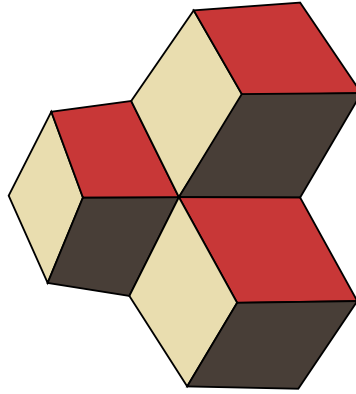


# Lineare Algebra 1



Dr. D. Adams

Institut für Mathematik und Naturwissenschaften (IMN)

[donat.adams@fhnw.ch](mailto:donat.adams@fhnw.ch)

Büro: 5.1C01

Zürich, 16. Februar 2024

<b>I</b>	<b>Vektoren</b>	<b>2</b>
1	Eliminationsverfahren I	3
2	Der Vektorraum	17
3	Darstellung der Gerade in $\mathbb{R}^2$	41
4	Trigonometrie	59
5	Skalarprodukt	96
6	Vektorprodukt	135
7	Ebenen in $\mathbb{R}^3$	154
<b>II</b>	<b>Lineare Algebra</b>	<b>192</b>
8	Lösungen von linearen Gleichungssystemen	193
9	Matrixalgebra	237
10	Lineare Abbildung	274
11	Matlab	296
12	Determinanten	303
13	Umkehrabbildung und inverse Matrix	344
14	RCL-Netzwerke mit Wechselstrom	383
<b>III</b>	<b>Komplexe Zahlen</b>	<b>404</b>
15	Komplexe Zahlen	405



**Teil I**  
**Vektoren**

1.1	Eliminationsverfahren von Gauss I . . . . .	3
1.2	Gleichungen lösen mit dem Gauss-Verfahren . . . . .	9
1.3	Übungen zu linear abhängigen Vektoren . . . . .	12
1.4	Übungen Gleichungssysteme lösen . . . . .	14

## 1.1 Eliminationsverfahren von Gauss I

### Definition Linearkombination

Eine **Linearkombination** der Objekte  $\{\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_N\}$  ist die Summe

$$x_1\vec{a}_1 + x_2\vec{a}_2 + \dots + x_N\vec{a}_N$$

mit  $x_i \in \mathbb{R}$

Die Linearkombination lässt sich auch mit dem Summenzeichen schreiben. Für  $N$  Vektoren schreiben wir

$$\sum_{i=1}^N x_i \vec{a}_i .$$

### Definition Lineare Abhängigkeit

Die Menge von Vektoren  $\{\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_N\}$  heisst **linear abhängig** genau dann, wenn die Gleichung

$$x_1\vec{a}_1 + x_2\vec{a}_2 + \dots + x_N\vec{a}_N = \vec{0}, \quad x_i \in \mathbb{R}$$

eine Lösung besitzt mit  $x_i \neq 0$  für mindestens einen der Koeffizienten.

[?, Bd. 1 II 2.4] [?, 3.3.2, p.429]

Bestimme Sie, ob die Vektoren  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  und  $\vec{c}$  linear abhängig sind.

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 1 \\ 5 \\ 1 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} 2 \\ 8 \\ 3 \end{pmatrix}, \vec{c} = \begin{pmatrix} 4 \\ 30 \\ -1 \end{pmatrix}$$

Falls ja: Geben Sie an, welche Linearkombination den Nullvektor ergibt.

**Lösung:**

Wir schreiben die Komponenten der Vektoren in eine Matrix, Zeile für Zeile:

$$\begin{array}{rcc} & x & y & z \\ \vec{a} & = & ( & 1 & 5 & 1) \\ \vec{b} & = & ( & 2 & 8 & 3) \\ \vec{c} & = & ( & 4 & 30 & -1) \end{array}$$

Die  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Komponenten stehen jetzt jeweils in einer Spalte untereinander. Indem wir nun die  $x$ -Komponente bei allen Vektoren eliminieren, entstehen zwei Vektoren, die schon keine  $x$ -Komponente haben (und deshalb etwas mehr dem gewünschten Endresultat  $\vec{0}$  gleichen):

$$\begin{array}{rcl} \vec{a} & = & (1 \quad 5 \quad 1) \\ \vec{b}' = \vec{b} - 2\vec{a} & = & (0 \quad -2 \quad 1) \\ \vec{c}' = \vec{c} - 4\vec{a} & = & (0 \quad 10 \quad -5) \end{array}$$

Mit den neuen Vektoren, führen wir das selbe Verfahren durch, um einen Vektor ohne  $y$ -Komponente zu erhalten:

$$\begin{array}{rcl} \vec{a} & = & (1 \quad 5 \quad 1) \\ \vec{b}' & = & (0 \quad -2 \quad 1) \\ \vec{c}'' = \vec{c}' + 5\vec{b}' & = & (0 \quad 0 \quad 0) \end{array}$$

D.h. es ist also gelungen  $\vec{0}$  als Linearkombination von  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  und  $\vec{c}$  darzustellen. Die Vektoren sind also linear abhängig.

Die Linearkombination ist

$$\vec{c}'' = \vec{c}' + 5\vec{b}' = (\vec{c} - 4\vec{a}) + 5(\vec{b} - 2\vec{a}) = -14\vec{a} + 5\vec{b} + \vec{c} = \vec{0} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Beachte, dass beim ersten Schritt, die erste Zeile nicht verändert wird. Beim zweiten Schritt wird die zweite Zeile nicht verändert.

**Infobox Vorgehen beim Gaussverfahren**

Bei jedem Schritt gilt: Die Zeile, die benutzt wird um in anderen Zeilen zu eliminieren, darf nicht verändert werden.

**Beispiel 1.2 Gauss-Eliminationsverfahren**

782891

Bestimme Sie, ob die Vektoren  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  und  $\vec{c}$  linear abhängig sind.

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 1 \\ 6 \\ 1 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} 2 \\ 14 \\ 1 \end{pmatrix}, \vec{c} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}$$

Falls ja: Geben Sie an, welche Linearkombination den Nullvektor ergibt.

**Lösung:**

Wir schreiben die Komponenten der Vektoren in eine Matrix, Zeile für Zeile:

$$\begin{aligned} \vec{a} &= (1 \quad 6 \quad 1) \\ \vec{b} &= (2 \quad 14 \quad 1) \\ \vec{c} &= (1 \quad 2 \quad 3) \end{aligned}$$

Die  $x$ -Komponenten eliminieren:

$$\begin{aligned} \vec{a} &= (1 \quad 6 \quad 1) \\ \vec{b}' = \vec{b} - 2\vec{a} &= (0 \quad 2 \quad -1) \\ \vec{c}' = \vec{c} - \vec{a} &= (0 \quad -4 \quad 2) \end{aligned}$$

$y$ -Komponente eliminieren:

$$\begin{aligned} \vec{a} &= (1 \quad 6 \quad 1) \\ \vec{b}' &= (0 \quad 2 \quad -1) \\ \vec{c}'' = \vec{c}' + 2\vec{b}' &= (0 \quad 0 \quad 0) \end{aligned}$$

D.h. es ist also gelungen  $\vec{0}$  als Linearkombination von  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  und  $\vec{c}$  darzustellen. Die Vektoren sind also linear abhängig.

Die Linearkombination ist

$$\vec{c}'' = \vec{c}' + 2\vec{b}' = (\vec{c} - \vec{a}) + 2(\vec{b} - 2\vec{a}) = -5\vec{a} + 2\vec{b} + \vec{c}$$

**Beispiel 1.3 Gauss-Eliminationsverfahren**

854654

Bestimme Sie, ob die Vektoren  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  und  $\vec{c}$  linear abhängig sind.

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 1 \\ 5 \\ 2 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} 3 \\ 16 \\ 1 \end{pmatrix}, \vec{c} = \begin{pmatrix} -1 \\ -7 \\ 9 \end{pmatrix}$$

Falls ja: Geben Sie an, welche Linearkombination den Nullvektor ergibt.

**Lösung:**

Wir schreiben die Komponenten der Vektoren in eine Matrix, Zeile für Zeile:

$$\begin{aligned}\vec{a} &= (1 \quad 5 \quad 2) \\ \vec{b} &= (3 \quad 16 \quad 1) \\ \vec{c} &= (-1 \quad -7 \quad 9)\end{aligned}$$

Die  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Komponenten stehen jetzt jeweils in einer Spalte untereinander. Indem wir nun die  $x$ -Komponente bei allen Vektoren eliminieren, entstehen zwei Vektoren, die schon keine  $x$ -Komponente haben (und deshalb etwas mehr dem gewünschten Endresultat  $\vec{0}$  gleichen):

$$\begin{aligned}\vec{a} &= (1 \quad 5 \quad 2) \\ \vec{b}' = \vec{b} - 3\vec{a} &= (0 \quad 1 \quad -5) \\ \vec{c}' = \vec{c} + \vec{a} &= (0 \quad -2 \quad 11)\end{aligned}$$

Mit den neuen Vektoren, führen wir das selbe Verfahren durch, um einen Vektor mit ohne  $y$ -Komponente zu erhalten:

$$\begin{aligned}\vec{a} &= (1 \quad 5 \quad 2) \\ \vec{b}' &= (0 \quad 1 \quad -5) \\ \vec{c}'' = \vec{c}' + 2\vec{b}' &= (0 \quad 0 \quad 1)\end{aligned}$$

Die  $z$ -Komponente des Vektors  $\vec{c}$  kann nicht mehr eliminiert werden. Die Vektoren sind also linear unabhängig.

## Kollineare und komplanare Vektoren

### Definition Kollinear

Zwei Vektoren  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$  sind **kollinear**, wenn es eine Zahl  $\lambda \in \mathbb{R}$  gibt, so dass  $\vec{a} = \lambda\vec{b}$ .

Sind zwei Vektoren kollinear so gilt auch

$$\vec{a} - \lambda\vec{b} = \vec{0}$$

Der Begriff kollinear fasst also die Begriffe **parallel**

$$\vec{a} = \lambda\vec{b}$$

und **antiparallel**

$$\vec{a} = -\lambda\vec{b}$$

mit  $\lambda > 0$  zusammen.

### Beispiel 1.4 Spezielle Lage von zwei Vektoren

014841

Untersuche, ob die Paare von Vektoren kollinear sind durch Addition von Vielfachen der Vektoren.



$$\text{a) } \vec{c} = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix}, \vec{d} = \begin{pmatrix} -12 \\ -12 \end{pmatrix}$$

$$\text{c) } \vec{g} = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ -4 \end{pmatrix}, \vec{h} = \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ 2 \end{pmatrix}$$

$$\text{b) } \vec{e} = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix}, \vec{f} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{d) } \vec{k} = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ -4 \end{pmatrix}, \vec{l} = \begin{pmatrix} 18 \\ 18 \\ -36 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

$$\text{a) } \vec{c} + \frac{1}{6}\vec{d} = \vec{0}$$

$$\text{b) } \vec{e} + 2\vec{f} = \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \end{pmatrix} \text{ also sind } \vec{e} \text{ und } \vec{f} \text{ nicht kollinear.}$$

$$\text{c) } \vec{g} + 2\vec{h} = \vec{0}$$

$$\text{d) } \vec{k} - \frac{1}{9} \cdot \vec{l} = \vec{0}$$

Nehmen wir die Gleichung  $\vec{c} + \frac{1}{6} \cdot \vec{d} = \vec{0}$ , dann gilt z.B. auch  $7 \cdot \vec{c} + 7 \cdot \frac{1}{6} \cdot \vec{d} = \vec{0}$  oder allgemein

$$x_1 \cdot \vec{c} + x_2 \cdot \vec{d} = \vec{0}$$

d.h. wir können *beide* Vektoren mit einer Vorzahl multiplizieren. Erhalten wir so den Null-Vektor, dann sind sie kollinear.

### Beispiel 1.5 Spezielle Lage von zwei Vektoren

429102

Untersuche ob die Paare von Vektoren kollinear sind (durch Addition von Vielfachen der Vektoren).

$$\text{a) } \vec{a} = \begin{pmatrix} 3 \\ 9 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} 4 \\ 12 \end{pmatrix}$$

$$\text{c) } \vec{e} = \begin{pmatrix} 7 \\ 2 \\ -1 \end{pmatrix}, \vec{f} = \begin{pmatrix} 3 \\ -3 \\ -5 \end{pmatrix}$$

$$\text{b) } \vec{c} = \begin{pmatrix} 5 \\ -15 \end{pmatrix}, \vec{d} = \begin{pmatrix} 3 \\ -9 \end{pmatrix}$$

$$\text{d) } \vec{g} = \begin{pmatrix} 4 \\ -12 \\ 8 \end{pmatrix}, \vec{h} = \begin{pmatrix} -3 \\ 9 \\ -6 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

$$1. \quad 4\vec{a} - 3\vec{b} = \vec{0}$$

$$2. \quad 3\vec{c} - 5\vec{d} = \vec{0}$$

$$3. \quad 3\vec{e} - 7\vec{f} = \begin{pmatrix} 21 - 21 \\ 6 + 21 \\ -3 + 35 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 27 \\ 32 \end{pmatrix}$$

$$4. \quad 3\vec{g} + 4\vec{h} = \vec{0}$$

Wir betrachten nun die spezielle Lage von drei Vektoren. Wie Fig. 1.1 zeigt, gilt für drei Vektoren, die in einer Ebene liegen

$$x_1\vec{a} + x_2\vec{b} + x_3\vec{c} = \vec{0}.$$

Beachte, dass in Fig. 1.1a) die Linearkombination

$$1\vec{a} + (-1)\vec{b} + 1\vec{c} = \vec{0}.$$

lautet. D.h. zufällig haben die Vektoren die richtige Länge, und wir müssen sie nur addieren und subtrahieren, damit wir wieder zur Ursprung gelangen.

Sind nun drei Vektoren ganz beliebig in einer Ebene, dann gehen wir so vor:

- i) Wir verschieben  $\vec{a}$  und  $\vec{c}$  in den Endpunkt von  $\vec{b}$  (Fig. 1.1 c).
- ii) Durch den Endpunkt von  $\vec{b}$  legen wir zwei Geraden (rot), die Parallel zu  $\vec{a}$  und  $\vec{c}$  liegen. Es entsteht ein Parallelogramm.
- iii) Wir strecken  $\vec{a}$  und  $\vec{c}$ , so dass sie die Länge der Kanten des Parallelogramms haben Fig. 1.1 c).

$$\vec{a}' = \vec{a} \cdot x_1 \quad \text{und} \quad \vec{c}' = \vec{c} \cdot x_3$$

- iv) Wir haben  $\vec{a}' - \vec{b} + \vec{c}' = \vec{0}$  Fig. 1.1 d).

Um also zu untersuchen, ob die Vektoren komplanar sind, wurden im Beispiel eine Linearkombinationen der Vektoren berechnet.

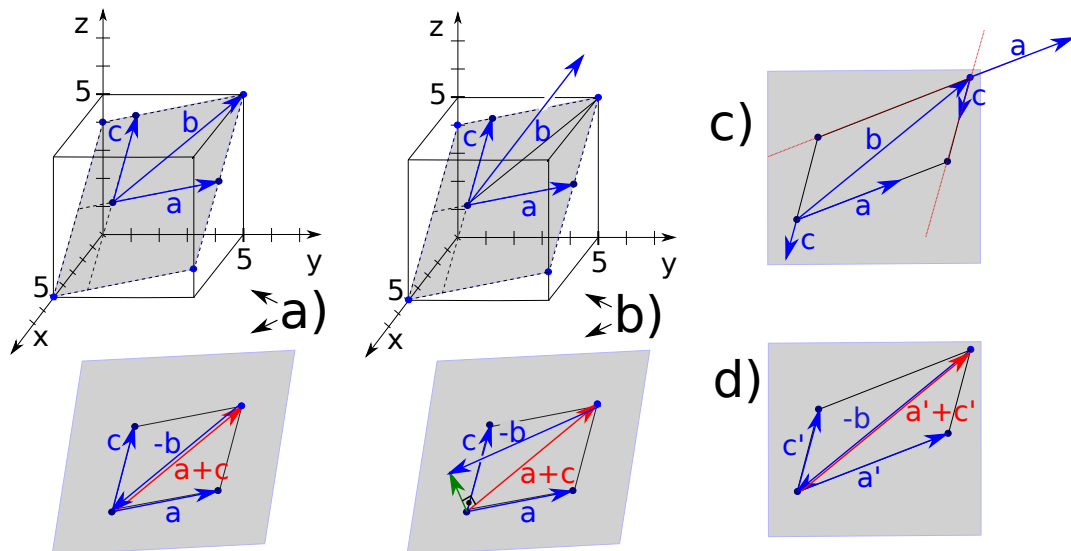


Abbildung 1.1: a) Drei Vektoren, die in einer Ebene liegen, lassen sich immer so addieren, dass der Nullvektor entsteht. b) Zwei Vektoren  $\vec{a}$  und  $\vec{c}$  definieren eine Ebene. Zeigt der Vektor  $\vec{b}$  aus dieser Ebene heraus, gibt es keine Linearkombination so dass  $x_1\vec{a} + x_2\vec{b} + x_3\vec{c} = \vec{0}$  (abgesehen von der Lösung  $x_1 = x_2 = x_3 = 0$ ).

### Definition Komplanar

Drei oder mehr Vektoren in  $\mathbb{R}^3$  sind komplanar, falls es eine Linearkombination

$$x_1\vec{a} + x_2\vec{b} + x_3\vec{c} = \vec{0}, \quad x_i \in \mathbb{R}$$

gibt mit  $x_i \neq 0$  für mindestens einen der Koeffizienten.

Nebenbei: Liegen die Vektoren  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  und  $\vec{c}$  nicht in einer Ebene, dann ist die einzige Möglichkeit um aus der Summe der Vektoren den Nullvektor zu bekommen wie folgt

$$0 \cdot \vec{a}_1 + 0 \cdot \vec{a}_2 + 0 \cdot \vec{a}_3 = \vec{0}$$

Wir merken uns also folgendes:

- Lineare Abhängigkeit ist die Verallgemeinerung der Begriffe “kollinear” und “komplanar” für beliebig viele Vektoren und beliebig viele Dimensionen.
- Um herauszufinden, ob Vektoren komplanar sind, wenden wir das Gauss-Eliminationsverfahren an.
- Linear abhängige Vektoren haben eine spezielle Lage zueinander. Zwei kollineare Vektoren sind linear abhängig, drei komplanare Vektoren sind linear abhängig.
- Die spezielle Lage erlaubt, dass man wieder zum Ursprung zurück gelang indem man sich strikt nur entlang der Vektoren bewegt.
- In 2 Dimensionen sind *mehr* als 2 Vektoren *immer* linear abhängig. In 3 Dimensionen sind mehr als 3 Vektoren *immer* linear abhängig usw.
- Linear unabhängige Vektoren haben keine spezielle Lage zueinander. Zwei linear unabhängige Vektoren spannen eine Fläche auf, drei linear unabhängige Vektoren spannen ein Volumen auf, vier linear unabhängige Vektoren spannen ein Hyper-Volumen auf.

## 1.2 Gleichungen lösen mit dem Gauss-Verfahren

### Definition Dreiecksform

Ein Gleichungssystem ist in Dreiecksform, falls die Koeffizienten unter der Diagonalen verschwinden (siehe Beispiele 1.6 und 1.7)

### Beispiel 1.6 Einsetzen in die Dreiecksform

15951

Lösen Sie das Gleichungssystem durch Einsetzen von unten nach oben.

$$\left| \begin{array}{rcl} x & +2y & +3z = 8 \\ & 2y & +4z = 14 \\ & & 5z = 10 \end{array} \right|$$

Lösung:

- In der letzten Zeile erhalten wir  $z = 2$ .
- Eingesetzt in die zweite Zeile ergibt dies

$$2y + 4 \cdot 2 = 14 \Rightarrow 2y = 6 \Rightarrow y = 3$$

- Schliesslich berechnen wir  $x$  mit der ersten Zeile:

$$x + 2 \cdot 3 + 3 \cdot 2 = 8 \Rightarrow x = -4$$

Die Lösung ist also  $\vec{u} = \begin{pmatrix} -4 \\ 3 \\ 2 \end{pmatrix}$ .

Wir sehen, dass die Dreiecksform eines Gleichungssystems den Vorteil hat, dass man von unten nach oben einsetzen kann. Deshalb ist es nützlich, Gleichungssysteme in diese Form zu bringen. Dies geschieht mit dem Gauss-Verfahren.

### Beispiel 1.7 Dreiecksform

712666

Bestimmen Sie für das vorliegende lineare Gleichungssystem die Dreiecksform mit dem Gaussverfahren. Lösen Sie dann das Gleichungssystem durch Einsetzen von unten nach oben.

$$\left| \begin{array}{ccc|c} x & +2y & +3z & = & 8 \\ -3x & -2y & -z & = & 4 \\ 4x & +2y & +5z & = & 0 \end{array} \right|$$

#### Lösung:

Wir benennen die Gleichungen  $L_1$ ,  $L_2$  und  $L_3$ . Wir eliminieren zuerst die  $x$ -Komponenten der Gleichungen  $L_2$  und  $L_3$  mit Hilfe von  $L_1$ :

$$\left[ \begin{array}{l} L'_1 = L_1 : x + 2y + 3z = 8 \\ L'_2 = L_2 + 3L_1 : 0 \quad 4y + 8z = 28 \\ L'_3 = L_3 - 4L_1 : 0 \quad -6y - 7z = -32 \end{array} \right]$$

Nun benutzen wir die Gleichung  $L'_2$  um noch die  $y$ -Komponente in der Gleichung  $L'_3$  zu eliminieren.

$$\left[ \begin{array}{l} L''_1 = L'_1 : x + 2y + 3z = 8 \\ L''_2 = L'_2 : 0 \quad 4y + 8z = 28 \\ L''_3 = 2L'_3 + 3L'_2 : 0 \quad 0 \quad 10z = 20 \end{array} \right]$$

Jetzt kann man von unten nach oben einsetzen und erhält die Lösung:

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} -4 \\ 3 \\ 2 \end{pmatrix}$$

**Beispiel 1.8 Einsetzen in die Dreiecksform**

25951

Lösen Sie das Gleichungssystem durch Einsetzen von unten nach oben.

$$\left| \begin{array}{rcl} 2x & -3y & +5z = 12 \\ & 5y & -z = 6 \\ & & 7z = 28 \end{array} \right|$$

**Lösung:**

- In der letzten Zeile erhalten wir  $z = 4$ .
- Eingesetzt in die zweite Zeile ergibt dies

$$5y - 4 = 6 \Rightarrow 5y = 10 \Rightarrow y = 2$$

- Schliesslich berechnen wir  $x$  mit der ersten Zeile:

$$2x - 3 \cdot 2 + 5 \cdot 4 = 12 \Rightarrow 2x = -2 \Rightarrow x = -1$$

Die Lösung ist also  $\vec{u} = \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \\ 4 \end{pmatrix}$ .

**Beispiel 1.9 Dreiecksform**

601555

Bestimmen Sie für das vorliegende lineare Gleichungssystem die Dreiecksform mit dem Gaussverfahren.

Löse dann das Gleichungssystem durch Einsetzen von unten nach oben.

$$\left| \begin{array}{rcl} 2x & -3y & +5z = 12 \\ 4x & -y & +9z = 30 \\ 8x & -2y & +25z = 88 \end{array} \right|$$

**Lösung:**

Eliminieren der  $x$ -Komponenten in den Gleichungen  $L_2$  und  $L_3$  mit Hilfe von  $L_1$

( $L_1$  bleibt unverändert):

$$\begin{bmatrix} L'_1 = L_1 : & 2x & -3y & +5z & = & 12 \\ L'_2 = L_2 - 2L_1 : & 0 & +5y & -z & = & 6 \\ L'_3 = L_3 - 4L_1 : & 0 & +10y & +5z & = & 40 \end{bmatrix}$$

Eliminieren der  $y$ -Komponente in der Gleichung  $L'_3$  mit Hilfe von  $L'_2$  ( $L'_2$  bleibt unverändert):

$$\begin{bmatrix} L''_1 = L'_1 : & 2x & -3y & +5z & = & 12 \\ L''_2 = L'_2 : & 0 & +5y & -z & = & 6 \\ L''_3 = L'_3 - 2L'_2 : & 0 & +0 & +7z & = & 28 \end{bmatrix}$$

Jetzt kann man von unten nach oben einsetzen und erhält die Lösung:

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \\ 4 \end{pmatrix}$$

### 1.3 Übungen zu linear abhängigen Vektoren

#### Beispiel 1.10 Kollinear

588716

Bestimmen Sie  $x, y$  und  $z$ , so dass  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$  kollinear sind.

a)  $\vec{a} = \begin{pmatrix} -3 \\ 1 \\ 8 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} x \\ -4 \\ z \end{pmatrix}$

c)  $\vec{a} = \begin{pmatrix} x \\ 7 \\ 5 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} -2 \\ y \\ 8 \end{pmatrix}$

b)  $\vec{a} = \begin{pmatrix} 6 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} -4 \\ y \\ z \end{pmatrix}$

d)  $\vec{a} = \begin{pmatrix} 4 \\ y \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} x \\ -9 \\ 1 \end{pmatrix}$

**Lösung:**

a)  $x = 12, z = -32$

c)  $x = -\frac{5}{4}, y = \frac{56}{5}$

b)  $y = 0, z = \frac{2}{3}$

d) keine Lösung

#### Beispiel 1.11 Kollinear/Parallel

745674

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 3 \\ -1 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} -4 \\ 5 \end{pmatrix}, \vec{c} = \begin{pmatrix} 0 \\ -2 \end{pmatrix}$$

a) Bestimme  $x$ , so dass  $\vec{d} = 2\vec{a} - \vec{b} + \frac{1}{2}\vec{c}$  und  $\vec{e} = \begin{pmatrix} x \\ -2 \end{pmatrix}$  kollinear sind.

b) Bestimme  $y$ , so dass  $\vec{f} = 3\vec{a} + 4\vec{b} - 2\vec{c}$  und  $\vec{e} = \begin{pmatrix} -4 \\ y \end{pmatrix}$  kollinear sind.

**Lösung:**

1.  $\vec{d} = \begin{pmatrix} 10 \\ -8 \end{pmatrix} \Rightarrow x = \frac{5}{2}$

2.  $\vec{f} = \begin{pmatrix} -7 \\ 21 \end{pmatrix} \Rightarrow y = 12$

**Beispiel 1.12 Kollinear**

036721

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 0 \\ -2 \\ 8 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} -1 \\ 3 \\ 2 \end{pmatrix}, \vec{c} = \begin{pmatrix} 3 \\ -5 \\ -3 \end{pmatrix} \text{ und } \vec{w} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ 2.5 \end{pmatrix}$$

Die Vektoren  $\vec{v} = \vec{a} - 2\vec{b} + 3\vec{c}$  und  $\vec{w}$  sollen kollinear sein. Bestimme  $x$  und  $y$ .

**Lösung:**

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} 11 \\ -23 \\ -5 \end{pmatrix} \Rightarrow x = -\frac{11}{2}, y = \frac{23}{2}$$

**Beispiel 1.13 Kollinear**

631401

Überprüfe, ob die Vektoren  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$  kollinear sind.

a)  $\vec{a} = \begin{pmatrix} 4 \\ -1 \\ 3 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} -12 \\ 3 \\ 9 \end{pmatrix}$

c)  $\vec{a} = \begin{pmatrix} 8 \\ -16 \\ 28 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} -18 \\ 36 \\ -63 \end{pmatrix}$

b)  $\vec{a} = \begin{pmatrix} 5 \\ 7 \\ -2 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} -2.5 \\ -3.5 \\ 1 \end{pmatrix}$

d)  $\vec{a} = \begin{pmatrix} 3 \\ -1 \\ -0.1 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} -2.25 \\ 0.75 \\ 0 \end{pmatrix}$

**Lösung:**

a) nicht kollinear

c) kollinear,  $-\frac{4}{9}\vec{b} = \vec{a}$

b) kollinear,  $-2\vec{b} = \vec{a}$

d) nicht kollinear

## 1.4 Übungen Gleichungssysteme lösen

**Beispiel 1.14 Lösen von LGS, Reihenfolge Gleichungen vertauschen FZJIRV**

Bestimmen Sie für das vorliegende lineare Gleichungssystem die Dreiecksform mit dem Gaussverfahren. Lösen Sie dann das Gleichungssystem durch Einsetzen von unten nach oben.

$$\begin{bmatrix} L_1: & -6x & 8y & 2z & = & 40 \\ L_2: & 12x & -16y & 2z & = & -32 \\ L_3: & 24x & -33y & -3z & = & -120 \end{bmatrix}$$

**Lösung:**

Wir eliminieren nun die  $x$ -Komponenten der Gleichungen  $L_2$  und  $L_3$  mit Hilfe von  $L_1$ :

$$\begin{bmatrix} L_1: & -6x & +8y & +2z & = & 40 \\ L'_2 = L_2 + 2L_1: & 0 & 0 & 6z & = & 48 \\ L'_3 = L_3 + 4L_1: & 0 & -y & +5z & = & 40 \end{bmatrix}$$

Wir können die Reihenfolge der Gleichungen ändern und erhalten die Dreiecksform:

$$\begin{bmatrix} L_1: & -6x & +8y & +2z & = & 40 \\ L''_2 = L'_3: & 0 & -y & +5z & = & 40 \\ L''_3 = L'_2: & 0 & 0 & 6z & = & 48 \end{bmatrix}$$

Einsetzen von unten nach oben ergibt

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} -4 \\ 0 \\ 8 \end{pmatrix}$$

**Beispiel 1.15 Gauss-Elimination, Vertauschen von Gleichungen F1NB3C**

Bestimmen Sie für das vorliegende lineare Gleichungssystem die Dreiecksform mit dem Gaussverfahren. Lösen Sie dann das Gleichungssystem durch Einsetzen von unten nach oben.

$$\begin{bmatrix} L_1: & -19x & 38y & -3z & = & 114 \\ L_2: & 15x & -22y & 7z & = & -82 \\ L_3: & x & -2y & 2z & = & -6 \end{bmatrix}$$

**Lösung:**

Wegen dem Koeffizienten 1 vor dem Term  $x$  bietet sich  $L_3$  bietet an für das Eliminieren. Wir stellen also um:

$$\begin{bmatrix} L'_1 = L_3: & x & -2y & 2z & = & -6 \\ L_2: & 15x & -22y & +7z & = & -82 \\ L'_3 = L_1: & -19x & +38y & -3z & = & 114 \end{bmatrix}$$



und eliminieren

$$\begin{bmatrix} L'_1 = L'_1 : & x & -2y & +2z & = & -6 \\ L'_2 = L_2 - 15L'_1 : & 0 & +8y & -23z & = & 8 \\ L''_3 = L'_3 + 19L'_1 : & 0 & +0 & +35z & = & 0 \end{bmatrix}$$

Einsetzen ergibt

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} -4 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

### Beispiel 1.16 Gauss-Elimination, Vertauschen/Skalieren von Gleichungen H7XS9Z

Bestimmen Sie für das vorliegende lineare Gleichungssystem die Dreiecksform mit dem Gaussverfahren. Lösen Sie dann das Gleichungssystem durch Einsetzen von unten nach oben.

$$\begin{bmatrix} L_1 : & 42x & +9y & +35z & = & 205 \\ L_2 : & 3x & & -6z & = & -3 \\ L_3 : & 14x & +6y & +22z & = & 92 \end{bmatrix}$$

**Lösung:**

Wir sehen, dass die zweite Gleichung einen Koeffizienten 1 vor dem Term  $x$  erhält, falls wir sie mit  $1/3$  multiplizieren. Also skalieren wir und stellen um:

$$\begin{bmatrix} L'_1 = L_2 \cdot \frac{1}{3} : & x & & -2z & = & -1 \\ L'_2 = L_1 : & 42x & +9y & +35z & = & 205 \\ L_3 : & 14x & +6y & +22z & = & 92 \end{bmatrix}$$

Jetzt können wir eliminieren:

$$\begin{bmatrix} L'_1 : & x & & -2z & = & -1 \\ L'_2 = L'_2 - 42L'_1 : & & 9y & +119z & = & 247 \\ L'_3 = L_3 - 14L'_1 : & & 6y & +50z & = & 106 \end{bmatrix}$$

und

$$\begin{bmatrix} L'_1 : & x & & -2z & = & -1 \\ L'_2 : & & 9y & +119z & = & 247 \\ L''_3 = 9L'_3 - 6L'_2 : & & & -264z & = & -528 \end{bmatrix}$$

Einsetzen ergibt

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}$$

### Beispiel 1.17 Konzepte

TZ8EV9

a)  $\vec{v}, \vec{w} \in \mathbb{R}^3$ . Wir finden  $5\vec{v} - 2\vec{w} = \vec{0}$ . Wählen Sie die richtigen Antworten aus:

- i)  $\vec{v}$  und  $\vec{w}$  sind parallel
  - ii)  $\vec{v}$  und  $\vec{w}$  sind antiparallel
  - iii)  $\vec{v}$  und  $\vec{w}$  sind komplanar
  - iv)  $\vec{v}$  und  $\vec{w}$  sind linear abhängig
- b)  $\vec{v}, \vec{w} \in \mathbb{R}^3$ . Wir finden  $3\vec{v} + 2\vec{w} = \vec{0}$ . Wählen Sie die richtigen Antworten aus:
- i)  $\vec{v}$  und  $\vec{w}$  sind parallel
  - ii)  $\vec{v}$  und  $\vec{w}$  sind antiparallel
  - iii)  $\vec{v}$  und  $\vec{w}$  sind komplanar
  - iv)  $\vec{v}$  und  $\vec{w}$  sind linear abhängig
- c)  $\vec{u}, \vec{v}, \vec{w} \in \mathbb{R}^3$ . Wir eliminieren die Komponenten mit dem Gaussverfahren, können aber die  $z$ -Komponente nicht eliminieren. Also sind die Vektoren
- i) linear abhängig
  - ii) linear unabhängig

**Lösung:**

- a) Korrekt sind i) und iv). i) und ii) schliessen sich aus, iii) ist falsch, weil nur 3 Vektoren oder mehr die Eigenschaft 'komplanar' haben können.
- b) Korrekt sind ii) und iv)
- c)  $\vec{u}, \vec{v}$  und  $\vec{w}$  sind *linear unabhängig*

**Lernziele Begriffe Vektoren**

- Die Studierenden kennen die komponentenweise Schreibweise von Vektoren sowie das Vorgehen bei der komponentenweise Addition. Sie können Gegenvektoren bestimmen und Vektoren mit einem Skalar multiplizieren.
- Sie können Ortsvektoren von allgemeinen Vektoren unterscheiden.
- Sie können die Norm (Länge) eines Vektors berechnen und einen Vektor normieren.
- Sie kennen die Definition eines Vektorraums. Sie kennen neben den Vektoren in der Geometrie mindestens zwei weitere Vektorräume.

**2.1 Vektoren in der Geometrie****Definition Ortsvektor**

Als Ortsvektor eines Punktes bezeichnet man einen Vektor, der vom Ursprung zu diesem Punkt zeigt.

$$\vec{OA}$$

Für Berechnungen in der Geometrie ist es praktisch die Notation abzukürzen. Wir stellen fest: Die Koordinaten eines Punktes  $A(2/4)$  entsprechen den Komponenten des Ortsvektors

$$\vec{OA} = \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \end{pmatrix}$$

in dieser Basis. Wir unterscheiden deshalb nicht zwischen Koordinaten eines Punktes  $A$  und Komponenten des Ortsvektors  $\vec{OA}$  dieses Punktes. Um die Komponenten des Ortsvektors eines Punktes anzugeben, führen wir noch folgende Kurzschreibweise ein:

### Infobox Ortsvektoren

Wir kürzen den Ortsvektor des Punktes  $A$  wie folgt ab:

$$\overrightarrow{OA} =: \vec{A}$$

Wir fassen zusammen: Wir bezeichnen Ortsvektoren mit Grossbuchstaben, z.B.  $\vec{A}, \vec{B}, \vec{C}, \dots$  und allgemeine Vektoren mit Kleinbuchstaben z.B.  $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}, \dots$ . Ortsvektoren sind an den Ursprung gebunden, deshalb können wir sie nicht verschieben. Allgemeine Vektoren hingegen können verschoben werden.

### Infobox Verbindungsvektor

In dieser Notation können wir für den Verbindungsvektor von  $\vec{A}$  zu  $\vec{B}$  schreiben:

$$\overrightarrow{AB} = \vec{B} - \vec{A}$$

Die Norm eines Vektors schreiben wir immer mit

$$\|\vec{a}\|$$

und seltener als  $a$ .

### Infobox Gesetze für die Norm

- Die Norm  $\|\vec{a}\|$  eines Vektors  $\vec{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ \dots \\ a_N \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^N$  ist (in einer Orthogonalbasis)

$$\|\vec{a}\| = \sqrt{(a_1)^2 + \dots + (a_N)^2}$$

- Die Norm eines Vektor wird in der Geometrie auch 'Länge' oder 'Betrag' genannt. Wir ziehen aber den Ausdruck 'Norm' vor.
- Für die Norm eines Vektor gilt immer

$$\|\lambda \cdot \vec{a}\| = |\lambda| \cdot \|\vec{a}\|$$

- Beachte, dass im Ausdruck oben die Striche bei  $|\lambda|$  eine andere Bedeutung haben als bei  $\|\vec{a}\|$ . Stehen die Striche links und rechts von einer *Zahl*, wird der Betrag berechnet z.B.  $|-2| = 2$ , stehen aber Doppelstrich links und rechts von einem Vektor, wird dessen Länge (Norm) berechnet z.B.

$$\left\| \begin{pmatrix} 5 \\ -12 \end{pmatrix} \right\| \neq \begin{pmatrix} 5 \\ 12 \end{pmatrix} \text{ sondern } \left\| \begin{pmatrix} 5 \\ -12 \end{pmatrix} \right\| = 13.$$

### Beispiel 2.1 Mittelpunkt

I9QK6H

$$\vec{P} = \begin{pmatrix} -3 \\ 2 \end{pmatrix}, \vec{Q} = \begin{pmatrix} 9 \\ -3 \end{pmatrix}$$

- a) Bestimmen Sie die Länge der Strecke  $\overrightarrow{PQ}$
- b) Erstellen Sie eine Skizze und berechnen Sie die Koordinaten des Mittelpunktes  $\vec{M}$  der Strecke  $\overline{PQ}$

**Lösung:**

a)  $|\overrightarrow{PQ}| = 13$

- b) Aus der Skizze entnehmen wir, dass  $\vec{M} = \vec{P} + \frac{1}{2} \cdot \overrightarrow{PQ}$ . Wir können dies vereinfachen zu

$$\vec{M} = \vec{P} + \frac{1}{2} \cdot (\vec{Q} - \vec{P}) = \frac{1}{2} \cdot (\vec{Q} + \vec{P}) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 6 \\ -1 \end{pmatrix}$$

### Beispiel 2.2 Schwerpunkt eines Dreiecks

6JL1WJ

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} -3 \\ 2 \end{pmatrix}, \vec{B} = \begin{pmatrix} 4 \\ -3 \end{pmatrix}, \vec{C} = \begin{pmatrix} 14 \\ -3 \end{pmatrix}$$

Wir betrachten das Dreieck ABC.

- a) Berechnen Sie den Mittelpunkt  $\vec{M}$  der Kante c.
- b) Berechnen Sie den Verbindungsvektor  $\overrightarrow{CM}$ . Was sind die Koordinaten des Schwerpunktes?
- c) Geben den Schwerpunkt eines allgemeinen Dreiecks ABC an mit Hilfe der Koordinaten der Eckpunkte  $\vec{A}$ ,  $\vec{B}$ ,  $\vec{C}$  (d.h. ohne Koordinaten rechnen).
- d) Überprüfen Sie Ihren Ausdruck, indem Sie in den allgemeinen Ausdruck die Koordinaten von oben einsetzen und mit dem Resultat aus Teilaufgabe c) vergleichen.

**Lösung:**

a)  $\vec{M} = \frac{1}{2} \cdot (\vec{A} + \vec{B}) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$

b)  $\vec{s} = \overrightarrow{CM} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -27 \\ 5 \end{pmatrix}$ . Der Schwerpunkt liegt bei

$$\vec{S} = \vec{C} + \frac{2}{3} \cdot \vec{s} = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} 15 \\ -4 \end{pmatrix}$$

c) Wir gehen die Rechnung oben Schritt für Schritt durch

$$\begin{aligned}\vec{s} &= \vec{C} + \frac{2}{3} \cdot \vec{s} \\ &= \vec{C} + \frac{2}{3} \cdot (\vec{M} - \vec{C}) \\ &= \frac{1}{3} \cdot \vec{C} + \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{2} \cdot (\vec{A} + \vec{B}) \\ &= \frac{1}{3} \cdot (\vec{A} + \vec{B} + \vec{C})\end{aligned}$$

d) Überprüfung des allgemeinen Ausdrucks:

$$\frac{1}{3} \cdot (\vec{A} + \vec{B} + \vec{C}) = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} 15 \\ -4 \end{pmatrix}$$

### Beispiel 2.3 Quadrat

FNIOZ

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} 8 \\ 2 \end{pmatrix}, \vec{B} = \begin{pmatrix} 4 \\ 4 \end{pmatrix}, \vec{C} = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{D} = \begin{pmatrix} 6 \\ -2 \end{pmatrix}$$

- Bestimmen Sie die Länge der Seiten.
- Bestimmen Sie die Mittelpunkte der Seiten.
- Bestimmen Sie den Mittelpunkt des Quadrats.

**Lösung:**

a) Seite a:

$$\vec{a} = \vec{B} - \vec{A} = \begin{pmatrix} -4 \\ 2 \end{pmatrix} \quad |\vec{a}| = 4.47$$

b) Die Seitenmittelpunkte liegen bei

$$\vec{M}_a = \frac{1}{2} (\vec{A} + \vec{B}) = \begin{pmatrix} 6 \\ 3 \end{pmatrix}, \vec{M}_b = \frac{1}{2} (\vec{B} + \vec{C}) = \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \end{pmatrix}$$

$$\vec{M}_c = \frac{1}{2} (\vec{C} + \vec{D}) = \begin{pmatrix} 4 \\ -1 \end{pmatrix}, \vec{M}_d = \frac{1}{2} (\vec{D} + \vec{A}) = \begin{pmatrix} 7 \\ 0 \end{pmatrix}$$

c) Der Mittelpunkt des Quadrats liegt auf der Mitte der Diagonalen:

$$\vec{S} = \frac{1}{2} (\vec{A} + \vec{C}) = \begin{pmatrix} 5 \\ 1 \end{pmatrix}$$

## **2.2 Komponentenweise Notation Hintergrund**

---

Wie wir später sehen werden, benutzt man in der Anwendungen meist eine komponentenweise Notation, d.h. man betreibt Mathematik mit den Komponenten. Bei dieser Notation sind folgende Regeln wichtig:

### Infobox Gesetze für die komponentenweise Notation von Vektoren

Betrachte  $\vec{v} = \begin{pmatrix} -3 \\ 1 \end{pmatrix}$  und  $\vec{w} = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix}$ :

- Die Vektoren werden addiert, indem man die Komponenten addiert.

$$\vec{v} + \vec{w} = \begin{pmatrix} -3 + 2 \\ 1 + 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ 3 \end{pmatrix}$$

- Die Addition ist kommutativ:  $\vec{v} + \vec{w} = \vec{w} + \vec{v}$
- Das neutrale Element der Addition ist

$$\vec{0} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

Wir nennen diesen Vektor den Nullvektor. Es erfüllt die Eigenschaft  $\vec{v} + \vec{0} = \vec{v}$

- Komponentenweise Multiplikation mit einer Zahl:

$$\lambda \cdot \vec{a} = \begin{pmatrix} \lambda \cdot a_1 \\ \vdots \\ \lambda \cdot a_N \end{pmatrix} \quad \text{z.B. } 3\vec{v} = \begin{pmatrix} 3 \cdot (-3) \\ 3 \cdot 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -9 \\ 3 \end{pmatrix}$$

- Der Gegenvektor zu  $\vec{w}$  ist  $-\vec{w}$ . Wir berechnen ihn, indem wir alle Komponenten mit  $(-1)$  multiplizieren:

$$-\vec{w} = (-1) \cdot \vec{w} = \begin{pmatrix} -2 \\ -2 \end{pmatrix}$$

- Wir benutzen für Vektor die Spaltenform

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$$

und seltener die Zeilenform  $\vec{a} = (a_1, a_2)$

[?, 11.1,p.204]

- Vektoren sind gleich, wenn sie in allen Komponenten übereinstimmen. In  $\mathbb{R}^2$ :

$$\vec{a} = \vec{b} \quad \text{oder} \quad \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix}$$

Das Gleichheitszeichen gilt nur, falls  $a_1 = b_1$  und  $a_2 = b_2$ .

[?, 11.1,p.204]

Traditionell werden in der analytischen Geometrie folgende Begriffe auseinander gehalten:



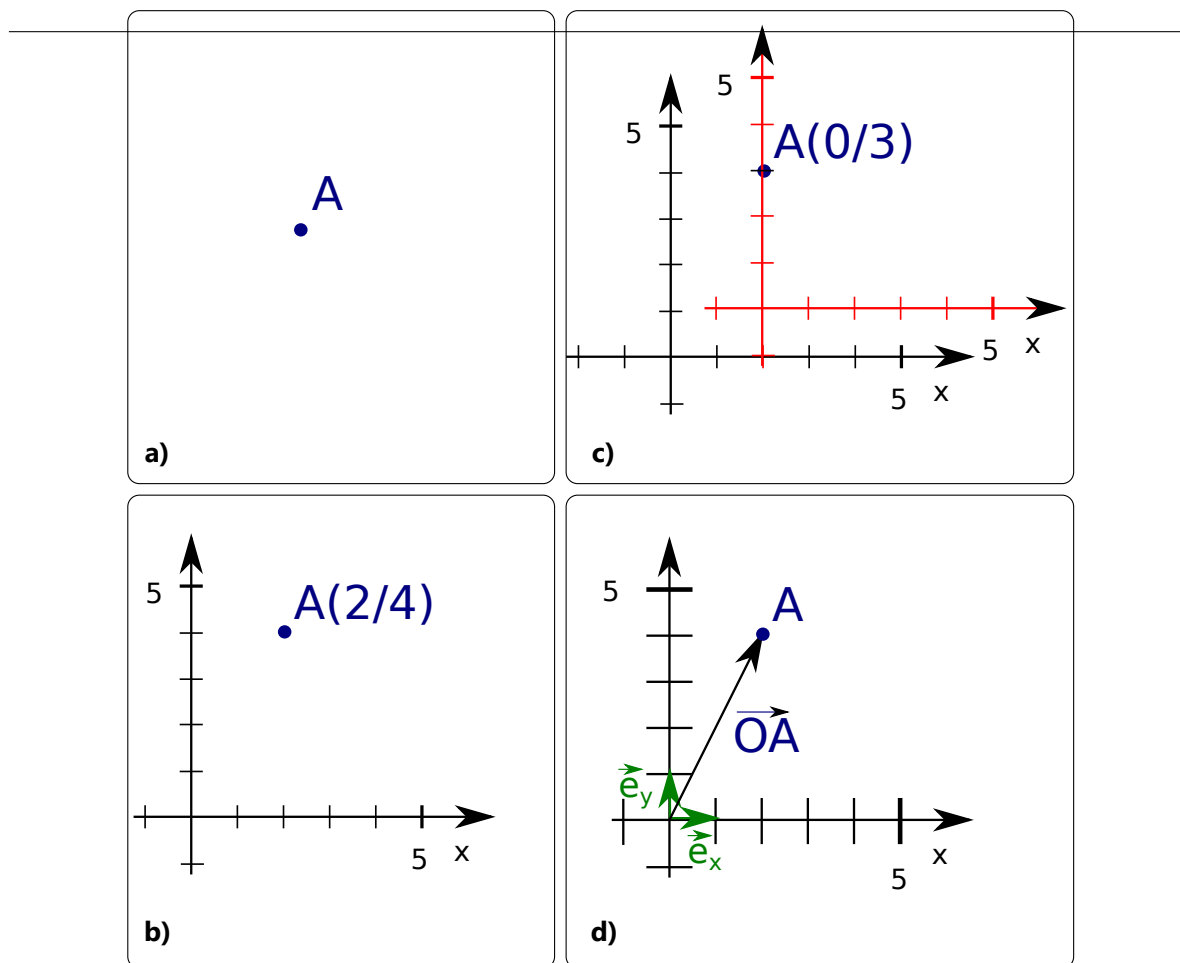


Abbildung 2.1: Traditionelle Darstellung eines Punktes (a) und der Koordinaten des Punktes (b). (c) Die Koordinaten eines Punktes sind nicht eindeutig. Sie hängen von der Wahl des Koordinatensystems ab. (d) Der Ortsvektor ist ein Vektor der vom Ursprung zum Punkt  $A$  geht.

- **Punkt**,  $A$ .<sup>1</sup> In Abbildung 2.1 a) wird der Punkt mit einer kleinen Scheibe dargestellt, der einen Durchmesser hat, wenn auch einen kleinen. D.h. jede Darstellung eines Punktes (hier die Scheibe), ist selber kein Punkt. Ein Punkt kann nur gedacht werden. Würde man ihn zeichnen, wie er gedacht ist — nämlich unendlich klein — wäre er unsichtbar.
- **Koordinaten eines Punktes**,  $A(2/4)$ . In Abb. 2.1 b) wird gezeigt, dass wir ein Koordinatensystem einzeichnen können und dann die Koordinaten auslesen können.  
Die Koordinaten eines Punktes sind aber nicht eindeutig. In Abb. 2.1 c) sehen wir, dass die Koordinaten entweder  $A(2/4)$  lauten (schwarzes Koordinatensystem), oder  $A(0/3)$  (rotes Koordinatensystem).

<sup>1</sup>Ein Punkt (als Raumpunkt) ist ein grundlegendes Element der Geometrie. Anschaulich stellt man sich darunter ein Objekt ohne jede Ausdehnung vor. Der griechische Mathematiker Euklid bezeichnet um 300 v. Chr. in seinem Werk 'Die Elemente' in der ersten Definition den Punkt als "etwas, das keine Teile hat" und verwendet die Bezeichnung semeion. Nach [https://de.wikipedia.org/wiki/Punkt\\_\(Geometrie\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Punkt_(Geometrie)).

- **Ortsvektor eines Punktes**,  $\vec{OA} = \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \end{pmatrix}$ . In Abb. 2.1 d) wird gezeigt, dass damit der Vektor gemeint ist, der vom Ursprung zum Punkt  $A$  läuft.
- ein **allgemeiner Vektor**  $\vec{a} = \begin{pmatrix} 3 \\ -5 \end{pmatrix}$ .

Anders ausgedrückt: Wir setzen den Vektor mit seinen Komponenten gleich. Das ist sinnvoll, denn oft interessieren wir uns ausschliesslich für die Komponenten eines Vektors.

Alle Vektoren können zerlegt werden in Vektoren, die parallel zu den Basisvektoren des Koordinatensystems stehen  $\vec{e}_x, \vec{e}_y$ . Oft wird folgende Kurzschreibweise benutzt: Da die Basis oft klar ist und sich nicht ändert, wird sie 'dazugedacht'. D.h. statt  $\vec{a} = 3 \cdot \vec{e}_x - 5 \cdot \vec{e}_y$  schreiben wird

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 3 \\ -5 \end{pmatrix}$$

oder

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \end{pmatrix} \text{ für } \vec{A} = 2 \cdot \vec{e}_x + 4 \cdot \vec{e}_y.$$

## 2.3 Der Vektorraum oder: Was ist überhaupt ein Vektor?

### Definition Vektorraum

Ein Vektorraum über  $\mathbb{R}$  ist eine Menge  $V$  mit einer Addition  $+: V \times V \mapsto V$  und einer skalaren Multiplikation  $\cdot: \mathbb{R} \times V \mapsto V$ . Seien  $\vec{v}, \vec{w}$  beliebige Elemente aus  $V$  und  $a, b \in \mathbb{R}$ , dann muss gelten:

- $\vec{v} + \vec{w}$  und  $a \cdot \vec{v}$  liegen ebenfalls in  $V$  (Abgeschlossenheit).
- Es gibt ein Element  $\vec{0}$  (das **neutrale Element der Addition**), das folgendes erfüllt:
 
$$\vec{v} + \vec{0} = \vec{v}$$
- Zu jedem  $\vec{v}$  gibt es einen **Gegenvektor**<sup>a</sup>  $-\vec{v}$ , so dass
 
$$\vec{v} + (-\vec{v}) = \vec{0}$$
- Die Addition ist kommutativ:  $\vec{v} + \vec{w} = \vec{w} + \vec{v}$
- Die skalare Multiplikation ist assoziativ:  $a \cdot (b \cdot \vec{v}) = (a \cdot b) \cdot \vec{v}$
- Die skalare Multiplikation ist distributiv:  $a \cdot (\vec{v} + \vec{w}) = a \cdot \vec{v} + a \cdot \vec{w}$  und  $(a + b) \cdot \vec{v} = a \cdot \vec{v} + b \cdot \vec{v}$
- Das neutrale Element (1) der Multiplikation in  $\mathbb{R}$  ist auch in  $V$  ein neutrales Element  $1 \cdot \vec{v} = \vec{v}$ .

<sup>a</sup>man spricht auch vom Inversen von  $\vec{v}$

### Infobox Vektorraum Gegenbeweis

- Eine Menge, die  $\vec{0}$  nicht enthält, ist kein Vektorraum.
- Wenn wir vermuten, dass  $V$  kein Vektorraum ist, suchen wir ein Beispiel wo  $\lambda \cdot \vec{v} \notin V$  oder  $\vec{v} + \vec{w} \notin V$ .

### Beispiel 2.4 Die Gerade in $\mathbb{R}^2$

ACDB18

Zeige, dass die Punkte auf der Geraden  $g$ , ( $s \in \mathbb{R}$ ):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \end{pmatrix} \cdot s$$

einen Vektorraum bildet. Betrachte nur die Abgeschlossenheit mit der Addition und der Multiplikation.

**Lösung:**

Abgeschlossenheit mit der Addition:

$$\begin{pmatrix} 2s \\ -1s \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2t \\ -1t \end{pmatrix} = (s+t) \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \end{pmatrix}$$

Wir erhalten einen Koeffizienten  $s+t \in \mathbb{R}$  und eine Richtung  $(2, -1)$ . Deshalb liegt auch jede Summe von zwei Punkten in der Grundmenge, d.h. auf der Geraden. Abgeschlossenheit mit der Multiplikation :

$$\lambda \begin{pmatrix} 2s \\ -1s \end{pmatrix} = (\lambda \cdot s) \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \end{pmatrix}$$

Wir erhalten einen Koeffizienten  $\lambda \cdot s \in \mathbb{R}$  eine Richtung  $(2, -1)$ . Deshalb liegt auch jedes Vielfache eines Punktes in der Grundmenge, d.h. auf der Geraden. Deshalb ist gegebene Menge ein Vektorraum.

### Beispiel 2.5 Ein Punkt in $\mathbb{R}^2$

234208

Zeige, dass der Punkt :

$$\vec{P} = \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \end{pmatrix}$$

keinen Vektorraum bildet. Betrachte nur die Abgeschlossenheit mit der Addition und der Multiplikation.

**Lösung:**

Abgeschlossenheit mit der Addition:

$$\vec{P} + \vec{P} = \begin{pmatrix} 4 \\ -2 \end{pmatrix}$$

oder mit der Multiplikation

$$0 \cdot \vec{P} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \neq \vec{P}$$

Das sind keine Elemente der Grundmenge. Deshalb ist die gegebene Menge kein Vektorraum. Übrigens: Für den Beweis, dass die Menge nicht abgeschlossen ist genügt eine der beiden Zeilen.

### Definition Unterraum

Eine Teilmenge  $U \subseteq V$  eines Vektorraums nennt man Unterraum, falls für alle  $\vec{u} \in U$  und  $\vec{u}' \in U$

$$\begin{aligned} \vec{u} + \vec{u}' &\in U \\ a \cdot \vec{u} &\in U \end{aligned}$$

Dabei ist  $a \in \mathbb{R}$  eine reelle Zahl.

### Infobox Unterräume in $\mathbb{R}^N$

Typische Unterräume in  $\mathbb{R}^N$  sind Geraden und Ebenen, die  $\vec{0}$  beinhalten. Sie gehen durch den Ursprung.

### Beispiel 2.6 Ausgabenvektor für die Ferien I

3ZEM2R

$$\text{Anna: } \vec{A} = \begin{pmatrix} 120 \\ 150 \end{pmatrix}, \text{ Bea: } \vec{B} = \begin{pmatrix} 130 \\ 170 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{Flug} \\ \text{Hotel} \end{array}$$

Anna und Beat machen Urlaub. Ihre Ausgaben erfassen sie in einer Liste. Diese Liste ist ein Vektor aus  $\mathbb{R}^2$ . Die erste Koordinaten gibt die Ausgaben (in CHF) für den Flug an, die zweite die Ausgaben für das Hotel. Berechnen Sie den Vektor der angibt

- wie viel beide zusammen für Flug und Hotel ausgegeben haben.
- um wie viel Beat für Flug bzw. Hotel mehr ausgegeben hat als Anna.

#### Lösung:

Alle Angaben in CHF

- Ausgaben beide zusammen

$$\vec{A} + \vec{B} = \begin{pmatrix} 250 \\ 370 \end{pmatrix}$$

- Differenz der Ausgaben

$$\vec{B} - \vec{A} = \begin{pmatrix} 10 \\ 20 \end{pmatrix}$$

## 2.4 Übungen: Komponentenweise Notation

### Beispiel 2.7 Gesetze für die Addition

SYOXAE

Ordnen Sie die Namen den Gesetzen zu: Gesetz vom inversen Element, Gesetz vom neutralen Element, Kommutativgesetz der Addition, Assoziativgesetz der Addition.

- a)  $\vec{A} + \vec{B} = \vec{B} + \vec{A}$
- b)  $(\vec{A} + \vec{B}) + \vec{C} = \vec{A} + (\vec{B} + \vec{C})$
- c)  $\vec{A} + \vec{0} = \vec{A}$
- d)  $\vec{A} + (-\vec{A}) = \vec{0}$

**Lösung:**

- a) Kommutativgesetz der Addition
- b) Assoziativgesetz der Addition
- c) Gesetz vom neutralen Element der Addition
- d) Gesetz vom inversen Element der Addition

### Beispiel 2.8 Gesetze für die Multiplikation

60FTC8

Ordnen Sie die Namen den Gesetzen zu: Gesetz vom neutralen Element, Distributivgesetz, Assoziativgesetz.

- a)  $r \cdot (\vec{A} + \vec{B}) = r \cdot \vec{A} + r \cdot \vec{B}$
- b)  $(r + s) \cdot \vec{A} = r \cdot \vec{A} + s \cdot \vec{A}$
- c)  $(r \cdot s) \cdot \vec{A} = r \cdot (s \cdot \vec{A})$
- d)  $1 \cdot \vec{A} = \vec{A}$

**Lösung:**

- a) Distributiv-Gesetz
- b) Distributiv-Gesetz
- c) Assoziativgesetz der Addition der Multiplikation mit einer Zahl
- d) Gesetz vom neutralen Element der Multiplikation

**Beispiel 2.9 Rechnen mit Vektoren I**

GD49V9

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix}, \vec{B} = \begin{pmatrix} 6 \\ -1 \end{pmatrix}, \vec{C} = \begin{pmatrix} -4 \\ 3 \end{pmatrix}, \vec{D} = \begin{pmatrix} -2 \\ -5 \end{pmatrix}$$

Berechne die Komponenten der folgenden Vektoren:

- |  |  |
|--|--|
| a) $\vec{A} + \vec{B}$                     | e) $2 \cdot \vec{A}$                                       |
| b) $\vec{C} - \vec{B}$                     | f) $(-1) \cdot \vec{B}$                                    |
| c) $\vec{A} - \vec{B} + \vec{C}$           | g) $7 \cdot \vec{A} - 2 \cdot \vec{B} + 2 \cdot \vec{C}$   |
| d) $\vec{A} + \vec{B} - \vec{C} - \vec{D}$ | h) $\frac{7}{2} \cdot \vec{A} + \frac{1}{3} \cdot \vec{D}$ |

**Lösung:**

- |  |   |
|--|---|
| a) $\vec{A} + \vec{B} = \begin{pmatrix} 8 \\ 2 \end{pmatrix}$                      | e) $2 \cdot \vec{A} = \begin{pmatrix} 4 \\ 6 \end{pmatrix}$   |
| b) $\vec{C} - \vec{B} = \begin{pmatrix} -10 \\ 4 \end{pmatrix}$                    | f) $(-1) \cdot \vec{B} = \begin{pmatrix} -6 \\ 1 \end{pmatrix}$   |
| c) $\vec{A} - \vec{B} + \vec{C} = \begin{pmatrix} -8 \\ 7 \end{pmatrix}$           | g) $7 \cdot \vec{A} - 2 \cdot \vec{B} + 2 \cdot \vec{C} = \begin{pmatrix} -6 \\ 29 \end{pmatrix}$                     |
| d) $\vec{A} + \vec{B} - \vec{C} - \vec{D} = \begin{pmatrix} 14 \\ 4 \end{pmatrix}$ | h) $\frac{7}{2} \cdot \vec{A} + \frac{1}{3} \cdot \vec{D} = \frac{1}{6} \cdot \begin{pmatrix} 38 \\ 53 \end{pmatrix}$ |

**Beispiel 2.10 Diagonalen in Rechteck**

YWC8BB

- Berechnen Sie die Länge der Diagonalen (Seitenlängen  $x = 8$  cm und  $y = 15$  cm).
- Berechnen Sie die Länge des Pfeils  $\vec{c}$ .
- Wir betrachten nun ein Rechteck mit Seitenlängen  $x = 5 \cdot 8$  cm und  $y = 5 \cdot 15$  cm. Wie lange ist die Diagonale?
- Wie lange ist die Diagonale in einem Rechteck Seitenlänge  $x$  Zentimeter und  $y$  Zentimeter?
- Wie lange ist die Diagonale in einem Rechteck der Seitenlänge  $\lambda \cdot x$  Zentimeter und  $\lambda \cdot y$  Zentimeter?

**Lösung:**

b) wie a): Mit dem Satz von Pythagoras berechnen wir

$$\|\vec{c}\| = \sqrt{x^2 + x^2} = 17$$

c) Die Diagonale ist 5 mal länger, also

$$\|5\vec{c}\| = |5| \cdot \|\vec{c}\| = 5 \cdot 17$$

d) Wir haben ein allgemeines Resultat gefunden. Die Überlegung mit der Diagonalen funktioniert immer, egal wie lange die Kanten sind. Also

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

e) Auch hier können wir das Resultat von oben auf den allgemeinen Fall übertragen.

$$\|\vec{d}\| = \lambda \cdot \|\vec{c}\|$$

### Beispiel 2.11 Gesetze bei der komponentenweise Notation von Vektoren 490953

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \vec{w} = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix}$$

Bestimme für die angegebenen Vektoren die Komponenten. Benutze wann immer möglich die oben angegebenen Gesetze.

- a) Gib den Nullvektor in  $\mathbb{R}^5$  an.                      d)  $-\vec{v}$   
b)  $\vec{v} + \vec{w}$     e)  $\|\vec{v}\|$   
c)  $5\vec{v}$ ,  $5\vec{w}$  und  $5 \cdot (\vec{v} + \vec{w})$                       f)  $\|\vec{v} \cdot 5\|$

**Lösung:**

a)  $\vec{0} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$

$$\text{b) } \vec{v} + \vec{w} = \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$\text{c) } 5\vec{v} = \begin{pmatrix} 5 \\ 0 \\ -5 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix}$$

$$5\vec{w} = \begin{pmatrix} 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad 5 \cdot (\vec{v} + \vec{w}) = 5 \cdot \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 15 \\ 10 \\ 5 \\ 10 \\ 15 \end{pmatrix}$$

$$\text{d) } -\vec{v} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}$$

$$\text{e) } \|\vec{v}\| = \sqrt{(-1)^2 + 0^2 + 1^2 + 0^2 + (-1)^2} = \sqrt{3}$$

f)  $\|\vec{v} \cdot 5\| = \sqrt{3} \cdot 5$ . Hier kommt das Gesetz für die Norm zum Zug (einfacher). Es könnte aber auch explizit nachgerechnet werden, dass

$$\sqrt{(5)^2 + 0^2 + (-5)^2 + 0^2 + (5)^2} = \sqrt{5^2 \cdot 3} = 5\sqrt{3}$$

### Beispiel 2.12 Parallelogramm

DDBD9S

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}, \vec{B} = \begin{pmatrix} 3 \\ -2 \end{pmatrix}, \vec{C} = \begin{pmatrix} 2.25 \\ -1.3 \end{pmatrix}, \vec{D} = \begin{pmatrix} 0.25 \\ 2.7 \end{pmatrix}$$

Sind die Punkte die aufeinanderfolgenden Ecken eines Parallelogramms ABCD?

a) Lösen Sie die Aufgabe, indem Sie Verbindungsvektoren der Punkte berechnen.

b) Lösen Sie die Aufgabe, indem Sie Seitenlängen berechnen.

**Lösung:**

a) Die Verbindungsvektoren sind

$$\overrightarrow{AB} = \begin{pmatrix} 2 \\ -4 \end{pmatrix}, \overrightarrow{BC} = \begin{pmatrix} -0.75 \\ 0.7 \end{pmatrix}, \overrightarrow{CD} = \begin{pmatrix} -2 \\ 4 \end{pmatrix}, \overrightarrow{DA} = \begin{pmatrix} 0.75 \\ -0.7 \end{pmatrix}$$



Die gegenüberliegenden Seiten verlaufen parallel, denn

$$\vec{AB} = (-1) \cdot \vec{CD} \text{ und } \vec{BC} = (-1) \cdot \vec{DA}$$

b) Seitenlängen:

$$\|\vec{AB}\| = 4.47214, \|\vec{BC}\| = 1.02591, \|\vec{CD}\| = 4.47214, \|\vec{DA}\| = 1.02591$$

Wir haben also ein Viereck, weil jeweils zwei gegenüberliegende Seiten gleich lang sind. Es handelt sich um ein Parallelogramm.

### Beispiel 2.13 Parallelogramm II

LJY3HS

Überprüfen Sie, ob das Viereck ABCD ein Parallelogramm ist.

a)

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} -2 \\ 2 \end{pmatrix}, \vec{B} = \begin{pmatrix} 5 \\ 5 \end{pmatrix}, \vec{C} = \begin{pmatrix} 9 \\ 6 \end{pmatrix}, \vec{D} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix}$$

b)

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{B} = \begin{pmatrix} 4 \\ 4 \end{pmatrix}, \vec{C} = \begin{pmatrix} 11 \\ 7 \end{pmatrix}, \vec{D} = \begin{pmatrix} 9 \\ 3 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

Wir berechnen die Verbindungsvektoren von einer Ecke jeweils zu nächsten:

a)

$$\vec{AB} = \begin{pmatrix} 7 \\ 3 \end{pmatrix}, \vec{BC} = \begin{pmatrix} 4 \\ 1 \end{pmatrix}, \vec{CD} = \begin{pmatrix} -7 \\ -3 \end{pmatrix}, \vec{DA} = \begin{pmatrix} -4 \\ -1 \end{pmatrix}$$

Gegenüberliegende Seiten sind parallel und gleich lang. Es ist ein Parallelogramm.

b)

$$\vec{AB} = \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \end{pmatrix}, \vec{BC} = \begin{pmatrix} 7 \\ 3 \end{pmatrix}, \vec{CD} = \begin{pmatrix} -2 \\ -4 \end{pmatrix}, \vec{DA} = \begin{pmatrix} -7 \\ -3 \end{pmatrix}$$

Gegenüberliegende Seiten sind parallel und gleich lang. Es ist ein Parallelogramm.

### Beispiel 2.14 Parallelogramm III

NI9G3B

Ergänzen Sie die Punkte zu einem Parallelogramm ABCD.

a)

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} 21 \\ -11 \end{pmatrix}, \vec{B} = \begin{pmatrix} 3 \\ 7 \end{pmatrix}, \vec{C} = \begin{pmatrix} 0 \\ 4 \end{pmatrix}$$

b)

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} -75 \\ 199 \end{pmatrix}, \vec{B} = \begin{pmatrix} 35 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{C} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

a) Wir erstellen eine kleine Skizze und sehen darin

$$\vec{D} = \vec{A} + \vec{BC} = \begin{pmatrix} 18 \\ -14 \end{pmatrix}$$

b)

$$\vec{D} = \vec{A} + \vec{BC} = \begin{pmatrix} -109 \\ 201 \end{pmatrix}$$

### Beispiel 2.15 Gleichschenklige Dreiecke

5CE2XT

Handelt es sich bei ABC um gleichschenklige Dreiecke. Wenn ja, berechnen Sie den Flächeninhalt des Dreiecks.

a)

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} 1 \\ -5 \end{pmatrix}, \vec{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \end{pmatrix}, \vec{C} = \begin{pmatrix} -8 \\ 2 \end{pmatrix}$$

b)

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} 1 \\ 4 \end{pmatrix}, \vec{B} = \begin{pmatrix} 5 \\ 2 \end{pmatrix}, \vec{C} = \begin{pmatrix} 7 \\ 11 \end{pmatrix}$$

c)

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} 6 \\ 2.75 \end{pmatrix}, \vec{B} = \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \end{pmatrix}, \vec{C} = \begin{pmatrix} 7 \\ 1 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

In einer Skizze erkennen wir, dass der Flächeninhalt z.B. falls die Symmetrieachse durch C geht mit dem Mittelpunkt der Seite c und  $\vec{M}_c$  berechnet werden kann:

$$F = \frac{1}{2} \cdot |\vec{AB}| \cdot |\vec{M}_c\vec{C}|$$

a) Wir orientieren uns zuerst, indem wir die Vektoren der Seitenkanten berechnen:

$$\vec{AB} = \begin{pmatrix} -1 \\ 8 \end{pmatrix}, \vec{BC} = \begin{pmatrix} -8 \\ -1 \end{pmatrix}, \vec{CA} = \begin{pmatrix} 9 \\ -7 \end{pmatrix}$$

und die Längen sind

$$|\vec{AB}| = 8.06226, |\vec{BC}| = 8.06226, |\vec{CA}| = 11.4018$$

Wir sehen, dass die Symmetrieachse durch B geht.

$$F = \frac{1}{2} \cdot |\vec{CA}| \cdot |\vec{M_bB}| \approx \frac{1}{2} \cdot 11.4018 \cdot 5.7 \approx 32.5$$

- b) Wir orientieren uns zuerst, indem wir die Vektoren der Seitenkanten berechnen:

$$\vec{AB} = \begin{pmatrix} 4 \\ -2 \end{pmatrix}, \vec{BC} = \begin{pmatrix} 2 \\ 9 \end{pmatrix}, \vec{CA} = \begin{pmatrix} -6 \\ -7 \end{pmatrix}$$

und die Längen sind

$$|\vec{AB}| = 4.47214, |\vec{BC}| = 9.21954, |\vec{CA}| = 9.21954$$

Wir sehen, dass die Symmetrieachse durch C geht.

$$F = \frac{1}{2} \cdot |\vec{AB}| \cdot |\vec{M_cC}| \approx \frac{1}{2} \cdot 4.47 \cdot 8.94 \approx 20$$

- c) Wir orientieren uns zuerst, indem wir die Vektoren der Seitenkanten berechnen:

$$\vec{AB} = \begin{pmatrix} -2 \\ 0.25 \end{pmatrix}, \vec{BC} = \begin{pmatrix} 3 \\ -2 \end{pmatrix}, \vec{CA} = \begin{pmatrix} -1 \\ 1.75 \end{pmatrix}$$

und die Längen sind

$$|\vec{AB}| = 2.01556, |\vec{BC}| = 3.60555, |\vec{CA}| = 2.01556$$

Wir sehen, dass die Symmetrieachse durch A geht.

$$F = \frac{1}{2} \cdot |\vec{BC}| \cdot |\vec{M_aA}| = \frac{1}{2} \cdot 3.60555 \cdot 0.901388 = 1.625$$

### Beispiel 2.16 Rechnen mit Vektoren II

KG5VVR

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} 5 \\ 4 \end{pmatrix}, \vec{B} = \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \end{pmatrix}, \vec{C} = \begin{pmatrix} 3 \\ -2 \end{pmatrix}, \vec{D} = \begin{pmatrix} 4 \\ 4 \end{pmatrix}$$

$\vec{E}$  und  $\vec{F} \in \mathbb{R}^2$  sind allgemeine Vektoren.

- Gegenvektor zu  $\vec{A}$ ?
- Gegenvektor zu  $\vec{B}$ ?
- Gegenvektor zu  $\vec{E} - 2 \cdot \vec{F}$ ?
- Gegenvektor zu  $-(\vec{E} - 5 \cdot \vec{F})$ ?

e)  $\vec{A} + \vec{X} = \vec{B}$ ,  $\vec{X} = ?$

g)  $7 \cdot (\vec{A} - 2 \cdot \vec{B}) + \vec{X} = \vec{C}$ ,  $\vec{X} = ?$

f)  $\vec{B} + \vec{X} = \vec{0}$ ,  $\vec{X} = ?$

h)  $\frac{1}{2} \cdot \vec{X} + \frac{1}{3} \cdot \vec{A} + \vec{D} = \vec{X}$ ,  $\vec{X} = ?$

**Lösung:**

a)  $-\vec{A} = \begin{pmatrix} -5 \\ -4 \end{pmatrix}$

b)  $-\vec{B} = \begin{pmatrix} -3 \\ -2 \end{pmatrix}$

c)  $-(\vec{E} - 2 \cdot \vec{F}) = -\vec{E} + 2 \cdot \vec{F}$

d)  $-[-(\vec{E} - 5 \cdot \vec{F})] = \vec{E} - 5 \cdot \vec{F}$

e)  $\vec{X} = \vec{B} - \vec{A} = \begin{pmatrix} -2 \\ -2 \end{pmatrix}$

f)  $\vec{X} = -\vec{B} = \begin{pmatrix} -3 \\ -2 \end{pmatrix}$

g) Aus

$$7 \cdot \vec{A} - 7 \cdot 2 \cdot \vec{B} + \vec{X} = \vec{C}$$

folgt

$$\vec{X} = \vec{C} - (7 \cdot \vec{A} - 14 \cdot \vec{B}) = \begin{pmatrix} 10 \\ -2 \end{pmatrix}$$

h) Wir bringen zuerst alle Terme, die die Unbekannt  $\vec{X}$  enthalten nach links, alle anderen nach rechts:

$$\frac{1}{2} \cdot \vec{X} - \vec{X} = -\left(\frac{1}{3} \cdot \vec{A} + \vec{D}\right)$$

Wir zählen jetzt links wieviele  $\vec{X}$  wir haben und vereinfachen rechts

$$-\frac{1}{2} \cdot \vec{X} = -\frac{1}{3} \cdot \vec{A} - \vec{D}$$

Jetzt lösen wir auf

$$\vec{X} = \frac{-\frac{1}{3} \cdot \vec{A} - \vec{D}}{-1/2} = \frac{2}{3} \cdot \vec{A} + 2\vec{D} = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} 34 \\ 32 \end{pmatrix}$$

## 2.5 Übungen: Vektorraum

**Beispiel 2.17 Die Ebene  $\mathbb{R}^2$**

14841

Zeige, dass die Tupel in der Menge  $V = \{(x, y) \mid x, y \in \mathbb{R}\}$  einen Vektorraum

bilden. Betrachte nur die Abgeschlossenheit mit der Addition und der Multiplikation

$$\begin{aligned}(x, y) + (p, k) &= (x + p, y + k) \\ (x, y) \cdot \lambda &= (x \cdot \lambda, y \cdot \lambda)\end{aligned}$$

mit  $\lambda \in \mathbb{R}$ .

**Lösung:**

i) Abgeschlossenheit mit der Addition:

$$(x, y) + (p, k) = (x + p, y + k)$$

Das Tupel  $(x + p, y + k)$  hat wiederum Komponenten in  $\mathbb{R}$  und liegt deshalb in  $V$ .

ii) Abgeschlossenheit mit der Multiplikation:

$$(x, y) \cdot \lambda = (x \cdot \lambda, y \cdot \lambda)$$

Das Tupel  $(x \cdot \lambda, y \cdot \lambda)$  hat wiederum Komponenten in  $\mathbb{R}$  und liegt deshalb in  $V$ .

Wegen i) und ii) ist die gegebene Menge ein Vektorraum.

### Beispiel 2.18 Die Gerade in $\mathbb{R}^2$

234208

Zeige, dass die Tupel  $V = \{a \cdot (1, 3) \mid a \in \mathbb{R}\}$  einen Vektorraum bilden. Betrachte nur die Abgeschlossenheit mit der Addition und der Multiplikation. **Lösung:**

i) Abgeschlossenheit mit der Addition:

$$(a, 3a) + (b, 3b) = (a + b, 3a + 3b) = (a + b) \cdot (1, 3)$$

Das Tupel  $(a + b) \cdot (1, 3)$  wird mit dem Vorgehen erzeugt, wie die alle Elemente in  $V$  (Vorfaktor  $a + b$  mal Richtung  $(1, 3)$ ). Deshalb liegt auch jede Summe von zwei Tupeln wieder in  $V$ .

ii) Abgeschlossenheit mit der Multiplikation:

$$(a, 3a) \cdot \lambda = (a \cdot \lambda, 3a \cdot \lambda) = a \cdot \lambda(1, 3)$$

Das Tupel  $a \cdot \lambda(1, 3)$  wird mit dem Vorgehen erzeugt, wie die alle Elemente in  $V$  (Vorfaktor  $\lambda \cdot a$  mal Richtung  $(1, 3)$ ). Deshalb liegt auch jedes Vielfache eines Tupels wieder in  $V$ .

Die Gegebene Menge ist also ein Vektorraum .

Prüfe, ob die Tupel  $V = \{(a + 1, 3a) \mid a \in \mathbb{R}\}$  einen Vektorraum bilden. Betrachte nur die Abgeschlossenheit mit der Addition und der Multiplikation. **Lösung:**

Wir stellen fest, dass  $\vec{0}$  nicht in  $V$  liegt: Die erste Komponente ist nur für  $a = -1$  gleich Null. Dort erhalten wir

$$(0, -3).$$

Das reicht um zu zeigen, dass  $V$  kein Vektorraum ist, denn für jedes Element  $\vec{v} \in V$  müsste gelten

$$\vec{v} + (-\vec{v}) = \vec{0}$$

Da aber  $\vec{0}$  nicht in  $V$  liegt, ist  $V$  nicht abgeschlossen mit der Addition. Wem das nicht reicht, rechnet z.B.

$$\vec{w} + \vec{w} + (1, 0) + (1, 0) = (2, 0)$$

$\vec{w}$  liegt in  $V$  aber, das Resultat liegt nicht in  $V$ , denn um die zweite Komponente 0 zu bekommen müssen wir  $a = 0$  wählen. Für diese Wahl erhalten wir aber in  $V$

$$(0 + 1, 0) = (1, 0)$$

Die  $V$  ist also kein Vektorraum .

Wie wir später sehen werden, liegen die Punkte, die man bilden kann mit dem Gesetz

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = a \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} + b \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a + b \\ a - b \\ a + b \end{pmatrix}$$

und  $a, b \in \mathbb{R}$  in einer Ebene. Zeige, dass die Tripel in  $V = \left\{ \begin{pmatrix} a + b \\ a - b \\ a + b \end{pmatrix} \mid a, b \in \mathbb{R} \right\}$

einen Vektorraum bilden. Betrachte nur die Abgeschlossenheit mit der Addition und der Multiplikation.

**Lösung:**

Abgeschlossenheit mit der Addition:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} a + b \\ a - b \\ a + b \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c + d \\ c - d \\ c + d \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} a + b + c + d \\ a - b + c - d \\ a + b + c + d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a + c + (b + d) \\ a + c - (b + d) \\ a + c + (b + d) \end{pmatrix} \\ &= (a + c) \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} + (b + d) \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Das Tripel  $(a + c) \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} + (b + d) \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}$  ist wieder in der selber Form wie die Ele-

mente in  $V$ : Die Koeffizienten  $a + c$  und  $b + d$  liegen in  $\mathbb{R}$ ). Deshalb liegt auch die Summe in  $V$ .

$$\lambda \cdot \begin{pmatrix} a+b \\ a-b \\ a+b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \cdot \lambda + b \cdot \lambda \\ a \cdot \lambda - b \cdot \lambda \\ a \cdot \lambda + b \cdot \lambda \end{pmatrix} = \lambda \cdot a \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} + \lambda \cdot b \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Das Tripel  $\lambda \cdot a \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} + \lambda \cdot b \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}$  hat die Vorfaktoren in  $\mathbb{R}$  und ist in der selben Form, wie die Elemente in  $V$ . Deshalb liegt auch jedes Vielfache eines Tripels in  $V$ .

$V$  ist also ein Vektorraum.

### Beispiel 2.21 Ein A4-Blatt

A1D84A

$$V = \{(x, y) | 0 < x < 210 \wedge 0 < y < 297\}$$

$$\begin{aligned} (x, y) + (p, k) &= (x + p, y + k) \\ (x, y) \cdot \lambda &= (x \cdot \lambda, y \cdot \lambda) \end{aligned}$$

mit  $\lambda \in \mathbb{R}$ . Bilden die Tupel in  $V$  einen Vektorraum? Betrachte nur die Abgeschlossenheit mit der Addition und der Multiplikation **Lösung:**

Abgeschlossenheit mit der Addition: Es gilt zwar

$$(x, y) + (p, k) = (x + p, y + k) .$$

Aber das Tupel  $(x + p, y + k)$  ist nicht in jedem Fall in  $V$ . Betrachte z.B.

$$(210, 297) + (0, 297) = (210, 600)$$

Die Summe liegt nicht im Vektorraum. Also ist der Vektorraum nicht abgeschlossen. Gleichfalls ist

$$(210, 297) \cdot 10 = (2100, 2970)$$

nicht im Vektorraum. Also ist  $V$  auch gegenüber der Multiplikation nicht abgeschlossen.

### Beispiel 2.22 Ausgabenvektor für die Ferien

IY13LE

Seit Anna im Urlaub war, ist ein Jahr vergangen. Damals waren ihr Ausgaben

$$\begin{array}{l} \text{Flug} \\ \text{Hotel} \end{array} : \begin{pmatrix} 120 \\ 150 \end{pmatrix}$$

Inzwischen ist alles um 10% teurer geworden: wie sieht der Ausgaben-Vektor von Anna dieses Jahr aus? **Lösung:**

$$\vec{A}' = (1 + 0.1) \cdot \begin{pmatrix} 120 \\ 150 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 132 \\ 165 \end{pmatrix}$$

### Beispiel 2.23 Verdienst

JHUQUG

Herr Meyer arbeitet für zwei Arbeitsgebern.  $\vec{M} \in \mathbb{R}^2$  gibt die Monatsgehälter bei beiden Arbeitsgebern,  $\vec{J} \in \mathbb{R}^2$  seine Jahresgehälter an.

- a) Drücke  $\vec{J}$  mit  $\vec{M}$  aus.  
 b) Herr Meyer erhält zweimal im Jahr das doppelte Gehalt. Drücke jetzt  $\vec{J}$  mit  $\vec{M}$  aus.

**Lösung:**

- a)  $\vec{J} = 12 \cdot \vec{M}$ , oder falls das Monatsgehalt in 13 Raten ausgezahlt wird gilt  $\vec{J} = 13 \cdot \vec{M}$   
 b)  $\vec{J} = 12 \cdot \vec{M} + \vec{M} + \vec{M} = 14 \cdot \vec{M}$ ; Je nach Arbeitsvertrag gilt alternativ

$$\vec{J} = 13 \cdot \vec{M} + \vec{M} + \vec{M} = 15 \cdot \vec{M} .$$

### Beispiel 2.24 Polynome bis Grad 3

1A73ZA

$$p(x) = 120 - 15x + 5x^2 - 4x^3, \quad q(x) = 7 + 42x - 6x^2 - 2x^3$$

Wir schreiben die Buchhaltung für die Koeffizienten der beiden Polynome in Listen auf

$$\vec{p} = \begin{pmatrix} 120 \\ -15 \\ 5 \\ -4 \end{pmatrix} \text{ und } \vec{q} = \begin{pmatrix} 7 \\ 42 \\ -6 \\ -2 \end{pmatrix}$$

- a) Berechne  $a(x) = p(x) + q(x)$   
 b) Berechne  $b(x) = -3p(x) + 2q(x)$

**Lösung:**

- a) Die Koeffizienten 'vermischen sich nicht', d.h. bei der Addition bleiben die Komponenten getrennt. Also

$$\vec{a} = \vec{p} + \vec{q} = \begin{pmatrix} 127 \\ 27 \\ -1 \\ -6 \end{pmatrix} \text{ d.h. } a(x) = 127 + 27x - x^2 - 6x^3 .$$



- b) Die Koeffizienten 'vermischen sich nicht', auch nicht bei der Multiplikation mit einem Skalar. Also

$$\vec{b} = -3\vec{p} + 2\vec{q} = \begin{pmatrix} -346 \\ 129 \\ -27 \\ 8 \end{pmatrix} \text{ d.h. } b(x) = -346 + 129x - 27x^2 + 8x^3.$$

### Beispiel 2.25 Trigonometrische Funktionen

847116

$$p(x) = 15 \cos(x) - 4 \sin(x), \quad q(x) = -2 \cos(x) + 6 \sin(x)$$

Wir schreiben die Buchhaltung für die Koeffizienten in Listen auf

$$\vec{p} = \begin{pmatrix} 15 \\ -4 \end{pmatrix} \text{ und } \vec{q} = \begin{pmatrix} -2 \\ 6 \end{pmatrix}$$

- a) Berechne  $a(x) = 2p(x) + 15q(x)$   
b) Berechne  $b(x) = 6p(x) + 4q(x)$

**Lösung:**

- a) Die Koeffizienten 'vermischen sich nicht', also

$$\vec{a} = 2\vec{p} + 15\vec{q} = \begin{pmatrix} 0 \\ 82 \end{pmatrix}$$

und  $a(x) = 82 \sin(x)$

- b) Die Koeffizienten 'vermischen sich nicht', also

$$\vec{b} = 6\vec{p} + 4\vec{q} = \begin{pmatrix} 82 \\ 0 \end{pmatrix}$$

und  $b(x) = 82 \cos(x)$

### Beispiel 2.26 Polynome bis Grad 4

625994

Zeige, dass die Polynome

$$p(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + a_3 \cdot t^3 + a_4 \cdot t^4 \text{ mit } a_i \in \mathbb{R}$$

(Polynom 4. Grades) einen fünfdimensionalen Vektorraum  $V$  bilden.

**Lösung:**

Wir betrachten die Polynome  $p(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + a_3 \cdot t^3 + a_4 \cdot t^4$  und  $q(t) =$

$b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot t^2 + b_3 \cdot t^3 + b_4 \cdot t^4$  Die Addition von zwei Polynomen ergibt

$$p(t) + q(t) = (a_0 + b_0) + (a_1 + b_1) \cdot t + (a_2 + b_2) \cdot t^2 + (a_3 + b_3) \cdot t^3 + (a_4 + b_4) \cdot t^4$$

Es entsteht wieder ein Polynom von Grad 4 mit Koeffizienten in  $\mathbb{R}$ , also ist  $V$  mit der Addition abgeschlossen.

Für die Multiplikation gilt:

$$\lambda \cdot p(t) = (\lambda \cdot a_0) + (\lambda \cdot a_1) \cdot t + (\lambda \cdot a_2) \cdot t^2 + (\lambda \cdot a_3) \cdot t^3 + (\lambda \cdot a_4) \cdot t^4$$

Auch das ist ein Polynom in  $V$ . Also ist  $V$  ein Vektorraum.

Darstellung der Gerade in  $\mathbb{R}^2$ **Lernziele Darstellung der Gerade**

- Die Studierenden kennen die Geradengleichung in Parameterform.
- Die Studierenden können aus der Koordinatengleichung einer Geraden die Parameterform bestimmen und umgekehrt.
- Die Studierenden können einen Vektor normieren.
- Die Studierenden können überprüfen, ob zwei Vektoren senkrecht zueinander stehen.
- In  $\mathbb{R}^2$  können die Studierenden zu einem gegebenen Vektor  $\vec{v}$  einen zweiten Vektor  $\vec{n}$  bestimmen, der senkrecht auf  $\vec{v}$  steht.

Eine Gerade kann auf folgende Arten dargestellt werden:

**Definition Funktionsgleichung einer Geraden in  $\mathbb{R}^2$** 

Der Ausdruck

$$y = m \cdot x + d$$

beschreibt eine Gerade in  $\mathbb{R}^2$ . Dabei ist  $m$  die Steigung und  $d$  der  $y$ -Achsen-Abschnitt

**Definition Koordinatenform der Geraden in  $\mathbb{R}^2$** 

Alle Punkte, die auf einer Geraden liegen und die Koordinaten  $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$  haben, erfüllen die Bedingung

$$n_x \cdot x + n_y \cdot y + d = 0$$

Dabei ist  $n \in \mathbb{R}$  und  $\vec{n} = \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \end{pmatrix}$  der Normalenvektor der Geraden.

### Definition Parameterform der Geraden in $\mathbb{R}^2$

Die Punkte

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \vec{A} + s \cdot \vec{v}$$

beschreiben eine Gerade. Dabei sind

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}, \vec{A} \text{ und } \vec{v} \in \mathbb{R}^2; s \in \mathbb{R}$$

Wir nennen

- $\vec{A}$  den **Aufpunkt**.
- $\vec{v}$  den **Richtungsvektor**.

[?, Bd. 1 II 4.1] In  $\mathbb{R}^3$  gilt analog

$$g : \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \vec{A} + s \cdot \vec{v}$$

mit

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}, \vec{A} \text{ und } \vec{v} \in \mathbb{R}^3; s \in \mathbb{R}$$

### Infobox Darstellung von Geraden in $\mathbb{R}^n$

- In  $\mathbb{R}^2$ : Für Geraden, die parallel zu  $y$ -Achse verlaufen, gibt es eine Koordinatengleichung (z.B.  $x = 3$ ) aber keine Funktionsgleichung.
- In  $\mathbb{R}^n$  werden Geraden durch die Parameterform dargestellt. Für die Gerade gibt es in  $\mathbb{R}^n$  ( $n \geq 3$ ) keine Funktionsgleichung und keine Koordinatenform.

### Grundfertigkeiten beim Wechsel der Darstellung von Geradengleichungen

#### Beispiel 3.1 Parameterform der Geraden

EEZWBD

$$\vec{P} = \begin{pmatrix} -3 \\ 2 \end{pmatrix}, \vec{Q} = \begin{pmatrix} 9 \\ -3 \end{pmatrix}$$

Wir kennen den Mittelpunkt der Strecke  $\vec{M} = \vec{P} + \frac{1}{2} \cdot \underbrace{\vec{PQ}}_{=\vec{v}} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 6 \\ -1 \end{pmatrix}$ .

- Geben Sie 4 weitere Punkte auf der Geraden durch  $\vec{P}$  und  $\vec{Q}$  an.
- Wie können wir *alle* Punkte auf der Geraden darstellen?

**Lösung:**

a) Weitere Punkte könnten sein

$$\vec{A} = \vec{P} - \vec{v} = \begin{pmatrix} -15 \\ 7 \end{pmatrix}, \quad \vec{B} = \vec{Q} + \vec{v} = \begin{pmatrix} 21 \\ -8 \end{pmatrix}$$

$$\vec{D} = \vec{P} + \frac{1}{10}\vec{v} = \frac{1}{10} \cdot \begin{pmatrix} -18 \\ 15 \end{pmatrix}, \quad \vec{E} = \vec{P} + 10 \cdot \vec{v} = \begin{pmatrix} 117 \\ -48 \end{pmatrix},$$

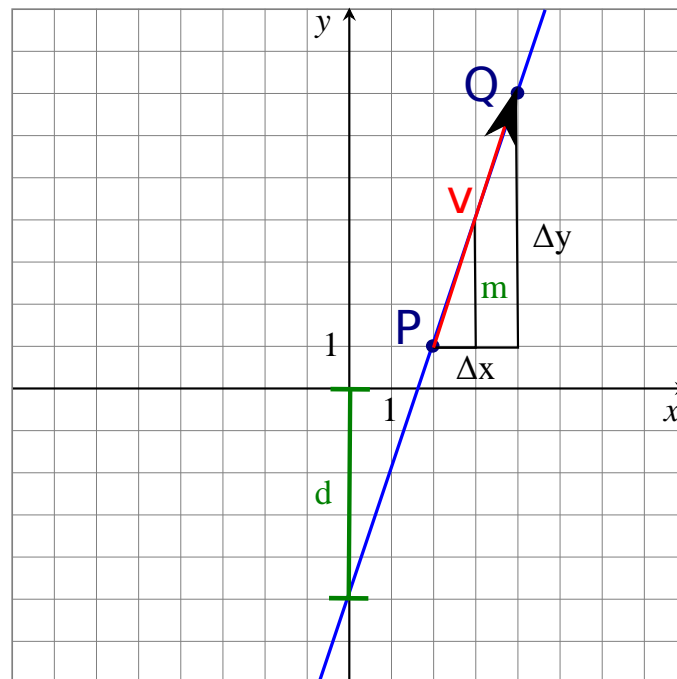
b) Aus den Beispielen oben sehen wir, dass das Bildungsgesetz lautet

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \vec{P} + s \cdot \vec{v}$$

dabei ist  $s \in \mathbb{R}$  eine beliebige Zahl und als Aufpunkt kann statt  $\vec{P}$  auch  $\vec{Q}$  verwendet werden

### Beispiel 3.2 Grundfertigkeiten 1

EPMOVQ



Wir betrachten die Gerade  $g$  durch die Punkte

$$\vec{P} = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \vec{Q} = \begin{pmatrix} 4 \\ 7 \end{pmatrix}$$

Bestimmen Sie die Darstellung der Geraden

- als Funktionsgleichung
- in Parameterform.

**Lösung:**

a) Wir bestimmen die Steigung

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{7-1}{4-2} = 3.$$

Der  $y$ -Achsenabschnitt muss nun die Gleichung (beim Punkt  $\vec{P}$ ) erfüllen:

$$1 = 3 \cdot 2 + d.$$

also  $d = -5$ . Die Funktionsgleichung lautet also

$$y(x) = -5 + 3x$$

b) Wir berechnen den Verbindungsvektor

$$\vec{v} = \vec{Q} - \vec{P} = \begin{pmatrix} 2 \\ 6 \end{pmatrix}$$

Die Parameterform lautet also ( $s \in \mathbb{R}$ ):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \vec{P} + s \cdot \vec{v} = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 6 \end{pmatrix}, \quad s \in \mathbb{R}$$

### Beispiel 3.3 Grundfertigkeiten 2

ZOAP3T

Wir betrachten die Gerade  $f$  durch die Punkte

$$\vec{P} = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \vec{Q} = \begin{pmatrix} 6 \\ -11 \end{pmatrix}$$

Bestimmen Sie die Darstellung der Geraden

- in Parameterform.
- als Funktionsgleichung.
- in Koordinatenform
- zwei weitere Punkte auf der Geraden anhand der Parameterform
- zwei weitere Punkte auf der Geraden Koordinatengleichung

**Lösung:**

a) Wir berechnen den Verbindungsvektor

$$\vec{v} = \vec{Q} - \vec{P} = \begin{pmatrix} 4 \\ -12 \end{pmatrix}$$

Beim Richtungsvektor spielt die Länge keine Rolle. Wir skalieren ihn also  $\vec{v}' = \frac{1}{4}\vec{v}$ . Die Parameterform lautet also

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \vec{P} + s \cdot \vec{v} = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ -3 \end{pmatrix}$$

b) Wir lösen die Koordinatenform nach  $y$  auf:

$$y = 7 - 3x$$

c) Aus dem Komponenten des Richtungsvektors bestimmen wir die Koeffizienten (Komponenten vertauschen und ein Vorzeichen switchen):

$$\begin{pmatrix} 1 \\ -3 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \end{pmatrix} := \vec{n}$$

Das sind die Koeffizienten

$$3x + 1y + d = 0$$

Die Gleichung muss auch bei  $\vec{P}$  erfüllt sein, also

$$3 \cdot 2 + 1 \cdot 1 + d = 0 \Rightarrow d = -7$$

Die Koordinatenform lautet  $3x + y - 7 = 0$ .

d) Punkte aus der Parameterform z.B.  $s = 10$  und  $s = 20$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix} + 10 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ -3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 12 \\ -29 \end{pmatrix} \text{ und } \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix} + 20 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ -3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 32 \\ -59 \end{pmatrix}$$

e) Punkte aus Koordinatengleichung  $3x + y - 7 = 0$ . Wir wählen  $x = 0$ , also

$$y - 7 = 0 \Rightarrow \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 7 \end{pmatrix}$$

und  $y = 0$ , also

$$3x - 0 - 7 = 0 \Rightarrow \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7/3 \\ 0 \end{pmatrix}$$

### Beispiel 3.4 Grundfertigkeiten 3

F1CD8V

Wir betrachten die Gerade  $h$  gegeben durch

$$3 \cdot x + 2 \cdot y + 6 = 0$$

Bestimmen Sie

- a) zwei weitere Punkte auf der Geraden.  
 b) die Parameterform der Geraden  $h$

**Lösung:**

- a) Es bietet sich an die Punkte

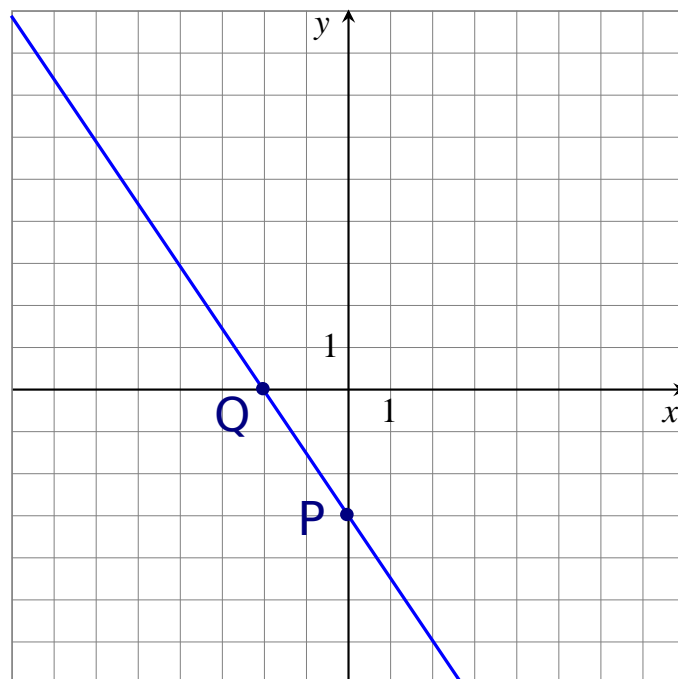
$$\vec{P} = \begin{pmatrix} 0 \\ p_y \end{pmatrix}, \vec{Q} = \begin{pmatrix} q_x \\ 0 \end{pmatrix}$$

zu bestimmen. Wir setzen ein und erhalten

$$\begin{aligned} 3 \cdot 0 + 2p_y + 6 &= 0 & \Rightarrow & p_y = -3 \\ 3 \cdot q_x + 2 \cdot 0 + 6 &= 0 & \Rightarrow & q_x = -2 \end{aligned}$$

also

$$\vec{P} = \begin{pmatrix} 0 \\ -3 \end{pmatrix}, \vec{Q} = \begin{pmatrix} -2 \\ 0 \end{pmatrix}$$



- b) Der Richtungsvektor lautet

$$\vec{v} = \vec{P} - \vec{Q} = \begin{pmatrix} 2 \\ -3 \end{pmatrix}$$

und also die Parameterform von  $h$  ( $s \in \mathbb{R}$ ):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -3 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ -3 \end{pmatrix}$$



## Wieso funktioniert das?

### Beispiel 3.5 Bestimme die Punkte auf der Geraden durch $\vec{A}$ und $\vec{B}$ 814251

Gegeben seien die Punkte

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 2 \end{pmatrix}, \vec{B} = \begin{pmatrix} 5 \\ -5 \\ 6 \end{pmatrix}.$$

Berechne zunächst zwei weitere Punkte auf der Geraden durch  $\vec{A}$  und  $\vec{B}$ . Überlege dann, wie man alle Punkte auf der Geraden berechnen kann.

#### Lösung:

Der Vektor der die Punkte  $\vec{A}$  und  $\vec{B}$  verbindet ist

$$\vec{u} = \vec{B} - \vec{A} = \begin{pmatrix} 4 \\ -4 \\ 4 \end{pmatrix}$$

Um weitere Punkte auf der Geraden zu bestimmen gehen wir von  $\vec{A}$  zum Beispiel nur den halben Weg in Richtung von  $B$ :

$$\vec{P} = \vec{A} + \frac{1}{2} \cdot \vec{u} = \begin{pmatrix} 3 \\ -3 \\ 4 \end{pmatrix}$$

oder  $\frac{3}{4}$  vom Weg:

$$\vec{Q} = \vec{A} + \frac{3}{4} \cdot \vec{u} = \begin{pmatrix} 4 \\ -4 \\ 5 \end{pmatrix}$$

Die Punkte  $\vec{P}$  und  $\vec{Q}$  liegen sicher auf der Geraden durch  $\vec{A}$  und  $\vec{B}$ . Es wird ersichtlich, dass wir irgendeinen Teil des Weges zwischen Alle Punkte auf der Geraden sind gegeben durch  $\vec{A}$  und  $\vec{B}$  gehen können und so stets einen Punkt auf der Geraden bleiben. Wir können das wie folgt schreiben

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 2 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} 4 \\ -4 \\ 4 \end{pmatrix}$$

oder

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \vec{A} + \lambda \vec{u}$$

Dabei kann  $\lambda \in \mathbb{R}$  irgendeinen Wert annehmen - auch negative Werte oder auch  $|\lambda| > 1$ .

### Beispiel 3.6 Punkte einer Geraden

702095

Die Gerade ist gegeben durch

$$g: \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 2 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} 4 \\ -4 \\ 4 \end{pmatrix}$$

Liegen die Punkte auf der Geraden  $g$ ?

$$\vec{C} = \begin{pmatrix} -2 \\ 2 \\ -1 \end{pmatrix}, \vec{Q} = \begin{pmatrix} 6 \\ 20 \\ 10 \end{pmatrix}, \vec{R} = \begin{pmatrix} -8 \\ 8 \\ -6 \end{pmatrix}, \vec{S} = \begin{pmatrix} -4 \\ 4 \\ -3 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

Wir untersuchen dazu, ob der Verbindungsvektor von  $\vec{C}$  zum Aufpunkt kollinear zum Richtungsvektor ist. Wir erhalten

$$\vec{c} = \begin{pmatrix} -2 \\ 2 \\ -1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -3 \\ 3 \\ -3 \end{pmatrix}$$

$\vec{c}$  ist ein Vielfaches von  $\vec{u}$ , deshalb liegt  $\vec{C}$  auf der Geraden. Des Weiteren liegt  $\vec{Q}$  und  $\vec{R}$  nicht auf der Geraden dafür aber  $\vec{S}$ .

### Beispiel 3.7 Parameterform einer Geraden

THGS9F

Bestimmen Sie die Parameterform der Geraden durch die Punkte

a)  $\vec{A} = \begin{pmatrix} 0 \\ -9 \end{pmatrix}, \vec{B} = \begin{pmatrix} -8 \\ -10 \end{pmatrix}$

b)  $\vec{C} = \begin{pmatrix} -7 \\ 9 \end{pmatrix}, \vec{D} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$

**Lösung:**

a)  $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -9 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} -8 \\ -1 \end{pmatrix}$

b)  $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 8 \\ -8 \end{pmatrix}$

### Beispiel 3.8 Senkrechte Vektoren

HGV4AA

Zeichnen Sie folgende Vektoren in ein Koordinatensystem ein und bestimmen Sie einen Vektor, der senkrecht dazu steht.

Berechnen Sie anschliessend für die beiden Vektoren den Term

$$v_x \cdot w_x + v_y \cdot w_y$$

a)  $\vec{a} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$

d)  $\vec{d} = \begin{pmatrix} 3.2 \\ u \end{pmatrix}$

b)  $\vec{b} = \begin{pmatrix} 5 \\ 2 \end{pmatrix}$

e)  $\vec{e} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$

c)  $\vec{c} = 2 \cdot \begin{pmatrix} -1 \\ 3 \end{pmatrix}$

f)  $\vec{f} = 4 \cdot \begin{pmatrix} \cos(\varphi) \\ \sin(\varphi) \end{pmatrix}$

**Lösung:**

a)  $\vec{a}' = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$  und  $1 \cdot 0 + 0 \cdot 1 = 0$ .

d)  $\vec{d}' = \begin{pmatrix} u \\ -3.2 \end{pmatrix}$  und  $3.2 \cdot u + u \cdot (-3.2) = 0$ .

b)  $\vec{b}' = \begin{pmatrix} 5 \\ -2 \end{pmatrix}$  und  $5 \cdot (-2) + 2 \cdot 5 = 0$ .

e)  $\vec{e}' = \begin{pmatrix} y \\ -x \end{pmatrix}$  und  $x \cdot y + y \cdot (-x) = 0$ .

c)  $\vec{c}' = \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \end{pmatrix}$  und  $-1 \cdot 3 + 3 \cdot 1 = 0$ .

f)  $\vec{f}' = \begin{pmatrix} \sin(\varphi) \\ -\cos(\varphi) \end{pmatrix}$  und  $\cos(\varphi) \cdot \sin(\varphi) - \cos(\varphi) \cdot \sin(\varphi) = 0$ .

**Infobox Senkrechte Vektoren**

Wir betrachten die Vektoren

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} \text{ und } \vec{w} = \begin{pmatrix} w_x \\ w_y \end{pmatrix}$$

- Die beiden Vektoren stehen senkrecht aufeinander, falls gilt

$$v_x \cdot w_x + v_y \cdot w_y = 0$$

- Die Summe oben notieren wir auch mit dem Skalarprodukt

$$\vec{v} \odot \vec{w} = v_x \cdot w_x + v_y \cdot w_y$$

- Der Vektor  $\vec{n} = \begin{pmatrix} -v_y \\ v_x \end{pmatrix}$  steht senkrecht auf  $\vec{v}$ .
- Diese Technik erlaubt es, aus dem Richtungsvektor einer Geraden  $\vec{v}$  einen Vektor  $\vec{n}$  zu bestimmen, der senkrecht auf der Geraden steht. Wir nennen dann  $\vec{n}$  den **Normalenvektor**.

Beweis, dass  $\vec{v}$  senkrecht steht auf  $\vec{n}$ :

$$\vec{v} \odot \vec{n} = v_x \cdot (-v_y) + v_y \cdot v_x = 0$$

Wir betrachten die Gerade  $g$ . Sie lässt sich darstellen in Parameterform

$$g: \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 4 \\ 16 \end{pmatrix}}_{=\vec{A}} + s \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} 1 \\ 5 \end{pmatrix}}_{=\vec{v}}$$

Wir bestimmen den Normalenvektor  $\vec{n} = \begin{pmatrix} 5 \\ -1 \end{pmatrix}$  und daraus in Koordinatenform

$$5x - y = 4$$

Untersuchen sie die geometrische Lage von  $\vec{v}$  und  $\vec{n}$ .

**Lösung:**

Die beiden Vektoren stehen senkrecht aufeinander:

$$5 \cdot 1 + (-1) \cdot 5 = 0$$

$$g: \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 2 \\ 8 \end{pmatrix}}_{=\vec{A}} + s \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} 3 \\ 2 \end{pmatrix}}_{=\vec{v}}$$

a) Bestimmen Sie einen Vektor  $\vec{n}$ , der senkrecht auf dem Richtungsvektor  $\vec{v}$  steht.

b) Wir berechnen einen zweiten Punkt auf der Geraden

$$\vec{B} = \begin{pmatrix} 2 \\ 8 \end{pmatrix} + 2 \cdot \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 8 \\ 12 \end{pmatrix}$$

Welchen Winkel schliessen  $\vec{w} = \overrightarrow{AB}$  und  $\vec{n}$  ein? Wie untersuchen Sie das mathematisch?

c) Wir berechnen einen weiteren Punkt, der nicht auf der Geraden liegt

$$\vec{D} = \begin{pmatrix} 3 \\ 8 \end{pmatrix}$$

Welchen Winkel schliessen  $\vec{l} = \overrightarrow{AD}$  und  $\vec{n}$  ein?

d) Wir betrachten einen weiteren Punkt  $\vec{C} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$  auf der Geraden  $g$ . Drücken Sie mathematisch aus, dass  $\overrightarrow{AC}$  senkrecht zu  $\vec{n}$  steht.

e) Multiplizieren Sie den letzten Ausdruck aus und vereinfachen Sie.

**Lösung:**

a) Normalenvektor  $\vec{n} = \begin{pmatrix} -2 \\ 3 \end{pmatrix}$

b) Wir berechnen einen zweiten Punkt auf der Geraden

$$\vec{w} \odot \vec{n} = \begin{pmatrix} -2 \\ 3 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} 6 \\ 4 \end{pmatrix} = -12 + 12 = 0$$

Der Zwischenwinkel ist  $90^\circ$ .

c)

$$\overrightarrow{AC} \odot \vec{n} = 0$$

d.h.

$$\begin{pmatrix} x-2 \\ y-8 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} -2 \\ 3 \end{pmatrix} = 0$$

d) ausmultipliziert

$$-2x + 3y - 10 = 0$$

**Beispiel 3.11 Von der Koordinatenform zur Parameterform der Geraden**  
V1YY0V

$$g: 5x + 8y - 16 = 0$$

a) Bestimmen Sie den Normalenvektor  $\vec{n}$  der Geraden.

b) Bestimmen Sie den Richtungsvektor  $\vec{v}$ .

c) Bestimmen Sie einen Punkt  $\vec{A}$  auf der Geraden.

d) Geben Sie die Parameterform der Geraden an.

**Lösung:**

a) Normalenvektor  $\vec{n} = \begin{pmatrix} 5 \\ 8 \end{pmatrix}$  auslesen.

b) Richtungsvektor  $\vec{v} = \begin{pmatrix} 8 \\ -5 \end{pmatrix}$ .

c) Um einen Punkt zu bestimmen, wählen wir z.B.  $x = 0$  und lösen dann auf

$$0 + 8y - 16 = 0 \Rightarrow y = \frac{16}{8} = 2$$

Also ist der Aufpunkt  $\vec{A} = \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \end{pmatrix}$

d)  $g$  in Parameterform

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 8 \\ -5 \end{pmatrix}$$

**Beispiel 3.12 Konstante bestimmen**

OJNWFS

$$h: \left( \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} - \underbrace{\begin{pmatrix} -5 \\ 3 \end{pmatrix}}_{=\vec{A}} \right) \odot \begin{pmatrix} 7 \\ 5 \end{pmatrix} = 0$$

a) Geben Sie den Normalenvektor an.

b) Bestimmen Sie  $n_x$  und  $n_y$  in der Koordinatenform

$$n_x \cdot x + n_y \cdot y + d = 0$$

c) Der Punkt  $\vec{A}$  liegt auf der Geraden. Wie lässt sich mit dieser Überlegung  $d$  bestimmen?

d) Geben Sie  $h$  in der Koordinatenform an.

**Lösung:**

a) Normalenvektor  $\vec{n} = \begin{pmatrix} 7 \\ 5 \end{pmatrix}$

b) Koordinatenform

$$7 \cdot x + 5 \cdot y + d = 0$$

c)  $\vec{A}$  liegt auf  $h$  mathematisch ausgedrückt (durch Einsetzen von  $\vec{A}$ ):

$$7 \cdot (-5) + 5 \cdot 3 + d = 0 \quad d = -(-35 + 15) = 20$$

d) ausmultipliziert

$$7 \cdot x + 5 \cdot y + 20 = 0$$

### Infobox Umwandeln der Darstellungen der Geraden

- 2 Punkte zu Parameterform: Einen Punkt als Aufpunkt wählen,  $\vec{v} = \vec{B} - \vec{A}$  ist der Richtungsvektor.
- Parameterform zu Koordinatenform: Aus  $\vec{v}$  den Normalenvektor  $\vec{n}$  berechnen. Dann Pkt. einsetzen und Konstante bestimmen.
- Parameterform zu Funktionsgleichung: Mit  $\vec{v}$  die Steigung berechnen und den Aufpunkt  $\vec{P} = \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \end{pmatrix}$  einsetzen in

$$y = m \cdot (x - A_x) + A_y$$

- Koordinatenform zu Parameterform: Normalenvektor  $\vec{n}$  auslesen. Der Vektor senkrecht zu  $\vec{n}$  ergibt den Richtungsvektor. Ein Punkt (z.B.  $\begin{pmatrix} 0 \\ y \end{pmatrix}$ ) ist der Aufpunkt.

## 3.1 Übungen: Geradengleichung

### Beispiel 3.13 Gerade als Gleichung: Geradengleichung

48726

Durch die Gleichung  $x_2 = mx_1 + c$  wird eine Gerade im  $x_1x_2$ -Koordinatensystem beschrieben. Dabei ist  $m$  die Steigung und  $d$  der  $y$ -Achsenabschnitt. Gib die Parameterdarstellung der Geraden an für

a)  $m = 3, d = 3$

d)  $2x_1 + x_2 = 5$

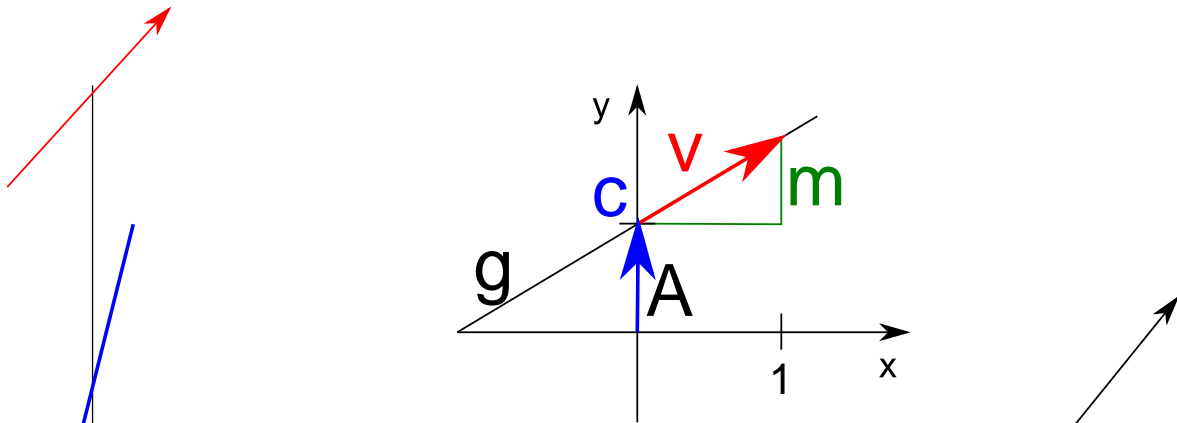
b)  $m = 0, d = 2$

c)  $x_1 + x_2 = 3$

e)  $x_1 = 5$

#### Lösung:

Meistens lässt sich die Parameterform aus der Geradengleichung berechnen, nämlich in allen Fällen, wo sowohl  $m$  wie auch  $c$  gegeben sind. Mit Hilfe der Grafik, führen wir uns die Bedeutung der beiden Parameter vor Augen.



$c$  sagt, bei welcher Höhe die  $y$ -Achse geschnitten wird. Daraus lässt sich ein Aufpunkt schnell bestimmen:  $\vec{A} = \begin{pmatrix} 0 \\ c \end{pmatrix}$ .  $m$  sagt, dass die Gerade um  $m$  steigt, wenn man einen Schritt in Richtung von  $x$  geht. Daraus lässt sich ein Richtungsvektor schnell bestimmen:  $\vec{v} = \begin{pmatrix} 1 \\ m \end{pmatrix}$ .

a)  $g : \vec{x} = \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \end{pmatrix}$

b)  $g : \vec{x} = \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$

c) Wir lösen nach  $x_2$  auf:

$$x_2 = 3 - x_1$$

Daraus bestimmen wir  $m = -1$  und  $c = 3$ , also  $g : \vec{x} = \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$

Für die weiteren Aufgaben gehen wir wie folgt vor: Wir können zwei Punkte bestimmen. Das geht oft am einfachsten für die Punkte  $\begin{pmatrix} 0 \\ x_2 \end{pmatrix}$  und  $\begin{pmatrix} x_1 \\ 0 \end{pmatrix}$ . Mit diesen Punkten kann dann die Parameterdarstellung bestimmt werden:

d) Punkte  $\vec{A} = \begin{pmatrix} 0 \\ 5 \end{pmatrix}$  und  $\vec{B} = \begin{pmatrix} 5/2 \\ 0 \end{pmatrix}$ . Richtungsvektor

$$\vec{u} = 2(\vec{B} - \vec{A}) = 2 \begin{pmatrix} 5/2 \\ -5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 \\ -10 \end{pmatrix}.$$

Also  $g : \vec{x} = \begin{pmatrix} 0 \\ 5 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 5 \\ -10 \end{pmatrix}$

e) Hier gibt es keinen Punkt  $\vec{A} = \begin{pmatrix} 0 \\ y \end{pmatrix}$ . Dafür können wir z.B.  $\vec{A} = \begin{pmatrix} 5 \\ 0 \end{pmatrix}$  und  $\vec{B} = \begin{pmatrix} 5 \\ 1 \end{pmatrix}$  wählen. Richtungsvektor

$$\vec{u} = \vec{B} - \vec{A} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$



$$\text{Also } g : \vec{x} = \begin{pmatrix} 5 \\ 0 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

**Beispiel 3.14 Von der Parameterform zur Geradengleichung**
**94899**

Bestimme die Gleichung  $x_2 = m \cdot x_1 + c$  der Geraden  $g$ :

a)  $g : \vec{x} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \end{pmatrix}$

b)  $g : \vec{x} = \begin{pmatrix} 2 \\ 5 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} -1 \\ 5 \end{pmatrix}$

**Lösung:**

- a) Die Steigung kann mit dem Richtungsvektor bestimmt werden. Es gilt  $m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{1}{3}$ . Um den y-Achsenabschnitt zu bestimmen, setzen wir den Aufpunkt in die halbfertige Geradengleichung ein:

$$2 = 1 \cdot \frac{1}{3} + c$$

also  $c = \frac{5}{3}$  und die Geradengleichung lautet

$$x_2 = \frac{5}{3} + \frac{1}{3}x_1 .$$

- b) Steigung  $m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{5}{-1} = -5$ . Um den y-Achsenabschnitt zu bestimmen, suchen wir den Punkt  $\begin{pmatrix} 0 \\ c \end{pmatrix}$ . Um den y-Achsenabschnitt zu bestimmen, setzen wir den Aufpunkt in die halbfertige Geradengleichung ein:

$$5 = 2 \cdot \frac{-5}{1} + c$$

also  $c = 15$  und die Geradengleichung lautet

$$x_2 = -5x_1 + 15 .$$

**Beispiel 3.15 Schnittpunkt von zwei Geraden**
**339474**

Berechne die Koordinaten des Schnittpunktes  $\vec{s}$  der Geraden  $g$  und  $h$ :

a)  $g : \vec{x} = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix} + \lambda \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}, h : \vec{x} = \begin{pmatrix} 5 \\ 9 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} 2 \\ 9 \end{pmatrix}$

b)  $g : \vec{x} = \begin{pmatrix} 2 \\ 8 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \end{pmatrix}, h : \vec{x} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix}$

$$\text{c) } g: \vec{x} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \lambda \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}, h: \vec{x} = \begin{pmatrix} 3 \\ -2 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$\text{d) } g: \vec{x} = \begin{pmatrix} 7 \\ 3 \\ 9 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} 1 \\ 4 \\ 0 \end{pmatrix}, h: \vec{x} = \begin{pmatrix} 3 \\ -13 \\ 9 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

$$\text{a) } \vec{S} = \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ (z.B. für } t = -1\text{).}$$

$$\text{b) } \vec{S} = \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \end{pmatrix} \text{ (z.B. für } \lambda = -3\text{).}$$

$$\text{c) } \vec{S} = \begin{pmatrix} 3 \\ -2 \end{pmatrix} \text{ (z.B. für } t = 0\text{).}$$

$$\text{d) } \vec{S} = \begin{pmatrix} 3 \\ -13 \\ 9 \end{pmatrix} \text{ (z.B. für } t = 0\text{).}$$

**Methode:**

In  $\mathbb{R}^2$  können wir die Geradengleichung in Koordinatenform bestimmen und dann mit der Gauss-Elimination, das Gleichungssystem in Dreiecksform bringen.

In  $\mathbb{R}^3$  funktioniert es so: Wir setzen die vektoriellen Ausdrücke gleich und multiplizieren mit dem Parameter aus:

$$\begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \lambda \\ -\lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 \\ 9 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2t \\ 9t \end{pmatrix}$$

oder komponentenweise

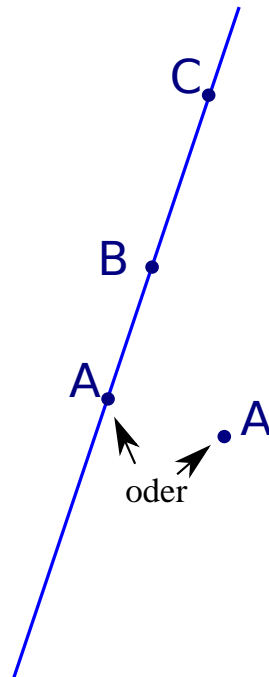
$$\begin{aligned} L_1: & \quad 2 + \lambda = 5 + 2t \\ L_2: & \quad 1 - \lambda = 9 + 9t \end{aligned}$$

Als nächstes wollen wir einen Parameter eliminieren. Hier gelingt dies durch Addition der Gleichungen (links und rechts separat):

$$L_1 + L_2: \quad 3 = 14 + 11t$$

also  $t = \frac{3-14}{11} = -1$ . Diesen Parameter kann man in die Parameterform von  $h$  einsetzen und erhält

$$\vec{S} = \begin{pmatrix} 5 \\ 9 \end{pmatrix} + (-1) \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \end{pmatrix}$$



Liegt der Punkt  $\vec{A}$  auf der Geraden durch die Punkte  $\vec{B}$  und  $\vec{C}$ ?

a)  $\vec{A} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -2 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{B} = \begin{pmatrix} 10 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{C} = \begin{pmatrix} -8 \\ 8 \\ -6 \end{pmatrix}$

b)  $\vec{A} = \begin{pmatrix} 8 \\ -8 \\ 8 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{B} = \begin{pmatrix} 2 \\ 7 \\ -5 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{C} = \begin{pmatrix} -4 \\ 22 \\ -18 \end{pmatrix}$

**Lösung:**

Idee zu Lösung: Falls  $\vec{A}$  auf der Geraden liegt, sind  $\vec{v}$  und  $\vec{w}$  kollinear.

a) Wir berechnen den Richtungsvektor der Geraden

$$\vec{v} = \vec{B} - \vec{C} = \begin{pmatrix} 18 \\ -9 \\ 6 \end{pmatrix}$$

und einen Vektor, der den Punkt  $\vec{A}$  mit der Geraden verbindet

$$\vec{w} = \vec{A} - \vec{C} = \begin{pmatrix} 9 \\ -8 \\ 4 \end{pmatrix} .$$

Falls,  $\vec{v}$  und  $\vec{w}$  kollinear sind, liegt  $\vec{A}$  auf der Geraden. Hier ist aber

$$\begin{pmatrix} 18 \\ -9 \\ 6 \end{pmatrix} - 2 \begin{pmatrix} 9 \\ -8 \\ 4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 17 \\ -2 \end{pmatrix},$$

also liegt  $\vec{A}$  nicht auf der Geraden.

b) Wir berechnen den Richtungsvektor der Geraden

$$\vec{v} = \vec{B} - \vec{C} = \begin{pmatrix} 6 \\ -15 \\ 13 \end{pmatrix}$$

und einen Vektor, der den Punkt  $\vec{A}$  mit der Geraden verbindet

$$\vec{w} = \vec{A} - \vec{C} = \begin{pmatrix} 12 \\ -30 \\ 26 \end{pmatrix}.$$

Falls,  $\vec{v}$  und  $\vec{w}$  kollinear sind, liegt  $\vec{A}$  auf der Geraden. Hier ist

$$\begin{pmatrix} 12 \\ -30 \\ 26 \end{pmatrix} - 2 \begin{pmatrix} 6 \\ -15 \\ 13 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

also liegt  $\vec{A}$  auf der Geraden.

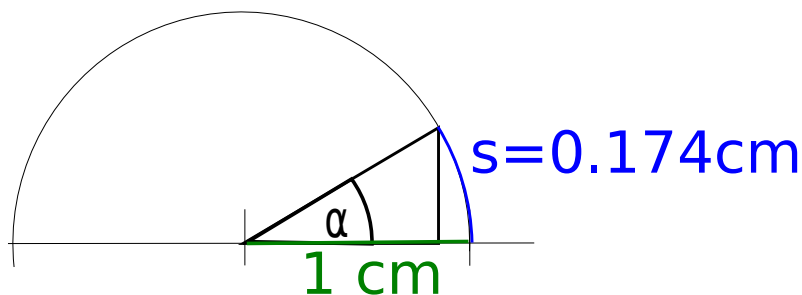
4.1	Das Bogenmass	59
4.2	Der Einheitskreis	62
4.3	Transformationen von Funktionen	68
4.4	Die allgemeine Sinusfunktion; Phase und Amplitude	79
4.5	Additionstheoreme für trigonometrische Funktionen	83
4.6	Arkus-Funktionen	86
4.7	Zerlegung und Überlagerungen von Schwingungen	88
4.8	Übungen	93

### 4.1 Das Bogenmass

**Beispiel 4.1 Kreisbogen**

EMSJBG

Wir messen auf einem Kreisbogen (Radius 1) einen Kreisbogen vom 0.174533. Wie gross ist der darunterliegende Winkel.



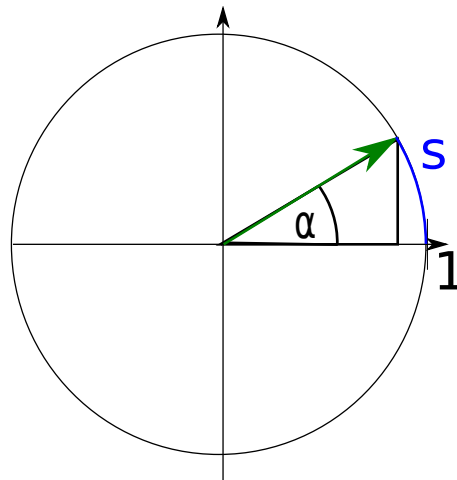
**Lösung:**

$10^\circ$

### Definition Bogenmass

Unter dem Bogenmass  $s$  eines Winkels  $\alpha$  (in Grad) verstehen wir die Länge des Bogens auf dem Einheitskreis.

$$\frac{x}{2\pi} = \frac{\alpha}{360^\circ}$$



### Beispiel 4.2 Rechne die Masseinheit um

245307

Berechne die Winkel  $s = \frac{\pi}{7}$  und  $\varphi = 12^\circ$  in beiden Masseinheiten.

**Lösung:**

Wir beginnen mit der Feststellung, dass ein voller Kreis in den beiden Masseinheiten  $2\pi$  oder  $360^\circ$  entspricht:

Bogenmass	Winkelgrad
$2\pi$	$360^\circ$
$\frac{\pi}{7}$	

Danach berechnen wir den Quotienten der dritten und zweiten Zeile ist in allen Winkel-Einheiten gleich, also

$$f = \frac{\frac{\pi}{7}}{2\pi} = \frac{\alpha}{360^\circ}.$$

Also

$$\alpha = \frac{360^\circ}{14} = 25.71^\circ.$$

Gleich verfahren wir bei der Umrechnung von Winkelgrad ins Bogenmass:

Bogenmass	Winkelgrad
$2\pi$	$360^\circ$
	$12^\circ$

Der Quotient der dritten und zweiten Zeile ist

$$f = \frac{12^\circ}{360^\circ} = \frac{x}{2\pi}.$$

Also

$$x = \frac{2\pi}{30} = 0.209.$$

**Beispiel 4.3 Bogenmass**

TC2EE3

Berechne die fehlenden Einträge im Bogenmass  $x$  oder im Winkelmaß  $\alpha$ .**Lösung:**

$\alpha$	$111^\circ$	$90^\circ$	$120^\circ$	$270^\circ$	$-15^\circ$
$x$	$\frac{37\pi}{60} = 1.94$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{2\pi}{3}$	$\frac{3\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{12}$

**Beispiel 4.4 Bogenmass**

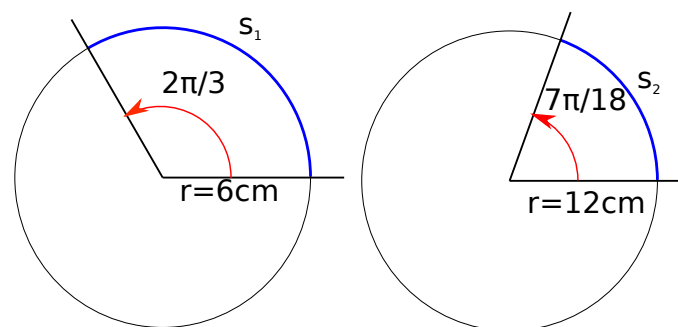
978833

Berechne die fehlenden Einträge im Bogenmass  $x$  oder im Winkelmaß  $\alpha$ .**Lösung:**

$\alpha$	$18^\circ$	$300^\circ$	$-630^\circ$	$480^\circ$	$50^\circ$
$x$	$\frac{\pi}{10}$	$\frac{5\pi}{3}$	$-\frac{7\pi}{2}$	$\frac{8\pi}{3}$	$\frac{5\pi}{18}$

**Beispiel 4.5 Bogenmass**

335331

Berechne die Bogenlänge  $s$ .**Lösung:** Die Bogenlänge berechnen wir aus dem Anteil am ganzen Kreis, d.h.

$$s = 2\pi \cdot r \cdot \frac{x}{2\pi}$$

Hier sind [in cm]:

$$s_1 = 2\pi \cdot 6 \cdot \frac{2\pi/3}{2\pi} = 4\pi$$

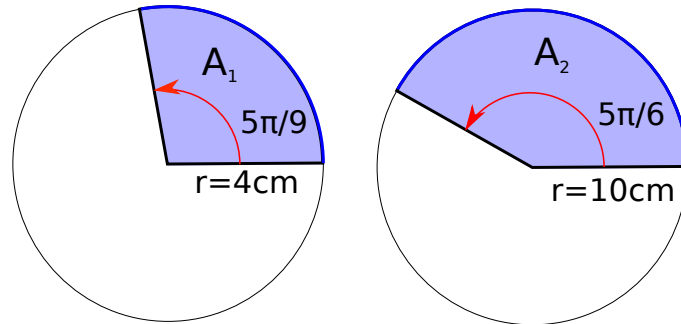
und

$$s_2 = 2\pi \cdot 12 \cdot \frac{7\pi/18}{2\pi} = \frac{14\pi}{3}$$

**Beispiel 4.6 Bogenmass**

845541

Berechne die Fläche des Kreissektors  $A$ .



**Lösung:**

Die Fläche des Kreissektors berechnen wir aus dem Anteil am ganzen Kreis, d.h.

$$A = \pi \cdot r^2 \cdot \frac{x}{2\pi}$$

Hier sind [in cm<sup>2</sup>]:

$$A_1 = \pi \cdot 4^2 \cdot \frac{5\pi/9}{2\pi} = \frac{40\pi}{9} \approx 13.96$$

und

$$A_2 = \pi \cdot 10^2 \cdot \frac{5\pi/6}{2\pi} = \frac{125\pi}{3} \approx 130.90$$

## 4.2 Der Einheitskreis

Wir definieren die trigonometrischen Funktionen als Stücke am Einheitskreis.

**Definition Winkelfunktionen**

Beachten Sie, dass die trigonometrischen Funktionen auch die Richtungen der Pfeile angeben und durch ihr Vorzeichen. Es gilt

- Für  $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$ :  $\sin(\alpha) > 0$  und  $\cos(\alpha) > 0$
- Für  $\pi < \alpha < \frac{3\pi}{2}$ :  $\sin(\alpha) < 0$  und  $\cos(\alpha) < 0$



### Infobox Winkel haben eine Richtung

In der Mathematik und in der Physik werden Winkel im Gegenuhrzeigersinn gemessen, d.h.  $10^\circ$  ist im Gegenuhrzeigersinn und  $-10^\circ$  ist im Uhrzeigersinn.

Für rechtwinklige Dreiecke gelten auch folgende Relationen. Wir werden die Relationen selten gebrauchen, weil wir uns mehr für die Beschreibung von periodischen Schwingungen interessieren.

### Infobox Relationen am rechtwinkligen Dreieck

$$\sin(\alpha) = \frac{G}{H}; \cos(\alpha) = \frac{A}{H}$$

$$\tan(\alpha) = \frac{G}{A}$$

Mit den Abkürzungen A für Ankathete, G für Gegenkathete und H für Hypotenuse.

[?, Bd. 1 III 9.1]

### Beispiel 4.7 Vorzeichen der trigonometrischen Funktionen

K4PJLD

Welche Vorzeichen haben  $\sin(\alpha)$  und  $\cos(\alpha)$  für die folgenden Winkel? Geben Sie den Quadranten an.

a)  $\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi$

b)  $\frac{3\pi}{2} < \alpha < 2\pi$

**Lösung:**

a) Q2:  $\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi$ :  $\sin(\alpha) > 0$  und  $\cos(\alpha) < 0$

b) Q3:  $\frac{3\pi}{2} < \alpha < 2\pi$ :  $\sin(\alpha) < 0$  und  $\cos(\alpha) > 0$

Wir strecken den Einheitskreis um den Faktor  $r$ . Dadurch erhalten wir einen Kreis mit Radius  $r$ .

### Satz Polarkoordinaten

Wir betrachten  $r > 0$  und  $0 \leq \varphi < 360^\circ$ . Der Vektor

$$\vec{w} = r \cdot \begin{pmatrix} \cos(\varphi) \\ \sin(\varphi) \end{pmatrix}$$

hat die Länge  $r$  und schliesst mit der  $x$ -Achse den Winkel  $\varphi$  ein. Wir nennen  $(r, \varphi)$  die Polarkoordinaten von  $\vec{w}$ .

**Beispiel 4.8 Polarkoodinaten**

7SXS1J

Addiere die Vektoren  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$ .

Ihre Polar-Koordinaten sind  $(r = 6.5, \varphi = 30^\circ)$  und  $(r = 10, \varphi = 50^\circ)$ .

**Lösung:**

Wir berechnen zuerst die Karthesischen Koordinaten

$$\vec{a} = 6.5 \cdot \begin{pmatrix} \cos(30^\circ) \\ \sin(30^\circ) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5.62917 \\ 3.25 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \vec{b} = 10 \cdot \begin{pmatrix} \cos(50^\circ) \\ \sin(50^\circ) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6.42788 \\ 7.66044 \end{pmatrix}$$

Die Summe ist also

$$\vec{a} + \vec{b} = \begin{pmatrix} 12.057 \\ 10.91 \end{pmatrix}$$

**Beispiel 4.9 Polarkoodinaten**

UCWJYR

Geben Sie die Vektoren in Karthesischen Koordinaten an.

a)  $\vec{a}$ :  $\|\vec{a}\| = 1, \varphi = 45^\circ$

e)  $\vec{e}$ :  $\|\vec{e}\| = \sqrt{2}, \varphi = -\frac{\pi}{4}$

b)  $\vec{b}$ :  $\|\vec{b}\| = 2, \varphi = -225^\circ$

f)  $\vec{f}$ :  $\|\vec{f}\| = 7, \varphi = 35^\circ$

c)  $\vec{c}$ :  $\|\vec{c}\| = 5, \varphi = \frac{5\pi}{36}$

d)  $\vec{d}$ :  $\|\vec{d}\| = 2, \varphi = 60^\circ$

g)  $\vec{g} = \vec{a} + \vec{b}$

**Lösung:**

a)  $\vec{a} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$

e)  $\vec{e} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$

b)  $\vec{b} = \begin{pmatrix} -\sqrt{2} \\ \sqrt{2} \end{pmatrix}$

f)  $\vec{f} = \begin{pmatrix} 5.73 \\ 4.02 \end{pmatrix}$

c)  $\vec{c} = \begin{pmatrix} 4.53 \\ 2.11 \end{pmatrix}$

d)  $\vec{d} = \begin{pmatrix} 1 \\ \sqrt{3} \end{pmatrix}$

g)  $\vec{g} = \begin{pmatrix} -0.707 \\ 2.12 \end{pmatrix}$

**Beispiel 4.10 Polarkoodinaten zu kartesischen Koordinaten**

NNHCXF

Geben Sie die kartesischen Koordinaten der Vektoren an. Verwenden Sie auf dem Taschenrechner den Grad modus (deg), falls Winkel in Grad angegeben sind und den Radian-Modus (rad), falls die Winkel im Bogenmass angegeben sind.

a)  $r = 5, \varphi = 216.9^\circ$

d)  $r = 85, \varphi = 25^\circ$

b)  $r = 13, \varphi = -0.4$

e)  $r = 145, \varphi = 4.55$

c)  $r = 37, \varphi = 1.24$

f)  $r = 197, \varphi = 98.2^\circ$

**Lösung:**

a)  $\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} = 5 \cdot \begin{pmatrix} \cos(216.9^\circ) \\ \sin(216.9^\circ) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -4 \\ -3 \end{pmatrix}$

d)  $\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 77.04 \\ 35.92 \end{pmatrix}$

b)  $\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} = 13 \cdot \begin{pmatrix} \cos(-0.4) \\ \sin(-0.4) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 11.97 \\ -5.06 \end{pmatrix}$

e)  $\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -23.44 \\ -143.09 \end{pmatrix}$

c)  $\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 12.02 \\ 34.99 \end{pmatrix}$

f)  $\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -28.10 \\ 194.99 \end{pmatrix}$

**Beispiel 4.11 Kompass und Winkel****IJ5I6F**

a) Nicolas läuft 3 m von Punkt O weg. Dabei schliesst er mit der positiven  $x$ -Achse einen Winkel von  $30^\circ$  ein. Beschreibe seinen Weg mit einem Pfeil in der Zeichnung und danach mit Zahlen.

b) Wo landet er, wenn er 7 m läuft und mit der positiven  $x$ -Achse einen Winkel von  $55^\circ$  einschliesst?

c) Wo landet er, wenn er beide Wege nacheinander läuft?

**Lösung:**

a)

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} 3 \cdot \cos(30^\circ) \\ 3 \cdot \sin(30^\circ) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.6 \\ -1.5 \end{pmatrix}$$

b)

$$\vec{w} = \begin{pmatrix} 7 \cdot \cos(55^\circ) \\ 7 \cdot \sin(55^\circ) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4.02 \\ -5.73 \end{pmatrix}$$

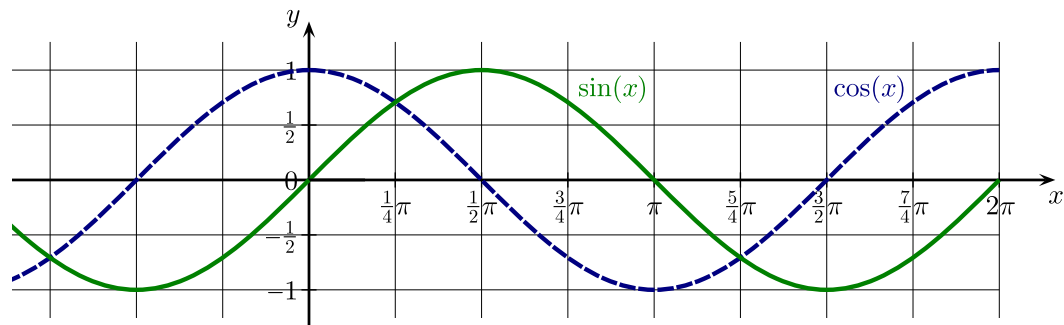
c) Gesamt

$$\vec{v} + \vec{w} = \begin{pmatrix} 6.61 \\ -7.23 \end{pmatrix}$$

**4.2.1 Graphen der trigonometrischen Funktionen**

### Infobox Funktionen

- Die Zuordnung  $x \mapsto y = f(x)$  heisst  $f(x)$  Funktion. Dabei ist  $x$  die freie Variable (Input) und  $y$  die abhängige Variable (Output).
- Wir nennen  $x$  das **Argument** von  $f$  und  $y$  den **Funktionswert**.



### Definition Eigenschaften von Funktionen

Eine Funktion  $f(t)$  heisst

- periodisch mit **Periode**  $T$ , falls  $f(t + T) = f(t)$
- **symmetrisch**, falls  $f(-t) = f(t)$
- **antisymmetrisch**, falls  $f(-t) = -f(t)$

### Beispiel 4.12 Symmetrie von Monomen

NUDTZW

Bestimme die Symmetrie der Funktionen

a)  $f(x) = x^2$

b)  $f(x) = x^3$

**Lösung:**

a)  $f(-x) = (-x)^2 = (-1)^2 \cdot x^2 = x^2$ . Also

$$f(-x) = f(x)$$

Die Funktion ist also symmetrisch.

b)  $f(-x) = (-x)^3 = (-1)^3 \cdot x^3 = -x^3$ . Also

$$f(-x) = -f(x)$$

Die Funktion ist also antisymmetrisch.

**Beispiel 4.13 Symmetrie von Monomen**

MVESAV

Bestimme die Symmetrie der Funktionen

a)  $f(x) = 1 + x^2$

c)  $f(x) = x + x^2$

b)  $f(x) = x - x^3$

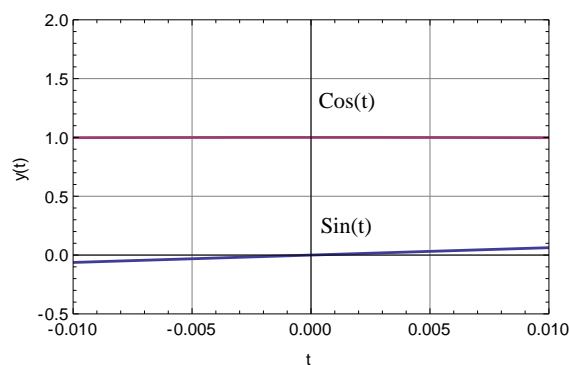
d)  $f(x) = x^3 + x^4$

**Lösung:**a)  $f(x)$  ist symmetrisch.b)  $f(x)$  ist antisymmetrisch.c)  $f(x)$  hat keine Symmetrie.d)  $f(x)$  hat keine Symmetrie.**Beispiel 4.14 Symmetrie der trigonometrischen Funktionen**

U4POS2

Benutze den Einheitskreis:

a) Sind die trigonometrischen Funktionen periodisch. Warum? Was ist ihre Periode?

b) Haben die trigonometrischen Funktionen Symmetrien. Welche? Warum? Betrachten (zeichnen) Sie dafür  $\sin(\alpha)$  und  $\cos(\alpha)$  in der Umgebung von  $\alpha = 0$ .**Lösung:**a) Spätestens nach einer Drehung um  $2\pi$  ist der Kreis geschlossen, d.h. die Graphen sind  $2\pi$  periodisch. Die  $\tan(\alpha)$ -Funktion ist sogar  $\pi$ -periodisch.b) Es gilt  $\sin(-\alpha) = -\sin(\alpha)$  und  $\cos(-\alpha) = \cos(\alpha)$ . Die Symmetrien sind in der Umgebung von 0 gut ersichtlich

Bestimme die Symmetrien der folgenden Funktionen

- |                       |                            |
|-----------------------|----------------------------|
| a) $f(x) = \sin(-x)$  | d) $f(x) = (\sin(x))^2$    |
| b) $f(x) = \cos(-x)$  | e) $f(x) = \sin(\cos(x))$  |
| c) $f(x) = \sin(x^2)$ | f) $f(x) = \cos(x - 6\pi)$ |

**Lösung:**

- a)  $f(x) = \sin(-x) = -\sin(x)$  und  $f(-x) = \sin(x) = -f(x)$ , also ist die Funktion antisymmetrisch.

Alternative: Wir nähern  $\sin(x)$  mit  $x$ , d.h. mit dem Argument. Das ist eine gute Näherung für kleine  $x$  und reicht um die Symmetrie abzulesen:

$$f(x) \approx (-x).$$

$-x$  ist eine Gerade durch den Ursprung in der  $xy$ -Ebene und also ungerade Funktion.

- b)  $f(x) = \cos(-x) = \cos(x)$  und  $f(-x) = \cos(x) = f(x)$ , also ist die Funktion symmetrisch.

Alternative: Wir nähern  $\cos(x)$  mit 1. Das ist eine gute Näherung für kleine  $x$  und reicht um die Symmetrie abzulesen:

$$f(x) \approx 1.$$

1 ist eine horizontale Gerade in der  $xy$ -Ebene und also gerade Funktion.

- c)  $f(x) = \sin(x^2)$  und  $f(-x) = \sin((-x)^2) = \sin(x^2) = f(x)$ , also ist die Funktion symmetrisch. Alternativ

$$f(x) \approx x^2$$

also ist es eine gerade Funktion.

- d) symmetrisch. Alternativ

$$f(x) \approx \cos(x) \approx 1$$

also ist es eine gerade Funktion.

- e) symmetrisch

- f) symmetrisch

### 4.3 Transformationen von Funktionen

## Satz Transformationen

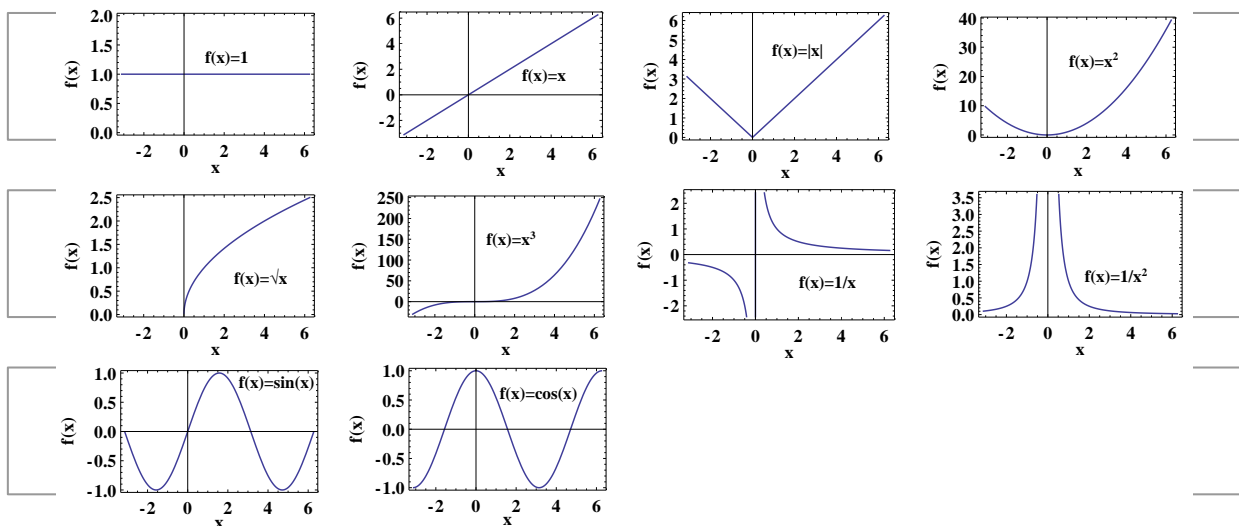
Die Funktion  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  kann wie folgt transformiert werden:

- $-f(x)$  Spiegelung an der  $x$ -Achse
- $f(-x)$  Spiegelung an der  $y$ -Achse
- $f(x) + c$  Verschiebung in Richtung der  $y$ -Achse ( $c > 0$ )
- $f(x - c)$  Verschiebung in Richtung der **positiven**  $x$ -Achse ( $c > 0$ )
- $f(a \cdot x)$  Stauchung in Richtung der  $x$ -Achse ( $a > 1$ ).
- $a \cdot f(x)$  Streckung in Richtung der  $y$ -Achse ( $a > 1$ ).

Die Transformationen entlang der  $y$ -Achse sind intuitiv, die entlang der  $x$ -Achse gehen oft gegen unsere Intuition.

## Infobox Folgerungen Transformationen

- $f(x) - c$  Verschiebung der  $y$ -Achse entgegengesetzt ( $c > 0$ )
- $f(x + c)$  Verschiebung der  $x$ -Achse entgegengesetzt ( $c > 0$ )
- $f(a \cdot x)$  Streckung in Richtung der  $x$ -Achse ( $0 < a < 1$ ).
- $a \cdot f(x)$  Stauchung in Richtung der  $y$ -Achse ( $0 < a < 1$ ).

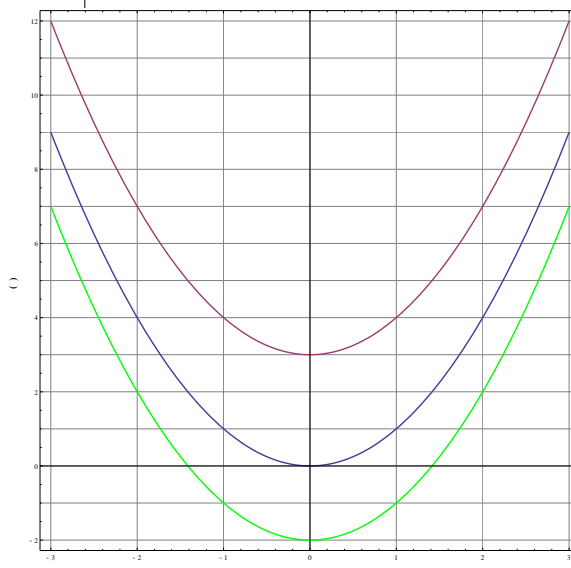


Die zehn Graphen oben zeigen die häufigsten Funktionen in der Algebra. Sie sollten schon mit den Charakteristiken dieser Graphen vertraut sein. Das wird Ihnen helfen, die Graphen der etwas komplizierteren Funktionen, die aus den einfachen Funktionen durch Transformation hervorgehen, besser zu verstehen.

- a) Ergänzen Sie die Tabelle und skizzieren Sie die Graphen.
- b) Was ändert sich zwischen  $f(x)$ ,  $g(x)$  und  $h(x)$ ? Die Form? Die Position? Beschreiben Sie Ihre Beobachtungen.
- c) Was ist der vertikale Abstand der Graphen?
- d) Wie verschiebt sich also der Graph der Funktion  $f(x)$ , wenn wir die Transformation  $y = f(x) + k$  oder  $y = f(x) - k$  mit  $k > 0$  anwenden?

**Lösung:**

$x$	$f(x) = x^2$	$g(x)x^2 - 3$	$h(x)x^2 + 2$
-4	16	13	18
-3	9	6	11
-2	4	1	6
-1	1	-2	3
0	0	-3	2
1	1	-2	3
2	4	1	6
3	9	6	11
4	16	13	18



- a) Tabelle und Plot.
- b) Zwischen  $f(x)$ ,  $g(x)$  und  $h(x)$  ändert nur die Position, nicht aber die Form.
- c) Der vertikale Abstand ist

$$\Delta = f(x) - g(x) = 3 \text{ und } \Delta' = f(x) - h(x) = -2$$

Am Rande der Zeichnung scheinen sich die Graphen vertikal zu nähern. Dies ist eine optische Täuschung. Das können wir belegen, indem wir an festen



Stellen die Funktionswerte berechnen, und miteinander vergleichen. Bei  $x = 0$

$$\begin{aligned} f(0) &= 0 \\ g(0) &= -3 \Rightarrow f(0) - g(0) = 3 \end{aligned}$$

Bei  $x = 4$ :

$$\begin{aligned} f(4) &= 16 \\ g(4) &= 13 \Rightarrow f(4) - g(4) = 3 \end{aligned}$$

- d) Der Graph der Funktion  $f(x)$  verschiebt sich nach oben (positive y-Richtung), wenn wir die Transformation  $y = f(x) + k$  ( $k > 0$ ) anwenden und nach unten bei  $y = f(x) - k$ .

#### Beispiel 4.17 Horizontale Verschiebung: Parabel

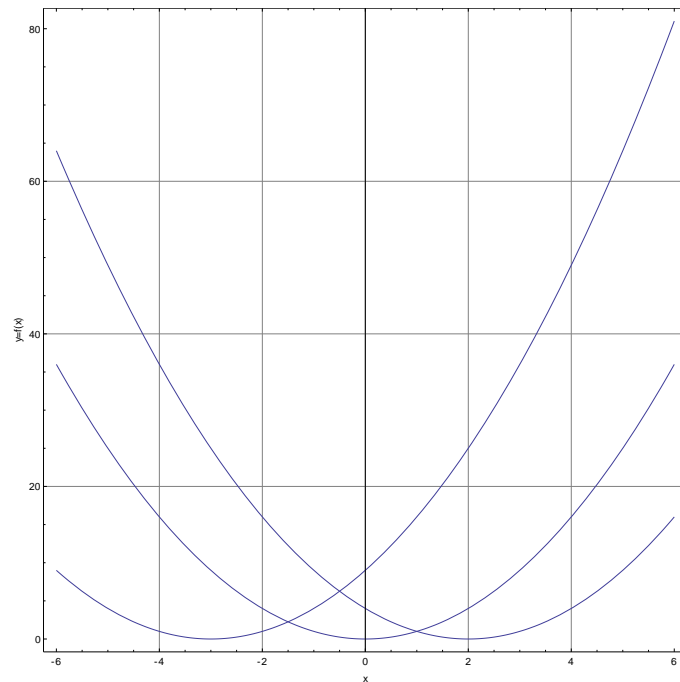
2RSKP9

Wir betrachten die Parabel  $f(x) = x^2$ . Sie hat bei  $(x, y) = (0, 0)$  einen Scheitelpunkt.

- Ergänzen Sie die Tabelle.
- Skizzieren Sie unten die Graphen.
- Wo befindet sich der Scheitelpunkt bei der Funktionen  $g(x)$  und  $h(x)$ ?
- Versuchen Sie anhand der vorherigen Teilaufgaben zu verallgemeinern: Wo hat die Funktion  $f(x) = (x - c)^2$  ihren Scheitelpunkt? Benutzen Sie dazu auch die Ausdrücke 'Verschiebung in Richtung ...'.
- Ergänzen Sie folgende Sätze:
  - “Wenn ich bei  $g(x) = f(x + 3)$  für  $x$  den Wert  $-3$  einsetze, dann ist es genauso, wie wenn ich bei  $f(x)$  für  $x$  den Wert ... einsetze.”
  - “Also ist die verschobene Funktion  $g(x) = f(x + 3)$  jetzt bei  $-3$  so, wie ursprüngliche Funktion bei ... war.”

**Lösung:**

$x$	$f(x) = x^2$	$g(x) = f(x + 3) = (x + 3)^2$	$h(x) = f(x - 2) = (x - 2)^2$
-4	16	1	36
-3	9	0	25
-2	4	1	16
-1	1	4	9
0	0	9	4
1	1	16	1
2	4	25	0
3	9	36	1
4	16	49	4



a) Tabelle

b) Plot

c) Der Scheitelpunkt der Funktion  $g(x)$  liegt bei  $x = -3$  und  $y = 0$ , der Scheitelpunkt der Funktion  $h(x)$  liegt bei  $x = 2$  und  $y = 0$ .

d) Die Funktion  $f(x) = (x - c)^2$  hat ihren Scheitelpunkt bei  $x = c$  und  $y = 0$ . Wir stellen fest, dass Transformation  $f(x - c)$  eine Verschiebung des Graphen in  $x$ -Richtung bewirkt. Ansonsten bleiben die Funktionswerte unverändert.

e) Ergänzungen:

- “Wenn ich bei  $g(x) = f(x + 3)$  für  $x$  den Wert  $-3$  einsetze, dann ist es genauso, wie wenn ich bei  $f(x)$  für  $x$  den Wert  $0$  einsetze.”
- “Also ist die verschobene Funktion  $g(x) = f(x + 3)$  jetzt bei  $-3$  so, wie ursprüngliche Funktion bei  $0$  war.”

#### Beispiel 4.18 Streckung und Stauchung

ZC38E4

Wir betrachten die Funktion  $f(x) = \sin(x)$ . Sie hat bei  $x = \pi \cdot k$  ( $k \in \mathbb{Z}$ ) Nullstellen, bei  $x = 2k\pi - \frac{\pi}{2}$  Tiefpunkte und bei  $x = 2k\pi + \frac{\pi}{2}$  Hochpunkte.

a) Ergänzen Sie die Tabelle (maximal 3 Stellen). Nutzen Sie auch Symmetrien der Funktionen aus.

b) Die Funktion  $f(x) = \sin(x)$  hat ihre charakteristische Nullstelle bei  $x = \pi$ . Welches Kriterium muss der Ausdruck im Argument der Sinusfunktion von  $g(x) = \sin(2x)$  erfüllen, damit  $g(x) = 0$ ?

- c) Bestimmen Sie die erste Nullstelle  $x > 0$  der Funktionen  $h(x)$  und  $p(x)$ . Vergleichen Sie die gefundenen Nullstellen mit der ursprünglichen Funktion  $f(x) = \sin(x)$ .
- d) Wurden die Funktionen  $g(x)$ ,  $h(x)$  und  $p(x)$  entlang der  $x$ -Achse zusammengestaucht oder gestreckt? Argumentieren Sie mit Hilfe der ersten Nullstelle und der Tabelle.
- e) Skizzieren Sie nun die Graphen der Funktion  $h(x)$ ,  $g(x)$  und  $p(x)$ .
- f) Versuchen Sie anhand der vorherigen Teilaufgaben zu verallgemeinern: Wo hat die Funktion  $f(x) = \sin(x\omega)$  ihre erste Nullstelle  $x > 0$ ? Benutzen Sie dazu auch die Ausdrücke 'Streckung des Graphen in Richtung ...'.

**Lösung:**

a) Tabelle

b) Für  $\sin(2x) = 0$  kann z.B. im Argument stehen  $2x = \pi$  und nach  $x$  aufgelöst  $x = \frac{\pi}{2}$ .

c) Die ersten Nullstelle  $x > 0$  der Funktionen liegen bei

$$\begin{aligned} g(x) = \sin(2x) &\Rightarrow 2x = \pi \Rightarrow x_1 = \frac{\pi}{2} \\ h(x) = \sin\left(\frac{1}{4} \cdot x\right) &\Rightarrow \frac{1}{4} \cdot x = \pi \Rightarrow x_2 = 4\pi \\ p(x) = \sin\left(\frac{2\pi}{5} \cdot x\right) &\Rightarrow \frac{2\pi}{5} \cdot x = \pi \Rightarrow x_3 = \frac{5}{2} \end{aligned}$$

d) Wir stellen fest

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{\pi}{2} < \pi \\ x_2 &= 4\pi > \pi \\ x_3 &= \frac{5}{2} < \pi \end{aligned}$$

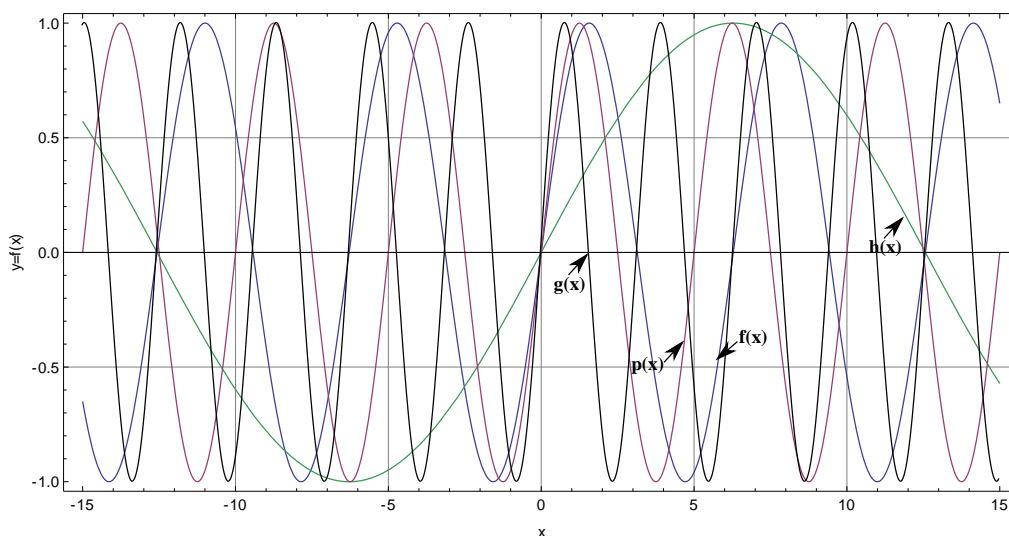
Aufgrund der Verschiebung vermuten wir:  $g(x)$  wurde gestaucht,  $h(x)$  wurde gestreckt und  $p(x)$  wurde zusammengestaucht.

e) Graphik

f) Die Funktion  $f(x) = \sin(x\omega)$  eine Nullstelle dort, wo das Argument  $x\omega = \pi$ , d.h. bei  $x = \frac{\pi}{\omega}$ .

- Für  $g(x) = \sin(2x)$  finden wir die Nullstelle  $x_1 = \frac{\pi}{2} < \pi$ . Sie liegt näher bei 0, als die der Funktion  $\sin(x)$ . Der Graph der Funktion  $\sin(2x)$  entsteht durch eine Stauchung des Graphen von  $\sin(x)$  in  $x$ -Richtung.
- Für  $h(x) = \sin\left(\frac{1}{4} \cdot x\right)$  finden wir die Nullstelle  $x_2 = 4\pi > \pi$ . Sie liegt weiter von 0 entfernt, als die der Funktion von  $\sin(x)$ . Der Graph der Funktion  $\sin\left(\frac{1}{4} \cdot x\right)$  entsteht durch eine Streckung des Graphen von  $\sin(x)$  in  $x$ -Richtung.
- Für  $p(x) = \sin\left(\frac{2\pi}{5} \cdot x\right)$  finden wir die Nullstelle  $x_3 = \frac{5}{2} < \pi$ . Sie liegt näher bei 0, als die der Funktion  $\sin(x)$ . Der Graph der Funktion  $\sin\left(\frac{2\pi}{5} \cdot x\right)$  entsteht durch eine Stauchung des Graphen von  $\sin(x)$  in  $x$ -Richtung.

$x$	$f(x) = \sin(x)$	$g(x) = \sin(2x)$	$h(x) = \sin(\frac{1}{4}x)$	$p(x) = \sin(\frac{2\pi}{5} \cdot x)$
$-4\pi$	0	0	0	0.083
-10	0.544	-0.913	-0.598	0
$-2\pi$	0	0	-1	-0.999
-5	0.959	0.544	-0.949	0
$-\pi$	0	0	-0.707	0.722
0	0	0	0	0
$\pi$	0	0	0.707107	-0.722
5	-0.959	-0.544	0.949	0
$2\pi$	0	0	1	0.999
10	-0.544	0.913	0.598	0
$4\pi$	0	0	0	-0.083



### 4.3.1 Weitere Aufgaben

#### Beispiel 4.19 Translationen

DG6A5Y

Wir betrachten die Wurzelfunktion  $f(x) = \sqrt{x}$ . Sie ist definiert, falls das Argument (hier  $x$ ) im Intervall  $[0; \infty[$  liegt.

- a) In der Funktion  $r(x) = f(x - 3) = \sqrt{x - 3}$  können wir  $x = 3$  einsetzen und erhalten

$$r(3) = f(3 - 3) = \sqrt{3 - 3} = \sqrt{0} = 0$$

Also ist  $x = 3$  die Stelle, die den Definitionsbereich nach unten begrenzt. Geben Sie die untere Grenze des Definitionsbereichs der folgenden Funktionen an:

$$g(x) = f(x - 5) = \sqrt{x - 5}, \quad h(x) = f(x + 14) = \sqrt{x + 14}$$

$$k(x) = f(x - 10) + 2 = \sqrt{x - 10} + 2, \quad p(x) = f(x + \frac{1}{4}) - 3 = \sqrt{x + \frac{1}{4}} - 3$$

- b) Ergänzen Sie folgende Sätze:

- “Wenn ich bei  $g(x) = f(x - 5)$  für  $x$  den Wert 5 einsetze, dann ist es genauso, wie wenn ich bei  $f(x)$  für  $x$  den Wert ... einsetze.”
- “Also ist die verschobene Funktion  $g(x) = f(x - 5)$  jetzt bei 5 so, wie ursprüngliche Funktion bei ... war.”

Schreiben Sie die obigen Sätze auch allgemein für die Funktion  $f(x - c)$  mit  $c \in \mathbb{R}$  auf.

- c) Zeichnen Sie die Graphen von  $f(x)$ ,  $g(x)$ ,  $h(x)$ ,  $k(x)$  und  $p(x)$  in ein gemeinsames Koordinatensystem ein. Zeichnen Sie ebenfalls den Vektor ein um den die Funktion  $f(x)$  jeweils verschoben wurde, um  $g(x)$ ,  $h(x)$ ,  $k(x)$  oder  $p(x)$  zu erhalten.
- d) Ergänzen Sie nun folgenden Satz: “Die Transformation  $f(x - c) + d$  verschiebt die Funktion  $f(x)$  ...”

### Lösung:

- a) Der Definitionsbereich begrenzt an der Stelle, wo der Ausdruck unter der Wurzel gleich Null ist.

$$\begin{aligned} g(x) &= \sqrt{x - 5} \Rightarrow x - 5 = 0 \Rightarrow x = 5 \\ h(x) &= \sqrt{x + 14} \Rightarrow x + 14 = 0 \Rightarrow x = -14 \\ k(x) &= \sqrt{x - 10} + 2 \Rightarrow x - 10 = 0 \Rightarrow x = 10 \\ p(x) &= \sqrt{x + \frac{1}{4}} - 3 \Rightarrow x + \frac{1}{4} = 0 \Rightarrow x = -\frac{1}{4} \end{aligned}$$

- b) Ergänzung:

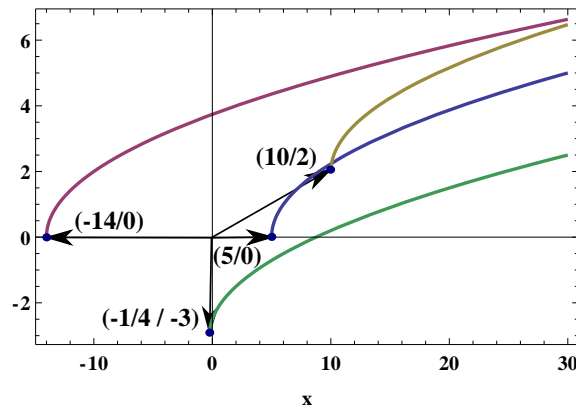
- “Wenn ich bei  $g(x) = f(x - 5)$  für  $x$  den Wert 5 einsetze, dann ist es genauso, wie wenn ich bei  $f(x)$  für  $x$  **den Wert 0** einsetze.”
- “Also ist die verschobene Funktion  $g(x) = f(x - 5)$  jetzt bei 5 so, wie ursprüngliche Funktion bei **der Stelle 0** war.”

### Allgemein:

- “Wenn ich bei  $g(x) = f(x - c)$  für  $x$  den Wert  $c$  einsetze, dann ist es genauso, wie wenn ich bei  $f(x)$  für  $x$  **den Wert 0** einsetze.”
- “Also ist die verschobene Funktion  $g(x) = f(x - c)$  jetzt bei  $c$  so, wie ursprüngliche Funktion bei **der Stelle 0** war.”

- c) Graphik unten.

- d) Ergänzung: “Die Transformation  $f(x - c) + d$  verschiebt die Funktion  $f(x)$  um  $c$ -Einheiten in Richtung der x-Achse und um  $d$  Einheiten in Richtung der y-Achse”



### Beispiel 4.20 Spiegelung

82Q57Q

Wir betrachten die Funktionen  $f(x) = \sqrt{x}$ ,  $g(x) = \sqrt{x-2}$  und  $h(x) = \sqrt{-x-2}$ .

- Ergänzen Sie die Tabelle
- Geben Sie für alle Funktionen die Stelle an, wo der Ausdruck unter der Wurzel 0 ist. In welche Richtung auf der  $x$ -Achse dürfen Sie sich von dieser Stelle aus bewegen, damit der Ausdruck unter der Wurzel positiv wird?
- Geben Sie den Definitionsbereich der Funktionen an.
- Beschreiben Sie die Zeilen 3 und 5 in Worten: Was sind ihre Ähnlichkeiten? Worin unterscheiden Sie sich?
- Erklären Sie nun die Ähnlichkeiten und Unterschiede (Zeilen 3 und 5) aufgrund der Werte in den Zeilen 2 und 4.
- Plotten Sie nun die Graphen der Funktion  $f(x) = \sqrt{x}$ ,  $g(x) = \sqrt{x-2}$  und  $h(x) = \sqrt{-x-2}$  mit Matlab oder GeoGebra.
- Wie verändern sich die Graphen der Funktion  $f(x) = \sqrt{x}$ ,  $g(x) = \sqrt{x-2}$  und  $h(x) = \sqrt{-x-2}$ , falls Sie anstatt  $f(x)$  die Funktion  $-f(x)$  etc. plotten?
- Vervollständigen Sie nun folgende Sätze: "Der Graph der Funktion  $y = f(-x)$  ergibt sich durch ... des Graphen  $f(x)$ ."  
"Der Graph der Funktion  $y = -f(x)$  ergibt sich durch ... des Graphen  $f(x)$ ."

### Lösung:

a) Tabelle

b)

$$\begin{aligned}
 f(x) = \sqrt{x} &\Rightarrow x = 0 \\
 g(x) = \sqrt{x-2} &\Rightarrow x-2 = 0 \Rightarrow x = 2 \\
 h(x) = \sqrt{-x-2} &\Rightarrow -x-2 = 0 \Rightarrow x = -2
 \end{aligned}$$

Bei  $f(x)$  darf man 0 oder grössere Werte (z.B.  $x = 2, 3$  etc.) einsetzen und der Ausdruck unter der Wurzel bleibt positiv.

Bei  $g(x)$  darf man 2 oder grössere Werte (z.B.  $x = 3, 4$  etc.) einsetzen und der Ausdruck unter der Wurzel bleibt positiv.

Bei  $h(x)$  darf man -2 oder *kleinere* Werte (z.B.  $x = -3, -4$  etc.) einsetzen und der Ausdruck unter der Wurzel bleibt positiv.

c)

$$\begin{aligned} D_f &= [0, \infty[ \\ D_g &= [2, \infty[ \\ D_h &= ]\infty, -2[ \end{aligned}$$

d) Zeilen 3 und 5 Ähnlichkeiten: In beiden treten selben Funktionswerte auf. In beiden gibt es Stellen, wo die Funktion nicht definiert ist.

Unterschiede: Die nicht definierten Funktionswerte stehen bei  $\sqrt{x-2}$  am Anfang und bei  $\sqrt{-x-2}$  am Ende.  $\sqrt{x-2}$  nimmt monoton zu und  $\sqrt{-x-2}$  nimmt monoton ab.

e) Ähnlichkeiten: Durch die Operationen  $\sqrt{x-2}$  und  $\sqrt{-x-2}$  ergibt sich aus den angegebenen x-Werten die selben Mengen. Unterschied: Die Reihenfolge der Zahlen ist umgekehrt. Wir nun aus diesen Zahlen die Wurzel gezogen, entsteht die zweimal die selbe Form des Graphen, nur ist der eine das Spiegelbild des anderen.

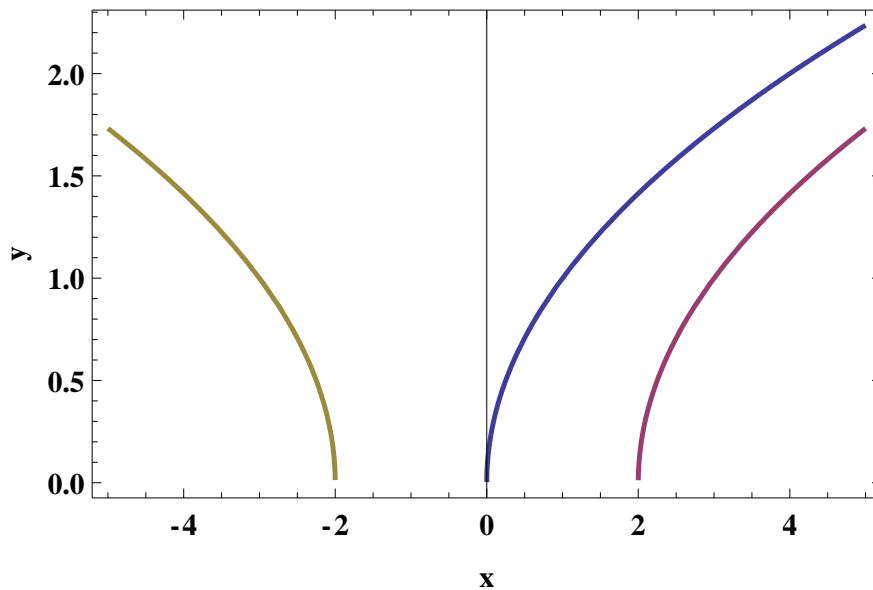
f) Graphik unten

g) Die Graphen erscheinen unter der y-Achse auf dem Kopf gestellt.

h) "Der Graph der Funktion  $y = f(-x)$  ergibt sich durch Spiegelung des Graphen  $f(x)$  an der y-Achse."

"Der Graph der Funktion  $y = -f(x)$  ergibt sich durch Spiegelung des Graphen  $f(x)$  an der x-Achse"

$x$	-18	-11	-6	-3	-2	2	3	6	11	18
$x - 2$	-20	-13	-8	-5	-4	0	1	4	9	16
$g(x) = \sqrt{x-2}$	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0	1	2	3	4
$-x - 2$	16	9	4	1	0	-4	-5	-8	-13	-20
$h(x) = \sqrt{-x-2}$	4	3	2	1	0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.



#### Beispiel 4.21 Spiegelung

879G1J

Wir betrachten die Funktion  $g(x) = 1 - 2x + x^2 + x^3$ . Bestimmen Sie

- die Funktion  $h(x)$ , die eine Spiegelung der Funktion  $g(x)$  an der x-Achse ist.
- die Funktion  $p(x)$ , die eine Spiegelung der Funktion  $g(x)$  an der y-Achse ist.
- Überprüfen Sie Ihr Resultat indem Sie alle drei Funktionen in Matlab oder GeoGebra im Bereich  $x \in [-2.2; 2.2]$  plotten.

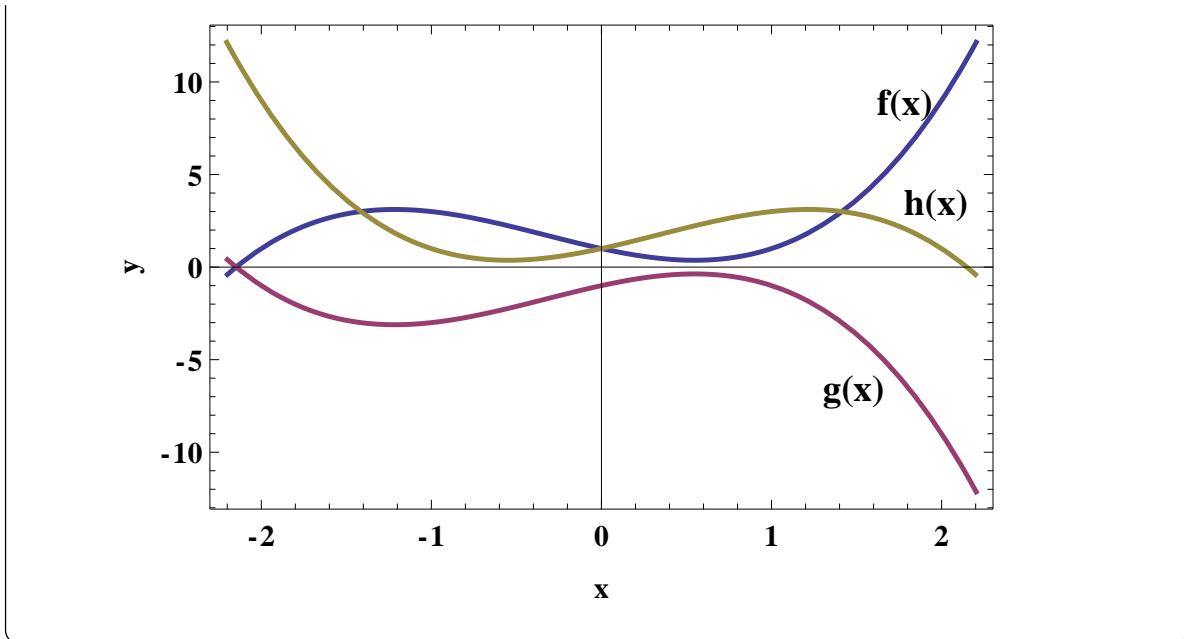
**Lösung:**

a)  $h(x) = -g(x) = -(1 - 2x + x^2 + x^3) = -1 + 2x - x^2 - x^3$

b)  $p(x) = g(-x) = 1 - 2(-x) + (-x)^2 + (-x)^3 = 1 + 2x + x^2 - x^3$

c) Graphik unten





#### 4.4 Die allgemeine Sinusfunktion; Phase und Amplitude

##### Infobox Eigenschaften der allgemeinen Sinusfunktion

Die Funktion

$$f(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot (t + c))$$

hat

- $A$  die Amplitude,
- die Periode  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ ,
- die charakteristische Nullstelle bei  $-c$

Der Nullphasenwinkel ist  $\varphi = c \cdot \omega$ .

Die Funktion

$$f(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$$

hat

- die Amplitude  $A$ ,
- die Periode  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ ,
- und den Nullphasenwinkel  $\varphi$

Die charakteristische Nullstelle liegt bei  $-\frac{\varphi}{\omega}$ .

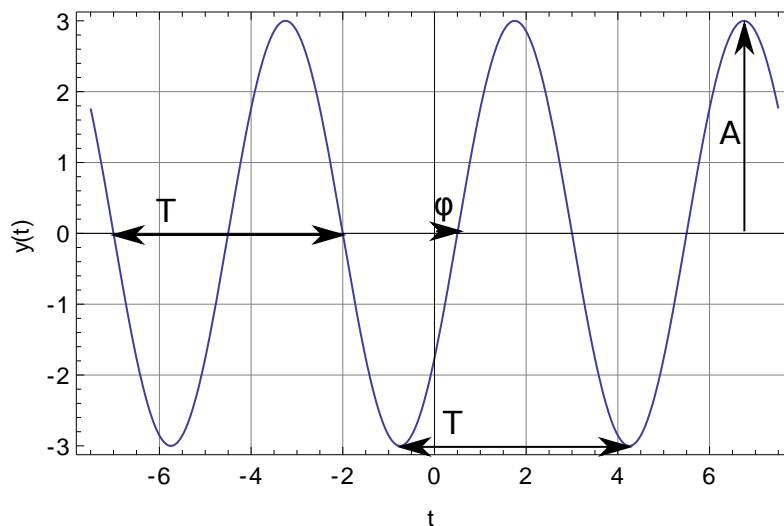
##### Beispiel 4.22 Charakteristische Größen einer harmonischen Schwingung IMSGR1

$$f(t) = 3 \sin \left( \frac{2\pi}{5} \left( t - \frac{1}{2} \right) \right) = 3 \sin \left( \frac{2\pi t}{5} - \frac{\pi}{5} \right)$$

- Geben Sie für  $f(t)$  den Nullphasenwinkel  $\varphi$ , die Amplitude  $A$  und die Periode  $T$  an.
- Zeichnen Sie ohne elektronische Hilfsmittel den Graphen der Funktionen.
- Wo erscheinen die Charakteristischen Grössen im Graphen?

**Lösung:**

- die Amplitude  $A = 3$ ,
- $\omega = \frac{2\pi}{5}$  und die Periode  $T = \frac{2\pi}{\omega} = 5$ ,
- die charakteristische Nullstelle bei  $\frac{1}{2}$ ,
- und den Nullphasenwinkel  $-\frac{\pi}{5}$ .



**Beispiel 4.23 Charakteristische Grössen einer harmonischen Schwingung**  
**IMSGR1**

$$f(t) = 5 \cos \left( \frac{\pi t}{3} - \frac{4\pi}{15} \right)$$

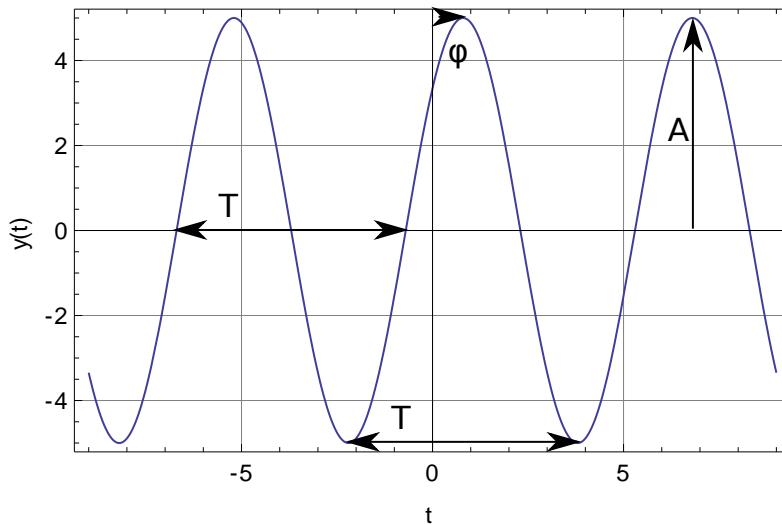
- Geben Sie für  $f(t)$  den Nullphasenwinkel  $\varphi$ , die Amplitude  $A$  und die Periode  $T$  an.
- Zeichnen Sie ohne elektronische Hilfsmittel den Graphen der Funktionen.
- Wo erscheinen die Charakteristischen Grössen im Graphen?

**Lösung:**

Wir formen um und erhalten

$$f(t) = 5 \cos\left(\frac{\pi}{3}\left(t - \frac{4}{5}\right)\right)$$

- die Amplitude  $A = 5$ ,
- $\omega = \frac{\pi}{3}$  und die Periode  $T = \frac{2\pi}{\omega} = 6$ ,
- die charakteristische Nullstelle bei  $\frac{4}{5}$ ,
- und den Nullphasenwinkel  $-\frac{4\pi}{15}$ .

**Beispiel 4.24 Trigonometrische Funktionen zeichnen****4HG9L9**

Zeichnen Sie ohne elektronische Hilfsmittel den Graphen der folgenden Funktionen. Zeichnen Sie für jeden Graph den Nullphasenwinkel  $\varphi$ , Amplitude  $A$  und Periode  $T$  ein.

a)  $f(x) = 2 \sin(x)$

g)  $f(x) = \sin\left(\frac{2\pi x}{3}\right)$

b)  $f(x) = \frac{\cos(x)}{2}$

h)  $f(x) = \cos\left(\frac{2\pi x}{4}\right)$

c)  $f(x) = \sin\left(\frac{x}{2}\right)$

i)  $f(x) = \sin\left(\frac{x}{2} - \frac{3\pi}{4}\right)$

d)  $f(x) = \cos\left(2x - \frac{\pi}{4}\right)$

j)  $f(x) = 5 \cos\left(\frac{\pi x}{2} - 2\right)$

e)  $f(x) = \cos(-x) - 2$

k)  $f(x) = \cos\left(\frac{2\pi x}{5} + 3\right) - 2$

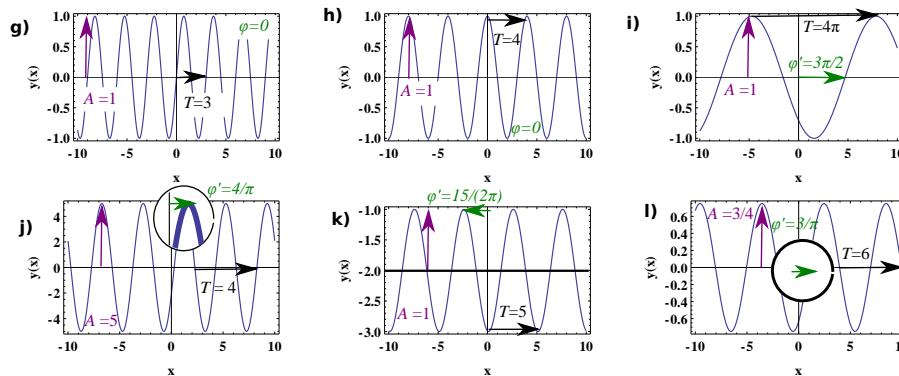
f)  $f(x) = \sin(x - \pi/2)$

l)  $f(x) = \frac{3}{4} \cdot \sin\left(\frac{\pi x}{3} - 1\right)$

**Lösung:**

Achtung bei Funktionen, die eine Verschiebung wie auch eine Kreisfrequenz enthalten:

- a)  $f(x) = \cos(2x - \frac{\pi}{4}) = \cos(2(x - \frac{\pi}{8}))$ . Die Funktion wird zu  $x = \frac{\pi}{8}$  verschoben und *dann* gestaucht mit  $\omega = 2$ .
- b)  $f(x) = \sin(\frac{x}{2} - \frac{3\pi}{4}) = \sin(\frac{1}{2} \cdot (x - \frac{3\pi}{2}))$ . Die Funktion wird zu  $x = \frac{3\pi}{2}$  verschoben und *dann* gestreckt mit  $\omega = \frac{1}{2}$ .
- c)  $f(x) = 5 \cos(\frac{\pi x}{2} - 2) = 5 \cos(\frac{\pi}{2} \cdot (x - \frac{2 \cdot 2}{\pi}))$ . Die Funktion wird zu  $x = \frac{4}{\pi}$  verschoben und *dann* gestaucht mit  $\omega = \frac{\pi}{2}$ .
- d)  $f(x) = \cos(\frac{2\pi x}{5} + 3) - 2 = \cos(\frac{2\pi}{5}(x + \frac{5 \cdot 3}{2\pi})) - 2$ . Die Funktion wird zu  $x = -\frac{15}{2\pi}$  verschoben und *dann* gestaucht mit  $\omega = \frac{2\pi}{5}$ .
- e)  $f(x) = \frac{3}{4} \cdot \sin(\frac{\pi x}{3} - 1) = \frac{3}{4} \cdot \sin(\frac{\pi}{3}(x - \frac{3}{\pi}))$ . Die Funktion wird zu  $x = \frac{3}{\pi}$  verschoben und *dann* gestaucht mit  $\omega = \frac{\pi}{3}$ .



**Beispiel 4.25 Additonstheoreme Vorbereitung**

ECQ2MU

- a) Wie hängen  $\cos(\alpha + \frac{\pi}{2})$  und  $\sin(\alpha)$  zusammen?
- b) Wie hängen  $\sin(\alpha + \frac{\pi}{2})$  und  $\cos(\alpha)$  zusammen?

**Lösung:**

Wir plotten die Funktionen und sehen:

a)  $\cos(\alpha + \frac{\pi}{2}) = -\sin(\alpha)$

$$\text{b) } \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) = \cos(\alpha)$$

## 4.5 Additionstheoreme für trigonometrische Funktionen

### Satz Additionstheoreme für trigonometrische Funktionen

$$\begin{aligned}\cos(\alpha \pm \beta) &= \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) \mp \sin(\alpha) \cdot \sin(\beta) \\ \sin(\alpha \pm \beta) &= \sin(\alpha) \cdot \cos(\beta) \pm \cos(\alpha) \cdot \sin(\beta)\end{aligned}$$

Es ist eine Kurzschreibweise, wenn wir  $\pm$  verwenden. Gemeint ist, dass  $\pm$  entweder alle oberen Zeichen ausgelsen werden, oder nur die unteren.

### Beispiel 4.26 Additionstheoreme Vorbereitung

EBP1NU

Argumentieren Sie anhand eines Zeigers am Einheitskreis

a) Berechnen Sie für  $\alpha = \frac{\pi}{18}$  die Werte

$$\sin(\alpha), \cos(\alpha), \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right), \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right), \sin(-\alpha), \cos(-\alpha)$$

Welche Zusammenhänge erkennen Sie?

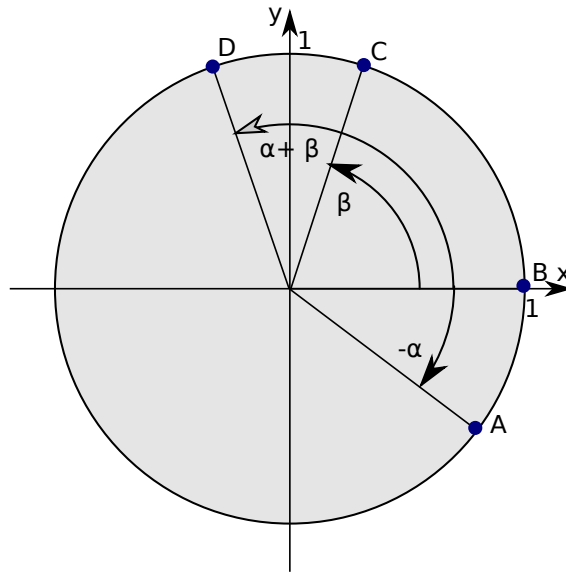
- b) Wie lässt sich aus  $\sin(-\alpha)$  das Vorzeichen aus dem trigonometrischen Ausdruck beseitigen?
- c) Wie lässt sich aus  $\cos(-\alpha)$  das Vorzeichen aus dem trigonometrischen Ausdruck beseitigen?
- d) Vereinfachen Sie  $\cos^2(\alpha) + \sin^2(\alpha)$

**Lösung:**

- a)  $\sin(\alpha) = 0.174$ ,  $\cos(\alpha) = 0.985$ ,  $\sin\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) = 0.985$   
 $\cos\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) = -0.174$ ,  $\sin(-\alpha) = -0.174$ ,  $\cos(-\alpha) = 0.174$
- b)  $\sin(-\alpha) = -\sin(\alpha)$
- c)  $\cos(-\alpha) = \cos(\alpha)$
- d)  $\cos^2(\alpha) + \sin^2(\alpha) = 1$

### Beispiel 4.27 Herleitung Additionstheorem

IJ65F9



a) Geben Sie die kartesischen Koordinaten der Punkte  $\vec{A}$ , ...,  $\vec{D}$  an.

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} \cos(-\alpha) \\ \sin(-\alpha) \end{pmatrix}, \vec{B} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{C} = \begin{pmatrix} \cos(\beta) \\ \sin(\beta) \end{pmatrix}, \vec{D} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha + \beta) \\ \sin(\alpha + \beta) \end{pmatrix},$$

b) Verbinden Sie die Punkte in Gedanken miteinander. Zwei der Verbindungen haben die selbe Länge. Welche?

$$\vec{v} = \vec{C} - \vec{A}, \vec{w} = \vec{D} - \vec{B},$$

c) Wir benennen die Verbindungen, die die selbe Länge mit  $\vec{v}$  und  $\vec{w}$ . Berechnen Sie kartesischen Koordinaten dieser Vektoren.

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} \cos(\beta) - \cos(-\alpha) \\ \sin(\beta) - \sin(-\alpha) \end{pmatrix}, \vec{w} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha + \beta) - 1 \\ \sin(\alpha + \beta) \end{pmatrix}$$

d) Benutzen Sie die Symmetrie der Trigonometrischen Funktionen um negative Winkel in trigonometrischen Funktionen zu beseitigen.

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} \cos(\beta) - \cos(\alpha) \\ \sin(\beta) + \sin(\alpha) \end{pmatrix}, \vec{w} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha + \beta) - 1 \\ \sin(\alpha + \beta) \end{pmatrix}$$

e) Geben Sie nun den folgenden Ausdruck an

$$|\vec{v}|^2 = |\vec{w}|^2$$

$$(\cos(\beta) - \cos(\alpha))^2 + (\sin(\beta) + \sin(\alpha))^2 = (\cos(\alpha + \beta) - 1)^2 + (\sin(\alpha + \beta))^2$$

f) Wir notieren  $(\sin(x))^2 = \sin^2(x)$ . Multiplizieren Sie den Term oben aus.

$$\begin{aligned} & \cos^2(\beta) + \cos^2(\alpha) - 2 \cos(\beta) \cdot \cos(\alpha) + \sin^2(\beta) + \sin^2(\alpha) + 2 \sin(\beta) \cdot \sin(\alpha) \\ = & \cos^2(\alpha + \beta) + 1^2 - 2 \cos(\alpha + \beta) + \sin^2(\alpha + \beta) \end{aligned}$$

g) Benutzen Sie  $\cos^2(x) + \sin^2(x) = 1$  (3 mal anwenden) um den Ausdruck weiter zu vereinfachen.

$$1 + 1 - 2 \cos(\beta) \cdot \cos(\alpha) + 2 \sin(\beta) \cdot \sin(\alpha) = 1 + 1 - 2 \cos(\alpha + \beta)$$

h) Lösen Sie nach  $\cos(\alpha + \beta)$  auf.

$$\begin{aligned} 2 - 2 \cos(\beta) \cdot \cos(\alpha) + 2 \sin(\beta) \cdot \sin(\alpha) &= 2 - 2 \cos(\alpha + \beta) \\ -2 \cos(\beta) \cdot \cos(\alpha) + 2 \sin(\beta) \cdot \sin(\alpha) &= -2 \cos(\alpha + \beta) \\ \cos(\beta) \cdot \cos(\alpha) - \sin(\beta) \cdot \sin(\alpha) &= \cos(\alpha + \beta) \end{aligned}$$

**Beispiel 4.28 Ausdruck für  $\cos(\alpha - \beta)$**

**KNUQTG**

$$\cos(\alpha + \gamma) = \cos(\gamma) \cdot \cos(\alpha) - \sin(\gamma) \cdot \sin(\alpha)$$

a) Setzen Sie in den Ausdruck den Winkel  $\gamma = -\beta$  ein.

$$\cos(\alpha + (-\beta)) = \cos(-\beta) \cdot \cos(\alpha) - \sin(-\beta) \cdot \sin(\alpha)$$

b) Benutzen Sie die Symmetrien-Eigenschaften um die negativen Winkel in den einfachen trigonometrischen Funktionen zu beseitigen.

$$\cos(\alpha - \beta) = \cos(\beta) \cdot \cos(\alpha) + \sin(\beta) \cdot \sin(\alpha)$$

**Beispiel 4.29 Additionstheorem  $\sin(\alpha + \gamma)$**

**8FY7QU**

$$\cos(\alpha + \gamma) = \cos(\gamma) \cdot \cos(\alpha) - \sin(\gamma) \cdot \sin(\alpha)$$

a) Setzen Sie in den Ausdruck den Winkel  $\gamma = \beta + \frac{\pi}{2}$  ein.

b) Benutzen Sie  $\cos(x + \frac{\pi}{2}) = -\sin(x)$  und  $\sin(x + \frac{\pi}{2}) = \cos(x)$  um die Summen von Winkeln in den einfachen trigonometrischen Funktionen zu beseitigen.

c) Beseitigen Sie Summen von Winkeln in den einfachen trigonometrischen Funktionen.

d) Ersetzen Sie im letzten Ausdruck  $\alpha + \beta$  durch  $\alpha - \beta$  und beseitigen sie negative Winkel in den einfachen trigonometrischen Ausdrücken.

**Lösung:**

a)  $\gamma = \beta + \frac{\pi}{2}$  einsetzen:

$$\cos\left(\alpha + \beta + \frac{\pi}{2}\right) = \cos\left(\beta + \frac{\pi}{2}\right) \cdot \cos(\alpha) - \sin\left(\beta + \frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin(\alpha)$$

b) Summen von Winkeln beseitigen

$$-\sin(\alpha + \beta) = -\sin(\beta) \cdot \cos(\alpha) - \cos(\beta) \cdot \sin(\alpha)$$

also

$$\sin(\alpha + \beta) = \sin(\beta) \cdot \cos(\alpha) + \cos(\beta) \cdot \sin(\alpha)$$

c)  $\alpha - \beta$  einsetzen

$$\sin(\alpha - \beta) = \sin(-\beta) \cdot \cos(\alpha) + \cos(-\beta) \cdot \sin(\alpha)$$

Vereinfachen

$$\sin(\alpha - \beta) = -\sin(\beta) \cdot \cos(\alpha) + \cos(\beta) \cdot \sin(\alpha)$$

**Beispiel 4.30 Darstellung**  $\cos^2(\alpha)$

AT9S8M

Zeigen Sie, dass gilt

$$\cos^2(\alpha) = \frac{1}{2} [\cos(2\alpha) + 1]$$

Werten Sie dazu

$$\cos(\alpha + \beta) = \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) - \sin(\alpha) \cdot \sin(\beta)$$

für  $\beta = \alpha$  aus.

**Lösung:**

$$\begin{array}{rcll} \cos(2\alpha) & = & \cos^2(\alpha) - \sin^2(\alpha) & | + 1 \\ \cos(2\alpha) + 1 & = & 2 \cos^2(\alpha) & | \cdot \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} [\cos(2\alpha) + 1] & = & \cos^2(\alpha) & \end{array}$$

## 4.6 Arkus-Funktionen

### Definition Arkustangens-Funktion

Die Arkustangens-Funktion ordnet den Komponenten  $x$  und  $y$  den Winkel  $\varphi$  zu.

$$\varphi = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) + \begin{cases} 0 & x > 0 \\ 180^\circ & x < 0 \end{cases}$$

Dabei sind  $x, y \in \mathbb{R}$



Wir nennen die Komponenten  $\vec{v} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix}$  auch **Kartesische Koordinaten**. Für jeden Vektor können wir daraus Betrag und  $\varphi$  (den Winkel, den  $\vec{v}$  mit der x-Achse einschliesst) berechnen. Das Paar  $v$  und  $\varphi$  bestimmt einen Vektor eindeutig. Wir nennen dieses Zahlenpaar die **Polar-Koordinaten** des Vektors  $\vec{v}$ .

**Beispiel 4.31 Kartesische- → Polar-Koordinaten**

R3601V

Berechnen Sie die Polarkoordinaten

a)  $\vec{a} = \begin{pmatrix} 7.96956 \\ -0.697246 \end{pmatrix}$

d)  $\vec{d} = \begin{pmatrix} -5 \\ 5\sqrt{3} \end{pmatrix}$

b)  $\vec{b} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ \sqrt{3} \end{pmatrix}$

e)  $\vec{e} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 + \sqrt{3} \\ -1 + \sqrt{3} \end{pmatrix}$

c)  $\vec{c} = \begin{pmatrix} 1 \\ -\sqrt{3} \end{pmatrix}$

f)  $\vec{f} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\sqrt{2} \end{pmatrix}$

**Lösung:**

a)  $a = 8, \varphi = -5^\circ$

d)  $d = 10, \varphi = 120^\circ$

b)  $b = 1, \varphi = 60^\circ$

e)  $e = 2, \varphi = 15^\circ$

c)  $c = 2, \varphi = -60^\circ$

f)  $f = \sqrt{2}, \varphi = 270^\circ$

**Infobox Inverse trigonometrische Funktionen**

- Der Zwischenwinkel zwischen zwei Vektoren  $\vec{v}$  und  $\vec{w}$  wird berechnet über

$$\varphi = \arccos\left(\frac{\vec{v} \odot \vec{w}}{|\vec{v}| \cdot |\vec{w}|}\right)$$

Dabei erhalten wir korrekterweise einen Winkel  $0 \leq \varphi < 180^\circ$  zwischen den Vektoren, und es wird korrekterweise kein Drehsinn berücksichtigt.

**Beispiel 4.32 Neigungswinkel**

084725

Berechne den Neigungswinkel für ein Gelände mit 5%, 50%, 100% und 200% Neigung.

**Lösung:**

Bei einer Neigung von 5% ist das Gelände parallel zum Vektor  $\begin{pmatrix} 100 \\ 5 \end{pmatrix}$ . Der Nei-

gunswinkel ist also

$$\varphi = \arctan\left(\frac{5}{100}\right) = 2.86^\circ$$

Analog

$$\begin{aligned}\varphi_{50} &= \arctan\left(\frac{50}{100}\right) = 26.57^\circ \\ \varphi_{100} &= \arctan\left(\frac{100}{100}\right) = 45^\circ \\ \varphi_{200} &= \arctan\left(\frac{200}{100}\right) = 63.43^\circ\end{aligned}$$

## 4.7 Zerlegung und Überlagerungen von Schwingungen

### Kosinus

#### Satz Zerlegung der Kosinus-Schwingungen

Die Funktion

$$f(t) = A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi)$$

kann geschrieben werden als

$$f(t) = a \cdot \cos(\omega \cdot t) + b \cdot \sin(\omega \cdot t) .$$

mit

- $a = A \cdot \cos(\varphi)$
- $b = -A \cdot \sin(\varphi)$ .

#### Beispiel 4.33 Zerlegung der Cosinus-Schwingungen

NFCHGJ

Gegeben  $f(t) = \sqrt{41} \cdot \cos(1 \cdot t - 0.674741)$  Zerlegen Sie das Signal in gleichfrequente cos / sin Schwingungen der Form

$$f(t) = a \cdot \cos(\omega \cdot t) + b \cdot \sin(\omega \cdot t) .$$

**Lösung:**

Wir berechnen  $b = -\sqrt{41} \cdot \sin(-0.674741) = 4$  und  $a = \sqrt{41} \cdot \cos(-0.674741) = 5$ . Also

$$f(t) = 5 \cdot \cos(1 \cdot t) + 4 \cdot \sin(1 \cdot t)$$

#### Beispiel 4.34 Zerlegung der Sinus-Schwingungen

DR61E5

Zerlegen Sie die Schwingung in gleichfrequente cos / sin Schwingungen der Form

$$f(t) = a \cdot \cos(\omega \cdot t) + b \cdot \sin(\omega \cdot t) .$$

a)  $f(t) = \sqrt{5} \cdot \cos(4t + 1.10715)$

c)  $f(t) = \sqrt{74} \cdot \cos(2t + 0.950547)$

b)  $f(t) = 5 \cdot \cos(5t + \frac{\pi}{2})$

**Lösung:**

Wir benutzen  $a = A \cdot \cos(\varphi)$  und  $b = -A \cdot \sin(\varphi)$ .

a) Wir berechnen  $b = -\sqrt{5} \cdot \sin(1.10715) = -2$  und  $a = \sqrt{5} \cdot \cos(1.10715) \cdot 1 = 1$ . Also

$$f(t) = 1 \cdot \cos(4 \cdot t) - 2 \cdot \sin(4 \cdot t)$$

b) Wir berechnen  $b = 5 \cdot \sin(\frac{\pi}{2}) = 5$  und  $a = 5 \cdot \cos(\frac{\pi}{2}) = 0$

$$f(t) = 5 \cdot \cos(5 \cdot t) + 0$$

c) Wir berechnen  $b = \sqrt{74} \cdot \sin(0.950547) = 5$  und  $a = \cos(0.950547) \cdot 1 = 7$ . Also

$$f(t) = 7 \cdot \cos(2 \cdot t) + 5 \cdot \sin(2 \cdot t)$$

**Satz Überlagerung gleichfrequenter cos / sin Schwingungen zu cos**

Für die Überlagerung

$$f(t) = a \cdot \cos(\omega \cdot t) + b \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

gilt

$$f(t) = A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi)$$

mit

- Frequenz  $\nu = \frac{\omega}{2\pi}$  oder gleichbedeutend, Periodendauer  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ .
- Amplitude  $A = \sqrt{a^2 + b^2}$
- Nullphasenwinkel  $\varphi = -\arctan\left(\frac{b}{a}\right) + \begin{cases} \pi & (a < 0) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$

**Beispiel 4.35 Überlagerung gleichfrequenter cos / sin Schwingungen IYPB5L**

Geben Sie die Superposition in der Form

$$f(t) = A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi)$$

an.

$$f(t) = \frac{5 \cdot \sqrt{3}}{2} \cdot \cos(t) + \frac{5}{2} \cdot \sin(t)$$

**Lösung:**

Wir lesen aus  $\omega = 1$  ( $f = \frac{1}{2\pi}$ ) und erhalten  $A = \sqrt{\frac{75+25}{4}} = 5$  und  $\varphi = -\arctan\left(\frac{5}{5\sqrt{3}}\right) = -\frac{\pi}{6}$ . Also

$$f(t) = \underbrace{5}_{=A} \cdot \cos\left(\underbrace{1}_{\omega} \cdot t - \underbrace{\frac{\pi}{6}}_{=\varphi}\right)$$

Bestimmen Sie Kreisfrequenz, Nullphasenwinkel und Amplitude der Superposition.

**Beispiel 4.36 Überlagerung gleichfrequenter  $\cos/\sin$  Schwingungen AU8VZS**

Geben Sie die Superposition in der Form

$$f(t) = A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi)$$

an.

a)  $f(t) = 1.76336 \cdot \cos(18t) + 2.42705 \sin(18t)$

b)  $f(t) = \cos(10t) + \sqrt{3} \cdot \sin(10t)$

c)  $f(t) = 3.36588 \cdot \cos(7t) + 2.16121 \cdot \sin(7t)$

**Lösung:**

a) Wir lesen aus  $\omega = 18$  ( $f = \frac{9}{\pi}$ ) und erhalten

$$A = \sqrt{(1.76336)^2 + (2.42705)^2} = 3$$

und

$$\varphi = -\arctan\left(\frac{2.42705}{1.76336}\right) \approx -0.942476.$$

Also

$$f(t) = 3 \cdot \cos(18 \cdot t - 0.942476)$$

b) Wir lesen aus  $\omega = 10$  ( $f = \frac{5}{\pi}$ ) und erhalten

$$A = \sqrt{1^2 + 3} = 2$$

und

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\sqrt{3}}{1}\right) = \frac{\pi}{3}.$$

Also

$$f(t) = 2 \cdot \cos\left(10 \cdot t - \frac{\pi}{3}\right)$$

c) Wir lesen aus  $\omega = 7$  ( $f = \frac{7}{2\pi}$ ) und erhalten

$$A = \sqrt{(3.36588)^2 + (2.16121)^2} = 4$$

und

$$\varphi = \arctan\left(\frac{2.16121}{3.36588}\right) \approx -0.570797.$$

Also

$$f(t) = 4 \cdot \cos(7 \cdot t - 0.570797)$$

### Satz Zerlegung der Sinus-Schwingungen

Die Funktion

$$f(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$$

kann geschrieben werden als

$$f(t) = a \cdot \cos(\omega \cdot t) + b \cdot \sin(\omega \cdot t) .$$

mit

- $a = A \cdot \sin(\varphi)$
- $b = A \cdot \cos(\varphi)$ .

### Beispiel 4.37 Zerlegung der Sinus-Schwingungen

Gegeben  $f(t) = \sqrt{41} \cdot \sin(1 \cdot t - 0.674741)$  Zerlegen Sie die Schwingung in gleichfrequente  $\cos / \sin$  Schwingungen der Form

$$f(t) = a \cdot \cos(\omega \cdot t) + b \cdot \sin(\omega \cdot t) .$$

**Lösung:**

Wir berechnen  $b = \sqrt{41} \cdot \cos(-0.674741) = 5$  und  $a = \sqrt{41} \cdot \sin(-0.674741) = -4$ . Also

$$f(t) = -4 \cdot \cos(1 \cdot t) + 5 \cdot \sin(1 \cdot t)$$

### Beispiel 4.38 Zerlegung der Sinus-Schwingungen

Z4DX95

Zerlegen Sie die Schwingung in gleichfrequente  $\cos / \sin$  Schwingungen der Form

$$f(t) = a \cdot \cos(\omega \cdot t) + b \cdot \sin(\omega \cdot t) .$$

- a)  $f(t) = \sqrt{5} \cdot \sin(4t + 1.10715)$                       c)  $f(t) = \sqrt{74} \cdot \sin(2t + 0.950547)$   
 b)  $f(t) = 5 \cdot \sin(5t + \frac{\pi}{2})$

**Lösung:**

Wir benutzen  $a = A \cdot \sin(\varphi)$  und  $b = A \cdot \cos(\varphi)$ .

a) Wir berechnen  $b = \sqrt{5} \cdot \cos(1.10715) = 1$  und  $a = \sin(1.10715) \cdot 1 = 2$ . Also

$$f(t) = 2 \cdot \cos(4 \cdot t) + 1 \cdot \sin(4 \cdot t)$$

b) Wir berechnen  $b = 5 \cdot \cos(\frac{\pi}{2}) = 0$  und  $a = 5 \cdot \sin(\frac{\pi}{2}) = 5$

$$f(t) = 5 \cdot \cos(5 \cdot t) + 0$$

c) Wir berechnen  $b = \sqrt{74} \cdot \cos(0.950547) = 5$  und  $a = \sin(0.950547) \cdot 1 = 7$ . Also

$$f(t) = 7 \cdot \cos(2 \cdot t) + 5 \cdot \sin(2 \cdot t)$$

### Satz Überlagerung gleichfrequenter cos / sin Schwingungen

Für die Überlagerung

$$f(t) = a \cdot \cos(\omega \cdot t) + b \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

gilt

$$f(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$$

mit

- Frequenz  $\nu = \frac{\omega}{2\pi}$  oder gleichbedeutend, Periodendauer  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ .
- Amplitude  $A = \sqrt{a^2 + b^2}$
- Nullphasenwinkel  $\varphi = \arctan\left(\frac{a}{b}\right) + \begin{cases} \pi & (b < 0) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$

### Beispiel 4.39 Überlagerung gleichfrequenter cos / sin Schwingungen

Geben Sie die Superposition in der Form

$$f(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$$

an.

$$f(t) = \frac{5 \cdot \sqrt{3}}{2} \cdot \cos(t) + \frac{5}{2} \cdot \sin(t)$$

**Lösung:**

Wir lesen aus  $\omega = 1$  ( $f = \frac{1}{2\pi}$ ) und erhalten  $A = \sqrt{\frac{75+25}{4}} = 5$  und  $\varphi = \arctan\left(\frac{5 \cdot \sqrt{3}}{5}\right) = \frac{\pi}{3}$ . Also

$$f(t) = \underbrace{5}_A \cdot \sin\left(\underbrace{1}_\omega \cdot t + \underbrace{\frac{\pi}{3}}_\varphi\right)$$

### Beispiel 4.40 Überlagerung gleichfrequenter cos / sin Schwingungen SXWHB9

Geben Sie die Superposition in der Form

$$f(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$$

an.

a)  $f(t) = 1.76336 \cdot \cos(18t) + 2.42705 \sin(18t)$

b)  $f(t) = \cos(10t) + \sqrt{3} \cdot \sin(10t)$

c)  $f(t) = 3.36588 \cdot \cos(7t) + 2.16121 \cdot \sin(7t)$

**Lösung:**

a) Wir lesen aus  $\omega = 18$  ( $f = \frac{9}{\pi}$ ) und erhalten

$$A = \sqrt{(1.76336)^2 + (2.42705)^2} = 3$$

und

$$\varphi = \arctan\left(\frac{1.76336}{2.42705}\right) \approx \frac{\pi}{5}.$$

Also

$$f(t) = 3 \cdot \sin\left(18 \cdot t + \frac{\pi}{5}\right)$$

b) Wir lesen aus  $\omega = 10$  ( $f = \frac{5}{\pi}$ ) und erhalten

$$A = \sqrt{1^2 + 3} = 2$$

und

$$\varphi = \arctan\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right) = \frac{\pi}{6}.$$

Also

$$f(t) = 2 \cdot \sin\left(10 \cdot t + \frac{\pi}{6}\right)$$

c) Wir lesen aus  $\omega = 7$  ( $f = \frac{7}{2\pi}$ ) und erhalten

$$A = \sqrt{(3.36588)^2 + (2.16121)^2} = 4$$

und

$$\varphi = \arctan\left(\frac{3.36588}{2.16121}\right) \approx 1.$$

Also

$$f(t) = 4 \cdot \sin(7 \cdot t + 1)$$

## 4.8 Übungen

### Beispiel 4.41 Phasenwinkel beim Sinus

QSB28F

Allgemein gilt

$$A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) = a \cdot \cos(\omega \cdot t) + b \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

a) Für  $A = 10$  und  $\varphi = 2$  berechne  $a$  und  $b$

b) Berechne nun allgemein für  $A$  und  $\varphi$  die entsprechenden Amplituden  $a$  und  $b$ .

**Lösung:**

Wir benutzen das Additionstheorem für die Sinusfunktion

$$A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) = A \cdot \{\sin(\omega \cdot t) \cdot \cos(\varphi) + \cos(\omega \cdot t) \cdot \sin(\varphi)\}$$

Wir vergleichen mit dem Ausdruck in der Aufgabenstellung (Koeffizientenvergleich) und sehen

$$A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) = \sin(\omega \cdot t) \cdot \underbrace{A \cdot \cos(\varphi)}_{=b} + \cos(\omega \cdot t) \cdot \underbrace{A \cdot \sin(\varphi)}_{=a}$$

Mit den gegebenen Zahlen erhalten wir also

$$a = 10 \cdot \sin(2) = 9.09297 \text{ und } b = 10 \cdot \cos(2) = -4.16147$$

d.h.

$$10 \cdot \sin(\omega \cdot t + 2) = 9.09297 \cdot \cos(\omega \cdot t) - 4.16147 \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

**Beispiel 4.42 Phasenwinkel beim Cosinus und beim Sinus****R2KFYJ**

Schreiben Sie folgende Ausdrücke in der Form  $A \cos(\omega t + \varphi)$

- a)  $1.36079 \cos(t\omega) - 2.67362 \sin(t\omega)$       c)  $-9.36457 \cos(t\omega) + 3.50783 \sin(t\omega)$   
 b)  $-1.13601 \cos(t\omega) - 4.86924 \sin(t\omega)$

Schreiben Sie folgende Ausdrücke in der Form  $A \sin(\omega t + \varphi)$

- d)  $0.850987 \sin(t\omega) - 2.87677 \cos(t\omega)$       f)  $30.0068 \cos(t\omega) - 13.7328 \sin(t\omega)$   
 e)  $-8.49737 \sin(t\omega) - 9.83843 \cos(t\omega)$

**Lösung:**

- a)  $3 \cos(t\omega + 1.1)$   
 b)  $5 \cos(t\omega + 1.8)$   
 c)  $10 \cos(t\omega + 3.5)$   
 d)  $3 \sin(t\omega + 5) = 3 \sin(t\omega - 1.28318)$   
 e)  $13 \sin(t\omega + 4)$   
 f)  $33 \sin(t\omega + 2)$

**Beispiel 4.43 Phasenwinkel beim Cosinus und beim Sinus****TEA3WI**



Schreiben Sie folgende Ausdrücke in der Form  $a \cos(t\omega) + b \sin(t\omega)$

a)  $8.544 \cos(\omega t - 1.21203)$

e)  $10.6301 \sin(\omega t + 5.56436)$

b)  $5.83095 \cos(\omega t + 5.25281)$

f)  $2.82843 \sin(\omega t - 0.785398)$

c)  $2.82843 \cos(\omega t + 5.49779)$

g)  $9.21954 \sin(\omega t - 0.86217)$

d)  $12.0416 \cos(\omega t - 0.844154)$

h)  $9.43398 \sin(\omega t + 5.27099)$

**Lösung:**

```
%syms w t
%li=8.544*cos(w*t-1.21203) ;
%wpa(expand(li))
% 3*cos(t*w)+ 8*sin(t*w)
```

a)  $3 \cos(t\omega) + 8 \sin(t\omega)$

f)  $-2 \cos(t\omega) + 2 \sin(t\omega)$

b)  $3 \cos(t\omega) + 5 \sin(t\omega)$

g)  $-7 \cos(t\omega) + 6 \sin(t\omega)$

c)  $2 \cos(t\omega) + 2 \sin(t\omega)$

h)  $-8 \cos(t\omega) + 5 \sin(t\omega)$

d)  $8 \cos(t\omega) + 9 \sin(t\omega)$

e)  $-7 \cos(t\omega) + 8 \sin(t\omega)$

---

5.1	Berechnung des Skalarprodukt in einer Orthogonalbasis . . . . .	96
5.2	Projektion . . . . .	105
5.3	Spiegelung und Projektionen . . . . .	108
5.4	Wieso funktioniert das? . . . . .	116
5.5	Geometrische Deutung der Gesetze für das Skalarprodukt . . . . .	123
5.6	Spezialfall $ a  = 1$ . . . . .	125
5.7	Allgemeiner Fall . . . . .	125
5.8	Komponenten-Schreibweise, Basis orthonormal . . . . .	126
5.9	Skalarprodukt in nicht orthogonaler Basis* . . . . .	127
5.10	Basiswechsel zwischen Orthogonalbasen . . . . .	128

---

## 5.1 Berechnung des Skalarprodukt in einer Orthogonalbasis

### Definition Skalarprodukt

Für  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$ , die den Winkel  $\varphi$  einschliessen, ist das Skalarprodukt

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

[?, Bd. 1 II 2.3]

**Satz Skalarprodukt für Vektoren in Komponenten-Schreibweise einer Orthonormalbasis**

Das Skalarprodukt in einer Orthonormalbasis in  $\mathbb{R}^N$  ist

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_N \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_N \end{pmatrix} = a_1 b_1 + a_2 b_2 + \dots + a_N b_N = \sum_{i=1}^N a_i b_i$$

Wie Abschnitt 5.4 zeigen wird, handelt es sich hier nicht um eine Definition sondern bereits um das Resultat einer Herleitung.

**Beispiel 5.1 In einer Orthonormalbasis****6PUK6M**

Berechnen Sie die Skalarprodukte

a)  $\vec{a} \odot \vec{b} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 4 \\ 10 \\ 3 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} 10 \\ 9 \\ 5 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix}$

b)  $\vec{c} \odot \vec{d} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} 8 \\ 1 \\ -4 \end{pmatrix}$

c)  $\vec{e} \odot \vec{f} = \begin{pmatrix} -2 \\ 5 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} -5 \\ -2 \end{pmatrix}$

**Lösung:**

a)  $\vec{a} \odot \vec{b} = 16$

b)  $\vec{c} \odot \vec{d} = -7$

c)  $\vec{e} \odot \vec{f} = 0$

**Beispiel 5.2 In einer Orthonormalbasis****M6C2WL**

Berechnen Sie die Skalarprodukte

a)  $\vec{a} \odot \vec{b} = \begin{pmatrix} 7 \\ 0 \\ 4 \\ 6 \\ 1 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} -3 \\ 9 \\ 2 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}$

b)  $\vec{c} \odot \vec{d} = \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ -3 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} 6 \\ 5 \\ 8 \end{pmatrix}$

c)  $\vec{e} \odot \vec{f} = \begin{pmatrix} 10 \\ 2 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$

Was können wir anhand dieser Resultate über den Winkel zwischen den Vektoren  $\varphi$  sagen?

**Lösung:**

a)  $\vec{a} \odot \vec{b} = 0$

b)  $\vec{c} \odot \vec{d} = -14$

c)  $\vec{e} \odot \vec{f} = 2$

Aus der Definition 5.1 schliessen wir, dass gilt

- $\vec{a} \odot \vec{b} = 0$  für  $\varphi = 90^\circ$
- $\vec{a} \odot \vec{b} < 0$  für  $\varphi > 90^\circ$
- $\vec{a} \odot \vec{b} > 0$  für  $\varphi < 90^\circ$

Mit dem Satz 5.1 können wir Winkel zwischen Vektoren berechnen. Die Definition des Skalarprodukts aufgelöst nach dem Winkel gibt

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

oder sogar

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

Andererseits wissen wir nun wie wir das Skalarprodukt und die Längen der Vektoren berechnen. Beachte, dass der Ausdruck  $\frac{\vec{a} \odot \vec{b}}{\|a\| \cdot \|b\|}$  gemäss der Schwarz'schen Ungleichung (Satz 5.4) im Bereich  $[-1; 1]$  liegt und dass deshalb der Winkel stets eindeutig definiert ist.

**Beispiel 5.3 Berechne das Skalarprodukt und den Zwischenwinkel 600065**

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

$\vec{a} \odot \vec{b} = 1$  und  $\varphi = \frac{\pi}{4}$ , d.h.  $\varphi = 45^\circ$ .

**Infobox Cos/ArcCos**

Bei der Berechnung des Zwischenwinkels mit Hilfe des Skalarprodukts und  $\arccos$  entstehen **keine** Probleme. Oder auch:

Wenn wir Zwischenwinkels mit Hilfe des Skalarprodukts und  $\arccos$  wird immer ein Winkel  $\varphi < 180^\circ$  zwischen den Vektoren berechnet.

**Beispiel 5.4 Berechne das Skalarprodukt und den Zwischenwinkel 599954**

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \vec{c} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

- $\vec{a} \odot \vec{b} = 1$  und  $\varphi = \frac{\pi}{3}$ , d.h.  $\varphi = 60^\circ$ .
- $\vec{b} \odot \vec{c} = 0$  und  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ , d.h.  $\varphi = 90^\circ$ .
- $\vec{a} \odot \vec{c} = 1$  und  $\varphi = \frac{\pi}{4}$ , d.h.  $\varphi = 45^\circ$ .

### Beispiel 5.5 Skalarprodukt, Orthogonalität

891584

Bestimme die Vektoren in der Liste, die zu  $\vec{v}$  orthogonal sind.

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} 1 \\ 5 \\ 2 \end{pmatrix}, \quad \vec{a} = \begin{pmatrix} 263 \\ -35 \\ -44 \end{pmatrix}, \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} -121 \\ 15 \\ -48 \end{pmatrix}, \quad \vec{c} = \begin{pmatrix} 71 \\ 5 \\ -48 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

$$\begin{aligned} \vec{v} \odot \vec{a} &= 0 \\ \vec{v} \odot \vec{b} &= -142 \\ \vec{v} \odot \vec{c} &= 0 \end{aligned}$$

Also stehen  $\vec{a}$  und  $\vec{c}$  orthogonal zu  $\vec{v}$

### Beispiel 5.6 Winkel zwischen Vektoren

520784

Berechne den Winkel zwischen den Vektoren  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$ .

a)

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix}, \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

b)

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

c)

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} 1351 \\ 362 \end{pmatrix}$$

d)

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

a)

$$\varphi = \arccos \left( \frac{\vec{a} \odot \vec{b}}{\|\vec{a}\| \cdot \|\vec{b}\|} \right) = 109.471^\circ$$

mit  $\vec{a} \odot \vec{b} = -1$ ,  $\|\vec{a}\| = \sqrt{3}$  und  $\|\vec{b}\| = \sqrt{3}$ .

b)  $\varphi = 90^\circ$  mit  $\vec{a} \odot \vec{b} = 0$

c)  $\varphi = 120^\circ$  mit  $\vec{a} \odot \vec{b} = -989$ ,  $\|\vec{a}\| = \sqrt{2}$  und  $\|\vec{b}\| \approx 1398.7$ .

d)  $\varphi = 60^\circ$

### 5.1.1 Norm

### 5.1.2 Normierung

#### Definition Normierter Vektor

Der Vektor  $\frac{\vec{a}}{\|\vec{a}\|}$  hat die Länge 1 und heisst deshalb **normiert**.

Achtung: Den Vektor mit  $\|\vec{a}\| = 0$  kann man nicht normieren.

#### Beispiel 5.7 Normierung

503757

Normiere den Vektor. Zeige dann, dass der normierte Vektor die Länge 1 hat.

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} -9 \\ 40 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

$$\vec{a}' = \vec{a} \frac{1}{\|\vec{a}\|} = \begin{pmatrix} -9 \\ 40 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{41}$$

Das ist die Schreibweise mit der man im Kopf am schnellsten rechnen kann. Wir könnten auch schreiben (das wird aber später umständlicher zum Rechnen):

$$\vec{a}' = \frac{\begin{pmatrix} -9 \\ 40 \end{pmatrix}}{41} \text{ oder } \vec{a}' = \begin{pmatrix} -9/41 \\ 40/41 \end{pmatrix}$$

Die Länge ist 1:

$$\|\vec{a}'\| = \left\| \frac{1}{41} \vec{a} \right\| = \left| \frac{1}{41} \right| \cdot \|\vec{a}\| = \frac{1}{41} \cdot 41 = 1$$

Dabei wurde verwendet, dass  $\|\lambda \cdot \vec{a}\| = |\lambda| \cdot \|\vec{a}\|$  gilt.

#### Beispiel 5.8 Normierung

492646

Normiere die Vektoren. Zeige dann, dass der normierte Vektor die Länge 1 hat.

$$\text{a) } \vec{a} = \begin{pmatrix} -3 \\ 4 \end{pmatrix}$$

$$\text{b) } \vec{b} = \begin{pmatrix} 5 \\ 0 \\ 12 \end{pmatrix}$$

$$\text{c) } \vec{c} = \begin{pmatrix} 0 \\ -6 \\ 8 \end{pmatrix}$$

$$\text{d) } \vec{d} = \begin{pmatrix} -20 \\ 99 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{e) } \vec{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

$$\text{a) } \vec{a}' = \vec{a} \frac{1}{\|\vec{a}\|} = \begin{pmatrix} -3 \\ 4 \end{pmatrix} \frac{1}{5}$$

Länge ist 1:

$$\|\vec{a}'\| = \left\| \frac{1}{5} \vec{a} \right\| = \left| \frac{1}{5} \right| \cdot \|\vec{a}\| = \frac{1}{5} \cdot 5 = 1$$

$$\text{b) } \vec{b}' \frac{1}{\|\vec{b}\|} = \begin{pmatrix} 5 \\ 0 \\ 12 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{13}$$

$$\text{c) } \vec{c}' \frac{1}{\|\vec{c}\|} = \begin{pmatrix} 0 \\ -6 \\ 8 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{10} = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.6 \\ 0.8 \end{pmatrix}$$

$$\text{d) } \vec{d}' \frac{1}{\|\vec{d}\|} = \begin{pmatrix} -20 \\ 99 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{101}$$

$$\text{e) } \vec{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

Länge ist 1:

$$\|\vec{x}'\| = \left\| \frac{1}{|\vec{x}|} \vec{x} \right\| = \left| \frac{1}{|\vec{x}|} \right| \cdot \|\vec{x}\| = 1$$

Die Norm oben heisst in der Fachsprache 'karthesische Norm'. Es gibt aber andere Möglichkeiten eine Norm festzulegen — siehe Beispiel 5.10.

Aus der Definition folgt ausserdem

$$\vec{a} \odot \vec{a} = \|\vec{a}\| \|\vec{a}\| \cdot \underbrace{\cos(0)}_{=1} = \|\vec{a}\|^2$$

oder also

$$\|\vec{a}\| = \sqrt{\vec{a} \odot \vec{a}}$$

Alle Normen erfüllt folgende Eigenschaften.

### Definition Definition und Eigenschaften der Norm

Die Norm ist für alle Elemente der Grundmenge definiert und es gilt:

- $\|\vec{0}\| = 0$
- $\|\lambda \cdot \vec{x}\| = |\lambda| \cdot \|\vec{x}\|$
- $\|\vec{x} + \vec{y}\| \leq \|\vec{x}\| + \|\vec{y}\|$

**Beispiel 5.9 Eigenschaften der Norm**

CESMGH

Wir wollen die Norm des Vektors  $\vec{a} = \frac{1}{5} \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \end{pmatrix}$  berechnen. Welches ist ein korrekter Ausdruck für  $\|\vec{a}\|$ ? Mehrere Antworten möglich.

a)  $\|\vec{a}\| = \frac{1}{5}$

d)  $\|\vec{a}\| = \sqrt{5}$

b)  $\|\vec{a}\| = \frac{\sqrt{5}}{5}$

e)  $\|\vec{a}\| = \frac{1}{5} \cdot \left\| \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \end{pmatrix} \right\|$

c)  $\|\vec{a}\| = \sqrt{\left(\frac{-2}{5}\right)^2 + \left(\frac{1}{5}\right)^2}$

f)  $\|\vec{a}\| = 5$

**Lösung:**

a) falsch

b)  $\|\vec{a}\| = \frac{\sqrt{5}}{5} = \frac{1}{\sqrt{5}}$ , korrektc)  $\|\vec{a}\| = \sqrt{\left(\frac{-2}{5}\right)^2 + \left(\frac{1}{5}\right)^2}$ , korrekt aber umständlich

d) falsch

e)  $\|\vec{a}\| = \frac{1}{5} \cdot \left\| \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \end{pmatrix} \right\|$ , korrekt und einfach zu berechnen

f) falsch

**Beispiel 5.10 Eine Norm?**

SROOVS

Überprüfen Sie, ob es sich bei den folgenden Funktionen um Normen handelt:

$$\vec{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^2$$

Hinweise:

Allgemeine Gesetze für den Betrag der Zahlen  $a, b \in \mathbb{R}$ 

$$|a \cdot b| = |a| \cdot |b|$$

$$|a + b| \leq |a| + |b|$$

Ausserdem gilt

$$\max\{|\lambda \cdot x_1|, |\lambda \cdot x_2|\} = |\lambda| \cdot \max\{|x_1|, |x_2|\}$$



A)  $\|\vec{x}\| = |x_1| + |x_2|$

E)  $\|\vec{x}\| = \sqrt{(x_1)^2 + (x_2)^2}$

B)  $\|\vec{x}\| = \max\{|x_1|, |x_2|\}$

F)  $\|\vec{x}\| = \sqrt{(x_1)^2 - (x_2)^2}$

C)  $\|\vec{x}\| = x_1$

D)  $\|\vec{x}\| = |x_1|$

G)  $\|\vec{x}\| = \min\{|x_1|, |x_2|\}$

**Lösung:**

A) Ist eine Norm, denn

- $\left\| \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right\| = 0$
- $\left\| \lambda \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \right\| = \left\| \begin{pmatrix} \lambda \cdot x_1 \\ \lambda \cdot x_2 \end{pmatrix} \right\| = |\lambda \cdot x_1| + |\lambda \cdot x_2| = |\lambda| \cdot (|x_1| + |x_2|) = |\lambda| \cdot \|\vec{x}\|$
- $\left\| \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} \right\| = |x_1 + y_1| + |x_2 + y_2| \leq |x_1| + |x_2| + |y_1| + |y_2| = \left\| \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \right\| + \left\| \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} \right\|$

B) Ist eine Norm, denn

- $\|\vec{0}\| = \max\{|0|, |0|\} = 0$
- $\|\lambda \cdot \vec{x}\| = \max\{|\lambda \cdot x_1|, |\lambda \cdot x_2|\} = |\lambda| \cdot \max\{|x_1|, |x_2|\} = |\lambda| \cdot \|\vec{x}\|$
- **Fallunterscheidung**  $|x_1| \leq |x_2|$  **und**  $|y_1| \leq |y_2|$ :

$$\|\vec{x} + \vec{y}\| = \max\{|x_1 + y_1|, |x_2 + y_2|\} = |x_2 + y_2|$$

Andererseits

$$\|\vec{x}\| + \|\vec{y}\| = \max\{|x_1|, |x_2|\} + \max\{|y_1|, |y_2|\} = |x_2| + |y_2|$$

Da  $|a + b| \leq |a| + |b|$  gilt, haben wir gezeigt, dass  $\|\vec{x} + \vec{y}\| \leq \|\vec{x}\| + \|\vec{y}\|$ .

**2. Fall**  $|x_2| < |x_1|$  **und**  $|y_2| < |y_1|$ :

Alle Schritte gehen gleich wie beim Fall 1, nur sind alle Indizes vertauscht  $1 \rightarrow 2$  und  $2 \rightarrow 1$ .

**3. Fall**  $|x_2| < |x_1|$  **und**  $|y_2| > |y_1|$ :

$$\|\vec{x} + \vec{y}\| = \max\{|x_1 + y_1|, |x_2 + y_2|\} = |x_2 + y_2|$$

Andererseits

$$\|\vec{x}\| + \|\vec{y}\| = \max\{|x_1|, |x_2|\} + \max\{|y_1|, |y_2|\} = |x_1| + |y_2| < |x_2| + |y_2| < |x_2 + y_2|$$

es gilt aber auch

$$= |x_1| + |y_2| < |x_1| + |y_1| < |x_1 + y_1|$$

d.h. in jedem Fall, ist  $\|\vec{x} + \vec{y}\| \leq \|\vec{x}\| + \|\vec{y}\|$ .

4. Fall  $|x_2| > |x_1|$  und  $|y_2| < |y_1|$ :

Alle Schritte gehen gleich wie beim Fall 3, nur sind alle Indizes vertauscht  $1 \rightarrow 2$  und  $2 \rightarrow 1$ .

C) Ist keine Norm, denn z.B.  $\left\| -1 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right\| = -1 \neq |-1| \cdot 1$

D) Ist eine Norm.

E) Ist eine Norm.

- $\left\| \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right\| = 0$

- 

$$\begin{aligned} \left\| \lambda \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \right\| &= \left| \begin{pmatrix} \lambda \cdot x_1 \\ \lambda \cdot x_2 \end{pmatrix} \right| = \sqrt{(\lambda x_1)^2 + (\lambda x_2)^2} \\ &= \sqrt{\lambda^2[(x_1)^2 + (x_2)^2]} = |\lambda| \cdot \sqrt{(x_1)^2 + (x_2)^2} = |\lambda| \cdot \|\vec{x}\| \end{aligned}$$

- 

$$\begin{aligned} \left\| \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} \right\|^2 &= \left\| \begin{pmatrix} x_1 + y_1 \\ x_2 + y_2 \end{pmatrix} \right\|^2 = (x_1 + y_1)^2 + (x_2 + y_2)^2 \\ &= (x_1)^2 + (y_1)^2 + (x_2)^2 + (y_2)^2 + \underbrace{2x_1 \cdot x_2 + 2y_1 \cdot y_2}_{2 \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}} \\ &= (x_1)^2 + (y_1)^2 + (x_2)^2 + (y_2)^2 + 2 \left\| \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \right\| \cdot \left\| \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} \right\| \cdot \cos(\alpha) \\ &\leq \left\| \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \right\|^2 + \left\| \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} \right\|^2 + 2 \left\| \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \right\| \cdot \left\| \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} \right\| \end{aligned}$$

Auf der anderen Seite berechnen wir (Binom):

$$\left( \left\| \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \right\| + \left\| \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} \right\| \right)^2 = \left\| \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \right\|^2 + \left\| \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} \right\|^2 + 2 \cdot \left\| \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \right\| \cdot \left\| \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} \right\|$$

Wir erhalten hier genau den Ausdruck, den wir schon oben erhalten haben. Wir können deshalb die *rechten* Seiten der Gleichungen oben vergleichen

$$\left\| \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} \right\|^2 \leq \left( \left\| \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \right\| + \left\| \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} \right\| \right)^2$$

Dieser Ausdruck gilt auch ohne Quadrierung links und rechts.

F) Ist keine Norm auf  $\mathbb{R}^2$ . In der Relativitätstheorie gilt aber für alle Vektoren  $(x_1)^2 \geq (x_2)^2$ , dann kann der Ausdruck als Norm benutzt werden.

G)  $\|\vec{x}\| = \min\{|x_1|, |x_2|\}$  ist keine Norm. Der Beweis geht zunächst analog zu Beispiel B, er versagt aber bei der Fallunterscheidung (3. Fall  $|x_2| < |x_1|$  und  $|y_2| > |y_1|$ ).

Es genügt auch folgendes eine Zahlenbeispiel anzugeben, wo die Norm versagt:

$$\vec{x} = \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \end{pmatrix}, \vec{y} = \begin{pmatrix} 4 \\ 2 \end{pmatrix}$$

Dann erhalten wir

$$\|\vec{x} + \vec{y}\| = \min\{|1+4|, |3+2|\} = 5$$

und

$$\|\vec{x}\| + \|\vec{y}\| = 1 + 2 = 3$$

Deshalb gilt hier  $\|\vec{x} + \vec{y}\| \leq \|\vec{x}\| + \|\vec{y}\|$  nicht.

### Beispiel 5.11 Richtung und Länge

TVJ58M

Geben sie die kartesischen Koordinaten des folgenden Vektors an:

$\vec{a}$  hat Länge 7 und zeigt in die Richtung  $\begin{pmatrix} 4 \\ -3 \end{pmatrix}$

**Lösung:**

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 4 \\ -3 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{4^2+(-3)^2}} \cdot 7 = \frac{7}{5} \cdot \begin{pmatrix} 4 \\ -3 \end{pmatrix}$$

### Beispiel 5.12 Richtung und Länge

SWI49N

Geben sie die kartesischen Koordinaten der folgenden Vektoren an:

a)  $\vec{a}$  hat Länge 10 und zeigt in die Richtung  $\begin{pmatrix} 8 \\ -0.5 \end{pmatrix}$

b)  $\vec{b}$  hat Länge 5 und zeigt in die Richtung  $\begin{pmatrix} -33 \\ 56 \end{pmatrix}$

c)  $\vec{c}$  hat Länge  $\lambda$  und zeigt in die Richtung  $\begin{pmatrix} 9 \\ 40 \end{pmatrix}$

d)  $\vec{d}$  hat Länge  $\nu$  und zeigt in die Richtung  $\begin{pmatrix} 4 \\ 0.5 \end{pmatrix}$

**Lösung:**

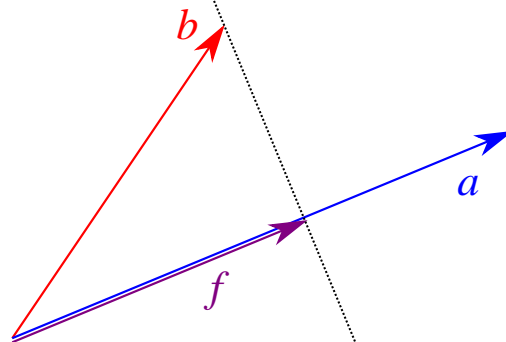
$$\text{a) } \vec{a} = \begin{pmatrix} 8 \\ -0.5 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{8^2+(-0.5)^2}} \cdot 10 = \begin{pmatrix} 9.98 \\ -0.624 \end{pmatrix}$$

$$\text{b) } \vec{b} = \frac{5}{65} \begin{pmatrix} -33 \\ 56 \end{pmatrix} = \frac{1}{13} \begin{pmatrix} -33 \\ 56 \end{pmatrix}$$

$$\text{c) } \vec{c} = \frac{\lambda}{41} \cdot \begin{pmatrix} 9 \\ 40 \end{pmatrix}$$

$$\text{d) } \vec{d} = \frac{\nu}{\sqrt{65/4}} \cdot \begin{pmatrix} 4 \\ 0.5 \end{pmatrix}$$

## 5.2 Orthogonale Projektion und Lot



### Satz Projektion und Lot

Seien  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$  zwei Vektoren. Der Vektor  $\vec{b}$  lässt sich eindeutig als  $\vec{b} = \vec{f} + \vec{h}$  schreiben, wobei  $\vec{f}$  parallel zu  $\vec{a}$  steht und  $\vec{h}$  senkrecht zu  $\vec{a}$ . Dabei sind  $\vec{f}$  und  $\vec{h}$  eindeutig festgelegt über:

$$\vec{f} = \left( \vec{b} \odot \frac{\vec{a}}{\|\vec{a}\|} \right) \cdot \frac{\vec{a}}{\|\vec{a}\|} \quad \text{und} \quad \vec{h} = \vec{b} - \vec{f}$$

### Definition Projektion und Lot

$\vec{f}$  heisst die **Projektion** von  $\vec{b}$  auf  $\vec{a}$  und  $\vec{h}$  heisst das **Lot** von  $\vec{b}$  auf  $\vec{a}$

[?, 3.1, p.398]

Die "Logik dahinter" ist, dass wir mit dem Ausdruck  $\vec{b} \odot \frac{\vec{a}}{\|\vec{a}\|}$  die Länge des Schattens von  $\vec{b}$  auf  $\vec{a}$  berechnen. Merke, dass die Länge des Schattens nur dann richtig berechnet wird, wenn das Skalarprodukt mit einem Vektor der Länge 1 berechnet wird — hier mit  $\frac{\vec{a}}{\|\vec{a}\|}$  — projiziert wird. Danach wird die Länge des Schattens mit einem Vektor der Länge 1 — auch das ist  $\frac{\vec{a}}{\|\vec{a}\|}$  — multipliziert. Deshalb hat  $\vec{f}$  genau die Länge des Schattens von  $\vec{b}$  auf  $\vec{a}$  und liegt auf der Geraden durch  $\vec{0}$  und die Spitze von  $\vec{a}$ . Übrigens projiziert man schneller, wenn man oben Faktoren etwas umordnet:

$$\vec{f} = \frac{\vec{b} \odot \vec{a}}{\vec{a} \odot \vec{a}} \cdot \vec{a}.$$

und das Vorzeichen bei der Bestimmung von  $\vec{h}$  kann sich durch den Ausdruck  $\vec{f} + \vec{h} = \vec{b}$  merken.

$$\vec{b} = \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix} \text{ und } \vec{a} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

In der Formel für die Projektion kommt der Ausdruck  $\frac{\vec{a}}{|\vec{a}|}$  zwei mal vor, deshalb berechnen wir ihn im Voraus

$$\vec{a}' = \frac{\vec{a}}{|\vec{a}|} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Damit vereinfacht sich die Projektion zu

$$\vec{f} = (\vec{b} \odot \vec{a}') \cdot \vec{a}' = \left( \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix} \odot \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 7 \\ 0 \\ 7 \end{pmatrix}$$

und

$$\vec{h} = \vec{b} - \vec{f} = \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix} - \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 7 \\ 0 \\ 7 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}$$

Berechnen Sie die Länge des Schattens von  $\vec{b}$  auf  $\vec{a}$  und geben Sie an, ob der Zwischenwinkel  $0^\circ < \varphi \leq 90^\circ$  oder  $90^\circ < \varphi \leq 180^\circ$ .

a)  $\vec{a} = \begin{pmatrix} 3 \\ -4 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} 12 \\ -1 \end{pmatrix}$

c)  $\vec{a} = \begin{pmatrix} 3 \\ -4 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \end{pmatrix}$

b)  $\vec{a} = \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} 12 \\ -1 \end{pmatrix}$

d)  $\vec{a} = \begin{pmatrix} 7 \\ -24 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} 6.84 \\ 5.12 \end{pmatrix}$

**Lösung:**

Lösung durch Projektion:

a)  $s = \vec{b} \odot \vec{a} \cdot \frac{1}{|\vec{a}|} = \begin{pmatrix} 12 \\ -1 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} 3 \\ -4 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{5} = 8$ . Die Zahl ist positiv, also ist der Zwischenwinkel  $0^\circ < \varphi \leq 90^\circ$

b)  $s = \vec{b} \odot \vec{a} \cdot \frac{1}{|\vec{a}|} = \begin{pmatrix} 12 \\ -1 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{5} = 45 \cdot \frac{1}{5} = 9$ . Die Zahl ist positiv, also ist der Zwischenwinkel  $0^\circ < \varphi \leq 90^\circ$

c)  $s = \vec{b} \odot \vec{a} \cdot \frac{1}{|\vec{a}|} = 0$ , die Vektoren stehen senkrecht aufeinander.  $\varphi = 90^\circ$

d)  $s = \vec{b} \odot \vec{a} \cdot \frac{1}{|\vec{a}|} = -3 \cdot \frac{1}{25} = \frac{-3}{25}$ . Die Zahl ist negativ, also ist der Zwischenwinkel  $90^\circ < \varphi \leq 180^\circ$ .

### Beispiel 5.15 Schatten als Vektor

JBARLL

Geben Sie den Schatten von  $\vec{b}$  auf  $\vec{a}$  als Vektor an.

a)  $\vec{a} = \begin{pmatrix} 3 \\ -4 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} 12 \\ -1 \end{pmatrix}$

c)  $\vec{a} = \begin{pmatrix} 3 \\ -4 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \end{pmatrix}$

b)  $\vec{a} = \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} 12 \\ -1 \end{pmatrix}$

d)  $\vec{a} = \begin{pmatrix} 7 \\ -24 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} 6.84 \\ 5.12 \end{pmatrix}$

**Lösung:**

a)  $\vec{f} = \vec{b} \odot \vec{a} \cdot \frac{1}{|\vec{a}|^2} \cdot \vec{a} = \begin{pmatrix} 12 \\ -1 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} 3 \\ -4 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{5^2} = \frac{8}{5} \cdot \begin{pmatrix} 3 \\ -4 \end{pmatrix}$ .

b)  $\vec{f} = \vec{b} \odot \vec{a} \cdot \frac{1}{|\vec{a}|^2} \cdot \vec{a} = \vec{b} = \begin{pmatrix} 12 \\ -1 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{5^2} \cdot \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \end{pmatrix} = 45 \cdot \frac{1}{5^2} = \frac{9}{5} \cdot \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \end{pmatrix}$ .

c) Die Vektoren stehen senkrecht aufeinander, also  $\vec{f} = \vec{0}$

d)  $\vec{f} = \vec{b} \odot \vec{a} \cdot \frac{1}{|\vec{a}|^2} \cdot \vec{a} = -3 \cdot \frac{1}{25^2} \cdot \begin{pmatrix} 7 \\ -24 \end{pmatrix} = \frac{-3}{625} \cdot \begin{pmatrix} 7 \\ -24 \end{pmatrix}$ .

### Beispiel 5.16 Geometrie am Dreieck

713581

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} 4 \\ 2 \\ -1 \end{pmatrix}, \vec{B} = \begin{pmatrix} 7 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}, \vec{C} = \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix},$$

Berechne für das Dreieck ABC die Koordinaten des Fusspunktes  $\vec{F}_C$  und den Höhenvektor  $h_C$ . Siehe auch Skizze Abbildung 5.3.

**Lösung:**

Wir berechnen die Verbindungsvektoren

$$\vec{b} = \vec{C} - \vec{A} = \begin{pmatrix} -1 \\ -2 \\ 3 \end{pmatrix}; \vec{c} = \vec{B} - \vec{A} = \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ 4 \end{pmatrix}$$

Wir berechnen die Projektion  $\vec{f}$  und das Lot  $\vec{h}_C$ , des Vektors  $\vec{b}$  auf den Vektor  $\vec{c}$ :

$$s = \vec{b} \odot \frac{\vec{c}}{|\vec{c}|} = \begin{pmatrix} -1 \\ -2 \\ 3 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ 4 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{3^2 + 4^2}} = \frac{9}{5}$$

also

$$\vec{f} = s \cdot \frac{\vec{c}}{|\vec{c}|} = \frac{9}{5} \cdot \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ 4 \end{pmatrix} \frac{1}{5} = \frac{9}{25} \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ 4 \end{pmatrix}$$

Der Fusspunkt liegt bei

$$\vec{F}_C = \vec{A} + \vec{f} = \frac{1}{25} \cdot \begin{pmatrix} 127 \\ 50 \\ 11 \end{pmatrix}$$

Und

$$\vec{h}_C = \vec{b} - \vec{f} = \frac{1}{25} \begin{pmatrix} -52 \\ -50 \\ 39 \end{pmatrix}.$$

### 5.3 Spiegelung und Projektionen

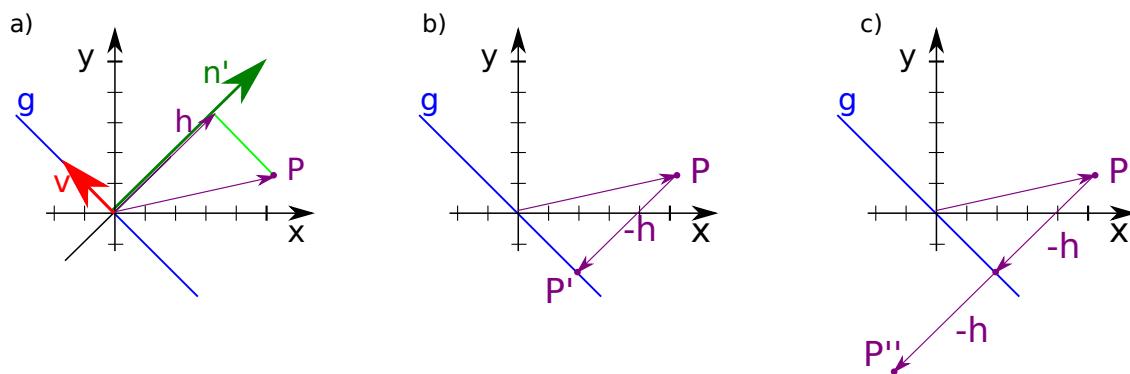


Abbildung 5.1: a) Der Ortsvektor wird auf den Normalenvektor projiziert b) Projektion:  $\vec{P} - \vec{h}$  fällt auf die Gerade c) Spiegelung:  $\vec{P} - 2\vec{h}$ .

Beachte, dass eine Gerade die Ebene in zwei Halbebenen zerschneidet. Die Projektion  $(\vec{P} \odot \vec{n}) \cdot \vec{n}$  zeigt stets in die selbe Halbebene wie  $\vec{P}$ , egal ob  $\vec{n}'$  in der selben Halbebene liegt wie  $\vec{P}$ . Deshalb bringt  $\vec{P} - \vec{h}$  den Punkt zurück auf die Gerade (Fig. 5.1), d.h. wir brauchen uns mit dem Vorzeichen in Gleichung 5.1 nicht zu beschäftigen.

**Satz Projektion und Spiegelung an einer Geraden durch  $\vec{0}$** 

Wir projizieren  $\vec{P}$  auf den Normalenvektor:

$$\vec{h} = \vec{P} \odot \frac{\vec{n}}{\|\vec{n}\|} \cdot \frac{\vec{n}}{\|\vec{n}\|} = \frac{\vec{P} \odot \vec{n}}{\vec{n} \odot \vec{n}} \cdot \vec{n}$$

Dabei ist  $\vec{n}$  ein Normalenvektor der Geraden  $g : \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix}$ .

Wir können den Punkt  $\vec{P} \in \mathbb{R}^2$  auf  $g$  projizieren durch

$$\vec{P}' = \vec{P} - \vec{h} \tag{5.1}$$

oder an  $g$  spiegeln durch

$$\vec{P}'' = \vec{P} - 2\vec{h}.$$

**Beispiel 5.17 Spiegelungen und Projektionen in  $\mathbb{R}^2$** **5A1XEX**

Spiegeln Sie den Punkt  $\vec{P}$  an der Geraden  $g$  mit dem Richtungsvektor mit  $\vec{v}$ . Projizieren Sie anschliessend  $\vec{P}$  auf  $g$ . Die Gerade  $g$  verläuft durch den Ursprung.

$$\vec{P} = \begin{pmatrix} -21.2 \\ 13.4 \end{pmatrix} \text{ und } \vec{v} = \begin{pmatrix} -4 \\ 3 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

Wir bestimmen zuerst den Normalenvektor

$$\vec{n}' = \begin{pmatrix} 3 \\ 4 \end{pmatrix}$$

und projizieren  $\vec{P}$  darauf

$$\vec{h} = \frac{\vec{P} \odot \vec{n}'}{\vec{n}' \odot \vec{n}'} \cdot \vec{n}' = \frac{-10}{25} \cdot \begin{pmatrix} 3 \\ 4 \end{pmatrix} = \frac{-2}{5} \cdot \begin{pmatrix} 3 \\ 4 \end{pmatrix}$$

Spiegelung:

$$\vec{P}'' = \vec{P} - 2\vec{h} = \begin{pmatrix} -18.8 \\ 16.6 \end{pmatrix}$$

Projektion:

$$\vec{P}' = \vec{P} - \vec{h} = \begin{pmatrix} -20 \\ 15 \end{pmatrix}$$

**Beispiel 5.18 Spiegelungen und Projektionen an einer Geraden****IES6DX**

Spiegeln Sie den Punkt  $\vec{P}$  an der Geraden  $g$  mit dem Richtungsvektor mit  $\vec{v}$ . Projizieren Sie anschliessend  $\vec{P}$  auf  $g$ . Alle Geraden  $g$  verlaufen durch den Ursprung.



$$\text{a) } \vec{P} = \begin{pmatrix} 8.4 \\ 6.2 \end{pmatrix}, \vec{v} = \begin{pmatrix} 3 \\ 4 \end{pmatrix}$$

$$\text{c) } \vec{P} = \begin{pmatrix} 16.88 \\ 47.16 \end{pmatrix}, \vec{v} = \begin{pmatrix} 7 \\ 24 \end{pmatrix}$$

$$\text{b) } \vec{P} = \begin{pmatrix} 26.85 \\ -59.23 \end{pmatrix}, \vec{v} = \begin{pmatrix} 5 \\ -12 \end{pmatrix}$$

$$\text{d) } \vec{P} = \begin{pmatrix} 120.56 \\ -33.08 \end{pmatrix}, \vec{v} = \begin{pmatrix} 24 \\ -7 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

a) Wir berechnen zuerst den Normalenvektor und normieren ihn

$$\vec{n}' = \begin{pmatrix} 4 \\ -3 \end{pmatrix} \Rightarrow \vec{h} = \begin{pmatrix} 2.4 \\ -1.8 \end{pmatrix}$$

Spiegelung:

$$\vec{P}'' = \vec{P} - 2\vec{h} = \begin{pmatrix} 3.6 \\ 9.8 \end{pmatrix}$$

Projektion:

$$\vec{P}' = \vec{P} - \vec{h} = \begin{pmatrix} 6 \\ 8 \end{pmatrix}$$

b) Wir berechnen zuerst den Normalenvektor

$$\vec{n}' = \begin{pmatrix} -12 \\ -5 \end{pmatrix} \Rightarrow \vec{h} = \begin{pmatrix} 1.8497 \\ 0.77071 \end{pmatrix}$$

Spiegelung:

$$\vec{P}'' = \vec{P} - 2\vec{h} = \begin{pmatrix} 23.15 \\ -60.77 \end{pmatrix}$$

Projektion:

$$\vec{P}' = \vec{P} - \vec{h} = \begin{pmatrix} 25 \\ -60 \end{pmatrix}$$

c) Wir berechnen zuerst den Normalenvektor

$$\vec{n}' = \begin{pmatrix} 24 \\ -7 \end{pmatrix} \Rightarrow \vec{h} = \begin{pmatrix} 2.88 \\ -0.84 \end{pmatrix}$$

Spiegelung:

$$\vec{P}'' = \vec{P} - 2\vec{h} = \begin{pmatrix} 11.12 \\ 48.84 \end{pmatrix}$$

Projektion:

$$\vec{P}' = \vec{P} - \vec{h} = \begin{pmatrix} 14 \\ 48 \end{pmatrix}$$

d) Wir berechnen zuerst den Normalenvektor und normieren ihn

$$\vec{n}' = \begin{pmatrix} -24 \\ -7 \end{pmatrix} \Rightarrow \vec{h} = \begin{pmatrix} 0.56 \\ 1.92 \end{pmatrix}$$

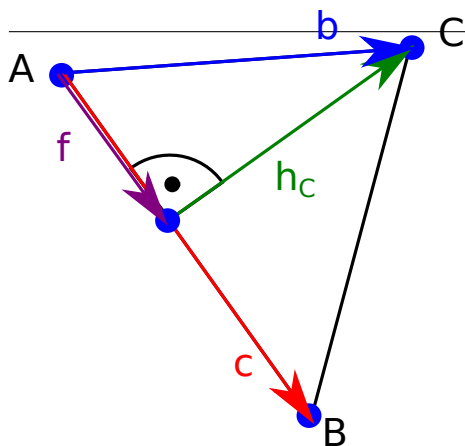


Abbildung 5.2: Zur Aufgabe 5.19

Spiegelung:

$$\vec{P}'' = \vec{P} - 2\vec{h} = \begin{pmatrix} 119.44 \\ -36.92 \end{pmatrix}$$

Projektion:

$$\vec{P}' = \vec{P} - \vec{h} = \begin{pmatrix} 120 \\ -35 \end{pmatrix}$$

**Beispiel 5.19 Geometrie am Dreieck**

713581

Berechne für das Dreieck ABC die Koordinaten des Fusspunktes  $\vec{F}_C$  und die Höhe  $h_C$ .

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} 4 \\ 2 \\ -1 \end{pmatrix}, \vec{B} = \begin{pmatrix} 7 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}, \vec{C} = \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix},$$

Siehe auch Skizze Abbildung 5.3.

**Lösung:** Wir berechnen die Projektion  $\vec{f}$  und das Lot  $\vec{h}_C$ , des Vektors  $\vec{b}$  auf den Vektor  $\vec{c}$ :

$$f = \vec{b} \odot \frac{\vec{c}}{|\vec{c}|} = \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ 4 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ 4 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{3^2 + 4^2}} = \frac{9}{5}$$

also

$$\vec{f} = f \cdot \frac{\vec{c}}{|\vec{c}|} = \frac{9}{5} \cdot \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ 4 \end{pmatrix} \frac{1}{5} = \frac{9}{25} \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ 4 \end{pmatrix}$$

und

$$\vec{h}_C = \vec{b} - \vec{f} = \frac{1}{25} \begin{pmatrix} -52 \\ -50 \\ 39 \end{pmatrix}.$$

Daraus ergibt sich die Höhe  $h_c$  des Dreiecks und der Fusspunkt

$$h_C = |\vec{h}_C| = \sqrt{269/25} \approx 3.28024$$

und

$$\vec{F}_C = \vec{A} + \vec{f} = \frac{1}{25} \begin{pmatrix} 136 \\ 48 \\ -9 \end{pmatrix} = \frac{1}{25} \begin{pmatrix} 127 \\ 50 \\ 11 \end{pmatrix}$$

**Wichtig:** Die Projektion von  $\vec{b}$  auf  $\vec{c}$  ist

$$\vec{f} = \frac{\vec{b} \odot \vec{c}}{|\vec{c}|} \cdot \frac{\vec{c}}{|\vec{c}|} = \frac{\vec{b} \odot \vec{c}}{|\vec{c}|^2} \cdot \vec{c}.$$

Die Richtung von  $\vec{f}$  hängt nur von der Richtung von  $\vec{b}$  aber nicht von der Richtung von  $\vec{c}$

Wird  $\vec{c}$  in umgekehrter Richtung gewählt — von  $\vec{B}$  zu  $\vec{A}$  — dann hätte  $\vec{f}$  immer noch die selbe Richtung:

$$\frac{\vec{b} \odot (-\vec{c})}{|(-\vec{c})|^2} \cdot (-\vec{c}) = \vec{f}$$

Hätten wir aber  $\vec{b}$  in umgekehrter Richtung gewählt — von  $\vec{C}$  zu  $\vec{A}$  — dann hätte  $\vec{f}$  die entgegengesetzte Richtung:

### Beispiel 5.20 Lot

381963

Fällen Sie das Lot vom Punkt  $\vec{C}$  auf die Gerade  $g$  und berechnen Sie den Abstand des Punktes  $\vec{C}$  zur Geraden  $g$ :

a)  $g: \vec{x} = \begin{pmatrix} 6 \\ -2 \end{pmatrix} + k \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \end{pmatrix}$  und  $\vec{C} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ .

b)  $g: \vec{x} = \begin{pmatrix} 7 \\ 7 \end{pmatrix} + k \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \end{pmatrix}$  und  $\vec{C} = \begin{pmatrix} -1 \\ 3 \end{pmatrix}$ .

**Lösung:** a) Skizze wie in Abbildung 5.3, wir stellen uns einfach vor,  $\vec{A}$  sei der Aufpunkt, und  $\vec{c}$  der Richtungsvektor der Geraden.

$$f = \vec{b} \odot \frac{\vec{c}}{\|\vec{c}\|} = \begin{pmatrix} -6 \\ 2 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{(-1)^2 + 2^2}} = 2\sqrt{5} \approx 4.47$$

also

$$\vec{f} = \|\vec{f}\| \cdot \frac{\vec{c}}{\|\vec{c}\|} = 2\sqrt{5} \cdot \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{5}} = \begin{pmatrix} -2 \\ 4 \end{pmatrix}$$

und

$$\vec{h}_C = \begin{pmatrix} -6 \\ 2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -2 \\ 4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -4 \\ -2 \end{pmatrix}$$

$$|\vec{h}_C| = 2\sqrt{5} \approx 4.47.$$

$$\text{b) } 2\sqrt{10} \approx 6.32$$

### Beispiel 5.21 Abstand, effizientes Vorgehen

797792

Bestimmen Sie den Abstand des Punktes  $\vec{C}$  von der Geraden  $g$ :

$$\text{a) } g : \vec{x} = \begin{pmatrix} 6 \\ -2 \end{pmatrix} + k \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \end{pmatrix} \text{ und } \vec{C} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

$$\text{b) } g : \vec{x} = \begin{pmatrix} 7 \\ 7 \end{pmatrix} + k \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \end{pmatrix} \text{ und } \vec{C} = \begin{pmatrix} -1 \\ 3 \end{pmatrix}.$$

**Lösung:** a) Es wird ausschliesslich der Abstand gesucht. Wir können ihn — wie so oft — als Projektion des Verbindungsvektors zwischen Punkt  $\vec{C}$  und  $g$  den Vektor  $\vec{n}$ , der senkrecht auf der Geraden steht, berechnen:

$$h = \left| \vec{n} \odot (\vec{C} - \vec{A}) \right|.$$

Der Vektor  $\vec{n}$  lässt sich schnell berechnen. Wir nehmen den Richtungsvektor, tauschen die Komponenten und multiplizieren eine Komponente mit  $-1$ :

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix} = \vec{n}'$$

Durch die Normierung erhalten wir

$$\vec{n} = \frac{1}{|\vec{n}'|} \vec{n}' = \frac{1}{\sqrt{5}} \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Also ist der Abstand

$$h = \left| \frac{1}{\sqrt{5}} \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} -6 \\ 2 \end{pmatrix} \right| = \left| \frac{1}{\sqrt{5}} \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} -6 \\ 2 \end{pmatrix} \right| = \left| \frac{-10}{\sqrt{5}} \right| = 2\sqrt{5} \approx 4.47$$

$$\text{b) } 2\sqrt{10} \approx 6.32$$

### Beispiel 5.22 Spiegelung an Geraden durch Ursprung

659289

Spiegeln Sie das Dreieck  $\vec{A} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{B} = \begin{pmatrix} 3 \\ -1 \end{pmatrix}$  und  $\vec{C} = \begin{pmatrix} 2 \\ 6 \end{pmatrix}$  an der Geraden

$$g : \vec{x} = k \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}$$

**Lösung:** Wir nennen den den Richtungsvektor der Geraden  $\vec{v}$ . Die Idee ist, dass wir den Ortsvektor der Punkte, die wir spiegeln wollen, z.B.  $\vec{B}$ ,

zerlegen in eine Komponente, parallel zu  $g$  und senkrecht zu  $g$ :

$$\vec{B} = \vec{B}_p + \vec{B}_s$$

Ist  $\vec{B}_s$  bekannt, können wir spiegeln:

$$\vec{B}' = \vec{B} - 2 \cdot \vec{B}_s.$$

$\vec{A}$  liegt auf der Geraden also gilt

$$\vec{A}' = \vec{A}.$$

Für die anderen Punkte berechnen die einen Vektor der senkrecht auf der Geraden steht durch Vertauschen der Komponenten des Richtungsvektors und Ändern eines Vorzeichens:

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \end{pmatrix} = \vec{n}'.$$

Die senkrechten Komponenten ergeben sich durch Projektion auf diesen Vektor:

$$\vec{B}_s = \vec{B} \odot \vec{n}' \frac{1}{|\vec{n}'|} = \vec{B} \odot \vec{n}' \frac{1}{|\vec{n}'|} = 7 \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{5}} \cdot \frac{1}{\sqrt{5}} = \begin{pmatrix} 14 \\ -7 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{5}$$

und genau gleich

$$\vec{C}_s = -2 \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{5} = \begin{pmatrix} -4 \\ 2 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{5}$$

Der gespiegelte Punkt ist also bei

$$\vec{B}' = \vec{B} - 2\vec{B}_s = \frac{1}{5} \begin{pmatrix} -13 \\ 9 \end{pmatrix}$$

und

$$\vec{C}' = \vec{C} - 2\vec{C}_s = \frac{1}{5} \begin{pmatrix} 18 \\ 26 \end{pmatrix}$$

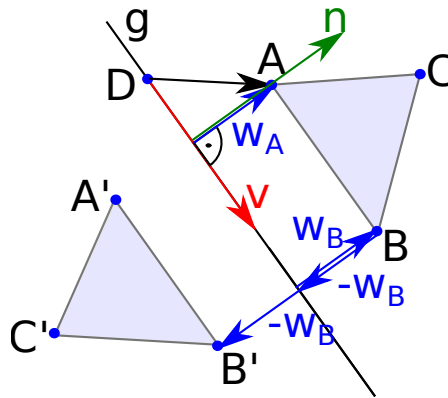
### Beispiel 5.23 Spiegelung

109810

Spiegeln Sie das Dreieck  $\vec{A} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{B} = \begin{pmatrix} 3 \\ -1 \end{pmatrix}$  und  $\vec{C} = \begin{pmatrix} 2 \\ 6 \end{pmatrix}$  an der Geraden

$$g : \vec{x} = \begin{pmatrix} 7 \\ -2 \end{pmatrix} + k \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**



Wir nennen den Aufpunkt der Geraden  $\vec{D}$  und den Richtungsvektor  $\vec{v}$ . Die Idee ist — in der Grafik wird dies anhand des Punktes  $\vec{B}$  gezeigt — dass wir einen Vektor berechnen,  $g$  und den Punkt  $\vec{B}$  verbindet und der senkrecht auf  $g$  steht. Wir nennen diesen Vektor  $\vec{w}_B$ . Ist der bekannt, kann der Spiegelpunkt berechnet werden als

$$\vec{B}' = \vec{B} - 2\vec{w}_B .$$

Wie wird  $\vec{w}_B$  berechnet? Diese Methode wird anhand von Punkt  $\vec{A}$  gezeigt: Wir berechnen den Vektor  $\vec{n}$ , der senkrecht auf  $g$  steht und normiert ist. Dafür nehmen wir den Richtungsvektor, tauschen die Komponenten und multiplizieren eine Komponente mit  $-1$ :

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} 2 \\ -2 \end{pmatrix} = \vec{n}'$$

Durch die Normierung erhalten wir

$$\vec{n} = \frac{1}{|\vec{n}'|} \vec{n}' = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} .$$

Die Projektion auf diesen Vektor ist

$$\vec{w}_A = \vec{n} \odot (\vec{A} - \vec{D}) \cdot \vec{n} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 9 \\ -9 \end{pmatrix}$$

Der gespiegelte Punkt ist also bei

$$\vec{A}' = \vec{A} - 2\vec{w}_A = \begin{pmatrix} 9 \\ -9 \end{pmatrix}$$

Weitere (Zwischen-) Resultate:

$$\vec{w}_B = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -5 \\ 5 \end{pmatrix}, \vec{w}_C = \begin{pmatrix} -2 \\ 4 \end{pmatrix} .$$

Die gespiegelten Punkte ergeben sich zu

$$\vec{B}' = \begin{pmatrix} 8 \\ -6 \end{pmatrix}, \vec{C}' = \begin{pmatrix} 15 \\ -7 \end{pmatrix} .$$

## 5.4 Wieso funktioniert das?

### Gesetze für das Skalarprodukt

#### Satz Gesetze für das Skalarprodukt

- |  |                          |
|--|--------------------------|
| 1. $\vec{a} \odot \vec{b} = \vec{b} \odot \vec{a}$ ,                                     | Kommutativ-Gesetz        |
| 2. $(r \cdot \vec{b}) \odot \vec{a} = r(\vec{b} \odot \vec{a})$ ,                        | Assoziativ-Gesetz        |
| 3. $(\vec{b} + \vec{c}) \odot \vec{a} = \vec{b} \odot \vec{a} + \vec{c} \odot \vec{a}$ , | Distributiv-Gesetz       |
| 4. $ \vec{a} \odot \vec{b}  \leq  \vec{a}  \cdot  \vec{b} $ ,                            | Schwarz'sche Ungleichung |

[?, Bd. 1 II 3.3] [?, 3.1,p.394]

Für die erste Gleichung wurde verwendet, dass

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

Bisher haben wir ausschliesslich die abstrakte Schreibweise für Vektoren benutzt. Im Folgenden werden wir herleiten, wie man das Skalarprodukt für Vektoren in Komponenten-Schreibweise berechnet.

#### Beispiel 5.24 Gesetze Skalarprodukt

D9YQP1

$$\vec{a} = \frac{1}{5} \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Wir wollen das Skalarprodukt für die obigen Vektoren berechnen. Welche Ausdrücke sind korrekt? Mehrere Antworten möglich.

- a)  $\vec{a} \odot \vec{b} = \frac{1}{5} \left( \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right)$
- b)  $\vec{a} \odot \vec{b} = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$
- c)  $\vec{a} \odot \vec{b} = 2$
- d)  $\vec{a} \odot \vec{b} = \frac{2}{5}$
- e)  $\vec{a} \odot \vec{b} = \left| \frac{1}{5} \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix} \right| \cdot \left| \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right| \cdot \cos(45^\circ)$
- f)  $\vec{a} \odot \vec{b} = \vec{b} \odot \vec{a}$

**Lösung:**

- a) korrekt (Assoziativität des Skalarprodukts)

b) nicht korrekt; Das Skalarprodukt ist definiert als

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

deshalb beeinflusst die Länge der Vektoren das Endresultat.

c) nicht korrekt; sieht oben

d) korrekt:  $\vec{a} \odot \vec{b} = \frac{2}{5}$

e) korrekt; Definition des Skalarprodukts

f) korrekt; das Skalarprodukts ist kommutativ

### Beispiel 5.25 Rechenregeln Skalarprodukt

248034

Es seien die Skalarprodukte

$$\vec{a} \odot \vec{b} = \vec{a} \odot \vec{c} = \vec{b} \odot \vec{c} = \frac{1}{2} \text{ und } \|\vec{a}\| = \|\vec{b}\| = \|\vec{c}\| = 1.$$

Berechne

a)  $\vec{b} \odot \vec{a}$

c)  $\vec{b} \odot (\vec{b} - \vec{c})$

b)  $\vec{a} \odot (\vec{b} + \vec{c})$

d)  $(\vec{a} + \vec{b}) \odot (\vec{b} - \vec{c})$

**Lösung:**

a) Gemäss der Regeln für das Skalarprodukt und der Aufgabenstellung gilt  $\vec{b} \odot \vec{a} = \vec{a} \odot \vec{b} = \frac{1}{2}$

b)

$$\vec{a} \odot (\vec{b} + \vec{c}) = \vec{a} \odot \vec{b} + \vec{a} \odot \vec{c} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}$$

c)

$$\vec{b} \odot (\vec{b} - \vec{c}) = \vec{b} \odot \vec{b} - \vec{b} \odot \vec{c} = 1 - \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$$

d)

$$(\vec{a} + \vec{b}) \odot (\vec{b} - \vec{c}) = (\vec{a} + \vec{b}) \odot \vec{b} - (\vec{a} + \vec{b}) \odot \vec{c}$$

also

$$\vec{a} \odot \vec{b} + \vec{b} \odot \vec{b} - (\vec{a} \odot \vec{c} + \vec{b} \odot \vec{c}) = \frac{1}{2} + 1 - \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\right) = \frac{1}{2}$$

### Beispiel 5.26 Herleitung der Parallelprojektion

C1N49E



Leiten Sie den Ausdruck

$$\vec{f} = \underbrace{\frac{\vec{b} \odot \vec{a}}{\|\vec{a}\|}}_{\text{skalare Komponente}} \cdot \frac{\vec{a}}{\|\vec{a}\|}.$$

für die Parallelprojektion her. Gehen Sie wie folgt vor

a)  $\vec{f}$  ist parallel zu  $\vec{a}$  für  $k \in \mathbb{R}$  und lassen vorerst  $k \in \mathbb{R}$  offen. Wir schreiben also  $\vec{f} = k \cdot \vec{a}$ . Berechnen Sie

$$(\vec{b} - \vec{f}) \odot \vec{a}$$

b) Kombinieren Sie die beiden Ausdrücke und lösen sie nach  $k$  auf.

c) Benutzen Sie die Resultate aus a) und b) und schreiben Sie  $\vec{f}$  aus.

d) Benutzen Sie

$$\vec{a} \odot \vec{a} = \|\vec{a}\|^2 = \|\vec{a}\| \cdot \|\vec{a}\|$$

und geben Sie die skalare Komponente von  $\vec{b}$  bezüglich  $\vec{a}$  an.

### Lösung:

a) Wir<sup>a</sup> finden

$$(\vec{b} - \vec{f}) \odot \vec{a} = 0$$

Oder in Worten  $\vec{f}$  ist parallel zu  $\vec{a}$  und senkrecht zu  $(\vec{b} - \vec{f})$ . Das ist die Definition der Projektion.

b) Einsetzen, vereinfachen und auflösen  $k$ :

$$\begin{aligned} (\vec{b} - k \cdot \vec{a}) \odot \vec{a} &= 0 \\ \Rightarrow k &= \frac{\vec{b} \odot \vec{a}}{\vec{a} \odot \vec{a}} \end{aligned}$$

c) Daraus ergibt sich die Projektionsformel

$$\vec{f} = \frac{\vec{b} \odot \vec{a}}{\vec{a} \odot \vec{a}} \cdot \vec{a}.$$

d) Die skalare Komponente von  $\vec{b}$  bezüglich  $\vec{a}$  kann dann aus folgendem Ausdruck herausgelesen werden:

$$\vec{f} = \underbrace{\frac{\vec{b} \odot \vec{a}}{\|\vec{a}\|}}_{\text{skalare Komponente}} \cdot \underbrace{\frac{\vec{a}}{\|\vec{a}\|}}_{\text{Richtungsvektor}}.$$

<sup>a</sup>Herleitung nach Binz [?, S. 44].

### 5.4.1 Basis, Komponenten

#### Definition Basis

Die Vektoren  $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \dots, \vec{e}_n$  heissen Basis des Vektorraums  $V$ , falls

- sie linear unabhängig sind
- und jeder Vektor in  $V$  als Linearkombination von  $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \dots, \vec{e}_n$  geschrieben werden kann.

Die Vektoren  $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \dots, \vec{e}_n$  heissen **Basisvektoren**.

[?, 3.12,p.433]

#### Definition Dimension

Die Anzahl der Basisvektoren eines Vektorraums  $V$  heisst **Dimension** von  $V$

#### Definition Koordinate (Komponente)

Seien die Vektoren  $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \dots, \vec{e}_n$  eine Basis eines Vektorraums und

$$\vec{v} = v_1\vec{e}_1 + v_2\vec{e}_2 + \dots + v_n\vec{e}_n,$$

dann nennen wir  $(v_1, v_2, \dots, v_n)$  die **Koordinaten** von  $\vec{v}$  (oder auch die **Komponenten** von  $\vec{v}$ ).

Wir werden später zeigen, dass sich jeder Vektor in Komponenten zerlegen lässt, auch bezüglich einer Basis, die weder aus senkrechten noch normierten Basisvektoren besteht.

#### Beispiel 5.27 Vektor vs. Komponente

785039

Schreiben Sie die Vektoren mit den Komponenten  $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -2 \end{pmatrix}$  in der Basis  $1, t, t^2$  oder

in der Basis  $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ .

a)  $\vec{e}_1 = 1, \vec{e}_2 = t, \vec{e}_3 = t^2$

b)  $\vec{e}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \vec{e}_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \vec{e}_3 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$

c)  $\vec{e}_1 = 1, \vec{e}_2 = t^2 - 1, \vec{e}_3 = t^2 - t$

d)  $\vec{e}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{e}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{e}_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$

e)  $\vec{e}_1 = 1, \vec{e}_2 = \cos(t), \vec{e}_3 = \sin(t)$

**Lösung:**

a)  $1 \cdot \vec{e}_1 + 0 \cdot \vec{e}_2 + 2\vec{e}_3 = 1 \cdot 1 + 0 \cdot t - 2 \cdot t^2 = 1 - 2t^2$

b)  $1 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} + 0 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} - 2 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}$

c)  $1 + 2t - 2t^2$

d)  $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -2 \end{pmatrix}$

e)  $1 \cdot 1 + 0 \cdot \cos(t) - 2 \sin(t) = 1 - 2 \sin(t)$

**Beispiel 5.28 Vektorkomponenten**

128857

Zeichnen Sie die Vektoren  $\vec{U}, \vec{V}$  und  $\vec{W}$ . Die Basis-Vektoren sind

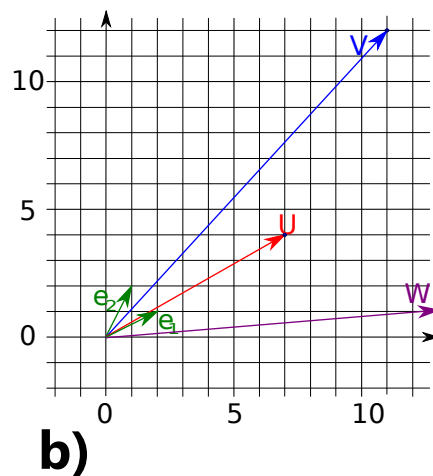
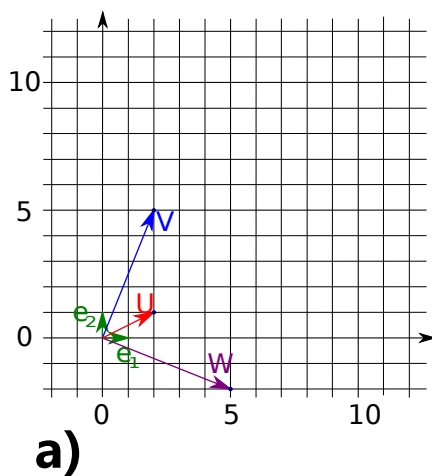
a)  $\vec{e}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$  und  $\vec{e}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$

b)  $\vec{e}_1 = \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \end{pmatrix}$  und  $\vec{e}_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}$

Die Komponenten der Vektoren sind in jeder Basis

$$\vec{U} = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix}, \vec{V} = \begin{pmatrix} 2 \\ 5 \end{pmatrix}, \vec{W} = \begin{pmatrix} 5 \\ -2 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**



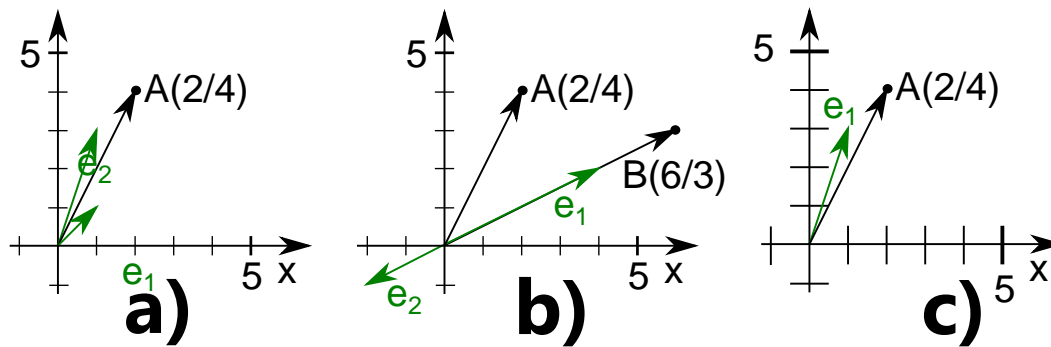


Abbildung 5.3: Die Darstellung eines Punktes in der Ebene als Summe von (zwei) Vektoren.

#### Definition Orthogonal-Basis

Eine Basis  $\vec{g}_1, \vec{g}_2, \dots, \vec{g}_n$  heisst **orthogonal**, wenn die Basisvektoren rechtwinklig zu einander stehen.

#### Definition Normierte Basis

Eine Basis heisst **normiert**, wenn die Basisvektoren  $\vec{g}_1, \vec{g}_2, \dots, \vec{g}_n$  die Länge 1 haben.

#### Definition Orthonormalbasis

Ist die Basis sowohl orthogonal wie auch normiert, heisst sie **Orthonormalbasis**.

### 5.4.2 Was ist eine Basis?

#### Infobox Basis von $\mathbb{R}^3$

Jeder Satz von 3 Vektoren (die nicht in einer Ebene liegen) ist eine Basis von  $\mathbb{R}^3$ .

Wir haben gesehen, dass sich jeder Punkt in der Ebene schreiben lässt als die Summe von zwei Vektoren. Wir wollen kurz analysieren, welche Bedingungen erfüllt sein müssen, damit dies möglich ist. Wählen wir  $\vec{e}_1$  und  $\vec{e}_2$  wie in Abb. 5.3 a), ist die Zerlegung immer möglich. Im Beispiel ist  $\vec{A} = \vec{e}_1 + \vec{e}_2$ . Wählen wir  $\vec{e}_1$  und  $\vec{e}_2$  wie in Abb. 5.3 b), ist die Zerlegung des Vektors  $\vec{B}$  möglich — es gibt sogar mehrere Möglichkeiten für die Zerlegung. Der Vektor  $\vec{A}$  hingegen kann nicht dargestellt werden!  $\vec{e}_1$  und  $\vec{e}_2$  liegen auf einer Geraden — sie sind kollinear — und mit einer Addition dieser Vektoren ist es nicht möglich, von dieser Geraden wegzukommen. In Abb. 5.3 c) hingegen ist nur der Vektor  $\vec{e}_2$  gegeben. Er reicht nicht um die Ebene abzudecken und um den Vektor  $\vec{A}$  als Linearkombination darzustellen.

Mit den Fachbegriffen ausgedrückt bedeutet dies: Für alle Situationen in Abb. 5.3 gilt, dass wir uns in der Ebene  $\mathbb{R}^2$  bewegen. Sie hat zwei Dimensionen, also brauchen wir mindestens zwei Basisvektoren. Deshalb ist der Vektor in Abb. 5.3 c) keine

Basis. In Abb. 5.3 b) sind die Basisvektoren linear abhängig. Deshalb bilden sie keine Basis. Nur in Abb. 5.3 a) handelt es sich um eine Basis: Wir haben zwei Basisvektoren die linear unabhängig sind.

**Beispiel 5.29 Basis von  $\mathbb{R}^3$**

279728

Welches ist eine Orthogonal-Basis, welches eine Orthonormal-Basis von  $\mathbb{R}^3$ ?

a)  $\left\{ \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \right\}$

c)  $\left\{ \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \right\}$

b)  $\left\{ \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \right\}$

d)  $\left\{ \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{bmatrix} 2 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix}, \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} \right\}$

**Lösung:**

- a) Orthonormal-Basis, denn die drei Vektoren sind orthogonal zueinander, haben alle die Länge 1 und sind linear unabhängig.
- b) Keine Basis, denn die Vektoren sind linear abhängig.
- c) Die Vektoren sind eine Basis, auch wenn sie einen Winkel vom  $60^\circ$  miteinander einschliessen.
- d) Orthonormal-Basis, denn die drei Vektoren sind orthogonal zueinander, haben alle die Länge 1 und sind linear unabhängig.

**Beispiel 5.30 Basis von  $\mathbb{R}^3$**

133855

Welches ist eine Orthogonal-Basis, welches eine Orthonormal-Basis von  $\mathbb{R}^3$ ?

a)  $\left\{ \begin{bmatrix} \sqrt{2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \right\}$

b)  $\left\{ \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \right\}$

c)  $\left\{ \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 2 \end{bmatrix}, \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \right\}$

**Lösung:**

- a) Die Vektoren sind eine Orthogonal-Basis, aber der erste hat eine Länge  $\neq 1$ .
- b) Die Vektoren bilden eine Orthogonal-Basis.
- c) Die Vektoren bilden zwar eine Basis, sie stehen aber weder senkrecht aufeinander, noch sind sie normiert.

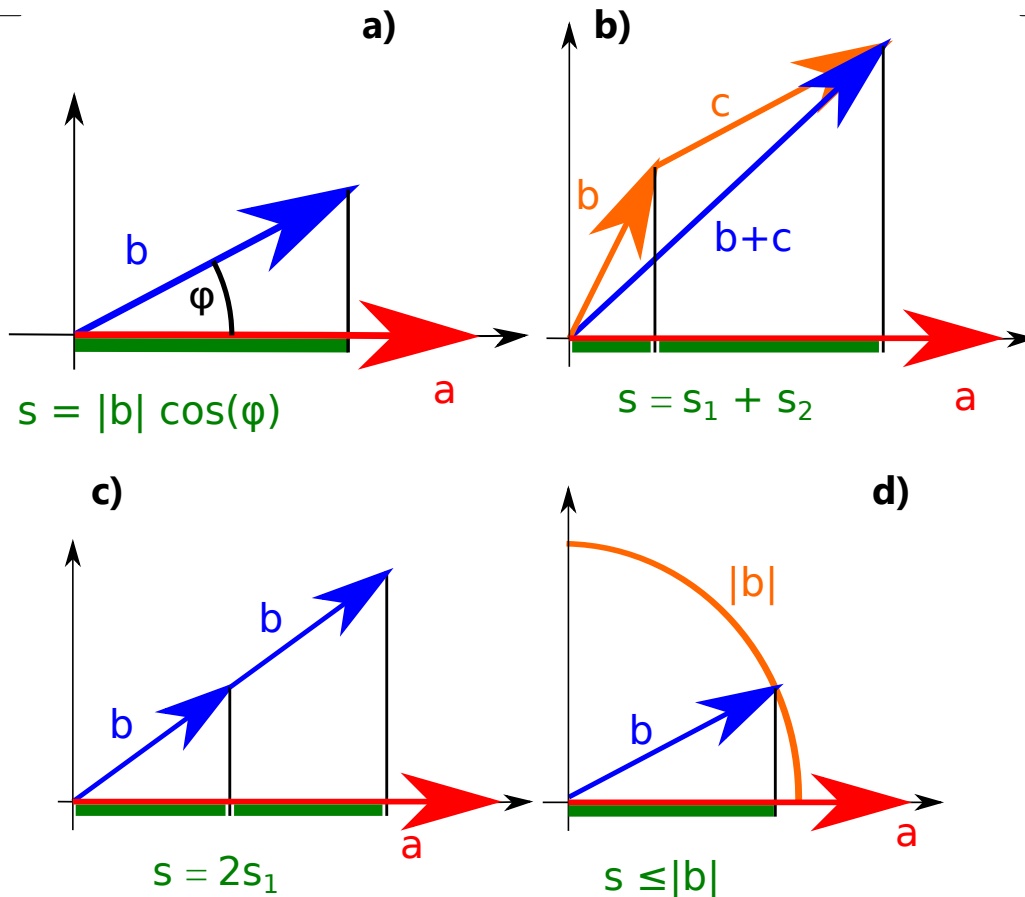


Abbildung 5.4: Die ersten Gesetzmässigkeiten für das Skalarprodukt folgen direkt aus geometrischen Betrachtungen.

## 5.5 Geometrische Deutung der Gesetze für das Skalarprodukt

Wir wollen hier darüber nachdenken, ob die Gesetze 5.4 für das Skalarprodukt geometrisch nachvollziehbar sind. Dieser Abschnitt und die drei folgenden sind ein schönes Beispiel für die axiomatische Arbeitsweise der modernen Mathematik. Am Anfang steht eine geschickte Definition 5.1. Daraus werden nacheinander Eigenschaften abgeleitet. Zuerst stellen wir fest, dass

$$\vec{a} \odot \vec{b} = \vec{b} \odot \vec{a}$$

denn

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

Danach finden wir

$$(\lambda \vec{a}) \odot \vec{b} = \lambda \cdot (\vec{a} \odot \vec{b})$$

Um dies zu zeigen müssen wir den folgenden Ausdruck anschauen:

$$(\lambda \vec{a}) \odot \vec{b} = |\lambda \vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \cos(\varphi).$$

Ist  $\lambda > 0$  dann wird der Zwischenwinkel bei der Multiplikation mit  $\vec{a}$  nicht verändert, also gilt

$$|\lambda \vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \cos(\varphi) = \lambda \cdot |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \cos(\varphi) = \lambda \cdot (\vec{a} \odot \vec{b}) .$$

Ist  $\lambda < 0$  dann wird durch die Multiplikation der Zwischenwinkel verändert:  $\varphi \rightarrow \varphi'$ , aber es gilt  $\cos(\varphi') = -\cos(\varphi)$ . Also

$$|\lambda \vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \cos(\varphi) = -\lambda \cdot |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot [-\cos(\varphi)] = \lambda \cdot (\vec{a} \odot \vec{b}) .$$

Wir finden also, dass das Skalarprodukt alle (für positive und negative) Faktoren  $\lambda$  assoziativ ist. Der Spezialfall  $|a| = 1$  ist nun besonders anschaulich:

## 5.6 Spezialfall $|a| = 1$

Gemäss der Definition 5.1 ist hier  $\vec{a} \odot \vec{b} = |b| \cdot \cos(\varphi)$ . Aus der Skizze in Abb. 5.4 a) ist aber ersichtlich, dass  $|b| \cdot \cos(\varphi)$  genau die Länge des Schattens (grün) von  $\vec{b}$  auf  $\vec{a}$  ist. Das merken wir uns. Wir wollen nun  $(\vec{b} + \vec{c}) \odot \vec{a}$  berechnen, d.h. den Schatten von  $(\vec{b} + \vec{c})$  auf  $\vec{a}$ . Gemäss Abb. 5.4 b) ist dieser Schatten gleich der Summe der Schatten von  $\vec{b}$  und von  $\vec{c}$ . Also gilt

$$(\vec{b} + \vec{c}) \odot \vec{a} = \vec{b} \odot \vec{a} + \vec{c} \odot \vec{a} . \quad (5.2)$$

Jetzt interessieren wir uns für den Schatten von  $r \cdot \vec{b}$  auf  $\vec{a}$ , d.h. der Schatten des Vektors  $\vec{b}$ , der um den Faktor  $r$  gedehnt wurde. Gemäss Abb. 5.4 c) muss dieser Schatten um den selben Faktor gedehnt sein:

$$(r \cdot \vec{b}) \odot \vec{a} = r \cdot (\vec{b} \odot \vec{a}) . \quad (5.3)$$

Wie Abb. 5.4 c) zeigt, müssen wir auch zulassen, dass ein Schatten eine "negative Länge" hat, sollte  $\lambda$  mal negativ ausfallen. Schliesslich stellen wir noch fest, dass der Schatten (bei einem rechtwinkligen Lichteinfall) nie länger als das reale Objekt sein kann

$$|\vec{b} \odot \vec{a}| \leq |\vec{b}| . \quad (5.4)$$

## 5.7 Allgemeiner Fall

Wir wollen nun die Gleichungen 5.2 bis 5.4 benutzen um Gesetze für den allgemeinen Fall  $\|a\| \neq 1$  zu finden. Zuerst stellen wir fest, dass aus der Definition des Skalarprodukts folgt

$$\vec{v} \odot \vec{v} = \|\vec{v}\| \cdot \|\vec{v}\| \cdot \underbrace{\cos(\varphi)}_{=1} = \|\vec{v}\|^2$$

Dann stellen wir fest, dass jeder Vektor<sup>1</sup>  $\vec{v}$  auf die Länge 1 gebracht werden kann, indem wir ihn durch seine Länge dividieren:

$$\vec{v}' = \frac{1}{\|\vec{v}\|} \vec{v} .$$

Nun ist Eqn. 5.2 nur gültig, wenn  $\vec{a}$  die Länge 1 hat. Deshalb müssen wir darin  $\vec{a}$  jeweils mit  $\frac{\vec{a}}{\|\vec{a}\|}$  ersetzen:

<sup>1</sup>Um genau zu sein, jeder Vektor mit Ausnahme von  $\vec{0}$

$$(\vec{b} + \vec{c}) \odot \frac{\vec{a}}{\|\vec{a}\|} = \vec{b} \odot \frac{\vec{a}}{\|\vec{a}\|} + \vec{c} \odot \frac{\vec{a}}{\|\vec{a}\|} . \quad (5.5)$$

Diese Gleichung kann auf beiden Seiten mit  $\|\vec{a}\|$  multipliziert werden. Wir benutzen die Assoziativität aus Satz 5.4 und die Distributivität der Addition und erhalten

$$(\vec{b} + \vec{c}) \odot \vec{a} = \vec{b} \odot \vec{a} + \vec{c} \odot \vec{a}$$

Damit haben wir alle Gesetze aus Satz 5.4 nacheinander bewiesen. Bei jedem Schritt haben wir nur Eigenschaften verwendet, die aus den vorherigen Schritten schon bekannt waren.

## 5.8 Komponenten-Schreibweise in Orthonormalbasis

Wenn wir  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$  in Komponenten-Schreibweise als

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \text{ und } \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} ,$$

angeben, wie berechnen wir dann das Skalarprodukt  $\vec{a} \odot \vec{b}$ ? Die meisten werden wohl antworten

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = a_1 b_1 + a_2 b_2 ,$$

was zwar richtig ist, solange man mit einer Orthonormalbasis arbeitet. Für jede andere Basis ist diese Antwort aber *falsch*. Z.B. nehmen wir die Basis

$$\{\vec{f}_1, \vec{f}_2, \vec{f}_3\} = \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}_E, \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}_E, \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}_E \right\} .$$

Mit dem Index  $E$  drücken wir aus, dass die Vektoren in der Standardbasis  $\mathbf{E} = \{\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3\}$  gegeben sind. Die Basisvektoren sind normiert aber *nicht orthogonal*. Die Basisvektoren geschrieben in dieser Basis sind

$$\vec{f}_1 = 1 \cdot \vec{f}_1 + 0 \cdot \vec{f}_2 + 0 \cdot \vec{f}_3 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}_F, \quad \vec{f}_2 = 1 \cdot \vec{f}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}_F, \quad \vec{f}_3 = 1 \cdot \vec{f}_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}_F$$

Wenn wir hier naiv die Komponentenschreibweise für das Skalarprodukt benutzen, dann erhielten wir

$$\vec{f}_1 \odot \vec{f}_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}_F \odot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}_F = 1 \cdot 0 + 0 \cdot 1 + 0 \cdot 0 = 0$$

Das würde ja bedeuten, dass  $\vec{f}_1$  senkrecht auf  $\vec{f}_2$  steht, aber das ist eben falsch. Die Basisvektoren stehen gerade nicht senkrecht aufeinander.

Wir werden deshalb hier die Berechnung des Skalarprodukts für Vektoren in Komponenten-schreibweise einer Orthonormalbasis herleiten. Für andere Basen kann das Skalarprodukt auf gleiche Weise hergeleitet werden.



**Beispiel 5.31 Skalarprodukt in  $\mathbb{R}^2$  für die Basisvektoren**

195709

Berechnen Sie das Skalarprodukt der Basisvektoren der Orthonormalbasis  $\vec{e}_1, \vec{e}_2$ . Betrachten Sie dazu den Schatten von  $\vec{e}_1$  auf  $\vec{e}_2$ , von  $\vec{e}_2$  auf  $\vec{e}_1$ , von  $\vec{e}_1$  auf  $\vec{e}_1$ , von  $\vec{e}_2$  auf  $\vec{e}_2$ . **Lösung:**

$$\begin{aligned}\vec{e}_1 \odot \vec{e}_2 &= 0; & \vec{e}_2 \odot \vec{e}_1 &= 0 \\ \vec{e}_1 \odot \vec{e}_1 &= 1; & \vec{e}_2 \odot \vec{e}_2 &= 1\end{aligned}$$

**Beispiel 5.32 Skalarprodukt in  $\mathbb{R}^2$  für beliebige Vektoren**

536234

Berechne das Skalarprodukt zwischen den Vektoren  $\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$  und  $\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix}$ . Schreibe dafür die Vektoren als Summe der Basisvektoren der Orthonormalbasis  $\vec{e}_1, \vec{e}_2$  und wende dann die Gesetze für das Skalarprodukt (Satz 5.4) an.

**Lösung:**

$$\begin{aligned}\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} &= (a_1\vec{e}_1 + a_2\vec{e}_2) \odot (b_1\vec{e}_1 + b_2\vec{e}_2) \\ &= a_1b_1\vec{e}_1 \odot \vec{e}_1 + a_1b_2\vec{e}_1 \odot \vec{e}_2 \\ &\quad + a_2b_1\vec{e}_2 \odot \vec{e}_1 + a_2b_2\vec{e}_2 \odot \vec{e}_2 = a_1b_1 + a_2b_2\end{aligned}$$

**5.9 Skalarprodukt in nicht orthogonaler Basis\***

Wir betrachten das Beispiel der Basis

$$\{\vec{f}_1, \vec{f}_2, \vec{f}_3\} = \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}_E, \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}_E, \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}_E \right\}$$

Die Basisvektoren sind normiert aber *nicht orthogonal*. Um das Skalarprodukt von zwei allgemeinen Vektoren in dieser Basis zu berechnen, berechnen wir zuerst das Skalarprodukt zwischen den Basisvektoren. Dafür verwenden wir die Schreibweise der Basisvektoren in der Orthonormalbasis

$$\begin{aligned}\vec{f}_1 \odot \vec{f}_1 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}_E \odot \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}_E = 1 & \vec{f}_1 \odot \vec{f}_2 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}_E \odot \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}_E = \frac{1}{2} \\ \vec{f}_1 \odot \vec{f}_3 &= \frac{1}{2} & \vec{f}_2 \odot \vec{f}_2 &= 1 \\ \vec{f}_2 \odot \vec{f}_3 &= \frac{1}{2} & \vec{f}_3 \odot \vec{f}_3 &= 1\end{aligned}$$

Nun berechnen wir das Skalarprodukt zwischen den Vektoren  $\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix}_F$  und  $\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix}_F$

in dieser Basis und wenden dann die Gesetze für das Skalarprodukt (Satz 5.4) an:

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix}_F \odot \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix}_F &= \left( a_1 \vec{f}_1 + a_2 \vec{f}_2 + a_3 \vec{f}_3 \right) \odot \left( b_1 \vec{f}_1 + b_2 \vec{f}_2 + b_3 \vec{f}_3 \right) \\
 &= (a_1 \vec{f}_1) \odot (b_1 \vec{f}_1) + (a_1 \vec{f}_1) \odot (b_2 \vec{f}_2) + (a_1 \vec{f}_1) \odot (b_3 \vec{f}_3) \\
 &\quad + (a_2 \vec{f}_2) \odot (b_1 \vec{f}_1) + (a_2 \vec{f}_2) \odot (b_2 \vec{f}_2) + (a_2 \vec{f}_2) \odot (b_3 \vec{f}_3) \\
 &\quad + (a_3 \vec{f}_3) \odot (b_1 \vec{f}_1) + (a_3 \vec{f}_3) \odot (b_2 \vec{f}_2) + (a_3 \vec{f}_3) \odot (b_3 \vec{f}_3) \\
 &= a_1 b_1 + \frac{1}{2} a_1 b_2 + \frac{1}{2} a_1 b_3 + \frac{1}{2} a_2 b_1 + a_2 b_2 + \frac{1}{2} a_2 b_3 + \frac{1}{2} a_3 b_1 + \frac{1}{2} a_3 b_2 + a_3 b_3 \\
 &= a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3 + a_1 b_2 + a_2 b_3 + a_3 b_1
 \end{aligned}$$

Als Kontrolle berechnen wir das Skalarprodukt zwischen den orthogonal Vektoren  $\vec{a} = \vec{f}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}_F$  und dem Vektor  $\vec{b} = \vec{f}_2 + \vec{f}_3 - \vec{f}_1 = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}_F$ .

$$\vec{a} \odot \vec{b} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}_F \odot \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}_F = 1 \cdot (-1) + 0 \cdot 1 + 0 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 0 \cdot 1 + 0 \cdot 1 = 0$$

Tatsächlich ergibt die Rechnung, dass die Vektoren orthogonal aufeinander stehen.

## 5.10 Basiswechsel zwischen Orthogonalbasen

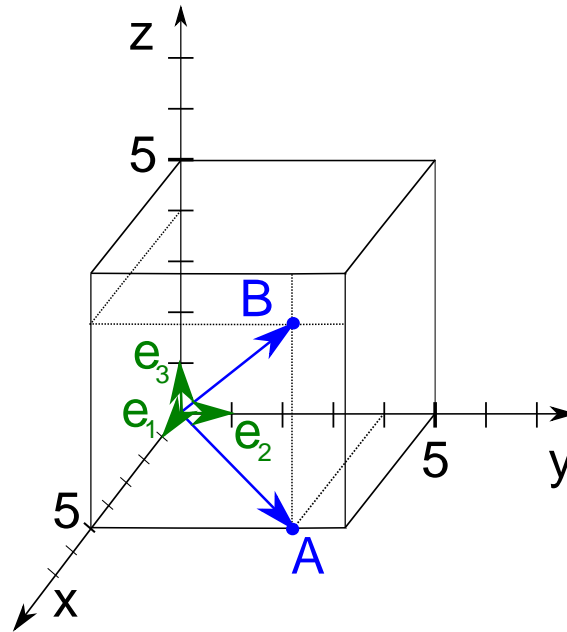
Wir schreiben die Komponenten meist in eine vertikale Liste

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix}$$

Beachte, dass diese Liste noch kein geometrischer Vektor ist! Um den Vektor  $\vec{v}$  zu erhalten müssen die Komponenten mit den Basisvektoren multipliziert und dann addiert werden.

### 5.10.1 Komponenten in einer Basis

**Beispiel 5.33** Drücke  $\vec{A}$  und  $\vec{B}$  als Linearkombination von  $\vec{e}_1, \dots, \vec{e}_3$  aus  
158844



$$\vec{e}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{e}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{e}_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} 5 \\ 4 \\ 0 \end{pmatrix} = 5\vec{e}_1 + 4\vec{e}_2$$

$$\vec{B} = \begin{pmatrix} 5 \\ 4 \\ 4 \end{pmatrix} = 5\vec{e}_1 + 4\vec{e}_2 + 4\vec{e}_3$$

### Definition Standard-Basis

Die Vektoren  $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$  heißen **Standard-Basis** (auch kartesische Basis, kartesisches Koordinatensystem)

Was wir also bis jetzt intuitiv<sup>2</sup> gemacht haben, ist die Zerlegung von Vektoren in Komponenten entlang der Standardbasis. Diese Komponenten werden dann in Spaltenvektoren  $\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix}$  untereinander notiert.

### Beispiel 5.34 Basis-Wechsel (orthonormal)

585056

<sup>2</sup>d.h. ohne viel nachzudenken

Drücke die Vektoren  $\vec{A}$  und  $\vec{B}$  in der Basis  $\vec{f}_1, \vec{f}_2$  aus (alle Vektoren sind in der Standard-Basis angegeben).

$$\{\vec{f}_1, \vec{f}_2\} = \left\{ \frac{1}{5} \begin{pmatrix} 3 \\ 4 \end{pmatrix}, \frac{1}{5} \begin{pmatrix} 4 \\ -3 \end{pmatrix} \right\}$$

$$\{\vec{A}, \vec{B}\} = \left\{ \begin{pmatrix} 4 \\ -3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 5 \\ -10 \end{pmatrix} \right\}$$

**Lösung:**

Da die Basisvektoren senkrecht aufeinander stehen, können wir die Komponenten mit Projektionen auf die Basisvektoren berechnen:

$$A_{1F} = \vec{A} \odot \vec{f}_1 = 0$$

und

$$A_{2F} = \vec{A} \odot \vec{f}_2 = 5$$

Die Basisvektoren sind normiert, also bleibt weiter nichts zu tun. Der Vektor  $\vec{A}$  lautet also in der Basis  $F$ :

$$\vec{A}_F = \begin{pmatrix} 0 \\ 5 \end{pmatrix}_F$$

Das hätten wir uns auch denken können, denn  $\vec{A}$  hat die selbe Richtung wie  $\vec{f}_2$ , ist aber fünf Mal länger.

$$B_{1F} = \vec{A} \odot \vec{f}_1 = -5$$

und

$$B_{2F} = \vec{A} \odot \vec{f}_2 = 10 \quad \Rightarrow \quad \vec{B}_F = \begin{pmatrix} -5 \\ 10 \end{pmatrix}_F$$

**Satz Komponenten in einer Orthonormal-Basis**

Bei der Basis-Transformation von der Standard-Basis in die Orthonormal-Basis  $F = \{\vec{f}_1, \vec{f}_2, \dots\}$  sind die Komponenten gegeben durch:

$$B_{j,F} = \vec{B} \odot \vec{f}_j$$

**Beispiel 5.35 Basis-Wechsel (orthogonal)**

304231

Drücke die Vektoren  $\vec{A}$  und  $\vec{B}$  in der Basis  $\vec{f}_1, \vec{f}_2$  aus (alle Vektoren sind in der Standard-Basis angegeben).

$$\{\vec{f}_1, \vec{f}_2\} = \left\{ \begin{pmatrix} -8 \\ 6 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 6 \\ 8 \end{pmatrix} \right\}$$

$$\{\vec{A}, \vec{B}\} = \left\{ \begin{pmatrix} -60 \\ -80 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 200 \\ 100 \end{pmatrix} \right\}$$

**Lösung:**

Da die Basisvektoren senkrecht aufeinander stehen, können wir die Komponenten mit Projektionen auf die Basisvektoren berechnen:

$$A'_{1F} = \vec{A} \odot \vec{f}_1 \cdot \frac{1}{|\vec{f}_1|} = \frac{0}{10} = 0$$

und

$$A'_{2F} = \vec{A} \odot \vec{f}_2 \cdot \frac{1}{|\vec{f}_2|} = \frac{-1000}{10} = -100$$

Der Vektor  $\vec{A}$  kann also mit den Vektoren der Basis wie folgt geschrieben werden:

$$\vec{A} = 0 \cdot \vec{f}_1 \cdot \frac{1}{|\vec{f}_1|} - 100 \cdot \vec{f}_2 \cdot \frac{1}{|\vec{f}_2|} = 0 \cdot \vec{f}_1 - 10\vec{f}_2$$

Also lautet  $\vec{A}$  in der Basis  $\mathbf{F}$ :

$$\vec{A}_F = \begin{pmatrix} 0 \\ -10 \end{pmatrix}_F$$

Auch das hätten wir uns denken können, denn  $\vec{A}$  ist kollinear zu  $\vec{f}_2$ , hat die umgekehrte Richtung und ist zehn Mal länger.

$$B'_{1F} = \vec{B} \odot \frac{\vec{f}_1}{|\vec{f}_1|} = \frac{-1000}{10} = -100$$

und

$$B'_{2F} = \vec{B} \odot \frac{\vec{f}_2}{|\vec{f}_2|} = \frac{2000}{10} = 200$$

Wir können also schreiben:

$$\vec{B} = -100 \cdot \vec{f}_1 \cdot \frac{1}{|\vec{f}_1|} + 200 \cdot \vec{f}_2 \cdot \frac{1}{|\vec{f}_2|} = -10 \cdot \vec{f}_1 + 20\vec{f}_2 \quad \Rightarrow \quad \vec{B}_F = \begin{pmatrix} -10 \\ 20 \end{pmatrix}_F$$

Beachte, dass hier durch die Skalarprodukte wie

$$B'_{1F} = \vec{B} \odot \vec{f}_1 \cdot \frac{1}{|\vec{f}_1|}$$

nicht direkt die Komponenten berechnet werden, sondern die Länge der Projektion. Die Komponenten ergeben sich schliesslich erst, wenn die Normierung der Basisvektoren auf die  $B'_{1F}$  transferiert wird:

$$B_{1F} = \frac{B'_{1F}}{|\vec{f}_1|} = \frac{\vec{B} \odot \vec{f}_1}{|\vec{f}_1|^2}$$

### Satz Komponenten in einer Orthogonal-Basis

Bei der Basis-Transformation von der Standard-Basis in die Orthogonal-Basis  $\mathbf{F} = \{\vec{f}_1, \vec{f}_2, \dots\}$  sind die Komponenten gegeben durch:

$$B_{j,F} = \frac{\vec{B} \odot \vec{f}_j}{|\vec{f}_j|^2}$$

### Beispiel 5.36 Basis-Wechsel (orthonormal)

101909

Drücke die Vektoren  $\vec{A}$ ,  $\vec{B}$  und  $\vec{C}$  in der Basis  $\vec{f}_1, \vec{f}_2, \vec{f}_3$  aus (alle Vektoren sind in der Standard-Basis angegeben).

$$\{\vec{f}_1, \vec{f}_2, \vec{f}_3\} = \left\{ \frac{1}{5} \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ 4 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \frac{1}{5} \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ -3 \end{pmatrix} \right\}$$

$$\{\vec{A}, \vec{B}, \vec{C}\} = \left\{ \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ 4 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -3 \\ 10 \\ -4 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 10 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix} \right\}$$

#### Lösung:

Da die Basisvektoren senkrecht aufeinander stehen, können wir die Komponenten mit Projektionen auf die Basisvektoren berechnen:

$$A_{1F} = \vec{A} \odot \vec{f}_1 = 5, \quad A_{2F} = \vec{A} \odot \vec{f}_2 = 0 \quad \text{und} \quad A_{3F} = \vec{A} \odot \vec{f}_3 = 0$$

Der Vektor  $\vec{A}$  lautet also in der Basis  $\mathbf{F}$ :

$$\vec{A}_F = \begin{pmatrix} 5 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}_F$$

Das hätten wir uns auch denken können, denn  $\vec{A}$  hat die selbe Richtung wie  $\vec{f}_1$ , ist aber fünf Mal länger.

$$B_{1F} = \vec{B} \odot \vec{f}_1 = -5, \quad B_{2F} = \vec{B} \odot \vec{f}_2 = 10 \quad \text{und} \quad B_{3F} = \vec{B} \odot \vec{f}_3 = 0$$

also

$$\vec{B}_F = \begin{pmatrix} -5 \\ 10 \\ 0 \end{pmatrix}_F.$$

Schliesslich

$$C_{1F} = \vec{C} \odot \vec{f}_1 = 10, \quad C_{2F} = \vec{C} \odot \vec{f}_2 = 0 \quad \text{und} \quad C_{3F} = \vec{C} \odot \vec{f}_3 = 5$$

und also

$$\vec{C}_F = \begin{pmatrix} 10 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix}_F.$$

**Beispiel 5.37 Basis-Wechsel (orthogonal)**

723703

Drücke die Vektoren  $\vec{A}$ ,  $\vec{B}$  und  $\vec{C}$  in der Basis  $\vec{f}_1, \vec{f}_2, \vec{f}_3$  aus (alle Vektoren sind in der Standard-Basis angegeben).

$$\{\vec{f}_1, \vec{f}_2, \vec{f}_3\} = \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 2 \end{pmatrix} \right\}$$

$$\{\vec{A}, \vec{B}, \vec{C}\} = \left\{ \begin{pmatrix} 6 \\ -6 \\ 12 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 3 \\ 11 \\ 4 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -4 \\ 10 \\ -14 \end{pmatrix} \right\}$$

**Lösung:**

Da die Basisvektoren senkrecht aufeinander stehen, können wir die Komponenten mit Projektionen auf die Basisvektoren berechnen. Für die orthogonalen Vektoren verwenden wir die Normierung der Komponenten wie im Satz vorher:

$$A_{1F} = \vec{A} \odot \vec{f}_1 \cdot \frac{1}{|\vec{f}_1|^2} = 0 \quad A_{2F} = \vec{A} \odot \vec{f}_2 \cdot \frac{1}{|\vec{f}_2|^2} = 0$$

und

$$A_{3F} = \vec{A} \odot \vec{f}_3 \cdot \frac{1}{|\vec{f}_3|^2} = \frac{36}{6} = 6$$

Also lautet  $\vec{A}$  in der Basis  $F$ :

$$\vec{A}_F = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 6 \end{pmatrix}_F$$

Auch das hätten wir uns auch denken können, denn  $\vec{A}$  ist parallel zu  $\vec{f}_3$  ist aber sechs Mal länger.

$$B_{1F} = \vec{B} \odot \vec{f}_1 \cdot \frac{1}{|\vec{f}_1|^2} = \frac{14}{2} = 7, \quad B_{2F} = \vec{B} \odot \vec{f}_2 \cdot \frac{1}{|\vec{f}_2|^2} = \frac{12}{3} = 4, \quad B_{3F} = \vec{B} \odot \vec{f}_3 \cdot \frac{1}{|\vec{f}_3|^2} = \frac{0}{6} = 0$$

Also lautet  $\vec{B}$  in der Basis  $F$ :

$$\vec{B}_F = \begin{pmatrix} 7 \\ 4 \\ 0 \end{pmatrix}_F$$

Schliesslich berechnen wir

$$C_{1F} = \vec{C} \odot \vec{f}_1 \cdot \frac{1}{|\vec{f}_1|^2} = \frac{6}{2} = 3, \quad C_{2F} = \vec{C} \odot \vec{f}_2 \cdot \frac{1}{|\vec{f}_2|^2} = \frac{0}{3} = 0, \quad C_{3F} = \vec{C} \odot \vec{f}_3 \cdot \frac{1}{|\vec{f}_3|^2} = \frac{-42}{6} = -7$$

und schreiben

$$\vec{C}_F = \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ -7 \end{pmatrix}_F$$

Der Basis-Wechsel für nicht orthogonale Basen ist rechnerisch aufwendig. Wir werden dies später betrachten.



**Lernziele Vektorprodukt**

Wenn nicht anders deklariert beziehen sich die Lernziele auf eine rechtshändige Orthogonalbasis.

- Die Studierenden können das Vektorprodukt von Vektoren in  $\mathbb{R}^3$  berechnen.
- Sie wissen, dass das Vektorprodukt antikommutativ, distributiv und assoziativ ist.
- Sie können das Spatprodukt von Vektoren in  $\mathbb{R}^3$  berechnen.
- Sie können das Vektorprodukt benutzen um Abstände von Punkten zu einer Geraden in  $\mathbb{R}^3$  zu berechnen.

**Beispiel 6.1 Leseauftrag Vektorprodukt**

57DXTK

Lesen Sie im Buch “Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 1” von Papula den Abschnitt 3.4. zum Vektorprodukt, d.h. die Seiten 90-96). Beantworten Sie dann folgende Fragen.

- a) Welche Eigenschaften hat das Vektorprodukt?
- b) Wie berechnet man das Vektorprodukt in einer rechtshändigen Orthonormalbasis?

Die Online-Resource zum Buch finden Sie hier

Google: E-Medien FHNW

wähle: E-Books

wähle: Springer

wähle: Technik-Informatik

suche: Papula

wähle: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 1

**Lösung:**

- a) Eigenschaften des Vektorprodukts: Der Betrag des Vektorprodukts ist gleich dem Flächeninhalt des Parallelogramms, das von den Vektoren  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$  aufgespannt wird. Es gelten die Eigenschaften in Satz 6.1.
- b) Die Berechnung des Vektorprodukts ist in Infobox 6.1 angegeben.

## 6.1 Berechnung Vektorprodukt

### Definition Vektorprodukt

Für  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$  in  $\mathbb{R}^3$ , die den Winkel  $\varphi$  einschliessen, ist das **Vektorprodukt**  $\vec{c} = \vec{a} \times \vec{b}$ , mit den Eigenschaften:

- $\|\vec{c}\| = \|\vec{a}\| \cdot \|\vec{b}\| \cdot \sin(\varphi)$
- $\vec{c}$  ist orthogonal zu  $\vec{a}$  und zu  $\vec{b}$
- $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$  bilden ein Rechtssystem

[?, Bd. 1 II 3.4], [?, p.401]

Wir merken uns auch: Der Betrag des Vektorprodukts ist gleich dem Flächeninhalt des Parallelogramms, das von den Vektoren  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$  aufgespannt wird.

### Infobox Praktische Berechnung des Vektorprodukts

Das Vektorprodukt von zwei Vektoren kann wie folgt berechnet werden:

- Wir schreiben die Produktvektoren auf
- Wir erstellen ein Skelett aus Minuszeichen (-) und zusätzlich einem Ausdruck  $-()$  in der zweiten Zeile
- Wir füllen jede Zeile im Skelett, indem wir die selbe Zeile in den Produktvektoren abdecken und das Kreuz der verbleibenden Einträge ins Skelett einfüllen.

$$\vec{a} \times \vec{b} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} - & - \\ -(-) & - \\ - & - \end{pmatrix}}_{\text{Skelett}} \rightarrow \begin{pmatrix} a_2b_3 - a_3b_2 \\ -(a_1b_3 - a_3b_1) \\ a_1b_2 - a_2b_1 \end{pmatrix}$$

**Beispiel 6.2 Vektorprodukt**

306988

Berechne das Vektorprodukt von  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$ .

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} 4 \\ 5 \\ 6 \end{pmatrix}$$

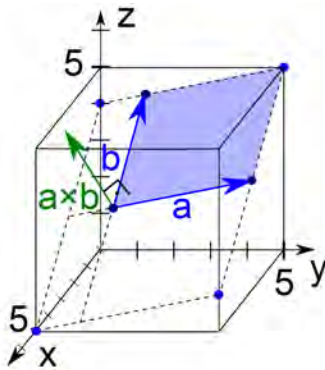
**Lösung:**

$$\vec{a} \times \vec{b} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 4 \\ 5 \\ 6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \cdot 6 - 3 \cdot 5 \\ -(1 \cdot 6 - 3 \cdot 4) \\ 1 \cdot 5 - 2 \cdot 4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -3 \\ 6 \\ -3 \end{pmatrix}$$

**Beispiel 6.3 Berechne die Fläche des Parallelogramms aufgespannt durch  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$** 

519844

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ -5 \end{pmatrix} \text{ und } \vec{b} = \begin{pmatrix} 5 \\ 4 \\ 0 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

Wir berechnen zuerst das Vektorprodukt

$$\vec{a} \times \vec{b} = \begin{pmatrix} 20 \\ -25 \\ 8 \end{pmatrix} =: \vec{c}$$

Danach benutzen wir, dass der Betrag des Vektorprodukts gleich der Fläche des aufgespannten Parallelogramms ist:

$$\|\vec{c}\| = 33$$

**Infobox "Vektorprodukt" für  $\vec{v} \in \mathbb{R}^2$** 

In  $\mathbb{R}^2$  lässt sich ein Vektor, der senkrecht auf  $\vec{v} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix}$  steht schnell finden:

$$\vec{n}' = \begin{pmatrix} v_2 \\ -v_1 \end{pmatrix}.$$

**Beispiel 6.4 Vektorprodukt in Orthonormalbasis**

BT8J1D

Berechnen Sie die Vektorprodukte

$$\text{a) } \vec{a} \times \vec{b} = \begin{pmatrix} -2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 9 \\ 8 \end{pmatrix}$$

$$\text{d) } \vec{g} \times \vec{h} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} -4 \\ 5 \\ 2 \end{pmatrix}$$

$$\text{b) } \vec{c} \times \vec{d} = \begin{pmatrix} 1 \\ 5 \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 7 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{e) } \vec{k} \times \vec{l} = (1 \cdot \vec{e}_1 + 1 \cdot \vec{e}_2 + 3 \cdot \vec{e}_3) \times (2 \cdot \vec{e}_3)$$

$$\text{f) } \vec{p} \times \vec{q} = (8 \cdot \vec{e}_1 + 9 \cdot \vec{e}_2 + 4 \cdot \vec{e}_3) \times (2 \cdot \vec{e}_2)$$

$$\text{c) } \vec{e} \times \vec{f} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} -5 \\ -3 \\ 0 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

$$\text{a) } \vec{a} \times \vec{b} = \begin{pmatrix} -2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 9 \\ 8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 16 \\ -18 \end{pmatrix}$$

$$\text{d) } \vec{g} \times \vec{h} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} -4 \\ 5 \\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 \\ 4 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{b) } \vec{c} \times \vec{d} = \begin{pmatrix} 1 \\ 5 \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 7 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 7 \end{pmatrix}$$

$$\text{e) } \vec{k} \times \vec{l} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ -2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{c) } \vec{e} \times \vec{f} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} -5 \\ -3 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 9 \\ -15 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{f) } \vec{p} \times \vec{q} = \begin{pmatrix} 8 \\ 9 \\ 4 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -8 \\ 0 \\ 16 \end{pmatrix}$$

**Beispiel 6.5 Fläche und Vektorprodukt**

68EML3

Berechnen Sie die Fläche des Parallelogramms aufgespannt durch die Vektoren  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$ .

$$\text{a) } \vec{a} = \begin{pmatrix} 4 \\ -5 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} 5 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

$$\text{d) } \vec{a} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ -4 \end{pmatrix}, \vec{b} = 19\vec{e}_1 + 14\vec{e}_2 - 3\vec{e}_3.$$

$$\text{b) } \vec{a} = \begin{pmatrix} 10 \\ -4 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 17 \end{pmatrix}.$$

$$\text{e) } \vec{a} = 10\vec{e}_1 + 10\vec{e}_2 + 19\vec{e}_3, \vec{b} = \begin{pmatrix} 11 \\ 3 \\ 5 \end{pmatrix}.$$

$$\text{c) } \vec{a} = \begin{pmatrix} 3 \\ -2 \\ 5 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} 18 \\ 4 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

**Lösung:**

- a) Wir überlegen, dass die Fläche den Betrag  $F = |a| \cdot \underbrace{|b| \cdot \sin(\alpha)}_{=h}$  hat. Diesen Betrag können wir auf folgende Weise berechnen: Wir berechnen zuerst den Normalenvektor

$$\vec{n}' = \vec{a} \times \vec{b} = \begin{pmatrix} 4 \\ -5 \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 5 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 29 \end{pmatrix}.$$

Seine Länge (Norm) entspricht der Fläche des Parallelogramms:

$$F = |\vec{n}'| = 29$$

- b) Wir berechnen zuerst den Normalenvektor

$$\vec{n}' = \vec{a} \times \vec{b} = \begin{pmatrix} 10 \\ -4 \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 17 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -68 \\ -170 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Seine Länge (Norm) entspricht der Fläche des Parallelogramms:

$$|\vec{n}'| = 34\sqrt{29} \approx 183.096$$

- c) Wir berechnen zuerst den Normalenvektor

$$\vec{n}' = \vec{a} \times \vec{b} = \begin{pmatrix} 3 \\ -2 \\ 5 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 18 \\ 4 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -20 \\ 90 \\ 48 \end{pmatrix}.$$

Seine Länge (Norm) entspricht der Fläche des Parallelogramms:

$$|\vec{n}'| = 2\sqrt{2701} \approx 103.942$$

d) Normalenvektor

$$\vec{n}' = \vec{a} \times \vec{b} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ -4 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 19 \\ 14 \\ -3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 59 \\ -73 \\ 33 \end{pmatrix}.$$

$$|\vec{n}'| = \sqrt{9899} \approx 99.4937$$

e) Normalenvektor

$$\vec{n}' = \vec{a} \times \vec{b} = \begin{pmatrix} 10 \\ 10 \\ 19 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 11 \\ 3 \\ 5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -7 \\ 159 \\ -80 \end{pmatrix}.$$

$$|\vec{n}'| = \sqrt{31730} \approx 178.129$$

### Beispiel 6.6 Fläche Dreieck

62FVCH

Berechne die Fläche des Dreiecks mit den Ecken  $\vec{A}$ ,  $\vec{B}$  und  $\vec{C}$ .

a)  $\vec{A} = \begin{pmatrix} 0 \\ 4 \\ 2 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 8 \\ 5 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{C} = \begin{pmatrix} 0 \\ 8 \\ -1 \end{pmatrix}$

b)  $\vec{A} = \begin{pmatrix} 1 \\ -4 \\ 0 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{B} = \begin{pmatrix} 1 \\ 13 \\ 20 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{C} = \begin{pmatrix} 1 \\ 16 \\ 0 \end{pmatrix}$

c)  $\vec{A} = \begin{pmatrix} -1 \\ 8 \\ 17 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{B} = \begin{pmatrix} 3 \\ 25 \\ 12 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{C} = \begin{pmatrix} -1 \\ 11 \\ 36 \end{pmatrix}$

d)  $\vec{A} = \begin{pmatrix} 0 \\ 9 \\ -3 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{B} = \begin{pmatrix} 20 \\ 22 \\ -1 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{C} = \begin{pmatrix} -2 \\ 6 \\ 3 \end{pmatrix}$

**Lösung:**

a) Die Fläche des Dreiecks ist die Hälfte der Fläche des Parallelogramms. Wir berechnen zunächst Vektoren, die zwei Kanten beschreiben

$$\vec{c} = \vec{B} - \vec{A} = \begin{pmatrix} 0 \\ 4 \\ 3 \end{pmatrix}, \quad \vec{b} = \vec{C} - \vec{A} = \begin{pmatrix} 0 \\ 4 \\ -3 \end{pmatrix}$$

Dann berechnen wir den Normalenvektor

$$\vec{n}' = \vec{c} \times \vec{b} = \begin{pmatrix} -24 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Aus der Länge berechnen wir die Fläche des Dreiecks

$$F = \frac{|\vec{n}'|}{2} = 12$$

b)

$$\vec{c} = \vec{B} - \vec{A} = \begin{pmatrix} 0 \\ 17 \\ 20 \end{pmatrix}, \quad \vec{b} = \vec{C} - \vec{A} = \begin{pmatrix} 0 \\ 20 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{n}' = \vec{c} \times \vec{b} = \begin{pmatrix} -400 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

$$F = \frac{|\vec{n}'|}{2} = 200$$

c)

$$\vec{c} = \vec{B} - \vec{A} = \begin{pmatrix} 4 \\ 17 \\ -5 \end{pmatrix}, \quad \vec{b} = \vec{C} - \vec{A} = \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \\ 19 \end{pmatrix}$$

$$\vec{n}' = \vec{c} \times \vec{b} = \begin{pmatrix} 338 \\ -76 \\ 12 \end{pmatrix}.$$

$$F = \frac{|\vec{n}'|}{2} = \sqrt{30041} \approx 173.323$$

d)

$$\vec{c} = \vec{B} - \vec{A} = \begin{pmatrix} 20 \\ 13 \\ 2 \end{pmatrix}, \quad \vec{b} = \vec{C} - \vec{A} = \begin{pmatrix} -2 \\ -3 \\ 6 \end{pmatrix}$$

$$\vec{n}' = \vec{c} \times \vec{b} = \begin{pmatrix} 84 \\ -124 \\ -34 \end{pmatrix}.$$

$$F = \frac{|\vec{n}'|}{2} = \sqrt{5897} \approx 76.7919$$

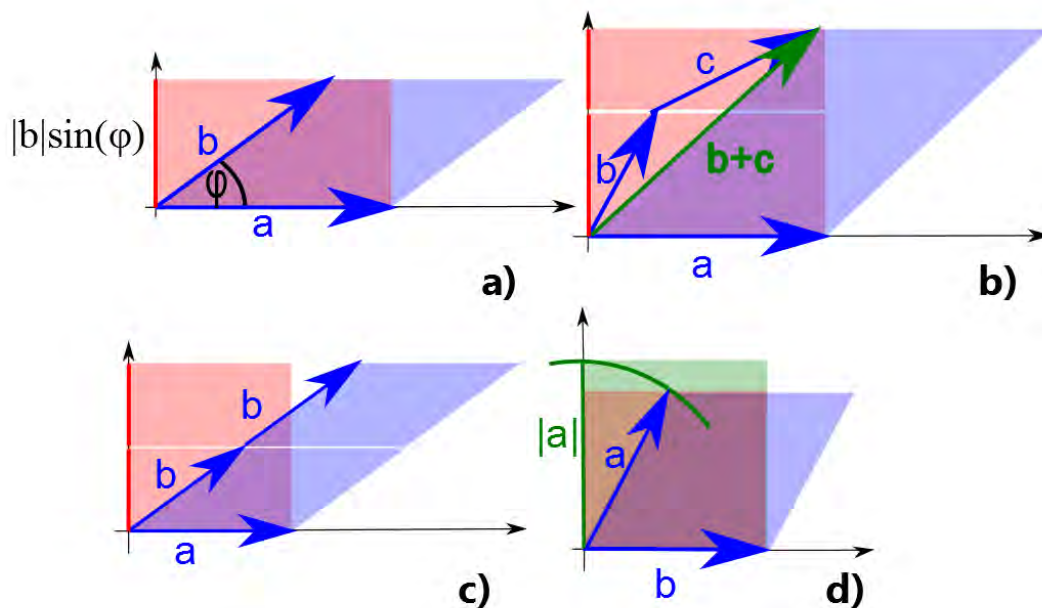


Abbildung 6.1: Die ersten Gesetzmässigkeiten für das Vektorprodukt folgen direkt aus geometrischen betrachtungen.

### Satz Gesetze für das Vektorprodukt

- i) Betrag des Vektorprodukts: Flächeninhalt des von  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$  aufgespannten Parallelogramms.
- ii)  $\vec{a} \times (\vec{b} + \vec{c}) = \vec{a} \times \vec{b} + \vec{a} \times \vec{c}$ , Distributiv-Gesetz
- iii)  $\vec{a} \times (\lambda \cdot \vec{b}) = \lambda \cdot (\vec{a} \times \vec{b})$ , Assoziativ-Gesetz
- iv)  $\vec{a} \times \vec{b} = -\vec{b} \times \vec{a}$ , Anti-Kommutativ-Gesetz
- v)  $|\vec{a} \times \vec{b}| \leq |\vec{a}| \cdot |\vec{b}|$

## 6.2 Herleitungen

Auch hier gehen wir axiomatisch vor, genau so wie wir es bereits beim Skalarprodukt getan haben. Welche allgemeinen Gesetze gelten für das Vektorprodukt? Gilt das Assoziativ-Gesetz, gilt das Kommutativgesetz? Wir definieren dafür zuerst, welche Eigenschaften wir für das Vektorprodukt wünschen. Erst später kümmern wir uns darum, wie man das Vektorprodukt in einer gegebenen Basis berechnet.

Wie Abb.6.1 a) zeigt, ist der Betrag des Vektorprodukts gleich dem Flächeninhalt des Parallelogramms, das von den Vektoren  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$  aufgespannt wird. Mit  $|b| \sin(\varphi)$  wird die Komponente (rot) von  $\vec{b}$  berechnet, die senkrecht auf  $\vec{a}$  steht. Wie Abb.6.1 b) zeigt, kann die Fläche des grossen blauen Parallelogramms auf zwei Arten berechnet werden: entweder direkt als  $|\vec{a} \times (\vec{b} + \vec{c})|$  oder als Summe der kleinen roten Rechtecke,



die sich zu  $|\vec{a} \times \vec{b}|$  und  $|\vec{a} \times \vec{c}|$  berechnen. Also muss gelten

$$\vec{a} \times (\vec{b} + \vec{c}) = \vec{a} \times \vec{b} + \vec{a} \times \vec{c}$$

Abb.6.1 c) zeigt, dass eine Streckung um den Faktor Zwei, auch zur Verdoppelung des blauen Parallelogramms — d.h. des Skalarprodukts — führt. Dies muss für alle Streckungsfaktoren gelten also folgt

$$\vec{a} \times (\lambda \cdot \vec{b}) = \lambda \cdot (\vec{a} \times \vec{b}) .$$

Schliesslich zeigt Abb.6.1 d), dass die Fläche des blauen Parallelogramms meistens kleiner — höchstens aber gleich gross — ist, als die des Rechtecks mit dem Seitenlängen  $|a|$  und  $|b|$ . Deshalb gilt für das Vektorprodukt

$$|\vec{a} \times \vec{b}| \leq |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| .$$

Das letzte Gesetz in 6.1 lässt sich nachvollziehen, indem Sie zwei Vektoren  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$  festlegen, z.B.  $\vec{a}$  nach rechts und  $\vec{b}$  nach vorne. Dann zeigt  $\vec{a} \times \vec{b}$  mit der Rechten-Hand-Regel nach oben und  $\vec{b} \times \vec{a}$  nach unten.

### 6.3 Das Vektorprodukt in einer rechtshändigen Orthonormalbasis

#### Beispiel 6.7 Vektorprodukt für Basisvektoren

745623

Berechne das Vektorprodukt zwischen *allen* Basisvektoren in einer rechtshändigen Orthonormalbasis. Benutze dazu nur die Definition 6.1 des Vektorprodukts.

$$\vec{e}_1 \times \vec{e}_1 = ?, \vec{e}_2 \times \vec{e}_2 = ? \dots$$

$$\vec{e}_1 \times \vec{e}_2 = ?, \vec{e}_2 \times \vec{e}_1 = ? \dots$$

**Lösung:**

- $\vec{e}_i \times \vec{e}_i = 0$  ( $i \in \{1, 2, 3\}$ , gilt für alle Basisvektoren)
- $\vec{e}_1 \times \vec{e}_2 = \vec{e}_3$
- $\vec{e}_2 \times \vec{e}_3 = \vec{e}_1$
- $\vec{e}_3 \times \vec{e}_1 = \vec{e}_2$

#### Beispiel 6.8 Vektorprodukt für allgemeine Vektoren

936044

Berechne das Vektorprodukt zwischen zwei allgemeinen Vektoren in einer rechtshändigen Orthonormalbasis. Benutze dafür auch die Sätze 6.1. Drücke dazu

$\vec{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix}$  mit Hilfe der Basisvektoren aus:

$$\vec{a} = a_1\vec{e}_1 + a_2\vec{e}_2 + a_3\vec{e}_3$$

Berechne dann das Vektorprodukt für die allgemeinen Vektoren  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$   
 Übrigens gilt auch  $\vec{b} = b_1\vec{e}_1 + b_2\vec{e}_2 + b_3\vec{e}_3$

**Lösung:**

$$\begin{aligned} \vec{a} \times \vec{b} &= (a_1\vec{e}_1 + a_2\vec{e}_2 + a_3\vec{e}_3) \times (b_1\vec{e}_1 + b_2\vec{e}_2 + b_3\vec{e}_3) \\ &= a_1 \cdot b_1\vec{e}_1 \times \vec{e}_1 + a_1 \cdot b_2\vec{e}_1 \times \vec{e}_2 + a_1 \cdot b_3\vec{e}_1 \times \vec{e}_3 \\ &\quad + a_2 \cdot b_1\vec{e}_2 \times \vec{e}_1 + a_2 \cdot b_2\vec{e}_2 \times \vec{e}_2 + a_2 \cdot b_3\vec{e}_2 \times \vec{e}_3 \\ &\quad + a_3 \cdot b_1\vec{e}_3 \times \vec{e}_1 + a_3 \cdot b_2\vec{e}_3 \times \vec{e}_2 + a_3 \cdot b_3\vec{e}_3 \times \vec{e}_3 \\ &= a_1b_2\vec{e}_3 - a_1b_3\vec{e}_2 - a_2b_1\vec{e}_3 + a_2b_3\vec{e}_1 + a_3b_1\vec{e}_2 - a_3b_2\vec{e}_1 \\ &= (a_2b_3 - a_3b_2)\vec{e}_1 + (a_3b_1 - a_1b_3)\vec{e}_2 + (a_1b_2 - a_2b_1)\vec{e}_3 \\ &= \begin{pmatrix} a_2b_3 - a_3b_2 \\ a_3b_1 - a_1b_3 \\ a_1b_2 - a_2b_1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Achtung, dieser Ausdruck gilt nur in einem orthonormalen, rechtshändigen Koordinatensystem! Für andere Koordinatensysteme ergeben sich — wie beim Skalarprodukt — andere Ausdrücke für das Vektorprodukt.

Der Ausdruck, der am Ende in Beispiel 6.1 entsteht lässt sich nur schwer merken. Die Infobox 6.1 zeigt ein Verfahren, wie der Ausdruck von Beispiel 6.1 ohne Auswendiglernen sondern mit einem einfachen Verfahren hingeschrieben werden kann.

### Beispiel 6.9 Rechenregeln Vektorprodukt

020196

Berechne für die Vektoren  $\vec{a} = \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \\ -2 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{b} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -3 \end{pmatrix}$  und  $\vec{c} = \begin{pmatrix} -2 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}$ . Benutzen Sie die Teilresultate der ersten Teilaufgaben für die Berechnung der letzteren.

a)  $\vec{a} \times \vec{b}$

d)  $\vec{a} \times (\vec{b} + \vec{c})$

f)  $(\vec{a} + \vec{b}) \times (\vec{b} - \vec{c})$

b)  $\vec{a} \times \vec{c}$

e)  $\vec{a} \times (\vec{b} - \vec{c})$

g)  $(\vec{a} \times \vec{b}) \times \vec{c}$

c)  $\vec{b} \times \vec{c}$

**Lösung:**

a)  $\vec{a} \times \vec{b} = \begin{pmatrix} -4 \\ -5 \\ -3 \end{pmatrix}$

$$\text{b) } \vec{a} \times \vec{c} = \begin{pmatrix} 0 \\ 5 \\ 5 \end{pmatrix}$$

$$\text{c) } \vec{b} \times \vec{c} = \begin{pmatrix} -2 \\ 5 \\ 1 \end{pmatrix}$$

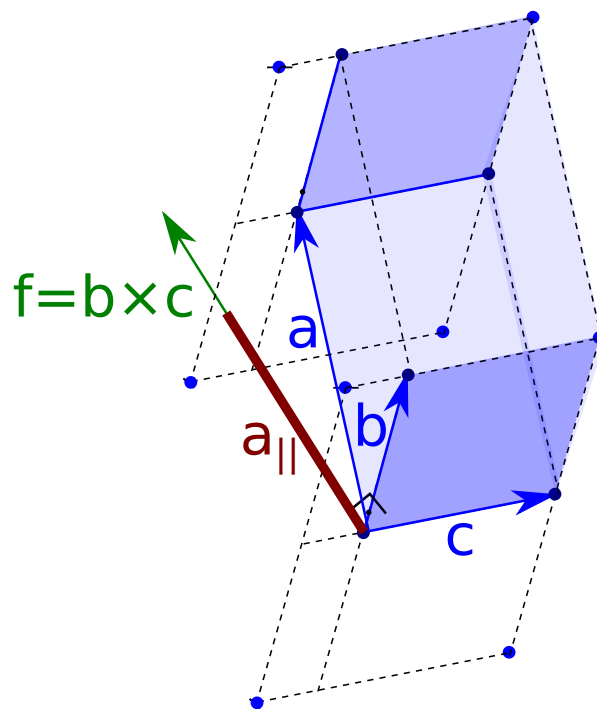
$$\text{d) } \vec{a} \times (\vec{b} + \vec{c}) = \vec{a} \times \vec{b} + \vec{a} \times \vec{c} = \begin{pmatrix} -4 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix}$$

$$\text{e) } \vec{a} \times (\vec{b} - \vec{c}) = \vec{a} \times \vec{b} - \vec{a} \times \vec{c} = \begin{pmatrix} -4 \\ -10 \\ -8 \end{pmatrix}$$

$$\text{f) } (\vec{a} + \vec{b}) \times (\vec{b} - \vec{c}) = \vec{a} \times \vec{b} - \vec{a} \times \vec{c} + \vec{b} \times \vec{b} - \vec{b} \times \vec{c} = \begin{pmatrix} -2 \\ -15 \\ -9 \end{pmatrix}$$

$$\text{g) } (\vec{a} \times \vec{b}) \times \vec{c} = \begin{pmatrix} -8 \\ 10 \\ -6 \end{pmatrix}$$

## 6.4 Spatprodukt



— Im Folgenden betrachten wir drei Vektoren  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  und  $\vec{c}$  und den Ausdruck —

$$\vec{a} \odot \underbrace{(\vec{b} \times \vec{c})}_{=:\vec{f}}.$$

Wir stellen fest, dass das Vektorprodukt  $\vec{f} = \vec{b} \times \vec{c}$  senkrecht auf dem Parallelogramm aufgespannt durch  $\vec{b} \times \vec{c}$  steht und dass  $|\vec{f}|$  gleich der Fläche des Parallelogramm aufgespannt durch  $\vec{b}$  und  $\vec{c}$  ist. Durch das Skalarprodukt

$$\vec{a} \odot \vec{f} = \underbrace{\cos(\varphi) \cdot |\vec{a}|}_{=:a_{\parallel}} \cdot |\vec{f}|$$

wird der Schatten  $a_{\parallel}$  von  $\vec{a}$  auf  $\vec{f}$  berechnet. Dies ist genau die Höhe des Körpers aufgespannt durch  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  und  $\vec{c}$ . Diese Höhe wird noch mit der Grundfläche  $|\vec{f}|$  multipliziert. Zusammenfassend haben wir also

$$\vec{a} \odot (\vec{b} \times \vec{c}) = \text{Grundfläche} \cdot \text{Höhe} = \text{Volumen}.$$

### Definition Spatprodukt

Das Parallelepipet aufgespannt durch die Vektoren  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  und  $\vec{c}$  nennen wir **Spat**. Für die Vektoren  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$ ,  $\vec{c} \in \mathbb{R}^3$  heisst die Zahl

$$[\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}] := \vec{a} \odot (\vec{b} \times \vec{c})$$

das **Spatprodukt**.

Der Betrag des Spatprodukts ist gleich dem Volumen des Spats.

[?, p.403] [?, Bd. 1 II 3.5]

### Satz Gesetze für das Spatprodukt

- Paarweise Vertauschung :

$$[\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}] = -[\vec{a}, \vec{c}, \vec{b}]$$

- Zyklische Vertauschung:

$$[\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}] = [\vec{c}, \vec{a}, \vec{b}] = [\vec{b}, \vec{c}, \vec{a}]$$

Wir merken uns also: Das Volumen des Spats ist unabhängig von der Reihenfolge in der  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$ ,  $\vec{c}$  aufzählet werden. Nur das Vorzeichen kann eventuell ändern, wenn die Reihenfolge vertauscht wird.

**Beispiel 6.10** Berechne das Volumen des Spats aufgespannt durch  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  und  $\vec{c}$  **340107**

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ 4 \\ 5 \end{pmatrix}, \vec{c} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

Zuerst berechnen wir das Vektorprodukt

$$\vec{f} := \vec{b} \times \vec{c} = \begin{pmatrix} 5 \\ 5 \\ -4 \end{pmatrix}$$

Dann berechnen wir das Skalarprodukt

$$\vec{a} \odot \vec{f} = -7$$

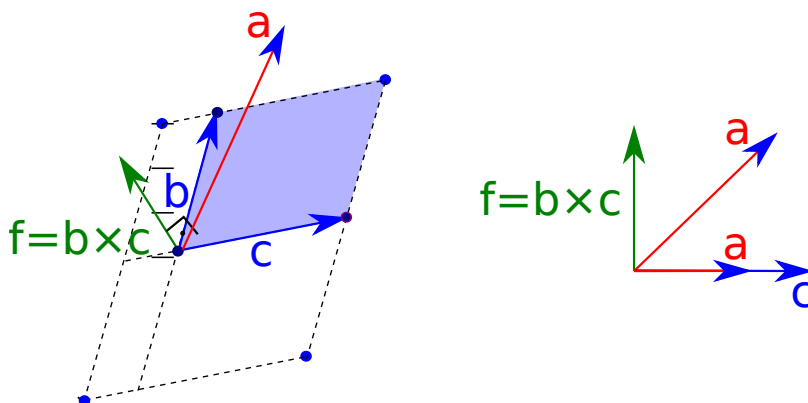
Also ist das Volumen  $|\vec{a} \odot \vec{f}| = V = 7$ .

**Beispiel 6.11 Bestimme, ob die Vektoren linear abhängig sind**

451218

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} 3 \\ 4 \\ 5 \end{pmatrix}, \vec{c} = \begin{pmatrix} 7 \\ 8 \\ 9 \end{pmatrix}$$

Benutze dazu das Spatprodukt.



**Lösung:**

Liegen die drei Vektoren in einer Ebene, sind sie linear abhängig. Andererseits ist das Volumen des aufgespannten Spates gleich Null.

Daraus folgt, dass man das Vektorprodukt wie folgt benutzen kann um die lineare Abhängigkeit zu überprüfen. Zuerst berechnen wir das Vektorprodukt

$$\vec{f} := \vec{b} \times \vec{c} = \begin{pmatrix} -4 \\ 8 \\ -4 \end{pmatrix}$$

Dann berechnen wir das Skalarprodukt

$$\vec{a} \odot \vec{f} = 0$$

Also ist das Volumen  $V = [\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}] = 0$  und die Vektoren sind linear abhängig.

### Beispiel 6.12 Spatprodukt

5AHNL8

Berechne das Volumen des Parallelepipeds aufgespannt durch die Vektoren  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  und  $\vec{w}$ . Gib jeweils an, ob die Vektoren linear abhängig sind.

a)  $\vec{u} = \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{v} = \begin{pmatrix} 4 \\ -3 \\ 0 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{w} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}$

b)  $\vec{u} = \begin{pmatrix} 0 \\ 7 \\ 2 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{v} = \begin{pmatrix} 0 \\ 20 \\ 0 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{w} = \begin{pmatrix} 1 \\ -4 \\ 0 \end{pmatrix}$

c)  $\vec{u} = \begin{pmatrix} 4 \\ 17 \\ -5 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{v} = \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \\ 19 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{w} = \begin{pmatrix} 4 \\ 20 \\ 14 \end{pmatrix}$

d)  $\vec{u} = \begin{pmatrix} 20 \\ 13 \\ 2 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{v} = \begin{pmatrix} -2 \\ -3 \\ 6 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{w} = \begin{pmatrix} 0 \\ 9 \\ -3 \end{pmatrix}$

**Lösung:**

a) Wir benutzen das Spatprodukt

$$a = \vec{u} \odot \vec{v} \times \vec{w} = \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} -6 \\ -8 \\ 7 \end{pmatrix} = -24 .$$

Das Volumen ist  $V = |a| = 24$ . Die Vektoren sind linear unabhängig.

b)  $a = \vec{u} \odot \vec{v} \times \vec{w} = \begin{pmatrix} 0 \\ 7 \\ 2 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -20 \end{pmatrix} = -40$  . Das Volumen ist  $V = |a| = 40$ . Die Vektoren sind linear unabhängig.

c)  $a = \vec{u} \odot \vec{v} \times \vec{w} = 0$  . Das Volumen ist  $V = 0$ . Die Vektoren sind linear *abhängig*.

d)  $a = \vec{u} \odot \vec{v} \times \vec{w} = -1014$  . Das Volumen ist  $V = \|a\| = 1014$ . Die Vektoren sind linear unabhängig.

## 6.5 Abstand Punkt-Gerade

**Satz Abstand Punkt Gerade**

Der Abstand eines Punktes  $\vec{B}$  von der Geraden  $g : \vec{x} = \vec{A} + \lambda \vec{u}$  ist  $h = \frac{|\vec{u} \times (\vec{B} - \vec{A})|}{|\vec{u}|}$

[?, Bd. 1 II 4.1.3]

**Beispiel 6.13 Abstand Punkt-Gerade**

DK2JYA

Wir betrachten die Gerade  $\vec{X} = \vec{A} + \lambda \cdot \vec{v}$  und den Punkt  $\vec{B}$  ( $\vec{A}, \vec{B}, \vec{X} \in \mathbb{R}^3; \lambda \in \mathbb{R}$ ). Wie gross ist ihr Abstand? Berechnen Sie dazu zuerst die Fläche aufgespannt durch  $\vec{r} = \vec{B} - \vec{A}$  und  $\vec{v}$ .

$$\vec{X} = \vec{A} + \lambda \cdot \vec{v} = \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \lambda \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

Wir berechnen zuerst die Fläche aufgespannt durch  $\vec{r} = \vec{B} - \vec{A}$  und  $\vec{v}$ .

$$\vec{n}' = \vec{v} \times (\vec{B} - \vec{A}) = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 2 \\ 10 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 20 \end{pmatrix}$$

Also  $F = |\vec{n}'| = 20$ . Danach fällt uns auf, dass sich die Fläche des Parallelogramms auch ausdrücken lässt durch die Höhe im Parallelogramm  $h$

$$F = h \cdot |\vec{v}|$$

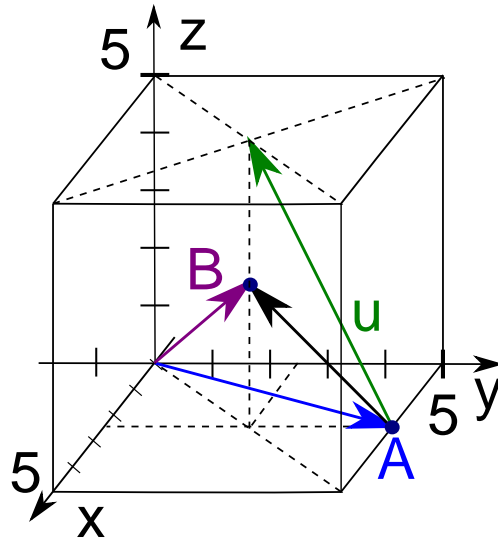
Die Höhe ist auch gleichzeitig der Abstand der Geraden zum Punkt. Also lösen wir auf nach  $h$

$$h = \frac{F}{|\vec{v}|} = \frac{|\vec{v} \times (\vec{B} - \vec{A})|}{|\vec{v}|} = \frac{20}{2} = 10$$

**Beispiel 6.14 Abstand Punkt-Gerade im Raum**

292982

Wie gross ist der Abstand zum Raum-Mittelpunkt des Würfels  $5 \times 5 \times 5$ ?



Lösung:

Vektoren auslesen:  $\vec{A} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 5 \\ 5 \\ 0 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{B} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 5 \\ 5 \\ 5 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{u} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 \\ -10 \\ 5 \end{pmatrix}$  Vektoren einsetzen:

$$(\vec{B} - \vec{A}) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 \\ -5 \\ 5 \end{pmatrix}$$

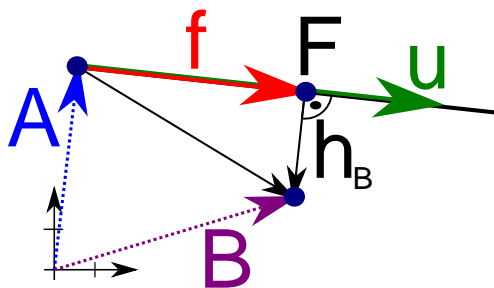
$$\vec{u} \times (\vec{B} - \vec{A}) = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 25 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$h = \frac{25 \cdot 2}{4 \cdot \sqrt{125}} = \frac{\sqrt{5}}{2} \approx 1.12$$

Achtung, der Satz ist eine Eigenheit von  $\mathbb{R}^3$ . Er basiert darauf, dass in  $\mathbb{R}^3$  das Vektorprodukt existiert. In  $\mathbb{R}^N$  mit  $N > 3$  gibt es keine Vektorprodukt. Deshalb muss dort der Abstand zwischen dem Punkt  $B$  und der Geraden  $g: \vec{A} + \lambda \vec{u}$  über den Fusspunkt  $\vec{F} = \vec{A} + \vec{f}$  und das Lot  $\vec{h}_B = \vec{B} - \vec{F}$  berechnet werden.

**Beispiel 6.15** Bestimme den Fusspunkt von  $\vec{B}$  auf  $g$

14259



Zerlege dazu  $\vec{B} - \vec{A}$  in eine Komponente  $\vec{f}$  parallel ( $\parallel$ ) und in eine Kompen-



te  $\vec{h}_B$  senkrecht ( $\perp$ ) zu  $\vec{u}$ . Zur Kontrolle kann die Länge des Verbindungsvektors von Fusspunkt zu  $\vec{B}$ . Sie sollte gleich lang sein, wie der Abstand, der in der vorherigen Aufgabe berechnet wurde. **Lösung:**

Um den Verbindungsvektor vom Aufpunkt  $\vec{A}$  zum Fusspunkt zu berechnen projizieren<sup>a</sup> wir den Verbindungsvektor  $\vec{B} - \vec{A}$  auf  $\vec{u}$ :

$$\vec{f} = [(\vec{B} - \vec{A}) \odot \frac{\vec{u}}{\|\vec{u}\|}] \frac{\vec{u}}{\|\vec{u}\|} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{3}{2} \\ 3 \end{pmatrix}$$

Der Fusspunkt befindet sich also bei

$$\vec{F} = \vec{A} + \vec{f} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 5 \\ 7 \\ 6 \end{pmatrix}$$

Das Lot ist

$$\vec{h}_B = \vec{B} - \vec{F} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ -\frac{1}{2} \end{pmatrix}$$

und die Länge davon

$$\|\vec{h}_B\| = \frac{\sqrt{5}}{2}$$

in Übereinstimmung mit dem Resultat aus der vorherigen Aufgabe.

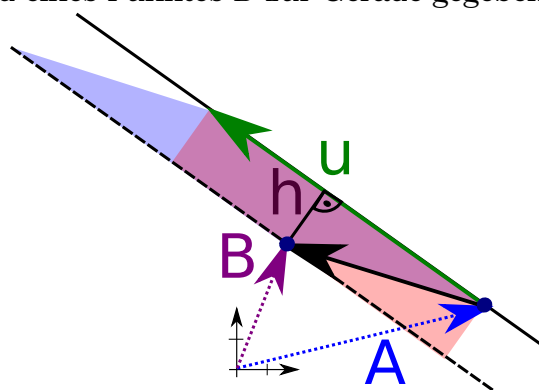
<sup>a</sup>wir berechnen die Länge des Schattens

## 6.6 Wieso funktioniert das? (Herleitung)

### Beispiel 6.16 Abstand Punkt-Gerade im Raum

094524

Berechne den Abstand eines Punktes  $\vec{B}$  zur Gerade gegeben durch  $g : \vec{A} + \lambda \vec{u}$ .



Drücke dazu die Fläche des Parallelogramms aufgespannt durch  $\vec{u}$  und  $\vec{B} - \vec{A}$  einmal mit Hilfe des Vektorprodukts aus und einmal mit Hilfe des Abstands aus  
**Lösung:**

- $F = \|\vec{u} \times (\vec{B} - \vec{A})\|$

- $F = \|\vec{u}\| \cdot h$

$$h = \frac{\|\vec{u} \times (\vec{B} - \vec{A})\|}{\|\vec{u}\|}$$

### Beispiel 6.17 Abstand Punkt-Gerade

CJ1IXZ

Wir betrachten die Gerade  $\vec{X} = \vec{A} + \lambda \cdot \vec{v}$  und den Punkt  $\vec{B}$  ( $\vec{A}, \vec{B}, \vec{X} \in \mathbb{R}^3; \lambda \in \mathbb{R}$ ). Wie gross ist ihr Abstand? Berechnen Sie dazu zuerst die Fläche aufgespannt durch  $\vec{r} = \vec{B} - \vec{A}$  und  $\vec{v}$ .

a)  $\vec{X} = \vec{A} + \lambda \vec{v} = \begin{pmatrix} -4 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix} + \lambda \cdot \begin{pmatrix} 8 \\ 0 \\ 15 \end{pmatrix}$  und  $\vec{B} = \begin{pmatrix} -4 \\ 1 \\ 3 \end{pmatrix}$

b)  $\vec{X} = \vec{A} + \lambda \vec{v} = \begin{pmatrix} 7 \\ 7 \\ 1 \end{pmatrix} + \lambda \cdot \begin{pmatrix} -12 \\ 35 \\ 0 \end{pmatrix}$  und  $\vec{B} = \begin{pmatrix} 7 \\ 12 \\ -3 \end{pmatrix}$

c)  $\vec{X} = \vec{A} + \lambda \vec{v} = \begin{pmatrix} 4 \\ -4 \\ 7 \end{pmatrix} + \lambda \cdot \begin{pmatrix} 6 \\ 2 \\ 5 \end{pmatrix}$  und  $\vec{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ -2 \\ 9 \end{pmatrix}$

**Lösung:**

a)  $\vec{r} = \vec{B} - \vec{A} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -2 \end{pmatrix}$

$$\vec{v} \times \vec{r} = \begin{pmatrix} -15 \\ 16 \\ 8 \end{pmatrix}, \|\vec{v} \times \vec{r}\| \approx 23.34$$

$$h \approx \frac{23.34}{17} \approx 1.37325 \quad (\text{genau: } = \frac{\sqrt{545}}{17})$$

b)

$$h = \frac{\left| \begin{pmatrix} -140 \\ -48 \\ -60 \end{pmatrix} \right|}{37} = \frac{4\sqrt{1594}}{37} \approx 4.31621$$

c)

$$h = \frac{\left| \begin{pmatrix} -6 \\ -32 \\ 20 \end{pmatrix} \right|}{\sqrt{65}} = \frac{2\sqrt{365}}{\sqrt{65}} \approx 4.73936$$

7.1	Abstand Punkt Ebene . . . . .	154
7.2	Wie kann man eine Ebene in $\mathbb{R}^3$ darstellen? . . . . .	170
7.3	Wie man die Darstellungen der Ebene ineinander überführt . . . . .	173
7.4	Hesse-Normalenform . . . . .	181
7.5	Wie kann man die Koeffizienten der Koordinatenform interpretieren? . . . . .	188

## 7.1 Abstand Punkt Ebene

Durch einen festen Punkt (den Aufpunkt) und eine gegebene Richtung (den Richtungsvektor) erhält man eine Gerade. Nimmt man einen zweiten Richtungsvektor hinzu, dann entsteht eine Ebene.

### Definition Parameterdarstellung einer Ebene in $\mathbb{R}^3$

Die Parameterdarstellung einer Ebene in  $\mathbb{R}^3$  ist

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \vec{P} + \lambda \vec{u} + \nu \vec{v}$$

- $\vec{P} \in \mathbb{R}^3$  heisst **Aufpunkt** (oder Stützpfel)
- $\vec{u}, \vec{v} \in \mathbb{R}^3$  heissen **Richtungsvektoren**
- $\lambda, \nu \in \mathbb{R}$  sind freie Parameter

Die Richtungsvektoren müssen nicht unbedingt senkrecht aufeinander stehen. Sie dürfen aber *nicht kollinear* sein.

**Beispiel 7.1 Parameterdarstellung der Ebene**

898246

Die Ebene  $E$  geht durch die Punkte

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}, \vec{B} = \begin{pmatrix} 6 \\ 5 \\ 4 \end{pmatrix}, \vec{C} = \begin{pmatrix} 7 \\ 8 \\ 9 \end{pmatrix}.$$

- a) Bestimme Parameterdarstellung der Ebene.  
 b) Welche Freiheiten haben wir bei dieser Darstellung?

**Lösung:**

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} &= \vec{A} + \lambda (\vec{B} - \vec{A}) + \nu (\vec{C} - \vec{A}) \\ &= \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} + \lambda \underbrace{\begin{pmatrix} 5 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix}}_{=\vec{u}} + \nu \underbrace{\begin{pmatrix} 6 \\ 6 \\ 6 \end{pmatrix}}_{=\vec{v}} \end{aligned}$$

mit  $\lambda, \nu \in \mathbb{R}$ .

**Freiheiten bei der Wahl:** Wir können  $\vec{A}$ ,  $\vec{B}$  oder  $\vec{C}$  als Aufpunkt wählen. Wir können Richtungsvektoren strecken oder durch eine Linearkombination von  $\vec{u}$  und  $\vec{v}$  ersetzen.

**Beispiel 7.2 Parameterdarstellung Ebene**

787135

Die Ebene  $E$  geht durch die Punkte

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix}, \vec{B} = \begin{pmatrix} 4 \\ -4 \\ 4 \end{pmatrix}, \vec{C} = \begin{pmatrix} 8 \\ -8 \\ 8 \end{pmatrix}.$$

Bestimme die Parameterdarstellung der Ebene. **Lösung:**

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} &= \vec{A} + \lambda (\vec{B} - \vec{A}) + \nu (\vec{C} - \vec{A}) \\ &= \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} 2 \\ -4 \\ 2 \end{pmatrix} + \nu \begin{pmatrix} 6 \\ -8 \\ 6 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

**Beispiel 7.3 Liegen die Punkte in der Ebene  $E$ ?**

642893

$$\vec{Q} = \begin{pmatrix} -22 \\ 28 \\ -22 \end{pmatrix}, \vec{R} = \begin{pmatrix} 5 \\ -5 \\ -5 \end{pmatrix}, \vec{S} = \begin{pmatrix} -6 \\ 4 \\ -6 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

**Schneller Weg zur Lösung:** Wir berechnen die Spatprodukte  $[\vec{Q} - \vec{A}, \vec{u}, \vec{v}]$  usw. ( $\vec{u}, \vec{v}$  sind Richtungsvektoren der Ebene). Ist das Volumen des Spates 0, liegen der Punkt  $\vec{Q}$  in der Ebene.

**Alternativ:** Um zu beurteilen, ob  $\vec{Q}$  in der Ebene liegt berechnen wir den Verbindungsvektor vom Aufpunkt zu  $\vec{Q}$ :

$$\vec{q} = \vec{Q} - \vec{A} = \begin{pmatrix} -24 \\ 28 \\ -24 \end{pmatrix}$$

Gelingt es nun  $\vec{q}$  als Summe der beiden Richtungsvektoren  $\vec{u}$  und  $\vec{v}$  darzustellen, liegt  $\vec{Q}$  in der Ebene:

$$\begin{pmatrix} -24 \\ 28 \\ -24 \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} 2 \\ -4 \\ 2 \end{pmatrix} + \nu \begin{pmatrix} 6 \\ -8 \\ 6 \end{pmatrix}$$

Aus der zwei ersten Komponenten berechnen wir  $\lambda$  und  $\nu$ :

$$\begin{aligned} L_1: \quad -24 &= 2\lambda + 6\nu \\ L_2: \quad 28 &= -4\lambda - 8\nu \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_2 + 2L_1: \quad -20 &= 4\nu \\ &\Rightarrow \nu = -5 \Rightarrow \lambda = 3. \end{aligned}$$

Setzen wir dieses Resultat in die dritte Komponente ein, ergibt sich eine wahre Aussage:

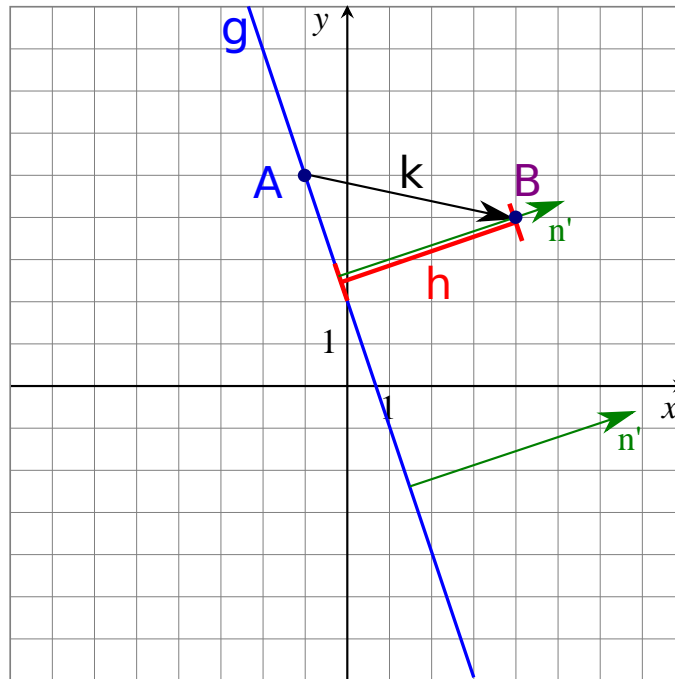
$$-24 = 2 \cdot 3 + 6 \cdot (-5)$$

Der Verbindungsvektor  $\vec{q}$  lässt sich also zerlegen in eine Komponente entlang  $\vec{u}$  und eine entlang  $\vec{v}$ . Deshalb liegt  $\vec{Q}$  in der Ebene.

Für  $\vec{R}$  ergibt sich beim Einsetzen in die dritte Komponente ein Widerspruch. Deshalb liegt  $\vec{R}$  nicht in der Ebene dafür aber der Punkt  $\vec{S}$  mit  $\lambda = 5; \nu = -3$ .

#### Beispiel 7.4 Abstand Punkt Gerade in $\mathbb{R}^2$

Bestimmen Sie den Abstand des Punktes  $\vec{B}$  von der Geraden  $g$



**Lösung:**

Wir lesen die Punkte und den Richtungsvektor aus.

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} -1 \\ 5 \end{pmatrix}, \vec{B} = \begin{pmatrix} 4 \\ 4 \end{pmatrix}, \vec{v} = \begin{pmatrix} 1 \\ -3 \end{pmatrix}$$

Daraus bestimmen wir den Verbindungsvektor Gerade-Punkt und den Normalenvektor

$$\vec{k} = \vec{B} - \vec{A} = \begin{pmatrix} 5 \\ -1 \end{pmatrix}, \vec{n}' = \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Der Abstand ist nun die Projektion von  $\vec{k}$  auf  $\vec{n}'$

$$h = \vec{k} \odot \vec{n}' \cdot \frac{1}{|\vec{n}'|} = \frac{14}{\sqrt{10}}$$

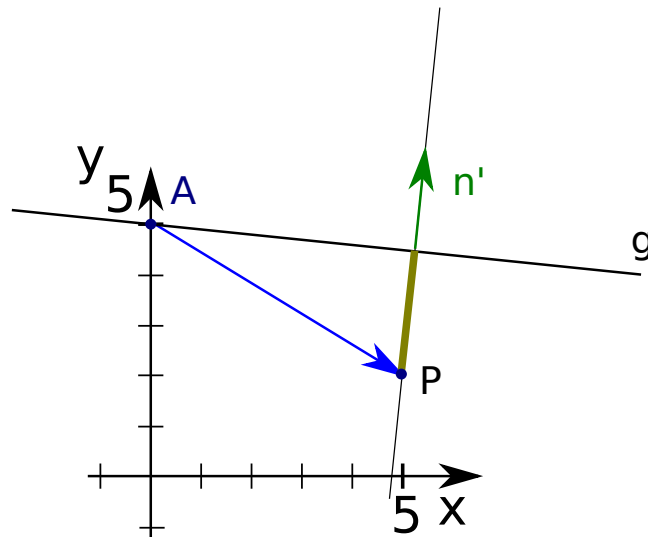
**Beispiel 7.5 Abstand Punkt Gerade in  $\mathbb{R}^2$**

ZIZIX3

Die Gerade  $g$  lautet  $y = -0.1 \cdot x + 5$ . Wir wollen den Abstand zu Punkt  $\vec{P} = \begin{pmatrix} 5 \\ 2 \end{pmatrix}$  berechnen (ohne Vektorprodukt). Gehen Sie dafür wie folgt vor:

- Machen Sie eine Skizze der Situation in der x-y-Ebene.
- Geben Sie die Gerade in Parameterform an.
- Berechnen Sie einen Vektor  $\vec{n}'$ , der senkrecht zu  $g$  steht. Zeichnen Sie diesen Vektor ein.

- d) Berechnen Sie einen Vektor  $\vec{w}$ , der  $\vec{P}$  mit der Geraden verbindet. Zeichnen Sie diesen Vektor ein.
- e) Berechnen Sie die Länge des Schattens von  $\vec{w}$  auf  $\vec{n}'$ .
- f) Wie kann man nun den Abstand von  $\vec{P}$  zu  $g$  berechnen?.



**Lösung:**

a) Skizze

b) Parameterform  $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 5 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} 10 \\ -1 \end{pmatrix}$

c) Normalenvektor:  $\vec{n}' = \begin{pmatrix} 1 \\ 10 \end{pmatrix}$

d)  $\vec{w} = \vec{P} - \vec{A} = \begin{pmatrix} 5 \\ 2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 \\ -3 \end{pmatrix}$

e) Schatten:

$$h = \frac{\vec{w} \odot \vec{n}'}{|\vec{n}'|} = \frac{\begin{pmatrix} 5 \\ -3 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} 1 \\ 10 \end{pmatrix}}{\sqrt{101}} \approx -2.49$$

f) Der Abstand ist  $|h| = 2.49$

**Beispiel 7.6 Abstand Punkt Gerade in  $\mathbb{R}^2$**

UE9YTP

Berechnen Sie den Abstand der folgenden Geraden vom angegebenen Punkt.



a)  $g: y = 0.1 \cdot x + 3$  und  $\vec{P} = \begin{pmatrix} 5 \\ 2 \end{pmatrix}$

b)  $h: \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \end{pmatrix} + \lambda \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix}$  und  $\vec{Q} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}$

c)  $i$  verläuft durch die Punkt  $\vec{A} = \begin{pmatrix} 10 \\ -3 \end{pmatrix}$  und  $\vec{B} = \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \end{pmatrix}$ . Gesucht ist der Abstand zu  $\vec{R} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$

d)  $k: 2x - y = 24$  und  $\vec{S} = \begin{pmatrix} 5 \\ 2 \end{pmatrix}$

**Lösung:**

Der Abstand  $|h|$  kann berechnet werden aus

$$h\left(\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}\right) = \frac{\left(\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} - \vec{A}\right) \odot \vec{n}'}{|\vec{n}'|}$$

a) Parameterform

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} 10 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Abstand

$$h\left(\begin{pmatrix} 5 \\ 2 \end{pmatrix}\right) = \frac{\left(\begin{pmatrix} 5 \\ 2 \end{pmatrix} - \vec{A}\right) \odot \begin{pmatrix} 1 \\ -10 \end{pmatrix}}{\sqrt{(-10)^2 + 1^2}} = \frac{15}{\sqrt{101}} \approx 1.49$$

b)  $h: \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \end{pmatrix} + \lambda \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix}$  und  $\vec{Q} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}$  Abstand:

$$h\left(\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}\right) = \frac{\left(\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \end{pmatrix}\right) \odot \begin{pmatrix} 3 \\ -2 \end{pmatrix}}{|\vec{n}'|} = \frac{5}{\sqrt{13}} \approx 1.39$$

c) Richtungsvektor

$$\vec{v} = \vec{A} - \vec{B} = \begin{pmatrix} 10 \\ -3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 11 \\ -5 \end{pmatrix}$$

Abstand

$$h\left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}\right) = \frac{\left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \end{pmatrix}\right) \odot \begin{pmatrix} 5 \\ 11 \end{pmatrix}}{|\vec{n}'|} = \frac{-17}{\sqrt{146}} \approx -1.41$$

Abstand  $|h| = 1.41$

d) Direkter Weg über Hesse'sche Normalenform. Auflösen nach 0:  $2x - y - 24 = 0$

$$h\left(\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}\right) = \frac{2x - y - 24}{|\vec{n}'|} = \frac{2x - y - 24}{\sqrt{2^2 + (-1)^2}} = \frac{2x - y - 24}{\sqrt{5}}$$

Abstand:

$$h\left(\begin{pmatrix} 5 \\ 2 \end{pmatrix}\right) = \frac{2 \cdot 5 - 2 - 24}{\sqrt{5}} \approx -7.16$$

also ist der Abstand  $|h| = 7.16$ .

### Beispiel 7.7 Gerade in Parameterdarstellung in $\mathbb{R}^2$

1PGCCB

Geben Sie die Parameterform der Geraden an.

Berechnen Sie den Abstand zu einem allgemeinen Punkt  $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$  in der Ebene.

Lesen Sie dann den Normalenvektor und den Abstand zum Ursprung aus.

a) f:  $y(x) = 4 - 2 \cdot x$

d) i:  $y(x) = \frac{3x+8}{2}$

b) g:  $y(x) = -8 + x$

e) j:  $2x - y = 14$

c) h:  $y(x) = \frac{9-x}{3}$

f) k:  $2x = 26$

**Lösung:**

a) Parameterform

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 4 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \end{pmatrix}$$

mit dem Normalenvektor  $\vec{n}' = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix}$ . Abstand

$$h\left(\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}\right) = \frac{-y + 4 - 2 \cdot x}{\sqrt{5}}$$

Abstand zum Ursprung ist  $h\left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}\right) = \frac{4}{\sqrt{5}} \approx 1.789$

Es ist wichtig, dass in der Hesseschen Normalenform  $h\left(\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}\right)$  der Normalenvektor auf dem Bruchstrich und unter dem Bruchstrich identisch sind (oder zumindest die selbe Länge haben). Hier haben wir im Zähler  $\vec{n}'' = \begin{pmatrix} -2 \\ -1 \end{pmatrix}$  mit der Länge  $|\vec{n}''| = \sqrt{5}$

b) Parameterform

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -8 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

mit dem Normalenvektor  $\vec{n}' = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix}$ . Abstand

$$h\left(\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}\right) = \frac{-y - 8 + x}{\sqrt{2}}$$

Abstand zum Ursprung ist  $h\left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}\right) = \frac{8}{\sqrt{2}} \approx 5.65685$

c) h:  $y(x) = 3 - \frac{x}{3}$  Parameterform

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 9/4 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} 3 \\ -1 \end{pmatrix}$$

Abstand: Wir lösen nach 0 auf:  $-y + 3 - \frac{x}{3} = 0$  oder  $-3y + 9 - x = 0$  und lesen den Normalenvektor aus

$$\vec{n}' = \begin{pmatrix} -1 \\ -3 \end{pmatrix}.$$

$$h\left(\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}\right) = \frac{-3y + 9 - x}{\sqrt{10}}$$

Abstand zum Ursprung ist  $h\left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}\right) = \frac{9}{\sqrt{10}} \approx 2.85$

d) i:  $y(x) = 4 + \frac{3}{2} \cdot x$  Parameterform

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 4 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix}$$

Abstand: Wir lösen nach 0 auf:  $-y + 4 + \frac{3}{2} \cdot x = 0$  oder  $-2y + 8 + 3 \cdot x = 0$  und lesen den Normalenvektor aus

$$\vec{n}' = \begin{pmatrix} 3 \\ -2 \end{pmatrix}.$$

$$h\left(\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}\right) = \frac{-2y + 8 + 3 \cdot x}{\sqrt{13}}$$

Abstand zum Ursprung ist  $h\left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}\right) = \frac{9}{\sqrt{13}} \approx 2.22$

e) j:  $y = -14 + 2x$  Parameterform

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -14 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}$$

Abstand: Wir lösen nach 0 auf:  $-y - 14 + 2x = 0$  und lesen den Normalenvektor aus

$$\vec{n}' = \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \end{pmatrix}.$$

$$h\left(\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}\right) = \frac{-y - 14 + 2x}{\sqrt{5}}$$

Abstand zum Ursprung ist  $h\left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}\right) = \frac{14}{\sqrt{5}} \approx 6.26$

f) k:  $2x = 26$  Parameterform

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 13 \\ 0 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Abstand: Wir lösen nach 0 auf:  $26 - 2x = 0$  und lesen den Normalenvektor aus

$$\vec{n}' = \begin{pmatrix} -2 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

$$h\left(\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}\right) = \frac{26 - 2x}{2} = 13 - x$$

Abstand zum Ursprung ist  $h\left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}\right) = 13$

### Beispiel 7.8 Gerade in Koordinatenform in $\mathbb{R}^2$

UPMT9H

Geben Sie die Koordinatenform der Geraden an. Berechnen Sie den Abstand zu einem allgemeinen Punkt  $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$  in der Ebene.

Lesen Sie dann den Normalenvektor und den Abstand zum Ursprung aus. Berechnen Sie schliesslich den Abstand zum Punkt  $\vec{P} = \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \end{pmatrix}$ .

a) f:  $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 11 \\ 59 \end{pmatrix} + \lambda \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 5 \end{pmatrix}$

d) i:  $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 63 \\ 3 \end{pmatrix} + \lambda \cdot \begin{pmatrix} 18 \\ 2 \end{pmatrix}$

b) g:  $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -3 \\ 11 \end{pmatrix} + \lambda \cdot \begin{pmatrix} -1 \\ 3 \end{pmatrix}$

e) j:  $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 8 \\ 12 \end{pmatrix} + \lambda \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 10 \end{pmatrix}$

c) h:  $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 16 \\ -12 \end{pmatrix} + \lambda \cdot \begin{pmatrix} -4 \\ 3 \end{pmatrix}$

f) k:  $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 \\ -3.22 \end{pmatrix} + \lambda \cdot \begin{pmatrix} 100 \\ 11 \end{pmatrix}$

**Lösung:**

a) Wir lesen Normalenvektor und Aufpunkt aus

$$\left(\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 11 \\ 59 \end{pmatrix}\right) \odot \begin{pmatrix} -5 \\ 1 \end{pmatrix} = 0$$

Jetzt multiplizieren wir aus und erhalten

$$-4 - 5x + y = 0$$

Der Abstand zu einem allgemeinen Punkt ist

$$h\left(\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}\right) = \frac{-4 - 5x + y}{\sqrt{26}}$$

Abstand zum Ursprung ist  $h\left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}\right) = \frac{-4}{\sqrt{26}}$  also  $|h| \approx 0.784465$  und der Abstand zu  $\vec{P}$

$$h(\vec{P}) = \frac{-6}{\sqrt{26}} \text{ also } |h| \approx 1.18 .$$

b) Wir lesen Normalenvektor und Aufpunkt aus

$$\left(\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -3 \\ 11 \end{pmatrix}\right) \odot \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \end{pmatrix} = 0$$

Jetzt multiplizieren wir aus und erhalten

$$2 - 3x - y = 0$$

Der Abstand zu einem allgemeinen Punkt ist

$$h\left(\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}\right) = \frac{2 - 3x - y}{\sqrt{10}}$$

Abstand zum Ursprung ist  $h\left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}\right) = \frac{2}{\sqrt{10}}$  also  $|h| \approx 0.632456$  und der Abstand zu  $\vec{P}$

$$h(\vec{P}) = \frac{-4}{\sqrt{10}} \text{ also } |h| \approx 1.26 .$$

c) Wir lesen Normalenvektor und Aufpunkt aus

$$\left(\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 16 \\ -12 \end{pmatrix}\right) \odot \begin{pmatrix} 3 \\ 4 \end{pmatrix} = 0$$

Jetzt multiplizieren wir aus und erhalten

$$-3x - 4y = 0$$

Der Abstand zu einem allgemeinen Punkt ist

$$h\left(\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}\right) = \frac{-3x - 4y}{5}$$

Abstand zum Ursprung ist  $h\left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}\right) = 0$  und der Abstand zu  $\vec{P}$

$$h(\vec{P}) = \frac{-15}{5} \text{ also } |h| = 3 .$$

d)

$$72 - 2x + 18y = 0$$

Der Abstand zu einem allgemeinen Punkt:

$$h\left(\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}\right) = \frac{72 - 2x + 18y}{2\sqrt{18}}$$

Abstand zum Ursprung ist  $h\left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}\right) = \frac{72}{2\sqrt{18}}$  also  $|h| \approx 3.98$  und der Abstand zu  $\vec{P}$

$$h(\vec{P}) = \frac{124}{2\sqrt{18}} \text{ also } |h| \approx 6.85 .$$

e)

$$80 - 10x = 0$$

Der Abstand zu einem allgemeinen Punkt ist

$$h\left(\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}\right) = \frac{80 - 10x}{10} = 8 - x$$

Abstand zum Ursprung ist  $h\left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}\right) = 8$  und der Abstand zu  $\vec{P}$

$$h(\vec{P}) = 7$$

f)

$$300 - 11x + 100y = 0$$

Der Abstand zu einem allgemeinen Punkt ist

$$h\left(\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}\right) = \frac{300 - 11x + 100y}{\sqrt{10121}}$$

Abstand zum Ursprung ist  $h\left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}\right) = \frac{300}{\sqrt{10121}}$  also  $|h| \approx 2.98$  und der Abstand zu  $\vec{P}$

$$h(\vec{P}) = \frac{589}{\sqrt{10121}} \text{ also } |h| \approx 5.85 .$$

### Beispiel 7.9 Abstand Punkt Ebene in $\mathbb{R}^3$

1R9P4G

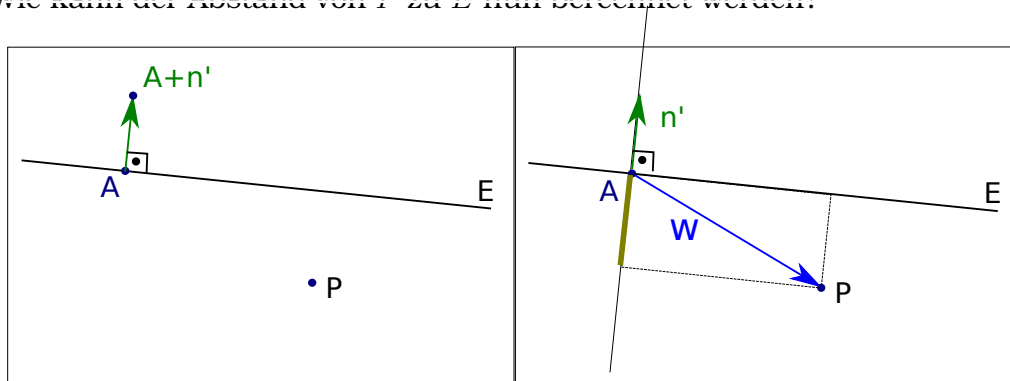
Die Ebene lautet  $E : \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix} + \mu \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} + \nu \cdot \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix}$ . Sie wollen ihren Abstand zu Punkt

$\vec{P} = \begin{pmatrix} 5 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}$  berechnen. Gehen Sie dafür wie folgt vor:

- Berechnen Sie einen Vektor  $\vec{n}'$ , der senkrecht zu  $E$  steht.
- Machen Sie eine Skizze der Situation in der Ebene, in der die folgenden Punk-

te liegen: Aufpunkt  $\vec{A}$  von  $E$ ,  $\vec{P}$ ,  $\vec{A} + \vec{n}'$  und die Ebene  $E$  selber.  
Zeichnen Sie den Normalenvektor  $\vec{n}'$  und die Ebene  $E$  ein.

- c) Berechnen Sie einen Vektor  $\vec{w}$ , der  $\vec{P}$  mit der Ebene verbindet. Zeichnen Sie diesen Vektor in der Skizze ein.
- d) Berechnen Sie die Länge des Schattens von  $\vec{w}$  auf  $\vec{n}'$ .
- e) Wie kann der Abstand von  $\vec{P}$  zu  $E$  nun berechnet werden?



**Lösung:**

a)  $\vec{n}' = \vec{u} \times \vec{v} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ -4 \end{pmatrix}$

- b) Skizze oben. Zeichnen in drei Schritten i) die drei Punkte definieren eine Ebene ii) der Normalenvektor  $\vec{n}'$  liegt in dieser Ebene und auch der Verbindungsvektor iii) also liegt die Ebene  $E$  senkrecht zu dieser und kann durch einen Strich dargestellt werden, der senkrecht zu  $\vec{n}'$  steht und durch  $\vec{A}$  verläuft.

c)  $\vec{w} = \vec{P} - \vec{A} = \begin{pmatrix} 5 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 \\ 2 \\ -5 \end{pmatrix}$

- d) Schatten:

$$h = \vec{w} \odot \frac{\vec{n}'}{|\vec{n}'|} = \begin{pmatrix} 4 \\ 2 \\ -5 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ -4 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{5} = \frac{32}{5} = 6.4$$

- e) Der Abstand ist  $|h| = 6.4$

### Beispiel 7.10 Abstand Punkt Ebene

2MZJ54

Berechnen Sie den Abstand zwischen  $E$  und  $\vec{P}$  ( $\mu, \nu \in \mathbb{R}$ )

a)  $E : \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 50 \\ 10 \\ -32 \end{pmatrix} + \mu \cdot \begin{pmatrix} 21 \\ 0 \\ 20 \end{pmatrix} + \nu \cdot \begin{pmatrix} 42 \\ 20 \\ 40 \end{pmatrix}$  und  $\vec{P} = \begin{pmatrix} 10 \\ 10 \\ 10 \end{pmatrix}$

b)  $E : \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 50 \\ 200 \\ -1 \end{pmatrix} + \mu \cdot \begin{pmatrix} -40 \\ 9 \\ 0 \end{pmatrix} + \nu \cdot \begin{pmatrix} 40 \\ -9 \\ 10 \end{pmatrix}$  und  $\vec{P} = \begin{pmatrix} 5 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}$

c) Die Punkte  $\vec{A} = \begin{pmatrix} 2 \\ -35 \\ 105 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{B} = \begin{pmatrix} 7 \\ 0 \\ 117 \end{pmatrix}$ , und  $\vec{C} = \begin{pmatrix} -1 \\ 35 \\ 129 \end{pmatrix}$  liegen in  $E$  und  $\vec{P} = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$  liegt ausserhalb

d) Die Punkte  $\vec{A} = \begin{pmatrix} 56 \\ 13 \\ 135 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{B} = \begin{pmatrix} 146 \\ 18 \\ 79 \end{pmatrix}$ , und  $\vec{C} = \begin{pmatrix} 101 \\ 8 \\ 107 \end{pmatrix}$  liegen in  $E$  und  $\vec{P} = \begin{pmatrix} -28 \\ 13 \\ 0 \end{pmatrix}$  liegt ausserhalb

**Lösung:**

a)

$$\vec{n}' = \vec{u} \times \vec{v} = \begin{pmatrix} -400 \\ 0 \\ 420 \end{pmatrix}; \quad \vec{w} = \vec{P} - \vec{A} = \begin{pmatrix} -40 \\ 0 \\ 42 \end{pmatrix}$$

Schatten:

$$h = \frac{\vec{w} \odot \vec{n}'}{|\vec{n}'|} = \frac{33640}{580} = 58$$

Der Abstand ist  $|h| = 58$

b)

$$\vec{n}' = \vec{u} \times \vec{v} = \begin{pmatrix} 90 \\ 400 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \vec{w} = \vec{P} - \vec{A} = \begin{pmatrix} -45 \\ -200 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Schatten:

$$h = \frac{\vec{w} \odot \vec{n}'}{|\vec{n}'|} = \frac{-84050}{410} = -205$$

Der Abstand ist  $|h| = 205$

c)

$$\vec{u} = \vec{B} - \vec{A} = \begin{pmatrix} 5 \\ 35 \\ 12 \end{pmatrix}; \quad \vec{v} = \vec{C} - \vec{A} = \begin{pmatrix} -3 \\ 70 \\ 24 \end{pmatrix}$$

$$\vec{n}' = \vec{u} \times \vec{v} = \begin{pmatrix} 0 \\ -156 \\ 455 \end{pmatrix}; \quad \vec{w} = \vec{P} - \vec{A} = \begin{pmatrix} 0 \\ 36 \\ -105 \end{pmatrix}$$



Schatten:

$$h = \frac{\vec{w} \odot \vec{n}'}{|\vec{n}'|} = \frac{-53391}{481} = -111$$

Der Abstand ist  $|h| = 111$

d)

$$\begin{aligned}\vec{u} &= \vec{B} - \vec{A} = \begin{pmatrix} 90 \\ 5 \\ -56 \end{pmatrix} & \vec{v} &= \vec{C} - \vec{A} = \begin{pmatrix} 45 \\ -5 \\ -28 \end{pmatrix} \\ \vec{n}' &= \vec{u} \times \vec{v} = \begin{pmatrix} -420 \\ 0 \\ -675 \end{pmatrix} & \vec{w} &= \vec{P} - \vec{A} = \begin{pmatrix} -84 \\ 0 \\ -135 \end{pmatrix}\end{aligned}$$

Schatten:

$$h = \frac{\vec{w} \odot \vec{n}'}{|\vec{n}'|} = \frac{-126405}{795} = -159$$

Der Abstand ist  $|h| = 159$

### Beispiel 7.11 Normaleneinheitsvektor

014259

Bestimme für die Ebene  $\vec{A} + \mu\vec{u} + \nu\vec{v}$  einen Vektor, der senkrecht auf der Ebene steht und der normiert ist.

**Lösung:**

Das Vektorprodukt

$$\vec{n}' = \vec{u} \times \vec{v}$$

steht senkrecht auf der Ebene. Die Reihenfolge  $\vec{u} \times \vec{v}$  oder  $\vec{v} \times \vec{u}$  spielt dabei keine Rolle. Die Normierung erhalten wir über

$$\vec{n} = \frac{\vec{n}'}{\|\vec{n}'\|} = \frac{\vec{u} \times \vec{v}}{\|\vec{u} \times \vec{v}\|}$$

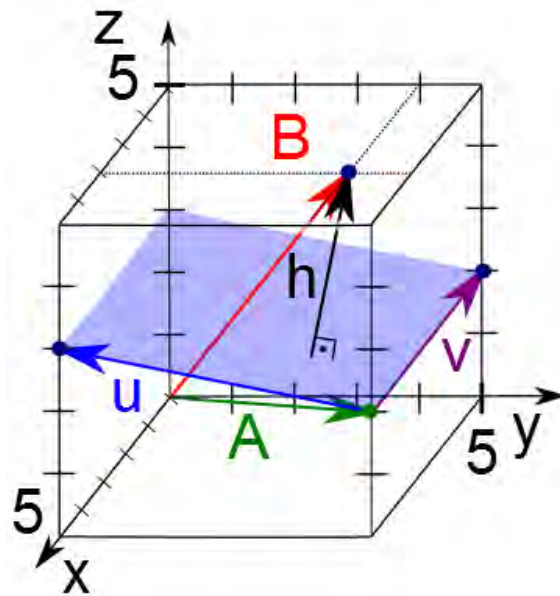
### Definition Normaleneinheitsvektor

Für die Ebene  $\vec{A} + \mu\vec{u} + \nu\vec{v} \in \mathbb{R}^3$  definieren wir den Normaleneinheitsvektor

$$\vec{n} = \frac{\vec{u} \times \vec{v}}{\|\vec{u} \times \vec{v}\|}.$$

Im Folgenden werden wir die Notation beibehalten, dass  $\vec{n}$  stets normiert ist, während  $\vec{n}'$  zwar senkrecht auf der Ebene steht, jedoch keine definierte Länge hat, wie im vorhergehenden Beispiel. Wir nennen  $\vec{n}'$  den Normalenvektor.

- Der **Normalenvektor**  $\vec{n}' = \vec{u} \times \vec{v}$  steht senkrecht auf Ebene
- Der **Normaleneinheitsvektor**  $\vec{n}$  steht senkrecht auf der Ebene *und* hat Länge 1, d.h. er ist normiert.



Lesen Sie die Punkte  $\vec{A}$  und  $\vec{B}$  und die Vektoren  $\vec{u}, \vec{v}$  aus der Grafik aus. Projizieren Sie dann den Verbindungsvektor  $\vec{B} - \vec{A}$  auf den Normaleneinheitsvektor der Ebene. Berechnen Sie daraus den Abstand von  $\vec{B}$  zur Ebene  $E$ .

$$E : \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \vec{A} + \lambda \vec{u} + \nu \vec{v}$$

**Lösung:**

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} 5 \\ 5 \\ 2 \end{pmatrix}, \vec{B} = \begin{pmatrix} 3 \\ 4 \\ 5 \end{pmatrix}, \vec{u} = \begin{pmatrix} 5 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix} - \vec{A} = \begin{pmatrix} 0 \\ -5 \\ 1 \end{pmatrix}, \vec{v} = \begin{pmatrix} 0 \\ 5 \\ 2 \end{pmatrix} - \vec{A} = \begin{pmatrix} -5 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$\vec{h}_B$  ist die Projektion von  $(\vec{B} - \vec{A})$  auf  $\vec{n}$ .

$$\vec{n}' = \vec{u} \times \vec{v} = \begin{pmatrix} 0 \\ -5 \\ -25 \end{pmatrix}$$

$$\vec{n} = \frac{\vec{n}'}{|\vec{n}'|} = \frac{1}{\sqrt{26}} = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ -5 \end{pmatrix}$$

$$\vec{B} - \vec{A} = \begin{pmatrix} -2 \\ -1 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$h_B = (\vec{B} - \vec{A}) \odot \vec{n} = -7\sqrt{\frac{2}{13}} \approx -2.75$$

Der Abstand ist also 2.75.

### Satz Abstand Punkt-Ebene im Raum, Hesse-Normalenform

Der Abstand eines Punktes  $\vec{P} \in \mathbb{R}^3$  von der Ebene  $E : \vec{x} = \vec{A} + \lambda\vec{u} + \mu\vec{v} \in \mathbb{R}^3$  ist  $|h|$  und berechnet sich aus

$$h(\vec{P}) = (\vec{P} - \vec{A}) \odot \vec{n}' = (\vec{P} - \vec{A}) \odot \vec{n}$$

Dabei benutzen wir den Normalenvektor

$$\vec{n}' = \frac{\vec{u} \times \vec{v}}{\|\vec{u} \times \vec{v}\|} \text{ oder den Normalen-Einheitsvektor } \vec{n} = \frac{\vec{n}'}{\|\vec{n}'\|}$$

[?, Bd. 1 II 4.2.4]

Damit kann man zwei Dinge tun:

- Wir können  $h(\vec{P})$  benutzen um Abstände von Punkten  $\vec{P}$  von der Ebene  $E$  zu berechnen.
- Wir können mit  $(\vec{P} - \vec{A}) \odot \vec{n} = 0$  implizit alle Punkte in einer Ebene definieren. Oder umgekehrt: Alle Vektoren  $\vec{P}$ , die  $(\vec{P} - \vec{A}) \odot \vec{n} = 0$  erfüllen liegen in der Ebene.

### Beispiel 7.13 Abstand Punkt-Ebene im Raum

007592

Berechnen Sie den Abstand des Punktes  $\vec{R}$  von den Ebenen.

a)  $E : \left( \vec{x} - \begin{pmatrix} -2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix} \right) \odot \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} = 0$  und  $\vec{R} = \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix}$

b)  $E : \left( \vec{x} - \begin{pmatrix} 3 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} \right) \odot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = 0$  und  $\vec{R} = \begin{pmatrix} 18 \\ 19 \\ -4 \end{pmatrix}$

c)  $E : \left( \vec{x} - \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ -4 \end{pmatrix} \right) \odot \begin{pmatrix} 0.8 \\ -0.6 \\ 0 \end{pmatrix} = 0$  und  $\vec{R} = \begin{pmatrix} 13.8 \\ 20.9 \\ 0 \end{pmatrix}$

**Lösung:**

a)  $h = \left( \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix} \right) \odot \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 \\ -2 \\ -5 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} = 2$ . Der Abstand ist  
 $|h| = 2$

$$\text{b) } h = \left( \begin{pmatrix} 18 \\ 19 \\ -4 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 3 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} \right) \odot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 15 \\ 20 \\ -4 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} = -4. \text{ Der Abstand ist}$$

$$|h| = 4$$

$$\text{c) } h = \left( \begin{pmatrix} 13.8 \\ 20.9 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ -4 \end{pmatrix} \right) \odot \begin{pmatrix} 0.8 \\ -0.6 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 11.8 \\ 20.9 \\ 4 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} 0.8 \\ -0.6 \\ 0 \end{pmatrix} = -3.1. \text{ Der Abstand}$$

ist

$$|h| = 3.1$$

## 7.2 Wie kann man eine Ebene in $\mathbb{R}^3$ darstellen?

### Definition Normalenform der Ebene im Raum

Ebene  $E$  ist definiert durch den Normalenvektor  $\vec{n}'$  und den Ortsvektor des Aufpunktes  $\vec{A}$ . Für den allgemeinen Punkt  $\vec{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$  in der Ebene gilt

$$E : (\vec{x} - \vec{A}) \odot \vec{n}' = 0$$

Die Normalenform kann man lesen entweder als

- Für einen Vektor  $\vec{x}$  in der Ebene gilt, dass  $(\vec{x} - \vec{A})$  senkrecht auf  $\vec{n}'$  steht.
- Ein Vektor  $\vec{x}$  in der Ebene  $(\vec{x} - \vec{A})$  hat den Abstand 0 zur Ebene.

Die zweite Interpretation erhält man indem man in der Normalenform auf beiden Seiten durch  $|\vec{n}'|$  dividiert, das ergibt dann  $(\vec{x} - \vec{A}) \odot \vec{n} = 0$ . Dies ist die Hessesche Normalenform, auf die wir noch zurückkommen.

### Beispiel 7.14 Gleichungen der Ebene im Raum

510881

$$E : \vec{x} = \vec{A} + \lambda \vec{u} + \nu \vec{v} = \begin{pmatrix} 5 \\ 1 \\ -3 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} 21 \\ 0 \\ 20 \end{pmatrix} + \nu \begin{pmatrix} 21 \\ 10 \\ 20 \end{pmatrix}$$

- Berechne den Normalenvektor der Ebene  $E$ .
- Bestimme die Normalenform von  $E$ .
- Führe dann das Skalarprodukt aus und ordne die Terme (Koordinatenform).

**Lösung:**

- Der Normalenvektor ist

$$\vec{n}' = \vec{u} \times \vec{v} = \begin{pmatrix} -200 \\ 0 \\ 210 \end{pmatrix}$$

Der Normaleneinheitsvektor:

$$\vec{n} = \frac{\vec{n}'}{290} = \frac{1}{29} \cdot \begin{pmatrix} -20 \\ 0 \\ 21 \end{pmatrix}$$

b) Normalenform durch Einsetzen von  $(\vec{x} - \vec{A})$ :

$$\left( \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 5 \\ 1 \\ -3 \end{pmatrix} \right) \odot \begin{pmatrix} -200 \\ 0 \\ 210 \end{pmatrix} = 0$$

c) Skalarprodukt ausführen

$$-200x + 210z + 1630 = 0$$

### Beispiel 7.15 Gleichungen der Ebene im Raum

409770

Bestimme die Normalenform der Ebene  $E$

$$E: \vec{x} = \vec{A} + \lambda \vec{u} + \nu \vec{v} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} 1 \\ -3 \\ 2 \end{pmatrix} + \nu \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix}$$

Berechne dazu den Normalenvektor. Vereinfache soweit, dass keine Vektoren mehr in der Normalenform auftreten. **Lösung:**

Der Normalenvektor ist

$$\vec{n}' = \vec{u} \times \vec{v} = \begin{pmatrix} -10 \\ 4 \\ 11 \end{pmatrix}$$

Einsetzen von  $(\vec{x} - \vec{A})$  ergibt

$$\begin{pmatrix} -10 \\ 4 \\ 11 \end{pmatrix} \odot \left( \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix} \right) = 0$$

was sich zu  $-10x + 4y + 11z - 3 = 0$  vereinfacht.

### Definition Koordinatenform der Ebene im Raum

Eine Ebene ist definiert durch die vier Parameter  $n'_1, n'_2, n'_3$  und  $d'$ . Für den allgemeinen Punkt  $\vec{x}$  in der Ebene gilt  $E: n'_1 \cdot x + n'_2 \cdot y + n'_3 \cdot z + d' = 0$

Die Koordinatenform ergibt sich z.B. durch das Auswerten der Normalenform. Die Koeffizienten  $n'_1, n'_2, n'_3$  sind die Komponenten des Normalenvektors.

Bestimme für die Ebene  $E$

$$E : \vec{x} = \vec{A} + \lambda \vec{u} + \nu \vec{v}$$

den Normalenvektor. Drücke dann mathematisch aus, dass der Verbindungsvektor von einem Punkt  $\vec{x}$  in der Ebene zum Aufpunkt den Abstand Null zur Ebene hat.

**Lösung:**

Wir benutzen den Normaleneinheitsvektor  $\vec{n}$  um den Abstand zu berechnen. Der Verbindungsvektor von einem Punkt in der Ebene zum Aufpunkt ist  $(\vec{A} - \vec{x})$ . Er soll den Abstand Null haben, also gilt

$$(\vec{A} - \vec{x}) \odot \vec{n} = 0$$

Wir können diesen Ausdruck noch mit  $|\vec{n}|$  multiplizieren

$$(\vec{A} - \vec{x}) \odot \vec{n}' = 0$$

Gibt die Normalenform und die Koordinatenform der folgenden Ebenen an.

a)  $E : \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 50 \\ 10 \\ -32 \end{pmatrix} + \mu \cdot \begin{pmatrix} -40 \\ 9 \\ 0 \end{pmatrix} + \nu \cdot \begin{pmatrix} 40 \\ -9 \\ 10 \end{pmatrix}$

b) Die Punkte  $\vec{A} = \begin{pmatrix} 2 \\ -35 \\ 105 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{B} = \begin{pmatrix} 7 \\ 0 \\ 117 \end{pmatrix}$ , und  $\vec{C} = \begin{pmatrix} -1 \\ 35 \\ 129 \end{pmatrix}$  liegen in  $E$

c) Die Punkte  $\vec{A} = \begin{pmatrix} 56 \\ 13 \\ 135 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{B} = \begin{pmatrix} 146 \\ 18 \\ 79 \end{pmatrix}$ , und  $\vec{C} = \begin{pmatrix} 101 \\ 8 \\ 107 \end{pmatrix}$  liegen in  $E$

**Lösung:**

a)

$$\vec{n}' = \vec{u} \times \vec{v} \quad \vec{n}'' = \frac{1}{10} \cdot \vec{n}' = \begin{pmatrix} 9 \\ 40 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Normalenform

$$\left( \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \vec{A} \right) \odot \vec{n}'' = \left( \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 50 \\ 10 \\ -32 \end{pmatrix} \right) \odot \begin{pmatrix} 9 \\ 40 \\ 0 \end{pmatrix} = 0$$

Koordinatenform (ausmultiplizieren):

$$-850 + 9x + 40y = 0$$

b)

$$\vec{u} = \vec{B} - \vec{A} = \begin{pmatrix} 5 \\ 35 \\ 12 \end{pmatrix} \quad \vec{v} = \vec{C} - \vec{A} = \begin{pmatrix} -3 \\ 70 \\ 24 \end{pmatrix}$$

$$\vec{n}' = \vec{u} \times \vec{v} \quad \vec{n}'' = \frac{1}{13} \cdot \vec{n}' = \begin{pmatrix} 0 \\ -12 \\ 35 \end{pmatrix}$$

Normalenform

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \vec{A} \odot \vec{n}'' = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 2 \\ -35 \\ 105 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} 0 \\ -12 \\ 35 \end{pmatrix} = 0$$

Koordinatenform (ausmultiplizieren):

$$-4095 - 12y + 35z = 0$$

c)

$$\vec{u} = \vec{B} - \vec{A} = \begin{pmatrix} 90 \\ 5 \\ -56 \end{pmatrix} \quad \vec{v} = \vec{C} - \vec{A} = \begin{pmatrix} 45 \\ -5 \\ -28 \end{pmatrix}$$

$$\vec{n}' = \vec{u} \times \vec{v} \quad \vec{n}'' = \frac{1}{15} \cdot \vec{n}' = \begin{pmatrix} -28 \\ 0 \\ -45 \end{pmatrix}$$

Normalenform

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \vec{A} \odot \vec{n}'' = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 56 \\ 13 \\ 135 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} -28 \\ 0 \\ -45 \end{pmatrix} = 0$$

Koordinatenform (ausmultiplizieren):

$$7643 - 28x - 45z = 0$$

### 7.3 Wie man die Darstellungen der Ebene ineinander überführt

Wir kennen drei unterschiedliche Darstellungen der Ebene im Raum. Es sind dies die Parameter-Form, die Normalen-Form und die Koordinaten-Form.

Jede Form kann in die beiden anderen überführt werden. Wie dies am effizientesten gemacht wird, wird hier besprochen.

## Parameter- Form

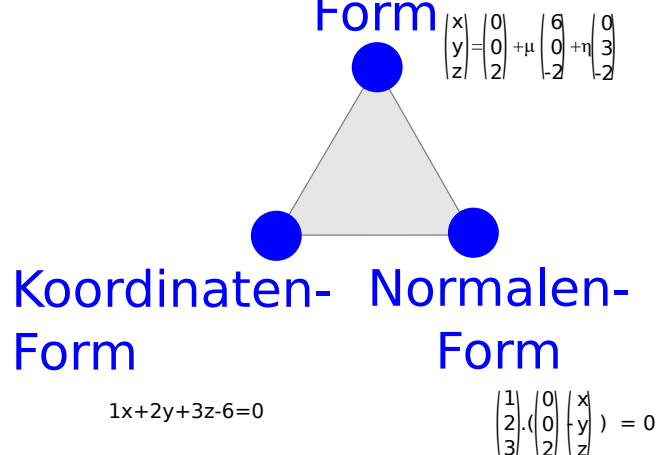


Abbildung 7.1: Die verschiedenen mathematischen Darstellungen der Ebene in  $\mathbb{R}^3$ .

### 7.3.1 Von der Koordinaten-Form $1x + 2y + 3z - 6 = 0$ zu ...

#### Infobox Koordinaten-Form zur Parameter-Form

Es können drei Punkte erzeugt werden. Meist gelingt dies am schnellsten mit den Punkten

$$\vec{P} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ z \end{pmatrix}, \quad \vec{Q} = \begin{pmatrix} 0 \\ y \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \vec{R} = \begin{pmatrix} x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Nun kann  $\vec{P}$  als Aufpunkt gewählt werden und

$$\vec{u} = \vec{Q} - \vec{P} \quad \text{und} \quad \vec{v} = \vec{R} - \vec{P}$$

als Richtungsvektoren. Die Ebenengleichung ist dann

$$E : \vec{x} = \vec{P} + \lambda \vec{u} + \nu \vec{v}$$

Es kann vorkommen, dass die Ebene parallel zu einer Koordinaten-Achse liegt. Dann müssen die Punkte  $\vec{P}$ ,  $\vec{Q}$ ,  $\vec{R}$  anders gewählt werden. Ist die Ebene z.B. parallel zur z-Achse, dann könnten dies z.B. die folgenden Punkte sein

$$\vec{P} = \begin{pmatrix} 0 \\ y \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \vec{Q} = \begin{pmatrix} 0 \\ y' \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \vec{R} = \begin{pmatrix} x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

#### Beispiel 7.18 Von der Koordinaten-Form zur Parameterform

467643



Berechnen Sie eine Parameterform der Ebene gegeben durch

$$E : 1x + 2y + 3z - 6 = 0$$

**Lösung:**

Wir erzeugen drei Punkte

$$\vec{P} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix}, \vec{Q} = \begin{pmatrix} 6 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{R} = \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Wir wählen  $\vec{P}$  als Aufpunkt und berechnen die Richtungsvektoren

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} 6-0 \\ 0-0 \\ 0-2 \end{pmatrix} + \nu \begin{pmatrix} 0-0 \\ 3-0 \\ 0-2 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} 6 \\ 0 \\ -2 \end{pmatrix} + \nu \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \\ -2 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

### Infobox Koordinaten-Form zur Normalen-Form

Es kann ein Punkt erzeugt werden, z.B.

$$\vec{P} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ z \end{pmatrix}$$

Die Normale kann aus der Koordinatenform abgelesen werden. Sie besteht aus den Koeffizienten

$$E : n'_1 x + n'_2 y + n'_3 z - d = 0$$

Die Normalenform ist dann

$$E : \begin{pmatrix} n'_1 \\ n'_2 \\ n'_3 \end{pmatrix} \odot \left( \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \vec{P} \right) = 0$$

### Beispiel 7.19 Von der Koordinaten-Form zur Normalen-Form

211568

Berechnen Sie eine Normalen-Form der Ebene gegeben durch

$$E : 1x + 2y + 3z - 6 = 0$$

**Lösung:**

Wir erzeugen einen Punkt  $\vec{P} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix}$  und lesen die Normale ab

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} \odot \left( \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} \right) = 0$$

### Beispiel 7.20 Punkte in Ebene erzeugen

7EQKL7

Geben Sie drei Punkte der Ebenen an, wenn möglich die folgenden

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} A_x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ B_y \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{C} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ C_z \end{pmatrix}$$

Lesen Sie dann den Normalenvektor und Abstand zum Ursprung aus und geben Sie die Normalenform der Ebenen an.

a) E:  $6x + 4y + 3z - 12 = 0$

d) E:  $6x - 3y - 2z + 30 = 0$

b) E:  $x - y - z + 1 = 0$

e) E:  $7x = 3$

c) E:  $5y = 0$

f) E:  $-4x + 2y - z + 8 = 0$

**Lösung:**

a) Die Punkte sind

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{C} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 4 \end{pmatrix}$$

Normalenvektor:

$$\vec{n}' = \begin{pmatrix} 6 \\ 4 \\ 3 \end{pmatrix}$$

und der Abstand zum Ursprung  $|h| = \frac{12}{\sqrt{61}} \approx 1.54$ . Normalenform:

$$\left( \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right) \odot \begin{pmatrix} 6 \\ 4 \\ 3 \end{pmatrix} = 0$$

b) Die Punkte sind

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{C} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Normalenvektor:

$$\vec{n}' = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

und der Abstand zum Ursprung  $|h| = \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0.577$ . Normalenform:

$$\left( \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right) \odot \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix} = 0$$

c) Die Punkte sind

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{C} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Normalenvektor:

$$\vec{n}' = \begin{pmatrix} 0 \\ 5 \\ 0 \end{pmatrix}$$

und der Abstand zum Ursprung  $|h| = 0$ . Normalenform:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = 0$$

d) Die Punkte sind

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} -5 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 10 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{C} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 15 \end{pmatrix}$$

Normalenvektor:

$$\vec{n}' = \begin{pmatrix} 6 \\ -3 \\ -2 \end{pmatrix}$$

und der Abstand zum Ursprung  $|h| = \frac{30}{7} \approx 4.29$ . Normalenform:

$$\left( \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -5 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right) \odot \begin{pmatrix} 6 \\ -3 \\ -2 \end{pmatrix} = 0$$

e) Die Punkte sind

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} 3/7 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{B} = \begin{pmatrix} 3/7 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{C} = \begin{pmatrix} 3/7 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Normalenvektor:

$$\vec{n}' = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

und der Abstand zum Ursprung  $|h| = \frac{3}{7} = 0.43$ . Normalenform:

$$\left( \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 3/7 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right) \odot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = 0$$

f) Die Punkte sind

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ -4 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{C} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 8 \end{pmatrix}$$

Normalenvektor:

$$\vec{n}' = \begin{pmatrix} -4 \\ 2 \\ -1 \end{pmatrix}$$

und der Abstand zum Ursprung  $|h| = \frac{8}{\sqrt{21}} \approx 1.74$ . Normalenform:

$$\left( \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right) \odot \begin{pmatrix} -4 \\ 2 \\ -1 \end{pmatrix} = 0$$

### 7.3.2 Von der Parameter-Form ...

#### Infobox Von der Parameter-Form zur Koordinaten-Form

Mit dem Vektorprodukt kann aus dem Richtungsvektoren  $\vec{u}$  und  $\vec{v}$  der Normalenvektor berechnet werden.

$$\vec{n}' = \vec{u} \times \vec{v}$$

Die Ebene schreibt sich nun als

$$n'_1 x + n'_2 y + n'_3 z + d = 0$$

wobei  $d$  die Konstante durch Einsetzen der Koordinaten des Aufpunktes bestimmt wird.

#### Beispiel 7.21 Von der Parameter-Form zur Koordinaten-Form

211568

Berechnen Sie die Koordinaten-Form der Ebene gegeben durch

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} 6 \\ 0 \\ -2 \end{pmatrix} + \nu \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \\ -2 \end{pmatrix}$$

Lösung:

Wir lesen berechnen die Normale mit dem Vektorprodukt

$$\vec{n}' = \begin{pmatrix} 6 \\ 0 \\ -2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \\ -2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6 \\ 12 \\ 18 \end{pmatrix}$$

Achtung, die Normale kann stets reskaliert werden. D.h. die Länge kann beliebig geändert werden. Hier verkürzen wir den Normalenvektor um den Faktor 6. Dann setzen wir den Aufpunkt ein und bestimmen so die Konstante

$$\begin{aligned} 1x + 2y + 3z + d &= 0 \\ 1 \cdot 0 + 2 \cdot 0 + 3 \cdot 2 + d &= 0 \\ \Rightarrow 1x + 2y + 3z - 6 &= 0 \end{aligned}$$

### Infobox Von der Parameter-Form zur Normalen-Form

Mit dem Vektorprodukt kann aus dem Richtungsvektoren  $\vec{u}$  und  $\vec{v}$  der Normalenvektor berechnet werden.

$$\vec{n}' = \vec{u} \times \vec{v}$$

Der Aufpunkt und die Normale kann dann direkt in die Normalen-Form eingesetzt werden.

### Beispiel 7.22 Von der Parameter-Form zur Normalen-Form

995397

Berechnen Sie die Normalen-Form der Ebene gegeben durch

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} 6 \\ 0 \\ -2 \end{pmatrix} + \nu \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \\ -2 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

Wir berechnen die Normale  $\vec{n}' = \begin{pmatrix} 6 \\ 12 \\ 18 \end{pmatrix}$  und setzen den Aufpunkt und die Normale in die Normalen-Form ein:

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} \odot \left( \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} \right) = 0$$

### 7.3.3 Von der Normalen-Form ...

Der Weg von der Normalen-Form zur Koordinaten-Form besteht aus dem Ausmultiplizieren.

**Beispiel 7.23 Von der Normalen-Form zur Koordinaten-Form**

849600

Berechnen Sie die Koordinaten-Form der Ebene gegeben durch

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} \odot \left( \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} \right) = 0$$

**Lösung:**

Wir multiplizieren aus und erhalten

$$1x + 2y + 3z - 6 = 0$$

**Infobox Von der Normalen-Form zur Parameter-Form**

Durch Ausmultiplizieren berechnen wir zuerst die Koordinatenform

$$n'_1 x + n'_2 y + n'_3 z + d = 0$$

wobei sowohl die Koeffizienten wie auch die Konstante bekannt sind. Wir erzeugen dann drei Punkte z.B.

$$\vec{P} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ z \end{pmatrix}, \vec{Q} = \begin{pmatrix} 0 \\ y \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{R} = \begin{pmatrix} x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

wählen  $\vec{P}$  als Aufpunkt und bestimmen die Richtungsvektoren

$$\vec{u} = \vec{Q} - \vec{P} \text{ und } \vec{v} = \vec{R} - \vec{P}$$

Die Ebenengleichung ist dann

$$E : \vec{x} = \vec{P} + \lambda \vec{u} + \nu \vec{v}$$

**Beispiel 7.24 Von der Normalen-Form zur Parameter-Form**

763463

Berechnen Sie die Parameter-Form der Ebene gegeben durch

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} \odot \left( \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} \right) = 0$$

**Lösung:**

Durch Ausmultiplizieren berechnen wir die Koordinatenform

$$1x + 2y + 3z - 6 = 0$$

Dann erzeugen wir drei Punkte

$$\vec{P} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix}, \vec{Q} = \begin{pmatrix} 6 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{R} = \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Die Parameterform ergibt sich durch die Berechnung der Richtungsvektoren

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} 6-0 \\ 0-0 \\ 0-2 \end{pmatrix} + \nu \begin{pmatrix} 0-0 \\ 3-0 \\ 0-2 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} 6 \\ 0 \\ -2 \end{pmatrix} + \nu \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \\ -2 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

## 7.4 Hesse-Normalenform

### Definition Hesse-Normalenform der Ebene im Raum

$$E : \vec{n} \odot (\vec{x} - \vec{A}) = 0$$

mit  $\vec{n}$  Normalen-Einheitsvektor,  $\vec{A}$  Aufpunkt und  $\vec{x} \in \mathbb{R}^3$ .

[?, p.418] [?, Bd. 1 II 4.2.3] In der Literatur findet sich wohl die Definition der Hesse-Normalform, doch hat diese in der Praxis für die implizite Definition einer Ebene kaum Bedeutung. Wieso soll man den Normalen-Einheitsvektor  $\vec{n} = \frac{\vec{n}'}{\|\vec{n}'\|}$  benutzen in  $\vec{n} \odot (\vec{x} - \vec{A}) = 0$ , wenn der Ausdruck einfach auch mit dem Normalenvektor  $\vec{n}'$  geschrieben werden kann

$$\vec{n}' \odot (\vec{x} - \vec{A}) = 0 ?$$

Einzig bei der Abstandbestimmung ist die Normierung nützlich.

### Infobox Hesse-Normalenform: Abstand Punkt-Ebene

- Die Hesse'sche Normalenform wird benutzt um Abstände zu einer Ebene zu berechnen. Wir schreiben dafür die Funktion

$$h(\vec{x}) = \vec{n} \odot (\vec{x} - \vec{A}) = \frac{\vec{n}'}{\|\vec{n}'\|} \odot (\vec{x} - \vec{A})$$

- Liegt die Ebene in der Koordinatenform vor  $ax + by + d = 0$ , so erfolgt die Abstandsmessung über

$$h(x, y, z) = \frac{ax + by + cz + d}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}$$

- Die Hesse'sche Normalenform in Koordinatenform ist besonders ökonomisch, wenn man den Abstand von  $E$  zu vielen verschiedenen Punkten berechnen will.

— Um beispielsweise die Abstände von der Ebene  $12x - 5y - 78 = 0$  zu bestimmen, benutzen wir die Funktion

$$h(x, y, z) = \frac{12x - 5y - 78}{\sqrt{12^2 + (-5)^2}} = \frac{12x - 5y - 78}{13}$$

**Beispiel 7.25 Hesse-Normalenform**

6ZXEAL

$$E : \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 5 \\ 1 \\ -2 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ -3 \end{pmatrix} = 0$$

- a) Berechnen Sie den Abstand von  $E$  zum Punkt  $\vec{P} = \begin{pmatrix} 10 \\ 4 \\ -12 \end{pmatrix}$ .
- b) Geben Sie den Abstand zum allgemeinen Punkt  $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$  in der Ebene an (Hessesche Normalenform).
- c) Multiplizieren Sie im Ausdruck das Skalarprodukt aus.
- d) Charakterisieren Sie dann die Ebene durch die Koordinatenform, Normalenvektor und Abstand zum Ursprung.

**Lösung:**

Der Normalenvektor ist

$$\vec{n}' = \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ -3 \end{pmatrix} \text{ mit } \|\vec{n}'\| = 5$$

Der Abstand ist  $|h|$ .

- a) Abstand zu  $\vec{P}$

$$h\left(\begin{pmatrix} 10 \\ 4 \\ -12 \end{pmatrix}\right) = \frac{\left(\begin{pmatrix} 10 \\ 4 \\ -12 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 5 \\ 1 \\ -2 \end{pmatrix}\right) \odot \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ -3 \end{pmatrix}}{5} = 10$$

- b) Der Ausdruck berechnet auch den Abstand zum allgemeinen Punkt  $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$ :

$$h\left(\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}\right) = \frac{\left(\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 5 \\ 1 \\ -2 \end{pmatrix}\right) \odot \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ -3 \end{pmatrix}}{5}$$



c) Ausmultiplizieren:

$$h(x, y, z) = \frac{4x}{5} - \frac{3z}{5} - \frac{26}{5}$$

d) Koordinatenform

$$4x - 3z - 26 = 0$$

Normalenvektor, Normaleneinheitsvektor

$$\vec{n}' = \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ -3 \end{pmatrix} \text{ und } \vec{n} = \frac{1}{5} \cdot \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ -3 \end{pmatrix}$$

Abstand zur Ebene zum Ursprung

$$h(0, 0, 0) = -\frac{26}{5} = -5.2$$

Also  $|h| = 5.2$ .

Wir stellen fest:

### Infobox Rolle der Konstante in der Ebenengleichung

Der Abstand zum Ursprung ist entweder die Konstante in der Hesseschen Normalenform, oder die Konstante der Koordinatenform geteilt durch die Länge des Normalenvektors.

### Beispiel 7.26 Hesse-Normalenform

5YWDZK

Geben Sie den Abstand zum allgemeinen Punkt  $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$  in der Ebene an (Hesse-Normalenform).

Charakterisieren Sie dann die Ebene durch die Koordinatenform, Normalenvektor und Abstand zum Ursprung.

Berechnen Sie schliesslich den Abstand zum Punkt  $\vec{P} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix}$ .

a)  $E : \left( \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 5 \\ 1 \\ -2 \end{pmatrix} \right) \odot \begin{pmatrix} 72 \\ 0 \\ 65 \end{pmatrix} = 0$

b)  $E$  Aufpunkt  $\begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ , Normalenvektor:  $\begin{pmatrix} 20 \\ 21 \\ 0 \end{pmatrix}$

c)  $E : \left( \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right) \odot \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix} = 0$

d)  $E$  Aufpunkt  $\begin{pmatrix} 3 \\ -2 \\ 1 \end{pmatrix}$ , Normalenvektor:  $\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ -2 \end{pmatrix} \cdot 0$

**Lösung:**

Der Abstand ist  $|h|$

a) Der Normalenvektor ist

$$\vec{n}' = \begin{pmatrix} 72 \\ 0 \\ 65 \end{pmatrix} \text{ mit } \|\vec{n}'\| = 97$$

Abstand von Ebene

$$h\left(\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}\right) = \frac{\left(\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 5 \\ 1 \\ -2 \end{pmatrix}\right) \odot \begin{pmatrix} 72 \\ 0 \\ 65 \end{pmatrix}}{97}$$

Durch Ausmultiplizieren der Normalenform erhalten wir auf dem Bruchstrich

$$72x + 65z - 230$$

und der Abstand zum Ursprung ist  $d = \left|-\frac{230}{97}\right| \approx 2.37$ . Und der Abstand zu  $\vec{P}$  ist

$$h(\vec{P}) = \frac{\left(\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 5 \\ 1 \\ -2 \end{pmatrix}\right) \odot \begin{pmatrix} 72 \\ 0 \\ 65 \end{pmatrix}}{97} \approx 0.381$$

b) Der Normalenvektor ist

$$\vec{n}' = \begin{pmatrix} 20 \\ 21 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ mit } |\vec{n}'| = 29$$

Abstand von Ebene

$$h\left(\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}\right) = \frac{\left(\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}\right) \odot \begin{pmatrix} 20 \\ 21 \\ 0 \end{pmatrix}}{29}$$

Durch Ausmultiplizieren der Normalenform erhalten wir auf dem Bruchstrich

$$-81 + 20x + 21y$$

und der Abstand zum Ursprung ist  $d = \frac{81}{21} \approx 2.79$ .

$$h(\vec{P}) = \frac{-81 + 20 \cdot 1 + 21 \cdot 0}{29} \approx -2.10 \text{ also } |h| \approx 2.10$$

c) Der Normalenvektor ist

$$\vec{n}' = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix} \text{ mit } |\vec{n}'| = 3\sqrt{3}$$

Abstand von Ebene

$$h\left(\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}\right) = \frac{\left(\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}\right) \odot \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix}}{3\sqrt{3}}$$

Durch Ausmultiplizieren der Normalenform erhalten wir auf dem Bruchstrich

$$3 + 3x + 3y + 3z$$

und der Abstand zum Ursprung ist  $d = \frac{3}{3\sqrt{3}} \approx 0.577$ .

$$h(\vec{P}) = \frac{3 + 3 \cdot 1 + 3 \cdot 0 + 3 \cdot 3}{3\sqrt{3}} = 5/\sqrt{3} \text{ also } |h| \approx 2.88675$$

d) Der Normalenvektor ist

$$\vec{n}' = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ -2 \end{pmatrix} \text{ mit } |\vec{n}'| = 3$$

Abstand von Ebene

$$h\left(\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}\right) = \frac{\left(\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 3 \\ -2 \\ 1 \end{pmatrix}\right) \odot \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ -2 \end{pmatrix}}{3}$$

Durch Ausmultiplizieren der Normalenform erhalten wir auf dem Bruchstrich

$$3 + x + 2y - 2z$$

und der Abstand zum Ursprung ist  $d = \frac{3}{3} = 1$ .

$$h(\vec{P}) = \frac{3 + 1 \cdot 1 + 2 \cdot 0 - 2 \cdot 3}{3} = -2/3 \text{ also } |h| \approx 0.667$$

Wie gross ist der Abstand der Ebene  $E$  vom Ursprung?

$$E : \vec{x} = \vec{A} + \lambda \vec{u} + \nu \vec{v} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} 1 \\ -3 \\ 2 \end{pmatrix} + \nu \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix}$$

Werte dann  $(\vec{x} - \vec{A}) \odot \vec{n}$  für  $\vec{x} = \vec{0}$  aus. Beachte, dass hier der Normaleneinheitsvektor und nicht der Normalenvektor verwendet wird. Betrachte die Resultate und formuliere eine Vermutung.

**Lösung:**

Der Abstand der Ebene vom Ursprung ist  $\sqrt{\frac{3}{79}}$ . Mit den Normaleneinheitsvektor  $\vec{n}$  erhalten wir

$$\frac{1}{\sqrt{237}} \begin{pmatrix} -10 \\ 4 \\ 11 \end{pmatrix} \odot \left( \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix} \right)$$

Am Ursprung ausgewertet ergibt dies  $-\sqrt{3/79}$ . Die Übereinstimmung der beiden Resultate ist kein Zufall. Der Ausdruck

$$\vec{n} \odot (\vec{x} - \vec{A})$$

ist die Projektion des Vektors  $(\vec{x} - \vec{A})$  auf den Normalenvektor, d.h. der Abstand zwischen  $\vec{x}$  und der Ebene.

### 7.4.1 Achsenabschnitts-Form

#### Beispiel 7.28 Schnittpunkte mit den Koordinatenachsen

440325

Berechne die Schnittpunkte der Ebene  $E$  mit den Koordinatenachsen

$$E : 21x + 70y + 15z - 105 = 0$$

Teile dann die Koordinatenform durch 105. Dadurch wird die Konstante auf  $-1$  gesetzt. Vergleiche nun die Koordinatenform mit den Schnittpunkten und formuliere deine Vermutung.

**Lösung:**

- $\begin{pmatrix} x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad 21x = 105, x = \frac{105}{21} \Rightarrow \begin{pmatrix} 5 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$
- $\begin{pmatrix} 0 \\ y \\ 0 \end{pmatrix} \quad 70y = 105, y = \frac{105}{70} \Rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 3/2 \\ 0 \end{pmatrix}$

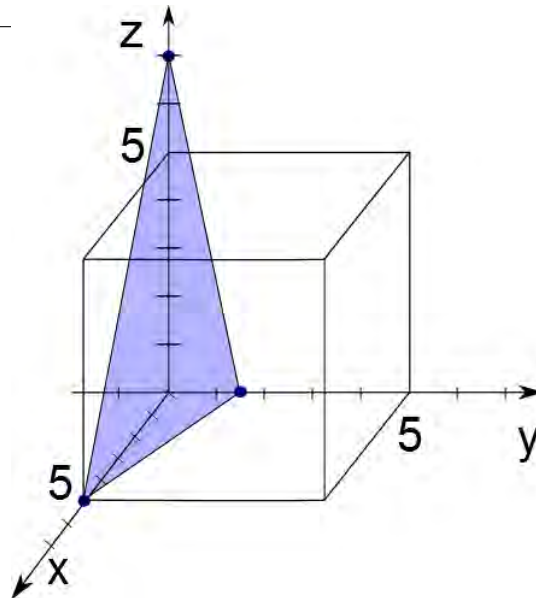


Abbildung 7.2: In der Achsenabschnittsform lassen sich die Schnittpunkte mit den jeweiligen Koordinatenachsen direkt ablesen.

- $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ z \end{pmatrix}$   $15z = 105, z = \frac{105}{15} \Rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 7 \end{pmatrix}$

Teilen wir die Koordinatengleichung durch  $-d$  — hier ist  $d = -105$  entsteht die folgende Form

$$E: \frac{1}{5}x + \frac{2}{3}y + \frac{1}{7}z - 1 = 0$$

Die Schnittpunkte mit den jeweiligen Koordinatenachsen können direkt abgelesen werden, z.B.

$$x_0 = \frac{1}{\frac{1}{5}} = 5$$

Das ist die  $x$ -Koordinate der Schnittpunktes mit  $x$ -Achse. Und weiter

$$y_0 = \frac{1}{\frac{2}{3}} = \frac{3}{2} \text{ und } z_0 = \frac{1}{\frac{1}{7}} = 7$$

### Definition Achsenabschnitts-Form

$$E: c_1x + c_2y + c_3z - 1 = 0$$

Die Achsenabschnittsform zeichnet sich dadurch aus, dass die Konstante den Wert  $-1$  hat. Die Schnittpunkte mit den jeweiligen Koordinatenachsen können direkt abgelesen werden und sind bei  $1/c_1, 1/c_2, 1/c_3$  wie Abb. 7.2 zeigt.

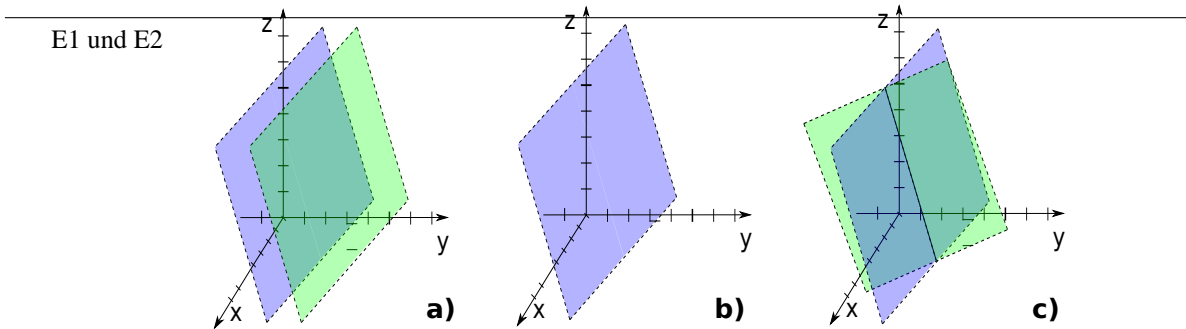


Abbildung 7.3: Mögliche Schnittmengen von zwei Ebenen

## 7.5 Wie kann man die Koeffizienten der Koordinatenform interpretieren?

### Infobox Koeffizienten und Konstante der Koordinatenform

$$c_1 \cdot x + c_2 \cdot y + c_3 \cdot z = d$$

- Die Koeffizienten  $c_1$ ,  $c_2$  und  $c_3$  sind die Koordinaten des Normalenvektors  $\vec{n}'$ .
- Der Betrag von  $\frac{d}{|\vec{n}'|}$  gibt den Abstand zum Ursprung an.
- Für  $d > 0$ : Verändern wir  $\vec{n}'$  nicht, sondern vergrößern wir nur  $d$ , so wächst der Abstand der Ebene zum Ursprung.

### Beispiel 7.29 Unterscheidung nach Schnittmenge, 2 Ebenen

QWHA5Z

Betrachten Sie die Schnittmengen von zwei Ebenen in Abbildung 7.3.

- Welche Schnittmengen gibt es? Beschreiben Sie die Schnittmengen in Worten.
- Wie können Sie die Fälle unterscheiden anhand der Normalenvektoren oder der Konstanten.
- Für ein homogenes lineares Gleichungssystem, d.h. die Konstanten aller Ebenen sind 0: Welche der oben besprochenen Fälle können jetzt noch auftreten?

#### Lösung:

- Die Abbildung Abbildung 7.3 zeigt alle möglichen Schnittmengen: a) keine Lösung, b) bei identischen Ebenen ist Schnittmenge eine Ebene, c) eine Schnittgerade

- b) Parallele Ebenen erkennt man daran, dass die Normalenvektoren kollinear sind a). Da gibt es keine Schnittmenge.  
 Identische Ebenen erkennt man daran, dass die Normalenvektoren kollinear sind und  $d/|\vec{n}|$  den selben Wert ergibt (b)  
 Sich schneidende Ebenen erkennt man daran, dass die Normalenvektoren nicht kollinear sind.
- c) Bei homogenen LGS beide Ebenen durch den Ursprung, d.h.  $\vec{0}$  ist immer in der Schnittmenge, also kann es bei der Lösung nur um eine Schnittgerade oder identische Ebenen handeln.

### Beispiel 7.30 Schnittmengen qualitativ

FK36P5

Betrachten Sie die Schnittmengen in Abbildung 7.4. Unten finden Sie die Gleichungen der Ebenen  $E_1$ ,  $E_2$  und  $E_3$  — vor und nach der Gauss-Elimination. Welche gegenseitige Lage haben  $E_1$ ,  $E_2$  und  $E_3$ . Wie sieht die Schnittmenge aus? Antworten Sie ohne die Schnittmengen zu berechnen, sondern beschreiben Sie die Schnittmengen in Worten.

a)

$$\begin{array}{l} E_1: 0 \quad +9y \quad +8z = 0 \\ E_2: 8x \quad +9y \quad +6z = 0 \\ E_3: 10x \quad +0 \quad +6z = 0 \end{array} \rightarrow \begin{array}{l} 2x \quad +0 \quad +8z = 0 \\ 0 \quad +9y \quad +8z = 0 \\ 0 \quad +0 \quad +34z = 0 \end{array}$$

b)

$$\begin{array}{l} E_1: 2x \quad +y \quad -2z = -1 \\ E_2: x \quad +8y \quad -4z = 10 \\ E_3: 6x \quad -y \quad +18z = 81 \end{array} \rightarrow \begin{array}{l} x \quad +0 \quad +44z = 178 \\ 0 \quad +y \quad +246z = 987 \\ 0 \quad +0 \quad +336z = 1344 \end{array}$$

c)

$$\begin{array}{l} E_1: 2x \quad +y \quad -2z = 7 \\ E_2: x \quad +8y \quad -4z = 20 \\ E_3: -3x \quad +6y \quad +0 = 6 \end{array} \rightarrow \begin{array}{l} x \quad +8y \quad -4z = 20 \\ 0 \quad +15y \quad -6z = 33 \\ 0 \quad +0 \quad +0 = 0 \end{array}$$

#### Lösung:

- a) Alle Konstanten sind 0, also schneiden sich die Ebenen dort. Setzt man nach der Gauss-Elimination in das LGS ein, ergibt sich tatsächlich nur dieser Punkt als Lösung (Fall i in Abbildung 7.4).
- b) Setzt man nach der Gauss-Elimination in das LGS ein, ergibt sich nur ein Punkt als Lösung (Fall i in Abbildung 7.4)..
- c) Nach der Gauss-Elimination ergibt sich in der dritten Zeile  $(0, 0, 0)$ , d.h. die Normalenvektoren der Ebenen sind linear abhängig. Nach der Gauss-Elimination sehen wir auch, dass nur zwei Gleichungen übrig bleiben, d.h. das System ist unterbestimmt, wir erhalten eine Schnittgerade. Es bleiben somit nur die Fälle f), g) und k) in Abbildung 7.4 interessant. Die Fälle f) und g) können wir jedoch ausschliessen, weil wir vor der Gauss-Elimination sehen, dass die

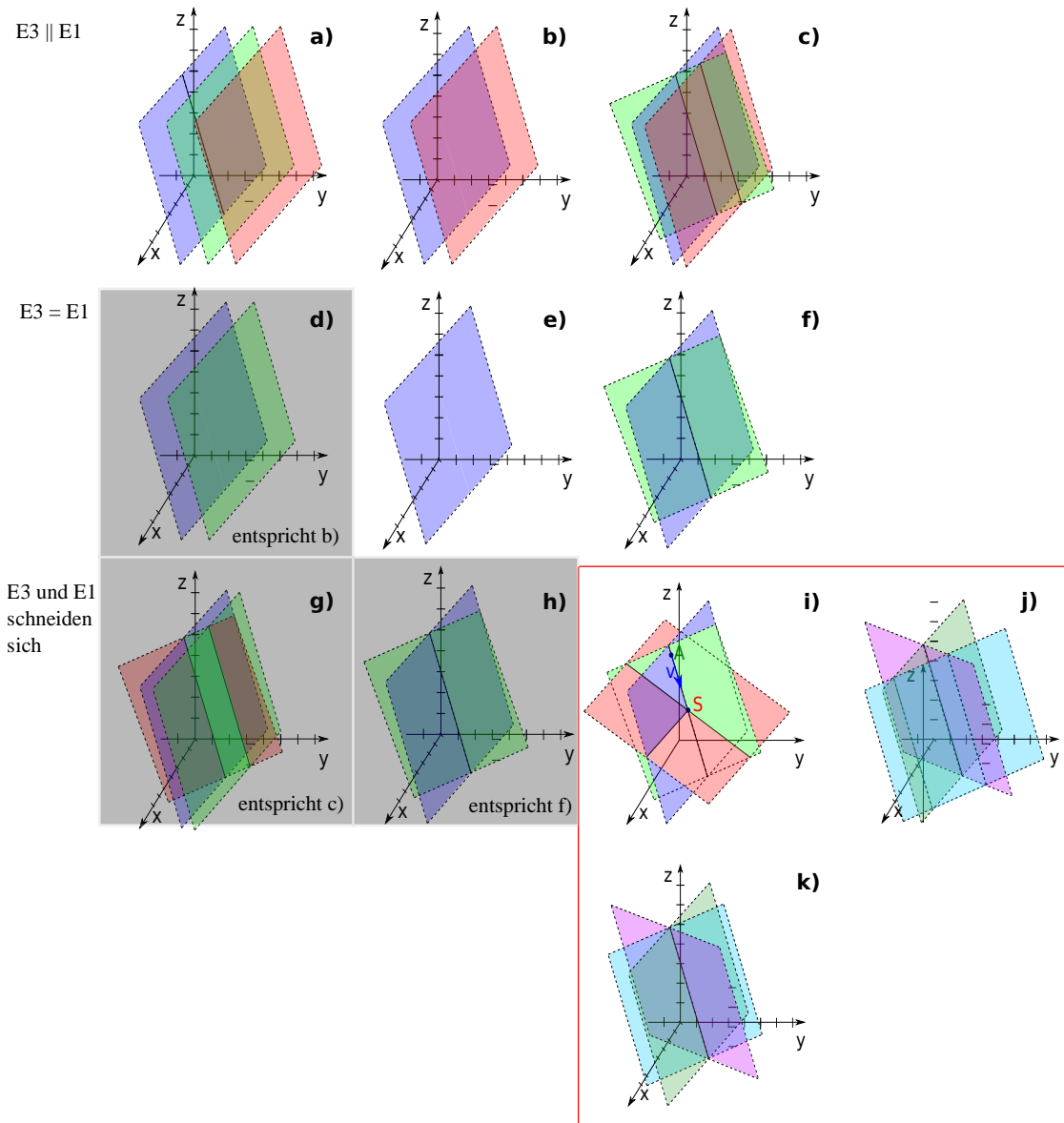


Abbildung 7.4: Mögliche Schnittmengen von drei Ebenen: die Ebenen  $E_1$  und  $E_2$  aus Abbildung 7.3 (parallele, identische und sich schneidende Ebenen) werden mit einer dritten Ebenen  $E_3$  (rot) kombiniert.



Normalenvektoren nicht kollinear sind. Also handelt es sich um drei Ebenen, die sich in der selben Geraden schneiden .

**Teil II**

**Lineare Algebra**

---

## Lösungen von linearen Gleichungssystemen

---

---

8.1	Standardform von linearen Gleichungssystemen . . . . .	193
8.2	Lösungsverfahren mit elementaren Zeilenoperationen . . . . .	201
8.3	Freie Parameter und konsistente/inkonsistente Gleichungen . . . . .	207
8.4	Homogene und inhomogene Lösungen bestimmen . . . . .	210
8.5	Geometrische Interpretation der Lösung . . . . .	223
8.6	Homogene und inhomogene lineare Gleichungssysteme . . . . .	230

---

### **8.1 Standardform von linearen Gleichungssystemen**

Lineare Gleichungssysteme sind ein wichtiges Thema in der linearen Algebra. Wie wir sehen werden, können viele Aufgaben auf die Lösung eines linearen Gleichungssystems zurückgeführt werden.

### Definition Lineare Gleichung

Eine **lineare Gleichung** in den Unbekannten  $x_1, x_2, \dots, x_n$  ist eine Gleichung, die sich in der Standard-Form

$$a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_n \cdot x_n = b$$

schreiben lässt, mit den Koeffizienten  $a_1, a_2, \dots, a_n$  und der Konstanten  $b$ . Eine **Lösung der linearen Gleichung** ist die Liste

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{pmatrix},$$

die eingesetzt in die lineare Gleichung die wahre Aussage

$$a_1 \cdot u_1 + a_2 \cdot u_2 + \dots + a_n \cdot u_n = b$$

ergibt.

Wir rechnen in  $\mathbb{R}$ , also  $a_1, a_2, \dots, a_n, b \in \mathbb{R}$

In der Definition haben wir die Unbekannten  $x_1, x_2, \dots, x_n$  genannt. Wenn wir diese Indices vermeiden wollen schreiben wir stattdessen  $x, y, z$  und beschränken uns auf drei Dimensionen.

### Beispiel 8.1 Lösung einer linearen Gleichung

Sind  $\vec{u} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 6 \end{pmatrix}$  und  $\vec{v} = \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}$  Lösungen der folgenden linearen Gleichung?

$$5x + 2y - z = 3$$

**Lösung:**

Wir setzen die Liste (den Vektor)  $\vec{u}$  in die Gleichung ein und erhalten nacheinander

$$\begin{aligned} 5 \cdot 1 + 2 \cdot 2 - 6 &= 3 \\ 3 &= 3 \end{aligned}$$

Die letzte Zeile ist eine wahre Aussage, also ist  $\vec{u}$  eine Lösung.

Wir setzen danach die Liste  $\vec{v}$  in die Gleichung ein und erhalten nacheinander

$$\left| \begin{array}{rcl} 5 \cdot 3 + 2 \cdot 2 - 1 & = & 3 \\ 18 & = & 6 \end{array} \right|$$

Die letzte Zeile ist eine falsche Aussage, also ist  $\vec{v}$  keine Lösung.

### Beispiel 8.2 Lösung einer linearen Gleichung

Sind  $\vec{u} = \begin{pmatrix} 5 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}$  und  $\vec{v} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}$  Lösungen der folgenden linearen Gleichung?

$$x + 2y - 3z = 6$$

**Lösung:**

Wir setzen die Liste (den Vektor)  $\vec{u}$  in die Gleichung ein und erhalten nacheinander

$$\begin{aligned} 5 + 2 \cdot 2 - 3 \cdot 1 &= 6 \\ 5 + 4 - 3 &= 6 \\ 6 &= 6 \end{aligned}$$

Die letzte Zeile ist eine wahre Aussage, also ist  $\vec{u}$  eine Lösung.

Wir setzen danach die Liste  $\vec{v}$  in die Gleichung ein und erhalten nacheinander

$$\left| \begin{array}{rcl} 1 + 2 \cdot 2 - 3 \cdot 3 & = & 6 \\ 1 + 4 - 9 & = & 6 \\ -4 & = & 6 \end{array} \right|$$

Die letzte Zeile ist eine falsche Aussage, also ist  $\vec{v}$  keine Lösung.

Wir notieren die Lösungen von LGSs in diesem Kapitel zwar mit Kleinbuchstaben z.B.  $\vec{u}$ . Diese Lösung kann manchmal einen Aufpunkt (Schnittpunkt) beinhalten, den wir im vorherigen Kapitel mit  $\vec{A}$  notiert hätten. Wir bewegen uns am Schnittpunkt von Bereichen der Mathematik (darstellende Geometrie/ lineare Algebra), die verschiedene Notationen verwenden. Deshalb ist eine Notation, die in beiden Gebieten anwendbar ist, schwierig zu finden.

### Definition Lineares Gleichungssystem, LGS

969291

Ein **lineares Gleichungssystem** ist eine Liste von linearen Gleichung in den selben Unbekannten  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

Wir systematisieren die Schreibweise noch weiter:

$$\left| \begin{array}{rcl} a_{11} \cdot x_1 & + a_{12} \cdot x_2 & + \dots + a_{1n} \cdot x_n = b_1 \\ a_{21} \cdot x_1 & + a_{22} \cdot x_2 & + \dots + a_{2n} \cdot x_n = b_2 \\ & \dots & \\ a_{m1} \cdot x_1 & + a_{m2} \cdot x_2 & + \dots + a_{mn} \cdot x_n = b_m \end{array} \right|$$

Dabei bezeichnet  $m$  die Anzahl der linearen Gleichungen. Die Koeffizienten  $a_{ij}$  haben jetzt zwei Indices. Der erste Index  $i$  bezeichnet die Nummer der Gleichung, der zweite bezeichnet die Unbekannte, zu der der Koeffizient gehört. Ebenfalls bezeichnet  $b_i$ , die Konstante in der  $i$ -ten Gleichung.

Ausserdem wird ein lineares Gleichungssystem **quadratisch** genannt, wenn es

gleich viele Gleichungen wie Unbekannte hat  $m = n$ .

Ein lineares Gleichungssystem heisst **homogen**, falls

$$\vec{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Andernfalls heisst es **inhomogen**.

### Beispiel 8.3 Lösung eines linearen Gleichungssystems

500997

Betrachte das System

$$\left| \begin{array}{cccc|c} x_1 & +x_2 & +4 \cdot x_3 & +3 \cdot x_4 & = 5 \\ 2 \cdot x_1 & +3 \cdot x_2 & +x_3 & -2 \cdot x_4 & = 1 \\ x_1 & +2 \cdot x_2 & -5 \cdot x_3 & +4 \cdot x_4 & = 3 \end{array} \right|.$$

Sind

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} -10 \\ 5 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \vec{v} = \begin{pmatrix} -8 \\ 6 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Lösungen des linearen Gleichungssystems?

**Lösung:**

Wir setzen  $\vec{u}$  in das Gleichungssystem ein und erhalten nacheinander

$$\left| \begin{array}{cccc|c} -10 + 5 + 4 + 6 & = & 5 \\ -10 + 15 + 1 - 4 & = & 1 \\ -10 + 10 - 5 + 8 & = & 3 \end{array} \right| \quad \text{oder} \quad \left| \begin{array}{c|c} 5 & = & 5 \\ -8 & = & 1 \\ 3 & = & 3 \end{array} \right|$$

Für die zweite Gleichung erhalten wir eine falsche Aussage, deshalb ist  $\vec{u}$  keine Lösung des linearen Gleichungssystems.

Ebenfalls setzen  $\vec{v}$  in das Gleichungssystem ein und erhalten nacheinander

$$\left| \begin{array}{cccc|c} -8 + 6 + 4 + 3 & = & 5 \\ -16 + 18 + 1 - 2 & = & 1 \\ -8 + 12 - 5 + 4 & = & 3 \end{array} \right| \quad \text{oder} \quad \left| \begin{array}{c|c} 5 & = & 5 \\ 1 & = & 1 \\ 3 & = & 3 \end{array} \right|$$

Alle Zeilen enthalten wahre Aussagen, deshalb ist  $\vec{v}$  eine Lösung des linearen Gleichungssystems.

### Beispiel 8.4 Lösung eines LGS

851082

Welcher der Vektoren erfüllt das lineare Gleichungssystem?

a) Setzen Sie dafür in das LGS ein.

b) Überprüfen Sie ihr Resultat mit Matlab indem Sie die Lösung mit der Koeffizientenmatrix multiplizieren.

a)

$$\begin{cases} E_1 : & -2y & = & 2 \\ E_2 : & 4x & -4y & +12z = 20 \\ E_3 : & 2x & & +6z = 8 \end{cases}$$

und

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} 10 \\ -1 \\ -2 \end{pmatrix}, \vec{v} = \frac{1}{5} \begin{pmatrix} 2 \\ -5 \\ 6 \end{pmatrix}, \vec{w} = \begin{pmatrix} 4 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

b)

$$\begin{cases} E_1 : & -2y & = & 0 \\ E_2 : & 8x & +4y & +12z = 16 \\ E_3 : & 4x & +4y & +6z = 8 \end{cases}$$

und

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} 8 \\ 0 \\ -5 \end{pmatrix}, \vec{v} = \frac{1}{5} \begin{pmatrix} -8 \\ 0 \\ 12 \end{pmatrix}, \vec{w} = \begin{pmatrix} -7 \\ 0 \\ 6 \end{pmatrix}.$$

**Lösung:**

a) Die Koeffizientenmatrix ist

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 0 & -2 & 0 \\ 4 & -4 & 12 \\ 2 & 0 & 6 \end{pmatrix}$$

Eingesetzt in das LGS erhalten wir:

$$\mathbf{M} \odot \vec{u} - \vec{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{M} \odot \vec{v} - \vec{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{M} \odot \vec{w} - \vec{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ 12 \\ 6 \end{pmatrix}$$

Also sind  $\vec{u}$  und  $\vec{v}$  Lösungen und  $\vec{w}$  ist keine Lösung.

b) Die Koeffizientenmatrix ist

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 0 & -2 & 0 \\ 8 & 4 & 12 \\ 4 & 4 & 6 \end{pmatrix}$$

Eingesetzt in das LGS erhalten wir:

$$\mathbf{M} \odot \vec{u} - \vec{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ -12 \\ -6 \end{pmatrix}, \mathbf{M} \odot \vec{v} - \vec{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{M} \odot \vec{w} - \vec{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Also sind  $\vec{v}$  und  $\vec{w}$  Lösungen und  $\vec{u}$  ist keine Lösung.

### 8.1.1 Lösungsmengen bestimmen (qualitativ)

#### Beispiel 8.5 Unterscheidung nach Schnittmenge, 3 Ebenen

PVKJ6M

Betrachten Sie die Schnittmengen von drei Ebenen in Abbildung 7.4.

- Welche Schnittmengen gibt es? Beschreiben Sie die Schnittmengen in Worten.
- Wie können Sie die Fälle unterscheiden anhand der Normalenvektoren oder der Konstanten.
- Zeichnen Sie ein entsprechendes Schema für homogene LGS.
- Erstellen Sie ein Schema um die möglichen Schnittmengen einzuteilen. Charakterisieren Sie die Fälle nach dem Rang der Koeffizientenmatrix und nach dem Rang der erweiterten Koeffizientenmatrix.

#### Lösung:

- Die Abbildung ?? zeigt alle möglichen Schnittmengen.
- Parallele Ebenen erkennt man daran, dass die Normalenvektoren kollinear sind (a-d und g). Da gibt es keine Schnittmenge.  
Identische Ebenen erkennt man daran, dass die Normalenvektoren kollinear sind und  $d/|\vec{n}|$  in zwei Ebenen den selben Wert ergibt (d-f und h)  
Bei j) und k) sind die Normalenvektoren komplanar, bei i) sind die Normalenvektoren linear unabhängig.
- Bei homogenen LGS gehen alle Ebenen durch den Ursprung, d.h.  $\vec{0}$  ist immer eine Lösung des LGS. Es kommen also nur die Fälle e), f)= h), i) und k) in Frage
- Wir bezeichnen die erweiterte Koeffizientenmatrix mit  $\mathbf{A}_e$  und die Koeffizientenmatrix mit  $\mathbf{A}$ . Falls es keine Lösung gibt (a-d, g, und j) gilt  $3 = \text{rank}(\mathbf{A}_e) > \text{rank}(\mathbf{A}) = 2$  (d.h. nach der Gaußelimination enthält  $\mathbf{A}_e$  einen Widerspruch in der letzten Zeile. Falls es genau eine Lösung gibt (i) gilt  $3 = \text{rank}(\mathbf{A}_e) = \text{rank}(\mathbf{A}) = 3$ . Falls die Lösungsmenge eine Schnittgerade ist gilt  $2 = \text{rank}(\mathbf{A}_e) = \text{rank}(\mathbf{A}) = 2$

#### Beispiel 8.6 Schnittmengen qualitativ

DSF4HG

Unten finden Sie die Ebenen  $E_1$ ,  $E_2$  und  $E_3$  — vor und nach der Gauss-Elimination. Wie sehen die Schnittmengen von der Ebenen  $E_1 \wedge E_2$ ,  $E_1 \wedge E_3$  und  $E_2 \wedge E_3$  aus? Wie sieht die Schnittmenge der drei Ebenen ( $E_1 \wedge E_2 \wedge E_3$ ) aus? Antworten Sie vorerst ohne die Schnittmengen zu berechnen, sondern beschreiben Sie die



Schnittmengen in Worten.

$$\begin{cases} 5x - 2y - 2z = 8 \\ 8x + 5y - z = -3 \\ 13x + 3y - 3z = 5 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} 41x - 12z = 34 \\ 41y + 11z = -79 \\ 0 = 0 \end{cases}$$

**Lösung:**

Wir finden die Pivot-Variablen  $x$  und  $y$ , also ist  $z$  eine freie Variable.

Die Lösungsmenge ist eine Schnittgerade. Wir beobachten, dass eine Linearkombination der Normalenvektoren den Nullvektor ergibt. D.h. die Normalenvektoren sind linear abhängig, d.h. sie sind komplanar (sie liegen in einer Ebene). Daraus schliessen wir, dass sich die drei Ebenen in einer gemeinsamen Schnittgeraden schneiden.

**Beispiel 8.7 Schnittmengen qualitativ: Homogene LGS**

GL27L6

Unten finden Sie Ebenen  $E_1$ ,  $E_2$  und  $E_3$  — vor und nach der Gauss-Elimination. Wie sehen die Schnittmengen der Ebenen  $E_1 \wedge E_2$ ,  $E_1 \wedge E_3$  und  $E_2 \wedge E_3$  aus? Wie sieht die Schnittmenge der drei Ebenen ( $E_1 \wedge E_2 \wedge E_3$ ) aus? Antworten Sie vorerst ohne die Schnittmengen zu berechnen, sondern beschreiben Sie die Schnittmengen in Worten.

a)

$$\begin{cases} 0 + 9y + 8z = 0 \\ 8x + 9y + 6z = 0 \\ 10x + 0 + 6z = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} 2x + 0 + 8z = 0 \\ 0 + 9y + 8z = 0 \\ 0 + 0 + 34z = 0 \end{cases}$$

b)

$$\begin{cases} -7x + y + 9z = 0 \\ 0 + 4y + 8z = 0 \\ 14x + 2y - 10z = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} 7x + 3y - z = 0 \\ 0 + 1y + 2z = 0 \\ 0 + 0 + 0 = 0 \end{cases}$$

c)

$$\begin{cases} -14x + 2y + 18z = 0 \\ -7x + y + 9z = 0 \\ 0 + 4y + 8z = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} 7x + 3y - z = 0 \\ 0 + 1y + 2z = 0 \end{cases}$$

d)

$$\begin{cases} 2x + y - 2z = 0 \\ x + 8y - 4z = 0 \\ -3x + 6y + 0 = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} x + 8y - 4z = 0 \\ 0 + 15y - 6z = 0 \\ 0 + 0 + 0 = 0 \end{cases}$$

e)

$$\begin{cases} 2x + y - 2z = 0 \\ x + 8y - 4z = 0 \\ 6x - y + 18z = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} x + 0 + 44z = 0 \\ 0 + y + 246z = 0 \\ 0 + 0 + 336z = 0 \end{cases}$$

f)

$$\begin{cases} 4x + 3y - 5z = 0 \\ -3x + 3y + 10z = 0 \\ 5x + 9y + 0 = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} x + 6y + 5z = 0 \\ 0 + 21y + 25z = 0 \end{cases}$$

**Lösung:**

Da bei allen Gleichungen die Konstanten 0 sind, gehen alle Ebenen durch den Ursprung. Der Vektor  $\vec{0}$  liegt deshalb immer in der Schnittmenge und ist entweder Schnittpunkt oder Aufpunkt der Schnittmenge.

- a) und e) ergeben einen Schnittpunkt nämlich  $\vec{0}$ . Jeweils zwei Ebenen schneiden sich in einer Schnittgeraden.
- b) d) f) ergeben eine Schnittgerade. Wir beobachten, dass eine Linearkombination der Normalenvektoren den Nullvektor ergibt. D.h. die Normalenvektoren sind linear abhängig, d.h. sie sind komplanar (sie liegen in einer Ebenen). Daraus schliessen wir, dass sich die drei Ebenen in einer gemeinsamen Schnittgeraden schneiden.
- c) ergibt eine Schnittgerade. Hier ist speziell, dass die Ebenen  $E_1$  und  $E_2$  identisch sind und sich mit  $E_3$  in einer Geraden schneiden. Das erkennen wir daran, dass gleichzeitig die Normalenvektoren von  $E_1$  und  $E_2$  kollinear sind und die Konstanten beide gleich sind, nämlich 0.

**Beispiel 8.8 Schnittmengen qualitativ: Inhomogene LGS**

EM75PE

Unten finden Sie Ebenen  $E_1$ ,  $E_2$  und  $E_3$  vor und nach der Gauss-Elimination. Wie sehen die Schnittmengen von der Ebenen  $E_1 \wedge E_2$ ,  $E_1 \wedge E_3$  und  $E_2 \wedge E_3$  aus? Wie sieht die Schnittmenge der drei Ebenen ( $E_1 \wedge E_2 \wedge E_3$ ) aus? Antworten Sie vorerst ohne die Schnittmengen zu berechnen, sondern beschreiben Sie die Schnittmengen in Worten.

a)

$$\begin{cases} 2x + y - 2z = -1 \\ x + 8y - 4z = 10 \\ 6x - y + 18z = 81 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} x + 0 + 44z = 178 \\ 0 + y + 246z = 987 \\ 0 + 0 + 336z = 1344 \end{cases}$$

b)

$$\begin{cases} 2x + y - 2z = 7 \\ x + 8y - 4z = 20 \\ -3x + 6y + 0 = 6 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} x + 8y - 4z = 20 \\ 0 + 15y - 6z = 33 \\ 0 + 0 + 0 = 0 \end{cases}$$

c)

$$\begin{cases} 4x + 18y - 12z = 62 \\ 2x + 9y - 6z = 29 \\ 12x - 3y + 4z = 67 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} 2x + 9y - 6z = 1 \\ 0 + 57y - 40z = 3 \\ 0 + 0 + 0 = 4 \end{cases}$$

d)

$$\begin{vmatrix} 2x & +y & -2z & = & 9 \\ 6x & -y & +18z & = & 41 \\ 24x & +8y & +0 & = & 110 \end{vmatrix} \rightarrow \begin{vmatrix} 2x & +y & -2z & = & 9 \\ 0 & +4y & -24z & = & 10 \\ 0 & +0 & +0 & = & 12 \end{vmatrix}$$

e)

$$\begin{vmatrix} 0 & +9y & +8z & = & 40 \\ 8x & +9y & +6z & = & 56 \\ 10x & +0 & +6z & = & -14 \end{vmatrix} \rightarrow \begin{vmatrix} 2x & +0 & +8z & = & -30 \\ 0 & +9y & +8z & = & 40 \\ 0 & +0 & +34z & = & -136 \end{vmatrix}$$

f)

$$\begin{vmatrix} -14x & +2y & +18z & = & 78 \\ -7x & +y & +9z & = & -41 \\ 0 & +4y & +8z & = & 9 \end{vmatrix} \rightarrow \begin{vmatrix} 7x & +3y & -z & = & 2 \\ 0 & +4y & +8z & = & 1 \\ 0 & +0 & +0 & = & 4 \end{vmatrix}$$

g)

$$\begin{vmatrix} -7x & +y & +9z & = & -31 \\ 0 & +4y & +8z & = & -12 \\ 14x & +2y & -10z & = & 50 \end{vmatrix} \rightarrow \begin{vmatrix} 7x & +3y & -z & = & 19 \\ 0 & +4y & +8z & = & -12 \\ 0 & +0 & +0 & = & 0 \end{vmatrix}$$

h)

$$\begin{vmatrix} 4x & +3y & -5z & = & 18 \\ -3x & +3y & +10z & = & 5 \\ 5x & +9y & +0 & = & 36 \end{vmatrix} \rightarrow \begin{vmatrix} x & +6y & +5z & = & 3 \\ 0 & +21y & +25z & = & 4 \\ 0 & +0 & +0 & = & 5 \end{vmatrix}$$

i)

$$\begin{vmatrix} 4x & +18y & -12z & = & 62 \\ 2x & +9y & -6z & = & 31 \\ x & -3y & +4z & = & 2 \end{vmatrix} \rightarrow \begin{vmatrix} 2x & +9y & -6z & = & 1 \\ 0 & +15y & -14z & = & 27 \\ 0 & +0 & +0 & = & 0 \end{vmatrix}$$

**Lösung:**

Im Gegensatz zu den homogenen LGS sind die Konstanten nicht alle gleich 0. Deshalb haben die Ebenen die Möglichkeit parallel zu liegen und sich trotzdem nicht zu schneiden.

- a) und e) ergeben einen Schnittpunkt, d.h. jeweils zwei Ebenen schneiden sich in einer Schnittgeraden.
- b) und g) ergeben eine Schnittgerade. Wir beobachten, dass eine Linearkombination der Normalenvektoren den Nullvektor ergibt. D.h. die Normalenvektoren sind linear abhängig, d.h. sie sind komplanar (sie liegen in einer Ebenen). Daraus schliessen wir, dass sich die drei Ebenen in einer gemeinsamen Schnittgeraden schneiden.
- d) und h) leere Schnittmenge. Die Normalenvektoren sind linear abhängig, aber es gibt keine zwei, die kollinear sind. Trotzdem schneiden sich die Ebenen nicht (Widerspruch in der letzten Zeile nach dem Eliminieren). Die Ebenen beschreiben also einen Kamin
- i) ergibt eine Schnittgerade. Hier ist speziell, dass die Ebenen  $E_1$  und  $E_2$  identisch sind und sich mit  $E_3$  in einer Geraden schneiden.

- c) und f) leere Schnittmenge. Hier ist speziell, dass die Ebenen  $E_1$  und  $E_2$  parallel sind (kollinear Normalenvektoren) aber verschiedene Koonstanten haben.

## 8.2 Lösungsverfahren mit elementaren Zeilenoperationen

### Beispiel 8.9 Linear-Kombinationen von Gleichungen

070402

$$\left| \begin{array}{l} L_1 : 8x_1 \quad +x_2 = 17 \\ L_2 : x_1 \quad +3 \cdot x_2 = 5 \end{array} \right| \text{ und } \vec{v} = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Wir benennen die Gleichungen  $L_1, L_2$  und  $L_3$ . Wir wissen von vorher, dass  $\vec{v}$  eine Lösung des LGS ist. Ist nun  $\vec{v}$  auch eine Lösung der lineare Gleichung

$$L' = 2L_1 + 3L_2 ?$$

**Lösung:**

Wir berechnen zuerst die lineare Gleichung  $L_1 + 3L_2$ :

$$\begin{array}{r} 2 \cdot L_1 : 16x_1 \quad +2x_2 = 34 \\ 3 \cdot L_2 : 3x_1 \quad +9x_2 = 15 \\ \hline L' : 19x_1 \quad +11x_2 = 49 \end{array}$$

Wenn wir nun  $\vec{v} = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix}$  in  $L'$  einsetzen, erhalten wir nacheinander

$$19 \cdot 2 + 11 \cdot 1 = 49 \quad \text{oder} \quad 49 = 49$$

also ist  $\vec{v}$  eine Lösung von  $L'$ .

### Beispiel 8.10 Linear-Kombinationen von Gleichungen

969391

$$\left| \begin{array}{l} L_1 : x_1 \quad +x_2 \quad +4 \cdot x_3 \quad +3 \cdot x_4 = 5 \\ L_2 : 2 \cdot x_1 \quad +3 \cdot x_2 \quad +x_3 \quad -2 \cdot x_4 = 1 \\ L_3 : x_1 \quad +2 \cdot x_2 \quad -5 \cdot x_3 \quad +4 \cdot x_4 = 3 \end{array} \right| \text{ und } \vec{v} = \begin{pmatrix} -8 \\ 6 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Wir benennen die Gleichungen  $L_1, L_2$  und  $L_3$ . Wir wissen von vorher, dass  $\vec{v}$  eine Lösung des LGS ist. Ist nun  $\vec{v}$  auch eine Lösung der lineare Gleichung

$$L' = L_2 - L_1 - L_3 ?$$

**Lösung:**

Wir berechnen zuerst die lineare Gleichung  $L_2 - L_1 - L_3$ :

$$\left| \begin{array}{rcllcl} 1 \cdot L_2 : & 2x_1 & +3x_2 & +1x_3 & -2x_4 & = & 1 \\ -1 \cdot L_1 : & -x_1 & -x_2 & -4x_3 & -3x_4 & = & -5 \\ -1 \cdot L_3 : & -x_1 & -2x_2 & +5x_3 & -4x_4 & = & -3 \\ \hline L' : & 0 \cdot x_1 & +0 \cdot x_2 & +2x_3 & -9x_4 & = & -7 \end{array} \right|$$

Wenn wir nun  $\vec{v} = \begin{pmatrix} -8 \\ 6 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$  in  $L'$  einsetzen, erhalten wir nacheinander

$$2 \cdot (1) - 9 \cdot (1) = -7 \quad \text{oder} \quad 25 = 25$$

Wir folgern daraus, dass durch die Linearkombination von linearen Gleichungen die Lösungsmenge nicht verändert wird.

### Definition Elementare Zeilenoperationen

Die elementaren Zeilenoperationen sind

- Vertauschung von zwei Gleichungen:  $L_i \leftrightarrow L_j$
- Multiplikation einer Gleichung mit einer Zahl  $k \neq 0$ :  $L_i \rightarrow L_i \cdot k$
- Addition der Gleichungen  $L_i$  und  $L_j \cdot k$ :  $L_i \rightarrow L_i + L_j \cdot k$

[?, Bd. 2 I 5.2]

### Satz Elementare Zeilenoperationen

Elementare Zeilenoperationen verändern die Lösungsmenge eines linearen Gleichungssystems  $A \cdot \vec{x} = \vec{b}$  nicht.

[?, p.464]

Das Gauss'sche Eliminations-Verfahren wendet die elementaren Zeilenoperationen nacheinander an, um das lineare Gleichungssystem in die **Zeilenstufenform** (meist sogar **Dreiecks-Form**) zu bringen. Daraus kann die Lösung des Gleichungssystems einfach bestimmt werden. Dazu das folgende Beispiel:

### Beispiel 8.11 Einsetzen in die Dreiecksform

959281

Löse das Gleichungssystem durch Einsetzen von unten nach oben.

$$\left| \begin{array}{rcllcl} 2x_1 & -3x_2 & +5x_3 & -2x_4 & = & 9 \\ & 5x_2 & -x_3 & +3x_4 & = & 1 \\ & & 7x_3 & -x_4 & = & 3 \\ & & & 2x_4 & = & 8 \end{array} \right|$$

**Lösung:**

- a) In der letzten Zeile erhalten wir  $x_4 = 4$ .
- b) Das setzen wir in die dritte Zeile ein und erhalten die Gleichung mit einer Unbekannten:

$$7x_3 - 4 = 3 \text{ also } 7x_3 = 7 \Rightarrow x_3 = 1$$

- c) Jetzt setzen wir  $x_3 = 1$  und  $x_4 = 4$  in die zweite Gleichung ein und erhalten wieder eine Gleichung mit nur einer Unbekannten:

$$5x_2 - 1 + 12 = 1 \text{ oder } 5x_2 + 11 = 1 \text{ oder } 5x_2 = -10 \Rightarrow x_2 = -2$$

- d) Schliesslich setzen wir  $x_2 = -2$ ,  $x_3 = 1$  und  $x_4 = 4$ , in die erste Gleichung ein und lösen nach  $x_1$  auf:

$$2x_1 + 6 + 5 - 8 = 9 \text{ oder } 2x_1 + 3 = 9 \text{ oder } 2x_1 = 6 \Rightarrow x_1 = 3$$

Die Lösung ist also  $\vec{u} = \begin{pmatrix} 3 \\ -2 \\ 1 \\ 4 \end{pmatrix}$ .

Die Dreiecksform zeichnet sich dadurch aus, dass genau so viele Gleichungen vorliegen wie Unbekannte. Gibt es weniger Gleichungen als Unbekannte, sprechen wir von der **Zeilenstufenform**. Die Dreiecksform ist also ein Spezialfall der Zeilenstufenform mit Anzahl Unbekannte gleich Anzahl Gleichung,  $n = m$ .

**Beispiel 8.12 Einsetzen in der Zeilenstufenform**

577593

Lösen Sie das nachfolgende Gleichungssystem durch Einsetzen von unten nach oben:

$$\left| \begin{array}{cccccc} 2x_1 & +6x_2 & -x_3 & +4x_4 & -2x_5 & = & 15 \\ & & x_3 & +2x_4 & +2x_5 & = & 5 \\ & & & 3x_4 & -9x_5 & = & 6 \end{array} \right|.$$

**Lösung:**

Die Variablen, die auf jeder Zeile zuvorderst stehen ( $x_1, x_3$  und  $x_4$ ), nennen wir **Pivot-Variablen**, die anderen nennen wir **freie Variablen** ( $x_2$  und  $x_5$ ). Die Benennung wird in den folgenden Lösungsschritten klar. Wir lösen jetzt in parametrischer Form: Wir benennen die freien Variablen mit Parametern

$$x_2 = \mu, \quad x_5 = \nu.$$

Die restlichen Variablen bestimmen wir nun wie beim Einsetzen in Dreieckform, nur dass hier noch zusätzlich die Parameter  $\mu$  und  $\nu$  auftreten:

a) In der letzten Gleichung ergibt sich

$$3x_4 - 9\nu = 6 \quad \text{oder} \quad 3x_4 = 6 + 9\nu \quad \Rightarrow \quad x_4 = 2 + 3\nu$$

b) Wir setzen  $x_4 = 2 + 3\nu$  und  $x_5 = \nu$  in die zweite Gleichung ein und lösen nach  $x_3$  auf:

$$2x_3 + 2(2 + 3\nu) + 3\nu = 5 \quad \text{oder} \quad x_3 + 4 + 8\nu = 5 \quad \Rightarrow \quad x_3 = 1 - 8\nu$$

c) Wir setzen  $x_3 = 1 - 8\nu$ ,  $x_4 = 2 + 3\nu$  und  $x_5 = \nu$  in die erste Gleichung ein und lösen nach  $x_1$  auf:

$$2x_1 + 6\mu - (1 - 8\nu) + 4(2 + 3\nu) - 2\nu = 15 \quad \Rightarrow \quad x_1 = 4 - 3\mu - 9\nu$$

Die Lösung ist also  $\vec{u} = \begin{pmatrix} 4 - 3\mu - 9\nu \\ \mu \\ 1 - 8\nu \\ 2 + 3\nu \\ \nu \end{pmatrix}$ . Dies kann auch geschrieben werden als

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ 1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix} + \mu \begin{pmatrix} -3 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \nu \begin{pmatrix} -9 \\ 0 \\ -8 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

und  $\mu$  und  $\nu$  sind Zahlen aus  $\mathbb{R}$ .

Übrigens, ist Ihnen aufgefallen, dass die Lösung die Form einer Ebene in Parameterform hat? Es gibt einen Aufpunkt und zwei Richtungsvektoren. Da wir uns in fünf und nicht in drei Dimensionen bewegen, nennen wir die Lösungsmenge eine **Hyperebene**.

Das Lösen von linearen Gleichungen mit dem **Gauss-Eliminations-Verfahren** setzt sich nun aus den beiden Teil-Verfahren zusammen:

- Elimination: Durch elementare Zeilenoperationen wird das Gleichungssystem auf Zeilenstufenform gebracht.
- Rücksubstitution: Durch Einsetzen von unten nach oben werden die Unbekannten bestimmt.

#### Infobox Zeilenstufenform vs. Trapezform

In [?, Bd. 2 I 4.4] werden die elementare Zeilenoperationen "äquivalente Umformungen" genannt. Ausserdem wird die Zeilenstufenform da "Trapezform" genannt.

Übrigens, beim Überführen eines Gleichungssystems in Zeilenstufenform verwendet man eine Kombination von zwei Schritten, nämlich man ersetzt die Gleichung  $L_i$  mit  $L_i + kL_j$ :  $L_i \rightarrow L_i + L_j \cdot k$ , d.h. man führt die Multiplikation einer

Gleichung gleichzeitig mit der Addition von Gleichungen aus.

Beachte, dass das Verfahren vorzeitig abgebrochen werden kann, wenn ein Widerspruch erzeugt wird. Dann hat das lineare Gleichungssystem keine Lösung. Wie die elementaren Zeilenoperationen eingesetzt werden um auf Zeilenstufenform zu kommen, zeigt das nächste Beispiel

**Beispiel 8.13 Zeilenstufenform durch elementare Zeilenoperationen 577593**

Lösen Sie das nachfolgende Gleichungssystem mit dem Gaussverfahren

$$\left| \begin{array}{ccc|c} x & -3y & -2z & = & 6 \\ 2x & -4y & -3z & = & 8 \\ -3x & +6y & +8z & = & -5 \end{array} \right|.$$

**Lösung:**

Elimination:

$$\left| \begin{array}{ccc|c} L'_1 = L_1 : & x & -3y & -2z & = & 6 \\ L'_2 = L_2 - 2L_1 : & 0 & 2y & z & = & -4 \\ L'_3 = L_3 + 3L_1 : & 0 & -3y & +2z & = & 13 \end{array} \right|$$

also

$$\left| \begin{array}{ccc|c} L''_1 = L'_1 : & x & -3y & -2z & = & 6 \\ L''_2 = \frac{1}{2} \cdot L'_2 : & & 1y & +\frac{1}{2}z & = & -2 \\ L''_3 = L'_3 + 3L''_2 : & & 0 & +\frac{7}{2}z & = & 7 \end{array} \right|$$

Einsetzen:

- Aus der Gleichung  $L''_3$  folgt, dass  $z = 2$ .
- Wir setzen das in Gleichung  $L''_2$  ein und erhalten

$$1y + 1 = -2 \quad \Rightarrow \quad y = -3$$

- Wir setzen  $z = 2$  und  $y = -3$  in die erste Gleichung  $L''_1$  ein

$$x + 9 - 4 = 6 \quad \Rightarrow \quad x = 1$$

Die Lösung ist also die Liste (oder der Vektor)  $\vec{u} = \begin{pmatrix} 1 \\ -3 \\ 2 \end{pmatrix}$ .

Beachte, dass beim Gaussverfahren zuerst von oben nach unten gearbeitet wird (Elimination) und dann strikt von unten nach oben (Einsetzen). Dies erlaubt die Übersicht zu behalten und wir vermeiden linear abhängige Linearkombinationen (siehe unten).



### Infobox Elimination beim Gaussverfahren

Bei der Elimination wird *eine* Zeile bestimmt, mit der eliminiert wird (sie darf zu anderen Zeilen addiert werden).

Diese Zeile muss unverändert in das nächste Gleichungssystem übernommen werden. So werden linear abhängige Linearkombinationen der Gleichungen vermieden.

Die Probleme, die entstehen, wenn man sich nicht an diese Regel hält, zeigt das folgende Beispiel:

### Beispiel 8.14 Linear abhängige Linearkombinationen von Gleichungen 942087

Für das Gleichungssystem

$$\left| \begin{array}{rcl} x & -3y & = 6 \\ 2x & -4y & = 10 \end{array} \right|.$$

wird das folgende Vorgehen vorgeschlagen:

$$\left| \begin{array}{rcl} L'_1 = L_1 - \frac{1}{2}L_2 & : & 0 \quad -1y = 1 \\ L'_2 = L_2 - 2L_1 & : & 0 \quad +2y = -2 \end{array} \right|$$

also

$$\left| \begin{array}{rcl} L''_1 = L'_1 & : & 0 \quad -1y = 1 \\ L''_2 = L'_2 + 2L'_1 & : & 0 \quad +0 = 0 \end{array} \right|$$

$x$  ist vermeintlich ein freier Parameter. Wir setzen  $x = \mu$ . Ausserdem folgt aus der ersten Zeile, dass  $y = -1$  ist. Die Lösungen sind also  $\vec{u} = \begin{pmatrix} \mu \\ -1 \end{pmatrix}$ . Dies ist offensichtlich eine falsche Lösung, denn die richtige Lösung besteht aus einem einzigen Schnittpunkt  $\vec{u} = \begin{pmatrix} 3 \\ -1 \end{pmatrix}$ . Was wurde beim Lösen falsch gemacht?

#### Lösung:

Beim ersten Eliminationsschritt wurde nicht eingehalten, dass die Zeile mit der eliminiert wird, nicht verändert werden darf.

Wenn wir nun untersuchen, welche Gleichungen wir im zweiten Eliminationsschritt erhalten, sind dies:

$$\left| \begin{array}{rcl} L''_1 & = & L'_1 = L_1 - \frac{1}{2}L_2 \\ L''_2 & = & L'_2 + 2L'_1 = \underbrace{(L_2 - 2L_1) + 2(L_1 - \frac{1}{2}L_2)}_{=0} \end{array} \right|.$$

Wir sehen also, dass die erste Gleichung eine Linearkombination von  $L_1$  und  $L_2$  ist. Das ist in Ordnung. Aber die zweite Gleichung wurde durch eine 0 ersetzt. Dies ist auf den ersten Blick nicht ersichtlich, sondern erscheint erst in der Analyse.

In der Fachsprache nennt man die Gleichungen  $L'_1$  und  $L'_2$  linear abhängige Linearkombinationen, weil die Vektoren gebildet aus den Koeffizienten

$$L'_1 = 1L_1 - \frac{1}{2}L_2 \Rightarrow \vec{c} = \begin{pmatrix} 1 \\ -\frac{1}{2} \end{pmatrix}$$

und

$$L'_2 = -2L_1 + 1L_2 \Rightarrow \vec{d} = \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \end{pmatrix}$$

linear abhängig sind. Diese linear abhängige Linearkombinationen werden bei der Elimination vermieden, indem die Zeile mit der eliminiert wird, unverändert beibehalten wird.

### 8.3 Freie Parameter und konsistente/inkonsistente Gleichungen

Beim letzten Schritt der Elimination können ausserdem in der letzten Zeile drei Situationen auftreten:

#### Satz Formen von linearen Gleichungssystemen

Das lineare Gleichungssystem  $a \cdot x = b$  kann drei Formen annehmen

- Es liegt die Form  $a \cdot x = b$  mit  $a \neq 0$  vor. Es gibt eine Lösung  $x = \frac{b}{a}$ .
- Es liegt die Form  $0 \cdot x = b$  mit  $b \neq 0$  vor. Es gibt keine Lösung.
- Es liegt die Form  $0 \cdot x = 0$  vor. Dann gibt es unendlich viele Lösungen  $x = \mu$  mit  $\mu \in \mathbb{R}$ .

#### Definition Inkonsistente lineare Gleichungen

Die lineare Gleichung  $0 \cdot x = b$  mit  $b \neq 0$  nennen wir **inkonsistent** (Fall 2 in Satz 8.2). Alle anderen Fälle der linearen Gleichungen heissen **konsistent** (Fall 1 und 3 in Satz 8.2).

Ist eine Gleichung inkonsistent, ist auch das zugehörige Gleichungssystem inkonsistent. Beachte auch, dass für konsistente Gleichungssysteme (Fall 1 und 3 in Satz 8.2) wieder zwei Unterscheidungen gemacht werden: Es gibt den Fall mit *einer* Lösung oder mit *unendlich vielen* Lösungen. Deshalb ergibt sich das Schema für linear Gleichungssysteme, wie es in Abb.8.3 gegeben ist. Ob genau eine Lösung oder unendlich viele Lösungen (d.h. freie Variablen) vorliegen, entscheidet man, indem man das Gleichungssystem auf Zeilenstufenform bringt und freie Variablen sucht. Gibt es freie Variablen, resultieren unendlich viele Lösungen, ansonsten gibt es genau eine Lösung.

Um den Schreibaufwand zu verringern, können bei den Umformungen im Gaußverfahren die Unbekannten und die Gleichheitszeichen weggelassen werden. Wir schreiben dann das lineare Gleichungssystem

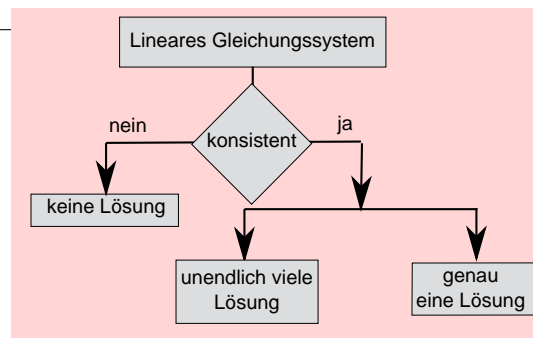


Abbildung 8.1: Mögliche Situationen für die Lösung eines linearen Gleichungssystems. [?, Bd. 2 I 5.4]

$$\begin{cases} a_{11} \cdot x_1 + a_{12} \cdot x_2 + \dots + a_{1n} \cdot x_n = b_1 \\ a_{21} \cdot x_1 + a_{22} \cdot x_2 + \dots + a_{2n} \cdot x_n = b_2 \\ \dots \\ a_{m1} \cdot x_1 + a_{m2} \cdot x_2 + \dots + a_{mn} \cdot x_n = b_m \end{cases}.$$

als

### Definition Erweiterte Koeffizienten-Matrix

$$\left[ \begin{array}{cccc|c} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} & b_2 \\ & & \dots & & \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} & b_m \end{array} \right].$$

### Beispiel 8.15 Erweiterte Koeffizienten-Matrix

958139

Schreibe das lineare Gleichungssystem als **erweiterte Koeffizienten-Matrix** und löse es mit dem Gauss-Verfahren:

$$\left| \begin{array}{ccc|c} x & +y & +z & = -6 \\ x & +2y & +3z & = -10 \\ 2x & +3y & +6z & = -18 \end{array} \right|$$

**Lösung:**

Die elementaren Zeilen-Operationen werden jetzt auf die Zeilen in der Matrix angewendet:

$$\left[ \begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 1 & -6 \\ 1 & 2 & 3 & -10 \\ 2 & 3 & 6 & -18 \end{array} \right] \Rightarrow \left[ \begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 1 & -6 \\ 0 & 1 & 2 & -4 \\ 0 & 1 & 4 & -6 \end{array} \right] \Rightarrow \left[ \begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 1 & -6 \\ 0 & 1 & 2 & -4 \\ 0 & 0 & 2 & -2 \end{array} \right]$$

Durch Einsetzen erhalten wir  $\vec{u} = \begin{pmatrix} -3 \\ -2 \\ -1 \end{pmatrix}$ .

**Beispiel 8.16 Rang Koeffizienten Matrix**

UHXGXT

Beschreiben Sie die LGS aus dem Beispiel 8.8 mit folgenden Fachausdrücken

- Rang Koeffizientenmatrix
- Rang der erweiterten Koeffizientenmatrix
- konsistentes/inkonsistentes LGS

**Lösung:**

- a) und e) Rang der Koeffizientenmatrix = Rang der erweiterten Koeffizientenmatrix = Anzahl Unbekante. Konsistentes LGS
- b) c) und g) Rang der Koeffizientenmatrix = Rang der erweiterten Koeffizientenmatrix < Anzahl Unbekante. Konsistentes LGS
- d), h) und f) Rang der Koeffizientenmatrix < Rang der erweiterten Koeffizientenmatrix. Inkonsistentes LGS

**Beispiel 8.17 Konsistente LGS**

OZDJ5L

Bestimme  $m$ , so dass das LGS konsistent ist. Bestimme dann für den gefundenen Wert die ganze Lösungsmenge (=allgemeine Lösung) des LGS.

$$\text{a) } \begin{cases} 2x + y + 3z = -5 \\ 3x - y + 4z = 2 \\ 5x + 7z = m - 5 \end{cases}$$

$$\text{b) } \begin{cases} -3x + 2y + 3z = 1 \\ 4x - y - 5z = -5 \\ x - y - 2z = m - 3 \end{cases}$$

**Lösung:**

a) Wir eliminieren

$$\begin{cases} L_1 : 2x + y + 3z = -5 \\ L_2 : 3x - y + 4z = 2 \\ L_3 : 5x + 7z = m - 5 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} L_1 : 2x + y + 3z = -5 \\ L'_2 = 2L_2 - 3L_1 : 0 - 5y - z = 19 \\ L'_3 = 2L_3 - 5L_1 : 0 - 5y - z = 2(m - 5) + 25 \end{cases}$$

und schliesslich

$$\begin{cases} L_1 : 2x + y + 3z = -5 \\ L'_2 : 0 - 5y - z = 19 \\ L''_3 = L'_3 - L'_2 : 0 \quad 0 \quad 0 = 2(m - 5) + 6 \end{cases}$$

Das LGS ist konsistent, falls  $m = 2$ , sonst ist es inkonsistent, d.h. für  $m = 2$  hat es unendlich viele Lösungen (Schnittgerade) und für  $m \neq 2$  hat es keine Lösung. Geometrisch wird die dritte Ebene durch  $m$  im Raum verschoben.

Für  $m = 2$  fällt sich so, dass sie durch die Schnittgeraden der Ebenen  $E_1$  und  $E_2$  verläuft.

b) Wir eliminieren

$$\begin{array}{l} \left| \begin{array}{cccc|c} L_1: & -3x & 2y & 3z & = & 1 \\ L_2: & 4x & -y & -5z & = & -5 \\ L_3: & x & -y & -2z & = & m-3 \end{array} \right| \\ \Rightarrow \left| \begin{array}{cccc|c} L_1: & -3x & 2y & 3z & = & 1 \\ L'_2 = 3L_2 + 4L_1: & 0 & 5y & -3z & = & -11 \\ L'_3 = 3L_3 + L_1: & 0 & -y & -3z & = & 3(m-3) + 1 \end{array} \right| \end{array}$$

und schliesslich

$$\left| \begin{array}{cccc|c} L_1: & -3x & 2y & 3z & = & 1 \\ L'_2: & 0 & 5y & -3z & = & -11 \\ L''_3 = 5L'_3 + L'_2: & 0 & 0 & -18z & = & 15m - 51 \end{array} \right|$$

Das LGS ist konsistent unabhängig von der Wahl von  $m$ .

## 8.4 Homogene und inhomogene Lösungen bestimmen

### Infobox Partikuläre Lösungen (Aufpunkt)

Sie lässt sich am schnellsten bestimmen, wenn im LGS alle freien Variablen 0 gesetzt werden und dann das LGS durch Einsetzen von unten nach oben gelöst wird.

### Infobox Homogene Lösungen (Richtungsvektoren)

Sie lassen sich am schnellsten bestimmen aus dem *homogenen* LGS. Für den ersten Richtungsvektor setzen wir die freien Variablen  $\lambda_1 = 1$ ,  $\lambda_2 = 0$ ,  $\lambda_3 = 0$ , usw. und lösen dann das LGS durch Einsetzen von unten nach oben. Gibt es weitere Richtungsvektoren, dann wiederholen wir dies mit

2.  $\lambda_1 = 0$ ,  $\lambda_2 = 1$ ,  $\lambda_3 = 0$ , usw.
3.  $\lambda_1 = 0$ ,  $\lambda_2 = 0$ ,  $\lambda_3 = 1$ , usw.

### Infobox Richtungsvektoren alternativ

Sie lassen sich auch bestimmen durch

- das Vektorprodukt der Normalenvektoren bei zwei Ebenen in  $\mathbb{R}^3$
- aus Lösung des LGS mit den freien Variablen  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ , usw.

### Beispiel 8.18 Aufpunkt

96265K

$$\left| \begin{array}{rcl} 2x & -z & = 3 \\ & 4y + z & = 0 \end{array} \right|$$

Bestimmen Sie die freien Variablen und die Pivot-Variablen. Bestimmen Sie dann einen Aufpunkt der Schnittmenge.

**Lösung:**

$x$  und  $y$  sind Pivot-Variablen, also ist  $z$  eine freie Variable.

In Anlehnung an vorher (Punkte generieren) versuchen wir beim Aufpunkt möglichst viele Einträge gleich 0 zu setzen. Die strategisch schnellste Variante ist geht so:

Man setzt alle freien Variablen 0, hier also  $z = 0$ . Dann setzt man in das verbleibende Gleichungssystem von unten nach oben ein:

$$\left| \begin{array}{rcl} 2x & -0 & = 3 \\ & 4y + 0 & = 0 \end{array} \right|$$

Also ist  $y = 0$  und  $x = 3/2$ . Der Aufpunkt ist

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{3}{2} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

### Beispiel 8.19 Richtungsvektoren: 3 Methoden

RQTXLH

$$\left| \begin{array}{rcl} 2x & -z & = 3 \\ & 4y + z & = 0 \end{array} \right|$$

Bestimmen Sie die freien Variablen und die Pivot-Variablen. Bestimmen Sie dann die Richtungsvektoren der Schnittmenge.

**Lösung:**

$x$  und  $y$  sind Pivot-Variablen, also ist  $z$  eine freie Variable.

Methoden:

- Wir wissen, dass der Richtungsvektor senkrecht auf den Normalenvektoren steht. Wir berechnen ihn durch das Vektorprodukt der Normalenvektoren:

$$\vec{l}_h = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 4 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 \\ -2 \\ 8 \end{pmatrix}$$

Die ganze Lösungsmenge ist also (mit Beispiel 8.18 und der Streckung des Richtungsvektors)

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{3}{2} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \lambda_1 \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \\ 4 \end{pmatrix}$$

- Richtungsvektoren aus Lösung des LGS mit den freien Variablen: Dafür

setzen wir  $z = \lambda_1 \in \mathbb{R}$ . Jetzt setzen wir von unten nach oben ein:

$$\begin{vmatrix} 2x & -z & = & 3 \\ 4y & +\lambda_1 & = & 0 \end{vmatrix} \rightarrow y = -\frac{\lambda_1}{4}$$

und also in der ersten Zeile

$$2x - \lambda_1 = 3 \rightarrow x = \frac{3 + \lambda_1}{2}$$

Die Lösung ist also

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{3+\lambda_1}{2} \\ -\frac{\lambda_1}{4} \\ \lambda_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{3}{2} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \lambda_1 \cdot \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{4} \\ 1 \end{pmatrix}$$

- Richtungsvektoren aus Lösung des homogenen LGS mit den freien Variablen:

Wir benennen die Komponenten des Richtungsvektors wie folgt:

$$\vec{l}_h = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

Von vorher wissen wir, dass er senkrecht auf den Normalenvektoren stehen muss. Also

$$\begin{vmatrix} \vec{n}'_1 \odot \vec{l}_h & = & 0 \\ \vec{n}'_2 \odot \vec{l}_h & = & 0 \end{vmatrix} \text{ oder eingesetzt } \begin{vmatrix} 2x & -z & = & 0 \\ 4y & +z & = & 0 \end{vmatrix}$$

Es entsteht das homogene LGS. Dieses löst man wie folgt. Wir wissen, dass man den Richtungsvektor strecken kann, also wählen wir  $\lambda_1 = 1$ . Es bleibt

$$\begin{vmatrix} 2x & -1 & = & 0 \\ 4y & +1 & = & 0 \end{vmatrix}$$

Wir setzen ein, erhalten zunächst  $y = -1/4$  und aus der ersten Zeile  $x = 1/2$ . Der Richtungsvektor ist also

$$\vec{l}_h = \begin{pmatrix} 1/2 \\ -1/4 \\ 1 \end{pmatrix}$$

### Beispiel 8.20 Richtungsvektoren einer Ebene bestimmen

Gibt die Ebene in Parameterform an. Bestimme dazu die Richtungsvektoren der Ebene

$$2x + y - z = 3$$

**Lösung:**

$x$  ist eine Pivot-Variable,  $y$  und  $z$  sind freie Variablen.

Richtungsvektoren  $\vec{l}_h = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$  stehen senkrecht auf dem Normalenvektor:

$$\vec{n}' \odot \vec{l}_h = 0 \text{ oder eingesetzt } 2x + 1 - z = 0$$

a) Um dies zu lösen, setzen wir  $y = 1$ ,  $z = 0$  und lösen das homogene LGS

$$2x + 1 - 0 = 0 \Rightarrow x = -\frac{1}{2}$$

Der erste Richtungsvektor ist also  $\vec{l}_{h,1} = \begin{pmatrix} -1/2 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$

b) Wir setzen  $y = 0$  und  $z = 1$  und lösen das homogene LGS

$$2x + 0 - 1 = 0 \Rightarrow x = \frac{1}{2}$$

Der zweite Richtungsvektor ist also  $\vec{l}_{h,2} = \begin{pmatrix} 1/2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$

Wir skalieren die Richtungsvektoren und schreiben die Parameterform als  $(\lambda, \nu \in \mathbb{R})$

$$\begin{pmatrix} 3/2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix} + \nu \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix}$$

### Beispiel 8.21 Richtungsvektoren

QWQK7P

Bestimmen Sie die freien Variablen und die Pivot-Variablen. Bestimmen Sie dann die Richtungsvektoren der Schnittmenge.

a)

$$\begin{vmatrix} x & +8y & -4z & = & 20 \\ 0 & +15y & -6z & = & 33 \end{vmatrix}$$

e)

$$\begin{vmatrix} 4x & +18y & -12z & = & 0 \\ 2x & +9y & -6z & = & 0 \end{vmatrix}$$

b)

$$\begin{vmatrix} 2x & +y & -2z & = & 9 \\ 0 & +4y & -24z & = & 10 \end{vmatrix}$$

f)

$$\begin{vmatrix} 5x & -2y & +z & +3v & +4w & = & -13 \\ & +3y & & & +w & = & 6 \end{vmatrix}$$

c)

$$\begin{vmatrix} 2x & +0 & +8z & = & -30 \\ 0 & +9y & +8z & = & 40 \\ 0 & +0 & +34z & = & -136 \end{vmatrix}$$

g)

d)

$$\begin{vmatrix} 7x & +3y & -z & = & 2 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} -7x & -3y & +z & -10v & -w & = & 12 \\ & & -4z & -7v & +w & = & 41 \end{vmatrix}$$



**Lösung:**

Es werden die verschiedenen Verfahren vorgestellt. Mit wenigen Einschränkungen lassen sich alle Verfahren auf alle Probleme anwenden.

a) Wir lesen die Normalenvektoren aus

$$\vec{n}' = \begin{bmatrix} 1 \\ 8 \\ -4 \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad \vec{m}' = \begin{bmatrix} 0 \\ 15 \\ -16 \end{bmatrix}$$

Der Richtungsvektor steht senkrecht auf beiden Normalenvektoren also

$$\vec{v} = \vec{n}' \times \vec{m}' = \begin{bmatrix} 12 \\ 6 \\ 15 \end{bmatrix}$$

Die Lösungsmenge ist also

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \vec{A} + \lambda \cdot \begin{bmatrix} 12 \\ 6 \\ 15 \end{bmatrix}$$

mit  $\lambda \in \mathbb{R}$  und dem hier vernachlässigten Aufpunkt  $\vec{A}$ .

Alternativ:

Wir stellen fest, dass  $x$  und  $y$  Pivot-Variablen sind und  $z$  eine Freie Variable. Für den ersten Richtungsvektor wählen wir  $z = 1$  (falls es weitere freie Variablen gäbe, würden wir die gleich Null setzen). Wir lösen das verbleibende **homogene** LGS:

$$\begin{cases} L_1: & x + 8y - 4 = 0 \\ L_2: & 0 + 15y - 6 = 0 \end{cases}$$

aus  $L_2$  folgt  $y = 6/15 = 2/5$  und aus  $L_1$  folgt  $x = 4 - 8 \cdot 2/5 = 4/5$ , also

$$\vec{v}'' = \begin{bmatrix} 4/5 \\ 2/5 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{oder} \quad \vec{v}'' = \begin{bmatrix} 4 \\ 2 \\ 5 \end{bmatrix}$$

b)

$$\begin{cases} L_1: & 2x + y - 2z = 9 \\ L_2: & 0 + 4y - 24z = 10 \end{cases}$$

Hier ist nur  $z$  eine freie Variable. Wir setzen  $z = \lambda$  und setzen von unten nach oben ein.  $L_2$ :

$$y = \frac{10 + 24\lambda}{4} = 2.5 + 6\lambda$$

und damit  $L_1$ :

$$x = \frac{9 + 2\lambda - (2.5 + 6\lambda)}{2} = 3.25 - 2\lambda$$

Wir können die Lösung in zwei Formen schreiben

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.25 - 2\lambda \\ 2.5 + 6\lambda \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.25 \\ 2.5 \\ 1 \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} -2 \\ 6 \\ 1 \end{bmatrix}$$

c) Es gibt keine freie Variable, also gibt es keinen Richtungsvektor der Schnittmenge.

d)

$$|7x + 3y - z = 2|$$

Die Pivot-Variable ist  $x$  und die freien Variablen  $y$  und  $z$ . Wir wählen also zuerst ( $y = 1, z = 0$ ) und lösen das homogene LGS

$$|7x + 3 = 0| \Rightarrow x = -\frac{3}{7}$$

Nun wählen wir  $y = 0, z = 1$  und lösen das homogene LGS

$$|7x - 1 = 0| \Rightarrow x = \frac{1}{7}$$

Die Richtungsvektoren sind

$$\vec{u} = \begin{bmatrix} -3/7 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ und } \vec{v} = \begin{bmatrix} 1/7 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

e) Die Richtungsvektoren sind

$$\vec{u} = \begin{bmatrix} 3 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \text{ und } \vec{v} = \begin{bmatrix} -9 \\ 2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

f) Die Pivot-Variablen sind  $x$  und  $y$ , die freien Variablen sind  $z, v$  und  $w$ .

- Wir wählen also zuerst ( $z = 1, v = 0, w = 0$ ) und lösen das homogene LGS

$$\left| \begin{array}{ccc|c} 5x & -2y & +1 & = 0 \\ & 3y & & = 0 \end{array} \right| \Rightarrow y = 0 \Rightarrow x = -\frac{1}{5}$$

- Wir wählen ( $z = 0, v = 1, w = 0$ ) und lösen das homogene LGS

$$\left| \begin{array}{ccc|c} 5x & -2y & +3 & = 0 \\ & +3y & & = 0 \end{array} \right| \Rightarrow y = 0 \Rightarrow x = -\frac{3}{5}$$

- Wir wählen ( $z = 0, v = 0, w = 1$ ) und lösen das homogene LGS

$$\left| \begin{array}{ccc|c} 5x & -2y & +4 & = 0 \\ & +3y & +1 & = 0 \end{array} \right| \Rightarrow y = -\frac{1}{3} \Rightarrow x = \frac{-4 - 2 \cdot 1/3}{5} = \frac{-12 - 2}{15} = -\frac{14}{15}$$

Die Richtungsvektoren sind in dieser Reihenfolge also

$$\vec{u} = \begin{bmatrix} -1/5 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \vec{v} = \begin{bmatrix} -3/5 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ und } \vec{w} = \begin{bmatrix} -14/15 \\ -1/3 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

g) Die Pivot-Variablen sind  $x$  und  $z$ , die freien Variablen sind  $y$ ,  $v$  und  $w$ .

- Wir wählen also zuerst ( $y = 1, v = 0, w = 0$ ) und lösen das homogene LGS

$$\begin{vmatrix} -7x & -3 & +z & = & 0 \\ & & -4z & = & 0 \end{vmatrix} \Rightarrow z = 0 \Rightarrow x = -\frac{3}{7}$$

- Wir wählen ( $y = 0, v = 1, w = 0$ ) und lösen das homogene LGS

$$\begin{vmatrix} -7x & +z & -10 & = & 0 \\ & -4z & -7 & = & 0 \end{vmatrix} \Rightarrow z = -\frac{7}{4} \Rightarrow x = -\frac{10 + 7/4}{-7} = -\frac{47}{28}$$

- Wir wählen ( $y = 0, v = 0, w = 1$ ) und lösen das homogene LGS

$$\begin{vmatrix} -7x & +z & -1 & = & 0 \\ & -4z & +1 & = & 0 \end{vmatrix} \Rightarrow z = \frac{1}{4} \Rightarrow x = \frac{1 - 1/4}{-7} = -\frac{3}{28}$$

Die Richtungsvektoren sind in dieser Reihenfolge also

$$\vec{u} = \begin{bmatrix} -3/7 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \vec{v} = \begin{bmatrix} -47/28 \\ 0 \\ -7/4 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ und } \vec{w} = \begin{bmatrix} -3/28 \\ 0 \\ 1/4 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

### Beispiel 8.22 Nullraum

QWDLIG

Falls es mehrere Richtungsvektoren in der Lösung eines LGS gibt (z.B.  $\vec{u}$  und  $\vec{v}$ ) sind auch Summen und Vielfache der Richtungsvektoren wieder Richtungsvektoren, z.B.

$$3 \cdot \vec{u} \text{ und } 3 \cdot \vec{u} - 5\vec{v}$$

oder allgemein

$$\lambda_1 \cdot \vec{u} + \lambda_2 \vec{v} + \dots$$

Wir nennen diesen Raum **Nullraum** der Koeffizientenmatrix.

Bestimmen Sie den Nullraum der Koeffizientenmatrizen in den folgenden LGSs.

a)

$$|5x + 6y + z = 0|$$

b)

$$\begin{vmatrix} 7x & +3y & -z & = & 19 \\ & 4y & +8z & = & -12 \end{vmatrix}$$

c)

$$\begin{vmatrix} x & +6y & +5z & = & 0 \\ & 21y & +25z & = & 0 \end{vmatrix}$$

d)

$$|-3x \quad -10y \quad -z \quad = \quad 0|$$

e)

$$\begin{vmatrix} 5x & -2y & +z & +3v & +4w & = & -13 \\ & 3y & & & +w & = & 6 \end{vmatrix}$$

f)

$$\begin{vmatrix} -7x & -3y & +z & -10v & -w & = & 12 \\ & & -4z & -7v & +w & = & 41 \end{vmatrix}$$

**Lösung:**

Die Parameter  $\lambda, \lambda_1, \lambda_2, \dots \in \mathbb{R}$  sind frei wählbar.

a)

$$\lambda_1 \cdot \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 5 \end{bmatrix} + \lambda_2 \cdot \begin{bmatrix} -6 \\ 5 \\ 0 \end{bmatrix}$$

b) Wir suchen alle Vektoren, die multipliziert mit der Koeffizientenmatrix

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 7 & 3 & -1 \\ 0 & 4 & 8 \end{pmatrix}$$

den Nullvektor ergeben. Wir stellen fest, dass die Variablen  $x$  und  $y$  Pivot-Variablen sind und also  $z$  eine freie Variable. Mit *einer* freien Variable, können wir *einen* Vektor im Nullraum bestimmen (Richtungsvektor).

Dafür wählen wir  $z = 1$  und setzen von unten nach oben in das homogene LGS ein

$$\begin{array}{rclcl} 7x & +3 \cdot (-2) & -1 & = & 0 & \Rightarrow & x = 1 \\ & 4y & +8 \cdot 1 & = & 0 & \Rightarrow & y = -2 \end{array}$$

Als ist der Nullraum

$$\lambda \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

c)

$$\lambda \cdot \begin{bmatrix} 45 \\ -25 \\ 21 \end{bmatrix}$$

d)

$$\lambda_1 \cdot \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 3 \end{bmatrix} + \lambda_2 \cdot \begin{bmatrix} -10 \\ 3 \\ 0 \end{bmatrix}$$

e)

$$\lambda_1 \cdot \begin{bmatrix} -14 \\ -5 \\ 0 \\ 0 \\ 15 \end{bmatrix} + \lambda_2 \cdot \begin{bmatrix} -3 \\ 0 \\ 0 \\ 5 \\ 0 \end{bmatrix} + \lambda_3 \cdot \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

f)

$$\lambda_1 \cdot \begin{bmatrix} -3 \\ 0 \\ 7 \\ 0 \\ 28 \end{bmatrix} + \lambda_2 \cdot \begin{bmatrix} -47 \\ 0 \\ -49 \\ 28 \\ 0 \end{bmatrix} + \lambda_3 \cdot \begin{bmatrix} -3 \\ 7 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

### Beispiel 8.23 Inhomogene LGS

970730

Bestimmen Sie die Lösungsmengen. Überprüfen Sie das Resultat mit Matlab (Befehle `rref` und `null`).

a)

$$\left| \begin{array}{l} E_1: 5x + 2y - 20z = 8 \\ E_2: x - 4z = 2 \\ E_3: 5x + 2y - 20z = 9 \end{array} \right|$$

c)

$$\left| \begin{array}{l} E_1: 2x + 3y = 15 \\ E_2: 2x + 3y + z = 11 \\ E_3: x + 3y = 12 \end{array} \right|$$

b)

$$\left| \begin{array}{l} E_1: 2x + 6y - 12z = 12 \\ E_2: 2y - 4z = 2 \\ E_3: 2x + 6y - 12z = 12 \end{array} \right|$$

**Lösung:**

a) Es fällt auf, dass die erste und die dritte Zeile einen Widerspruch ergeben:

$$\left| E_1 - E_3: 0 + 0 + 0 = -1 \right|$$

Also hat das Gleichungssystem keine Lösung.

b) Das Gleichungssystem lautet in Zeilenstufenform

$$\left| \begin{array}{l} x = 3 \\ y - 2z = 1 \\ 0 = 0 \end{array} \right|$$

Es gibt einen freien Parameter  $z = \lambda$  und die Lösungen sind

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}$$

c) Das Gleichungssystem lautet in Zeilenstufenform

$$\left| \begin{array}{ccc} x & & = 3 \\ & y & = 3 \\ & & z = -4 \end{array} \right|$$

Dies sind die Koordinaten des Schnittpunktes der drei Ebenen.

### Beispiel 8.24 Freie Variablen und Pivot-Variablen

863440

Bestimmen Sie freie Variablen und Pivot-Variablen und die Lösung des LGS. Überprüfen Sie Ihr Resultat mit Matlab (Befehle `null` und `rref`).

a)

$$\left| \begin{array}{cccccc} E_1: & & 2z & & & = 4 \\ E_2: & x & +y & -4z & +u & = 2 \\ E_3: & 3x & +3y & -12z & +3u & +v = 7 \end{array} \right|$$

b)

$$\left| \begin{array}{cccccc} E_1: & 3x & +3y & -8z & +6u & = 14 \\ E_2: & x & +y & -4z & +2u & +v = 3 \\ E_3: & 5x & +5y & -20z & +10u & +3v = 13 \end{array} \right|$$

**Lösung:**

a) Wir stellen um und eliminieren

$$\left[ \begin{array}{cccccc|c} E'_1 = E_2: & 1 & 1 & -4 & 1 & 0 & 2 \\ E'_2 = E_3: & 3 & 3 & -12 & 3 & 1 & 7 \\ E'_3 = E_1: & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 4 \end{array} \right]$$

$$\left[ \begin{array}{cccccc|c} E''_1 = E'_1: & & 1 & 1 & -4 & 1 & 0 & 2 \\ E''_2 = E'_2 - 3E'_1: & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ E''_3 = E'_3: & & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 4 \end{array} \right]$$

$$\left[ \begin{array}{cccccc|c} & x & y & z & u & v & \\ \hline E'''_1 = E''_1: & 1 & 1 & -4 & 1 & 0 & 2 \\ E'''_2 = E''_3: & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 4 \\ E'''_3 = E''_2: & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{array} \right]$$

$x$ ,  $z$  und  $v$  sind Pivot-Variablen und  $y$  und  $u$  sind freie Variablen. Wir berechnen *eine* partikuläre Lösung. Dafür setzen wir alle freien Variablen gleich 0

( $y = u = 0$ ) und setzen von unten nach oben ein:

$$\left[ \begin{array}{cccc|c} x & y & z & u & v \\ E_1''' : & 1 & 0 & -4 & 0 & 2 \\ E_2''' : & 0 & 0 & 2 & 0 & 4 \\ E_3''' : & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

$$\Rightarrow v = 1 \Rightarrow z = 2 \Rightarrow x = 2 + 4 \cdot 2 = 10$$

Die partikuläre Lösung ist also

$$\vec{l}_p = \begin{pmatrix} 10 \\ 0 \\ 2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Für die homogenen Lösungen setzen wir nacheinander einen freien Parameter gleich 1 und die anderen gleich 0 und setzen in die homogene Gleichung ein.

Für  $y = 1$  und  $u = 0$  ergibt sich:

$$\left[ \begin{array}{cccc|c} x & y & z & u & v \\ E_1''' : & 1 & 1 & -4 & 0 & 0 \\ E_2''' : & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ E_3''' : & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

$$\Rightarrow v = 0 \Rightarrow z = 0 \Rightarrow x = -1$$

Eine homogene Lösung ist also

$$\vec{l}_{h,1} = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Für  $y = 0$  und  $u = 1$  ergibt sich:

$$\left[ \begin{array}{cccc|c} x & y & z & u & v \\ E_1''' = E_1'' : & 1 & 0 & -4 & 1 & 0 \\ E_2''' = E_3'' : & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ E_3''' = E_2'' : & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

$$\Rightarrow v = 0 \Rightarrow z = 0 \Rightarrow x = -1$$

Die zweite homogene Lösung ist also

$$\vec{l}_{h,2} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Die allgemeine Lösung lautet schliesslich

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} 10 \\ 0 \\ 2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \nu \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

b) Wir stellen um und eliminieren

$$\left[ \begin{array}{l} E'_1 = E_2 : \\ E'_2 = E_1 : \\ E'_3 = E_3 : \end{array} \begin{array}{cccc|c} 1 & 1 & -4 & 2 & 1 & 3 \\ 3 & 3 & -8 & 6 & 0 & 14 \\ 5 & 5 & -20 & 10 & 3 & 13 \end{array} \right]$$
$$\left[ \begin{array}{l} E''_1 = E'_1 : \\ E''_2 = E'_2 - 3E'_1 : \\ E''_3 = E'_3 - 5E'_1 : \end{array} \begin{array}{cccc|c} 1 & 1 & -4 & 2 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 4 & 0 & -3 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & -2 \end{array} \right]$$

$x$ ,  $z$  und  $v$  sind Pivot-Variablen und  $y$  und  $u$  sind freie Variablen. Wir berechnen *eine* partikuläre Lösung. Dafür setzen wir alle freien Variablen gleich 0 ( $y = u = 0$ ) und setzen von unten nach oben ein:

$$\left[ \begin{array}{cccc|c} x & y & z & u & v & \\ \hline E''_1 : & 1 & 0 & -4 & 0 & 1 & 3 \\ E''_2 : & 0 & 0 & 4 & 0 & -3 & 5 \\ E''_3 : & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & -2 \end{array} \right]$$

$$\Rightarrow v = 1 \Rightarrow z = 5 + 3 \cdot 14 = 2 \Rightarrow x = 3 + 4 \cdot 2 - 1 = 10$$

Die partikuläre Lösung ist also

$$\vec{l}_p = \begin{pmatrix} 10 \\ 0 \\ 2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Für die homogenen Lösungen setzen wir nacheinander einen freien Parameter gleich 1 und die anderen gleich 0 und setzen in die homogene Gleichung



ein.

Für  $y = 1$  und  $u = 0$  ergibt sich:

$$\left[ \begin{array}{cccc|c} x & y & z & u & v \\ E_1'' : & 1 & 1 & -4 & 0 & 1 & 0 \\ E_2'' : & 0 & 0 & 4 & 0 & -3 & 0 \\ E_3'' : & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 \end{array} \right]$$

$$\Rightarrow v = 0 \Rightarrow z = 0 \Rightarrow x = -1$$

Eine homogene Lösung ist also

$$\vec{l}_{h,1} = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Für  $y = 0$  und  $u = 1$  ergibt sich:

$$\left[ \begin{array}{cccc|c} x & y & z & u & v \\ E_1'' : & 1 & 0 & -4 & 2 & 1 & 0 \\ E_2'' : & 0 & 0 & 4 & 0 & -3 & 0 \\ E_3'' : & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 \end{array} \right]$$

$$\Rightarrow v = 0 \Rightarrow z = 0 \Rightarrow x = -2$$

Die zweite homogene Lösung ist also

$$\vec{l}_{h,2} = \begin{pmatrix} -2 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Die allgemeine Lösung lautet schliesslich

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} 10 \\ 0 \\ 2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \nu \begin{pmatrix} -2 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

## 8.5 Geometrische Interpretation der Lösung

### Beispiel 8.25 Struktur der Lösung eines LGS

181322

Gegeben sind verschiedene Lösungen der linearen Gleichungssysteme. Bestimmen Sie die Richtungsvektoren der homogenen Lösung.

1. Setzen Sie dafür in das LGS ein.

2. Überprüfen Sie ihr Resultat mit Matlab indem Sie die Lösung mit der Koeffizienten-Matrix multiplizieren.

a)

$$\left| \begin{array}{l} E_1 : \quad -x \quad +2y \quad -3z \quad = \quad 0 \\ E_2 : \quad -2x \quad +5y \quad -6z \quad = \quad 0 \\ E_3 : \quad \quad x \quad +3y \quad +3z \quad = \quad 0 \end{array} \right|$$

und

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} 6 \\ 0 \\ -2 \end{pmatrix}, \vec{v} = \begin{pmatrix} -15 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix}, \vec{w} = \begin{pmatrix} -9 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix}.$$

b)

$$\left| \begin{array}{l} E_1 : \quad 9x \quad -6y \quad -5z \quad = \quad -16 \\ E_2 : \quad 6x \quad -4y \quad 8z \quad = \quad 12 \\ E_3 : \quad -12x \quad +8y \quad +4z \quad = \quad 16 \end{array} \right|$$

und

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} -14/3 \\ -6 \\ 2 \end{pmatrix}, \vec{v} = \begin{pmatrix} 28/3 \\ 15 \\ 2 \end{pmatrix}, \vec{w} = \begin{pmatrix} 16/3 \\ 9 \\ 2 \end{pmatrix}.$$

**Lösung:**

a) Der Richtungsvektor der Lösung ist

$$\vec{a} = \vec{u} - \vec{v} = \begin{pmatrix} 21 \\ 0 \\ -7 \end{pmatrix}.$$

Eingesetzt in das LGS ergibt sich

$$\left| \begin{array}{l} E_1 : \quad -21 \quad +0 \quad +21 \quad = \quad 0 \\ E_2 : \quad -42 \quad +0 \quad +42 \quad = \quad 0 \\ E_3 : \quad 21 \quad +0 \quad -21 \quad = \quad 0 \end{array} \right|$$

D.h.  $\vec{a}$  ist eine homogene Lösung des LGS.

Übrigens, das Gleichungssystem in Zeilenstufenform lautet

$$\left| \begin{array}{l} x \quad +3z \quad = \quad 0 \\ \quad y \quad \quad \quad = \quad 0 \\ \quad \quad 0 \quad = \quad 0 \end{array} \right|$$

b) Der Richtungsvektor der Lösung ist

$$\vec{a} = \vec{u} - \vec{v} = \begin{pmatrix} -14 \\ -21 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Eingesetzt in das LGS ergibt sich

$$\left| \begin{array}{l} E_1: \quad 9 \cdot (-14) \quad -6 \cdot (-21) \quad +0 = 0 \\ E_2: \quad 6 \cdot (-14) \quad -4 \cdot (-21) \quad +0 = 0 \\ E_3: \quad -12 \cdot (-14) \quad +8 \cdot (-21) \quad +0 = 0 \end{array} \right|$$

Übrigens, das Gleichungssystem in Zeilenstufenform lautet

$$\left| \begin{array}{l} 3x \quad -2y \quad = \quad -2 \\ \quad \quad \quad z \quad = \quad 2 \\ \quad \quad \quad 0 \quad = \quad 0 \end{array} \right|$$

### Beispiel 8.26 Homogene lineare Gleichungssysteme

801980

Bestimmen Sie die Lösungsmenge der homogenen linearen Gleichungssysteme. Überprüfen Sie ihr Resultat mit Matlab (Befehl `null`).

a)

$$\left| \begin{array}{l} E_1: \quad 3x \quad +3y \quad -12z = 0 \\ E_2: \quad x \quad \quad \quad -4z = 0 \\ E_3: \quad 5x \quad +2y \quad -20z = 0 \end{array} \right|$$

c)

$$\left| \begin{array}{l} E_1: \quad x \quad +3y \quad +z = 0 \\ E_2: \quad \quad y \quad +z = 0 \\ E_3: \quad \quad 2y \quad +2z = 0 \end{array} \right|$$

b)

$$\left| \begin{array}{l} E_1: \quad 3x \quad +3y \quad -5z = 0 \\ E_2: \quad \quad y \quad -3z = 0 \\ E_3: \quad \quad 2y \quad -5z = 0 \end{array} \right|$$

**Lösung:**

a) Wir stellen um und eliminieren

$$\left| \begin{array}{l} E'_1 = E_2: \quad 1 \quad 0 \quad -4 \\ E'_2 = E_3: \quad 5 \quad 2 \quad -20 \\ E'_3 = E_1: \quad 3 \quad 3 \quad -12 \end{array} \right|$$

$$\left| \begin{array}{l} E''_1 = E'_1: \quad \quad \quad 1 \quad 0 \quad -4 \\ E''_2 = E'_2 - 5E'_1: \quad 0 \quad 2 \quad 0 \\ E''_3 = E'_3 - 3E'_1: \quad 0 \quad 3 \quad 0 \end{array} \right|$$

$$\left| \begin{array}{l} E'''_1 = E''_1: \quad \quad \quad 1 \quad 0 \quad -4 \\ E'''_2 = E''_2: \quad \quad \quad 0 \quad 2 \quad 0 \\ E'''_3 = E''_3 - 3/2E''_2: \quad 0 \quad 0 \quad 0 \end{array} \right|$$

Wir stellen fest, dass  $z$  eine freie Variable ist. Die partikuläre Lösung ist (wie immer für homogene Probleme)  $\vec{l}_p = \vec{0}$ .

Für die homogenen Lösungen setzen wir nacheinander einen freien Parameter gleich 1 und die anderen gleich 0 und setzen in die homogene Gleichung

ein.

Für  $z = 1$  ergibt sich:

$$\left| \begin{array}{ccc|c} & x & y & z \\ E_1''' : & 1 & 0 & -4 \\ E_2''' : & 0 & 2 & 0 \\ E_3''' : & 0 & 0 & 0 \end{array} \right|$$
$$\Rightarrow y = 0 \Rightarrow x = 4$$

Eine homogene Lösung ist also

$$\vec{l}_{h,1} = \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Die allgemeine Lösung lautet schliesslich

$$\vec{u} = \lambda \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

b) Wir stellen um und eliminieren

$$\left| \begin{array}{ccc|c} E_1' = E_1 : & 1 & 3 & -5 \\ E_2' = E_2 : & 0 & 1 & -3 \\ E_3' = E_3 - 2E_2 : & 0 & 0 & 1 \end{array} \right|$$

Ausser der trivialen Lösung  $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$  gibt es keine weiteren Lösungen.

c) Wir stellen um und eliminieren

$$\left| \begin{array}{ccc|c} E_1' = E_1 : & 1 & 3 & 1 \\ E_2' = E_2 : & 0 & 1 & 1 \\ E_3' = E_3 - 2E_2 : & 0 & 0 & 0 \end{array} \right|$$

Wir stellen fest, dass  $z$  eine freie Variable ist. Die partikuläre Lösung ist (wie immer für homogene Probleme)  $\vec{l}_p = \vec{0}$ .

Für die homogenen Lösungen setzen wir nacheinander einen freien Parameter gleich 1 und die anderen gleich 0 und setzen in die homogene Gleichung ein.

Für  $z = 1$  ergibt sich:

$$\left| \begin{array}{ccc|c} & x & y & z \\ E_1''' : & 1 & 3 & 1 \\ E_2''' : & 0 & 1 & 1 \\ E_3''' : & 0 & 0 & 0 \end{array} \right|$$
$$\Rightarrow y = -1 \Rightarrow x = 2$$

Eine homogene Lösung ist also

$$\vec{l}_{h,1} = \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Die allgemeine Lösung lautet schliesslich

$$\vec{u} = \lambda \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

### Beispiel 8.27 Schnittgerade von Ebenen

042736

Die Ebenen  $E_1$  und  $E_2$  (und  $E_3$ ) schneiden sich in einer Geraden  $g$ .

- Bestimme eine Parameterdarstellung von  $g$
- Überprüfe das Resultat mit Matlab (Befehle `null` und `rref`).

a)

$$\left| \begin{array}{cccc|c} E_1 : & x_1 & -x_2 & +2x_3 - 1 & = & 0 \\ E_2 : & 6x_1 & +x_2 & -x_3 & = & 5 \end{array} \right|$$

b)

$$\left| \begin{array}{cccc|c} E_1 : & 4x & +4y & -16z & = & 4 \\ E_2 : & x & & -4z & = & 2 \\ E_3 : & 5x & +2y & -20z & = & 8 \end{array} \right|$$

c)

$$\left| \begin{array}{cccc|c} E_1 : & 3x_1 & +5x_2 & -x_3 & = & 7 \\ E_2 : & -x_1 & +5x_2 & -6x_3 & = & 0 \end{array} \right|$$

**Lösung:**

a) Wir stellen um und eliminieren

$$\left[ \begin{array}{ccc|c} E'_1 = E_1 : & 1 & -1 & 2 & 1 \\ E'_2 = E_2 - 6E_1 : & 0 & 7 & -13 & -1 \end{array} \right]$$

$x$  und  $y$  sind Pivot-Variablen und  $z$  ist eine freie Variable. Wir berechnen *eine* partikuläre Lösung. Dafür setzen wir alle freien Variablen gleich 0 ( $z = 0$ ) und setzen von unten nach oben ein:

$$\left[ \begin{array}{ccc|c} & x & y & z \\ E'_1 : & 1 & -1 & 0 & 1 \\ E'_2 : & 0 & 7 & 0 & -1 \end{array} \right]$$

$$\Rightarrow y = -1/7 \Rightarrow x = 1 - 1/7 = 6/7$$

Die partikuläre Lösung ist also

$$\vec{l}_p = \frac{1}{7} \begin{pmatrix} 6 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Für die homogenen Lösungen setzen wir nacheinander einen freien Parameter gleich 1 und die anderen gleich 0 und setzen in die homogene Gleichung ein.

Für  $z = 1$  ergibt sich:

$$\left[ \begin{array}{ccc|c} x & y & z & \\ \hline E'_1 & : & 1 & -1 & 2 & | & 0 \\ E'_2 & : & 0 & 7 & -13 & | & 0 \end{array} \right]$$

$$\Rightarrow y = \frac{13}{7} \Rightarrow x = \frac{13}{7} - 2 = -\frac{1}{7}$$

Eine homogene Lösung ist also (skalieren):

$$\vec{l}_{h,1} = \begin{pmatrix} -1 \\ 13 \\ 7 \end{pmatrix}.$$

Die allgemeine Lösung (Gleichung der Schnittgeraden) lautet schliesslich

$$\vec{u} = \frac{1}{7} \begin{pmatrix} 6 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} -1 \\ 13 \\ 7 \end{pmatrix}$$

b) Wir stellen um und eliminieren

$$\left[ \begin{array}{ccc|c} E'_1 = E_2 & : & 1 & 0 & -4 & | & 2 \\ E'_2 = E_3 & : & 5 & 2 & -20 & | & 8 \\ E'_3 = E_1 & : & 4 & 4 & -16 & | & 4 \end{array} \right]$$

$$\left[ \begin{array}{ccc|c} E''_1 = E'_1 & : & 1 & 0 & -4 & | & 2 \\ E''_2 = E'_2 - 5E'_1 & : & 0 & 2 & 0 & | & -2 \\ E''_3 = E'_3 - 4E'_1 & : & 0 & 4 & 0 & | & -4 \end{array} \right]$$

$$\left[ \begin{array}{ccc|c} x & y & z & \\ \hline E'''_1 = E''_1 & : & 1 & 0 & -4 & | & 2 \\ E'''_2 = E''_2/2 & : & 0 & 1 & 0 & | & -1 \\ E'''_3 = E''_3 - 2E''_2 & : & 0 & 0 & 0 & | & 0 \end{array} \right]$$

$x$  und  $y$  sind Pivot-Variablen und  $z$  ist eine freie Variable. Wir berechnen *eine* partikuläre Lösung. Dafür setzen wir alle freien Variablen gleich 0 ( $z = 0$ ) und setzen von unten nach oben ein:

$$\left[ \begin{array}{ccc|c} x & y & z & \\ \hline E'''_1 & : & 1 & 0 & 0 & | & 2 \\ E'''_2 & : & 0 & 1 & 0 & | & -1 \\ E'''_3 & : & 0 & 0 & 0 & | & 0 \end{array} \right]$$

$$\Rightarrow y = -1 \Rightarrow x = 2$$

Die partikuläre Lösung ist also

$$\vec{l}_p = \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Für die homogenen Lösungen setzen wir nacheinander einen freien Parameter gleich 1 und die anderen gleich 0 und setzen in die homogene Gleichung ein.

Für  $z = 1$  ergibt sich:

$$\left[ \begin{array}{ccc|c} x & y & z & \\ \hline E_1''' : & 1 & 0 & -4 & 0 \\ E_2''' : & 0 & 1 & 0 & 0 \\ E_3''' : & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right]$$

$$\Rightarrow y = 0 \Rightarrow x = 4$$

Eine homogene Lösung ist also

$$\vec{l}_{h,1} = \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Die allgemeine Lösung (Gleichung der Schnittgeraden) lautet schliesslich

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

c) Wir stellen um und eliminieren

$$\left[ \begin{array}{ccc|c} E_1' = -E_2 : & 1 & -5 & 6 & 0 \\ E_2' = E_1 + 3E_2 : & 0 & 20 & -19 & 7 \end{array} \right]$$

$x$  und  $y$  sind Pivot-Variablen und  $z$  ist eine freie Variable. Wir berechnen *eine* partikuläre Lösung. Dafür setzen wir alle freien Variablen gleich 0 ( $z = 0$ ) und setzen von unten nach oben ein:

$$\left[ \begin{array}{ccc|c} x & y & z & \\ \hline E_1' : & 1 & -5 & 0 & 0 \\ E_2' : & 0 & 20 & 0 & 7 \end{array} \right]$$

$$\Rightarrow y = \frac{7}{20} = \frac{7}{20} \Rightarrow x = 5 \cdot \frac{7}{20} = \frac{35}{20}$$

Die partikuläre Lösung ist also

$$\vec{l}_p = \frac{1}{20} \begin{pmatrix} 35 \\ 7 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Für die homogenen Lösungen setzen wir nacheinander einen freien Parameter gleich 1 und die anderen gleich 0 und setzen in die homogene Gleichung ein.

Für  $z = 1$  ergibt sich:

$$\left[ \begin{array}{ccc|c} x & y & z & \\ \hline E'_1 & : & 1 & -5 & 6 & | & 0 \\ E'_2 & : & 0 & 20 & -19 & | & 0 \end{array} \right]$$

$$\Rightarrow y = \frac{19}{20} \Rightarrow x = 5 \cdot \frac{19}{20} - 6 = -\frac{25}{20}$$

Eine homogene Lösung ist also (skalieren):

$$\vec{l}_{h,1} = \begin{pmatrix} -25 \\ 19 \\ 20 \end{pmatrix}.$$

Die allgemeine Lösung (Gleichung der Schnittgeraden) lautet schliesslich

$$\vec{u} = \frac{1}{20} \begin{pmatrix} 35 \\ 7 \\ 0 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} -25 \\ 19 \\ 20 \end{pmatrix}$$

## 8.6 Homogene und inhomogene lineare Gleichungssysteme

Die drei Fälle bei linearen Gleichungssystemen (inkonsistent, konsistent mit einer Lösung, konsistent mit unendlich vielen Lösungen) lassen sich in drei Dimensionen  $\mathbb{R}^3$  veranschaulichen. Damit schlagen wir auch eine Brücke zur Vektorgeometrie. Wir stellen fest, dass die lineare Gleichung  $a_1 \cdot x + a_2 \cdot y + a_3 \cdot z = b$  einer Ebene in  $\mathbb{R}^3$  entspricht. Beim Aufstellen von linearen Gleichungssystemen suchen wir Punkte, die alle Gleichungen erfüllen, d.h. die Schnittmenge der Ebenen. Die folgenden Beispiele erläutern die möglichen Situationen.

### 8.6.1 Inhomogene LGS: Ebenen, die nicht durch $\vec{0}$ gehen

Wir nennen diese Probleme, **inhomogene** lineare Gleichungssysteme.

#### Beispiel 8.28 Schnittmengen von Ebenen in $\mathbb{R}^3$

331889

Berechne die Schnittmenge der zwei Ebenen

$$\begin{aligned} x + 3y - z &= -1 \\ 2x + z &= 2 \end{aligned}$$

Benutze die Schreibweise mit der erweiterten Koeffizienten-Matrix.

**Lösung:**



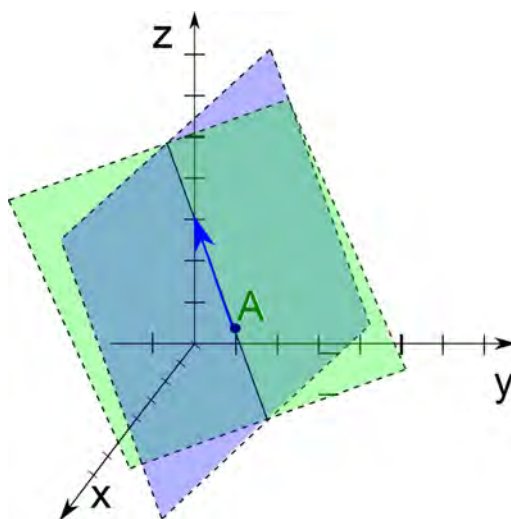
Die erweiterte Koeffizienten-Matrix lautet

$$\left[ \begin{array}{ccc|c} 1 & 3 & -1 & -1 \\ 2 & 0 & 1 & 2 \end{array} \right] \Rightarrow \left[ \begin{array}{ccc|c} 1 & 3 & -1 & -1 \\ 0 & -6 & 3 & 4 \end{array} \right]$$

$z$  erscheint als freie Variable. Wir setzen  $z = \lambda$ . Durch Einsetzen von unten nach oben erhalten wir die Lösung

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \frac{1}{6} \begin{pmatrix} -9 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}$$

Es handelt sich hier um ein konsistentes lineares Gleichungssystem. Da wir aber weniger Gleichungen als Variablen haben, gibt es eine freie Variable.



**Beispiel 8.29 Ebenen in  $\mathbb{R}^3$ , eine Lösung**

514280

Berechne die Schnittmenge der drei Ebenen

$$\left[ \begin{array}{ccc|c} x + 3y - z & = & -1 \\ 2y + z & = & 2 \\ x + 3y - 2z & = & 1 \end{array} \right].$$

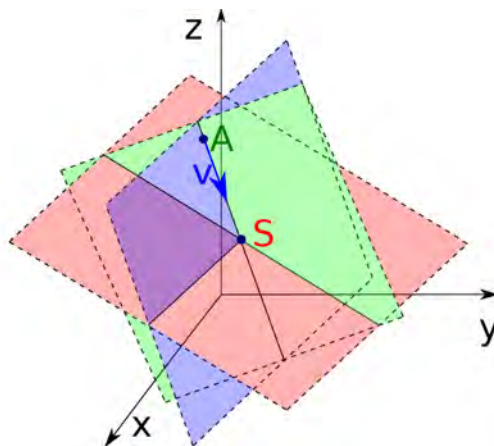
Benutze die Schreibweise mit der erweiterten Koeffizienten-Matrix.

**Lösung:**

Die erweiterte Koeffizienten-Matrix lautet

$$\left[ \begin{array}{ccc|c} L_1 & 1 & 3 & -1 \\ L_2 & 0 & 2 & 2 \\ L_3 & 1 & 3 & -2 \end{array} \right] \Rightarrow \left[ \begin{array}{ccc|c} L'_1 = L_1 & 1 & 3 & -1 \\ L'_2 = L_2 & 0 & 2 & 2 \\ L'_3 = L_3 - L_1 & 0 & 0 & 2 \end{array} \right] \Rightarrow \vec{S} := \begin{pmatrix} -9 \\ 2 \\ -2 \end{pmatrix}$$

Es handelt sich bei  $\vec{S}$  um den Schnittpunkt von drei windschiefen Ebenen. Wenn also das lineare Gleichungssystem konsistent ist und genau eine Lösung besitzt, entspricht das dem Schneiden von windschiefen Ebenen. — Oder anders ausgedrückt: Zwei der Ebenen schneiden sich in einer Geraden. Diese Gerade schneidet die dritte Ebene in einem Punkt, wie in der Grafik veranschaulicht. Die Schnittgerade hat einen Aufpunkt  $\vec{A}$  und den Richtungsvektor  $\vec{v}$  und schneidet die dritte Ebene im Punkt  $\vec{S}$ .



**Beispiel 8.30 Ebenen in  $\mathbb{R}^3$ , unendlich viele Lösungen**

928151

Berechne die Schnittmenge der drei Ebenen

$$\begin{cases} x + 3y - z = -1 \\ 2x + z = -3 \\ 3x + 3y = -4 \end{cases}.$$

Benutze dafür die Schreibweise als erweiterte Koeffizienten-Matrix.

**Lösung:**

Die erweiterte Koeffizienten-Matrix lautet

$$\left| \begin{array}{ccc|c} L_1: & 1 & 3 & -1 \\ L_2: & 2 & 0 & -3 \\ L_3: & 3 & 3 & -4 \end{array} \right| \Rightarrow \left| \begin{array}{ccc|c} L'_1 = L_1: & 1 & 3 & -1 \\ L'_2 = L_2 - 2L_1: & 0 & -6 & 3 \\ L'_3 = L_3 - 3L_1: & 0 & -6 & 3 \end{array} \right|$$

und weiter

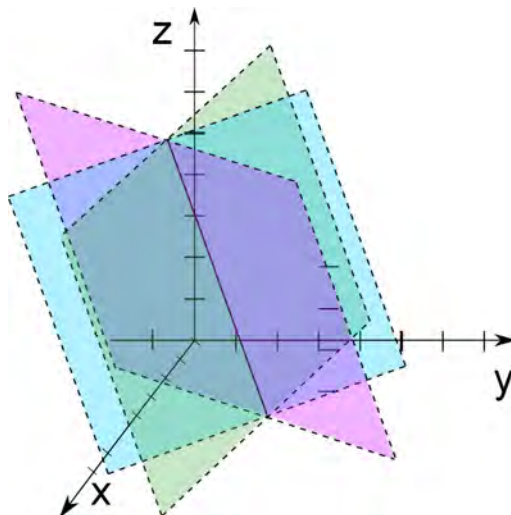
$$\left| \begin{array}{ccc|c} L''_1 = L'_1: & 1 & 3 & -1 \\ L''_2 = L'_2: & 0 & -6 & 3 \\ L''_3 = L'_3 - L'_2: & 0 & 0 & 0 \end{array} \right| \text{ also } \vec{u} = \begin{pmatrix} -\frac{3}{2} - \frac{\mu}{2} \\ \frac{1}{6} + \frac{\mu}{2} \\ \mu \end{pmatrix} \text{ mit } \mu \in \mathbb{R}$$

Es handelt sich bei  $\vec{u}$  um eine Schnittmenge von zwei Ebenen, also um eine Schnittgerade. Sie liegt zufällig in der dritten Ebene. Dies wird noch besser ersichtlich, wenn wir den Aufpunkt und den Richtungsvektor separat schreiben. Ausserdem strecken wir den Richtungsvektor mit um den Faktor 2, so vermei-

den wir Brüche

$$\vec{u} = \frac{1}{6} \begin{pmatrix} -9 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \mu \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}.$$

Der Fall des konsistenten linearen Gleichungssystems mit unendlich vielen Lösungen entspricht also dem Fall, wo die Lösungsmenge ausgedehnt ist und nicht nur aus einem Punkt besteht.



### Beispiel 8.31 Ebenen in $\mathbb{R}^3$ , inkonsistentes LGS

192620

Berechne die Schnittmenge der drei Ebenen

$$\begin{cases} x + 3y - z = -1 \\ 2x + z = -3 \\ 3x + 3y = 0 \end{cases}.$$

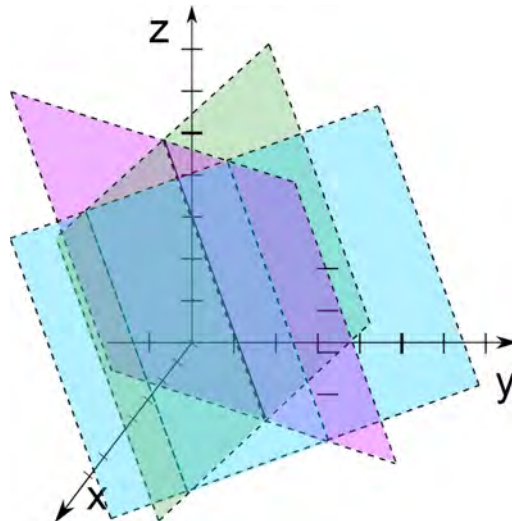
Benutze die Schreibweise mit der erweiterten Koeffizienten-Matrix.

#### Lösung:

Die erweiterte Koeffizienten-Matrix lautet

$$\begin{aligned} \left| \begin{array}{ccc|c} L_1: & 1 & 3 & -1 \\ L_2: & 2 & 0 & -3 \\ L_3: & 3 & 3 & 0 \end{array} \right| & \Rightarrow \left| \begin{array}{ccc|c} L'_1 = L_1: & 1 & 3 & -1 \\ L'_2 = L_2 - 2L_1: & 0 & -6 & 3 \\ L'_3 = L_3 - 3L_1: & 0 & -6 & 3 \end{array} \right| \\ & \Rightarrow \left| \begin{array}{ccc|c} L''_1 = L'_1: & 1 & 3 & -1 \\ L''_2 = L'_2: & 0 & -6 & 3 \\ L''_3 = L'_3 - L'_2: & 0 & 0 & 4 \end{array} \right| \end{aligned}$$

Es handelt sich hier um ein inkonsistentes lineares Gleichungssystem. Geometrisch bedeutet dies, dass zwei Ebenen sich in einer Geraden schneiden, dass aber die dritte Ebene parallel zu dieser Geraden steht. So ergibt sich kein Schnittpunkt.



### 8.6.2 Ebenen, die durch $\vec{0}$ gehen

Wir nennen diese Probleme **homogene** lineare Gleichungssysteme.

#### Beispiel 8.32 Ebenen in $\mathbb{R}^3$

185060

Berechne die Schnittmenge der drei Ebenen

$$\left| \begin{array}{l} L_1: -12y + 6z = 0 \\ L_2: 2x + 6y - 2z = 0 \\ L_3: 4x - 12y + 8z = 0 \end{array} \right|.$$

Benutze dafür die Schreibweise als erweiterte Koeffizienten-Matrix.

#### Lösung:

Es macht keinen Sinn in der Koeffizienten-Matrix die Nullen der Inhomogenität  $\vec{b} = \vec{0}$  mitzunehmen. Bei den Zeilenumformungen werden dort stets Nullen stehen. Also schreiben wir die nur die Koeffizienten-Matrix auf:

$$\left| \begin{array}{l} L'_1 = L_2/2: 1 \quad 3 \quad -1 \\ L'_2 = L_3/4: 1 \quad -3 \quad 2 \\ L'_3 = L_1/6: 0 \quad -2 \quad 1 \end{array} \right| \quad \text{also} \quad \left| \begin{array}{l} L''_1 = L'_1: 1 \quad 3 \quad -1 \\ L''_2 = L'_2 - L'_1: 0 \quad -6 \quad 3 \\ L''_3 = L'_3: 0 \quad -2 \quad 1 \end{array} \right|$$

und weiter

$$\left| \begin{array}{l} L'''_1 = L''_1: 1 \quad 3 \quad -1 \\ L'''_2 = L''_2: 0 \quad -6 \quad 3 \\ L'''_3 = 3L''_3 - L''_2: 0 \quad 0 \quad 0 \end{array} \right|$$

Wir erinnern uns daran, dass auf der rechten Seite des Gleichheitszeichens Nullen stehen. Deshalb haben wir also  $x_1$  und  $x_2$  als Pivot-Variable und  $x_3 = \lambda$  als freie Variable.

Einsetzen ergibt:

$$x_2 = \lambda/2, \rightarrow x_1 = -\lambda/2$$

Wir strecken den Richtungsvektor um den Faktor 2, so vermeiden wir Brüche

$$\vec{u} = \lambda \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}.$$

Die Ebenen, die alle den Abstand 0 vom Ursprung haben — ihre Konstante ist 0 — schneiden sich im Ursprung, d.h. der Aufpunkt der Schnittgeraden ist  $\vec{0}$  und der Richtungsvektor  $\begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}$ .

### Infobox Die triviale Lösung eines homogenen LGS

Ein homogenes LGS hat stets die Lösung  $\vec{0}$ .

Aus der geometrischen Anschauung ist dies klar: Die Konstanten der Ebenen sind 0, d.h. alle Ebenen gehen durch den Ursprung und schneiden sich da also. In den Anwendungen interessiert uns aber diese Lösung oft nicht.

### Beispiel 8.33 Ebenen in $\mathbb{R}^3$

807042

Berechne die Schnittmenge der drei Ebenen

$$\left| \begin{array}{l} L_1: \quad -2y + 4z = 0 \\ L_2: \quad 4x + 16y + 21z = 0 \\ L_3: \quad 2x + 10y + 6z = 0 \end{array} \right|.$$

Benutze dafür die Schreibweise als erweiterte Koeffizienten-Matrix.

#### Lösung:

Es macht keinen Sinn in der Koeffizienten-Matrix die Nullen der Inhomogenität  $\vec{b} = \vec{0}$  mitzunehmen. Bei den Zeilenumformungen werden dort stets Nullen stehen. Also schreiben wir die nur die Koeffizienten-Matrix auf:

$$\left| \begin{array}{l} L'_1 = L_3/2: \quad 1 \quad 5 \quad 3 \\ L'_2 = L_2: \quad 4 \quad 16 \quad 21 \\ L'_3 = L_1/2: \quad 0 \quad -1 \quad 2 \end{array} \right| \text{ also } \left| \begin{array}{l} L''_1 = L'_1: \quad 1 \quad 5 \quad 3 \\ L''_2 = L'_2 - 4L'_1: \quad 0 \quad -4 \quad 9 \\ L''_3 = L'_3: \quad 0 \quad -1 \quad 2 \end{array} \right|$$

und weiter

$$\left| \begin{array}{l} L'''_1 = L''_1: \quad 1 \quad 5 \quad 3 \\ L'''_2 = L''_2: \quad 0 \quad -4 \quad 9 \\ L'''_3 = 4L''_3 - L''_2: \quad 0 \quad 0 \quad -1 \end{array} \right|$$

Die unterste Gleichung  $-x_3 = 0$  führt auf  $\vec{u} = \vec{0}$ , d.h. ohne Spezielle Lage schneiden sich die Ebenen, die durch den Ursprung gehen nur im Ursprung.

Abgesehen von der trivialen Lösung gilt:

### **Infobox Lösungsmenge eines homogenen LGS**

Ein homogenes LGS hat nur dann weitere Lösungen, falls die Ebenen eine spezielle Lage haben.

In diesen Fällen sind die Normalenvektoren der Ebenen linear abhängig.

---

9.1	Zeilen und Spalten einer Matrix . . . . .	237
9.2	Summen von Matrizen, Multiplikation mit einer Zahl . . . . .	241
9.3	Matrix-Produkt mit dem Falk-Schema . . . . .	244
9.4	Das Summenzeichen . . . . .	248
9.5	Matrix-Produkt: assoziativ und distributiv, aber nicht kommutativ . . . . .	257
9.6	Produkt einer Matrix mit einem Vektor . . . . .	261
9.7	Spezielle Matrizen . . . . .	266
9.8	Übersicht Matlab . . . . .	272

---

Im vorherigen Kapitel haben wir die erweiterte Koeffizienten-Matrix

$$\left[ \begin{array}{cccc|c} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} & b_2 \\ & & \dots & & \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} & b_m \end{array} \right]$$

kennen gelernt. Wir haben schon festgestellt, dass die Darstellung von linearen Gleichungssystemen in dieser Form praktisch ist, weil sie uns viel Schreibarbeit erspart und andererseits, weil sie übersichtlich ist und damit Fehler bei den Umformungen verhindert. Deshalb werden wir erforschen welche weiteren Probleme wir mit Hilfe von Matrizen lösen können.

Um das Wichtigste vorwegzunehmen: Wir werden finden, dass alle Fragestellungen, die lineare Gleichungssysteme beinhalten mit Matrizen geschrieben werden sollen. Und wir werden deshalb zahlreiche davon so formulieren, dass wir darin lineare Gleichungssysteme erkennen.

## 9.1 Zeilen und Spalten einer Matrix

### Definition Matrix

Eine Matrix ist eine rechteckige Tabelle mit Zahlen

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} .$$

Die **Zeilen** der Matrix sind die  $m$  horizontalen Listen

$$(a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1n}), (a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2n}), \dots, (a_{m1}, a_{m2}, \dots, a_{mn})$$

und die **Spalten** sind die  $n$  vertikalen Listen

$$\begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ \vdots \\ a_{m1} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} a_{12} \\ a_{22} \\ \vdots \\ a_{m2} \end{pmatrix}, \dots, \begin{pmatrix} a_{1n} \\ a_{2n} \\ \vdots \\ a_{mn} \end{pmatrix}$$

Oft werden wir die Matrix einfach mit einem Grossbuchstaben<sup>1</sup> schreiben  $\mathbf{A} = [a_{ij}]$ . Die Elemente  $a_{ij}$  stehen in der  $i$ -ten Zeile und in der  $j$ -ten Spalte.

Eine Matrix mit  $m$  Zeilen und  $n$  Spalten nennen wir eine  $m$  mal  $n$  Matrix und schreiben dafür entweder  $m \times n$  oder  $\mathbb{R}^{m \times n}$  um noch anzugeben, aus welchem Zahlenbereich die Einträge gewählt werden (hier aus der Menge der reellen Zahlen  $\mathbb{R}$ ).

### Definition Spaltenvektor und Zeilenvektor

$$\begin{array}{c} \text{n Spalten} \rightarrow \\ \begin{matrix} \downarrow \text{m Zeilen} \\ \left( \begin{array}{ccc} a_{11} & a_{12} & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{mn} \end{array} \right) \end{matrix} \end{array}$$

Eine Matrix mit einer Spalte nennen wir **Spaltenvektor**, eine Matrix mit einer Zeile nennen wir **Zeilenvektor**. Für die  $m$  mal  $n$  Matrix  $\mathbf{A}$  schreiben wir die Spaltenvektoren auch als

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}_{:,1}, \mathbf{a}_{:,2}, \dots, \mathbf{a}_{:,n}]$$

und die Zeilenvektoren

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}_{1,:}, \mathbf{a}_{2,:}, \dots, \mathbf{a}_{m,:}] .$$

Wir übernehmen dabei die Notation aus Matlab:  $,$  bedeutet nächstes Element,  $\rightarrow$  bedeutet nächste Zeile und  $:$  bedeutet 'nimm alle Einträge'.

Um zu betonen, dass es sich um Vektoren handelt, schreiben wir manchmal auch

$$\mathbf{A} = [\vec{A}_1, \vec{A}_2, \dots, \vec{A}_n]$$

<sup>1</sup>in Fettschrift



für die Spaltenvektoren und für die Zeilenvektoren

$$\mathbf{A} = [\mathbf{A}_1; \mathbf{A}_2; \dots; \mathbf{A}_n] .$$

**Beispiel 9.1 Zeilen und Spalten**

711244

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} -1 & 4 & -1 \\ 7 & 1 & -3 \\ 0 & 4 & 3 \\ -2 & 8 & -3 \end{pmatrix}$$

Für M bestimme

- a) die zweite Spalte,
- b) die dritte Zeile,
- c) die Dimension.

**Lösung:**

- a) die zweite Spalte,

$$\mathbf{a}_{:,2} = \begin{pmatrix} 4 \\ 1 \\ 4 \\ 8 \end{pmatrix}$$

- b) die dritte Zeile,

$$\mathbf{a}_{3,:} = (0 \quad 4 \quad 3)$$

- c) die Dimension: es ist eine  $4 \times 3$  Matrix

**Beispiel 9.2 Zeilen und Spalten**

600133

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 5 & 2 & 5 & 2 & 4 \\ -3 & 5 & 9 & 5 & 9 \\ 6 & -3 & 0 & 9 & 2 \end{pmatrix}$$

Für M bestimme

- a) die vierte Spalte,
- b) die zweite Zeile,
- c) die Dimension.

**Lösung:**

a) die vierte Spalte,

$$\mathbf{a}_{:,4} = \begin{pmatrix} 2 \\ 5 \\ 9 \end{pmatrix}$$

b) die zweite Zeile,

$$\mathbf{a}_{2,:} = (-3 \ 5 \ 9 \ 5 \ 9)$$

c) die Dimension: es ist eine  $3 \times 5$  Matrix

### Definition Transponierte Matrix

Die Transponierte der Matrix

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

ist

$$\mathbf{A}^T = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & \dots & a_{m1} \\ a_{12} & a_{22} & \dots & a_{m2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{1n} & a_{2n} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

Die Elemente der transponierten Matrix  $\mathbf{A}^T$  sind

$$(\mathbf{a}^T)_{ij} = a_{ji},$$

d.h. die Indices werden vertauscht.

### Definition Symmetrisch und antisymmetrische Matrizen

Eine Matrix  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$  heiss **symmetrisch**, falls

$$\mathbf{A}^T = \mathbf{A}$$

oder **antisymmetrisch** falls

$$\mathbf{A}^T = -\mathbf{A}$$

### Beispiel 9.3 Transponierte

869494

Bestimme die Transponierte der folgenden Matrizen

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 2 \\ 3 & -2 \\ 2 & 4 \\ -1 & -2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 7 \\ 9 \\ 3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 3 & 7 & 7 \\ 7 & 3 & 9 \\ 3 & 2 & 7 \end{bmatrix}$$

Lösung:

$$\mathbf{A}^T = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 2 & -1 \\ 2 & -2 & 4 & -2 \end{bmatrix}, \mathbf{B}^T = [7 \quad 9 \quad 3], \mathbf{C}^T = \begin{bmatrix} 3 & 7 & 3 \\ 7 & 3 & 2 \\ 7 & 9 & 7 \end{bmatrix}$$

### Beispiel 9.4 Transponierte

758383

Bestimme die Transponierte der folgenden Matrizen

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 4 & 5 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = [5 \quad -3 \quad 8 \quad 5], \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 6 & 3 & 7 \\ 9 & 2 & 3 & 6 \end{bmatrix}$$

**Lösung:**

$$\mathbf{A}^T = \begin{bmatrix} 1 & 4 \\ 3 & 5 \end{bmatrix}, \mathbf{B}^T = \begin{bmatrix} 5 \\ -3 \\ 8 \\ 5 \end{bmatrix}, \mathbf{C}^T = \begin{bmatrix} 1 & 9 \\ 6 & 2 \\ 3 & 3 \\ 7 & 6 \end{bmatrix}$$

### Beispiel 9.5 Symmetrische/Antisymmetrische Matrizen

340726

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 4 & 5 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 3 \\ -3 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 3 & 4 \end{bmatrix}$$

Bestimmen Sie die Transponierten und entscheiden Sie anschliessend, ob die Matrizen symmetrisch oder antisymmetrisch sind.

**Lösung:**

C ist symmetrisch, denn es gilt

$$\mathbf{C}^T = \mathbf{C}.$$

B ist antisymmetrisch, denn es gilt

$$\mathbf{B}^T = -\mathbf{B}.$$

### Satz Gesetze für die Transponierte

- $(\mathbf{A} + \mathbf{B})^T = \mathbf{A}^T + \mathbf{B}^T$
- $(\mathbf{A} \odot \mathbf{B})^T = \mathbf{B}^T \odot \mathbf{A}^T$
- $(\mathbf{A}^T)^T = \mathbf{A}$

## 9.2 Summen von Matrizen, Multiplikation mit einer Zahl

### Infobox Summen von Matrizen, Multiplikation mit einer Zahl

Die Matrix  $\mathbf{A} = [a_{i,j}] \in \mathbb{R}^{m \times n}$  kann mit der Zahl  $\lambda \in \mathbb{R}$  multipliziert werden

$$\mathbf{C} = \lambda \cdot \mathbf{A} \text{ mit } c_{i,j} = \lambda \cdot a_{i,j} .$$

Die Matrizen  $\mathbf{A}$  und  $\mathbf{B} = [b_{i,j}] \in \mathbb{R}^{k \times l}$  können addiert und subtrahiert werden

$$\mathbf{S} = \mathbf{A} + \mathbf{B} \text{ mit } s_{i,j} = a_{i,j} + b_{i,j} \text{ und } \mathbf{D} = \mathbf{A} - \mathbf{B} \text{ mit } d_{i,j} = a_{i,j} - b_{i,j}$$

falls sie in den Dimensionen übereinstimmen, d.h.  $m = k$  und  $n = l$ .

Selten benutzen wir auch die elementweise Multiplikation von Matrizen, falls Sie in den Dimensionen übereinstimmen:

$$\mathbf{E} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} \text{ mit } e_{i,j} = a_{i,j} \cdot b_{i,j}$$

Auf dem Papier notieren wir die elementweise Multiplikation mit  $\cdot$  und in Matlab mit  $.*$ . Das Matrixprodukt hingegen ist auf dem Papier  $\odot$  und in Matlab  $*$ .

Leider unterscheiden viele Texte nicht zwischen den beiden Arten der Multiplikation. Häufig wird dort einfach  $\cdot$  oder nur ein Leerzeichen für die das Matrixprodukt geschrieben.

### Beispiel 9.6 Summe Matrizen

Betrachten Sie die Matrizen

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 2 & 3 \\ 4 & 2 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 0 & 3 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} -8 & 0 & -4 \\ 4 & 6 & 3 \\ 0 & -3 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & -4 & -3 \\ 7 & 9 & 2 \\ -1 & 0 & -5 \end{bmatrix}$$

Überlegen Sie zuerst, welche der folgenden Ausdrücke existieren. Berechnen Sie dann die Resultate.

- a)  $\mathbf{C} + \mathbf{D}$
- b)  $\mathbf{D} \cdot \mathbf{C}$
- c)  $\mathbf{A} + \mathbf{B}$
- d)  $2 \cdot \mathbf{A}$

**Lösung:**

$$\text{a) } \mathbf{C} + \mathbf{D} = \begin{bmatrix} -8 & -4 & -7 \\ 11 & 15 & 5 \\ -1 & -3 & -6 \end{bmatrix}$$

$$\text{b) } \mathbf{D} \cdot \mathbf{C} = \begin{bmatrix} -16 & -15 & -9 \\ -20 & 48 & -3 \\ 8 & 15 & 9 \end{bmatrix}$$

c)  $\mathbf{A} + \mathbf{B}$  keine Lösung

$$\text{d) } 2 \cdot \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 2 \\ 4 & 6 \\ 8 & 4 \end{bmatrix}$$

### Beispiel 9.7 Summe von Matrizen, Multiplikation mit Skalar

WEWKTK

Betrachten Sie die Matrizen

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 2 & 3 \\ 4 & 2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 0 & 3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} -8 & 0 & -4 \\ 4 & 6 & 3 \\ 0 & -3 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & -4 & -3 \\ 7 & 9 & 2 \\ -1 & 0 & -5 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} -7 \\ 0 \\ 2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F} = [0 \ 7 \ -6].$$

Überlegen Sie zuerst, welche der folgenden Ausdrücke existieren. Berechnen Sie dann die Resultate.

Befehle: + - .\*

a)  $\mathbf{A} + \mathbf{B}^T$

e)  $\mathbf{B} \cdot \mathbf{F}$

i)  $\mathbf{C} \cdot \mathbf{E}$

b)  $3 \cdot \mathbf{B}$

f)  $\mathbf{B} \cdot \mathbf{F}^T$

j)  $\mathbf{C}^T \cdot \mathbf{C}$

c)  $\mathbf{E} + \mathbf{F}$

g)  $\mathbf{E} \cdot \mathbf{E}$

d)  $\mathbf{E} + \mathbf{F}^T$

h)  $\mathbf{F} \cdot \mathbf{E}$

k)  $\mathbf{C} \cdot \mathbf{F}$

**Lösung:**

a)  $\mathbf{A} + \mathbf{B}^T = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 4 & 3 \\ 5 & 5 \end{bmatrix}$

b)  $3 \cdot \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 3 & 6 & 3 \\ 6 & 0 & 9 \end{bmatrix}$

c)  $\mathbf{E} + \mathbf{F}$  nicht definiert

d)  $\mathbf{E} + \mathbf{F}^T = \begin{bmatrix} -7 \\ 7 \\ -4 \end{bmatrix}$

e)  $\mathbf{B} \cdot \mathbf{F}$  nicht definiert

f)  $\mathbf{B} \cdot \mathbf{F}^T$  nicht definiert

a)  $\mathbf{E} \cdot \mathbf{E} = \begin{bmatrix} 49 \\ 0 \\ 4 \end{bmatrix}$

b)  $\mathbf{F} \cdot \mathbf{E}$  nicht definiert

c)  $\mathbf{C} \cdot \mathbf{E}$  nicht definiert

d)  $\mathbf{C}^T \cdot \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 64 & 0 & 0 \\ 0 & 36 & -9 \\ 0 & -9 & 1 \end{bmatrix}$

e)  $\mathbf{C} \cdot \mathbf{F}$  nicht definiert

## 9.3 Matrix-Produkt mit dem Falk-Schema

### Definition Matrix-Produkt, Falk-Schema

Mit dem Falk-Schema lassen sich die Produkte von Matrizen berechnen.

$$C \odot D = \begin{pmatrix} 8 & 0 & -2 \\ 0 & 2 & 4 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} -3 & 8 \\ 0 & 0 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -26 & 66 \\ 4 & -4 \end{pmatrix}$$

$$\underbrace{0 \cdot (-3) + 2 \cdot 0 + 4 \cdot 1}$$

- 1) Dazu werden die Matrizen in ein Raster geschrieben. C links unten, D rechts oben
- 2) Jeder Kreuzungspunkt von einer Zeile und einer Spalte ergibt einen Eintrag in der resultierenden Matrix.
- 3) Die neuen Elemente berechnet man aus dem *Skalarprodukt* aus einer Zeile und einer Spalte.

Achtung: Das Matrix-Produkt existiert nur dann, wenn die Zeilen C und die Spalten D gleich viele Einträge haben.

### Beispiel 9.8 Multiplikation Zeilen und Spalten

473738

$$\vec{a} = (5, 7, 9), \vec{b} = \begin{pmatrix} 3 \\ 6 \\ 7 \end{pmatrix}, \vec{c} = (2, 0, -3, -2), \vec{d} = \begin{pmatrix} 2 \\ -2 \\ 5 \end{pmatrix}, \vec{e} = (3, -3), \vec{f} = \begin{pmatrix} 7 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Berechne die Produkte

a)  $\vec{a} \odot \vec{b}$

b)  $\vec{c} \odot \vec{d}$

c)  $\vec{e} \odot \vec{f}$

**Lösung:**

a)  $\vec{a} \odot \vec{b} = 120$

b)  $\vec{c} \odot \vec{d}$  ist nicht definiert

c)  $\vec{e} \odot \vec{f} = 18$

Wir fassen also zusammen: Die Multiplikation einer Zeile mit einer Spalte ist

$$(a_1, a_2, \dots, a_n) \odot \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} = a_1 \cdot b_1 + a_2 \cdot b_2 + \dots + a_n \cdot b_n = \sum_{i=1}^n a_i \cdot b_i$$

Wir erkennen darin das Skalarprodukt wieder. Achtung, diese Multiplikation funktioniert nur, wenn Zeile und Spalte gleich viele Einträge haben!

**Beispiel 9.9 Multiplikation Zeilen und Spalten**

362627

$$\vec{a} = (7, -4, 5), \vec{b} = \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ -1 \end{pmatrix}, \vec{c} = (6, -1, 8, 3), \vec{d} = \begin{pmatrix} 4 \\ -9 \\ -2 \\ 5 \end{pmatrix}, \vec{e} = (7, -4, 5), \vec{f} = \begin{pmatrix} 4 \\ -9 \\ -2 \\ 5 \end{pmatrix}$$

Berechne die Produkte

a)  $\vec{a} \odot \vec{b}$

b)  $\vec{c} \odot \vec{d}$

c)  $\vec{e} \odot \vec{f}$

**Lösung:**

a)  $\vec{a} \odot \vec{b} = 7 \cdot 3 + (-4) \cdot 2 + 5 \cdot (-1) = 21 - 8 - 5 = 8$

b)  $\vec{c} \odot \vec{d} = 24 + 9 - 16 + 15 = 32$

c)  $\vec{e} \odot \vec{f}$  ist nicht definiert

**Beispiel 9.10 Multiplikation einer Matrix mit einem Spalten-Vektor SCLJSA**

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 8 \\ 0 & 3 & -2 \\ -3 & 2 & 0 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} 5 \\ 2 \\ -2 \end{pmatrix}, \mathbf{C} = \begin{pmatrix} 0 & -3 & 1 & 1 \\ 3 & 4 & 4 & 9 \\ 7 & 4 & 8 & -1 \\ 6 & 7 & 5 & -1 \end{pmatrix}, \vec{d} = \begin{pmatrix} 2 \\ 7 \\ 6 \end{pmatrix}, \mathbf{E} = \begin{pmatrix} 1 & 4 \\ 3 & 2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \vec{f} = \begin{pmatrix} 5 \\ 6 \end{pmatrix}$$

Berechne die Produkte

a)  $\mathbf{A} \odot \vec{b}$

b)  $\mathbf{C} \odot \vec{d}$

c)  $\mathbf{E} \odot \vec{f}$

**Lösung:**

a)  $\mathbf{A} \odot \vec{b} = \begin{pmatrix} -6 \\ 10 \\ -11 \end{pmatrix}$

b)  $\mathbf{C} \odot \vec{d}$  ist nicht definiert

c)  $\mathbf{E} \odot \vec{f} = \begin{pmatrix} 29 \\ 27 \\ 6 \end{pmatrix}$

**Beispiel 9.11 Multiplikation einer Matrix mit einem Spalten-Vektor BGY1U0**

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 8 & -3 & 8 & -3 \\ 7 & 6 & 8 & -2 \\ 1 & 2 & -2 & 2 \\ 4 & 3 & 1 & 9 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} 4 \\ 8 \\ 5 \end{pmatrix}, \mathbf{C} = \begin{pmatrix} 2 & -3 & 5 \\ 0 & 9 & 5 \\ 9 & 1 & 7 \end{pmatrix}, \vec{d} = \begin{pmatrix} 9 \\ 0 \\ 4 \end{pmatrix}, \mathbf{E} = \begin{pmatrix} 3 & -1 \\ 6 & 0 \\ 3 & -1 \end{pmatrix}, \vec{f} = \begin{pmatrix} 0 \\ 5 \end{pmatrix}$$

Berechne die Produkte

a)  $\mathbf{A} \odot \vec{b}$

b)  $\mathbf{C} \odot \vec{d}$

c)  $\mathbf{E} \odot \vec{f}$

**Lösung:**

a)  $\mathbf{A} \odot \vec{b}$  ist nicht definiert

b)  $\mathbf{C} \odot \vec{d} = \begin{pmatrix} 38 \\ 20 \\ 109 \end{pmatrix}$

c)  $\mathbf{E} \odot \vec{f} = \begin{pmatrix} -5 \\ 0 \\ -5 \end{pmatrix}$

**Beispiel 9.12 Produkt von zwei Matrizen**

AIX1U0

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 0 \\ 6 & 3 & 0 \\ 1 & 0 & 2 \end{pmatrix}, \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 3 & 4 & 5 \\ 5 & -2 & -1 \\ 8 & 5 & 2 \end{pmatrix}, \mathbf{C} = \begin{pmatrix} 8 & 0 & -2 \\ 0 & 2 & 4 \end{pmatrix}, \mathbf{D} = \begin{pmatrix} -3 & 8 \\ 0 & 0 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} 7 & 5 \\ 7 & 0 \end{pmatrix}, \mathbf{F} = \begin{pmatrix} 5 & -2 \\ 5 & 4 \\ 3 & 8 \end{pmatrix}$$

Berechne die Produkte

a)  $\mathbf{A} \odot \mathbf{B}$

b)  $\mathbf{C} \odot \mathbf{D}$

c)  $\mathbf{E} \odot \mathbf{F}$

**Lösung:**

a)  $\mathbf{A} \odot \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 18 & -2 & 2 \\ 33 & 18 & 27 \\ 19 & 14 & 9 \end{pmatrix}$

b)  $\mathbf{C} \odot \mathbf{D} = \begin{pmatrix} -26 & 66 \\ 4 & -4 \end{pmatrix}$

c)  $\mathbf{E} \odot \mathbf{F}$  ist nicht definiert



**Beispiel 9.13 Produkt von zwei Matrizen**

CKZ2V1

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 4 & 2 \\ 2 & -1 & 5 \\ 6 & 0 & -3 \end{pmatrix}, \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 4 & 1 & 9 \\ 5 & 4 & 2 \\ -3 & 5 & 2 \end{pmatrix}, \mathbf{C} = \begin{pmatrix} 5 & 6 \\ 5 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{D} = \begin{pmatrix} -1 & 3 \\ 5 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} 7 & -2 & 4 & 0 \\ 3 & 3 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{F} = \begin{pmatrix} 0 & 9 \\ 2 & 0 \\ 2 & 4 \\ 0 & -2 \end{pmatrix}$$

Berechne die Produkte

- a)  $\mathbf{A} \odot \mathbf{B}$                       c)  $\mathbf{E} \odot \mathbf{F}$   
b)  $\mathbf{C} \odot \mathbf{D}$                       d)  $\mathbf{E} \odot \mathbf{C}$

**Lösung:**

a)  $\mathbf{A} \odot \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 14 & 26 & 12 \\ -12 & 23 & 26 \\ 33 & -9 & 48 \end{pmatrix}$

b)  $\mathbf{C} \odot \mathbf{D} = \begin{pmatrix} 25 & 15 \\ 0 & 15 \end{pmatrix}$

c)  $\mathbf{E} \odot \mathbf{F} = \begin{pmatrix} 4 & 79 \\ 6 & 25 \end{pmatrix}$

d)  $\mathbf{E} \odot \mathbf{C}$  nicht definiert

**Beispiel 9.14 Matrixprodukt**

SY7RC5

Wir haben  $\mathbf{A}$  mit  $m$  Spalten und  $\mathbf{B}$  mit  $p$  Zeilen. Das Matrix Produkt  $\mathbf{A} \odot \mathbf{B}$  existiert nur, falls  $m = p$ . Betrachten Sie nun die Matrizen

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 2 & 3 \\ 4 & 2 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 0 & 3 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} -8 & 0 & -4 \\ 4 & 6 & 3 \\ 0 & -3 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & -4 & -3 \\ 7 & 9 & 2 \\ -1 & 0 & -5 \end{bmatrix}, \mathbf{E} = \begin{bmatrix} -7 \\ 0 \\ 2 \end{bmatrix}, \mathbf{F} = [0 \ 7 \ -6],$$

Überlegen Sie zuerst, welche der folgenden Ausdrücke existieren. Berechnen Sie dann die Resultate.

Befehle: + - .\*

a)  $\mathbf{D} \odot \mathbf{C}$

e)  $\mathbf{F} \odot \mathbf{E}$

i)  $(\mathbf{C} + \mathbf{D}) \odot \mathbf{E}$

b)  $\mathbf{B} \odot \mathbf{F}$

f)  $\mathbf{C} \odot \mathbf{E}$

j)  $(\mathbf{A}^\top + \mathbf{B}) \odot \mathbf{E}$

c)  $\mathbf{B} \odot \mathbf{F}^\top$

g)  $\mathbf{C}^\top \odot \mathbf{C}$

d)  $\mathbf{E} \odot \mathbf{E}$

h)  $\mathbf{C} \odot \mathbf{F}$

k)  $(\mathbf{C}^\top + \mathbf{D}) \odot (\mathbf{B}^\top + \mathbf{A})$

**Lösung:**

a)  $\mathbf{D} \odot \mathbf{C} = \begin{pmatrix} -16 & -15 & -9 \\ -20 & 48 & -3 \\ 8 & 15 & 9 \end{pmatrix}$

g)  $\mathbf{C}^\top \odot \mathbf{C} = \begin{pmatrix} 80 & 24 & 44 \\ 24 & 45 & 21 \\ 44 & 21 & 26 \end{pmatrix}$

b)  $\mathbf{B} \odot \mathbf{F}$

h)  $\mathbf{C} \odot \mathbf{F}$

c)  $\mathbf{B} \odot \mathbf{F}^\top = \begin{pmatrix} 8 \\ -18 \end{pmatrix}$

i)  $(\mathbf{C} + \mathbf{D}) \odot \mathbf{E} = \begin{pmatrix} 42 \\ -67 \\ -5 \end{pmatrix}$

d)  $\mathbf{E} \odot \mathbf{E}$

j)  $(\mathbf{A}^\top + \mathbf{B}) \odot \mathbf{E} = \begin{pmatrix} 3 \\ -11 \end{pmatrix}$

e)  $\mathbf{F} \odot \mathbf{E} = (-12)$

f)  $\mathbf{C} \odot \mathbf{E} = \begin{pmatrix} 48 \\ -22 \\ -2 \end{pmatrix}$

k)  $(\mathbf{C}^\top + \mathbf{D}) \odot (\mathbf{B}^\top + \mathbf{A}) = \begin{pmatrix} -23 & -39 \\ 62 & 61 \\ -23 & -36 \end{pmatrix}$

## 9.4 Das Summenzeichen

Das Summenzeichen  $\sum$  erspart uns viel Schreibarbeit. Wir benutzen dazu das  $\Sigma$  (Sigma) aus dem griechischen Alphabet, weil der Buchstaben gleich klingt wie das 'S' im Wort Summe.

### Definition Summenzeichen, Bezeichnungen

$$\sum_{i=1}^{18} a_i$$

- $a$ : Summationsvariable
- $i$ : Laufindex. Sie nimmt hier die Werte von 1 bis 18 in aufsteigender Folge an
- 1 : untere Grenze
- 18 : obere Grenze

Die Wahl der Bezeichnung des Laufindex ist nicht von Bedeutung. Gewöhnlich werden hierfür  $i$ ,  $k$  oder  $j$  verwendet.

Schreiben Sie die Summe mit dem Summenzeichen

a)

$$V = 1 + 2 + 3 + \dots + 10 + 11 + 12$$

b)

$$W = 4^0 + 4^1 + 4^2 + 4^3 + \dots + 4^{10} + 4^{11} + 4^{12}$$

c)

$$X = 7 + 7 + 7 + 7 + 7 + 7 + 7 + 7 + 7 + 7 + 7 + 7 + 7$$

d) Benutzen Sie die Summe  $\sum_{i=1}^N i$

$$S = 2 + 4 + 6 + 8 + 10 + \dots + 32 + 34 + 36$$

e) Benutzen Sie links die Summe  $\sum_{i=1}^N i$

$$P = 1+2+3+4+\dots+8+5+10+15+\dots+40 = 1+5+2+10+3+15+\dots+8+40$$

f) Welche Umformungen beim Summenzeichen können Sie aus den obigen Aufgaben ableiten?

**Lösung:**

a)

$$V = \sum_{i=1}^{12} i$$

b)

$$W = \sum_{i=0}^{15} 4^i$$

c) Es sind 12 Summanden. Es lohnt sich zu merken, dass die obere Grenze die Anzahl der Summanden angibt, falls die untere Grenze  $i = 1$  ist.

$$X = \sum_{i=1}^{12} 7$$

d) Jeder Summand ist hier durch 2 teilbar. Wir schreiben deshalb

$$S = 2 \cdot 1 + 2 \cdot 2 + 2 \cdot 3 + \dots + 2 \cdot 18$$

Wir können also schreiben  $S = \sum_{i=1}^{18} 2 \cdot i$ . Da die 2 immer auftaucht, ist es eine Konstante in der Summe. Wir klammern sie aus

$$S = 2 \cdot (1 + 2 + 3 + \dots + 18)$$

d.h.  $S = 2 \cdot \sum_{i=1}^{18} i$

e) Wir gruppieren die Summanden. Wir sehen, dass in den Gruppen jeweils die zweiten Summanden Vielfache von 5 sind:

$$P = 1 + 5 \cdot 1 + 2 + 5 \cdot 2 + 3 + 5 \cdot 3 + \dots + 8 + 5 \cdot 8$$

Wir können also schreiben

$$P = \sum_{i=1}^8 (i + 5 \cdot i)$$

Wir können die Summe aber auch umordnen:

$$P = 1 + 2 + 3 \dots 8 + 5 \cdot 1 + 5 \cdot 2 + 5 \cdot 3 + \dots + 5 \cdot 8$$

also

$$P = \sum_{i=1}^8 i + \sum_{i=1}^8 5 \cdot i$$

### Infobox Gesetze für das Summenzeichen

- Ausklammern (Multiplikation mit einer Konstanten):

$$\sum_{i=1}^n c \cdot a_i = c \cdot \sum_{i=1}^n a_i$$

- Umordnen (Zerlegen in Teilsummen):

$$\sum_{i=1}^n (a_i + b_i) = \sum_{i=1}^n a_i + \sum_{i=1}^n b_i$$

Achtung: Aus der Summe darf nur ausgeklammert werden, was nicht vom Laufindex abhängt.

### Beispiel 9.16 Schreiben Sie die Summen aus

W315NQ

a)  $\sum_{i=1}^5 i^3$

c)  $\sum_{i=0}^4 (i+1)^2$

e)  $\sum_{i=2}^6 (-i)^i$

b)  $\sum_{i=2}^7 (2-i)$

d)  $\sum_{i=3}^8 (10 - \frac{i}{2})$

f)  $\sum_{i=0}^5 \frac{i}{i+2}$

**Lösung:**

a)  $1 + 8 + 27 + 64 + 125$

b)  $0 - 1 - 2 - 3 - 4 - 5$

c)  $1 + 4 + 9 + 16 + 25$

d)

$$\frac{17}{2} + 8 + \frac{15}{2} + 7 + \frac{13}{2} + 6$$

e)  $4 - 27 + 256 - 3125 + 46656$

f)

$$0 + \frac{1}{3} + \frac{1}{2} + \frac{3}{5} + \frac{2}{3} + \frac{5}{7}$$

**Beispiel 9.17 Ermitteln Sie die Grenzen**

**N3J50P**

a)

$$\sum \frac{1}{i} = \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} + \dots + \frac{1}{10}$$

b)

$$\sum \frac{2^k}{3} = \frac{1}{3} + \frac{2}{3} + \frac{4}{3} + \dots + \frac{4096}{3}$$

c)

$$\sum (-1)^i \cdot i^2 = (-9) + 16 - 25 + \dots + 324$$

d)

$$\sum (4j^2 - j) = 14 + 33 + 60 + 96 + \dots + 1580$$

**Lösung:**

a)

$$\sum_{i=3}^{10} \frac{1}{i}$$

c)

$$\sum_{i=3}^{18} (-1)^i \cdot i^2$$

b)

$$\sum_{k=0}^{12} \frac{2^k}{3}$$

d)

$$\sum_{j=2}^{20} (4j^2 - j)$$

### Satz Summen Zusammenstellung

- Summe der Einsen

$$\sum_{i=1}^n 1 = n$$

- Summe der Indices

$$\sum_{i=1}^n i = \frac{n \cdot (n + 1)}{2}$$

- Summe von Quadraten

$$\sum_{i=1}^n i^2 = \frac{n \cdot (n + 1) \cdot (2n + 1)}{6}$$

- Summe von Kuben

$$\sum_{i=1}^n i^3 = \frac{n^2 \cdot (n + 1)^2}{2^2}$$

- Exponentialsumme

$$\sum_{k=0}^n r^k = \frac{1 - r^{n+1}}{1 - r}$$

Falls eine Grenze gegen  $\infty$  oder  $-\infty$  geht, sprechen wir von Reihen. Summen der Form  $\sum_{i=1}^n i$  sind dann algebraische Reihen und Summen der Form  $\sum_{k=0}^n r^k$  sind dann geometrische Reihen. Ihre Konvergenz wird in der Analysis besprochen.

### Beispiel 9.18 Rechenregeln für Summen

R4K83X

a)  $\sum_{i=1}^{15} 4i - 5$

b)  $\sum_{k=0}^8 \frac{3^k}{4}$

**Lösung:**

a)

$$\sum_{i=1}^{15} 4i - 5 = 4 \cdot \sum_{i=1}^{15} i - 5 \sum_{i=1}^{15} 1 = 4 \cdot \frac{15 \cdot 16}{2} - 5 \cdot 15 = 405$$

b)

$$\sum_{k=0}^8 \frac{3^k}{4} = \frac{1}{4} \cdot \sum_{k=0}^8 3^k = \frac{1}{4} \cdot \frac{1 - 3^9}{1 - 3} = \frac{1}{4} \cdot 9841 = 2460.25$$

a)  $\sum_{i=1}^{10} (3i)^2$

c)  $\sum_{i=1}^{15} i^2 - 5$

b)  $\sum_{i=0}^9 2^{i+1}$

d)  $\sum_{i=1}^{11} (3i - 1) \cdot (3i + 1)$

**Lösung:**

a)

$$\sum_{i=1}^{10} (3i)^2 = 9 \cdot \sum_{i=1}^{10} i^2 = 9 \cdot \frac{10 \cdot 11 \cdot 21}{6} = 3465$$

b)

$$\sum_{i=0}^9 2^{i+1} = 2 \sum_{i=0}^9 2^i = 2 \cdot \frac{1 - 2^{10}}{1 - 2} = 2046$$

c)

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{15} i^2 - 5 &= \sum_{i=1}^{15} i^2 - 5 \sum_{i=1}^{15} 1 \\ &= \frac{15 \cdot 16 \cdot 31}{6} - 5 \cdot 15 = 1165 \end{aligned}$$

d)

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{11} (3i - 1) \cdot (3i + 1) &= \sum_{i=1}^{11} 9i^2 + 3i - 3i - 1 \\ &= 9 \sum_{i=1}^{11} i^2 - \sum_{i=1}^{11} 1 \\ &= 9 \cdot \frac{11 \cdot 12 \cdot 23}{6} - 11 = 4543 \end{aligned}$$

$$\sum_{i=6}^{10} (i - 1)$$

**Lösung:**

Um die Rechengesetze anwenden zu können, führen wir eine Indexverschiebung durch. Dabei ist das Ziel, dass die untere Grenze zu 1 wird. Also soll bei

der unteren Grenze ( $k = 1$ ) gelten

$$i = 6 = \underbrace{k}_{=1} + 5$$

Es ergibt sich das 'Übersetzungsschema'

$$\left[ \begin{array}{l} i = k + 5 \\ \text{oder auch: } k = i - 5 \end{array} \right]$$

Wir ersetzen damit alle  $i$

$$\sum_{k=1}^{10-5} ((k+5) - 1) = \sum_{k=1}^5 (k+4) = 35$$

### Beispiel 9.21 Indexverschiebung

VUMPOV

Bestimmen Sie die Werte der Platzhalter  $\square$

a)  $\sum_{i=4}^{10} (i+4) = \sum_{k=1}^{\square} (\square)$

d)  $\sum_{i=6}^{10} (25 - 10i + i^2) = \sum_{k=1}^{\square} (\square)$

b)  $\sum_{i=2}^8 (3-i) = \sum_{k=1}^{\square} (\square)$

e)  $\sum_{j=6}^{10} \frac{1}{4} \cdot 3^j = \sum_{k=0}^{\square} (\square)$

c)  $\sum_{i=5}^{20} (i^2 + 2i) = \sum_{k=\square}^{17} (\square)$

f)  $\sum_{j=2}^{80} \left(1 + \frac{1}{4}\right)^j = \sum_{k=\square}^{78} (\square)$

**Lösung:**

a) Wir finden  $4 = i = \underbrace{k}_{=1} + 3$  also  $i = k + 3$  und  $k = i - 3$

$$\sum_{i=4}^{10} (i+4) = \sum_{k=1}^7 (i+1)$$

b) Wir finden  $2 = i = \underbrace{k}_{=1} + 1$  also  $i = k + 1$  und  $k = i - 1$

$$\sum_{i=2}^8 (3-i) = \sum_{k=1}^7 (3 - (k+1)) = \sum_{k=1}^7 (2-k)$$

c) Wir finden  $20 = i = \underbrace{k}_{=17} + 3$  also  $i = k + 3$  und  $k = i - 3$

$$\sum_{i=5}^{20} (i^2 + 2i) = \sum_{k=2}^{17} ((k+3)^2 + 2(k+3)) \sum_{k=2}^{17} (k^2 + 8k + 15)$$



d) Wir finden  $6 = i = \underbrace{k}_{=1} + 5$  also  $i = k + 5$  und  $k = i - 5$

$$\sum_{i=6}^{10} (25 - 10i + i^2) = \sum_{k=1}^5 (25 - 10 \cdot (k + 5) + (k + 5)^2) = \sum_{k=1}^5 k^2$$

e) Wir finden  $6 = j = \underbrace{k}_{=0} + 6$  also  $j = k + 6$  und  $k = j - 6$

$$\sum_{j=6}^{10} \frac{1}{4} \cdot 3^j = \sum_{k=0}^4 \left(\frac{1}{4} 3^{k+6}\right) = \sum_{k=0}^4 \left(\frac{729}{4} 3^k\right)$$

f) Wir finden  $80 = j = \underbrace{k}_{=78} + 2$  also  $j = k + 2$  und  $k = j - 2$

$$\sum_{j=2}^{80} \left(1 + \frac{1}{4}\right)^j = \sum_{k=0}^{78} \left(1 + \frac{1}{4}\right)^{k+2}$$

### Beispiel 9.22 Rechenregeln + Indexverschiebung für Summen

2W2RMM

Benutzen Sie die Regeln unten um die Summen zu berechnen.

a)  $\sum_{i=0}^{15} 5 + 3i$

d)  $\sum_{i=0}^{12} 1 + (i + 3)^2$

b)  $\sum_{i=0}^9 50 - 5i$

e)  $\sum_{j=1}^{18} 3^{j-10}$

c)  $\sum_{i=5}^{10} \frac{i \cdot (i+1)}{2}$

f)  $\sum_{i=2}^8 (-5)^i$

**Lösung:**

a)

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^{15} 5 + 3i &= \sum_{i=1}^{16} 5 + 3 \cdot (i - 1) \\ &= \sum_{i=1}^{16} 2 + 3 \sum_{i=1}^{16} i \\ &= 2 \cdot 16 + 3 \cdot \frac{16 \cdot 17}{2} = 440 \end{aligned}$$

b)

$$\begin{aligned}\sum_{i=0}^9 50 - 5i &= \underbrace{50}_{i=0} + 50 \sum_{i=1}^9 1 - \underbrace{5 \cdot 0}_{i=0} - 5 \cdot \sum_{i=1}^9 i \\ &= 50 + 50 \cdot 9 - 5 \cdot \frac{9 \cdot 10}{2} = 275\end{aligned}$$

c)

$$\begin{aligned}\sum_{i=5}^{10} \frac{i \cdot (i+1)}{2} &= \frac{1}{2} \cdot \left\{ \sum_{i=5}^{10} i^2 + i \right\} \\ &= \frac{1}{2} \cdot \left\{ \sum_{i=1}^{10} i^2 - \sum_{i=1}^4 i^2 + \sum_{i=1}^{10} i - \sum_{i=1}^4 i \right\} \\ &= \frac{1}{2} \cdot \left\{ \frac{10 \cdot 11 \cdot 21}{6} - \frac{4 \cdot 5 \cdot 9}{6} + \frac{10 \cdot 11}{2} - \frac{4 \cdot 5}{2} \right\} = 200\end{aligned}$$

d)

$$\begin{aligned}\sum_{i=0}^{12} 1 + (i+3)^2 &= \sum_{i=1}^{13} 1 + (i+2)^2 = \sum_{i=1}^{13} i^2 + 4i + 5 \\ &= \sum_{i=1}^{13} i^2 + \sum_{i=1}^{13} i + 5 \sum_{i=1}^{13} 1 \\ &= \frac{13 \cdot 14 \cdot 27}{6} + 4 \cdot \frac{13 \cdot 14}{2} + 5 \cdot 13 = 1248\end{aligned}$$

e)

$$\begin{aligned}\sum_{j=1}^1 83^{j-10} &= \sum_{j=0}^1 73^{j-9} = \frac{1}{39} \sum_{j=0}^1 73^j \\ &= \frac{1}{39} \cdot \frac{1 - 3^{17+1}}{1 - 3} = 9841,5\end{aligned}$$

f)

$$\begin{aligned}\sum_{i=2}^8 (-5)^i &= \sum_{k=0}^7 (-5)^{k+1} = (-5) \cdot \sum_{k=0}^7 (-5)^k \\ &= (-5) \cdot \sum_{k=0}^7 (-5)^k = (-5) \cdot \frac{1 - (-5)^{7+1}}{1 - (-5)} = 325\,520\end{aligned}$$

## 9.5 Matrix-Produkt: assoziativ und distributiv, aber nicht kommutativ

$$\text{a) } A \odot B = \begin{pmatrix} 3 & 0 & 0 & 3 & 3 \\ 9 & 2 & 7 & 0 & 1 \\ 2 & 5 & 2 & 7 & 3 \\ 3 & 0 & 4 & 8 & 2 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} 0 & 5 & 2 \\ 4 & 7 & 3 \\ 6 & 0 & 4 \\ 4 & 0 & 2 \\ 5 & 3 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 27 & 24 & 12 \\ 55 & 62 & 52 \\ 75 & 54 & 41 \\ 66 & 21 & 38 \end{pmatrix} = C$$

$$\text{b) } \begin{array}{c|c} & \begin{pmatrix} 0 & 5 & 2 \\ 4 & 7 & 3 \\ 6 & 0 & 4 \\ 4 & 0 & 2 \\ 5 & 3 & 0 \end{pmatrix} \\ \hline \begin{pmatrix} 3 & 0 & 0 & 3 & 3 \\ 9 & 2 & 7 & 0 & 1 \\ 2 & 5 & 2 & 7 & 3 \\ 3 & 0 & 4 & 8 & 2 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 27 & 24 & 12 \\ 55 & 62 & 52 \\ 75 & 54 & 41 \\ 66 & 21 & 38 \end{pmatrix} \end{array}$$

$$\text{c) } \begin{array}{c|c} & \begin{pmatrix} 0 & b_{12} & 2 \\ 4 & b_{22} & 3 \\ 6 & b_{32} & 4 \\ 4 & b_{42} & 2 \\ 5 & b_{52} & 0 \end{pmatrix} \\ \hline \begin{pmatrix} 3 & 0 & 0 & 3 & 3 \\ 9 & 2 & 7 & 0 & 1 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ 3 & 0 & 4 & 8 & 2 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 27 & 24 & 12 \\ 55 & 62 & 52 \\ 75 & c_{32} & 41 \\ 66 & 21 & 38 \end{pmatrix} \end{array}$$

Abbildung 9.1: **a)** Wir betrachten das Produkt der Matrizen  $A$  und  $B$ . Das Resultat nennen wir  $C$ . **b)** Wir wählen einen Eintrag in  $C$  aus, und verfolgen rückwärts welche Zeilen und Spalten zu diesem Element einen Beitrag geleistet haben: Es ist die 3. Zeile in  $A$  und die 2. Spalte in  $B$ . **c)** Nun betrachten wir die Indices aller relevanten Zeilen und Spalten. Wir sehen, dass dies  $a_{3,:}$  und  $b_{:,2}$  sind. Aus der Summe  $\sum_{k=1}^5 a_{3,k} \cdot b_{k,2}$  ergibt sich  $c_{3,2}$ .

### Definition Matrixprodukt

Die Matrizen  $A = [a_{i,j}] \in \mathbb{R}^{n \times m}$  und  $B = [b_{i,j}] \in \mathbb{R}^{p \times q}$  können multipliziert werden

$$C = A \odot B \text{ mit } c_{i,j} = \sum_{k=1}^m a_{i,k} \cdot b_{k,j}$$

falls sie in den Dimensionen übereinstimmen, d.h.  $m = p$ .

### Definition Drehungen in $\mathbb{R}^2$

$$R(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{bmatrix}$$

Die Matrix  $R(\varphi)$  stellt eine Rotation im Gegenuhrzeigersinn in der  $x - y$ -Ebene dar.

### Infobox Verknüpfung von Abbildungen

Das Ausführen von Transformationen nacheinander entspricht dem **Multiplizieren von Matrizen**.

Achtung bei der Reihenfolge: Für die eine Spiegelung **S** und die Drehung **R** bedeutet  $\mathbf{S} \odot \mathbf{R} \odot \vec{v}$ , dass der Vektor  $\vec{v}$  **zuerst** gedreht und dann gespiegelt wird. Das ist etwas gewöhnungsbedürftig, weil wir sonst von links nach rechts lesen.

### Beispiel 9.23 Eigenschaften der Matrixmultiplikation 2

9Y8SWL

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \vec{v} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix}, \vec{w} = \begin{pmatrix} -1 \\ -3 \end{pmatrix}$$

Berechne folgende Ausdrücke:

$$\mathbf{M} \odot \vec{v}, \mathbf{M} \odot \vec{w}, \mathbf{M} \odot (2\vec{v})$$

$$\mathbf{M} \odot (3\vec{w}), \mathbf{M} \odot (\vec{v} + \vec{w}), \mathbf{M} \odot (\vec{v} - \vec{w})$$

Berechne nun mit Hilfe der obigen Zwischenresultaten

$$\mathbf{M} \odot (\vec{v} + \vec{w}) - (\mathbf{M} \odot \vec{v} + \mathbf{M} \odot \vec{w}), \mathbf{M} \odot (\vec{v} - \vec{w}) - (\mathbf{M} \odot \vec{v} - \mathbf{M} \odot \vec{w})$$

$$\mathbf{M} \odot (2\vec{v}) - 2\mathbf{M} \odot \vec{v}, \mathbf{M} \odot (3\vec{w}) - (3\mathbf{M} \odot \vec{w})$$

Welche Rechenregeln lassen sich vermuten aufgrund der Resultate?

**Lösung:**

- $\mathbf{M} \odot \vec{v} = \begin{pmatrix} 5 \\ -3 \end{pmatrix}; \mathbf{M} \odot \vec{w} = \begin{pmatrix} -4 \\ 3 \end{pmatrix}$
- $\mathbf{M} \odot (2\vec{v}) = \begin{pmatrix} 10 \\ -6 \end{pmatrix}, \mathbf{M} \odot (3\vec{w}) = \begin{pmatrix} -12 \\ 9 \end{pmatrix}$
- $\mathbf{M} \odot (\vec{v} + \vec{w}) = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{M} \odot (\vec{v} - \vec{w}) = \begin{pmatrix} 9 \\ -6 \end{pmatrix}$

Die Differenzen anhand der Zwischenresultate ergeben immer null. Wir vermuten, dass folgende allgemeinen Regeln gelten:

- $\mathbf{M} \odot (\vec{v} + \vec{w}) = \mathbf{M} \odot \vec{v} + \mathbf{M} \odot \vec{w}$
- $\mathbf{M} \odot (\lambda\vec{v}) = \lambda\mathbf{M} \odot \vec{v}$
- Abbildungen mit diesen Eigenschaften nennt man **lineare Abbildungen**.

### Beispiel 9.24 Rechenregeln Matrix-Multiplikation 1

Y2ANUD

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} -8 & 0 & -4 \\ 4 & 6 & 3 \\ 0 & -3 & -1 \end{bmatrix}, \mathbf{E} = \begin{bmatrix} -7 \\ 0 \\ 2 \end{bmatrix}, \mathbf{P} = 3\mathbf{C} = \begin{bmatrix} -24 & 0 & -12 \\ 12 & 18 & 9 \\ 0 & -9 & -3 \end{bmatrix}$$

Wir berechnen

$$\mathbf{C} \odot \mathbf{E} = \begin{pmatrix} 48 \\ -22 \\ -2 \end{pmatrix} \text{ und } \mathbf{P} \odot \mathbf{E} = \begin{pmatrix} 144 \\ -66 \\ -6 \end{pmatrix}$$

- Welchen Zusammenhang vermuten Sie?
- Welchen Namen hat das Gesetz, das Sie entdeckt haben?
- Können Sie Ihre Vermutung beweisen für allgemeine Matrizen?

**Lösung:**

a) Wir erkennen, dass

$$(3\mathbf{C}) \odot \mathbf{E} = 3 \cdot (\mathbf{C} \odot \mathbf{E})$$

b) Das ist ein Assoziativgesetz. Die Multiplikation mit 3 kann an eine beliebige Matrix gekoppelt werden.

c) Wir betrachten die Definitionen oben und schreiben die Elemente des Produkts als:

$$\mathbf{P} = (\lambda \cdot \mathbf{C}) \text{ mit } p_{i,j} = \lambda \cdot c_{i,j}$$

Jetzt rechnen wir das Matrixprodukt aus:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{P} \odot \mathbf{E} \text{ mit } q_{i,j} = \sum_{k=1}^m p_{i,k} \cdot e_{k,j} = \sum_{k=1}^m (\lambda \cdot c_{i,k}) \cdot e_{k,j} = \lambda \cdot \sum_{k=1}^m c_{i,k} \cdot e_{k,j}$$

Der letzte Ausdruck enthält das Matrix-Produkt  $\mathbf{C} \odot \mathbf{E}$ .

### Beispiel 9.25 Rechenregeln Matrix-Multiplikation 2

95K4V9

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} -8 & 0 & -4 \\ 4 & 6 & 3 \\ 0 & -3 & -1 \end{bmatrix}, \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & -4 & -3 \\ 7 & 9 & 2 \\ -1 & 0 & -5 \end{bmatrix}, \mathbf{E} = \begin{bmatrix} -7 \\ 0 \\ 2 \end{bmatrix}, \mathbf{S} = \mathbf{C} + \mathbf{D} = \begin{bmatrix} -8 & -4 & -7 \\ 11 & 15 & 5 \\ -1 & -3 & -6 \end{bmatrix}$$

Wir berechnen

$$\mathbf{C} \odot \mathbf{E} = \begin{pmatrix} 48 \\ -22 \\ -2 \end{pmatrix} \text{ und } \mathbf{D} \odot \mathbf{E} = \begin{pmatrix} -6 \\ -45 \\ -3 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{C} \odot \mathbf{E} + \mathbf{D} \odot \mathbf{E} = \begin{pmatrix} 42 \\ -67 \\ -5 \end{pmatrix} \text{ und } \mathbf{S} \odot \mathbf{E} = \begin{pmatrix} 42 \\ -67 \\ -5 \end{pmatrix}$$

- Welchen Zusammenhang vermuten Sie?
- Welchen Namen hat das Gesetz, das Sie entdeckt haben?
- Können Sie ihre Vermutung beweisen für allgemeine Matrizen?

**Lösung:**

a) Wir erkennen, dass

$$\mathbf{C} \odot \mathbf{E} + \mathbf{D} \odot \mathbf{E} = (\mathbf{C} + \mathbf{D}) \odot \mathbf{E}$$

b) Das ist ein Distributivgesetz. Die Multiplikation mit  $\mathbf{E}$  wird auf die Summanden verteilt.

c) Wir betrachten die Definitionen oben und schreiben die Elemente der Summe als:

$$\mathbf{S} = (\mathbf{C} + \mathbf{D}) \text{ mit } s_{i,j} = c_{i,j} + d_{i,j}$$

Jetzt rechnen wir das Matrixprodukt aus:

$$\mathbf{P} = \mathbf{S} \odot \mathbf{E} \text{ mit } p_{i,j} = \sum_{k=1}^m s_{i,k} \cdot e_{k,j} = \sum_{k=1}^m (c_{i,k} + d_{i,k}) \cdot e_{k,j} = \sum_{k=1}^m c_{i,k} \cdot e_{k,j} + \sum_{k=1}^m d_{i,k} \cdot e_{k,j}$$

Die letzten beiden Ausdrücke sind die Matrix-Produkte  $\mathbf{C} \odot \mathbf{E}$  und  $\mathbf{D} \odot \mathbf{E}$ .

### Beispiel 9.26 Verkettung von Abbildungen

926268

Wir arbeiten mit folgenden Matrizen:

$$\mathbf{R}(90^\circ) = \begin{pmatrix} \cos(90^\circ) & -\sin(90^\circ) \\ \sin(90^\circ) & \cos(90^\circ) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \text{ und } \mathbf{S} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix},$$

d.h. mit der Drehung  $\mathbf{R}$  um  $\varphi = 90^\circ$  und der Spiegelung an der  $x$ -Achse. Es soll das Dreieck  $ABC$  abgebildet werden:

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix}, \vec{B} = \begin{pmatrix} 3 \\ -1 \end{pmatrix}, \vec{C} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

- i) Konstruieren Sie das Dreieck  $ABC$  gross auf ein Blatt Papier.
- ii) Berechnen Sie die Position der Ecken unter der Abbildung  $\mathbf{S} \odot \mathbf{R}$  und zeichnen Sie  $A'B'C'$  in die Grafik ein.
- iii) Berechnen Sie die Position der Ecken unter der Abbildung  $\mathbf{R} \odot \mathbf{S}$  und zeichnen Sie  $A''B''C''$  in die Grafik ein.

**Lösung:**

i) Siehe Graphik.

$$\text{ii) } \vec{A}' = \mathbf{S} \odot \mathbf{R} \odot \vec{A} = \begin{pmatrix} -2 \\ -2 \end{pmatrix}, \vec{B}' = \begin{pmatrix} 1 \\ -3 \end{pmatrix}, \vec{C}' = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\text{iii) } \vec{A}'' = \mathbf{R} \odot \mathbf{S} \odot \vec{A} = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix}, \vec{B}'' = \begin{pmatrix} -1 \\ 3 \end{pmatrix}, \vec{C}'' = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix}$$

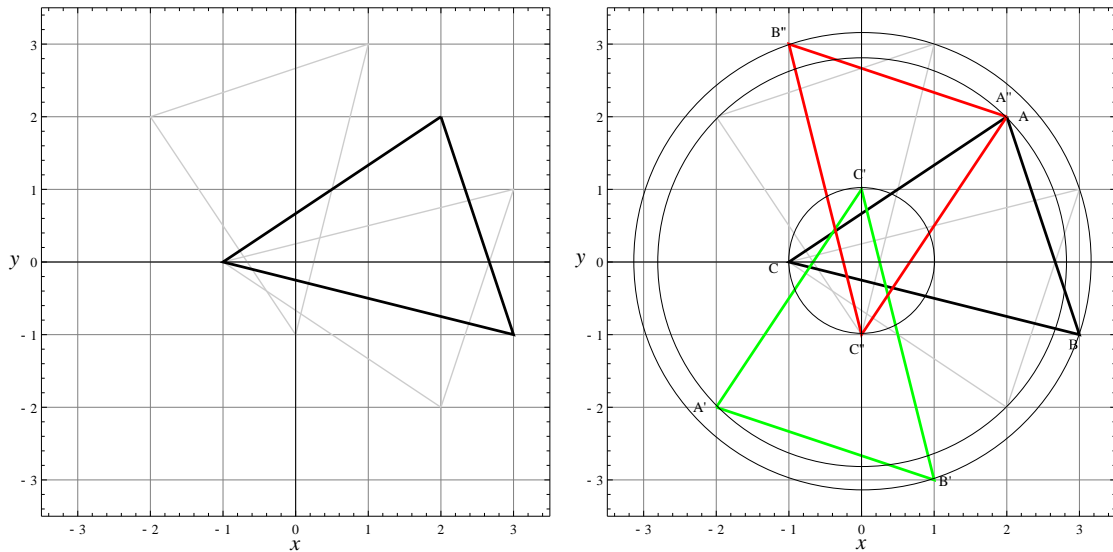


Abbildung 9.2: Zur Aufgabe 9.26

Hier sieht man, dass die Matrixmultiplikation nicht kommutativ ist, denn es ist  $\vec{A}' \neq \vec{A}''$ . Es kommt auf die Reihenfolge des Ausführens an!

### Satz Gesetze für das Matrixprodukt

- Die Matrix-Multiplikation ist im Allgemeinen **nicht kommutativ**

$$\mathbf{M} \odot \mathbf{S} \neq \mathbf{S} \odot \mathbf{M} .$$

Es gibt aber spezielle Matrizen, trotzdem miteinander kommutieren.

- $(\mathbf{C} + \mathbf{D}) \odot \mathbf{E} = \mathbf{C} \odot \mathbf{E} + \mathbf{D} \odot \mathbf{E}$  (distributiv)
- Für  $\lambda \in \mathbb{R}$ :  $(\lambda \cdot \mathbf{D}) \odot \mathbf{E} = \lambda \cdot (\mathbf{D} \odot \mathbf{E}) = \mathbf{D} \odot (\lambda \cdot \mathbf{E})$  (assoziativ und kommutativ mit einem Skalar)
- $(\mathbf{C} \odot \mathbf{D}) \odot \mathbf{E} = \mathbf{C} \odot (\mathbf{D} \odot \mathbf{E})$  (assoziativ)

## 9.6 Produkt einer Matrix mit einem Vektor

### Infobox Interpretation des Matrix-Produkts

Das Produkt einer Matrix mit einem Spaltenvektor kann interpretiert werden als

- als Linearkombination der Spaltenvektoren
- als 'Einsetzen einer Lösung in die Koeffizienten-Matrix'
- als Abbildung des Vektors (z.B. es wird ein Vektor gedreht oder gespiegelt).

### Beispiel 9.27 Linearkombination

LQF58M

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} -6 \\ 6 \\ 9 \end{pmatrix}, \vec{v} = \begin{pmatrix} 0 \\ -2 \\ 1 \end{pmatrix}, \vec{w} = \begin{pmatrix} 0 \\ 7 \\ -7 \end{pmatrix}, \vec{l} = \begin{pmatrix} -1 \\ 6 \\ 1 \end{pmatrix}, \mathbf{A} = (\vec{u}, \vec{v}, \vec{w})$$

Berechne folgende Ausdrücke

a)  $-1 \cdot \vec{u} + 6 \cdot \vec{v} + 1 \cdot \vec{w}$

b)  $\mathbf{A} \odot \vec{l}$

#### Lösung:

Wir beobachten:  $\vec{l}$  enthält als Komponenten die Koeffizienten der Linearkombination. Wenn wir nun die Linearkombination

$$-1 \cdot \begin{pmatrix} -6 \\ 6 \\ 9 \end{pmatrix} + 6 \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ -2 \\ 1 \end{pmatrix} + 1 \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 7 \\ -7 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6 \\ -11 \\ -10 \end{pmatrix}$$

berechnen, ergibt sich das Gleiche, wie wenn wir die Matrix  $\mathbf{A}$  mit dem Vektor  $\vec{l}$  multiplizieren

$$\mathbf{A} \odot \vec{l} = \begin{pmatrix} -6 & 0 & 0 \\ 6 & -2 & 7 \\ 9 & 1 & -7 \end{pmatrix} \odot \underbrace{\begin{pmatrix} -1 \\ 6 \\ 1 \end{pmatrix}}_{=\vec{l}} = \begin{pmatrix} 6 \\ -11 \\ -10 \end{pmatrix}.$$

### Beispiel 9.28 Linearkombination

T46Q97

Stellen Sie folgende Linearkombinationen als Matrix-Produkt dar. Berechnen Sie dann den Vektor.

a)

$$-8 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 6 \\ 0 \end{pmatrix} + 3 \cdot \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix} + (-2) \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ -5 \\ -1 \end{pmatrix}$$

b)

$$-4 \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 3 \end{pmatrix} + 3 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 3 \\ -1 \\ 15 \end{pmatrix}$$



**Lösung:**

a)

$$\underbrace{\begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 6 & 0 & -5 \\ 0 & 5 & -1 \end{pmatrix}}_{\mathbf{A}} \odot \underbrace{\begin{pmatrix} -8 \\ 3 \\ -2 \end{pmatrix}}_{\vec{i}} = \begin{pmatrix} -11 \\ -38 \\ 17 \end{pmatrix} .$$

b)

$$\underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 1 & 3 \\ -1 & 0 & -1 \\ 3 & 4 & 15 \end{pmatrix}}_{\mathbf{A}} \odot \underbrace{\begin{pmatrix} -4 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix}}_{\vec{i}} = \begin{pmatrix} 6 \\ 3 \\ 15 \end{pmatrix} .$$

**Beispiel 9.29 Matrix mal Vektor = Einsetzen in Koeffizientenmatrix CNNZ8U**

Wir betrachten das LGS

$$\left| \begin{array}{l} E_1 : \quad x_1 \quad -x_2 \quad +2x_3 \quad = \quad 1 \\ E_2 : \quad 6x_1 \quad +x_2 \quad -x_3 \quad = \quad 5 \end{array} \right|$$

mit der Koeffizientenmatrix

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 2 \\ 6 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

der *partikulären Lösung* (Aufpunkt)

$$\vec{x}_p = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \\ -1 \end{pmatrix}$$

und der *homogenen Lösung* (Richtungsvektor)

$$\vec{x}_h = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ 13 \\ 7 \end{pmatrix}$$

- Berechnen Sie das Produkt  $\mathbf{A} \odot \vec{x}_p$
- Setzen Sie  $\vec{x}_p$  in die linke Seite des Gleichungssystems ein
- Berechnen Sie das Produkt  $\mathbf{A} \odot \vec{x}_h$ .
- Geben Sie möglichst viele Lösungen des LGS an.

**Lösung:**

a) Produkt

$$\mathbf{A} \odot \vec{x}_p = \begin{pmatrix} 1 \\ 5 \end{pmatrix}$$

Wir nennen die Liste der Koeffizienten  $\begin{pmatrix} 1 \\ 5 \end{pmatrix} =: \vec{b}$  die Inhomogenität. Achtung: Wir bezeichnen dies als Vektor, obwohl es nicht in  $\mathbb{R}^3$  liegt wie die Lösung, sondern in  $\mathbb{R}^2$ .

b) Einsetzen linke Seite

$$\left| \begin{array}{ccc|c} 1 & -(-2) & +2 \cdot (-1) & = 1 \\ 6 \cdot 1 & +(-2) & -(-1) & = 5 \end{array} \right|$$

Linke Seite und rechte Seite des Gleichungssystems stimmen überein, also ist  $\vec{x}_p$  tatsächlich eine partikuläre Lösung.

c) Einsetzen linke Seite

$$\mathbf{A} \odot \vec{x}_h = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Also ist  $\vec{x}_h$  tatsächlich eine homogene Lösung, denn der Richtungsvektor  $\vec{x}_h$  steht tatsächlich senkrecht auf den Normalenvektoren der Ebenen.

d) Alle Lösungen des LGS können angegeben werden über den Ausdruck

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \vec{x}_p + \lambda \cdot \vec{x}_h \text{ mit } \lambda \in \mathbb{R}$$

**Beispiel 9.30 Matrix mal Vektor = Einsetzen in Koeffizientenmatrix XGG-MA7**

Handelt es sich bei den Lösungen unten um partikuläre Lösungen, homogene Lösungen oder gar keine Lösung?

Befehle: \*

a)

$$\left| \begin{array}{ccc|c} E_1 : & 4x & +4y & -16z & = & 4 \\ E_2 : & x & & -4z & = & 2 \\ E_3 : & 5x & +2y & -20z & = & 8 \end{array} \right|$$

und

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{v} = \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}, \vec{w} = \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

b)

$$\left| \begin{array}{ccc|c} E_1 : & 3x_1 & +5x_2 & -x_3 & = & 7 \\ E_2 : & -x_1 & +5x_2 & -6x_3 & = & 0 \end{array} \right|$$

und

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} -25/20 \\ 19/20 \\ 1 \end{pmatrix}, \vec{v} = \begin{pmatrix} 35/20 \\ 7/20 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{w} = \begin{pmatrix} 1/20 \\ 26/20 \\ 1 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

a) Wir lesen die Koeffizientenmatrix aus

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 4 & 4 & -16 \\ 1 & 0 & -4 \\ 5 & 2 & -20 \end{pmatrix}$$

und berechnen die Produkte

$$\mathbf{C} \odot \vec{u} = \begin{pmatrix} 4 \\ 2 \\ 8 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{C} \odot \vec{v} = \begin{pmatrix} -8 \\ -4 \\ -16 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{C} \odot \vec{w} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Also ist  $\vec{u}$  eine inhomogenen Lösung (Aufpunkt),  $\vec{v}$  keine Lösung und  $\vec{w}$  eine homogene Lösung (Richtungsvektor).

b) Wir lesen die Koeffizientenmatrix aus

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 3 & 5 & -1 \\ -1 & 5 & -6 \end{pmatrix}$$

und berechnen die Produkte

$$\mathbf{C} \odot \vec{u} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{C} \odot \vec{v} = \begin{pmatrix} 7 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{C} \odot \vec{w} = \begin{pmatrix} 5.65 \\ 0.45 \end{pmatrix}$$

Also ist  $\vec{u}$  eine homogene Lösung (Richtungsvektor),  $\vec{v}$  eine partikuläre Lösung (Aufpunkt) und  $\vec{w}$  keine Lösung.

Wir betrachten das LGS

$$\mathbf{A} \odot \vec{x} = \vec{b}$$

mit der Koeffizientenmatrix  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ , den Unbekannten  $\vec{x} \in \mathbb{R}^n$  und der Inhomogenität  $\vec{b} \in \mathbb{R}^m$ . Es sei  $\vec{x}_p$  eine partikuläre Lösung. Ausserdem sei  $\text{Rang}(\mathbf{A}) < m$ , d.h. es gibt eine homogene Lösung  $\vec{x}_h$ .

a) Berechnen Sie folgende Ausdrücke

$$\mathbf{A} \odot \vec{x}_p, \mathbf{A} \odot \vec{x}_h, \mathbf{A} \odot (\vec{x}_p + \vec{x}_h), \mathbf{A} \odot (\vec{x}_p - 3 \cdot \vec{x}_h), \mathbf{A} \odot (\vec{x}_p - \lambda \cdot \vec{x}_h)$$

für  $\lambda \in \mathbb{R}$ .

b) Zeigen Sie, dass die Lösung eines LGS stets die Form  $\vec{x}_p + \lambda \cdot \vec{x}_h$  hat.

**Lösung:**

a) Berechnen Sie folgende Ausdrücke

$$\begin{aligned} \mathbf{A} \odot \vec{x}_p &= \vec{b} \\ \mathbf{A} \odot \vec{x}_h &= \vec{0} \\ \mathbf{A} \odot (\vec{x}_p + \vec{x}_h) &= \vec{b} + \vec{0} = \vec{b} \\ \mathbf{A} \odot (\vec{x}_p - 3 \cdot \vec{x}_h) &= \mathbf{A} \odot \vec{x}_p - 3 \cdot \mathbf{A} \odot \vec{x}_h = \vec{b} - 3 \cdot \vec{0} = \vec{b} \\ \mathbf{A} \odot (\vec{x}_p - \lambda \cdot \vec{x}_h) &= \mathbf{A} \odot \vec{x}_p - \lambda \cdot (\mathbf{A} \odot \vec{x}_h) = \vec{b} - \lambda \cdot \vec{0} = \vec{b} \end{aligned}$$

b) Falls  $\vec{x}_p + \lambda \cdot \vec{x}_h$  eine Lösung ist, dann können wir den Ausdruck ins LGS einsetzen und erhalten die Inhomogenität:

$$\mathbf{A} \odot (\vec{x}_p + \lambda \cdot \vec{x}_h) = \mathbf{A} \odot \vec{x}_p + \lambda \cdot (\mathbf{A} \odot \vec{x}_h) = \vec{b} + \lambda \cdot \vec{0} = \vec{b}$$

## 9.7 Spezielle Matrizen

### Beispiel 9.32 Spezielle Matrizen

653JPW

Matrizen stellen Abbildungen von Vektoren dar. Sie drehen, spiegeln, projizieren oder strecken Vektoren. Hier lernen Sie typische Matrizen kennen. Wir arbeiten mit dem Dreieck:

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix}, \vec{B} = \begin{pmatrix} -1 \\ 3 \end{pmatrix}, \vec{C} = \begin{pmatrix} -2 \\ -1 \end{pmatrix}$$

Zeichnen Sie es gross auf. Benennen Sie die jeweiligen Abbildungen mit Worten, z.B. Drehung, Spiegelung, Projektion usw. Beachte dazu die Innenwinkel des Dreiecks, die Kantenlängen und den Umlaufsinn des Dreiecks.

a) Berechne und zeichne das Bild des Dreiecks unter der Abbildung  $M = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ .

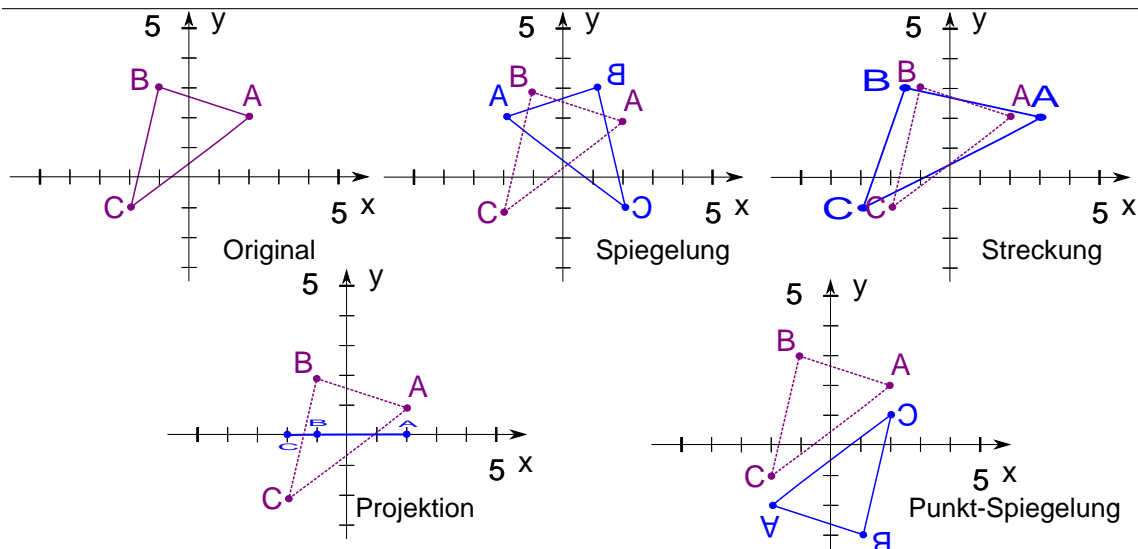


Abbildung 9.3: Zur Aufgabe 9.32. Das Original-Dreieck und die vier Bilder.

- b) Berechne und zeichne das Bild von  $ABC$  unter der Abbildung  $S = \begin{pmatrix} 1.5 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ .
- c) Berechne und zeichne das Bild von  $ABC$  unter der Abbildung  $P = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ .
- d) Berechne und zeichne das Bild von  $ABC$  unter der Abbildung  $S' = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$ .

**Lösung:**

a)  $\{\vec{A}', \vec{B}', \vec{C}'\} = \left\{ \begin{pmatrix} -2 \\ 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \end{pmatrix} \right\}$ . Die Längen und Innenwinkel bleiben erhalten. Der Umlaufsinn wechselt.  $M$  ist eine Spiegelung an der  $y$ -Achse.

b)  $\{\vec{A}', \vec{B}', \vec{C}'\} = \left\{ \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -1.5 \\ 3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -3 \\ -1 \end{pmatrix} \right\}$ .

Die Längen und Innenwinkel ändern. Der Umlaufsinn bleibt erhalten.  $S$  ist eine Streckung mit dem Faktor 1.5 (nur in  $x$ -Richtung).

c)  $\{\vec{A}', \vec{B}', \vec{C}'\} = \left\{ \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -2 \\ 0 \end{pmatrix} \right\}$ . Die Längen und Innenwinkel ändern. Der Umlaufsinn verliert seine Bedeutung.  $P$  ist eine Projektion auf die  $x$ -Achse.

d)  $\{\vec{A}', \vec{B}', \vec{C}'\} = \left\{ \begin{pmatrix} -2 \\ -2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ -3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$ . Die Längen und Innenwinkel bleiben erhalten. Der Umlaufsinn bleibt erhalten.  $S'$  ist eine Punktspiegelung am Ursprung.

### Definition Abbildungen in $\mathbb{R}^2$

Folgende Matrizen können als Abbildungen interpretiert werden ( $s \in \mathbb{R}$ ):

- $M = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ : Spiegelung an der  $y$ -Achse
- $M' = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$ : Spiegelung an der  $x$ -Achse
- $M'' = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$ : Punktspiegelung an  $\vec{0}$ .
- $S = \begin{pmatrix} s & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ : Streckung entlang der  $x$ -Achse
- $S' = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & s \end{pmatrix}$ : Streckung entlang der  $y$ -Achse
- $P = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ : Projektion auf die  $x$ -Achse

### Definition Quadratische Matrizen

Eine quadratische Matrix  $A$  hat gleich viele Spalten wie Zeilen:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ & & \dots & \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{n \times n}$$

### Definition Diagonalmatrix

Eine quadratische Matrix heisst Diagonalmatrix, falls alle Elemente ausserhalb der Diagonalen gleich 0 sind

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & \\ 0 & a_{22} & \dots & 0 \\ & & \dots & \\ 0 & 0 & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{n \times n}$$

Wir schreiben auch  $A = \text{diag}(a_{11}, a_{22}, \dots, a_{nn})$ , wobei  $a_{ii}$ , die Diagonalelemente sind.

### Definition Nullmatrix

$$\mathbf{0} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ & \dots & & \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

### Definition Einheitsmatrix

Eine Diagonalmatrix

$$\mathbf{1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ & \dots & & \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

heisst Einheitsmatrix oder auch Eins-Matrix.

### Definition Inverse Matrix

Falls es eine Matrix  $\mathbf{B}$  gibt, so, dass

$$\mathbf{A} \odot \mathbf{B} = \mathbf{1},$$

dann heisst  $\mathbf{B}$  die inverse Matrix von  $\mathbf{A}$

### Beispiel 9.33 Umformungen von Matrizen

EQVI4M

Berechnen Sie die Transponierte und die Inverse der folgenden Matrizen. (Inverse mit Matlab).

Befehle: `'`, `transpose()`, `inv()`

$$\begin{array}{lll} \text{a) } \mathbf{A} = \begin{pmatrix} -8 & 65 \\ 1 & -8 \end{pmatrix} & \text{b) } \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 3 & 10 & 6 \\ 1 & 3 & 3 \\ 3 & 6 & 19 \end{pmatrix} & \text{c) } \mathbf{C} = \begin{pmatrix} 9 & 82 & 64 & 82 \\ 1 & 9 & 8 & 9 \\ 8 & 64 & 129 & 59 \\ 9 & 82 & 59 & 108 \end{pmatrix} \end{array}$$

**Lösung:**

$$\begin{array}{l} \text{a) } \mathbf{A}^T = \begin{pmatrix} -8 & 1 \\ 65 & -8 \end{pmatrix}, \mathbf{C}^{-1} = \begin{pmatrix} 8 & 65 \\ 1 & 8 \end{pmatrix}, \\ \text{b) } \mathbf{B}^T = \begin{pmatrix} 3 & 1 & 3 \\ 10 & 3 & 6 \\ 6 & 3 & 19 \end{pmatrix}, \mathbf{B}^{-1} = \begin{pmatrix} -39 & 154 & -12 \\ 10 & -39 & 3 \\ 3 & -12 & 1 \end{pmatrix}, \end{array}$$

$$c) \mathbf{C}^T = \begin{pmatrix} 9 & 1 & 8 & 9 \\ 82 & 9 & 64 & 82 \\ 64 & 8 & 129 & 59 \\ 82 & 9 & 59 & 108 \end{pmatrix}, \mathbf{C}^{-1} = \begin{pmatrix} -16249 & 166482 & -2080 & -400 \\ 1586 & -16249 & 203 & 39 \\ 203 & -2080 & 26 & 5 \\ 39 & -400 & 5 & 1 \end{pmatrix}$$

### Beispiel 9.34 Symmetrische und antisymmetrische Matrizen

TKB9RA

Wir betrachten jetzt nur quadratische Matrizen  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ . Wir nennen eine Matrix symmetrisch, falls gilt  $\mathbf{A}^T = \mathbf{A}$  und antisymmetrisch falls  $\mathbf{A}^T = -\mathbf{A}$ .

- a) Ergänzen Sie die folgenden Matrizen zu symmetrischen und antisymmetrischen Matrizen.

Symmetrisch:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 3 & 3 \\ \square & -6 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} -7 & -1 & 8 \\ \square & 6 & 9 \\ \square & \square & -7 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} -2 & \square & \square \\ -1 & 8 & 7 \\ 5 & \square & -2 \end{bmatrix}$$

Antisymmetrisch:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & -7 \\ \square & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{E} = \begin{bmatrix} \square & -1 & 8 \\ \square & \square & 9 \\ \square & \square & \square \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \square & \square & 6 \\ -1 & \square & \square \\ \square & 7 & \square \end{bmatrix}$$

- b) Berechnen Sie  $\mathbf{X} = \frac{\mathbf{A}^T + \mathbf{A}}{2}$ ,  $\mathbf{Y} = \frac{\mathbf{A}^T - \mathbf{A}}{2}$  und  $\mathbf{Z} = \mathbf{X} + \mathbf{Y}$  für folgende Matrizen, wobei sie für  $\mathbf{A}$  nacheinander die Matrizen  $\mathbf{G}$ ,  $\mathbf{H}$  oder  $\mathbf{J}$  einsetzen. Was stellen Sie fest?

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} -10 & -7 \\ 1 & -2 \end{bmatrix}, \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 3 & 9 & -10 \\ 4 & -8 & -3 \\ 9 & 10 & 3 \end{bmatrix}, \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 3 & 7 & -3 \\ 2 & 1 & 5 \\ 2 & -6 & 5 \end{bmatrix}$$

- c) Fassen Sie die Resultate von dieser Aufgabe zusammen. Beantworten Sie mindestens folgende Fragen: Wie sieht die Diagonale einer antisymmetrischen Matrix aus? Welche Symmetrie haben die Matrizen  $\mathbf{X} = \frac{\mathbf{A}^T + \mathbf{A}}{2}$  und  $\mathbf{Y} = \frac{\mathbf{A}^T - \mathbf{A}}{2}$ ? Was ergibt  $\mathbf{X} + \mathbf{Y}$ ?
- d) Überlegen Sie, wie Sie  $(\mathbf{A} + \mathbf{B})^T$  aus den Transponierten  $\mathbf{A}^T$  und  $\mathbf{B}^T$  und berechnen können. Was bedeutet  $(\mathbf{B}^T)^T$ ? Beweisen Sie damit Ihre Vermutungen aus der vorherigen Teilaufgabe.

**Lösung:**

- a) Ergänzen Sie die folgenden Matrizen zu symmetrischen und antisymmetrischen Matrizen.



Symmetrisch:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 3 & 3 \\ 3 & -6 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} -7 & -1 & 8 \\ -1 & 6 & 9 \\ 8 & 9 & -7 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} -2 & -2 & 5 \\ -1 & 8 & 7 \\ 5 & 7 & -2 \end{bmatrix}$$

Antisymmetrisch:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & -7 \\ 7 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 8 \\ 1 & 0 & 9 \\ -8 & -9 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 6 \\ -1 & 0 & -7 \\ -6 & 7 & 0 \end{bmatrix}$$

b)

$$\mathbf{G}_x = \frac{\mathbf{G}^T + \mathbf{G}}{2} = \begin{bmatrix} -10 & -3 \\ -3 & -2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G}_y = \frac{\mathbf{G}^T - \mathbf{G}}{2} = \begin{bmatrix} 0 & -4 \\ 4 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H}_x = \begin{bmatrix} 3 & \frac{13}{2} & -\frac{1}{2} \\ \frac{13}{2} & -8 & \frac{7}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{7}{2} & 3 \end{bmatrix}, \mathbf{H}_y = \begin{bmatrix} 0 & \frac{5}{2} & -\frac{19}{2} \\ -\frac{5}{2} & 0 & -\frac{13}{2} \\ \frac{19}{2} & \frac{13}{2} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_x = \begin{bmatrix} 3 & \frac{9}{2} & -\frac{1}{2} \\ \frac{9}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 5 \end{bmatrix}, \mathbf{J}_y = \begin{bmatrix} 0 & \frac{5}{2} & -\frac{5}{2} \\ -\frac{5}{2} & 0 & \frac{11}{2} \\ \frac{5}{2} & -\frac{11}{2} & 0 \end{bmatrix}$$

Wir stellen fest, dass  $\frac{\mathbf{G}^T + \mathbf{G}}{2}$  eine symmetrische Matrix ergibt und  $\frac{\mathbf{G}^T - \mathbf{G}}{2}$  immer eine antisymmetrische.

Ausserdem sind  $\mathbf{G}_z$ ,  $\mathbf{H}_z$ ,  $\mathbf{J}_z$  wieder die Ausgangsmatrizen, z.B.  $\mathbf{G}_z = \mathbf{G}$

c) Die Diagonale einer antisymmetrischen Matrix besteht aus lauter Nullen.  $\mathbf{X} = \frac{\mathbf{A}^T + \mathbf{A}}{2}$  ist symmetrisch,  $\mathbf{Y} = \frac{\mathbf{A}^T - \mathbf{A}}{2}$  ist antisymmetrisch.

d) Es gilt

$$(\mathbf{A} + \mathbf{B})^T = \mathbf{A}^T + \mathbf{B}^T$$

und  $(\mathbf{B}^T)^T = \mathbf{B}$ . Daraus können wir die Symmetrie von  $\mathbf{X}$  und  $\mathbf{Y}$  berechnen:

$$\mathbf{X}^T = \left[ \frac{\mathbf{A}^T + \mathbf{A}}{2} \right]^T = \frac{1}{2} \cdot [\mathbf{A}^T + (\mathbf{A}^T)^T] = \frac{\mathbf{A}^T + \mathbf{A}}{2} = \mathbf{X}$$

und

$$\mathbf{Y}^T = \left[ \frac{\mathbf{A}^T - \mathbf{A}}{2} \right]^T = \frac{1}{2} \cdot [\mathbf{A}^T - (\mathbf{A}^T)^T] = \frac{\mathbf{A}^T - \mathbf{A}}{2} = -\mathbf{Y}$$

## 9.8 Übersicht Matlab

---

### Transposition

Bestimme die Transponierte der folgenden Matrizen ( $i = \sqrt{-1}$  ist die komplexe Einheit):

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 2 \\ 3 & -2 \\ 2 & 4 \\ -1 & -2 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 7 \\ i \\ 3 \end{bmatrix}$$

```
A= [0 2 ; 3 -2 ; 2 4 ; -1 -2 ];
```

```
B= [ 7 ; i ; 3 ];
```

```
A'
```

```
> 0 3 2 -1
```

```
> 2 -2 4 -2
```

```
transpose(A)
```

```
> 0 3 2 -1
```

```
> 2 -2 4 -2
```

```
B'
```

```
> 7 -i 3
```

```
transpose(B)
```

```
> 7 i 3
```

' ist die Komplexe-Konjugation. Sie unterscheidet sich nur dann von der Transponierten, wenn die Matrix komplexe Zahlen enthält.

### Inverse Matrix

Bestimme die inversen Matrizen.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 2 \\ 3 & -2 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 3 & -2 \end{bmatrix}$$

```
A= [ 0 2 ; 3 -2 ];
```

```
B= [ 1 2 ; 3 -2 ];
```

```
C=inv(A)
```

```
> -1.0 1.0
```

```
> 0.5 0.0
```

```
% Kontrolle:
```

```
A*C
```

```
> 1.0 0.0
```

```
> 0.0 1.0
```

```
inv(B)
```

```
> error
```

inv(B) berechnet die inverse Matrix. Sie existiert aber nicht für alle Matrizen. Wieso, das sehen wir später.

## Matrixprodukt vs. elementweises Produkt

---

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 2 \\ 3 & -2 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 3 \end{bmatrix}$$

Berechne das Matrixprodukt ( $\odot$ ) und das elementweise Produkt ( $\cdot$ ).

- |                                  |                                  |                                  |
|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| a) $\mathbf{A} \odot \mathbf{B}$ | c) $\mathbf{A} \odot \mathbf{A}$ | e) $\mathbf{B} \odot \mathbf{B}$ |
| b) $\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$ | d) $\mathbf{A} \cdot \mathbf{A}$ | f) $\mathbf{B} \cdot \mathbf{B}$ |

```
A= [0 2 ; 3 -2 ];
B= [ 0 ; 3 ];
A*B % a)
> 6 6
A.*B % b)
> error
A*A % c)
> 2 4
> 2 6
A.*A % d)
> 0 4
> 9 4
B*B % e)
> error
B.*B % f)
> 0
> 9
```

Mit `.*` werden nur die entsprechenden Matrix-Elemente miteinander multipliziert, mit `*` wird hingegen das Matrix-Produkt berechnet. Mit dem vorangestellten Punkt können viele Verknüpfungen Elementweise ausgeführt werden (`./` `.^`).

---

10.1 Linearität einer Abbildung $\mathcal{L}$ überprüfen . . . . .	274
10.2 Matrix der Darstellung einer linearen Abbildung berechnen . . . . .	284
10.3 Matrizen für zusammengesetzte Abbildungen . . . . .	290
10.4 Matrizen für Zeilenoperationen . . . . .	293

---

## 10.1 Linearität einer Abbildung $\mathcal{L}$ überprüfen

### Abbildungen (Funktion)

#### Definition Abbildung/Funktion

Eine Abbildung (oder Funktion)  $\mathcal{L}$  ordnet jedem Element  $x$  einer Definitionsmenge  $D$  genau ein Element  $y$  einer Zielmenge  $Z$  zu.

$$\mathcal{L} : D \rightarrow Z, \quad x \mapsto y$$

Wir nennen

- $x$  das Argument der Abbildung
- $y = \mathcal{L}(x)$  das Bild von  $x$  (oder den Funktionswert).

### Infobox Begriffe: Abbildungen (Funktionen)

- Wir stellen uns Abbildungen gerne als Maschinen  $L(x)$  vor. In die Klammer ( $x$ ) schreiben wir das, was wir der Maschine zur Verarbeitung übergeben.
- Wir nennen  $x$  auch den Input oder – wie oben – das Argument von  $L$
- Wir nennen  $y = \mathcal{L}(x)$  auch den Output oder – wie oben – das Bild von  $x$
- Sie haben bisher Abbildungen sicherlich unter dem Begriff ‘Funktion’ kennengelernt, z.B.  $f(x) = x^2$  oder  $g(x) = \sin(x)$ . In unserem aktuellen Kontext würden wir schreiben  $\mathcal{L}(x) = x^2$  oder  $\mathcal{G}(x) = \sin(x)$  und für diese beiden Funktionen angeben  $\mathcal{L} : \mathbb{R}^1 \rightarrow \mathbb{R}^1$  und auch  $\mathcal{G} : \mathbb{R}^1 \rightarrow \mathbb{R}^1$
- Wird eine Abbildung allgemein angegeben  $\mathcal{L}(\vec{x})$ , dann nehmen wir an, dass die Definitionsmenge  $\mathbb{R}^m$  ist und die Zielmenge  $\mathbb{R}^n$ , mit  $m, n \in \mathbb{N}$ .

### Beispiel 10.1 Zwei Notationen für lineare Abbildungen

J2MVFF

Geben Sie die Abbildungen in beiden Notationen an. Geben Sie an, für welchen Input die Funktion definiert ist und welche Dimension der Output hat.

$$\mathcal{L}(x, y, z) = \begin{pmatrix} -3y \\ 0 \end{pmatrix}$$

. Benutze auch  $\vec{v} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix}$

**Lösung:**

Die andere Notation ist

$$\mathcal{L}(\vec{v}) = \begin{pmatrix} (0, -3, 0) \odot \vec{v} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -3v_2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Das ist jedes Mal die selbe Abbildung. Um präzise zu sein, geben wir die Dimensionen des Inputs und des Outputs an

$$\mathcal{L} : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$$

### Beispiel 10.2 Zwei Notationen für lineare Abbildungen

AP4X4W

Geben Sie die folgenden Abbildungen in alle Notationen an. Geben Sie an, für welchen Input die Funktion definiert ist und welche Dimension der Output hat.

a)  $\mathcal{L}(x, y, z) = 5x - y + 1$

b)  $\mathcal{R}(\vec{v}) = \vec{v} \odot \vec{w}$  mit  $\vec{w} \in \mathbb{R}^3$ .

c)  $\mathcal{P}(x, y) = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) \cdot x \\ \sin(\varphi) \cdot y \end{pmatrix}$  und  $x, y, \varphi \in \mathbb{R}$

d)  $\mathcal{L}(\vec{v}) = \vec{v} \odot \vec{v}$  wobei  $\vec{v} \in \mathbb{R}^2$

**Lösung:**

a)  $\mathcal{L}(x, y, z) = 5x - y + 1$ , oder  $\mathcal{L}(\vec{v}) = (5, -1, 0) \odot \vec{v}$

$$\mathcal{L} : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$$

b)  $\mathcal{R}(\vec{v}) = \vec{v} \odot \vec{w}$  mit  $\vec{w} \in \mathbb{R}^3$ , oder  $\mathcal{R}(x, y, z) = x \cdot w_1 + y \cdot w_2 + z \cdot w_3$

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

c)  $\mathcal{P}(x, y) = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) \cdot x \\ \sin(\varphi) \cdot y \end{pmatrix}$  und  $\varphi \in \mathbb{R}$ , oder  $\mathcal{P}(\vec{v}) = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & 0 \\ 0 & \sin(\varphi) \end{pmatrix} \odot \vec{v}$

$$\mathcal{P} : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$$

d)  $\mathcal{C}(\vec{v}) = \vec{v} \odot \vec{v}$ , oder  $\mathcal{C}(x, y) = x^2 + y^2$

$$\mathcal{C} : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$$

## Linearität

### Definition Lineare Abbildung

Eine Abbildung  $\mathcal{L} : V \rightarrow W, \vec{v} \mapsto \mathcal{L}(\vec{v})$  heisst **linear** genau dann, wenn für alle  $\vec{v}, \vec{w} \in V$  und  $\lambda$  gilt:

- **Homogenität:**  $\mathcal{L}(\lambda \cdot \vec{v}) = \lambda \cdot \mathcal{L}(\vec{v})$
- **Additivität:**  $\mathcal{L}(\vec{v} + \vec{w}) = \mathcal{L}(\vec{v}) + \mathcal{L}(\vec{w})$

Dabei sind  $V$  und  $W$  Vektorräume, z.B.  $\mathbb{R}^n$  und  $\mathbb{R}^m$  und  $\lambda \in \mathbb{R}$  ist ein Skalar.

[?, p.454]

### Beispiel 10.3 Linearität

IMSW1Y

Zeigen Sie, dass die folgenden Abbildungen  $L$  linear oder nicht linear sind.

Wir schreiben  $\vec{v} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \end{pmatrix}$

a)  $\mathcal{L}(\vec{v}) = \vec{v} \odot \vec{w}$  mit  $\vec{w} \in \mathbb{R}^3$ .

b)  $\mathcal{R}(x, y, z) = 5x - y + 1$

**Lösung:**

Die Untersuchung kann in einer beliebigen Notation gemacht werden. Hier übernehmen wir die Notation, die in der Aufgabenstellung gebraucht wurde.

a) Homogenität

$$\mathcal{L}(\lambda \cdot \vec{v}) = (\lambda \cdot \vec{v}) \odot \vec{w} = \lambda \cdot \underbrace{(\vec{v} \odot \vec{w})}_{=\mathcal{L}(\vec{v})} = \lambda \cdot \mathcal{L}(\vec{v})$$

Additivität

$$\mathcal{L}(\vec{u} + \vec{v}) = (\vec{u} + \vec{v}) \odot \vec{w} = \underbrace{\vec{u} \odot \vec{w}}_{=\mathcal{L}(\vec{u})} + \underbrace{\vec{v} \odot \vec{w}}_{=\mathcal{L}(\vec{v})} = \mathcal{L}(\vec{u}) + \mathcal{L}(\vec{v})$$

Die Funktion ist also linear

b) Homogenität:

$$\mathcal{R}(\lambda \cdot x, \lambda \cdot y, \lambda \cdot z) = 5 \cdot (\lambda \cdot x) - (\lambda \cdot y) + 1 \neq \lambda \cdot 5 \cdot x - \lambda \cdot y + \lambda = \lambda \cdot \mathcal{R}(x, y, z)$$

Wegen der 1, die addiert wird, ist es nicht möglich  $\lambda$  ganz auszuklammern. Also ist die Funktion nicht linear.

#### Beispiel 10.4 Bild des Nullvektors

RGK9W3

Wir betrachten die lineare Abbildung  $\mathcal{L} : V \rightarrow W$ , die Vektoren  $\vec{x}_1, \vec{x}_2 \in V$  und  $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R}$ :

a) Berechnen Sie  $\mathcal{L}(\vec{0})$

b) Stellen Sie  $\mathcal{C}(\lambda_1 \vec{x}_1 + \lambda_2 \vec{x}_2)$  mit Hilfe von  $\mathcal{C}(\vec{x}_1)$  und  $\mathcal{C}(\vec{x}_2)$  dar.

**Lösung:**

a) Wir wissen, dass die Abbildung linear ist. Deshalb gilt

$$\mathcal{L}(\lambda \cdot \vec{v}) = \lambda \cdot \mathcal{L}(\vec{v}) \Rightarrow \mathcal{L}(\lambda \cdot \vec{0}) = \lambda \cdot \mathcal{L}(\vec{0})$$

Wir setzen nun  $\lambda = 0$

$$\mathcal{L}(\underbrace{0 \cdot \vec{0}}_{=\vec{0}}) = 0 \cdot \underbrace{\mathcal{L}(\vec{0})}_{=\vec{0}}$$

Links ändert die Multiplikation mit 0 nichts am Nullvektor, rechts erhalten wir ebenfalls den Nullvektor, denn jeder Vektor wird zum Nullvektor, falls er mit 0 multipliziert wird. Also

$$\mathcal{L}(\vec{0}) = \vec{0}$$

b) Wir benutzen Additivität und Homogenität:

$$\mathcal{C}(\lambda_1 \vec{x}_1 + \lambda_2 \vec{x}_2) = \mathcal{C}(\lambda_1 \cdot \vec{x}_1) + \mathcal{C}(\lambda_2 \cdot \vec{x}_2) = \lambda_1 \cdot \mathcal{C}(\vec{x}_1) + \lambda_2 \cdot \mathcal{C}(\vec{x}_2)$$

### Satz Eigenschaften linearer Abbildungen

Gegeben sei eine lineare Abbildung  $\mathcal{L} : V \rightarrow W$ , die Vektoren  $\vec{x}_1, \vec{x}_2 \in V$  und  $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R}$ :

- Der Nullvektor  $\vec{0}$  in  $V$  wird auf den Nullvektor  $\vec{0}$  in  $W$  abgebildet:

$$\mathcal{L}(\vec{0}) = \vec{0}.$$

Es kann aber weitere Vektoren  $\vec{x} \neq 0$  mit  $\mathcal{L}(\vec{x}) = \vec{0}$  geben.

- Das Bild einer Linearkombination von Vektoren ist gleich der Linearkombination der Bildvektoren, oder

$$\mathcal{L}(\lambda_1 \vec{x}_1 + \lambda_2 \vec{x}_2) = \lambda_1 \cdot \mathcal{L}(\vec{x}_1) + \lambda_2 \cdot \mathcal{L}(\vec{x}_2)$$

[?, p.454]

Finden wir  $L(\vec{0}) \neq \vec{0}$ , dann ist die Abbildung sicher nicht linear.

### Beispiel 10.5 Linearität

8AVYCE

Zeigen Sie, dass die folgenden Abbildungen  $L$  linear/nicht linear sind.

Wir schreiben  $\vec{v} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \end{pmatrix}$

- $\mathcal{L}(x) = x^2$  mit  $x \in \mathbb{R}^1$ .
- $\mathcal{L}(\vec{v}) = \begin{pmatrix} \cos(v_1) \\ \sin(v_2) \end{pmatrix}$  mit  $\vec{v} \in \mathbb{R}^2$ .
- $\mathcal{L}(x, y, z) = 5x - y + 1$  mit  $x, y, z \in \mathbb{R}$ .

**Lösung:**

a) Vortest

$$\mathcal{L}(\vec{0}) = 0^2 = 0$$

Dies könnte ein lineare Abbildung sein. Wir überprüfen die Homogenität:

$$\mathcal{L}(\lambda \cdot x) = (\lambda \cdot x)^2 = \lambda^2 \cdot (x)^2 \neq \lambda \cdot (x)^2$$

Wir sehen jetzt, dass es dennoch keine lineare Abbildung ist.

b) Vortest

$$\mathcal{L}(\vec{0}) = \begin{pmatrix} \cos(0) \\ \sin(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \neq \vec{0}$$

Dies ist also keine lineare Abbildung.



c) Vortest

$$\mathcal{L}(0, 0, 0) = 5 \cdot 0 - 0 + 1 \neq 0$$

Dies ist also keine lineare Abbildung.

### Infobox Beweis der Linearität

Beim Beweis der **Homogenität** macht man typischerweise folgende Schritte (hier gezeigt an der Funktion  $\mathcal{L}(\vec{v}) = \vec{v} \odot \vec{w}$ ,  $\mathcal{L} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^1$  mit  $\vec{w} \in \mathbb{R}^n$ ):

i) Funktion auswerten

$$\mathcal{L}(\lambda \cdot \vec{v}) = (\lambda \cdot \vec{v}) \odot \vec{w}$$

ii)  $\lambda$  ausklammern  $\lambda(\vec{v} \odot \vec{w})$

iii) für einen Ausdruck wieder  $\mathcal{L}(\vec{v})$  schreiben

$$\lambda \cdot \mathcal{L}(\vec{v})$$

Für die **Additivität** sind dies ähnliche Schritte:

i) Funktion auswerten

$$\mathcal{L}(\vec{u} + \vec{v}) = (\vec{u} + \vec{v}) \odot \vec{w}$$

ii) Ausdruck aufteilen (ausmultiplizieren):  $\vec{u} \odot \vec{w} + \vec{v} \odot \vec{w}$

iii) Ausdrücke mit Hilfe von  $L$  schreiben

$$\mathcal{L}(\vec{u}) + \mathcal{L}(\vec{v})$$

### Beispiel 10.6 Lineare Funktion

QKBUT2

a) Wir betrachten die Funktion  $f(x) = -3x$  also  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ . Berechnen Sie die Funktionswerte für

$$a = 3, b = 2, c = 3 + 2, b = 5 \cdot 3$$

b) Betrachten Sie ihre Resultate und formulieren Sie eine Hypothese, wie man die Funktionswerte für  $u = v + w$  und  $p = \lambda \cdot v$  berechnen kann, wenn man die Bilder  $f(v)$  und  $f(w)$  kennt.

c) Untersuchen Sie, ob die Funktion  $f(x) = m \cdot x$  linear ist.

d) Untersuchen Sie, ob die Funktion  $f(x) = m \cdot x + c$  linear ist.

**Lösung:**

a) Die Funktionswerte sind

$$\begin{aligned}f(3) &= -3 \cdot 3 = -9 \\f(2) &= -3 \cdot 2 = -6 \\f(3+2) &= -3 \cdot (3+2) = -15 \\f(5 \cdot 3) &= -3 \cdot (5 \cdot 3) = -45\end{aligned}$$

b) Wir beobachten, dass man mit dem Distributiv-Gesetz rechnen könnte

$$f(3+2) = -3 \cdot (3+2) = -3 \cdot 3 + (-3) \cdot 2 = -9 - 6 = f(3) + f(2)$$

und mit dem Assoziativgesetz

$$f(5 \cdot 3) = -3 \cdot (5 \cdot 3) = 5 \cdot (-3) \cdot 3 = 5 \cdot (-9) = 5 \cdot f(3)$$

Allgemein könnte man vermuten, dass

$$\begin{aligned}f(\lambda \cdot x_1) &= \lambda \cdot f(x_1) \\f(x_1 + x_2) &= f(x_1) + f(x_2)\end{aligned}$$

c) Homogenität:

$$f(\lambda \cdot x) = m \cdot (\lambda \cdot x) = \lambda \cdot (m \cdot x) = \lambda \cdot f(x)$$

Additivität:

$$f(x_1 + x_2) = m \cdot (x_1 + x_2) = m \cdot x_1 + m \cdot x_2 = f(x_1) + f(x_2)$$

Die Funktion ist also linear.

d) Homogenität:

$$f(\lambda \cdot x) = m \cdot (\lambda \cdot x) + c = \lambda \cdot (m \cdot x) + c$$

Es gibt keine Möglichkeit  $\lambda$  ganz auszuklammern, also ist diese Funktion *nicht linear*. Dies obwohl sie wegen der Form (eine Linie) "lineare Funktion" genannt wird.

### Beispiel 10.7 Matrix $\odot$ Vektor linear?

591417

Wir betrachten die Abbildung

$$\mathcal{L}(\vec{v}) := \mathbf{M} \odot \vec{a} =: \vec{b}$$

mit der Matrix

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

Durch die Multiplikation der Matrix mit einem Vektor haben wir also eine Abbildung  $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ , denn  $\vec{a} \in \mathbb{R}^2$  und  $\vec{b} \in \mathbb{R}^2$ . Untersuchen Sie, ob diese Abbildung linear ist, d.h. ob gilt

$$\begin{aligned}\mathcal{L}(\lambda \cdot \vec{v}) &= \lambda \cdot \mathcal{L}(\vec{v}) \\ \mathcal{L}(\vec{v} + \vec{w}) &= \mathcal{L}(\vec{v}) + \mathcal{L}(\vec{w})\end{aligned}$$

also

$$\mathbf{M} \odot (\lambda \cdot \vec{v}) = \lambda \cdot (\mathbf{M} \odot \vec{v}).$$

und

$$\mathbf{M} \odot (\vec{v} + \vec{w}) = \mathbf{M} \odot \vec{v} + \mathbf{M} \odot \vec{w}$$

Betrachten Sie in diesem Beispiel vorläufig nur die Vektoren

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix}, \vec{w} = \begin{pmatrix} -1 \\ -3 \end{pmatrix} \text{ und } \lambda = 3$$

**Lösung:**

Wir berechnen die vier Vektoren auf jeder Seite der Gleichungen

$$\mathbf{M} \odot (3 \cdot \vec{v}) = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} 6 \\ 9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 15 \\ -9 \end{pmatrix}$$

$$3 \cdot (\mathbf{M} \odot \vec{v}) = 3 \cdot \begin{pmatrix} 5 \\ -3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 15 \\ -9 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{M} \odot (\vec{v} + \vec{w}) = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{M} \odot \vec{v} + \mathbf{M} \odot \vec{w} = \begin{pmatrix} 5 \\ -3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -4 \\ 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Wir finden also, dass in diesem Beispiel gilt

$$\mathbf{M} \odot (\lambda \cdot \vec{v}) = \lambda \cdot (\mathbf{M} \odot \vec{v})$$

$$\mathbf{M} \odot (\vec{v} + \vec{w}) = \mathbf{M} \odot \vec{v} + \mathbf{M} \odot \vec{w}$$

Wir vermuten deshalb, dass dies wahrscheinlich für alle Vektoren  $\vec{v}$  und  $\vec{w}$  gilt.

Wir werden später sehen, dass es viele Beispiele gibt für lineare Abbildungen — auch bei Themen, wo wir es nicht vermutet hätten. Der nachfolgende Satz besagt, dass die Matrix-Multiplikation ein Beispiel für eine lineare Abbildung ist.

### Satz Matrix-Vektor-Multiplikation als lineare Abbildung

Sei  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{m \times n}$  eine Matrix mit  $m$  Zeilen und  $n$  Spalten. Die Abbildung

$$\mathcal{L} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$$

mit  $\mathcal{L}(\vec{v}) := \mathbf{A} \odot \vec{v}$  ist linear.

[?, p.456]

Wir hätten die Abbildung im Satz 10.2 auch mit dem Ausdruck

$$\vec{v} \mapsto \mathcal{L}(\vec{v}) := \mathbf{A} \odot \vec{v}$$

definieren können.

### Beispiel 10.8 Linearität

YHRNUS

Zeigen Sie, dass die folgenden Abbildungen  $L$  linear/nicht linear sind und geben Sie (falls möglich) die entsprechende Darstellung als Matrix in der Standard-Basis an.

Wir schreiben  $\vec{v} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^2$

a)  $\mathcal{L}(x, y) = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) \cdot x \\ \sin(\varphi) \cdot y \end{pmatrix}$  und  $\varphi \in \mathbb{R}$       g)  $\mathcal{L}(\vec{v}) = \begin{pmatrix} v_1 + v_2 \\ v_1 \end{pmatrix}$

b)  $\mathcal{L}(\vec{v}) = \vec{v} \odot \vec{v}$ .

h)  $\mathcal{L}(\vec{v}) = v_1$

c)  $\mathcal{L}(x, y) = (5y + 2x)$

i)  $\mathcal{L}(\vec{v}) = (v_1)^2$

d)  $\mathcal{L}(\vec{v}) = -\vec{v}$

e)  $\mathcal{L}(x, y) = \begin{pmatrix} \cos(y) \\ \sin(x) \end{pmatrix}$

j)  $\mathcal{L}(\vec{v}) = v_1 + 1$

f)  $\mathcal{L}(\vec{v}) = \begin{pmatrix} 0 \\ v_1 \cdot v_2 \end{pmatrix}$

k)  $\mathcal{L}(\vec{v}) = \begin{pmatrix} 3v_1 - 4v_2 \\ v_1 + 5v_2 \end{pmatrix}$

#### Lösung:

Die Untersuchung kann in einer beliebigen Notation gemacht werden. Hier übernehmen wir die Notation, die in der Aufgabenstellung gebraucht wurde.

a) Homogenität

$$\mathcal{L}(\lambda \cdot x, \lambda \cdot y) = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) \cdot (\lambda \cdot x) \\ \sin(\varphi) \cdot (\lambda \cdot y) \end{pmatrix} = \lambda \cdot \begin{pmatrix} \cos(\varphi) \cdot x \\ \sin(\varphi) \cdot y \end{pmatrix} = \lambda \cdot \mathcal{L}(x, y)$$

Additivität

$$\mathcal{L}(x + p, y + q) = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) \cdot (x + p) \\ \sin(\varphi) \cdot (y + q) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) \cdot x \\ \sin(\varphi) \cdot y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos(\varphi) \cdot p \\ \sin(\varphi) \cdot q \end{pmatrix} = \mathcal{L}(x, y) + \mathcal{L}(p, q)$$

Die Abbildung ist linear.  $\mathcal{L} : \mathbb{R}^2 \mapsto \mathbb{R}^2$

b) Homogenität:

$$\mathcal{L}(\lambda \cdot \vec{v}) = (\lambda \cdot \vec{v}) \odot (\lambda \cdot \vec{v}) = \lambda^2 \cdot \vec{v} \odot \vec{v}$$

Der Ausdruck ist quadratisch in  $\lambda$ , also ist die Funktion nicht linear.  $\mathcal{L} : \mathbb{R}^2 \mapsto \mathbb{R}^1$

c) Homogenität:

$$\mathcal{L}(\lambda \cdot x, \lambda \cdot y) = (5\lambda \cdot y + 2\lambda \cdot x) = \lambda \cdot (5y + 2x) = \lambda \cdot \mathcal{L}(x, y)$$

Additivität:

$$\mathcal{L}(x + a, y + b) = (5(y + b) + 2(x + a)) = (5y + 2x) + (5b + 2a) = \mathcal{L}(x, y) + \mathcal{L}(a, b)$$

Die Abbildung ist linear.  $\mathcal{L} : \mathbb{R}^2 \mapsto \mathbb{R}^1$ . Matrix:

$$M = [\mathcal{L}(1, 0), \mathcal{L}(0, 1)] = [(5 \cdot 0 + 2 \cdot 1), (5 \cdot 1 + 2 \cdot 0)] = [2 \ 5]$$

d) Homogenität:

$$\mathcal{L}(\lambda \cdot \vec{v}) = -(\lambda \cdot \vec{v}) = \lambda \cdot (-\vec{v}) = \lambda \cdot \mathcal{L}(\vec{v})$$

Additivität:

$$\mathcal{L}(\vec{v} + \vec{w}) = -(\vec{v} + \vec{w}) = -\vec{v} - \vec{w} = \mathcal{L}(\vec{v}) + \mathcal{L}(\vec{w})$$

Die Abbildung ist linear.  $\mathcal{L} : \mathbb{R}^2 \mapsto \mathbb{R}^2$ . Matrix:

$$M = [\mathcal{L}\left(\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}\right), \mathcal{L}\left(\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}\right)] = \left[-\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, -\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}\right] = -\mathbf{1}$$

e) Vortest

$$\mathcal{L}(0, 0) = \begin{pmatrix} \cos(0) \\ \sin(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \neq \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Test nicht bestanden, also ist  $\mathcal{L}$  nicht linear.  $\mathcal{L} : \mathbb{R}^2 \mapsto \mathbb{R}^2$

f) Homogenität:

$$\mathcal{L}(\lambda \cdot \vec{v}) = \begin{pmatrix} 0 \\ (\lambda \cdot v_1) \cdot (\lambda \cdot v_2) \end{pmatrix} = \lambda^2 \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ v_1 \cdot v_2 \end{pmatrix} \neq \lambda \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ v_1 \cdot v_2 \end{pmatrix} = \lambda \cdot \mathcal{L}(\vec{v})$$

Die Abbildung ist nicht homogen also auch nicht linear.  $\mathcal{L} : \mathbb{R}^2 \mapsto \mathbb{R}^2$

g) homogen und additiv  $\Rightarrow$  linear.  $\mathcal{L} : \mathbb{R}^2 \mapsto \mathbb{R}^2$ .

h) homogen und additiv  $\Rightarrow$  linear.  $\mathcal{L} : \mathbb{R}^2 \mapsto \mathbb{R}^1$ .

i) nicht homogen und nicht additiv  $\Rightarrow$  nicht linear.  $\mathcal{L} : \mathbb{R}^2 \mapsto \mathbb{R}^1$ .

j) nicht homogen und nicht additiv  $\Rightarrow$  nicht linear.  $\mathcal{L} : \mathbb{R}^2 \mapsto \mathbb{R}^1$ .

k) homogen und additiv  $\Rightarrow$  linear.  $\mathcal{L} : \mathbb{R}^2 \mapsto \mathbb{R}^2$ .

Übrigens hätte man bei einigen Abbildungen schon durch Einsetzen von  $\vec{0}$  herausfinden können, dass sie nicht linear sind.

**Beispiel 10.9 Überprüfe, ob die Abbildung  $L$  linear ist.**

410717

$$L(\vec{v}) = \frac{1}{101} \begin{pmatrix} v_1 - 10v_2 \\ -10v_1 + 100v_2 \end{pmatrix}$$

und  $L : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ . Bestimme danach die Matrix  $M$ , für die gilt

$$L(\vec{v}) = M \odot \vec{v}.$$

**Lösung:**

**Homogenität:**

$$L(\lambda \cdot \vec{v}) = \frac{1}{101} \begin{pmatrix} \lambda \cdot v_1 - 10\lambda \cdot v_2 \\ -10\lambda \cdot v_1 + 100\lambda \cdot v_2 \end{pmatrix} = \lambda \cdot \underbrace{\frac{1}{101} \begin{pmatrix} v_1 - 10v_2 \\ -10v_1 + 100v_2 \end{pmatrix}}_{=L(\vec{v})}$$

Die Homogenität ist also erfüllt.

**Additivität:**

$$\begin{aligned} L(\vec{v} + \vec{w}) &= \frac{1}{101} \begin{pmatrix} (v_1 + w_1) - 10(v_2 + w_2) \\ -10(v_1 + w_1) + 100(v_2 + w_2) \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{101} \left\{ \begin{pmatrix} v_1 - 10v_2 \\ -10v_1 + 100v_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} w_1 - 10w_2 \\ -10w_1 + 100w_2 \end{pmatrix} \right\} \\ &= \underbrace{\frac{1}{101} \begin{pmatrix} v_1 - 10v_2 \\ -10v_1 + 100v_2 \end{pmatrix}}_{=L(\vec{v})} + \underbrace{\frac{1}{101} \begin{pmatrix} w_1 - 10w_2 \\ -10w_1 + 100w_2 \end{pmatrix}}_{=L(\vec{w})} \end{aligned}$$

Die zugehörige Matrix lässt sich mit den Bildern der Basisvektoren bestimmen.

$$L(\vec{e}_1) = L\left(\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}\right) = \frac{1}{101} \begin{pmatrix} 1 \\ -10 \end{pmatrix}$$

$$L(\vec{e}_2) = L\left(\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}\right) = \frac{1}{101} \begin{pmatrix} -10 \\ 100 \end{pmatrix}$$

Die Matrix der Abbildung  $L$  ist also

$$\mathbf{A} = \left( \frac{1}{101} \begin{pmatrix} 1 \\ -10 \end{pmatrix}, \frac{1}{101} \begin{pmatrix} -10 \\ 100 \end{pmatrix} \right) = \frac{1}{101} \begin{pmatrix} 1 & -10 \\ -10 & 100 \end{pmatrix}$$

## 10.2 Matrix der Darstellung einer linearen Abbildung berechnen

### Satz Darstellung einer linearen Abbildung als Matrix

Zu jeder linearen Abbildung

$$\mathcal{L} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$$

gibt es genau eine Matrix  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ , so dass

$$\mathcal{L}(\vec{x}) = \mathbf{A} \odot \vec{x}.$$

[?, p.457]

Der Satz bedeutet, dass es zu jeder linearen Abbildung eine Matrix gibt, die erlaubt das Bild zu berechnen mit Hilfe der Matrix  $\mathbf{A}$  und der Matrixmultiplikation

$$\mathcal{L}(\vec{x}) = \mathbf{A} \odot \vec{x}.$$

### Infobox Matrix der Darstellung

Zur linearen Abbildung  $L : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$  und der Basis  $\vec{e}_1, \vec{e}_2 \dots \vec{e}_m$  gehört die Matrix

$$\mathbf{A} = [\mathcal{L}(\vec{e}_1), \mathcal{L}(\vec{e}_2), \dots] .$$

Sie enthält in den Spalten die Bilder der Basisvektoren.  $\mathcal{L}(\vec{e}_j) \in \mathbb{R}^n$ , also ist  $\mathbf{A}$  eine  $n \times m$ -Matrix.

### Beispiel 10.10 Matrix der Spiegelung

GNJDG3

Bestimme die Matrix der Spiegelung an der  $y$ -Achse. Vorgehen:

- Spiegle den Punkt  $\vec{A} = \begin{pmatrix} 5 \\ -3 \end{pmatrix}$  an der  $y$ -Achse
- Spiegle die Vektoren  $\vec{e}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$  und  $\vec{e}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$  an der  $y$ -Achse.
- Bestimme die Matrix  $\mathbf{S}$  der Spiegelung an der  $y$ -Achse
- Überprüfe das Resultat indem du  $\mathbf{S} \odot \vec{A}$  berechnest.

**Lösung:**

a) Spiegelung  $\vec{A}' = \begin{pmatrix} -5 \\ -3 \end{pmatrix}$

b)  $\vec{e}'_1 = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \end{pmatrix}$  und  $\vec{e}'_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$

c) Matrix

$$\mathbf{S} = [\vec{e}'_1, \vec{e}'_2] = \left[ \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right] = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

d) Test

$$\mathbf{S} \odot \vec{A} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \odot \begin{pmatrix} 5 \\ -3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -5 \\ -3 \end{pmatrix}$$

### Beispiel 10.11 Bestimme die Matrix der Abbildung, falls sie linear ist. 155513

a)  $\mathcal{L} : \mathbb{R}^2 \mapsto \mathbb{R}^2$  definiert durch  $L(x, y) = \begin{pmatrix} x + y \\ x \end{pmatrix}$

b)  $\mathcal{L} : \mathbb{R}^2 \mapsto \mathbb{R}$  definiert durch  $L(x, y) = 1$

c)  $\mathcal{D} : \mathbb{P}(n) \mapsto \mathbb{P}(n)$  definiert durch  $D(p(x)) = \frac{d}{dx}p(x)$ .  $\mathbb{P}$  sind alle Polynome von Grad  $n$

d)  $\mathcal{D} : \mathbb{T} \mapsto \mathbb{T}$  definiert durch  $D(p(x)) = \frac{d}{dx}p(x)$ .  $\mathbb{T}$  ist zweidimensional mit der Basis

$$\vec{e}_1 = \cos(x) \text{ und } \vec{e}_2 = \sin(x)$$

**Lösung:**

a) homogen und additiv (linear),  $M = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$

b) nicht linear, denn  $L(0,0) = 1$ .

c) Homogenität:

$$\mathcal{D}(\lambda \cdot p(x)) = \frac{d}{dx} \lambda \cdot p(x) = \lambda \cdot \frac{d}{dx} p(x) = \lambda \cdot \mathcal{D}(p(x))$$

Additivität:

$$\mathcal{D}(p(x) + q(x)) = \frac{d}{dx} (p(x) + q(x)) = \frac{d}{dx} p(x) + \frac{d}{dx} q(x) = \mathcal{D}(p(x)) + \mathcal{D}(q(x))$$

Die Abbildung erfüllt beide Kriterien, also ist sie linear. Wir bestimmen die Matrix für  $\mathbb{P}(2)$ , d.h. alle Polynome bis zweiten Grades. Eine mögliche Basis ist  $\vec{e}_1 = 1, \vec{e}_2 = x, \vec{e}_3 = x^2$ . In dieser Basis ist

$$\mathcal{D}(\vec{e}_1) = \frac{d}{dx} 1 = 0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathcal{D}(\vec{e}_2) = \frac{d}{dx} x = 1 = 1 \cdot \vec{e}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathcal{D}(\vec{e}_3) = \frac{d}{dx} x^2 = 2x = 2 \cdot \vec{e}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Diese Bilder schreiben wir in die Spalten der Matrix  $A$

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

d) Die Ableitung ist linear (vorherige Aufgabe). Also

$$\mathcal{D}(\vec{e}_1) = \frac{d}{dx} \cos(x) = -\sin(x) = -1 \cdot \vec{e}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathcal{D}(\vec{e}_2) = \frac{d}{dx} \sin(x) = \cos(x) = 1 \cdot \vec{e}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$



Diese Bilder schreiben wir in die Spalten der Matrix  $A$

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

### Beispiel 10.12 Projektionen

EPVI4M

Wir betrachten die Projektion auf die Gerade  $g : \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \end{pmatrix} (\lambda \in \mathbb{R})$ .

a) Projizieren Sie folgende Punkte auf die Gerade.

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} 6 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \vec{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 17 \end{pmatrix}, \quad \vec{C} = \begin{pmatrix} 6 \\ 17 \end{pmatrix}, \quad \vec{D} = \begin{pmatrix} 12 \\ 34 \end{pmatrix}$$

b) Betrachten Sie Ihre Resultate und formulieren Sie eine Hypothese, wie man die Projektionen der Vektoren  $\vec{u} = \vec{v} + \vec{w}$  und  $\vec{y} = \lambda \cdot \vec{v}$  berechnen kann, wenn man die Bilder  $P(\vec{v})$  und  $P(\vec{w})$  kennt. Hier bedeutet  $P(\vec{w})$ , dass  $\vec{w}$  auf den Punkt  $P(\vec{w}) \in \mathbb{R}^2$  fällt durch die Projektion.

c) Geben Sie die Projektion auf die Gerade  $h : \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \lambda \vec{a} (\lambda \in \mathbb{R})$  an. Untersuchen Sie, ob diese Projektion linear ist.

d) Untersuchen Sie, ob die Projektion auf die Gerade  $j : \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \vec{R} + \lambda \vec{a} (\lambda \in \mathbb{R})$  linear ist

**Lösung:**

a) Die Projektion bewerkstelligt die Funktion  $P(\vec{v}) = \frac{\vec{v} \odot \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \end{pmatrix}}{25} \cdot \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \end{pmatrix}$ . Die Bildpunkte sind also

$$P(\vec{A}) = \frac{\begin{pmatrix} 6 \\ 0 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \end{pmatrix}}{25} \cdot \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \end{pmatrix} = \frac{24}{25} \cdot \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \end{pmatrix}$$

und

$$P(\vec{B}) = \frac{51}{25} \cdot \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \end{pmatrix}, \quad P(\vec{C}) = \begin{pmatrix} 12 \\ 9 \end{pmatrix}, \quad P(\vec{D}) = \begin{pmatrix} 24 \\ 18 \end{pmatrix}$$

b) Wir vermuten, dass

$$\begin{aligned} P(\lambda \cdot \vec{v}) &= \lambda \cdot P(\vec{v}) \\ P(\vec{v} + \vec{w}) &= P(\vec{v}) + P(\vec{w}) \end{aligned}$$

c)

$$P(\lambda \cdot \vec{v}) = \frac{(\lambda \cdot \vec{v}) \odot \vec{a}}{|\vec{a}|^2} \cdot \vec{a} = \lambda \cdot \frac{\vec{v} \odot \vec{a}}{|\vec{a}|^2} \cdot \vec{a} = \lambda \cdot P(\vec{v})$$
$$P(\vec{v} + \vec{w}) = \frac{(\vec{v} + \vec{w}) \odot \vec{a}}{|\vec{a}|^2} \cdot \vec{a} = \frac{\vec{v} \odot \vec{a} + \vec{w} \odot \vec{a}}{|\vec{a}|^2} \cdot \vec{a} = \frac{\vec{v} \odot \vec{a}}{|\vec{a}|^2} \cdot \vec{a} + \frac{\vec{w} \odot \vec{a}}{|\vec{a}|^2} \cdot \vec{a} = P(\vec{v}) + P(\vec{w})$$

d) Die Projektion auf die Gerade  $j$  kann geschrieben werden als

$$P(\vec{v}) = \vec{R} + \frac{(\vec{v} - \vec{R}) \odot \vec{a}}{|\vec{a}|^2}$$

Homogenität:

$$P(\lambda \cdot \vec{v}) = \vec{R} + \frac{(\lambda \vec{v} - \vec{R}) \odot \vec{a}}{|\vec{a}|^2}$$

Es gibt keine Möglichkeit  $\lambda$  aus dem zweiten Ausdruck auszuklammern. Diese Projektion ist deshalb nicht homogen und also auch nicht linear.

**Beispiel 10.13 Bestimme die Matrix der Projektion auf die Gerade  $g : y = -10x$ .** **051137**

**Lösung:**

Die Gerade lautet in Parameterform

$$g : \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \lambda \underbrace{\begin{pmatrix} 1 \\ -10 \end{pmatrix}}_{=\vec{v}}$$

Wir bestimmen dazu die Bilder der Basisvektoren  $\vec{e}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$  und  $\vec{e}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ .

Für die Projektion brauchen wir den normierten Richtungsvektor der Geraden  $g$

$$\vec{v} = \frac{1}{\sqrt{101}} \begin{pmatrix} 1 \\ -10 \end{pmatrix}.$$

Wir führen die Projektionen durch

$$P(\vec{e}_1) = (\vec{e}_1 \odot \vec{v}) \vec{v} = \frac{1}{101} \begin{pmatrix} 1 \\ -10 \end{pmatrix}$$

und

$$P(\vec{e}_2) = (\vec{e}_2 \odot \vec{v}) \vec{v} = \frac{1}{101} \begin{pmatrix} -10 \\ 100 \end{pmatrix}.$$

Die Matrix der Projektion ist also

$$\mathbf{P} = \left[ \frac{1}{101} \begin{pmatrix} 1 \\ -10 \end{pmatrix}, \frac{1}{101} \begin{pmatrix} -10 \\ 100 \end{pmatrix} \right] = \frac{1}{101} \begin{bmatrix} 1 & -10 \\ -10 & 100 \end{bmatrix}$$

Wir betrachten

$$\vec{a} = a_1 \cdot \vec{e}_1 + a_2 \cdot \vec{e}_2 \text{ und } M = \begin{bmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} \\ m_{2,1} & m_{2,2} \\ \vdots & \vdots \\ m_{n,1} & m_{n,2} \end{bmatrix}$$

und eine lineare Abbildung  $L : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^n$ .

a) Drücken Sie den Vektor  $L(\vec{a})$  mit Hilfe von  $L(\vec{e}_1)$  und  $L(\vec{e}_2)$  aus.

b) Benutzen Sie die Spalten-Vektoren von  $M$  um das Produkt

$$M \odot \vec{a}$$

auszudrücken.

c) Zeigen Sie damit, dass die Darstellung von  $L$  die Matrix  $M = [L(\vec{e}_1), L(\vec{e}_2)]$  ist.

**Lösung:**

a) Aus der Linearität ergibt sich

$$L(\vec{a}) = L(a_1 \vec{e}_1 + a_2 \vec{e}_2) = a_1 \cdot L(\vec{e}_1) + a_2 \cdot L(\vec{e}_2)$$

b)

$$\begin{bmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} \\ m_{2,1} & m_{2,2} \\ \vdots & \vdots \\ m_{n,1} & m_{n,2} \end{bmatrix} \odot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{1,1} \\ m_{2,1} \\ \vdots \\ m_{n,1} \end{bmatrix} \cdot a_1 + \begin{bmatrix} m_{1,2} \\ m_{2,2} \\ \vdots \\ m_{n,2} \end{bmatrix} \cdot a_2$$

c) Wir vergleichen die Resultate von oben

$$a_1 \cdot \begin{bmatrix} m_{1,1} \\ m_{2,1} \\ \vdots \\ m_{n,1} \end{bmatrix} + a_2 \cdot \begin{bmatrix} m_{1,2} \\ m_{2,2} \\ \vdots \\ m_{n,2} \end{bmatrix} = a_1 \cdot L(\vec{e}_1) + a_2 \cdot L(\vec{e}_2)$$

Damit das für alle  $a_1$  und  $a_2$  stimmt, müssen die Vektoren, mit denen die Koeffizienten multipliziert werden, separat übereinstimmen:

$$\begin{bmatrix} m_{1,1} \\ m_{2,1} \\ \vdots \\ m_{n,1} \end{bmatrix} = L(\vec{e}_1) \text{ und } \begin{bmatrix} m_{1,2} \\ m_{2,2} \\ \vdots \\ m_{n,2} \end{bmatrix} = L(\vec{e}_2)$$

Damit haben wir gezeigt, dass in den Spalten von  $M$  die Bilder der Basisvektoren stehen.

## 10.3 Matrizen für zusammengesetzte Abbildungen

### Satz Skalares Vielfaches und Summe von linearen Abbildungen

Seien  $L : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  und  $S : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ ,  $\vec{x}$  lineare Abbildungen mit zugehörigen  $(m \times n)$ -Matrizen  $A$  und  $B$ .

- Die Summe  $L + S : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m, \vec{x} \mapsto L(\vec{x}) + S(\vec{x})$  ist eine lineare Abbildung, und die zugehörige  $(m \times n)$ -Matrix lautet  $A + B$ .
- Mit  $\lambda \in \mathbb{R}$  ist das skalare Vielfache von  $\lambda \cdot L : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m, \vec{x} \mapsto \lambda \cdot L(\vec{x})$  eine lineare Abbildung mit zugehöriger  $(m \times n)$ -Matrix  $\lambda \cdot A$ .

[?, p.459]

### Infobox Ausführen von Transformationen nacheinander

Das Ausführen von Transformationen nacheinander entspricht dem **Multiplizieren von Matrizen**.

Die Abbildung  $S \odot M$  bedeutet, **zuerst**  $M$  und dann  $S$ .

### Satz Verkettung linearer Abbildungen

Seien  $L : \mathbb{R}^l \rightarrow \mathbb{R}^n$  mit zugehöriger  $(n \times l)$ -Matrix  $A$  und  $S : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  ebenfalls linear mit  $(m \times n)$ -Matrizen  $B$ . Dann ist die Verkettung oder Verschachtelung  $S \circ L : \mathbb{R}^l \rightarrow \mathbb{R}^m, \vec{x} \mapsto S(L(\vec{x}))$ , eine lineare Abbildung, und die zugehörige  $(m \times l)$ -Matrix lautet  $C = B \odot A$ .

[?, p.459]

### Infobox Verkettung von Abbildungen

$S \circ L$  bedeutet: zuerst  $L$  ausführen, dann  $S$

$S \circ L$  heisst auch **Verschachtelung**

### Beispiel 10.15 Verkettung linearer Abbildungen

370598

- Konstruieren Sie das Dreieck  $ABC$
- Spiegeln Sie es an der  $x$ -Achse  $A'B'C'$ .
- Strecken Sie dann das Bild um den Faktor 2 in  $x$ -Richtung.
- Berechnen Sie das Bild von  $ABC$  unter der Abbildung  $S \odot M$

$$\vec{A}'' = \begin{pmatrix} 4 \\ 2 \end{pmatrix}, \vec{B}'' = \begin{pmatrix} -2 \\ -3 \end{pmatrix}, \vec{C}'' = \begin{pmatrix} -4 \\ -1 \end{pmatrix}$$

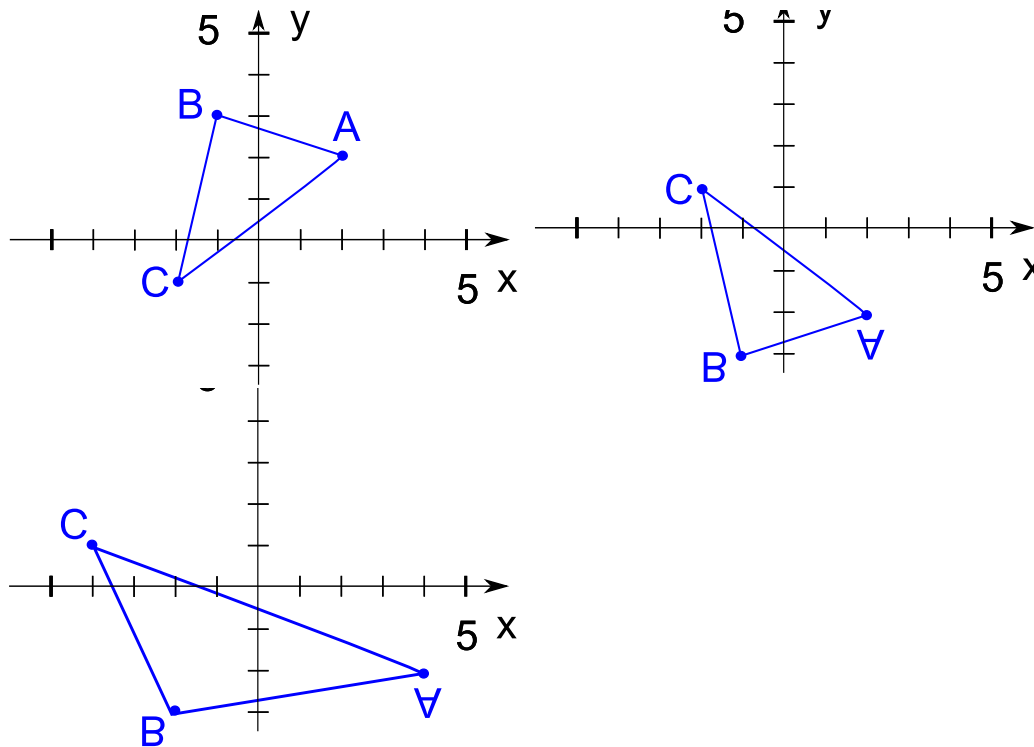
**Transformationen:** Spiegelung  $x$ -Achse:  $M = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$ .

Streckung um Faktor 2 in  $x$ -Richtung:  $S = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ .

**Punkte:**

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix}, \vec{B} = \begin{pmatrix} -1 \\ 3 \end{pmatrix}, \vec{C} = \begin{pmatrix} -2 \\ -1 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**



### Beispiel 10.16 Verkettung linearer Abbildungen

844538

Zeichnen Sie, dass die Operatoren  $L(p(x)) = x \cdot p(x)$  und  $D(p(x)) = \frac{d}{dx}p(x) = p(x)'$  linear sind.

Zeigen Sie anhand des Polynoms  $p(x) = 4 + 3x + 2x^2 + x^3$ , dass

$$L(D(p(x))) = D(L(p(x)))$$

nicht gilt.

**Lösung:**

Linearität der Operatoren:

$$\begin{aligned}L(\lambda \cdot p(x)) &= x \cdot \lambda \cdot p(x) = \lambda \cdot x \cdot p(x) = \lambda \cdot L(p(x)) \\L(p(x) + q(x)) &= x \cdot (p(x) + q(x)) = x \cdot p(x) + x \cdot q(x) = L(p(x)) + L(q(x))\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}D(\lambda \cdot p(x)) &= \frac{d}{dx} \lambda \cdot p(x) = \lambda \cdot \frac{d}{dx} p(x) = \lambda \cdot D(p(x)) \\D(p(x) + q(x)) &= \frac{d}{dx} (p(x) + q(x)) = \frac{d}{dx} p(x) + \frac{d}{dx} q(x) = D(p(x)) + D(q(x))\end{aligned}$$

Vertauschbarkeit:

$$\begin{aligned}L(D(p(x))) &= 3x + 4x^2 + 3x^3 \\D(L(p(x))) &= 4 + 6x + 6x^2 + 4x^3\end{aligned}$$

Die Ausdrücke sind verschieden also gilt

$$L(D(p(x))) \neq D(L(p(x)))$$

### Beispiel 10.17 Darstellung einer lineare Abbildung als Matrix

738430

Es sei  $\mathbf{P} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$ . Ferner bilden

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} -2 \\ 3 \end{pmatrix}, \vec{B} = \begin{pmatrix} -4 \\ -1 \end{pmatrix}, \vec{C} = \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \end{pmatrix}$$

das Dreieck  $ABC$ .

- Berechnen Sie die Produkte  $\vec{A}' = \mathbf{P} \odot \vec{A}$ ,  $\vec{B}' = \mathbf{P} \odot \vec{B}$  und  $\vec{C}' = \mathbf{P} \odot \vec{C}$ . Zeichnen Sie die Dreiecke  $ABC$  und  $A'B'C'$  in ein Koordinatensystem ein. Was ist der "Effekt der Matrix  $\mathbf{P}$ " auf das Dreieck?
- Bestimmen Sie die Matrix  $\mathbf{M}$  die das Dreieck an der  $y$ -Achse spiegelt und bestimmen Sie das Bild von  $ABC$  unter der Abbildung  $\mathbf{M}$ .
- Bestimmen Sie das Bild von  $ABC$  unter der Abbildung  $\mathbf{M} \odot \mathbf{P}$ .
- Bestimmen Sie das Bild von  $ABC$  unter der Abbildung  $\mathbf{P} \odot \mathbf{M}$ .
- Vergleichen Sie die Resultate aus den beiden letzten Teilaufgaben. Was schließen Sie daraus? Wie erklären Sie sich das Resultat?

#### Lösung

- Abbildung unter  $\mathbf{P}$ :  $A', B', C' = \begin{pmatrix} 0.5 \\ 0.5 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -2.5 \\ -2.5 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix}$

Alle Punkte liegen auf der Geraden  $\lambda \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ .  $\mathbf{P}$  beinhaltet also eine Projektion auf diese Gerade.

b) Die Matrix der Spiegelung ist  $\mathbf{M} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ . Abbildung unter  $\mathbf{M}$ :  $A'B'C' = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 4 \\ -1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -1 \\ 3 \end{pmatrix}$

c) Abbildung unter  $\mathbf{M} \odot \mathbf{P}$ :  $A'', B'', C'' = \begin{pmatrix} -0.5 \\ 0.5 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2.5 \\ -2.5 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -2 \\ 2 \end{pmatrix}$

d) Abbildung unter  $\mathbf{P} \odot \mathbf{M}$ :  $A^*B^*C^* = \begin{pmatrix} 2.5 \\ 2.5 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1.5 \\ 1.5 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$

e) Die Bildpunkte fallen verschieden aus, abhängig davon ob  $\mathbf{P} \odot \mathbf{M}$  oder  $\mathbf{M} \odot \mathbf{P}$  auf sie angewendet wird. Beim Dreieck (und auch allgemein) kommt es darauf an, in welcher Reihenfolge die Abbildungen ausgeführt werden. Im Allgemeinen gilt für beliebige lineare Abbildungen  $\mathbf{A}$  und  $\mathbf{B}$ :

$$\mathbf{A} \odot \mathbf{B} \neq \mathbf{B} \odot \mathbf{A} .$$

Lineare Abbildungen sind im Allgemeinen **nicht kommutativ**.

## 10.4 Matrizen für Zeilenoperationen

### Infobox Zeilenoperationen in einer Matrix speichern

Eine Zeilenoperation wird als Matrix dargestellt, indem die Zeilenoperation auf die Zeilen der Einsmatrix  $\mathbb{I}$  angewendet werden.

#### Beispiel 10.18 Zeilenumformungen

R9UR2T

Berechnen Sie die Matrix, die

- die zweite Zeile mit  $\frac{1}{3}$  multipliziert:  $\mathbf{L}$
- von der ersten Zeile 2-mal die zweite Zeile abzieht:  $\mathbf{D}$
- die beiden Zeilen vertauscht:  $\mathbf{S}$

Wenden Sie schliesslich die Matrizen  $(\mathbf{S} \odot \mathbf{D} \odot \mathbf{L})$  auf die erweiterte Koeffizientenmatrix des folgenden Gleichungssystems an:

$$\left| \begin{array}{cc|c} -6x & 2y & = 7 \\ -9x & & = 12 \end{array} \right| \text{ d.h. } \left[ \begin{array}{cc|c} -6 & 2 & 7 \\ -9 & 0 & 12 \end{array} \right] =: \mathbf{M}$$

**Lösung:**

$$\text{a) } \mathbf{L} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{3} \end{pmatrix}$$

$$\text{b) } \mathbf{D} = \begin{pmatrix} 1 & -2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\text{c) } \mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Wir erhalten nacheinander

$$\underbrace{\begin{bmatrix} -6 & 2 & 7 \\ -9 & 0 & 12 \end{bmatrix}}_{=\mathbf{M}} \rightarrow \underbrace{\begin{bmatrix} -6 & 2 & 7 \\ -3 & 0 & 4 \end{bmatrix}}_{=\mathbf{L} \odot \mathbf{M}} \rightarrow \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 2 & -1 \\ -3 & 0 & 4 \end{bmatrix}}_{=\mathbf{D} \odot \mathbf{L} \odot \mathbf{M}} \rightarrow \underbrace{\begin{bmatrix} -3 & 0 & 4 \\ 0 & 2 & -1 \end{bmatrix}}_{=\mathbf{S} \odot \mathbf{D} \odot \mathbf{L} \odot \mathbf{M}}$$

### Beispiel 10.19 Zeilenumformungen

XM6UY5

Wir betrachten das Gleichungssystem

$$\left| \begin{array}{l} L_1: \quad 3x \quad -5y \quad +11z = 7 \\ L_2: \quad -4x \quad +6y \quad -16z = -6 \\ L_3: \quad x \quad -2y \quad +3z = 4 \end{array} \right|$$

Wir wollen es mit folgenden Schritten lösen

$$(L'_3 = L_1; L'_1 = L_3), L'_2 = L_2 + 4L'_1, L''_3 = L'_3 - 3L'_1,$$

$$(L'''_3 = L'_2; L''_2 = L'_3), L_3^{(v)} = 2L''_2 + L'''_3$$

a) Führen Sie die Elimination aus.

b) Nun betrachten wir die erweiterte Koeffizientenmatrix

$$\mathbf{M} = \left[ \begin{array}{ccc|c} 3 & -5 & 11 & 7 \\ -4 & 6 & -16 & -6 \\ 1 & -2 & 3 & 4 \end{array} \right]$$

und die Umformungen

$$\mathbf{T}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{E}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 4 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Berechnen Sie  $\mathbf{T}_1 \odot \mathbf{M}$  und  $\mathbf{E}_1 \odot \mathbf{T}_1 \odot \mathbf{M}$ . Welchen Zusammenhang mit der vorherigen Teilaufgabe können Sie herstellen?

c) Welche Matrizen stellen die folgenden Umformungen ( $\mathbf{T}_2$  und  $\mathbf{E}_2$ ) dar?

$$(L'''_3 = L'_2; L''_2 = L'_3), (L_3^{(v)} = 2L''_2 + L'''_3)$$

Hinweis: Sie finden die Matrizen, indem Sie die angegebenen Umformungen auf die Einheitsmatrix anwenden.

d) Überprüfen Sie Ihr Resultat, indem Sie nun  $\mathbf{E}_2 \odot \mathbf{T}_2 \odot \mathbf{E}_1 \odot \mathbf{T}_1 \odot \mathbf{M}$  berechnen.

**Lösung:**



a) Die Elimination führt auf

$$\left| \begin{array}{ccc|c} x & -2y & +3z & = 4 \\ & -y & -2z & = 5 \\ & & 0 & = 0 \end{array} \right|$$

b) Wir berechnen

$$\mathbf{T}_1 \odot \mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 3 & 4 \\ -4 & 6 & -16 & -6 \\ 3 & -5 & 11 & 7 \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad \mathbf{E}_1 \odot \mathbf{T}_1 \odot \mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 3 & 4 \\ 0 & -2 & -4 & 10 \\ 0 & 1 & 2 & -5 \end{bmatrix}$$

Es sind die ersten beiden Schritte der Elimination aus der vorherigen Teilaufgabe

c) Der Hinweis meint: Nehmen Sie die Einheitsmatrix und wenden sie die Umformung auf sie an. Für  $\mathbf{T}_2$  also

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \xrightarrow{(L_3=L_2; L_2=L_3)} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_2$$

und mit dem selben Vorgehen

$$\mathbf{E}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

d)

$$\mathbf{E}_2 \odot \mathbf{T}_2 \odot \mathbf{E}_1 \odot \mathbf{T}_1 \odot \mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 3 & 4 \\ 0 & -1 & -2 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

---

11.1 Grundoperationen . . . . .	296
11.2 Vektoren und Matrizen . . . . .	297
11.3 Symbolisches Rechnen . . . . .	298
11.4 Kernel, Path, current folder . . . . .	299

---

## 11.1 Grundoperationen

### Infobox Grundoperationen und Konstanten $\pi, e$

+	Plus
-	Minus
*	Skalare-Multiplikation und Matrix-Multiplikation
/	Skalare-Division (und Matrix-Division)
^	Skalare-Potenz (und Matrix-Potenz)
sqrt(x)	Quadratwurzel $\sqrt{x}$
.*	Multiplikation elementweise
./	Division elementweise
.^	Potenz elementweise
pi	$\pi$
exp(1)	Eulersche Konstante $e$

### Infobox Betrag, Logarithmen und trigonometrische Funktionen

<code>abs(x)</code>	Betrag einer Zahl $ x $
<code>sign(x)</code>	Vorzeichen einer Zahl $\text{sign}(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases}$
<code>log(x)</code>	Logarithmus zur Basis $e$
<code>log10(x)</code>	Logarithmus zur Basis 10
<b>Trigonometrische Funktionen mit Bogenmass</b>	
<code>cos(x)</code>	Cosinus, $x$ ist z.B. $\pi/2$
<code>sin(x)</code>	Sinus
<code>tan(x)</code>	Tangens
<code>acos(x)</code>	Arkuscossinus = $\cos^{-1}(x)$
<code>asin(x)</code>	Arkussinus = $\sin^{-1}(x)$
<code>atan(x)</code>	Arkustangens = $\tan^{-1}(x)$
<b>Trigonometrische Funktionen mit Winkelmass</b>	
<code>cosd(x)</code>	Cosinus, $x$ ist z.B. 90 Grad
<code>sind(x)</code>	Sinus
<code>tand(x)</code>	Tangens

## 11.2 Vektoren und Matrizen

Matlab wurde ursprünglich für die Matrizen-Rechnung entworfen. Deshalb ist vieles für die Matrizen-Rechnung optimiert und ausgelegt. Die Eingabe einer Matrix erfolgt Zeile für Zeile getrennt durch ein Semikolon `;`. Die Elemente einer Matrix können durch Kommas `,` oder durch Leerzeichen getrennt werden:

`A=[1,3,5;1,0,2;-1,7,1]`

`B=[ -1 1 -1; 1 -1 1; 1 1 -1]`

### Infobox Grundoperationen für Vektoren

<code>x*y</code>	Skalarprodukt der Vektoren $\vec{x}$ und $\vec{y}$
<code>norm(x)</code>	Norm des Vektors $\ \vec{x}\ $ ,
<code>cross(x,y)</code>	Vektorprodukt der Vektoren $\vec{x}$ und $\vec{y}$
<code>size(x)</code>	Dimension (=Anzahl der Einträge) des Vektors $\vec{x}$

### Infobox Spezielle Matrizen

<code>eye(3)</code>	Einheitsmatrix, Matrix mit lauter Einsen auf der Diagonalen
<code>ones(3,1)</code>	Matrix mit lauter Einsen, 3 Zeilen, 1 Spalte
<code>ones(1,3)*0</code>	Nullmatrix, 1 Zeile, 3 Spalten
<code>diag([10 9])</code>	Diagonalmatrix mit den Elementen 10 und 9 auf der Diagonalen

Wir können auf einzelne Elemente einer Matrix zugreifen über,

`A(1,3)`

Hier wird auf das dritte Element aus der ersten Zeile von A zugegriffen. — Wir können Einträge einzeln überschreiben:

`A(1,3)=8`

Wir können auf ganze Spalten mit dem Doppelpunkt `:` an erster Stelle zugreifen, z.B. auf die zweite Spalte

```
A(:,2)
ans =
     0
     7
```

oder auch auf Zeilen mit dem Doppelpunkt `:` an zweiter Stelle, z.B hier auf die erste Zeile

```
A(1,:)
ans = 1 3 6
```

### Infobox Matrix Funktionen

```
transpose(A)
A'
inv(A)
det(A)
rref(A)
null(A)
```

```
rank(A)
size(A)
```

Matrix transponieren  
Matrix komplex konjugieren<sup>a</sup>.  
inverse Matrix  
die Determinante einer Matrix  
Bringt Matrix in 'Zeilenstufenform'<sup>b</sup>.  
Nimmt an, dass in den Zeilen von A die Normalenvektoren der Ebenen stehen. Sucht alle Vektoren, die senkrecht stehen auf allen Normalenvektoren.<sup>c</sup>  
Rang der Matrix A  
Dimensionen (=Anzahl Zeilen und Spalten) von A

## 11.3 Symbolisches Rechnen

Die Matrix-Funktionen wendet man an um lineare Probleme zu lösen. Es können aber auch nicht lineare Gleichungssysteme gelöst werden. Dazu benutzt man die symbolischen Rechenfunktionen von Matlab. Bisher haben wir zwar Variablen benutzt, aber wir haben darin nur Zahlen gespeichert. Beim symbolischen Rechnen, können wir den Wert einer Variablen vorerst offen lassen.

Zuerst sagt man Matlab, dass man ein Variable als symbolische Variable benutzen will. Hier wollen wir x symbolisch benutzen

```
>> syms x
```

Dann geben wir die Gleichung ein, hier  $x^2 + 4 \cdot x + 1 = 0$

```
>> solve(x^2+4*x+1 ==0)
ans = 3^(1/2) - 2
```

### Infobox Symbolisches Rechnen, Gleichungssysteme lösen

<pre>syms x clear x S=solve('2*x-y+6*z-1', 'x-y+z-2') S.x</pre>	<p>x als symbolische Variable initialisieren Variable löschen Gleichungssystem lösen In der Lösung S nachschauen, welchen Wert x hat</p>
---	--

## 11.4 Kernel, Path, current folder

Beim Starten von Matlab geschieht folgendes: Die Programmdateien von Matlab (auf der Festplatte) werden gelesen. Diese Programmdateien beschreiben, was in den Arbeitsspeicher geladen werden soll. Diese Programmdateien von Matlab im Arbeitsspeicher nennt man **Matlab-Kernel**. Dieser Kernel hat die Funktionen, die wir bisher besprochen haben. Um diese Funktionen auszuführen, benutzt er selber Variablen. Das bedeutet, dass ausser den Variablen die wir definieren, schon vordefinierte Variablen im Matlab-Kernel sind.

### Infobox Interne Variablen

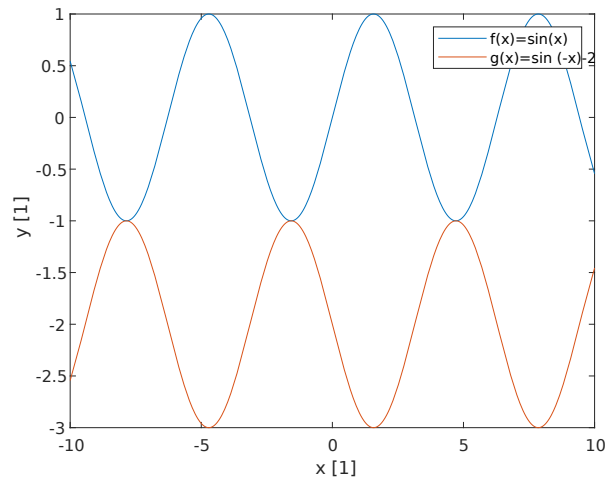
<pre>pwd ls cd cd ..</pre>	<p>gibt an, welches das aktuelle Verzeichnis ist listet alle Dateien im aktuellen Verzeichnis auf wechselt das aktuelle Verzeichnis wechselt im aktuellen Verzeichnis eine Hierarchiestufe nach oben</p>
<pre>path</pre>	<p>path; sie sagt dem Kernel in welchen Verzeichnissen er die Befehle suchen soll</p>
<pre>addpath('C:\Program Files\')</pre>	<p>fügt das Verzeichnis 'C:\Program Files\' zu path hinzu</p>

Der letzte Befehl wird gebraucht, wenn eigene Matlab Befehle und Funktionen geschrieben werden und z.B. in 'C:\Program Files\' gespeichert wurden.

### Beispiel 11.1 Graphen von Funktionen zeichnen

76BOUY

Plotten Sie die Funktionen  $f(x) = \sin(x)$  und  $g(x) = \sin(-x) - 2$  im Bereich  $x \in [-10, 10]$  Befehle: `fplot`, `hold on`, `hold off`, `xlabel`, `ylabel`, `legend`



### Matlab-Code

```
f=@(x) sin(x) ;
g=@(x) sin (-x)-2;
fplot(f,[-10,10])
hold on
fplot(g,[-10,10])
hold off
xlabel('x [1]')
ylabel('y [1]')
legend('f(x)=sin(x)', 'g(x)=sin (-x) -2')
```

### Beispiel 11.2 Hessesche Normalenform

GPNI6N

$$\vec{P} = \begin{pmatrix} 10 \\ 4 \end{pmatrix}, \vec{Q} = \begin{pmatrix} 11 \\ 0 \end{pmatrix}, g: y(x) = -\frac{4}{3} \cdot x + 2$$

- Erstelle eine Funktion  $h(x,y)$ , die den Abstand eines Punktes  $[x,y]$  zu  $g$  berechnet
- Berechne damit den Abstand der Punkte  $P, Q$  zu  $g$

Befehle: `abs`, `norm`,

### Matlab-Code

```
% a)
h=@(x,y) abs((4*x + 3*y - 6)/norm([3 -4])) ;
% b)
h(10,4) % 9.2
h(11,0) % 7.6
```

**Beispiel 11.3 Inhomogene LGS**

SLTNEO

Bestimmen Sie die Schnittmengen der Ebenen  $E_1$ ,  $E_2$  und  $E_3$ 

$$\begin{cases} E_1: & 0 & +3y & -2z & = & 3 \\ E_2: & 3x & +0 & -1 & = & 6 \\ E_3: & -2x & +y & +0 & = & -3 \end{cases}$$

Befehle: `rref`, `null(..., 'r')`**Matlab-Code**

```
% x y z = const
Ae=[ 0 3 -2 3
     3 0 -1 6
    -2 1 0 -3]
Aes=rref(Ae) % z ist freie Variable; Aufpkt: [ 2;1;0]
% Aes = 1.0 0 -0.3333 2.0000
% 0 1.0000 -0.6667 1.0000
% 0 0 0 0
As=Aes(:,1:end-1)
% As = 1.0 0 -0.3333
% 0 1.0000 -0.6667
% 0 0 0
riv=null(As, 'r') % Richtungsvektor [0.3333;0.6667; 1]
% Lösung Schnittgerade [2;1;0]+la*[ 1,2,3]
% mit la eine reelle Zahl
```

**Beispiel 11.4 Summen**

Y4AR4U

Berechnen Sie die Summe

$$\sum_{i=5}^{10} \frac{3 \cdot i}{(i+1)^{1/2}}$$

Befehle: `sum`, `(1:10)`**Matlab-Code**

```
tac=(5:10)
% 5 6 7 8 9 10
tac=(3.*tac)./(tac+1).^(1/2)
% 6.1237 6.8034 7.4246 8.0000 8.5381 9.0453
suc=sum(tac)
% 45.9352
```

**Beispiel 11.5 Linearität einer Funktion**

M27J2Z

a) Zeigen Sie, dass die folgenden Abbildungen  $L$  linear/nicht linear sind.

b) Bestimmen Sie die Matrix der Abbildung (falls  $L$  linear ist)

$$L(x, y, z) = \begin{pmatrix} 5x \\ -y \end{pmatrix} \text{ und } L: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$$

Befehle: `, simplify, syms ... real`

### Matlab-Code

```
Linearität \hcode{M27J2Z}
% a)
syms x y z a b c la real
L=@(x,y,z) [ 5*x;-y]
L(0,0,0) % [ 0; 0] Vortest bestanden
simplify(L(la*x,la*y,la*z)-la*L(x,y,z)) %0: Homogenität
simplify(L(x+a,y+b,z+c)-L(x,y,z)-L(a,b,c)) %0: Additivität
% b)
Mm=[ L(1,0,0), L(0,1,0), L(0,0,1)]
%      5      0      0
%      0     -1      0
```



---

Determinanten

---

---

12.1 Linearität der Determinante . . . . .	303
12.2 Determinante von $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ . . . . .	309
12.3 Determinante einer Dreiecksmatrix . . . . .	311
12.4 Folgen der Linearität . . . . .	316
12.5 Übungen . . . . .	319
12.6 Regel von Cramer . . . . .	322
12.7 Effiziente Berechnung der Determinante . . . . .	325
12.8 Satz von Laplace . . . . .	330
12.9 Multiplikationssatz und weitere Themen . . . . .	333

---

### Satz Gesetze für Determinanten von $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{N \times N}$

Im Folgenden können die Vektoren  $\vec{A}_1, \vec{A}_2, \dots$  als Spalten oder als Zeilen aufgefasst werden.

- $\det(\lambda \vec{A}_1, \vec{A}_2, \dots) = \lambda \det(\vec{A}_1, \vec{A}_2, \dots)$
- $\det(\vec{A}_1, \vec{A}_2 + \vec{d}, \dots) = \det(\vec{A}_1, \vec{A}_2, \dots) + \det(\vec{A}_1, \vec{d}, \dots)$
- $\det(\vec{A}_1, \vec{A}_2 + \vec{A}_1, \dots) = \det(\vec{A}_1, \vec{A}_2, \dots)$
- $\det(\vec{A}_2, \vec{A}_1, \dots) = -\det(\vec{A}_1, \vec{A}_2, \dots)$
- $\det(\vec{A}_1, \vec{0}, \dots) = 0$
- $\det(\vec{A}_1, \vec{A}_1, \dots) = 0$
- $\det(\lambda \mathbf{A}) = \lambda^N \det(\mathbf{A})$
- Dreiecksmatrizen:  $\det(\mathbf{A}) = a_{11} a_{22} \dots a_{NN}$
- $\det(\mathbf{A} \odot \mathbf{B}) = \det(\mathbf{A}) \cdot \det(\mathbf{B})$

## 12.1 Linearität der Determinante

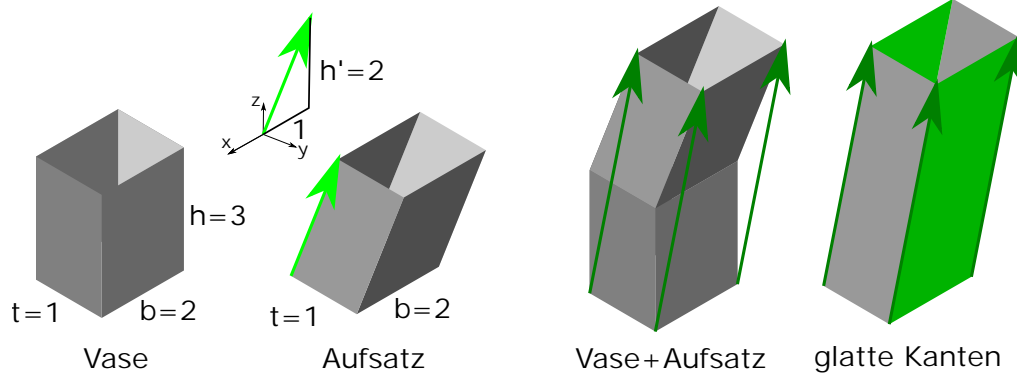
Wir verwenden die Definition der Determinante in zwei Dimensionen und leiten allgemeine Gesetzmässigkeiten der Determinante her. Wir machen das in zwei Dimensionen, weil wir das noch leicht aufzeichnen und uns gut vorstellen können. Die Gesetzmässigkeiten wie die Linearität und der Vorzeichenwechsel beim Vertauschen von Spalten einer Matrix sind aber für alle Matrizen in  $\mathbb{R}^{N \times N}$  gültig, d.h. auch in mehr als zwei Dimensionen.

### Infobox Determinante: Zeilen und Spalten

Wir beschränken uns darauf, das Vertauschen, Multiplizieren etc. von *Spalten* zu betrachten. Genau die selben Betrachtungen könnten aber ebenfalls für die *Zeilen* gemacht werden.

### Beispiel 12.1 Fläche eines Parallelogramms 1

Q86D9C



Eine rechteckiger Aufkleber hat die Abmessungen  $b = 2$  dm und  $h = 3$  dm.

- Wie gross ist seine Fläche (grün)?
- Wie verändert sich die Fläche, die Höhe  $\vec{h}$  um den Faktor  $\lambda = \frac{5}{3}$  gestreckt wird. Was passiert mit der Fläche, wenn in Richtung von  $\vec{t}$  gestreckt wird?
- Wir betrachten einen zweiten Aufkleber (blau). Welche Fläche hat er?
- Wie gross ist die Fläche der beiden zusammen.
- Wir gestalten eine Aufkleber, der aus  $A_1$  und  $A_3$  besteht. Welche Fläche hat er?
- Welches Fläche hat  $A_5$ ?
- Verallgemeinern Sie jetzt:
  - Wie berechnet sich die Fläche eines Aufklebers mit den Kanten  $\vec{b}$  und  $\vec{h}$ ?
  - Wie verhält sich die Fläche, wenn eine Kante mit dem Faktor  $\lambda$  gestreckt wird?
  - Welche Fläche erhalten wir, wenn einen Kleber mit den Kanten  $\vec{b}$  und  $\vec{h}_1 + \vec{h}_2$  gestalten?

### Lösung:

- $A_1 = b \cdot h = 6 \text{ dm}^2$
- Die Fläche ändert sich nicht, d.h.  $A_2 = b \cdot h' = 6 \text{ dm}^2$
- Die neue Höhe ist  $\lambda \cdot h$ , also ist die neue Fläche

$$A = b \cdot (\lambda \cdot h) = 10 \text{ dm}^2$$

Streckungen in andere Richtungen hätten den selben Effekt, das Volumen wächst um den Faktor  $\lambda = \frac{5}{3}$ .

- Für den zweiten Aufkleber gilt  $A_3 = b \cdot h' = 4 \text{ dm}^2$ . Es spielt keine Rolle, dass der Aufsatz schräg gebaut ist.

5.  $A_4 = A_1 + A_3 = 10 \text{ dm}^2$

6.  $A_4 = A_5$ , die Fläche verändert sich nicht

7. i) Die Fläche eines Aufklebers ist  $|\vec{A}|$  mit  $\vec{A} = \vec{b} \times \vec{h}$ .

ii) Eine Streckung mit Faktor  $\lambda \neq 0$  einer Kante führt zu  $\vec{A}' = \lambda \vec{A}$  (Homogenität der Determinante).

iii) Die Kombination von zwei Flächen führt zu

$$\vec{A} = \vec{b} \times (\vec{h} + \vec{h}') = \vec{b} \times \vec{h} + \vec{b} \times \vec{h}'$$

Hier wurde nur jeweils die Höhe verändert. Die selben Gesetzmässigkeiten gelten aber entlang aller Kanten.

iv) Streckungen und Erweiterung entlang der anderen Kanten verhalten sich genau gleich.

### Beispiel 12.2 Fläche eines Parallelogramms 2

N1ERF3

a) Berechne die Fläche eines Parallelogramms aufgespannt durch die Vektoren

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \text{ und } \vec{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix}$$

Benutze dazu das Vektorprodukt.

b) Überlege, welche Fläche ein Parallelogramm aufgespannt durch folgende Vektoren hat

$$11 \cdot \vec{a} \text{ und } \vec{b}$$

c) Welche Fläche hat ein Parallelogramm aufgespannt durch

$$(\vec{a} + \vec{c}) \text{ und } \vec{b}$$

**Lösung:**

a) Um das Vektorprodukt berechnen zu können, ergänzen wir die Vektoren

$$\vec{a}' = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ und } \vec{b}' = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

So erhalten wir

$$\vec{a}' \times \vec{b}' = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ a_1 \cdot b_2 - a_2 \cdot b_1 \end{pmatrix}$$

Der Eintrag in der  $z$ -Komponente ist die Fläche.

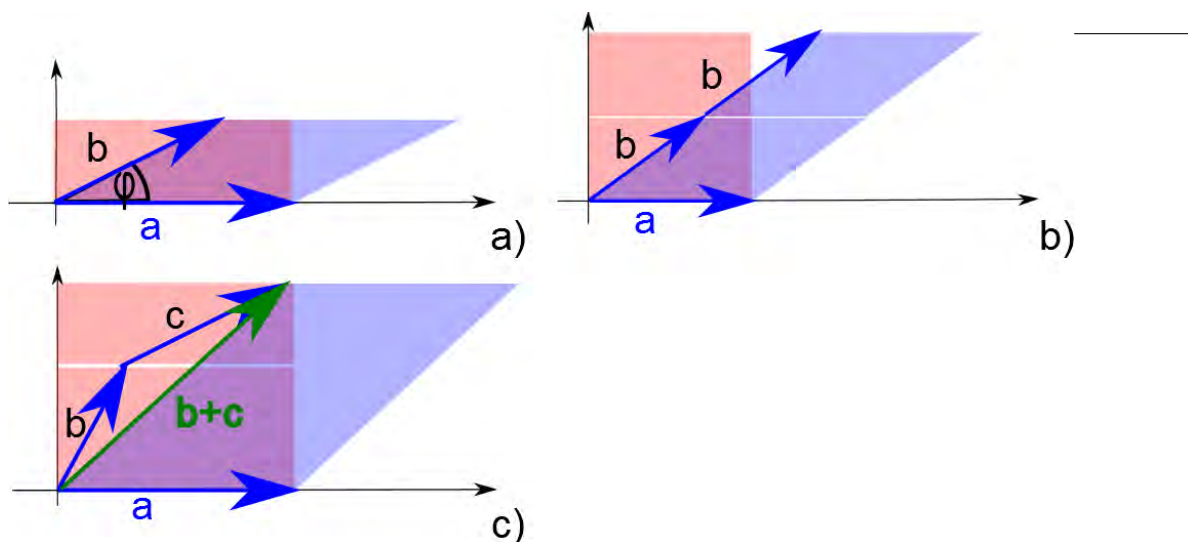


Abbildung 12.1: a) Die Determinante berechnet die Fläche des Parallelogramms aufgespannt durch  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$ . b) Homogenität der Determinante: Die Fläche muss sich verdoppeln, wenn wir  $\vec{b}$  verdoppeln in der Länge. c) Additivität der Determinante: Wenn wir uns für die Fläche aufgespannt durch  $\vec{a}$  und  $\vec{b} + \vec{c}$  interessieren, dann kann die grosse blaue Fläche berechnet werden aus der Summe der kleineren roten Flächen, die aufgespannt werden durch  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$  bzw.  $\vec{a}$  und  $\vec{c}$ .

- b) Wir benutzen, dass das Vektorprodukt assoziativ ist mit einer Zahl und erhalten

$$F' = 11 \cdot (a_1 \cdot b_2 - a_2 \cdot b_1)$$

- c) Wir benutzen, dass das Vektorprodukt distributiv ist und erhalten

$$F'' = \vec{a}' \times \vec{b}' + \vec{c}' \times \vec{b}' = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ a_1 \cdot b_2 - a_2 \cdot b_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ c_1 \cdot b_2 - c_2 \cdot b_1 \end{pmatrix}$$

### Definition Determinante für $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$

Für die Matrix  $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$  ist die *Determinante*

$$\det(\mathbf{A}) = a_1 \cdot b_2 - a_2 \cdot b_1 .$$

[?, Bd. 2 I 3.2]

Die Determinante berechnet den Flächeninhalt eines Parallelogramms aufgespannt durch die Vektoren  $\vec{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$  und  $\vec{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix}$ , siehe Fig. 12.1 a). Wenn wir eine Kante um den Faktor  $\lambda$  länger machen, dann muss auch die Fläche des Parallelogramms um diesen Faktor anwachsen. Wir nennen das die **Homogenität der Determinante**, siehe Fig. 12.1 b). Wenn eine Fläche aufgespannt wird durch  $\vec{a}$  und  $\vec{b} + \vec{c}$ , dann muss sich aus geometrischen Gründen die Gesamtfläche zusammensetzen aus dem kleinen Flächen aufgespannt durch  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$  bzw.  $\vec{a}$  und  $\vec{c}$ . Wir nennen

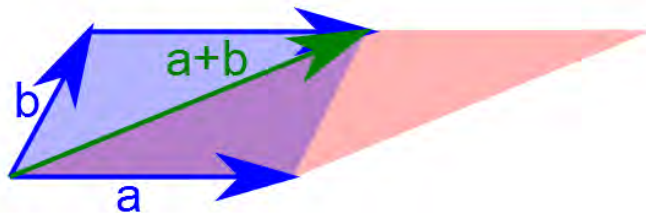


Abbildung 12.2: Die Fläche verändert sich nicht, wenn anstatt der Fläche des Parallelogramms aufgespannt durch  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$  (blau), die Fläche aufgespannt durch  $\vec{a}$  und  $\vec{b} + \vec{a}$  (rot) berechnet wird.

das die **Additivität der Determinante**, siehe Fig. 12.1 c). Diese beiden Eigenschaften fassen wir zusammen als die **Linearität der Determinante**.

#### Infobox Linearität der Determinante

$$\det\left(\begin{pmatrix} \lambda \cdot a_1 & b_1 \\ \lambda \cdot a_2 & b_2 \end{pmatrix}\right) = \lambda \cdot \det\left(\begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{pmatrix}\right)$$

$$\det\left(\begin{pmatrix} a_1 + c_1 & b_1 \\ a_2 + c_2 & b_2 \end{pmatrix}\right) = \det\left(\begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{pmatrix}\right) + \det\left(\begin{pmatrix} c_1 & b_1 \\ c_2 & b_2 \end{pmatrix}\right)$$

d.h. die Determinante ist linear, wenn wir ganze Spalten (oder ganze Zeilen) als Argumente auffassen.

Beachte, dass die Determinante aufgrund der Linearität auch negative Werte annehmen kann, d.h. die Determinante berechnet die Fläche plus ein Vorzeichen.

#### Infobox Additon von Spalten (oder Zeilen)

- Die Determinante ändert sich nicht, wenn eine Spalte zur anderen addiert wird. Siehe auch Fig. 12.2.
- Achtung: Die Multiplikation einer Spalte mit einer Zahl *verändert* die Determinante!
- $\det(\vec{a}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}) = 0$

#### Beispiel 12.3 Determinante $\mathbb{R}^{2 \times 2}$

UKQDY6

Berechnen Sie die Determinant

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 37 & 35 \\ 57 & 55 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

Wir machen die Einträge kleiner, indem wir von der ersten Spalte die zweite abziehen:

$$\mathbf{A}' = \begin{pmatrix} 2 & 35 \\ 2 & 55 \end{pmatrix}$$

Jetzt können wir aus der ersten Spalte die 2 ausklammern und berechnen die Determinante

$$\det(\mathbf{A}) = 2 \cdot \det\left(\begin{pmatrix} 1 & 35 \\ 1 & 55 \end{pmatrix}\right) = 2 \cdot (55 - 35) = 40$$

Übrigens: Man könnte die Multiplikationen noch weiter vermeiden, indem man in einem weiteren Schritt die erste Zeile von der zweiten abziehen würde:

$$\det(\mathbf{A}) = 2 \cdot \det\left(\begin{pmatrix} 1 & 35 \\ 1 & 55 \end{pmatrix}\right) = 2 \cdot \det\left(\begin{pmatrix} 1 & 35 \\ 0 & 20 \end{pmatrix}\right) = 2 \cdot (20 - 0) = 40$$

### Beispiel 12.4 Determinante $\mathbb{R}^{2 \times 2}$

SE7NDL

Berechnen Sie die Determinanten

a)  $\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 232 & 447 \\ 242 & 457 \end{pmatrix}$

c)  $\mathbf{D} = \begin{pmatrix} 382 & 44 \\ 362 & 24 \end{pmatrix}$

b)  $\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 261 & 291 \\ 101 & 131 \end{pmatrix}$

d)  $\mathbf{E} = \begin{pmatrix} 13247 & 13347 \\ 28469 & 28569 \end{pmatrix}$

**Lösung:**

a)  $\det(\mathbf{B}) = -2150$

c)  $\det(\mathbf{D}) = -6760$

b)  $\det(\mathbf{C}) = 4800$

d)  $\det(\mathbf{E}) = -1522200$

## 12.2 Determinante von $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$

### Definition Determinante in 3D

Sei  $\mathbf{A}$  eine  $3 \times 3$ -Matrix, und  $\vec{a}, \vec{b}$  und  $\vec{c}$  die Spalten von  $\mathbf{A}$ . Die Determinante ist dann definiert als

$$\det(\mathbf{A}) = [\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}] \text{ (Spatprodukt).}$$

### Infobox Linearität des Spatprodukts

Das Spatprodukt ist linear in allen Argumenten, d.h.

$$[\lambda \cdot \vec{a}, \vec{b}, \vec{c}] = \lambda \cdot [\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}]$$

und

$$[\vec{a} + \vec{d}, \vec{b}, \vec{c}] = [\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}] + [\vec{d}, \vec{b}, \vec{c}]$$

Diese Gleichungen gelten auch für die Addition und Multiplikation im zweiten Argument  $\vec{b}$  und im dritten  $\vec{c}$ .

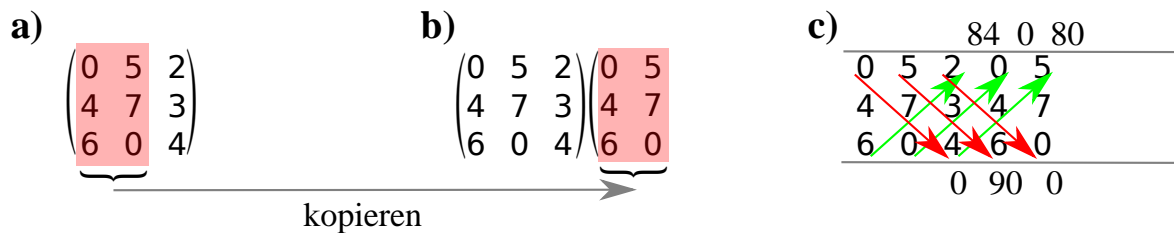


Abbildung 12.3: **a)** Die Regel von Sarrus ist ein graphisches Schema zur Berechnung der Determinante für  $M \in \mathbb{R}^3$ . **b)** Dabei werden die ersten beiden Spalten noch einmal als 4. und 5. Spalte kopiert. **c)** Entlang der 3 Diagonalen von oben nach unten (rot), werden die Produkte berechnet (0, 90 und 0). Davon werden die Produkte der 3 Diagonalen von unten nach oben (grün) abgezogen (84, 0 und 80). Wir erhalten also  $0 + 90 + 0 - 84 - 0 - 80 = -74$

### Satz Regel von Sarrus

Sei  $A$  die Matrix mit den Einträgen  $a_{i,j}$ , dann ist

$$\det(\mathbf{A}) = \underbrace{a_{11} \cdot a_{22} \cdot a_{33} + a_{12} \cdot a_{23} \cdot a_{31} + a_{13} \cdot a_{21} \cdot a_{32}}_{\text{Pfeile rot}} - \underbrace{a_{31} \cdot a_{22} \cdot a_{13} - a_{32} \cdot a_{23} \cdot a_{11} - a_{33} \cdot a_{21} \cdot a_{12}}_{\text{Pfeile grün}}$$

[?, p.174], [?, Bd. 2 I 3.1]

### Beispiel 12.5 Spatprodukt und Regel von Sarrus

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 2 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 5 \end{pmatrix}$$

- Berechnen Sie die Determinanten mit dem Spatprodukt
- Berechnen Sie die Determinanten mit der Regel von Sarrus.

**Lösung:**



a) Spatprodukt: Wir benennen die Spalten

$$\mathbf{A} = \left[ \underbrace{\begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}}_{\vec{a}}, \underbrace{\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}}_{\vec{b}}, \underbrace{\begin{pmatrix} -1 \\ 2 \\ 5 \end{pmatrix}}_{\vec{c}} \right]$$

$$\underbrace{\vec{b} \times \vec{c}}_{=: \vec{d}} = \begin{pmatrix} 5 \\ -5 \\ 3 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \vec{a} \odot \vec{d} = 10$$

b) Regel von Sarrus

$$\begin{aligned} \det(\mathbf{A}) &= 2 \cdot 1 \cdot 5 + 1 \cdot 2 \cdot 0 + (-1) \cdot 0 \cdot 0 \\ &\quad - 0 \cdot 1 \cdot (-1) - 0 \cdot 2 \cdot 2 - 5 \cdot 0 \cdot 1 \\ &= 10 \end{aligned}$$

**Beispiel 12.6 Berechnen Sie die Determinanten mit dem Spatprodukt IDV7PK**

a)  $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 2 & 3 & 4 \\ 5 & 6 & 7 \\ 8 & 9 & 10 \end{pmatrix}$

c)  $\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 5 & 1 & 7 \\ -3 & 2 & 10 \\ 5 & 10 & 9 \end{pmatrix}$

b)  $\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 1 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix}$

d)  $\mathbf{D} = \begin{pmatrix} 1 & 7 & 3 \\ -3 & 1 & 9 \\ 10 & 1 & 8 \end{pmatrix}$

**Lösung:**

a)  $\det(\mathbf{A}) = 0$

c)  $\det(\mathbf{C}) = -613$

b)  $\det(\mathbf{B}) = -12$

d)  $\det(\mathbf{D}) = 758$

**Beispiel 12.7 Determinanten 3D, Regel von Sarrus**

**T8SRHO**

Berechnen Sie die Determinanten aus der vorherigen Aufgabe mit der Regel von Sarrus.

**Lösung:**

a)  $\det(\mathbf{A}) = 120 + 168 + 180 - 192 - 126 - 150 = 0$

b)  $\det(\mathbf{B}) = 6 + 4 + 9 - 12 - 1 - 18 = -12$

c)  $\det(\mathbf{C}) = 90 + 50 - 210 - 70 - 500 + 27 = -613$

d)  $\det(\mathbf{D}) = 8 + 630 - 9 - 30 - 9 + 168 = 758$

### 12.3 Determinante einer Dreiecksmatrix

#### Satz Determinante einer Dreiecksmatrix

Für Dreiecksmatrizen (Diagonale von  $a_{1,1}$  bis  $a_{n,n}$ ) ist die Determinante gleich dem Produkt der Diagonalelemente. Sei  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{N \times N}$  eine Dreiecksmatrix, dann gilt

$$\det(\mathbf{A}) = a_{1,1} \cdot a_{2,2} \cdot \dots \cdot a_{N,N} = \prod_{i=1}^N a_{i,i}$$

Für Matrizen mit der Diagonalen  $a_{1,N}$  bis  $a_{N,1}$  gilt

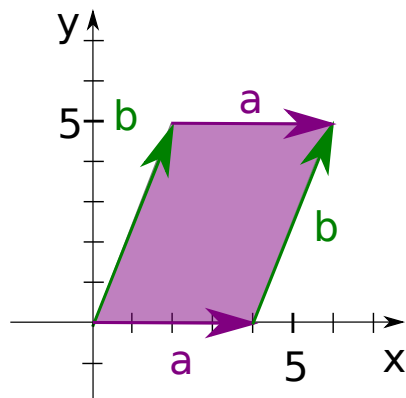
$$\det(\mathbf{A}) = (-1)^{\lfloor \frac{N}{2} \rfloor} \cdot a_{1,N} \cdot a_{2,N-1} \cdot \dots \cdot a_{N,1}$$

$\lfloor \frac{N}{2} \rfloor$  bedeutet abrunden. Wir erhalten z.B.

$N$	$\frac{N}{2}$	$\lfloor \frac{N}{2} \rfloor$	$(-1)^{\lfloor \frac{N}{2} \rfloor}$
1	0.5	0	1
2	1.	1	-1
3	1.5	1	-1
4	2.	2	1
5	2.5	2	1

#### Beispiel 12.8 Determinante einer Dreiecksmatrix

VDJ9NX



$$\mathbf{A} = (\vec{a}^T; \vec{b}^T) = \begin{pmatrix} 4 & 0 \\ 2 & 5 \end{pmatrix}$$

Berechnen Sie die Determinante. Benutze die geometrische Interpretation, dass nämlich die Determinante die Fläche des Parallelogramms berechnet. In der Matrix  $\mathbf{A}$  sind die Vektoren  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$  als Zeilen angeordnet.

**Lösung:**

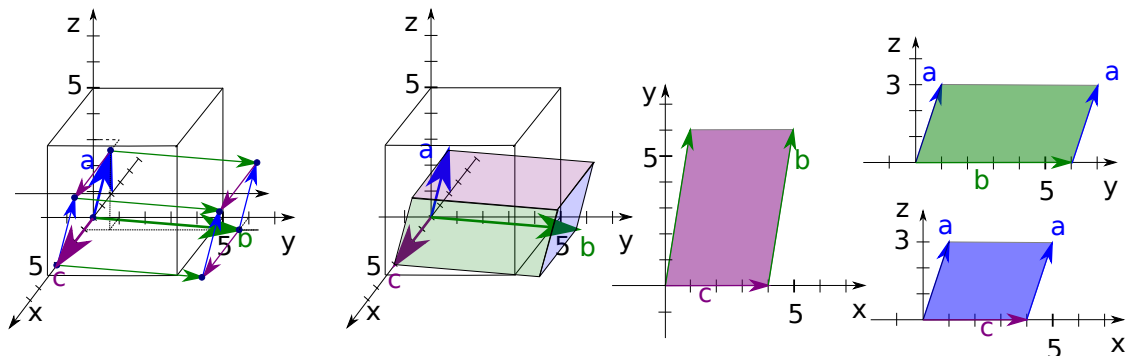
Die Grundkante berechnen wir aus der Länge von  $\vec{a}$  in Richtung  $a_1 = 4$ . Die Höhe des Parallelogramms ist  $b_2 = 5$ .

$$\det(\mathbf{A}) = 4 \cdot 5 = 20$$

Beachte: Wenn wir das Parallelogramm kippen, d.h. durch die Variation von  $b_1 = 2$ , ändert sich die Fläche nicht. Nur die Diagonal-Elemente der Matrix  $\mathbf{A}$  haben einen Einfluss auf die Fläche.

### Beispiel 12.9 Determinante einer Dreiecksmatrix

805275



Berechnen Sie die Determinante. Benutze die geometrische Interpretation, dass nämlich die Determinante das Volumen des Spats berechnet. In der Matrix  $\mathbf{A}$  sind die Vektoren  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  und  $\vec{c}$  als Zeilen angeordnet.

$$\mathbf{A} = (\vec{a}^T; \vec{b}^T; \vec{c}^T) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 \\ 1 & 6 & 0 \\ 4 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

#### Lösung:

Die Grundfläche berechnen aus der Länge in Richtung  $x = 4$  und der Höhe des roten Parallelogramms in Richtung  $y = 6$ . Schliesslich lesen wir noch die Höhe des Spats aus  $z = 3$ . Dies sind die drei Diagonalelemente der Matrix  $\mathbf{A}$ .

$$\det(\mathbf{A}) = \underbrace{(-1)}_{=f} \cdot 4 \cdot 6 \cdot 3 = -72$$

Der Faktor  $f$  ergibt sich aus der Konvention, dass bei Matrizen mit einer Diagonalen, die links unten beginnt ein Faktor  $f = (-1)$  multipliziert wird. Sieh auch Satz 12.1.

### Beispiel 12.10 Dreiecksmatrizen

1F6GZM

Berechnen Sie wenn möglich die Determinanten mit der Regel von Sarrus und dann mit den Regeln für Dreiecksmatrizen. Vergleichen Sie die Resultate.

$$\text{a) } \mathbf{E} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 \\ 0 & 6 & 1 \\ 0 & 0 & 4 \end{pmatrix}$$

$$\text{d) } \mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 & 7 & 3 & 7 \\ -3 & 5 & 1 & 0 \\ 10 & 5 & 0 & 0 \\ 8 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{g) } \mathbf{L} = \begin{pmatrix} 5 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 7 & 2 & 5 & 0 \\ 2 & 10 & 8 & 2 \end{pmatrix}$$

$$\text{b) } \mathbf{F} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 \\ 1 & 6 & 0 \\ 4 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{e) } \mathbf{J} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 6 & 0 \\ 3 & 1 & 4 \end{pmatrix}$$

$$\text{h) } \mathbf{M} = \begin{pmatrix} 1 & -3 & 10 & 8 \\ 7 & 5 & 5 & 0 \\ 3 & 1 & 0 & 0 \\ 7 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{c) } \mathbf{G} = \begin{pmatrix} 5 & 1 & 7 & 2 \\ 0 & -1 & 2 & 10 \\ 0 & 0 & 5 & 8 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}$$

$$\text{f) } \mathbf{K} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 4 \\ 1 & 6 & 0 \\ 3 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

$$\text{a) } \det(\mathbf{E}) = 24$$

$$\text{d) } \det(\mathbf{H}) = 280$$

$$\text{g) } \det(\mathbf{L}) = -50$$

$$\text{b) } \det(\mathbf{F}) = -72$$

$$\text{e) } \det(\mathbf{J}) = 24$$

$$\text{c) } \det(\mathbf{G}) = -50$$

$$\text{f) } \det(\mathbf{K}) = -72$$

$$\text{h) } \det(\mathbf{M}) = 280$$

### Beispiel 12.11 Dreiecksmatrizen und Elimination

PSGF67

Eliminieren Sie. Berechnen Sie dann die Determinanten den Regeln für Dreiecksmatrizen.

$$\text{a) } \mathbf{E} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 \\ 2 & 8 & 7 \\ 0 & 0 & 4 \end{pmatrix}$$

$$\text{c) } \mathbf{G} = \begin{pmatrix} 5 & 1 & 7 & 2 \\ 25 & 4 & 37 & 20 \\ 0 & 0 & 5 & 8 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}$$

$$\text{b) } \mathbf{F} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 \\ -2 & 3 & -9 \\ 8 & 4 & 12 \end{pmatrix}$$

$$\text{d) } \mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 & 7 & 3 & 7 \\ -5 & -9 & -5 & -14 \\ 13 & 26 & 9 & 21 \\ 8 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

a) Durch die Elimination erhalten wir

$$\mathbf{E}' = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 \\ 0 & 6 & 1 \\ 0 & 0 & 4 \end{pmatrix}$$

und  $\det(\mathbf{E}) = \det(\mathbf{E}') = 24$

b) Durch die Elimination erhalten wir

$$\mathbf{F}' = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 \\ 1 & 6 & 0 \\ 4 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

und  $\det(\mathbf{F}) = \det(\mathbf{F}') = -72$

c) Durch die Elimination erhalten wir

$$\mathbf{G}' = \begin{pmatrix} 5 & 1 & 7 & 2 \\ 0 & -1 & 2 & 10 \\ 0 & 0 & 5 & 8 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}$$

und  $\det(\mathbf{G}) = \det(\mathbf{G}') = -50$

d) Durch die Elimination erhalten wir

$$\mathbf{H}' = \begin{pmatrix} 1 & 7 & 3 & 7 \\ -3 & 5 & 1 & 0 \\ 10 & 5 & 0 & 0 \\ 8 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

und  $\det(\mathbf{H}) = \det(\mathbf{H}') = 280$

### Beispiel 12.12 Determinanten von Dreiecksmatrizen

341887

Berechnen Sie die Determinanten der folgenden Matrizen. Benutzen Sie Eliminationen und den Satz über die Determinante von Dreiecksmatrizen.

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

b)  $\begin{pmatrix} 1 & x & x^2 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & b & b^2 \end{pmatrix}$

c)  $\begin{pmatrix} x & 0 & 0 & 0 & b_1 \\ -1 & x & 0 & 0 & b_2 \\ 0 & -1 & x & 0 & b_3 \\ 0 & 0 & -1 & x & b_4 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & x + b_5 \end{pmatrix}$

#### Lösung

a) Wir eliminieren

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

So erhalten wir  $\det(\mathbf{A}) = -(-1) \cdot 2 \cdot (1 - b^2) = 2 - 2b^2$

b) Wir eliminieren

$$\begin{pmatrix} 1 & x & x^2 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & b & b^2 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & x & x^2 \\ 0 & a-x & a^2-x^2 \\ 0 & b-x & b^2-x^2 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & x & x^2 \\ 0 & a-x & a^2-x^2 \\ 0 & 0 & b^2-x^2 - \frac{(b-x)(a^2-x^2)}{a-x} \end{pmatrix}$$

So erhalten wir  $\det(\mathbf{A}) = 1 \cdot (a-x) \cdot (b^2-x^2 - \frac{(b-x)(a^2-x^2)}{a-x}) = (b-a) \cdot (a-x) \cdot (b-x)$

c) Die Matrix wird auf obere Dreiecksform gebracht. Dazu wird zur zweiten Zeile  $1/x$  mal die zweite Zeile dazugerechnet. Durch mehrfaches Anwenden dieses Verfahrens auf die Zeilen 3, 4 und 5 erhält man die obere Dreiecksform. Dann kann die Determinante durch Multiplikation der Diagonalelemente berechnet werden.

$$\det(\mathbf{A}) \stackrel{\text{II} = \text{II} + \text{I} \cdot \frac{1}{x}}{=} \det \begin{pmatrix} x & 0 & 0 & 0 & b_1 \\ 0 & x & 0 & 0 & b_2 + b_1/x \\ 0 & -1 & x & 0 & b_3 \\ 0 & 0 & -1 & x & b_4 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & x + b_5 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} & \dots \\ & = \det \begin{pmatrix} x & 0 & 0 & 0 & b_1 \\ 0 & x & 0 & 0 & b_2 + b_1/x \\ 0 & 0 & x & 0 & b_3 + \frac{b_2 + b_1/x}{x} \\ 0 & 0 & 0 & x & b_4 + b_3 + \frac{b_2 + b_1/x}{x} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x + b_5 + \frac{b_4 + \frac{b_3 + \frac{b_2 + b_1/x}{x}}{x}}{x} \end{pmatrix} \\ & = x^4 \cdot \left( x + b_5 + \frac{b_4 + \frac{b_3 + \frac{b_2 + b_1/x}{x}}{x}}{x} \right) \\ & = x^5 + b_5 \cdot x^4 + b_4 \cdot x^3 + b_3 \cdot x^2 + b_2 \cdot x + b_1 \end{aligned}$$

Dieser Ausdruck ist auch gültig für den Fall  $x = 0$ .

## 12.4 Folgen der Linearität

### Infobox Linearität Determinanten

Die Determinante ist linear in allen Argumenten, wenn wir Zeilen (oder Spalten) als Argument auffassen.

### Infobox Vertauschen von Spalten (oder Zeilen)

Die Determinante ändert ihr Vorzeichen, wenn Spalten vertauscht werden.

**Beispiel 12.13 Spalten vertauschen****X9E92Z**

Wir kennen die Determinante  $\det(\mathbf{N}) = \det([\vec{x}, \vec{y}]) = 2$ . Berechnen Sie die Determinante von

$$\mathbf{M} = [\vec{y}, \vec{x}] \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$$

Bringen Sie dazu die Spalten von  $\mathbf{M}$  in alphabetische Reihenfolge.

**Lösung:**

Mit der Linearität erhalten wir

$$\det([\vec{y}, \vec{x}]) = \det([\vec{y}, \vec{x} + \vec{y}]) = \det([\vec{y} - (\vec{x} + \vec{y}), \vec{x} + \vec{y}]) = \det([-\vec{x}, \vec{x} + \vec{y} - \vec{x}]) = -\det([\vec{x}, \vec{y}])$$

Es werden hier immer ganze Spalten von einander abgezogen. Im letzten Schritt benutzen wir die Homogenität. Also  $\det(\mathbf{M}) = -2$

**Beispiel 12.14 Spalten vertauschen****NDW7G3**

$$\mathbf{M} = [\vec{b}, \vec{a}, \vec{c}]$$

Wir wollen die Determinante von  $\mathbf{M}$  berechnen, indem wir die Spalten in alphabetische Reihenfolge bringen — denn von  $\mathbf{P} = [\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}]$  kennen wir die Determinante. Arbeiten sie z.B. mit  $\det(\mathbf{P}) = 5$

- Bringen Sie die Spalten von  $\mathbf{M}$  in alphabetische Reihenfolge. Benutzen Sie dazu ausschliesslich die Linearität der Determinante.
- Verallgemeinern Sie: Wie ändert sich die Determinante, wenn wir Spalten (oder Zeilen) vertauschen?

**Lösung:**

$$\begin{aligned} [\vec{b}, \vec{a}, \vec{c}] &= [\vec{b}, \vec{a} + \vec{b}, \vec{c}] \\ &= [\vec{b} - (\vec{a} + \vec{b}), \vec{a} + \vec{b}, \vec{c}] = [-\vec{a}, \vec{a} + \vec{b}, \vec{c}] \\ &= [-\vec{a}, \vec{a} + \vec{b} + (-\vec{a}), \vec{c}] \\ &= [-\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}] = -[\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}] \end{aligned}$$

Wir werden ab jetzt die Umformungen oben wie folgt vermeiden: Wir vertauschen Zeilen (oder Spalten) und bei jeder Vertauschung ändert sich das Vorzeichen der Determinante. Oder kurz:

$$\det([\vec{b}, \vec{a}, \vec{c}]) = -\det([\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}])$$

### Beispiel 12.15 Determinante der Transponierten

Berechne die Determinante von  $\mathbb{A}^\top$  mit

$$\mathbb{A} = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

Wir finden

$$\det(\mathbb{A}^\top) = \det\left(\begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{pmatrix}\right) = a_1 \cdot b_2 - b_1 \cdot a_2 = \det(\mathbb{A})$$

### Infobox Determinante der Transponierten

- $\det\left(\vec{a}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{b}\right) = 0$

- $\det\left(\begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{pmatrix}^\top\right) = \det\left(\begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{pmatrix}\right)$

Dies gilt übrigens auch in mehr als 3 Dimensionen

### Infobox Geometrische Bedeutung der Determinante

- Für 1D definiert man  $\det(a_{11}) = a_{11}$
- 1D Länge + Vorzeichen
- 2D Fläche + Vorzeichen
- 3D Volumen + Vorzeichen
- 4D und ND: Die Determinante ist das Hypervolumen des Hyper-Parallelogramms aufgespannt durch die Vektoren in den Spalten der Matrix + Vorzeichen

### Beispiel 12.16 Lineare Abhängigkeit

468897

Bestimme  $x$ , so dass die Spaltenvektoren der Matrix  $\mathbf{A}$  linear unabhängig sind.

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & x & 2 \\ 6 & 5 & x \\ 0 & 5 & -5 \end{pmatrix}$$

**Lösung**

Wir berechnen die Determinante

$$\det(\mathbf{A}) = 60 + 30x$$

Die Spaltenvektoren sind linear unabhängig, falls die Determinante nicht ver-



schwindet, also für alle  $x \in \mathbb{R}$  ausser

$$x = -2$$

### Beispiel 12.17 Lineare Abhängigkeit

OGB96D

Bestimme  $x$ , so dass die Spaltenvektoren der Matrizen linear unabhängig sind.

a)  $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} x & 1 & 0 \\ 1 & x & -1 \\ 0 & -1 & x \end{pmatrix}$

b)  $\mathbf{B} = \begin{pmatrix} x & -1 & 0 \\ 0 & x & -1 \\ 0 & 3 & -x \end{pmatrix}$

#### Lösung

a) Wir berechnen die Determinante

$$\det(\mathbf{A}) = -2x + x^3$$

Die Spaltenvektoren sind linear unabhängig, falls die Determinante nicht verschwindet, also für alle  $x \in \mathbb{R}$  ausser

$$x_1 = 0 \text{ und } x_{2,3} = \pm\sqrt{2}$$

b) Wir berechnen die Determinante

$$\det(\mathbf{A}) = 3x - x^3$$

Die Spaltenvektoren sind linear unabhängig, falls die Determinante nicht verschwindet, also für alle  $x \in \mathbb{R}$  ausser

$$x_1 = 0 \text{ und } x_{2,3} = \pm\sqrt{3}$$

### Beispiel 12.18 Äquivalenzumformungen für die Determinante,

670545

Es soll die Determinante von  $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 2 & -3 \\ -1 & -3 \end{pmatrix}$  bestimmt werden. Anton formt folgendermassen um:

$$\mathbf{A}' = \begin{pmatrix} 0 & -9 \\ 1 & -6 \end{pmatrix}, \text{ also } \det(\mathbf{A}) = 0 \cdot (-6) + 9 = 9$$

mit den Zeilenumformungen:<sup>a</sup>  $\mathbf{A}' = (\mathbf{A}_1 + 2\mathbf{A}_2; \mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2)$ .

Berta formt folgendermassen um:

$$\mathbf{B}' = \begin{pmatrix} 0 & -9 \\ -1 & -3 \end{pmatrix}, \text{ also } \det(\mathbf{A}) = 0 \cdot (-3) - (-1) \cdot (-9) = -9$$

mit den Zeilenumformungen: $\mathbf{B}' = (\mathbf{A}_1 + 2\mathbf{A}_2; \mathbf{A}_2)$ .

Die Resultate für die Determinante unterscheiden sich durch das Vorzeichen.

Anton und Berta sollten aber das gleiche Resultat erhalten. Wer hat den Fehler gemacht? Untersuchen Sie, ob wirklich beide zulässige Zeilenumformungen vorgenommen haben.

### Lösung

In diesem Fall hat Berta Recht. Die Zeilenumformungen von Anton sind nicht zulässig. Benützen wir die Äquivalenzumformungen für die Determinante<sup>b</sup>

- Zeilen addieren
- Zeilen vertauschen (ändert das Vorzeichen)
- Faktor vor einer Zeile vor die Determinante schreiben

um aus der Matrix  $A'$  wieder die Matrix  $A$  zu erhalten, dann sieht man, dass das Vorzeichen wechselt<sup>c</sup>

$$\det(\mathbf{A}') = \det(\mathbf{A}_1 + 2\mathbf{A}_2; \mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2) = \det(\mathbf{A}_1 + 2\mathbf{A}_2; -\mathbf{A}_2) = \det(\mathbf{A}_1; -\mathbf{A}_2) = -\det(\mathbf{A}) .$$

<sup>a</sup> $\mathbf{A}_1$  ist z.B. die erste Zeile von  $\mathbf{A}$

<sup>b</sup>Es sind nicht die selben wie beim Gaußalgorithmus, wo man a) Zeilen addieren, b) Zeilen vertauschen und c) Zeilen mit einer Zahl multiplizieren kann

<sup>c</sup>Bei jedem Schritt darf nur *eine* Äquivalenzumformung angewandt werden.

## 12.5 Übungen

### Beispiel 12.19 Determinanten,

949369

Berechnen Sie die Determinanten der folgenden Matrizen. Verwenden Sie den Satz von Sarrus und den Satz über Determinante von Diagonalmatrizen. Nützen Sie ausserdem aus, dass die Addition von Zeilen (oder Spalten) die Determinante nicht verändert, dass aber die Vertauschung von Zeilen, das Vorzeichen der Determinante ändert. Überprüfen Sie Ihre Resultate mit Matlab (Befehl  $\det(A)$ ).

$$\text{a) } \begin{pmatrix} \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \\ -\cos(\varphi) & \sin(\varphi) \end{pmatrix}$$

$$\text{f) } \begin{pmatrix} a & a & a \\ a & b & b \\ a & b & c \end{pmatrix}$$

$$\text{b) } \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{pmatrix}$$

$$\text{g) } \begin{pmatrix} 1-\lambda & 1 & 0 \\ 1 & 2-\lambda & 1 \\ 0 & 1 & 3-\lambda \end{pmatrix}$$

$$\text{c) } \mathbf{C} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 2 & 2 & 1 \\ 2 & 2 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

$$\text{h) } \begin{pmatrix} 0 & 4 & 0 \\ 3 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\text{d) } \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 0 & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 4 \end{pmatrix}$$

$$\text{i) } \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 5 \end{pmatrix}$$

$$\text{e) } \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 3 & 6 & 10 & 15 \\ 1 & 4 & 10 & 20 & 35 \\ 1 & 5 & 15 & 35 & 70 \end{pmatrix}$$

$$\text{j) } \begin{pmatrix} 1 & x & x^2 \\ 1 & y & y^2 \\ 1 & z & z^2 \end{pmatrix}$$

### Lösung

$$\text{a) } \sin^2(\varphi) + \cos^2(\varphi) = 1$$

$$\text{b) Regel von Sarrus: } 1 \cdot 5 \cdot 9 + 26 \cdot 7 + 3 \cdot 4 \cdot 8 - 7 \cdot 5 \cdot 3 - 8 \cdot 6 \cdot 1 - 9 \cdot 4 \cdot 2 = 45 + 84 + 96 - 105 - 48 - 72 = 0$$

c) Zeilen vertauschen

$$\mathbf{C}' = (\mathbf{C}_4, \mathbf{C}_3, \mathbf{C}_2, \mathbf{C}_1).$$

Dafür sind zwei Vertauschungen nötig  $4 \leftrightarrow 1$  und  $3 \leftrightarrow 2$ . Bei jeder Vertauschung ändert die Determinante das Vorzeichen:  $(-1) \cdot (-1) = 1$ , d.h. durch zwei Vertauschungen ändert sich die Determinante nicht. So entsteht eine Diagonalmatrix. Die Determinante kann aus den Diagonalelementen berechnet werden:  $2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 = 16$

d) Bringe die Matrix in Diagonalform  $\mathbf{A}' = (\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \mathbf{A}_3, \mathbf{A}_4, \mathbf{A}_5, \mathbf{A}_6 - 3\mathbf{A}_5)$ . Dann ist die Determinante das Produkt der Diagonalelemente:  $\det(\mathbf{A}) = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot (-2) = -2$ .

e) Wir verwenden die Notation  $\mathbf{A}_i$  für die  $i$ -te Zeile der Matrix  $\mathbf{A}$ . Die Umformun-

gen

$$\begin{aligned} \mathbf{A}' &= (\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2 - \mathbf{A}_1, \mathbf{A}_3 - \mathbf{A}_1, \mathbf{A}_4 - \mathbf{A}_1, \mathbf{A}_5 - \mathbf{A}_1) \\ \mathbf{A}'' &= (\mathbf{A}'_1, \mathbf{A}'_2, \mathbf{A}'_3 - 2\mathbf{A}'_2, \mathbf{A}'_4 - 3\mathbf{A}'_2, \mathbf{A}'_5 - 4\mathbf{A}'_2) \\ \mathbf{A}''' &= (\mathbf{A}''_1, \mathbf{A}''_2, \mathbf{A}''_3 - 2\mathbf{A}''_2, \mathbf{A}''_4 - 3\mathbf{A}''_2, \mathbf{A}''_5 - 4\mathbf{A}''_2) \\ \mathbf{A}'''' &= (\mathbf{A}'''_1, \mathbf{A}'''_2, \mathbf{A}'''_3, \mathbf{A}'''_4 - 3\mathbf{A}'''_3, \mathbf{A}'''_5 - 6\mathbf{A}'''_3) \\ \mathbf{A}''''' &= (\mathbf{A}''''_1, \mathbf{A}''''_2, \mathbf{A}''''_3, \mathbf{A}''''_4, \mathbf{A}''''_5 - 4\mathbf{A}''''_4) \end{aligned}$$

führen nacheinander auf die Matrizen:

$$\mathbf{A}' = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 0 & 2 & 5 & 9 & 14 \\ 0 & 3 & 9 & 19 & 34 \\ 0 & 4 & 14 & 34 & 69 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A}'' = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 0 & 0 & 1 & 3 & 6 \\ 0 & 0 & 3 & 10 & 22 \\ 0 & 0 & 6 & 22 & 53 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{A}''' = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 0 & 0 & 1 & 3 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & 17 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \mathbf{A}'''' = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 0 & 0 & 1 & 3 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Jetzt kann die Determinante als Produkt der Diagonalelemente berechnet werden: } \det(\mathbf{A}) = 1$$

f)

$$\begin{aligned} \mathbf{D}' &= (\mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2 - \mathbf{D}_1, \mathbf{D}_3 - \mathbf{D}_1) \\ \mathbf{D}'' &= (\mathbf{D}'_1, \mathbf{D}'_2, \mathbf{D}'_3 - \mathbf{D}'_2) \end{aligned}$$

führen nacheinander auf die Matrizen:  $\mathbf{D}' = \begin{pmatrix} a & a & a \\ 0 & (b-a) & (b-a) \\ 0 & (b-a) & (c-a) \end{pmatrix}$  und  $\mathbf{D}'' =$

$\begin{pmatrix} a & a & a \\ 0 & (b-a) & (b-a) \\ 0 & 0 & (c-b) \end{pmatrix}$ . Jetzt kann die Determinante als Produkt der Diagonalelemente berechnet werden:  $\det(\mathbf{A}) = a \cdot (b-a) \cdot (c-b) = a^2b - a^2c - ab^2 + abc$

g) Regel von Sarrus:  $\det(\mathbf{A}) = (1-\lambda) \cdot (2-\lambda) \cdot (3-\lambda) - (1-\lambda) - (3-\lambda) = 2 - 9\lambda + 6\lambda^2 - \lambda^3$

h) Regel von Sarrus:  $\det(\mathbf{A}) = 16 - 12 = 4$

i) Regel von Sarrus:  $\det(\mathbf{A}) = 10$

j) Regel von Sarrus:  $\det(\mathbf{A}) = yz^2 + xy^2 + zx^2 - yx^2 - zy^2 - xz^2$ . Übrigens lässt sich das umformen zu  $(y-x) \cdot (x-z) \cdot (y-z)$

## 12.6 Regel von Cramer

### Satz Regel von Cramer

Sei  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ , mit  $\det(\mathbf{A}) \neq 0$  und  $\vec{b} \in \mathbb{R}^n$ . Die Lösung  $\vec{x}$  des Gleichungssystems

$$\mathbf{A}\vec{x} = \vec{b}$$

ist gegeben durch

$$x_k = \frac{\det(\vec{A}_1, \dots, \vec{b}, \dots, \vec{A}_n)}{\det(\mathbf{A})}$$

wobei  $\vec{b}$  die  $k$ -te Spalte ersetzt.

[?, Bd. 2 I 5.4, p. 92], [?, p.181]

### Beispiel 12.20 Regel von Cramer

725615

Lösen Sie das lineare Gleichungssystem mit der Regel von Cramer.

$$\begin{cases} 5x_1 + 3x_3 = 2 \\ -x_1 + 2x_2 = 3 \\ 3x_2 + 1x_3 = 4 \end{cases}$$

**Lösung:**

Wir nennen die Koeffizienten Matrix

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 5 & 0 & 3 \\ -1 & 2 & 0 \\ 0 & 3 & 1 \end{pmatrix} \text{ und die Inhomogenität } \vec{b} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix}.$$

Dann lässt sich die Lösung des Gleichungssystems schreiben als

$$x_1 = \frac{\det(\vec{b}, \vec{A}_2, \vec{A}_3)}{\det(\mathbf{A})}, \quad x_2 = \frac{\det(\vec{A}_1, \vec{b}, \vec{A}_3)}{\det(\mathbf{A})}, \quad x_3 = \frac{\det(\vec{A}_1, \vec{A}_2, \vec{b})}{\det(\mathbf{A})}.$$

Die Determinanten sind

$$\begin{aligned} \det(\mathbf{A}) &= 10 + 0 + -9 + 0 + 0 + 0 = 1 \\ \det(\vec{b}, \vec{A}_2, \vec{A}_3) &= 4 + 27 + 0 + -24 + 0 + 0 = 7 \\ \det(\vec{A}_1, \vec{b}, \vec{A}_3) &= 15 - 12 + 0 + 0 + 0 + 2 = 5 \\ \det(\vec{A}_1, \vec{A}_2, \vec{b}) &= 40 + -6 + 0 + 0 - 45 + 0 = -11 \end{aligned}$$

Damit ist die Lösung

$$x_1 = \frac{7}{1} = 7, \quad x_2 = \frac{5}{1} = 5, \quad x_3 = \frac{-11}{1} = -11.$$

### Beispiel 12.21 Herleitung des Satzes von Cramer

260103

Leiten Sie den Satz von Cramer in drei Dimensionen her. Wir betrachten das

folgende Gleichungssystem in Matrixschreibweise

$$\left(\vec{A}_1, \vec{A}_2, \vec{A}_3\right) \odot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \vec{b}$$

Dabei fassen wir die erste Spalten von  $\vec{A}$  im Spaltenvektor  $\vec{A}_1$  zusammen usw. Betrachten Sie vorerst nur die zweite Variable  $y$ .

Der Beweis ist nicht sehr intuitiv. Deshalb sind hier die Schritte angegeben:

- Nehmen Sie an, dass Sie die Lösung  $(x, y, z)$  des Gleichungssystems schon kennen würden und drücken Sie  $\vec{b}$  mit dieser Lösung aus
- Ersetzen Sie die zweite Spalte von  $\mathbf{A}$  mit diesem Ausdruck für  $\vec{b}$
- Berechnen Sie die Determinante dieser Matrix
- Lösen Sie nach  $y$  auf

#### Lösung:

Würden wir die Lösung des Gleichungssystems schon kennen, dann könnten wir  $\vec{b}$  schreiben mit Hilfe der Koeffizientenmatrix und der Lösung

$$\vec{b} = x\vec{A}_1 + y\vec{A}_2 + z\vec{A}_3.$$

In der Matrix  $\mathbf{A}$  ersetzen wir nun  $\vec{A}_2$  mit  $\vec{b}$  und berechnen die Determinante der  $3 \times 3$ -Matrix

$$\left(\vec{A}_1, \vec{b}, \vec{A}_3\right)$$

Wir setzen dies zusammen und vereinfachen:

$$\begin{aligned} \det(\vec{A}_1, \vec{b}, \vec{A}_3) &= \det(\vec{A}_1, x\vec{A}_1 + y\vec{A}_2 + z\vec{A}_3, \vec{A}_3) \\ &= 0 + \det(\vec{A}_1, y \cdot \vec{A}_2, \vec{A}_3) + 0 = y \cdot \det(\mathbf{A}) \end{aligned}$$

Im letzten Ausdruck haben wir also die Determinante von  $\mathbf{A}$ . Diese Gleichung können wir nach  $y$  auflösen:

$$y = \frac{\det(\vec{A}_1, \vec{b}, \vec{A}_3)}{\det(\mathbf{A})}.$$

Für die weiteren Unbekannten  $x$  und  $z$  beweist man dies genau gleich.

#### Beispiel 12.22 Regel von Cramer

911705

Lösen Sie die folgenden *inhomogenen quadratischen* linearen Gleichungssysteme mit Hilfe der Regel von Cramer:

a)

$$\begin{cases} -x + 10y + 5z = 3 \\ 3x - 6y - 2z = -2 \\ -8x + 14y + 4z = 6 \end{cases}$$

c)

$$\begin{cases} 3y + 2x = z + 1 \\ 3x + 2z = 8 - 5y \\ 3z - 1 = x - 2y \end{cases}$$

b)

$$\begin{pmatrix} 2 & -3 & 1 \\ 3 & -5 & 2 \\ 1 & -4 & 5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \\ 12 \end{pmatrix}$$

**Lösung**

a) Die Matrix-Darstellung lautet

$$\begin{pmatrix} -1 & 10 & 5 \\ 3 & -6 & -2 \\ -8 & 14 & 4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ -2 \\ 6 \end{pmatrix}.$$

Wir benützen die Schreibweise  $\mathbf{A}\vec{x} = \vec{b}$  und  $\vec{A}_j$  ist die  $j$ -te Spalte von  $\mathbf{A}$ . Dann sind die Lösungen

$$\begin{aligned} x &= \frac{\det(\vec{b}, \vec{A}_2, \vec{A}_3)}{\det(\mathbf{A})} \\ y &= \frac{\det(\vec{A}_1, \vec{b}, \vec{A}_3)}{\det(\mathbf{A})} \\ z &= \frac{\det(\vec{A}_1, \vec{A}_2, \vec{b})}{\det(\mathbf{A})}. \end{aligned}$$

Die Determinanten sind nacheinander

$$\begin{aligned} \det(\mathbf{A}) &= 24 + 160 + 210 - 240 - 28 - 120 = 6 \\ \det(\vec{b}, \vec{A}_2, \vec{A}_3) &= -72 - 120 - 140 + 180 + 84 + 80 = 12 \\ \det(\vec{A}_1, \vec{b}, \vec{A}_3) &= 8 + 28 + 90 - 80 - 12 - 36 = 18 \\ \det(\vec{A}_1, \vec{A}_2, \vec{b}) &= 36 + 160 + 126 - 144 - 28 - 180 = -30. \end{aligned}$$

Damit ist die Lösung

$$x = \frac{12}{6} = 2, \quad y = \frac{18}{6} = 3, \quad z = \frac{-30}{6} = -5, \quad .$$

b) Mit der selben Schreibweise wie oben ergibt sich

$$\begin{aligned} \det(\mathbf{A}) &= -50 - 6 - 12 + 5 + 16 + 45 = -2 \\ \det(\vec{b}, \vec{A}_2, \vec{A}_3) &= -25 - 72 - 12 + 60 + 8 + 45 = 4 \\ \det(\vec{A}_1, \vec{b}, \vec{A}_3) &= 30 + 2 + 36 - 3 - 48 - 15 = 2 \\ \det(\vec{A}_1, \vec{A}_2, \vec{b}) &= -120 - 9 - 12 + 5 + 24 + 108 = -4. \end{aligned}$$

Damit ist die Lösung

$$x_1 = \frac{4}{-2} = -2, \quad x_2 = \frac{2}{-2} = -1, \quad x_3 = \frac{-4}{-2} = 2, \quad .$$

c)

$$x = \frac{66}{22} = 3, \quad y = \frac{-22}{22} = -1, \quad z = \frac{44}{22} = 2$$

### Beispiel 12.23 Gleichung der Parabel

044328

Bestimmen Sie die Gleichung der Parabel ( $f(x) = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$ ) durch die Punkte  $P = \begin{pmatrix} 1 \\ -8 \end{pmatrix}$ ,  $Q = \begin{pmatrix} 2 \\ -12 \end{pmatrix}$ ,  $R = \begin{pmatrix} -1 \\ -18 \end{pmatrix}$ . Stellen Sie dazu ein Gleichungssystem auf und benützen Sie dann die Regel von Cramer.

#### Lösung

Die Parabel soll durch die drei Punkte gehen, d.h. für den ersten Punkt soll

$$a + b + c = -8$$

erfüllt sein. Für die weiteren Punkte ergibt sich  $4a + 2b + c = -12$  und  $a - b + c = -18$ . Das lineare Gleichungssystem lautet:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 4 & 2 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -8 \\ -12 \\ -18 \end{pmatrix} .$$

Aus der Koeffizienten-Matrix  $\mathbf{A}$  und der Inhomogenität  $\vec{b} = \begin{pmatrix} -8 \\ -12 \\ -18 \end{pmatrix}$  berechnen wir

$$\begin{aligned} \det(\mathbf{A}) &= -6 \\ \det(\vec{b}, \mathbf{A}_2, \mathbf{A}_3) &= 18 \\ \det(\mathbf{A}_1, \vec{b}, \mathbf{A}_3) &= -30 \\ \det(\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \vec{b}) &= 60 . \end{aligned}$$

Die Koeffizienten sind demnach:

$$a = \frac{18}{-6} = -3, \quad b = \frac{-30}{-6} = 5, \quad c = \frac{60}{-6} = -10, \quad .$$

Und die Parabel ist also  $f(x) = -3 \cdot x^2 + 5 \cdot x - 10$ .

## 12.7 Effiziente Berechnung der Determinante



### Infobox Effiziente Berechnung der Determinante

In  $N \geq 3$  wird die Determinante effizient berechnet, indem die Matrix mit dem Gauss-Verfahren auf Dreiecks-Form gebracht wird.

- Die Determinante verändert sich durch die Elimination  $\mathbf{A}'_i = 1 \cdot \mathbf{A}_i + \nu \cdot \mathbf{A}_j$  ( $i \neq j$ ) nicht. Wichtig ist, dass der Koeffizient vor  $1 \cdot \mathbf{A}_i$  nur eine 1 sein darf, während  $\nu \in \mathbb{R}$ .
- Berechnen wir die Determinante aus der Dreiecksmatrix und multiplizieren mit der Hilfszahl  $f$ .
- Der Vorfaktor (Hilfszahl) ist am Anfang der Elimination  $f = 1$ .

Er

- ändert das Vorzeichen, wenn zwei Zeilen vertauscht werden  $f' = f \cdot (-1)$ .
- er wird mit  $1/\lambda$  multipliziert, falls eine Zeile mit  $\lambda$  multipliziert wird  $f' = f \cdot \frac{1}{\lambda}$ .

### Beispiel 12.24 Effiziente Berechnung der Determinante

721944

Berechnen Sie die Determinante effizient. Bringen Sie dazu die Matrix in Dreiecksform.

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & 6 & 12 \\ -1 & 3 & 0 \\ 2 & 0 & 4 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

Beginn: Vorfaktor  $f = 1$ . Elimination:

$$\mathbf{R}' = \begin{pmatrix} 1 & 6 & 12 \\ 0 & 9 & 12 \\ 0 & -12 & -20 \end{pmatrix}$$

mit den Umformungen  $\mathbf{R}' = (\mathbf{R}_1; \mathbf{R}_2 + \mathbf{R}_1; \mathbf{R}_3 - 2\mathbf{R}_1)$ . Damit wir besser eliminieren können, multiplizieren wir die 2. Zeile mit  $1/3$ . Das ändert den Vorfaktor  $f' = \frac{1}{1/3} \cdot f = 3$ .

$$\mathbf{R}'' = \begin{pmatrix} 1 & 6 & 12 \\ 0 & 3 & 4 \\ 0 & -12 & -20 \end{pmatrix}$$

Schliesslich eliminieren wir wieder:  $\mathbf{R}'' = (\mathbf{R}'_1; \mathbf{R}'_2; \mathbf{R}'_3 + 4\mathbf{R}'_2)$  und erhalten

$$\mathbf{R}''' = \begin{pmatrix} 1 & 6 & 12 \\ 0 & 3 & 4 \\ 0 & 0 & -4 \end{pmatrix}$$

Die Determinante ist also

$$\det(\mathbf{R}) = 1 \cdot 3 \cdot (-4) \cdot f' = -12 \cdot 3 = -36$$

**Beispiel 12.25 Effiziente Berechnung der Determinante****BLISCK**

Berechnen Sie die Determinante effizient. Bringen Sie dazu die Matrix in Dreiecksform.

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 5 & 0 & 0 & 8 \\ 20 & 0 & 0 & 4 \\ -5 & 1 & 0 & 0 \\ 10 & 0 & 2 & 0 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

Beginn: Vorfaktor  $f = 1$ . Elimination:

$$\mathbf{R}' = \begin{pmatrix} 5 & 0 & 0 & 8 \\ 0 & 0 & 0 & -28 \\ 0 & 1 & 0 & 8 \\ 0 & 0 & 2 & -16 \end{pmatrix}$$

mit den Umformungen  $\mathbf{R}' = (\mathbf{R}_1; \mathbf{R}_2 - 4\mathbf{R}_1; \mathbf{R}_3 + \mathbf{R}_1; \mathbf{R}_4 - 2\mathbf{R}_1)$ . Die Zeilen sollten jetzt geordnet werden. Bei jedem Vertauschen der Zeilen ändert das Vorzeichen von  $f$ .

$$\mathbf{R}' \rightarrow \begin{pmatrix} 5 & 0 & 0 & 8 \\ 0 & 1 & 0 & 8 \\ 0 & 0 & 0 & -28 \\ 0 & 0 & 2 & -16 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 5 & 0 & 0 & 8 \\ 0 & 1 & 0 & 8 \\ 0 & 0 & 2 & -16 \\ 0 & 0 & 0 & -28 \end{pmatrix} = \mathbf{R}''$$

Der Vorfaktor ist also  $f' = f \cdot (-1) \cdot (-1) = 1$  und die Determinante ist

$$\det(\mathbf{R}) = 5 \cdot 1 \cdot 2 \cdot (-28) \cdot f' = -280$$

**Beispiel 12.26 Effiziente Berechnung der Determinante****519361**

Berechnen Sie die Determinante effizient. Bringen Sie dazu die Matrix in Dreiecksform.

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 3 & 9 & 15 & 21 & 27 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 6 & -5 & -11 & -17 \\ 2 & 6 & 13 & 39 & 55 \\ 2 & 6 & 10 & 14 & 28 \end{pmatrix}$$

**Lösung:** Beginn: Vorfaktor  $f = 1$ . Wir teilen die erste Zeile durch 3

$$\mathbf{R}' = \left[ \begin{array}{l} Z'_1 = Z_1 \cdot \frac{1}{3}: \\ Z'_2 = Z_2: \\ Z'_3 = Z_3: \\ Z'_4 = Z_4: \\ Z'_5 = Z_5: \end{array} \begin{array}{ccccc} 1 & 3 & 5 & 7 & 9 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 6 & -5 & -11 & -17 \\ 2 & 6 & 13 & 39 & 55 \\ 2 & 6 & 10 & 14 & 28 \end{array} \right].$$

Dadurch ändert sich der Vorfaktor  $f' = f \cdot \frac{1}{1/3} = 3$ . Jetzt eliminieren wir

$$\mathbf{R}'' = \begin{bmatrix} Z_1'' = Z_1' : & 1 & 3 & 5 & 7 & 9 \\ Z_2'' = Z_2' - 2 \cdot Z_1' : & 0 & -4 & -8 & -12 & -16 \\ Z_3'' = Z_3' - 2 \cdot Z_1' : & 0 & 0 & -15 & -25 & -35 \\ Z_4'' = Z_4' - 2Z_1' : & 0 & 0 & 3 & 25 & 37 \\ Z_5'' = Z_5' - 2Z_1' : & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}.$$

Um weiter eliminieren zu können teilen wir die dritte Zeile durch 5:

$$\mathbf{R}''' = \begin{bmatrix} Z_1''' = Z_1'' : & 1 & 3 & 5 & 7 & 9 \\ Z_2''' = Z_2'' : & 0 & -4 & -8 & -12 & -16 \\ Z_3''' = Z_3'' \cdot \frac{1}{5} : & 0 & 0 & -3 & -5 & -7 \\ Z_4''' = Z_4'' : & 0 & 0 & 3 & 25 & 37 \\ Z_5''' = Z_5'' : & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}.$$

Der Vorfaktor ändert sich dadurch  $f'' = f \cdot \frac{1}{1/5} = 15$ . Elimination:

$$\mathbf{R}'''' = \begin{bmatrix} Z_1'''' = Z_1''' : & 1 & 3 & 5 & 7 & 9 \\ Z_2'''' = Z_2''' - 2 \cdot Z_1''' : & 0 & -4 & -8 & -12 & -16 \\ Z_3'''' = Z_3''' : & 0 & 0 & -3 & -5 & -7 \\ Z_4'''' = Z_4''' + Z_3''' : & 0 & 0 & 0 & 20 & 30 \\ Z_5'''' = Z_5''' : & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}.$$

Die Matrix ist jetzt in Zeilenstufenform und die Determinante ist also

$$\det(\mathbf{R}''''') = 1 \cdot (-4) \cdot (-3) \cdot 20 \cdot 10 \cdot \underbrace{15}_{f''} = 36000$$

### Beispiel 12.27 Effiziente Berechnung der Determinante

X4BOZP

Berechnen Sie die Determinante effizient. Bringen Sie dazu die Matrix in Dreiecksform.

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & 6 & 12 \\ -1 & 3 & 0 \\ 2 & 0 & 4 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

Start  $f = 1$ . Elimination:

$$\left[ \begin{array}{l|ll} L_1 & 1 & 6 & 12 \\ L_2' = L_2 + L_1 & 0 & 9 & 12 \\ L_3' = L_3 - 2L_1 & 0 & -12 & -20 \end{array} \right]$$

$$\left[ \begin{array}{l|ll} L_1 & 1 & 6 & 12 \\ L_2'' = L_2' \cdot \frac{1}{3} & 0 & 3 & 4 \\ L_3' & 0 & -12 & -20 \end{array} \right]$$

$L_2''$  wird skaliert also  $f' = f \cdot \frac{1}{1/3} = 3$ .

$$\left[ \begin{array}{ccc|ccc} L_1 & & & 1 & 6 & 12 \\ L_2'' & & & 0 & 3 & 4 \\ L_3'' = L_3 + 4L_2 & & & 0 & 0 & 4 \end{array} \right]$$

Die Determinante ist also

$$\det(\mathbf{R}) = 1 \cdot 3 \cdot 4 \cdot f' = 36$$

### Beispiel 12.28 Effiziente Berechnung der Determinante

245158

Berechnen Sie die Determinante effizient. Bringen Sie dazu die Matrix in Dreiecksform.

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 5 & 7 & 9 \\ 3 & 9 & 15 & 25 & 33 \\ 4 & 14 & 24 & 34 & 44 \\ 1 & 3 & 5 & 7 & 14 \\ 1 & 3 & 5 & 11 & 15 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

Start, Vorfaktor  $f = 1$ . Elimination:

$$\mathbf{R}' = \left[ \begin{array}{l} Z_1' = Z_1 : \\ Z_2' = Z_2 - 3 \cdot Z_1 : \\ Z_3' = Z_3 - 4 \cdot Z_1 : \\ Z_4' = Z_4 - Z_1 : \\ Z_5' = Z_5 - Z_1 : \end{array} \begin{array}{ccccc} 1 & 3 & 5 & 7 & 9 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & 6 \\ 0 & 2 & 4 & 6 & 8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & 6 \end{array} \right]$$

Wir ordnen die Zeilen:

$$\mathbf{R}'' = \left[ \begin{array}{l} Z_1'' = Z_1' : \\ Z_2'' = Z_3' : \\ Z_3'' = Z_2' : \\ Z_4'' = Z_5' : \\ Z_5'' = Z_4' : \end{array} \begin{array}{ccccc} 1 & 3 & 5 & 7 & 9 \\ 0 & 2 & 4 & 6 & 8 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5 \end{array} \right]$$

Das sind zwei Vertauschungen:  $f' = f \cdot (-1) \cdot (-1) = 1$ . Die Matrix ist jetzt in Zeilenstufenform und die Determinante ist also

$$\det(\mathbf{R}'') = 1 \cdot 2 \cdot 0 \cdot 4 \cdot 5 \cdot f' = 0$$

### Beispiel 12.29 Effiziente Berechnung der Determinante

519361

Berechnen Sie die Determinante effizient. Bringen Sie dazu die Matrix in Drei-

ecksform.

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 3 & 9 & 15 & 21 & 27 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 6 & -5 & -11 & -17 \\ 2 & 6 & 13 & 39 & 55 \\ 2 & 6 & 10 & 14 & 28 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

Beginn: Vorfaktor  $f = 1$ . Wir teilen die erste Zeile durch 3

$$\mathbf{R}' = \begin{bmatrix} Z'_1 = Z_1 \cdot \frac{1}{3} : & 1 & 3 & 5 & 7 & 9 \\ Z'_2 = Z_2 : & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ Z'_3 = Z_3 : & 2 & 6 & -5 & -11 & -17 \\ Z'_4 = Z_4 : & 2 & 6 & 13 & 39 & 55 \\ Z'_5 = Z_5 : & 2 & 6 & 10 & 14 & 28 \end{bmatrix}.$$

Dadurch ändert sich der Vorfaktor  $f' = f \cdot \frac{1}{1/3} = 3$  Jetzt eliminieren wir

$$\mathbf{R}'' = \begin{bmatrix} Z''_1 = Z'_1 : & 1 & 3 & 5 & 7 & 9 \\ Z''_2 = Z'_2 - 2 \cdot Z'_1 : & 0 & -4 & -8 & -12 & -16 \\ Z''_3 = Z'_3 - 2 \cdot Z'_1 : & 0 & 0 & -15 & -25 & -35 \\ Z''_4 = Z'_4 - 2Z'_1 : & 0 & 0 & 3 & 25 & 37 \\ Z''_5 = Z'_5 - 2Z'_1 : & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}.$$

Um weiter eliminieren zu können teilen wir die dritte Zeile durch 5:

$$\mathbf{R}''' = \begin{bmatrix} Z'''_1 = Z''_1 : & 1 & 3 & 5 & 7 & 9 \\ Z'''_2 = Z''_2 : & 0 & -4 & -8 & -12 & -16 \\ Z'''_3 = Z''_3 \cdot \frac{1}{5} : & 0 & 0 & -3 & -5 & -7 \\ Z'''_4 = Z''_4 : & 0 & 0 & 3 & 25 & 37 \\ Z'''_5 = Z''_5 : & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}.$$

Der Vorfaktor ändert sich dadurch  $f'' = f \cdot \frac{1}{1/5} = 15$ . Elimination:

$$\mathbf{R}'''' = \begin{bmatrix} Z''''_1 = Z'''_1 : & 1 & 3 & 5 & 7 & 9 \\ Z''''_2 = Z'''_2 - 2 \cdot Z'''_1 : & 0 & -4 & -8 & -12 & -16 \\ Z''''_3 = Z'''_3 : & 0 & 0 & -3 & -5 & -7 \\ Z''''_4 = Z'''_4 + Z'''_3 : & 0 & 0 & 0 & 20 & 30 \\ Z''''_5 = Z'''_5 : & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}.$$

Die Matrix ist jetzt in Zeilenstufenform und die Determinante ist also

$$\det(\mathbf{R}'''' ) = 1 \cdot (-4) \cdot (-3) \cdot 20 \cdot 10 \cdot \underbrace{15}_{f''} = 36000$$

## 12.8 Satz von Laplace

### Satz Determinanten-Entwicklungssatz (Satz von Laplace)

Sei  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ . Die Determinante von  $\mathbf{A}$  kann nach jeder Zeile oder jeder Spalte entwickelt werden:

- Entwicklung nach der  $i$ -ten Zeile

$$\det(\mathbf{A}) = \sum_{k=1}^n (-1)^{k+i} a_{ik} \det(\mathbf{A}_{ik})$$

- Entwicklung nach der  $k$ -ten Spalte

$$\det(\mathbf{A}) = \sum_{i=1}^n (-1)^{k+i} a_{ik} \det(\mathbf{A}_{ik})$$

$\mathbf{A}_{ik}$  ist die  $(n-1) \times (n-1)$ -Matrix, die durch Streichen der  $i$ -ten Zeile und  $k$ -ten Spalte entsteht.

### Infobox Schema für die Vorzeichen $(-1)^{k+i}$

$$\begin{pmatrix} + & - & + & \dots \\ - & + & - & \dots \\ + & - & + & \dots \\ \dots & & & \dots \end{pmatrix}$$

### Beispiel 12.30 Entwicklungssatz von Laplace

193792

Bestimmen Sie die Determinante der Matrix  $\mathbf{A}$ . Benutze den Entwicklungssatz von Laplace.

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{pmatrix}$$

#### Lösung

Entwicklung nach erster Spalte

$$\begin{aligned} \det(\mathbf{A}) &= 1 \cdot \det\left(\begin{pmatrix} 5 & 6 \\ 8 & 9 \end{pmatrix}\right) + (-1) \cdot 4 \cdot \det\left(\begin{pmatrix} 2 & 3 \\ 8 & 9 \end{pmatrix}\right) + 7 \cdot \det\left(\begin{pmatrix} 2 & 3 \\ 5 & 6 \end{pmatrix}\right) \\ &= 1 \cdot (-3) - 4 \cdot (-6) + 7 \cdot (-3) = 0 \end{aligned}$$

### Beispiel 12.31 Entwicklungssatz von Laplace

522207

Bestimmen Sie die Determinante der Matrix  $\mathbf{A}$ . Benutzen Sie dafür den Entwicklungssatz von Laplace.

Eliminieren Sie wenn nötig zuerst Einträge in einer ganzen Spalte bis auf einen Eintrag<sup>a</sup>, bevor Sie nach einer geeigneten Zeile oder Spalte entwickeln.

a)

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 3 & 4 \\ -2 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 5 \\ 0 & 2 & 2 & 0 \end{pmatrix}$$

c)

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 2 & 5 & -3 & -3 \\ -2 & -3 & 2 & -5 \\ 1 & 3 & -2 & 2 \\ -1 & -6 & 4 & 3 \end{pmatrix}$$

b)

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 5 & 0 & 0 & 8 \\ 0 & 0 & 0 & -28 \\ 0 & 1 & 0 & 8 \\ 0 & 0 & 2 & -16 \end{pmatrix}$$

d)

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} 6 & 2 & 1 & 0 & 5 \\ 2 & 1 & 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & -2 & 3 \\ 3 & 0 & 2 & 3 & -1 \\ -1 & -1 & -3 & 4 & 2 \end{pmatrix}$$

### Lösung

a)

$$\det(\mathbf{A}) = 2 \cdot \det \begin{pmatrix} 0 & 3 & 4 \\ -2 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 5 \end{pmatrix} - 2 \cdot \det \begin{pmatrix} 0 & 0 & 4 \\ -2 & 1 & 0 \\ 1 & 4 & 5 \end{pmatrix} = 2 \cdot 22 - 2 \cdot (-36) = 116$$

a)  $\det(\mathbf{B}) = -280$

c)  $\det(\mathbf{D}) = -34$

b)  $\det(\mathbf{C}) = -4$

<sup>a</sup>Addieren oder Subtrahieren von Spalten oder Zeilen verändert die Determinante nicht

### Beispiel 12.32 Determinante von Untermatrizen

311802

Berechne die Determinante der Matrix  $\mathbf{M}$  und ihrer Untermatrizen  $\mathbf{N}$  und  $\mathbf{P}$ :

$$\mathbf{N} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ -2 & 2 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{P} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & -2 \\ 1 & -4 & 1 \\ -2 & 2 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{M} = \begin{pmatrix} 4 & 0 & 1 & -2 \\ -3 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & -4 & 1 \\ 0 & -2 & 2 & 0 \end{pmatrix}$$

### Lösung

Die Determinanten der Untermatrizen berechnen sich mit der Regel von Sarrus zu

$$\det(\mathbf{N}) = 0 - 4 + 0 + 0 - 2 + 0 = -6 \quad \text{und} \quad \det(\mathbf{P}) = 0 + -2 + -4 + 16 + 0 + 0 = 10$$

Mit dem Laplace'schen Entwicklungssatz können wir nun die Determinante von  $\mathbf{M}$  berechnen

$$\det(\mathbf{M}) = 4 \cdot \det(\mathbf{N}) + (-3) \cdot (-1) \cdot \det(\mathbf{P}) = 4 \cdot (-6) + 3 \cdot (10) = 6$$

## 12.9 Multiplikationssatz und weitere Themen

### Satz Multiplikationssatz

Seien  $A, B \in \mathbb{R}^{n \times n}$ , so gilt

$$\det(\mathbf{A} \odot \mathbf{B}) = \det(\mathbf{A}) \cdot \det(\mathbf{B})$$

### Satz Determinante der Inversen Matrix

$$\det(\mathbf{A}^{-1}) = \frac{1}{\det(\mathbf{A})}$$

### Beispiel 12.33 Determinante eines Matrix-Produkts

801837

Berechne die Determinante der Matrix  $\mathbf{P}$ .

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -3 & -3 & 9 \\ -9 & 0 & 9 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} \frac{1}{3} & \frac{10}{9} & \frac{8}{9} \\ \frac{2}{3} & \frac{8}{9} & \frac{19}{9} \\ \frac{1}{3} & \frac{10}{9} & \frac{14}{9} \end{pmatrix}$$

#### Lösung

Wir berechnen das Matrix-Produkt

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & 4 & 5 \\ 0 & 0 & 6 \end{pmatrix} \text{ also } \det(\mathbf{P})$$

mit dem Satz über Dreiecksmatrizen oder evtl. der Regel von Sarrus.

### Beispiel 12.34 Determinanten eines Matrix-Produkts

799761

Berechnen Sie die Determinante der Matrizen  $\mathbf{A}$  und  $\mathbf{T}$ . Benutze den Multiplikationssatz für Matrizen.

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 2 & 3 & 0 \\ 3 & 1 & 7 \end{pmatrix} \text{ und } \mathbf{A} = \mathbf{T}^{-1} \begin{pmatrix} -5 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & -3 \end{pmatrix} \mathbf{T}$$

#### Lösung

Wir nennen die Diagonalmatrix in der Aufgabenstellung  $\mathbf{D}$  und stellen fest:

$$\det(\mathbf{A}) = \det(\mathbf{T}^{-1} \mathbf{D} \mathbf{T}) = \det(\mathbf{T}^{-1}) \cdot \det(\mathbf{D}) \cdot \det(\mathbf{T}) = \frac{1}{\det(\mathbf{T})} \cdot \det(\mathbf{T}) \cdot \det(\mathbf{D}) = \det(\mathbf{D}).$$

Die Determinante der Diagonalmatrix lässt sich nun einfach berechnen:

$$\det(\mathbf{A}) = \det(\mathbf{D}) = (-5) \cdot 4 \cdot (-3) = 60$$

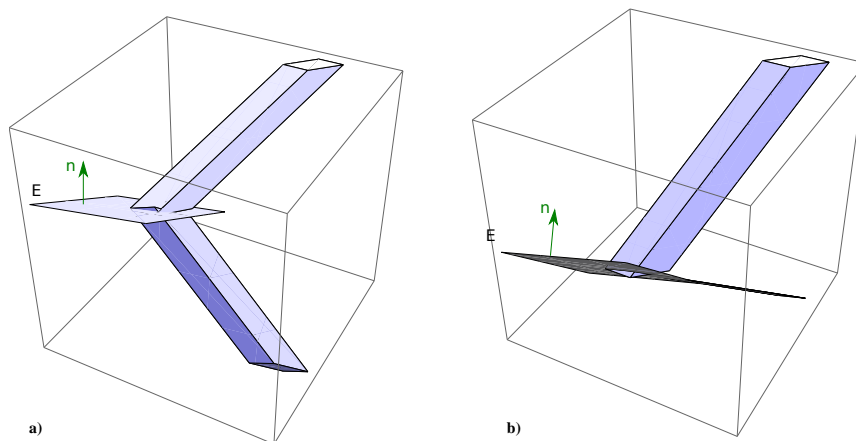


und

$$\det(\mathbf{T}) = 1 \cdot 3 \cdot 7 = 21$$

### Beispiel 12.35 Erhaltung der Struktur

J7DCU5



$$\mathbf{P} = \frac{1}{35} \begin{pmatrix} 34 & 3 & 5 \\ 3 & 26 & -15 \\ 5 & -15 & 10 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{S} = \frac{1}{35} \begin{pmatrix} 33 & 6 & 10 \\ 6 & 17 & -30 \\ 10 & -30 & -15 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 \\ 0 & 1 & 6 \\ 0 & 0 & 4 \end{pmatrix}$$

Die Matrix  $\mathbf{P}$  stellt eine Projektion auf die Ebene  $E : -x + 3y + 5z = 0$  dar und  $\mathbf{S}$  eine Spiegelung an  $E$ .

- a) Berechnen Sie die Determinanten von  $\mathbf{P} \odot \mathbf{1}$ ,  $\mathbf{S} \odot \mathbf{1}$  und  $\mathbf{R}$ .
- b) Weshalb fallen die Werte so aus? Argumentieren Sie u.a. mit der Form und dem Volumen des Quaders aufgespannt durch die Vektoren

$$\vec{e}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \vec{e}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \vec{e}_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

- c) Wir interpretieren die Spalten von  $\mathbf{R}$  als Seiten eines Parallelepipeds. Berechnen Sie das Volumen.
- d) Überlegen Sie — ohne zu rechnen — welche Werte wir für die folgenden Determinanten erhalten sollten.

$$\det(\mathbf{P} \odot \mathbf{R}), \det(\mathbf{S} \odot \mathbf{R}), \det(\mathbf{S} \odot \mathbf{S} \odot \mathbf{R}), \det(\mathbf{P} \odot \mathbf{S} \odot \mathbf{R}), \det(\mathbf{R} \odot \mathbf{R}),$$

- e) Verallgemeinern Sie: Welche Werte haben die Determinanten

$$\det(\mathbf{A} \odot \mathbf{B}), \det(\mathbf{A} \odot \mathbf{A}^{-1}) \text{ und } \det(\mathbf{A}^{-1})$$

**Lösung:**

a)

$$\det(\mathbf{P}) = 0 \quad \det(\mathbf{S}) = -1 \quad \text{und} \quad \det(\mathbf{R}) = 4$$

b) Wir wissen dass für alle Matrizen  $\mathbf{A}$  gilt,  $\mathbf{A} \odot \mathbf{1} = \mathbf{A}$ . Wir betrachten nun die Spalten von  $\mathbf{1}$  als die Einheitsvektoren des Koordinatensystems. Das Volumen, das sie aufspannen, ist  $1 \cdot 1 \cdot 1 = 1$  Volumeneinheit.

Somit können wir uns also folgendes überlegen: Wie wird dieser Quader verformt unter den jeweiligen Transformationen ( $\mathbf{A} \odot \mathbf{1}$ )? Die Spiegelung  $\mathbf{S}$  erhält das Volumen, ändert aber die Händigkeit. Das gespiegelte Koordinatensystem wird linkshändig, das drückt sich im negativen Vorzeichen aus.

Die Projektion bringt das Volumen auf 0, also ist die Determinante von  $\mathbf{P} = 0$ . Bei der Dreiecksmatrix wissen wir, dass die Determinante (= Volumen) nur von den Ausdehnung entlang der jeweiligen Dimensionen ist, also  $\det(\mathbf{R}) = 1 \cdot 1 \cdot 4 = 4$ . Eine Neigung der Seitenkanten ändert das Volumen nicht, solange die resultierende Matrix eine Dreiecksmatrix bleibt.

c) Das Volumen ist  $\det(\mathbf{R}) = 4$  Volumeneinheiten.

d) Wie oben interpretieren wir zuerst die Matrix links als Transformation, die rechts als Behälter mit dem Volumen 4. So erhalten wir

$$\begin{aligned}\det(\mathbf{P} \odot \mathbf{R}) &= 0 \\ \det(\mathbf{S} \odot \mathbf{R}) &= -4 \\ \det(\mathbf{S} \odot \mathbf{S} \odot \mathbf{R}) &= \det(\mathbf{1} \odot \mathbf{R}) = 4 \\ \det(\mathbf{P} \odot \mathbf{S} \odot \mathbf{R}) &= 0\end{aligned}$$

Bei der letzten Determinante überlegen wir uns folgendes: Eine der Transformationen ist eine Projektion, deshalb wird das Volumen schliesslich auf 0 gebracht. Es ist egal, wie sich das Volumen davor verändert hat.

Aus diesen Aufgaben ziehen wir die Vermutung

$$\det(\mathbf{R} \odot \mathbf{R}) = 4 \cdot 4 = 16$$

denn  $\det(\mathbf{R})$  an linker Stelle kann auch als Transformation betrachtet werden, die Volumina vervierfacht.

e) Die Determinanten sind

$$\begin{aligned}\det(\mathbf{A} \odot \mathbf{B}) &= \det(\mathbf{A}) \cdot \det(\mathbf{B}) \\ \det(\mathbf{A} \odot \mathbf{A}^{-1}) &= \det(\mathbf{1}) = 1 \\ \det(\mathbf{A}^{-1}) &= \frac{1}{\det(\mathbf{A})}\end{aligned}$$

Die letzte Zeile folgt aus den beiden oberen: Wir wenden zuerst die erste Zeile an und schreiben die zweite Zeile ab:

$$\det(\mathbf{A} \odot \mathbf{A}^{-1}) = \det(\mathbf{A}) \cdot \det(\mathbf{A}^{-1}) = 1$$

Teilen wir die letzten beiden Ausdrücke durch  $\det(\mathbf{A})$ , erhalten wir

$$\det(\mathbf{A}^{-1}) = \frac{1}{\det(\mathbf{A})}$$

### Beispiel 12.36 Determinanten der Transponierten

325124

Berechnen Sie die Determinanten der folgenden Matrizen. Benutzen Sie dazu den Satz von Sarrus und den Multiplikationssatz für Matrizen. Nutzen Sie zudem die Ähnlichkeit der Matrizen aus.

a)  $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 3 & -4 \\ 5 & -1 & 0 \\ 4 & -2 & -3 \end{pmatrix}$

b)  $\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{3}{\sqrt{2}} & \frac{-4}{\sqrt{2}} \\ 5 & \frac{-1}{\sqrt{2}} & 0 \\ 4 & \frac{-2}{\sqrt{2}} & \frac{-3}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$

a) Für  $\mathbf{E}$  gilt

$$\mathbf{E}^T = -\mathbf{E}$$

b)  $\mathbf{C} = \begin{pmatrix} \frac{1}{8}(1+\sqrt{2}) & 1 & 0 \\ \frac{1}{8}(1-\sqrt{2}) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{8}(1+\sqrt{2}) & \frac{1}{8}(1-\sqrt{2}) & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

### Lösung

a)  $\det(\mathbf{A}) = 0 + 0 + 40 - 16 + 0 + 45 = 69$

b)

$$\begin{aligned} \det(\mathbf{B}) &= \frac{1}{\sqrt{2}} \det \left( \begin{pmatrix} 0 & \frac{3}{\sqrt{2}} & -4 \\ 5 & \frac{-1}{\sqrt{2}} & 0 \\ 4 & \frac{-2}{\sqrt{2}} & -3 \end{pmatrix} \right) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{2}} \det \left( \begin{pmatrix} 0 & 3 & -4 \\ 5 & -1 & 0 \\ 4 & -2 & -3 \end{pmatrix} \right) = \frac{1}{2} \det(\mathbf{A}) = \frac{69}{2} \end{aligned}$$

c) Allgemein gilt

$$\det(\mathbf{E}^T) = \det(\mathbf{E})$$

Hier finden wir

$$\det(\mathbf{E}^T) = \det(-\mathbf{E}) = -\det(\mathbf{E})$$

d.h.  $\det(\mathbf{E}) = -\det(\mathbf{E})$ . Nur die Zahl 0 kann, dies erfüllen, nämlich dass  $0 = -0$ . Also  $\det(\mathbf{E}) = 0$ .

d) Feststellung:  $\mathbf{C} = \mathbf{D} \odot \mathbf{D}^T$ . Also können wir die Determinante durch  $\det(\mathbf{C}) = \det(\mathbf{D}) \cdot \det(\mathbf{D}^T) = \det(\mathbf{D}) \cdot \det(\mathbf{D})$  berechnen.

$$\begin{aligned} \det(\mathbf{D}) &= \det\left(\begin{pmatrix} \frac{1}{8}(1+\sqrt{2}) & 1 & 0 \\ \frac{1}{8}(1-\sqrt{2}) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}\right) \\ &= 1 \cdot \det\left(\begin{pmatrix} \frac{1}{8}(1+\sqrt{2}) & 1 \\ \frac{1}{8}(1-\sqrt{2}) & 1 \end{pmatrix}\right) = \frac{1}{8}(1+\sqrt{2}) - \frac{1}{8}(1-\sqrt{2}) = \frac{1}{2\sqrt{2}} \end{aligned}$$

Also ist die Determinante

$$\det(\mathbf{C}) = \frac{1}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{2\sqrt{2}} = \frac{1}{8}$$

### Beispiel 12.37 Determinanten von linearen Abbildungen

F9X8FP

Bestimme die Determinante der folgenden linearen Abbildungen. Hinweis: Bestimme zuerst die Matrix  $\mathbf{M}$  der Darstellung in einer Orthonormalbasis. Bestimme dann  $\det(\mathbf{M})$ .

a)  $T: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$  definiert durch  $T(\vec{x}) = \begin{pmatrix} 2x_1 - 9x_2 \\ 3x_1 - 5x_2 \end{pmatrix}$

b)  $T: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$  definiert durch  $T(x, y) = \begin{pmatrix} 2x - 9y \\ 3x - 5y \end{pmatrix}$

c)  $T: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$  definiert durch  $T(\vec{x}) = \begin{pmatrix} 3x_1 - 2x_3 \\ 5x_2 + 7x_3 \\ x_1 + x_2 + x_3 \end{pmatrix}$

d)  $T: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$  definiert durch  $T(x, y, z) = \begin{pmatrix} 2x + 7y - 4z \\ 4x - 6y + 2z \end{pmatrix}$

#### Lösung

a) Wir berechnen die Bilder der Basisvektoren:

$$\vec{e}'_1 = T(\vec{e}_1) = T\left(\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}\right) = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \vec{e}'_2 = T(\vec{e}_2) = T\left(\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}\right) = \begin{pmatrix} -9 \\ -5 \end{pmatrix}$$

Die Matrix der Abbildung besteht aus den Bildern der Basisvektoren, die in die Spalten geschrieben werden:  $\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 2 & -9 \\ 3 & -5 \end{pmatrix}$ , also  $\det(\mathbf{M}) = 17$

b) Wir berechnen die Bilder der Basisvektoren:

$$\vec{e}'_1 = T(\vec{e}_1) = T(1, 0) = (2, 3) \quad \text{und} \quad \vec{e}'_2 = T(\vec{e}_2) = T(0, 1) = (-9, -5)$$

Die Matrix der Abbildung besteht aus den Bildern der Basisvektoren, die in die Spalten geschrieben werden:  $M = \begin{pmatrix} 2 & -9 \\ 3 & -5 \end{pmatrix}$ , also  $\det(M) = 17$  (wie in der vorherigen Teilaufgabe, es ist nur die Schreibweise geändert).

c)  $M = \begin{pmatrix} 3 & 0 & -2 \\ 0 & 5 & 7 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$ , also  $\det(M) = 4$

d)  $M = \begin{pmatrix} 2 & 7 & -4 \\ 4 & -6 & 2 \end{pmatrix}$ . Für Matrizen, die nicht quadratisch sind, ist die Determinante nicht definiert.

### Beispiel 12.38 Determinanten von linearen Abbildungen

366248

Bestimme die Determinante der Abbildung  $D(f(t)) = \frac{df}{dt}$  für die gegebene Basis. Hinweis: Bestimme zuerst die Matrix  $D$ , die der linearen Abbildung entspricht. Bestimme dann  $\det(D)$

a)  $\{e^t, e^{2t}, e^{3t}\}$

c)  $\{\sin(t), \cos(t)\}$

b)  $\{1, t, \dots, t^5\}$

#### Lösung

a) Wir ordnen jeder Funktion einen Basisvektor zu

$$e^t \hat{=} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, e^{2t} \hat{=} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, e^{3t} \hat{=} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Wir leiten alle Funktionen ab und stellen die Ableitung als Linearkombination der drei Funktionen dar:

$$e^t \xrightarrow{\frac{df}{dt}} e^t \hat{=} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Für die weiteren Funktionen gilt

$$e^{2t} \xrightarrow{\frac{df}{dt}} 2e^{2t} \hat{=} 2 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

und

$$e^{3t} \xrightarrow{\frac{df}{dt}} 3e^{3t} \hat{=} 3 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Wir schreiben die Bilder der Basisvektoren in eine Matrix

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{pmatrix},$$

also  $\det(\mathbf{D}) = 6$

b) Wir ordnen jeder Funktion einen Basisvektor zu

$$t^0 = 1 \hat{=} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, t^1 \hat{=} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \dots, t^5 \hat{=} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Wir leiten alle Funktionen ab und stellen Sie als Linearkombination der Funktionen dar, z.B.

$$t^5 \xrightarrow{\frac{df}{dt}} 5t^4 \hat{=} 5 \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Dieser Vektor ist die letzte Spalte der Matrix der Ableitung in dieser Basis. Zusammengefasst ergibt sich:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \hat{=} \{1, t, t^2, t^3, t^4, t^5\}$$

$$\xrightarrow{\frac{df}{dt}} \{0, 1, 2t, 3t^2, 4t^3, 5t^4\} \hat{=} \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}}_{=:\mathbf{D}}$$

Die Determinante ist also  $\det(\mathbf{D}) = 0$

c) Wir leiten alle Basisvektoren ab

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \hat{=} \{\sin(t), \cos(t)\} \xrightarrow{\frac{df}{dt}} \{\cos(t), -\sin(t)\} \hat{=} \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}}_{=: \mathbf{D}}$$

Die Determinante ist also  $\det(\mathbf{D}) = 1$

### Beispiel 12.39 Wronski-Determinante: Kreisscheibe

PRFWDN

Wir betrachten zunächst einen Kreis mit dem Radius  $R = 3$  cm und die Polar-Koordinaten

$$x = \cos(\theta) \cdot r, \quad y = \sin(\theta) \cdot r$$

a) Versuchen Sie die Fläche über das folgende Integral zu berechnen. Was stellen Sie fest?

$$F = \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{r=0}^3 1 \, d\theta \, dr$$

b) Berechnen Sie die Wronski-Determinante und berechnen Sie damit das Volumen

$$F = \int 1 \, da$$

c) Berechnen Sie nun in Polar-Koordinaten für die Kreisscheibe ( $R = 3$  cm) die Integrale das Trägheitsmoment

$$I_1 = \int r^2 \, dv$$

**Lösung:**

a) Das Integral ergibt

$$F = \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{r=0}^3 1 \, d\theta \, dr = 3 \cdot 2\pi = 6\pi$$

Das kann nicht die Fläche des Kreises sein, denn es würde sich berechnen über  $F = \pi \cdot R^2 = 9\pi$

b) Die Wronski-Determinante ergibt sich aus

$$\mathbf{W} : \begin{array}{c|cc} & r & \theta \\ \hline x = \cos(\theta) \cdot r & \frac{dx}{dr} = \cos(\theta) & -\sin(\theta) \cdot r \\ y = \sin(\theta) \cdot r & \frac{dy}{dr} = \sin(\theta) & \cos(\theta) \cdot r \end{array}$$

also

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \cdot r \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \cdot r \end{pmatrix}$$

und die Determinante ist  $\det(\mathbf{W}) = \sin^2(\theta) \cdot r + \cos^2(\theta) \cdot r = r$  Wir berechnen also die Fläche

$$F = \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{r=0}^3 1 \cdot \underbrace{r}_{=\det(\mathbf{W})} d\theta dr = 2\pi \cdot 3^2 = 9 \cdot \pi$$

c) Das Trägheitsmoment ist

$$I_1 = \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{r=0}^3 r^2 \cdot \underbrace{r}_{=\det(\mathbf{W})} d\theta dr = \left[ 2\pi \frac{r^4}{4} \right]_{r=0}^3 = \frac{\pi}{2} \cdot 81$$

### Beispiel 12.40 Wronski-Determinante

OQEVCM

Wir betrachten zunächst einen Zylinder der Länge  $L = 10$  cm und mit dem Radius  $R = 3$  cm und die Zylinderkoordinaten

$$x = \cos(\theta) \cdot r, \quad y = \sin(\theta) \cdot r, \quad z = z$$

a) Versuchen Sie das Volumen über das folgende Integral zu berechnen. Was stellen Sie fest?

$$V = \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{r=0}^3 \int_{z=0}^{10} 1 d\theta dr dz$$

Der Ausdruck ist inspiriert von

$$V = \int \int \int 1 dx dy dz$$

b) Berechnen Sie die Wronski-Determinante und berechnen Sie damit das Volumen

$$V = \int 1 dv$$

c) Berechnen Sie nun in Zylinderkoordinaten für den Zylinder oben ( $L = 10$  cm und  $R = 3$  cm) die Integrale

$$I_1 = \int \frac{1}{r^2} dv \quad I_2 = \int \frac{1}{r} dv$$

**Lösung:**

a) Das Integral ergibt

$$V = \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{r=0}^3 \int_{z=0}^{10} 1 d\theta dr dz = 10 \cdot 3 \cdot 2\pi = 60\pi$$

Das kann nicht das Volumen sein, denn es würde sich berechnen über  $V = \pi \cdot R^2 \cdot L = 90\pi$



b) Die Wronski-Determinante ergibt sich aus

$$\mathbf{W} : \begin{array}{c|ccc} & r & z & \theta \\ \hline x = \cos(\theta) \cdot r & \frac{dx}{dr} = \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) \cdot r \\ y = \sin(\theta) \cdot r & \frac{dy}{dr} = \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \cdot r \\ z = z & 0 & 1 & 0 \end{array}$$

also

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) \cdot r \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \cdot r \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

und die Determinante ist  $\det(\mathbf{W}) = \sin^2(\theta) \cdot r + \cos^2(\theta) \cdot r = r$  Wir berechnen also das Volumen

$$V = \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{r=0}^3 \int_{z=0}^{10} 1 \cdot r \, d\theta \, dr \, dz = 2\pi \cdot 3^2 \cdot 10 = 90 \cdot \pi$$

c) Die Integrale sind

$$I_1 = \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{r=0}^3 \int_{z=0}^{10} \frac{1}{r^2} \cdot \underbrace{r}_{=\det(\mathbf{W})} \, d\theta \, dr \, dz = 2\pi \cdot \log(3) \cdot 10 = 20 \cdot \log(3) \cdot \pi$$

$$I_2 = \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{r=0}^3 \int_{z=0}^{10} \frac{1}{r} \cdot \underbrace{r}_{=\det(\mathbf{W})} \, d\theta \, dr \, dz = 2\pi \cdot 3 \cdot 10 = 20 \cdot 3 \cdot \pi = 60\pi$$

### Beispiel 12.41 Überblick

7TJ6SK

Welche der folgenden Aussagen sind korrekt

- a)  $\det(2\mathbf{A}) = 2 \cdot \det(\mathbf{A})$
- b)  $\det(\mathbf{A} \odot \mathbf{A} \odot \mathbf{A} \odot \mathbf{A} \odot \mathbf{A}) = \det(\mathbf{A})^5$
- c)  $\det(\mathbf{A}) = a_{1,n} \cdot a_{2,n-1} \cdot \dots \cdot a_{1,n}$  für  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$  mit den Einträgen  $a_{i,j} = 0$  falls  $i + j > n + 1$ .
- d)  $\det(\mathbf{A} + \mathbf{B}) = \det(\mathbf{A}) + \det(\mathbf{B})$
- e)  $\det(\mathbf{A} \odot \mathbf{B}) = \det(\mathbf{B} \odot \mathbf{A})$
- f)  $\det(\mathbf{B} \odot \mathbf{B}^\top \odot \mathbf{B}) = \det(\mathbf{B})^3$

**Lösung:**

- a) Korrekt wäre  $\det(2\mathbf{A}) = 2^n \cdot \det(\mathbf{A})$ , falls  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$
- b) Korrekt

c) Korrekt wäre

$$\det(\mathbf{A}) = (-1)^{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor} \cdot a_{1,n} \cdot a_{2,n-1} \cdots a_{n,1}$$

d) Nicht korrekt

e) Korrekt

f) Korrekt, denn

$$\det(\mathbf{B} \odot \mathbf{B}^T \odot \mathbf{B}) = \det(\mathbf{B} \odot \mathbf{B}) \cdot \det(\mathbf{B}^T) = \det(\mathbf{B})^2 \cdot \det(\mathbf{B}) = \det(\mathbf{B})^3$$

---

Umkehrabbildung und inverse Matrix

---



---

13.1 Definitionen . . . . .	344
13.2 Die inverse Matrix bestimmen . . . . .	344
13.3 Ein reguläres LGS lösen mit $A^{-1}$ . . . . .	351
13.4 Kriterien für die Existenz der Inversen . . . . .	356
13.5 Injektiv, surjektiv und bijektiv Abbildungen . . . . .	360
13.6 Weitere Sätze über die Inverse . . . . .	366
13.7 Maschenstromverfahren . . . . .	370
13.8 Knotenpotentialverfahren . . . . .	376
13.9 Orthogonale Matrizen und ihre Inverse* . . . . .	377
13.10 Die inverse Matrix mit der Adjungierten* . . . . .	379

---

### 13.1 Definitionen

**Definition Matrix-Inverse**

Sei  $A$  eine  $n \times n$ -Matrix. Existiert eine Matrix  $B$  so, dass gilt

$$A \odot B = \mathbf{1}$$

so nennt man  $A$  invertierbar und die Matrix  $B$  die Matrix-Inverse von  $A$ .

Im Weiteren schreiben wir  $A^{-1}$  für die Matrix-Inverse von  $A$  und nicht wie oben  $B$ , d.h. wir schreiben

$$A \odot A^{-1} = \mathbf{1}$$

Die Matrix  $A^{-1}$  nennt man auch die inverse Matrix von  $A$ .

### Definition Reguläre Matrizen und LGS

Eine Matrix  $A$  heisst **regulär**, falls  $A^{-1}$  existiert.

Eine Matrix  $A$  heisst **singulär**, falls die Inverse nicht existiert.

Eine LGS  $A\vec{x} = \vec{b}$  heisst **regulär**, falls  $A^{-1}$  existiert.

## 13.2 Die inverse Matrix bestimmen

### Beispiel 13.1 LGS lösen mit Gauss-Jordan

443930

$$\begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & -4 \\ 0 & -10 & 41 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ -10 \\ 103 \end{pmatrix}$$

Schreibe das Gleichungssystem zuerst als erweiterte Koeffizienten-Matrix. Wende dann das Gauss-Jordan Verfahren an.

**Lösung:**

Zuerst das Gauss Verfahren:

$$A = \left[ \begin{array}{ccc|c} 1 & -1 & 1 & 2 \\ 0 & 1 & -4 & -10 \\ 0 & -10 & 41 & 103 \end{array} \right] \rightarrow A' = \left[ \begin{array}{ccc|c} 1 & -1 & 1 & 2 \\ 0 & 1 & -4 & -10 \\ 0 & 0 & 1 & 3 \end{array} \right]$$

Mit der Zeilen-Umformung

$$A' = (A_1; A_2; A_3 + 10A_2)$$

Dann zusätzliche Schritte für Gauss-Jordan:

$$A'' = \left[ \begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & -3 & -8 \\ 0 & 1 & -4 & -10 \\ 0 & 0 & 1 & 3 \end{array} \right] \Rightarrow A''' = \left[ \begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 3 \end{array} \right]$$

mit den Zeilen-Umformungen

$$\begin{aligned} A'' &= (A'_1 + A'_2; A'_2; A'_3) \\ A''' &= (A''_1 + 3A''_3; A''_2 + 4A''_3; A''_3) \end{aligned}$$

Die Lösung kann jetzt direkt abgelesen werden:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}$$

Das Gauss-Jordan Verfahren wird in Matlab mit `rref` aufgerufen. Wird es benutzt um LGSs in erweiterter Koeffizienten-Form zu lösen — wie hier in diesem Beispiel — ist es das flexibelste Instrument um LGSs zu lösen. Also: Immer `rref` verwenden, wenn ein LGS mit Matlab gelöst werden soll.

**Beispiel 13.2 Die Inverse bestimmen.**

332829

Bestimme die Matrix-Inverse von  $A = \begin{pmatrix} 1 & -2 & -6 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & -5 & -9 \end{pmatrix}$  mit dem Gauss-Jordan

Verfahren. Überprüfe das Resultat.

**Lösung:**

$$A = \begin{pmatrix} 1 & -2 & -6 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & -5 & -9 \end{pmatrix} \left| \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \right. = \mathbb{1}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & -2 & -6 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \left| \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 5 & 1 \end{pmatrix} \right.$$

$$\begin{pmatrix} 1 & -2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \left| \begin{pmatrix} 1 & 30 & 6 \\ 0 & -9 & -2 \\ 0 & 5 & 1 \end{pmatrix} \right.$$

$$\mathbb{1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \left| \begin{pmatrix} 1 & 12 & 2 \\ 0 & -9 & -2 \\ 0 & 5 & 1 \end{pmatrix} \right. = A^{-1}$$

Die Zeilen-Umformungen sind:

$$A' = (A_1; A_2; A_3 + 5A_2)$$

$$A'' = (A'_1 + 6A'_3; A'_2 - 2A'_3; A'_3)$$

$$A''' = (A''_1 + 2A''_2; A''_2; A''_3)$$

Kontrolle: Die Matrix-Inverse wurde richtig berechnet, denn es gilt

$$A \odot A^{-1} = \mathbb{1}.$$

**Beispiel 13.3 LGS lösen mit Gauss-Jordan**

VTDGZN

$$\underbrace{\begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & -4 \\ 0 & -10 & 41 \end{pmatrix}}_{=:B} \odot \underbrace{\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}}_{=:b} = \underbrace{\begin{pmatrix} 2 \\ -10 \\ 103 \end{pmatrix}}_{=:b}$$

a) Wende das Gauss-Jordan-Verfahren an um die Inverse  $B^{-1}$  zu berechnen.  
Kontrolle:

$$B^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 31 & 3 \\ 0 & 41 & 4 \\ 0 & 10 & 1 \end{pmatrix}$$

b) Überprüfe, ob  $B^{-1}$  die Inverse von  $B$  ist, indem du  $B^{-1} \odot B$  berechnest.

c) Berechne  $B^{-1} \odot \vec{b}$ . Was stellst du fest, wenn du mit der Lösung von Beispiel 13.1 vergleichst?

**Lösung:**

a) Gauss-Jordan-Verfahren:

$$\mathbf{B} = \left( \begin{array}{ccc|ccc} 1 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -4 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -10 & 41 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) = \mathbf{1}$$
$$\mathbf{1} = \left( \begin{array}{ccc|ccc} 1 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -4 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 10 & 1 \end{array} \right) = \mathbf{B}^{-1}$$

Vorgehen:

$$\begin{aligned} \mathbf{B}^i &= (\mathbf{B}_1; \mathbf{B}_2; \mathbf{B}_3 + 10\mathbf{B}_2) \\ \mathbf{B}^{ii} &= (\mathbf{B}_1^i - \mathbf{B}_3^i; \mathbf{B}_2^i + 4\mathbf{B}_3^i; \mathbf{B}_3^i) \\ \mathbf{B}^{iii} &= (\mathbf{B}_1^{ii} + \mathbf{B}_2^{ii}; \mathbf{B}_2^{ii}; \mathbf{B}_3^{ii}) \end{aligned}$$

b) Test:

$$\mathbf{B} \odot \mathbf{B}^{-1} = \mathbf{1} .$$

c) Wir berechnen

$$\mathbf{B}^{-1} \odot \vec{b} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}$$

Wir erhalten auch so die Lösung des LGS.

**Beispiel 13.4 LGS lösen mit Gauss-Jordan**

**WSCFYM**

$$\underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 1 & -3 \\ 3 & -5 & 0 \\ -3 & 4 & 1 \end{pmatrix}}_{=: \mathbf{B}} \odot \underbrace{\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}}_{=: \vec{b}} = \underbrace{\begin{pmatrix} 2 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}}_{=: \vec{b}}$$

- a) Schreibe das LGS als erweiterte Koeffizienten-Matrix. Löse das LGS mit dem Gauss-Verfahren.
- b) Wende dann das Gauss-Jordan-Verfahren an um die Inverse  $\mathbf{B}^{-1}$  zu berech-

nen. Kontrolle:

$$\mathbf{B}^{-1} = \begin{pmatrix} -5 & -13 & -15 \\ -3 & -8 & -9 \\ -3 & -7 & -8 \end{pmatrix}$$

c) Überprüfe, ob  $\mathbf{B}^{-1}$  die Inverse von  $\mathbf{B}$  ist, indem du  $\mathbf{B}^{-1} \odot \mathbf{B}$  berechnest.

d) Berechne  $\mathbf{B}^{-1} \odot \vec{b}$ . Was stellst du fest?

**Lösung:**

a) Das Gauss Verfahren:

$$\mathbf{B} = \left[ \begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & -3 & 2 \\ 3 & -5 & 0 & -1 \\ -3 & 4 & 1 & 0 \end{array} \right] \rightarrow \mathbf{B}' = \left[ \begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & -3 & 2 \\ 0 & -8 & 9 & -7 \\ 0 & 7 & -8 & 6 \end{array} \right]$$

$$\rightarrow \mathbf{B}'' = \left[ \begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & -3 & 2 \\ 0 & -8 & 9 & -7 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{8} & -\frac{1}{8} \end{array} \right]$$

Mit den *Zeilen*-Umformungen

$$\mathbf{B}' = (\mathbf{B}_1; \mathbf{B}_2 - 3\mathbf{B}_1; \mathbf{B}_3 + 3\mathbf{B}_1)$$

$$\mathbf{B}'' = (\mathbf{B}_1; \mathbf{B}_2; \mathbf{B}_3 + \frac{7}{8} \cdot \mathbf{B}_1)$$

Einsetzen von unten nach oben ergibt

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}$$

b) Gauss-Jordan-Verfahren:

$$\begin{array}{l}
 \mathbf{B} = \left( \begin{array}{ccc|ccc}
 1 & 1 & -3 & 1 & 0 & 0 \\
 3 & -5 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 -3 & 4 & 1 & 0 & 0 & 1
 \end{array} \right) = \mathbf{1} \\
 \left( \begin{array}{ccc|ccc}
 1 & 1 & -3 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & -8 & 9 & -3 & 1 & 0 \\
 0 & 7 & -8 & 3 & 0 & 1
 \end{array} \right) \\
 \left( \begin{array}{ccc|ccc}
 1 & 1 & -3 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & -8 & 9 & -3 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & -\frac{1}{8} & \frac{3}{8} & \frac{7}{8} & 1
 \end{array} \right) \\
 \left( \begin{array}{ccc|ccc}
 1 & 1 & -3 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & -8 & 9 & -3 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & -3 & -7 & -8
 \end{array} \right) \\
 \left( \begin{array}{ccc|ccc}
 1 & 1 & 0 & -8 & -21 & -24 \\
 0 & -8 & 0 & 24 & 64 & 72 \\
 0 & 0 & 1 & -3 & -7 & -8
 \end{array} \right) \\
 \left( \begin{array}{ccc|ccc}
 1 & 0 & 0 & -5 & -13 & -15 \\
 0 & -8 & 0 & 24 & 64 & 72 \\
 0 & 0 & 1 & -3 & -7 & -8
 \end{array} \right) \\
 \mathbf{1} = \left( \begin{array}{ccc|ccc}
 1 & 0 & 0 & -5 & -13 & -15 \\
 0 & 1 & 0 & -3 & -8 & -9 \\
 0 & 0 & 1 & -3 & -7 & -8
 \end{array} \right) = \mathbf{B}^{-1}
 \end{array}$$

Schritte des Gauss-Verfahrens wie oben. Danach:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{B}''' &= (\mathbf{B}_1''; \mathbf{B}_2''; \mathbf{B}_3'' \cdot \frac{1}{8}) \\
 \mathbf{B}^{iv} &= (\mathbf{B}_1''' + 3\mathbf{B}_3'''; \mathbf{B}_2''' - 9\mathbf{B}_3'''; \mathbf{B}_3''') \\
 \mathbf{B}^v &= (\mathbf{B}_1^{iv} + \frac{1}{8} \cdot \mathbf{B}_2^{iv}; \mathbf{B}_2^{iv}; \mathbf{B}_3^{iv}) \\
 \mathbf{B}^{vi} &= (\mathbf{B}_1^v; \mathbf{B}_2^v \cdot \frac{(-1)}{8}; \mathbf{B}_3^v)
 \end{aligned}$$

c) Test:

$$\mathbf{B} \odot \mathbf{B}^{-1} = \mathbf{1} .$$

d) Wir berechnen

$$\mathbf{B}^{-1} \odot \vec{b} = \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Wir erhalten auch so die Lösung des LGS.

Beim Invertieren einer Matrix mit dem Gauss-Jordan Verfahren, werden die Umformungen auf die Einheitsmatrix angewendet. So werden die Zeilenumformungen auf der rechten Seite in der Einheitsmatrix "zwischengespeichert".

Betrachten wir dazu eine Umformungen aus den vorherigen Beispiels: Beim ersten Schritt

$$\mathbf{A}' = (\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \mathbf{A}_3 + 5\mathbf{A}_2)$$



Entsteht auf der rechten Seite die Matrix

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 5 & 1 \end{pmatrix}$$

Sie speichert die Umformung "3. Zeile plus 5 mal die 2. Zeile".

**Beispiel 13.5 Berechne das Produkt  $\mathbf{P} \odot \mathbf{M}$ .**

657484

$$\mathbf{P} \odot \begin{pmatrix} 11 & 22 & 33 \\ 1 & 2 & 3 \\ 100 & 200 & 300 \end{pmatrix}$$

Beschreibe den Effekt von  $\mathbf{P}$  auf  $\mathbf{M}$  in Worten.

**Lösung:**

$$\mathbf{P} \odot \mathbf{M} = \begin{pmatrix} 11 & 22 & 33 \\ 1 & 2 & 3 \\ 105 & 210 & 315 \end{pmatrix}.$$

In Worten: Zur dritten Zeile wir 5 mal die zweite Zeile addiert.

Diese Überlegungen können wir für alle Äquivalenzumformungen machen: Welche Umformungen angewendet wurden auf der linken Seite, das wird auf der rechten Seite gespeichert. Deshalb "enthält" am Schluss die Matrix auf der rechten Seite ( $\mathbf{A}^{-1}$ ) alle Umformungen um die ursprüngliche Matrix in die Einheitsmatrix umzuformen, deshalb gilt dann

$$\mathbf{A}^{-1} \odot \mathbf{A} = \mathbf{1}$$

**Infobox Zulässige Umformungen Gauss-Jordan-Verfahren**

- das Vielfache einer Zeile zu einer anderen addieren
- eine Zeile mit einer Zahl multiplizieren
- Zeilen vertauschen

Es sind die selben Umformungen wie beim Gauss-Verfahren (Definition 8.3 und Infobox 8.2), nur werden diese Schritte noch weiter ausgeführt, bis die Eins-Matrix  $\mathbf{1}$  erzeugt wird.

**Beispiel 13.6 Elementare Zeilenumformungen**

CEPCBK

Forme das System  $[\mathbf{A}|\mathbf{1}]$  mit elementaren Zeilenumformungen in das System  $[\mathbf{1}|\mathbf{B}]$  um. Wie verhalten sich  $\mathbf{A}$  und  $\mathbf{B}$  zueinander?

a) 
$$\left[ \begin{array}{ccc|ccc} 2 & 0 & 3 & 1 & 0 & 0 \\ -2 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & -2 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

b) 
$$\left[ \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 4 & 5 & 1 & 0 & 0 \\ 2 & -3 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 8 & 6 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

**Lösung:**

$$\text{a) } \left[ \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & \frac{1}{4} & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{4} \\ 0 & 1 & 0 & \frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{2}{3} \\ 0 & 0 & 1 & \frac{1}{6} & \frac{1}{3} & \frac{1}{6} \end{array} \right]$$

$$\text{b) } \left[ \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & 2 & -\frac{16}{13} & -\frac{19}{13} \\ 0 & 1 & 0 & 1 & -\frac{11}{13} & -\frac{9}{13} \\ 0 & 0 & 1 & -1 & \frac{12}{13} & \frac{11}{13} \end{array} \right]$$

Für A und B gilt

$$\mathbf{A} \odot \mathbf{B} = \mathbf{1} \text{ und } \mathbf{B} \odot \mathbf{A} = \mathbf{1}$$

Die eine ist also Inverse der anderen Matrix.

### 13.3 Ein reguläres LGS lösen mit $\mathbf{A}^{-1}$

Inverse Matrizen erlaubt ein lineares Gleichungssystem

$$\mathbf{A}\vec{x} = \vec{b}$$

wie folgt zu lösen. Wir multiplizieren von beiden Seiten  $\mathbf{A}^{-1}$  von links, dann ergibt sich:

$$\mathbf{A}^{-1}\mathbf{A}\vec{x} = \mathbf{A}^{-1}\vec{b}$$

Gemäss Definition ist das Matrixprodukt auf der linken Seite gleich der Einheitsmatrix,

$$\mathbf{A}^{-1}\mathbf{A} = \mathbf{1}$$

Da diese Matrix den Vektor  $\vec{x}$  nicht verändert ( $\mathbf{1} \odot \vec{x} = \vec{x}$ ), können wir sie weglassen und erhalten die Lösung

$$\vec{x} = \mathbf{A}^{-1}\vec{b}.$$

#### Beispiel 13.7 Lösung des linearen Gleichungssystems mit der Inversen 786014

Berechne die Lösung  $\vec{x}$  des LGS mit Hilfe der Inversen

$$\mathbf{A}\vec{x} = \vec{b}$$

und

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -1 & -1 & 1 \\ 33 & -10 & -1 \\ 5 & 1 & -2 \end{pmatrix}, \mathbf{A}^{-1} = \begin{pmatrix} 21 & -1 & 11 \\ 61 & -3 & 32 \\ 83 & -4 & 43 \end{pmatrix} \text{ und } \vec{b} = \begin{pmatrix} -1 \\ 22 \\ 4 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

Es gilt:

$$\mathbf{A} \odot \vec{x} = \vec{b} \Rightarrow \mathbf{A}^{-1} \odot \mathbf{A}\vec{x} = \mathbf{A}^{-1} \odot \vec{b} \Rightarrow \vec{x} = \mathbf{A}^{-1} \odot \vec{b}$$

Also

$$\vec{x} = \mathbf{A}^{-1} \odot \vec{b} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Weitere Erklärungen zu diesem Thema sind auch in [?, Bd. 2 I 5.5, p. 93] zu finden.

Bei allen Aufgaben ist die Inverse der Koeffizientenmatrix gegeben. Lösen Sie die LGSs. Betrachten Sie am Schluss die Aufgaben b) und e) noch einmal. Was stellen Sie fest?

a)

$$\underbrace{\begin{pmatrix} -5 & 2 \\ -3 & 1 \end{pmatrix}}_{=:A} \odot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 5 \\ 0 \end{pmatrix}}_{=:b} \text{ und } A^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & -2 \\ 3 & -5 \end{pmatrix}$$

b)

$$\left| \begin{array}{cc|c} -2x & -2y & = 0 \\ -3x & -y & = 0 \end{array} \right| \text{ und } B^{-1} = \begin{pmatrix} 0.25 & -0.5 \\ -0.75 & 0.5 \end{pmatrix}$$

c)

$$\underbrace{\begin{pmatrix} -3 & -14 & 6 \\ 1 & -19 & 5 \\ 6 & 1 & -4 \end{pmatrix}}_{=:C} \odot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} -66 \\ -78 \\ 18 \end{pmatrix}}_{=:b} \text{ und } C^{-1} = \begin{pmatrix} 71 & -50 & 44 \\ 34 & -24 & 21 \\ 115 & -81 & 71 \end{pmatrix}$$

d)

$$\left| \begin{array}{ccc|c} -1 & 5 & 1 & = 55 \\ 0 & 149 & 5 & = 1267 \\ 5 & 154 & 1 & = 1247 \end{array} \right| \text{ und } D^{-1} = \begin{pmatrix} -621 & 149 & -124 \\ 25 & -6 & 5 \\ -745 & 179 & -149 \end{pmatrix}$$

e)

$$\underbrace{\begin{pmatrix} 3 & 6 & 8 \\ 3 & 5 & 7 \\ -1 & 11 & 9 \end{pmatrix}}_{=:E} \odot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}}_{=:b} \text{ und } E^{-1} = \begin{pmatrix} -8. & 8.5 & 0.5 \\ -8.5 & 8.75 & 0.75 \\ 9.5 & -9.75 & -0.75 \end{pmatrix}$$

f)

$$\left| \begin{array}{ccc|c} 8 & 0 & -1 & = 5 \\ -3 & 6 & -2.5 & = 43.5 \\ 4 & -1 & 0 & = -5 \end{array} \right| \text{ und } F^{-1} = \begin{pmatrix} -2.5 & 1 & 6 \\ -10 & 4 & 23 \\ -21 & 8 & 48 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

Wir berechnen die Lösung, indem wir die Inverse mit der Inhomogenität  $\vec{b}$  multiplizieren. Wir erhalten:

a)

$$A^{-1} \odot \vec{b} = \begin{pmatrix} 1 & -2 \\ 3 & -5 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} 5 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 \\ 15 \end{pmatrix}$$

b)

$$B^{-1} \odot \vec{b} = \begin{pmatrix} 0.25 & -0.5 \\ -0.75 & 0.5 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

c)

$$\mathbf{C}^{-1} \odot \vec{b} = \begin{pmatrix} 6 \\ 6 \\ 6 \end{pmatrix}$$

e)

$$\mathbf{E}^{-1} \odot \vec{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

d)

$$\mathbf{D}^{-1} \odot \vec{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ 8 \\ 15 \end{pmatrix}$$

f)

$$\mathbf{F}^{-1} \odot \vec{b} = \begin{pmatrix} 1 \\ 9 \\ 3 \end{pmatrix}$$

Bei den Aufgaben b) und e) sehen wir: In einem regulären LGS mit der Inhomogenität  $\vec{0}$  gibt es nur eine Lösung und die ist  $\vec{0}$ .

### Beispiel 13.9 Bestimme die Inverse von A und löse das folgende LGS 183360

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 2 & 0 \\ 2 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ und } \mathbf{A} \odot \vec{x} = \begin{pmatrix} 12 \\ 8 \\ -6 \end{pmatrix}$$

Lösung:

$$\begin{aligned} (\mathbf{A}|\mathbf{1}) &= \left( \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \Rightarrow \left( \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 2 & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & -2 & 0 & 1 \end{array} \right) \\ \Rightarrow \left( \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & \frac{1}{3} & 0 & \frac{1}{3} \\ 0 & 2 & 0 & -\frac{2}{3} & 1 & -\frac{2}{3} \\ 0 & 0 & 1 & -\frac{2}{3} & 0 & \frac{1}{3} \end{array} \right) &\Rightarrow \left( \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & \frac{1}{3} & 0 & \frac{1}{3} \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{1}{3} & \frac{1}{2} & -\frac{1}{3} \\ 0 & 0 & 1 & -\frac{2}{3} & 0 & \frac{1}{3} \end{array} \right) = (\mathbf{1}|\mathbf{A}^{-1}) \end{aligned}$$

$$\vec{x} = \mathbf{A}^{-1} \odot \begin{pmatrix} 12 \\ 8 \\ -6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ -10 \end{pmatrix}$$

### Beispiel 13.10 Matrix-Inverse

536550

Lösen Sie das folgende *inhomogenen* linearen Gleichungssysteme durch Invertierung der Koeffizientenmatrix A mit dem Gauss-Jordan-Verfahren. Geben Sie  $\mathbf{A}^{-1}$  an.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -1 & 3 & 2 \\ 2 & 1 & -1 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Lösung

Die inverse Matrix  $\mathbf{A}^{-1}$  berechnen wir durch gleichzeitiges Anwenden von

Äquivalenztransformationen auf  $\mathbf{A}^{-1}$  und auf  $\mathbb{1}$ :

$$\begin{aligned}
 (\mathbf{A}|\mathbb{1}) &= \left( \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 3 & 2 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & 1 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \Rightarrow \left( \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 3 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -3 & -2 & 0 & 1 \end{array} \right) \Rightarrow \\
 &\left( \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 0 \\ 0 & 0 & -4 & -\frac{7}{3} & -\frac{1}{3} & 1 \end{array} \right) \Rightarrow \left( \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & \frac{5}{12} & -\frac{1}{12} & \frac{1}{4} \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{1}{4} & \frac{1}{12} & \frac{1}{4} \\ 0 & 0 & 1 & \frac{7}{12} & \frac{1}{12} & -\frac{1}{4} \end{array} \right) = (\mathbb{1}|\mathbf{A}^{-1})
 \end{aligned}$$

Die Transformationen sind (hier wird folgende Notation verwendet:  $\mathbf{A}_i$  ist die  $i$ -te Zeile)

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A}' &= (\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2 + \mathbf{A}_1, \mathbf{A}_3 - 2\mathbf{A}_1) \\
 \mathbf{A}'' &= (\mathbf{A}'_1, \mathbf{A}'_2/3, \mathbf{A}'_3 - \mathbf{A}'_2/3) \\
 \mathbf{A}^{-1} &= (\mathbf{A}''_1 + \mathbf{A}''_3/4, \mathbf{A}''_2 + \mathbf{A}''_3/4, -\mathbf{A}''_3/4)
 \end{aligned}$$

Die Lösung erhalten wir aus der Gleichung

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{12} \begin{pmatrix} 5 & -1 & 3 \\ -3 & 3 & 3 \\ 7 & 1 & -3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 3 \\ -1 \\ 3 \end{pmatrix}.$$

### Beispiel 13.11 Eindeutigkeit der Lösung

820317

Für welche Werte des reellen Parameters  $\lambda$  besitzt das inhomogene lineare Gleichungssystem (LGS)  $\mathbf{A}\vec{x} = \vec{c}$  genau eine Lösung?

$$\begin{pmatrix} 2 & \lambda & -1 \\ 0 & 2 & -1 \\ 2 & 1 - \lambda & 3 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}$$

#### Lösung

Ein inhomogenes lineares Gleichungssystem besitzt genau eine eindeutige Lösung, wenn die Matrix invertierbar ist, d.h.  $\det(\mathbf{A}) \neq 0$ . Die Determinante ist (Regel von Sarrus):

$$\det(\mathbf{A}) = 12 - 2\lambda + 0 + 4 + 2(1 - \lambda) + 0 = 18 - 4\lambda.$$

Aus der Bedingung  $\det(\mathbf{A}) = 18 - 4\lambda \neq 0$  folgt  $\lambda \neq \frac{9}{2}$ . Das LGS besitzt eine Lösung, wenn  $\lambda$  von  $\frac{9}{2}$  verschieden ist.

### Beispiel 13.12 Eindeutigkeit der Lösung,

254537

Für welche Werte des reellen Parameters  $\lambda$  besitzt das inhomogene lineare Gleichungssystem

chungssystem genau eine Lösung?

$$\begin{pmatrix} -1 & \lambda & -1 \\ 0 & \lambda & -1 \\ 2 & 1-\lambda & 3 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}$$

### Lösung

Die Lösung existiert und sie ist eindeutig, wenn die Determinante der Koeffizientenmatrix  $\det(\mathbf{A}) \neq 0$  erfüllt. Hier ist (Regel von Sarrus):

$$\det(\mathbf{A}) = -3\lambda - 2\lambda + 0 + 2\lambda - 1 + \lambda + 0 = -1 - 2\lambda$$

und die Lösung ist für alle  $\lambda \neq -\frac{1}{2}$  eindeutig.

### Beispiel 13.13 Inverse bestimmen

SSWSXV

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a & -4 & -6 \\ -8 & 5 & 7 \\ -5 & 3 & 4 \end{pmatrix}, \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & -2 \\ 3 & b & 1 \\ -1 & 1 & -3 \end{pmatrix}$$

a) Bestimmen Sie  $a$  und  $b$  so, dass  $\mathbf{B}$  die Inverse von  $\mathbf{A}$  ist.

b) Lösen Sie mit den Resultaten von oben das lineare Gleichungssystem

$$\begin{cases} x + 2y - 2z = 5 \\ 3x + by + z = 0 \\ -x + y - 3z = a - 1 \end{cases}$$

### Lösung:

Wir multiplizieren die Matrizen und erhalten

$$\mathbf{C} = \mathbf{A} \odot \mathbf{B} = \begin{pmatrix} a-6 & 2a-4b-6 & 14-2a \\ 0 & 5b-9 & 0 \\ 0 & 3b-6 & 1 \end{pmatrix}$$

Falls die eine Matrix die Inverse der anderen ist, sollte  $\mathbf{C} = \mathbb{1}$  und

$$\begin{cases} a-6 = 1 \\ 3b-6 = 0 \end{cases}$$

Daraus folgt  $a = 7$  und  $b = 2$ .

Wir stellen fest, dass das angegebene LGS die Koeffizientenmatrix  $\mathbf{B}$  ergibt. Wir benutzen ihre Inverse  $\mathbf{A}$ , um das LGS zu lösen:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \mathbf{B}^{-1} \odot \begin{pmatrix} 5 \\ 0 \\ 6 \end{pmatrix} = \mathbf{A} \odot \begin{pmatrix} 5 \\ 0 \\ 6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \\ -1 \end{pmatrix}$$

## 13.4 Kriterien für die Existenz der Inversen

### Satz Invertierbare lineare Abbildung

Sei  $L : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$  eine lineare Abbildung,  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$  und  $L(\vec{x}) = \mathbf{A}\vec{x}$ . Dann sind folgende Aussagen äquivalent:

1.  $\mathbf{A}$  ist invertierbar
2.  $\det(\mathbf{A}) \neq 0$
3. Der Rang der Matrix  $\mathbf{A}$  ist  $n$ .
4. Die Spalten von  $\mathbf{A}$  sind linear unabhängig, d.h.  $\dim S(\mathbf{A}) = n$ .
5. Die Zeilen von  $\mathbf{A}$  sind linear unabhängig, d.h.  $\dim Z(\mathbf{A}) = n$ .
6. Die lineare Abbildung  $L$  ist bijektiv.
7. Für jedes  $\vec{b}$  hat die Gleichung  $\mathbf{A}\vec{x} = \vec{b}$  genau eine Lösung.
8. Die Gleichung  $\mathbf{A}\vec{x} = \vec{0}$  hat nur die Lösung  $\vec{x} = \vec{0}$ .
9. Der Kern von  $L$  besteht nur aus dem Nullvektor, d.h.  $\dim \text{Kern}(L) = 0$ .

[?, p.465]

Trifft eine der Aussagen aus dem vorhergehenden Satz zu, so existiert auch die inverse Abbildung  $L^{-1}(\vec{x})$  und es gilt

$$L^{-1}(\vec{x}) = \mathbf{A}^{-1} \odot \vec{x}$$

.

### Satz Matrix einer injektiven Abbildung

Sei  $L : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$  eine lineare Abbildung,  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$  und  $L(\vec{x}) = \mathbf{A}\vec{x}$ . Dann ist  $L$  injektiv genau dann, wenn die Matrix  $\mathbf{A}$  invertierbar ist.

[?, p.465]

### Beispiel 13.14 Projektion

Y9HXCF

$$\vec{P} = \begin{pmatrix} 8 \\ 6 \end{pmatrix}, \vec{Q} = \begin{pmatrix} 5 \\ 10 \end{pmatrix}, \vec{R} = \begin{pmatrix} 11 \\ 2 \end{pmatrix}, \vec{S} = \begin{pmatrix} -4 \\ -3 \end{pmatrix}, \vec{T} = \begin{pmatrix} -7 \\ 1 \end{pmatrix}, \vec{U} = \begin{pmatrix} -1 \\ -7 \end{pmatrix}$$

- a) Berechnen Sie die Bilder der Punkte unter der Abbildung  $L$  mit der Abbildungsmatrix  $\mathbf{A}$

$$L(x, y) = \begin{pmatrix} 16x + 12y \\ 12x + 9y \end{pmatrix} \text{ und } \mathbf{A} = \begin{pmatrix} 16 & 12 \\ 12 & 9 \end{pmatrix}$$

- b) Berechnen Sie die Inverse von  $\mathbf{A}$ .
- c) Falls die Inverse nicht existiert, erklären Sie weshalb.

**Lösung:**

a) Die Bilder lauten

$$\vec{P}' = \vec{Q}' = \vec{R}' = \begin{pmatrix} 200 \\ 150 \end{pmatrix}, \vec{S}' = \vec{T}' = \vec{U}' = \begin{pmatrix} -100 \\ -75 \end{pmatrix}$$

Es fällt auf, dass verschiedene Bildpunkte gleich ausfallen.

b) Inversion von A

$$(\mathbf{A}|\mathbb{1}) = \left( \begin{array}{cc|cc} 16 & 12 & 1 & 0 \\ 12 & 9 & 0 & 1 \end{array} \right) \rightarrow \left( \begin{array}{cc|cc} 4 & 3 & 1/4 & 0 \\ 12 & 9 & 0 & 1 \end{array} \right) \rightarrow \left( \begin{array}{cc|cc} 4 & 3 & 1/4 & 0 \\ 0 & 0 & -3/4 & 1 \end{array} \right)$$

Hier kann die Elimination nicht weitergeführt werden, denn mit der zweiten Zeile (0, 0) kann die 3 in der ersten Zeile nicht eliminiert werden. Die Inverse existiert nicht.

c) Wir haben oben gesehen, dass A die Wirkung hat

$$\vec{P}, \vec{Q}, \vec{R} \xrightarrow{\mathbf{A}} \vec{P}'$$

und

$$\vec{S}, \vec{T}, \vec{U} \xrightarrow{\mathbf{A}} \vec{S}'$$

Die Umkehrfunktion müsste also zum Beispiel folgendes bewerkstelligen können

$$\vec{S}' = \begin{pmatrix} -100 \\ -75 \end{pmatrix} \xrightarrow{\mathbf{A}^{-1}} \vec{S}, \vec{T}, \vec{U}$$

und das ist nicht möglich, denn das Matrix-Produkt  $\mathbf{A}^{-1} \odot \vec{S}'$  erzeugt einen einzigen Punkt und nicht drei verschiedene.

**Beispiel 13.15 Projektion auf eine Gerade**

ISMWWY

$$g : y = -x$$

a) Projizieren Sie den Punkt  $\vec{P} = \begin{pmatrix} 1 \\ 4 \end{pmatrix}$  orthogonal auf  $g$ .

b) Wie lautet die Abbildung allgemein.

c) Bestimme die Projektions-Matrix

d) Bestimme die Inverse von P.

**Lösung:**



Die Gerade hat den Richtungsvektor  $\vec{v} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$  und den Normalenvektor  $\vec{n}' = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ . Also ist wird der Punkt wie folgt projiziert:

$$\vec{P}' = \frac{\vec{P} \odot \vec{v}}{\vec{v} \odot \vec{v}} \cdot \vec{v} = -\frac{3}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

Die Abbildung lautet allgemein

$$L\left(\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}\right) = \frac{\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \odot \vec{v}}{\vec{v} \odot \vec{v}} \cdot \vec{v}$$

oder

$$L\left(\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}\right) = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \odot \frac{\vec{n}'}{|\vec{n}'|} \cdot \frac{\vec{n}'}{|\vec{n}'|}$$

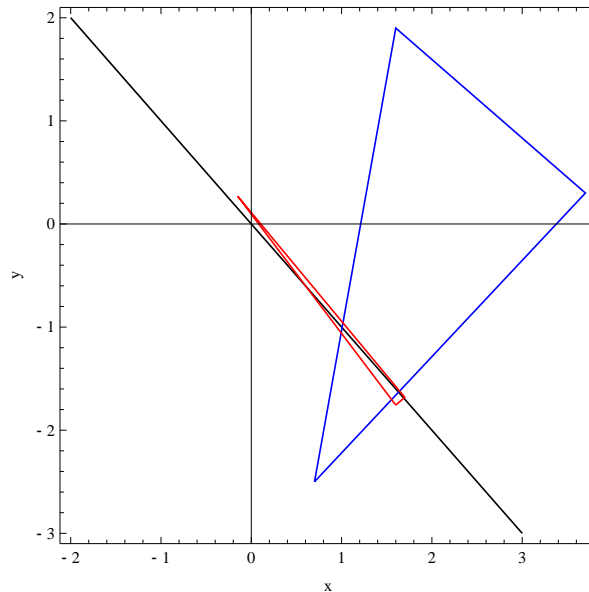
Die beiden Spalten der Projektionsmatrix ergeben sich aus den Bildern der Basisvektoren unter der Projektion:

$$\begin{aligned} \vec{e}'_1 &= \vec{e}_1 - \vec{e}_1 \odot \frac{\vec{n}'}{|\vec{n}'|} \cdot \frac{\vec{n}'}{|\vec{n}'|} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} - \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} \\ \vec{e}'_2 &= \vec{e}_2 - \vec{e}_2 \odot \frac{\vec{n}'}{|\vec{n}'|} \cdot \frac{\vec{n}'}{|\vec{n}'|} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} - \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Die Matrix der Projektion ist also  $\mathbf{P} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$ . Nun wenden wir das Gauss-Jordan-Verfahren an:

$$\mathbf{P} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 2 & 2 \end{pmatrix}$$

Weiter kann nicht umgeformt werden.  $\mathbf{P}$  hat keine Inverse.



**Beispiel 13.16 Fast eine Projektion**

58II14

- a) Berechne die Bilder der Punkte  $\vec{A} = \begin{pmatrix} 0.7 \\ -2.5 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{B} = \begin{pmatrix} 3.7 \\ 0.3 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{D} = \begin{pmatrix} -1.6 \\ 1.9 \end{pmatrix}$  unter der Abbildung

$$Q = \frac{1}{16} \begin{pmatrix} 8 & -8 \\ -8 & 9 \end{pmatrix}$$

- b) Zeichne die Bildpunkte. Beschreibe das Bild des Dreiecks in Worten.  
 c) Invertiere Q!

**Lösung:**

$$\begin{array}{c|c} \mathbf{Q} & \mathbf{1} \\ \hline \begin{pmatrix} 8 & 8 \\ 8 & 9 \\ 8 & 8 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 16 & 0 \\ 0 & 16 \\ 16 & 0 \\ -16 & 16 \\ 2 & 0 \\ -16 & 16 \\ 18 & -16 \\ -16 & 16 \end{pmatrix} = \mathbf{Q}^{-1} \end{array}$$

Q ist keine perfekte Projektion, d.h. das Dreieck wird nicht vollständig auf die Gerade projiziert. Die zweidimensionale Information des Dreiecks bleibt erhalten.

Mit Hilfe von  $Q^{-1}$  kann das Dreieck wieder rekonstruiert werden. Das ist nicht möglich bei einer perfekten Projektion, wie in der vorherigen Aufgabe.

## 13.5 Injektiv, surjektiv und bijektiv Abbildungen

### Definition Injektivität, Surjektivität und Bijektivität

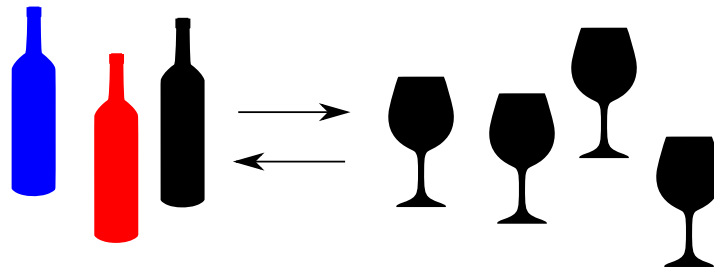
Sei  $L$  eine Abbildung<sup>a</sup> von  $D$  nach  $Z$  oder in Symbolen

$$L : D \mapsto Z .$$

- $L$  heisst **injektiv**, falls für je zwei Elemente  $x_1, x_2 \in D$  mit  $x_1 \neq x_2$  gilt:  $L(x_1) \neq L(x_2)$ .
- $L$  heisst **surjektiv**, falls zu jedem  $y \in Z$  mindestens ein  $x \in D$  existiert mit  $L(x) = y$ .
- $L$  heisst **bijektiv**, falls  $L$  injektiv und surjektiv ist.

<sup>a</sup>Das Wort Abbildung bedeutet bereits, dass jedem  $x \in D$  ein  $y \in Z$  zugeordnet wird.

[?, p.10]

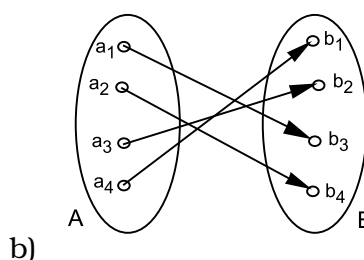
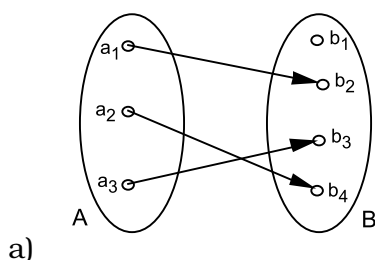


Wir können die Begriffe injektiv und surjektiv in einem Bild veranschaulichen. Wir betrachten die Flaschen  $x_1, x_2, x_3, \dots$  als Definitionismenge  $D$  und die gefüllten Gläser  $L(x_1), L(x_2), L(x_3), L(x_4) \dots$  als Zielmenge. Injektiv bedeutet dann, dass verschiedene Flaschen nur in verschiedene Gläser geschüttet wurden (keine zwei Flaschen, wurden in das selbe Glas geschüttet). Und surjektiv bedeutet, dass es keine leeren Gläser gibt, nachdem eingeschenkt wurde.

### Beispiel 13.17 Injektiv, surjektiv, bijektiv;

089077

Beurteilen Sie welche Eigenschaften die aufgeführten Funktionen besitzen:



a)  $f : x \in \mathbb{R}^- \mapsto y \in \mathbb{R}^+ \text{ mit } y = x^2$

b)  $f : x \in \mathbb{R} \setminus \{0\} \mapsto y \in \mathbb{R}^+ \text{ mit } y = x^2$

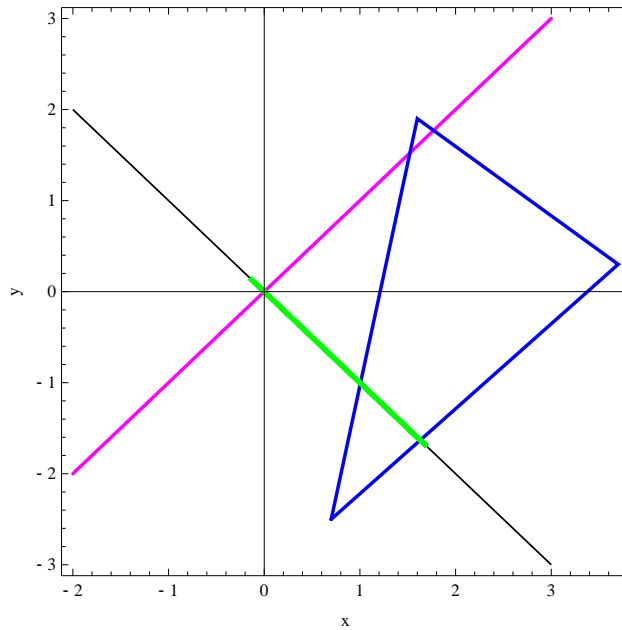


Abbildung 13.1: Bei der Projektion  $P$  wird die ganze violette Gerade auf den Ursprung abgebildet. Die Abbildung ist nicht injektiv. Deshalb gibt es keine Inverse.

### Lösung

- |                                  |                                  |
|----------------------------------|----------------------------------|
| a) injektiv aber nicht surjektiv | c) bijektiv                      |
| b) bijektiv                      | d) surjektiv aber nicht injektiv |

### Satz Existenz der Umkehrabbildung

Ist  $L : D \mapsto Z$  bijektiv, so existiert eine eindeutige Abbildung  $L^{-1} : Z \mapsto D$ , die jedem  $y \in Z$  ein  $x \in D$  zuordnet mit  $L(x) = y$ . Diese Abbildung heisst Umkehrabbildung von  $L$  und wird als  $L^{-1}$  geschrieben.

[?, p.10]

In Abb. 13.1 wird gezeigt, dass die Abbildung  $Q$  die Abstände zur Geraden  $g : y = -1x$  nur kleiner macht. Die Richtung  $\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$  wird zwar geschrumpft, aber es wird nicht projiziert. Dann fallen durch die Abbildung  $Q$  keine weiteren Punkte auf die Gerade  $g$  ausser die, die schon darauf sind. Deshalb ist  $Q$  injektiv<sup>1</sup> und hat auch eine Inverse.

<sup>1</sup>surjektiv ist die Abbildung sowieso

### Infobox Eigenschaften der Projektion

- Informationen über eine oder mehr Dimension(en) gehen verloren.
- Es gibt noch mehr Vektoren als  $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$  die auf  $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$  abgebildet werden.
- Die Matrix, die eine Projektion enthält, erkennt man daran, dass die Spaltenvektoren linear abhängig sind.

### Beispiel 13.18 Umkehrfunktion

081061

Betrachten Sie die Funktion  $f(x) : x \in \mathbb{R} \mapsto y \in \mathbb{R}$  mit  $y = m \cdot x + q$  ( $m, q \in \mathbb{R}$ ).

- Bestimmen Sie für den Fall, dass  $f$  bijektiv ist, die Umkehrfunktion  $f^{-1}$ .
- Bestimmen Sie, für welche Werte von  $m$  und  $q$  die Funktion  $f$  bijektiv ist.
- Zeigen Sie, dass die in b) bestimmte Funktion  $f^{-1}$  tatsächlich die Umkehrfunktion von  $f$  ist, indem Sie nachprüfen, dass  $f^{-1} \circ f = 1$  gilt.

#### Lösung

- Die Umkehrfunktion berechnet sich durch Vertauschung der Namen der Variablen  $x$  und  $y$

$$x = m \cdot y + q$$

und Auflösen nach  $y$ :

$$\begin{array}{rcl} x & = & m \cdot y + q \\ x - q & = & m \cdot y \\ \frac{x-q}{m} & = & y \end{array} \quad \left| \begin{array}{l} -q \\ : m \end{array} \right.$$

Die Umkehrfunktion ist also  $y = \frac{x-q}{m}$ .

- Der letzte Schritt der Auflösung funktioniert nur, falls  $m \neq 0$ . Deshalb ist  $f$  für alle  $q$ , aber nur für  $m \neq 0$  bijektiv.

- $f^{-1} \circ f = f^{-1}(f(x)) = f^{-1}(m \cdot x + q) = \frac{(m \cdot x + q) - q}{m} = x$

### Beispiel 13.19 Invertierbarkeit

980407

Welche der folgenden Matrizen lassen sich invertieren. Entscheiden Sie anhand der Determinante.

- $\begin{pmatrix} 3 & -3 \\ 4 & -4 \end{pmatrix}$

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

- $\begin{pmatrix} -10 & -5 & 2 & -6 \\ 4 & 3 & -1 & 5 \\ 1 & -1 & 0 & -4 \\ -7 & -4 & 0 & -4 \end{pmatrix}$

#### Lösung

Falls  $\det(\mathbf{A}) \neq 0$  lässt sich eine Matrix invertieren. Die Determinanten sind hier:

a)  $\det(\mathbf{A}) = 0$

b)  $\det(\mathbf{B}) = -18$

c)  $\det(\mathbf{C}) = 12$

### Beispiel 13.20 Invertierbarkeit

312846

Welche der folgenden Matrizen lassen sich invertieren. Entscheiden Sie anhand der linearen Abhängigkeit der Zeilen.

a)  $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -5 \end{pmatrix}$

c)  $\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 3 & -3 & -3 \\ 3 & 3 & 0 \\ 6 & 3 & -3 \end{pmatrix}$

b)  $\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 3 & -3 & -3 \\ 3 & 3 & 0 \\ 2 & -4 & -3 \end{pmatrix}$

d)  $\mathbf{D} = \begin{pmatrix} -5 & 1 & -1 & -1 \\ -1 & 3 & 1 & 1 \\ -6 & 1 & -2 & -2 \\ 4 & -4 & 2 & 2 \end{pmatrix}$

#### Lösung

Matrizen mit linear abhängigen Zeilen lassen sich nicht invertieren. Wir notieren die  $i$ -te Zeile der Matrix  $\mathbf{A}$  mit  $\mathbf{A}_i$ .

a) Die beiden Zeilen sind linear abhängig, also lässt sich  $\mathbf{A}$  nicht invertieren.

b) Mit der Umformung

$$\mathbf{B}' = (\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1, \mathbf{B}_3 - 2/3\mathbf{B}_1)$$

ergibt sich die Matrix  $\begin{pmatrix} 3 & -3 & -3 \\ 0 & 6 & 3 \\ 0 & -2 & -1 \end{pmatrix}$ .  $\mathbf{B}'_2$  und  $\mathbf{B}'_3$  sind linear abhängig, also lässt sich  $\mathbf{B}$  nicht invertieren.

c) Mit der Umformung

$$\mathbf{C}' = (\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2 - \mathbf{C}_1, \mathbf{C}_3 - 2 \cdot \mathbf{C}_1)$$

ergibt sich die Matrix  $\begin{pmatrix} 3 & -3 & -3 \\ 0 & 6 & 3 \\ 0 & 9 & 3 \end{pmatrix}$ . Die weitere Umformung

$$\mathbf{C}'' = (\mathbf{C}'_1, \frac{1}{2} \cdot \mathbf{C}'_2, \mathbf{C}'_3 - \frac{3}{2} \cdot \mathbf{C}'_2)$$

führt auf die Matrix  $\begin{pmatrix} 3 & -3 & -3 \\ 0 & 3 & \frac{3}{2} \\ 0 & 0 & -\frac{3}{2} \end{pmatrix}$ . Das ist eine obere Dreiecksmatrix, in der die Zeilen (oder Spalten) immer linear unabhängig sind. Also lässt sich  $\mathbf{C}$  invertieren.

d) Mit den Umformung

$$\mathbf{D}' = (\mathbf{D}_2, \mathbf{D}_1, \mathbf{D}_3, \mathbf{D}_4)$$

$$\mathbf{D}'' = (\mathbf{D}'_1, \mathbf{D}'_2 - 5\mathbf{D}'_1, \mathbf{D}'_3 - 6\mathbf{D}'_1, \mathbf{D}'_4 + 4\mathbf{D}'_1)$$

$$\mathbf{D}''' = (\mathbf{D}''_1, \mathbf{D}''_2 - \mathbf{D}''_3, \mathbf{D}''_3, \mathbf{D}''_4 + \mathbf{D}''_3)$$

$$\mathbf{D}'''' = (\mathbf{D}'''_1, \mathbf{D}'''_2/3, \mathbf{D}'''_3/17 + \mathbf{D}'''_2/3, \mathbf{D}'''_4 + 3\mathbf{D}'''_2)$$

ergeben sich die Matrizen

$$\mathbf{D}' = \begin{pmatrix} -1 & 3 & 1 & 1 \\ -5 & 1 & -1 & -1 \\ -6 & 1 & -2 & -2 \\ 4 & -4 & 2 & 2 \end{pmatrix}, \mathbf{D}'' = \begin{pmatrix} -1 & 3 & 1 & 1 \\ 0 & -14 & -6 & -6 \\ 0 & -17 & -8 & -8 \\ 0 & 8 & 6 & 6 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{D}''' = \begin{pmatrix} -1 & 3 & 1 & 1 \\ 0 & 3 & 2 & 2 \\ 0 & -17 & -8 & -8 \\ 0 & -9 & -2 & -2 \end{pmatrix}, \mathbf{D}'''' = \begin{pmatrix} -1 & 3 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & \frac{2}{3} & \frac{2}{3} \\ 0 & 0 & \frac{10}{51} & \frac{10}{51} \\ 0 & 0 & 4 & 4 \end{pmatrix}.$$

$\mathbf{D}'''_3$  und  $\mathbf{D}''''_4$  sind linear abhängig, also lässt sich C nicht invertieren.

### Definition Kern einer Abbildung $L$ , Nullraum einer Matrix $A$

Wir betrachten alle  $\vec{x}$ , die über  $L(\vec{x})$  auf  $\vec{0}$  abgebildet werden:

$$L(\vec{x}) = \vec{0}.$$

Diese Vektoren heissen **Kern** von  $L$ .

Die Matrix  $A$  hat einen **Nullraum**. Es sind die Vektoren  $\vec{x}$  für die gilt

$$A\vec{x} = \vec{0}.$$

Wir werden nicht unterscheiden zwischen einer linearen Abbildung  $L$  und der entsprechenden Abbildungsmatrix  $A$ . Deshalb werden wir auch vom *Kern einer Matrix* sprechen.

Matrizen mit  $\text{Kern}(A) \neq \vec{0}$  lassen sich nicht invertieren. Um dies zu verstehen, halten Sie sich vor Augen, dass eine Abbildung einem Element der Bildmenge nur ein Element der Definitionsmenge zuordnen darf, damit sie invertierbar bleibt.

Betrachten wir kurz den Fall, wo eine Abbildung zwei Elementen  $g_1$  und  $g_2$  das selbe Element  $h$  in der Bildmenge zuordnet. Bei der Umkehrabbildung ist nicht klar, ob  $h$  auf  $g_1$  oder  $g_2$  abgebildet werden soll. Deshalb existiert keine Umkehrabbildung. Siehe auch Beispiel 13.14.

Gibt es ausser  $\vec{0}$  noch andere Vektoren, die auf  $\vec{0}$  abgebildet werden, ist die Abbildung  $A$  nicht umkehrbar.

Um den Nullraum zu bestimmen, lösen wir das Gleichungssystem  $A\vec{x} = \vec{0}$ . In der erweiterten Matrix-Form, braucht man die Nullen in der letzten Spalten nicht zu schreiben, da die Äquivalenttransformationen dort stets wieder Nullen ergeben.

Welche der folgenden Matrizen lassen sich invertieren. Bestimmen Sie dazu den Kern der Abbildungen mit Zeilenoperationen, d.h. löse  $A\vec{x} = \vec{0}$ .

a)  $A = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$

b)  $B = \begin{pmatrix} 0 & -4 & 7 \\ 0 & 0 & -4 \\ 0 & 4 & -1 \end{pmatrix}$

c)  $C = \begin{pmatrix} -7 & 0 & -8 & -5 \\ 4 & 1 & 7 & 3 \\ -1 & 0 & -2 & -2 \\ -2 & -3 & -1 & 2 \end{pmatrix}$

**Lösung**

Wir notieren die  $i$ -te Spalte der Matrix  $A$  mit  $A_i$ .

a) Mit den Umformungen

$$A' = (A_1, A_2 - A_1)$$

ergibt sich die Matrix

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

Sie bildet keinen anderen Vektor ausser  $\vec{0}$  auf  $\vec{0}$  ab. Der Kern ist also  $\vec{0}$ . Deshalb lässt sich  $A$  invertieren.

b) Die erste Spalte ist gleich 0, also ist der Vektor  $\vec{d} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$  im Kern und  $B$  lässt sich nicht invertieren.

c) Mit den Umformungen

$$C' = (C_3, C_2 + 4C_3, C_1 - 7C_3, C_4 - 2C_3); C'' = (C'_1, C'_2, C'_3, C'_4 + 3C'_2)$$

ergeben sich die Matrizen

$$C' = \begin{pmatrix} -1 & 0 & -2 & -2 \\ 0 & 1 & -1 & -5 \\ 0 & 0 & 6 & 9 \\ 0 & -3 & 3 & 6 \end{pmatrix} \quad C'' = \begin{pmatrix} -1 & 0 & -2 & -2 \\ 0 & 1 & -1 & -5 \\ 0 & 0 & 6 & 9 \\ 0 & 0 & 0 & -9 \end{pmatrix}.$$

Aus der letzten Zeile in  $C''$  folgt, dass  $x_4$  und damit auch  $x_1, x_2, x_3$  gleich 0 sind. Deshalb ist nur  $\vec{0}$  im Kern von  $C$  und die Matrix lässt sich invertieren.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & k-1 \\ k & 0 & -1 \\ 6 & 2 & -3 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} k-3 & -3 & k \\ 3 & k+2 & -1 \\ -2 & -4 & 1 \end{pmatrix}$$

a) Bestimme  $k$ , so dass  $A$  singulär<sup>a</sup> ist.



b) Bestimme die Werte von  $k$ , so dass  $\mathbf{B}$  die Inverse von  $\mathbf{A}$  ist.

c) Das System

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & k-1 & 1 & 0 & 0 \\ k & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 6 & 2 & -3 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

kann durch elementare Zeilenoperationen in das System

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a & b & c \\ 0 & 1 & 0 & d & e & f \\ 0 & 0 & 1 & g & h & i \end{pmatrix}$$

überführt werden. Benutze die Resultate von oben.

**Lösung:**

a)  $\mathbf{A}$  ist singulär, falls  $\det(\mathbf{A}) = 0$ . Wir berechnen

$$\det(\mathbf{A}) = -4 + k + 2k^2 = 0$$

mit den Lösungen  $k = \frac{1}{4} \cdot (-1 \pm \sqrt{41})$ .

b) Falls die eine Matrix die Inverse der anderen ist, sollte  $\mathbf{C} = \mathbb{1}$ . Wir multiplizieren die Matrizen und erhalten

$$\mathbf{C} = \mathbf{A} \odot \mathbf{B} = \begin{pmatrix} k - 2(k-1) & -4(k-1) + k - 1 & 2k - 2 \\ (k-3)k + 2 & 4 - 3k & k^2 - 1 \\ 6(k-3) + 12 & 2(k+2) - 6 & 6k - 5 \end{pmatrix}.$$

Das Element  $c_{1,1}$  sollte 1 sein, daraus folgt  $k - 2(k-1) = 1$  und  $k = 1$ .

c) Die Angaben bedeuten, dass die Matrix

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{pmatrix}$$

die Inverse von  $\mathbf{A}$  ist.

<sup>a</sup>singulär=hat keine Inverse

## 13.6 Weitere Sätze über die Inverse

### Beispiel 13.23 Linksinverse, Rechtsinverse

285208

Da die Matrizen nicht kommutativ sind, ergibt sich die Frage ob aus

$$\mathbf{A} \odot \mathbf{A}^{-1} = \mathbb{1}$$

auch folgt

$$\mathbf{A}^{-1} \odot \mathbf{A} = \mathbb{1} ?$$

Multiplizieren Sie dafür den ersten Ausdruck mit  $A^{-1}$  und benutzen Sie die Gesetze für die Matrixmultiplikation (Satz 9.3)

**Lösung:**

Wir multiplizieren den ersten Ausdruck von links mit  $A^{-1}$ . Es ergibt sich

$$A^{-1} \odot (A \odot A^{-1}) = \underbrace{A^{-1} \odot \mathbb{1}}_{=A^{-1}}$$

Wir wissen, die Matrixmultiplikation ist assoziativ. Deshalb können wir die Matrizen mit einer Klammer umgruppieren.

$$(A^{-1} \odot A) \odot A^{-1} = A^{-1}$$

Wir sehen jetzt: Unabhängig davon, wie die Matrix  $A^{-1}$  lautet, der Ausdruck in Klammer (...), verändert diese Matrix nicht. Dies kann nur wahr sein, wenn in der Klammer die Einheitsmatrix steht, also

$$\underbrace{(A^{-1} \odot A)}_{=1}$$

Schliesslich schreiben wir also:

$$A \odot A^{-1} = A^{-1} \odot A = \mathbb{1}.$$

Aus diesen Überlegungen (Beispiel) folgt, dass die Matrix mit ihrer Matrix-Inversen immer kommutiert.

#### Infobox Inverse für $A \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$

Für

$$A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$$

gilt

$$A^{-1} = \frac{1}{ad - bc} \begin{bmatrix} d & -b \\ -c & a \end{bmatrix} = \frac{1}{\det(A)} \cdot \begin{pmatrix} d & -b \\ -c & a \end{pmatrix}$$

Dies gilt, falls  $A$  regulär ist, d.h.  $\det(A) \neq 0$ .

#### Beispiel 13.24 Inverse für $A \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$

Invertieren Sie folgende Matrizen

a)  $A = \begin{pmatrix} 3 & 1 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}$

b)  $B = \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 4 & 3 \end{pmatrix}$

c)  $C = \begin{pmatrix} -2 & 2 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$

d)  $D = \begin{pmatrix} 9 & 5 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}$

**Lösung:**

a)  $A = \begin{pmatrix} 1. & -1. \\ -2. & 3. \end{pmatrix}$

b)  $B = \begin{pmatrix} 1.5 & -0.5 \\ -2. & 1. \end{pmatrix}$

c) existiert nicht

d)  $D = \begin{pmatrix} -1. & 5. \\ 2. & -9. \end{pmatrix}$

### Infobox Weitere Gesetze für die Inverse

Seien  $A$  und  $B$  regulär, dann gilt

- $(A^{-1})^{-1} = A$
- $(A \odot B)^{-1} = B^{-1} \odot A^{-1}$
- $(A^T)^{-1} = (A^{-1})^T$

Die Beweise für die Sätze finden sich in Beispiel 13.25.

### Beispiel 13.25 Beweise für die Gesetze der Inversen

TPXL3B

Wir betrachten reguläre die Matrizen  $A$  und  $B$ .

a) Finden Sie Argumente, weshalb  $(A^{-1})^{-1} = A$

b) Zeigen Sie, dass  $(A \odot B)^{-1} = A^{-1} \odot B^{-1}$

c) Zeigen Sie, dass gilt

$$(A^{-1})^T = (A^T)^{-1}$$

Vorgehen:

i) Wir starten mit dem Ausdruck  $A^{-1} \odot A = \mathbb{1}$

ii) Transponieren auf beiden Seiten

iii) Benutze

$$(A \odot B)^T = B^T \odot A^T$$

und vereinfache auf beiden Seiten

d) Vereinfachen Sie folgenden Ausdruck soweit wie möglich

$$(A \odot A^T)^{-1} A \odot (B^T \odot A)^{-1} \odot [(B^{-1})^T]^{-1}$$

**Lösung:**

a) Gauss-Jordan-Verfahren kann rückwärts gelesen werden als Inversion der Inversen.  $\mathbf{A}$  entsteht dann als Inverse von  $\mathbf{A}^{-1}$

b) Wir argumentieren in Worten: Gesucht ist das Inverse des Ausdrucks

$$(\mathbf{A} \odot \mathbf{B})$$

oder in Symbolen: Wir suchen eine Matrix  $\mathbf{C}$ , die folgendes bewerkstelligen kann für alle Matrizen  $\mathbf{A}$  und  $\mathbf{B}$ :

$$(\mathbf{A} \odot \mathbf{B}) \odot \mathbf{C} = \mathbf{1}$$

Wir wissen, dass die Matrixmultiplikation Assoziativ ist. Deshalb schreiben wir ohne Klammern:

$$\mathbf{A} \odot \mathbf{B} \odot \mathbf{C} = \mathbf{1}$$

Wir versuchen nun  $\mathbf{C}$  so aufzubauen, dass  $\mathbf{C}$  nacheinander "die Wirkung der Matrizen  $\mathbf{A}$  und  $\mathbf{B}$  rückgängig macht". Wir finden

$$\mathbf{C} = \mathbf{B}^{-1} \odot \mathbf{A}^{-1}$$

Zusammengefasst also

$$(\mathbf{A} \odot \mathbf{B})^{-1} = \mathbf{B}^{-1} \odot \mathbf{A}^{-1}$$

c) Wie oben beschrieben, führen wir die Schritte durch. Start

$$\mathbf{A}^{-1} \odot \mathbf{A} = \mathbf{1}$$

Transponieren auf beiden Seiten

$$(\mathbf{A}^{-1} \odot \mathbf{A})^{\top} = \mathbf{1}^{\top}$$

Gesetz für Transponierte benutzen

$$\mathbf{A}^{\top} \odot (\mathbf{A}^{-1})^{\top} = \mathbf{1} \tag{13.1}$$

Achtung, dies ist nicht

$$\mathbf{A}^{\top} \odot (\mathbf{A}^{\top})^{-1} = \mathbf{1} \tag{13.2}$$

Die Gleichung 13.2 ist selbstverständlich, denn es ist eine Abwandlung von  $\mathbf{B} \odot (\mathbf{B})^{-1} = \mathbf{1}$ , nur dass statt  $\mathbf{B}$  jetzt  $\mathbf{A}^{\top}$  geschrieben wurde.

Der Ausdruck hingegen überrascht. Er besagt, dass  $(\mathbf{A}^{-1})^{\top}$ , den gleichen Effekt hat auf  $\mathbf{A}^{\top}$ , wie die Inverse  $(\mathbf{A}^{\top})^{-1}$  von  $\mathbf{A}^{\top}$ . Daraus folgern wir, dass wir auf zwei verschiedene Arten, die selbe Matrix gefunden haben, d.h.

$$(\mathbf{A}^{-1})^{\top} = (\mathbf{A}^{\top})^{-1}$$

d) Nach den Vereinfachungen bleibt

$$(\mathbf{A} \odot \mathbf{A}^{\top})^{-1}$$

**Beispiel 13.26 Formal auflösen**

CTX1K9

Wir betrachten die Matrizen  $A, B \in \mathbb{R}^{n \times n}$ . Löse Sie die Gleichungen formal nach  $X$  auf und geben Sie an, unter welcher Bedingung dies möglich ist.

a)  $A \odot X = B$

b)  $3A \odot X = B \odot X$

c)  $(A \odot X)^T = 4X^T \odot B - 5C$

d)  $A \odot X = X \odot B$

**Lösung:**

Wir benutzen  $\mathbb{0}$  für die Matrix mit lauter Nullen.

a)  $A \odot X = B$ . Wir multiplizieren auf beiden Seiten  $A^{-1}$  und erhalten

$$X = A^{-1} \odot B$$

b) Wir subtrahieren auf beiden Seiten  $B \odot X$  und klammern  $X$  aus:

$$(3A - B) \odot X = \mathbb{0}$$

Wir multiplizieren auf beiden Seiten das Inverse der Klammer und erhalten

$$X = (3A - B)^{-1} \odot \mathbb{0} = \mathbb{0}$$

c) Wir wenden das Gesetz für die Transponierte an

$$X^T \odot A^T = 4X^T \odot B - 5C$$

Nun bringen wir alle Unbekannten  $X^T$  auf die linke Seite und klammern aus

$$X^T \odot (A^T - 4 \odot B) = -5C$$

Wir multiplizieren mit dem Inverse der Klammer:

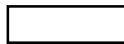
$$X^T = -5C \odot (A^T - 4 \odot B)^{-1}$$

Schliesslich transponieren wir

$$X = -5 [(A^T - 4 \odot B)^{-1}]^T \odot C^T$$

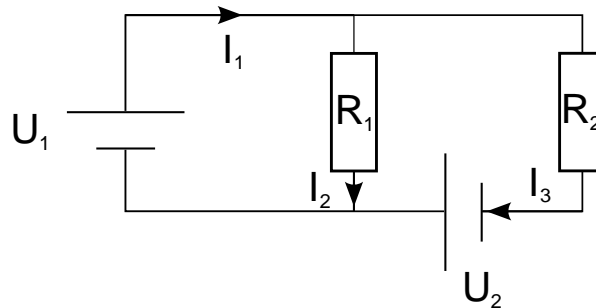
d)  $A \odot X = X \odot B$  hat keine allgemeine Lösung ausser  $X = \mathbb{0}$

**13.7 Maschenstromverfahren**

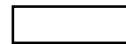
**Beispiel 13.27 Bestimme die Ströme  $I_1$ ,  $I_2$  und  $I_3$** 

117132

Arbeite dabei mit der inversen Matrix. Rechnen Sie zunächst mit den bekannten Grössen  $R_1 = 1\Omega$ ,  $R_2 = 0.5\Omega$  und  $U_1 = 1\text{ V}$  und  $U_2 = 2\text{ V}$ . Rechnen Sie erst dann allgemein.

**Lösung:**

$$\begin{aligned} \bullet & I_1 - I_2 - I_3 = 0 \\ \bullet & R_1 \cdot I_2 = U_1 \\ \bullet & -R_1 \cdot I_2 + R_2 \cdot I_3 = U_2 \end{aligned}$$



Wir schreiben das LGS in Matrixschreibweise

$$\mathbf{A}\vec{I} = \vec{b}$$

dabei gruppieren wir die Ströme in einem Vektor

$$\vec{I} = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix}$$

die Koeffizienten in einem Matrix

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 0 & R_1 & 0 \\ 0 & -R_1 & R_2 \end{pmatrix}$$

und die Inhomogenität ebenfalls in einem Vektor

$$\vec{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ U_1 \\ U_2 \end{pmatrix}.$$

Wir berechnen die Inverse

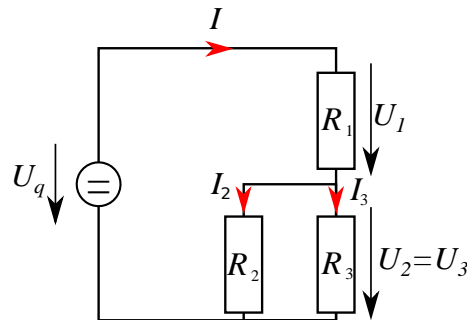
$$\mathbf{A}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2} \\ 0 & \frac{1}{R_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 2 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 2 \end{pmatrix} 1/\Omega$$

So ergeben sich die Ströme

$$\vec{I} = \mathbf{A}^{-1}\vec{b} = \begin{pmatrix} U_1 \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) + \frac{U_2}{R_2} \\ \frac{U_1}{R_1} \\ \frac{U_1}{R_2} + \frac{U_2}{R_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7 \\ 1 \\ 6 \end{pmatrix} \text{ A}$$

### Beispiel 13.28 Netzwerkberechnung

99P61P



Berechnen Sie die Grössen  $I$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $U_1$  und  $U_2$ . Gehen Sie dafür wie folgt vor:

- Benutzen Sie die Knotengleichung, die Maschenregel und drei Mal das Ohmsche Gesetz.
- Stellen Sie ein LGS in der folgenden Form auf.

$$\mathbf{A} \odot \begin{pmatrix} I \\ I_2 \\ I_3 \\ U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} = \vec{c},$$

- Benutzen Sie Matlab für die Inversion der Matrix.

### Lösung

Die Gleichungen lauten

- $I = I_2 + I_3$  (Zufließende Ströme = abfließende Ströme)
- $U_q = U_1 + U_2$  (Maschenregel)
- $U_1 = R_1 \cdot I$  (Ohm)
- $U_2 = R_2 \cdot I_2$  (Ohm)
- $U_2 = R_3 \cdot I_3$  (Ohm)

Als lineares Gleichungssystem geschrieben ergibt dies:

$$\begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ R_1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & R_3 & 0 & -1 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} I \\ I_2 \\ I_3 \\ U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ U_q \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

oder  $\mathbf{A}\vec{I} = \vec{c}$ . Das Resultat ergibt sich aus  $\vec{I} = \mathbf{A}^{-1} \odot \vec{c}$  d.h.

$$\begin{pmatrix} I \\ I_2 \\ I_3 \\ U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \odot \begin{pmatrix} 0 \\ U_q \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

mit

$$\mathbf{A}^{-1} = \frac{1}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3} \begin{pmatrix} R_2 R_3 & R_2 + R_3 & R_2 + R_3 & R_3 & R_2 \\ -R_1 R_3 & R_3 & R_3 & R_1 + R_3 & -R_1 \\ -R_1 R_2 & R_2 & R_2 & -R_1 & R_1 + R_2 \\ R_1 R_2 R_3 & R_1 R_2 + R_1 R_3 & -R_2 R_3 & R_1 R_3 & R_1 R_2 \\ -R_1 R_2 R_3 & R_2 R_3 & R_2 R_3 & -R_1 R_3 & -R_1 R_2 \end{pmatrix},$$

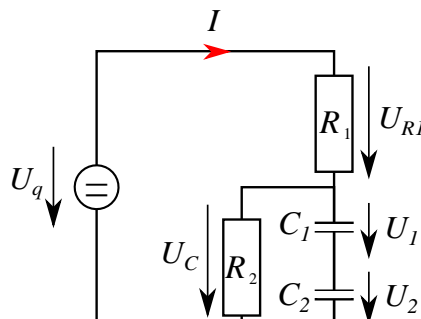
Numerisch

$$\mathbf{A}^{-1} = \begin{pmatrix} 0.16 & 1. & 1. & 0.8 & 0.2 \\ -0.672 & 0.8 & 0.8 & 1.64 & -0.84 \\ -0.168 & 0.2 & 0.2 & -0.84 & 1.04 \\ 0.1344 & 0.84 & -0.16 & 0.672 & 0.168 \\ -0.1344 & 0.16 & 0.16 & -0.672 & -0.168 \end{pmatrix}$$

Also

$$\begin{pmatrix} I \\ I_2 \\ I_3 \\ U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} = \frac{U_q}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3} \begin{pmatrix} R_2 + R_3 \\ R_3 \\ R_2 \\ R_1 R_2 + R_1 R_3 \\ R_2 R_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 \text{ A} \\ 4 \text{ A} \\ 1 \text{ A} \\ 4.2 \text{ V} \\ 0.8 \text{ V} \end{pmatrix}.$$

### Beispiel 13.29 Netzmasche mit Widerständen und Kondensatoren DNGTIO



Berechnen Sie die Größen  $I$ ,  $U_C$ ,  $U_{R1}$ ,  $U_1$  und  $U_2$ . Gehen Sie dafür wie folgt vor:



a) Benutzen Sie zwei Mal die Maschenregel, zwei Mal das Ohmsche Gesetz und die Ladungserhaltung.

b) Stellen Sie ein LGS in der folgenden Form auf.

$$\mathbf{A} \odot \begin{pmatrix} I \\ U_C \\ U_{R1} \\ U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} = \vec{c},$$

c) Benutzen Sie Matlab für die Inversion der Matrix.

### Lösung

Die Größen lassen sich aus den folgenden linear unabhängigen Gleichungen bestimmen:

- $U_q = U_C + U_{R1}$  (Maschenregel)
- $U_{R1} = R_1 \cdot I$  (Ohm)
- $U_C = R_2 \cdot I$  (Ohm)
- $U_1 + U_2 - U_C = 0$  (Maschenregel)
- ( $Q =$ )  $C_1 \cdot U_1 = C_2 \cdot U_2$  (Ladungserhaltung)

Als lineares Gleichungssystem geschrieben ergibt dies:

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ R_1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ R_2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & C_1 & -C_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I \\ U_C \\ U_{R1} \\ U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_q \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

oder  $\mathbf{A}\vec{I} = \vec{c}$ . Das Resultat ergibt sich aus  $\vec{I} = \mathbf{A}^{-1} \odot \vec{c}$  d.h.

$$\begin{pmatrix} I \\ U_C \\ U_{R1} \\ U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \odot \begin{pmatrix} U_q \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

mit

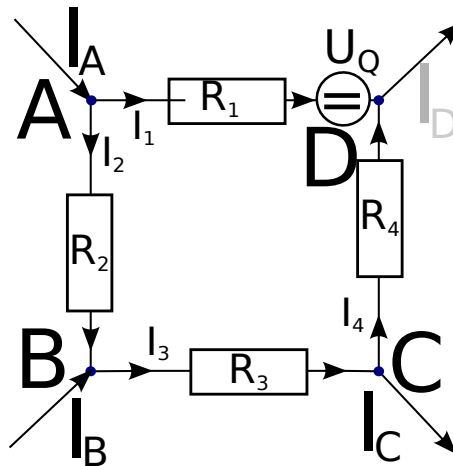
$$\mathbf{A}^{-1} = \frac{1}{C_1 R_1 + C_2 R_1 + C_1 R_2 + C_2 R_2} \begin{pmatrix} C_1 + C_2 & C_1 + C_2 & C_1 + C_2 & 0 & 0 \\ C_1 R_2 + C_2 R_2 & C_1 R_2 + C_2 R_2 & -C_1 R_1 - C_2 R_1 & 0 & 0 \\ C_1 R_1 + C_2 R_1 & -C_1 R_2 - C_2 R_2 & C_1 R_1 + C_2 R_1 & 0 & 0 \\ C_2 R_2 & C_2 R_2 & -C_2 R_1 & C_2 R_1 + C_2 R_2 & R_1 + R_2 \\ C_1 R_2 & C_1 R_2 & -C_1 R_1 & C_1 R_1 + C_1 R_2 & -R_1 - R_2 \end{pmatrix}.$$

also

$$\begin{pmatrix} I \\ U_C \\ U_{R1} \\ U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} = \frac{U_q}{C_1 R_1 + C_2 R_1 + C_1 R_2 + C_2 R_2} \begin{pmatrix} C_1 + C_2 \\ (C_1 + C_2) \cdot R_2 \\ (C_1 + C_2) \cdot R_1 \\ C_2 R_2 \\ C_1 R_2 \end{pmatrix}$$

### Beispiel 13.30 Netzmasche

643107



$$R_1 = 1 \Omega, R_2 = 2 \Omega, R_3 = 5 \Omega, R_4 = 2 \Omega, U_q = 19 \text{ V}, I_A = 2 \text{ A}, I_B = 1 \text{ A}, I_C = 1 \text{ A}$$

Berechnen Sie die vier Zweigströme  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  und  $I_4$ . Gehen Sie dafür wie folgt vor:

- Benutzen Sie dreimal die Knotengleichung und einmal die Maschengleichung.
- Stellen Sie ein LGS in der folgenden Form auf.

$$\mathbf{A} \odot \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{pmatrix} = \vec{c},$$

- Benutzen Sie Matlab für die Inversion der Matrix.

#### Lösung

Die vier Größen lassen sich aus den vier linear unabhängigen Gleichungen bestimmen:

- $I_A = I_1 + I_2$  (Zufließende Ströme = abfließende Ströme)
- $I_2 + I_B = I_3$  (Zufließende Ströme = abfließende Ströme)
- $I_3 = I_C + I_4$  (Zufließende Ströme = abfließende Ströme)

- $-I_2R_1 - U_q + I_2R_2 + I_3R_3 + I_4R_4 = 0$  (Maschenregel)

Als lineares Gleichungssystem geschrieben ergibt dies:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ -1 & 2 & 5 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 1 \\ 19 \end{pmatrix},$$

oder  $\mathbf{A}\vec{I} = \vec{c}$

Für die Einheiten gilt: Benutze SI-Einheiten beim Aufstellen der Gleichungen, kümmere dich nicht mehr um die Einheiten, denn das Resultat kommt wieder in den SI-Einheiten heraus.

oder  $\mathbf{A}\vec{I} = \vec{c}$ . Das Resultat ergibt sich aus  $\vec{I} = \mathbf{A}^{-1} \odot \vec{c}$  d.h.

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{pmatrix} = \frac{1}{10} \begin{pmatrix} 9 & 7 & -2 & -1 \\ 1 & -7 & 2 & 1 \\ 1 & 3 & 2 & 1 \\ 1 & 3 & -8 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 1 \\ 19 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.4 \\ 1.6 \\ 2.6 \\ 1.6 \end{pmatrix}.$$

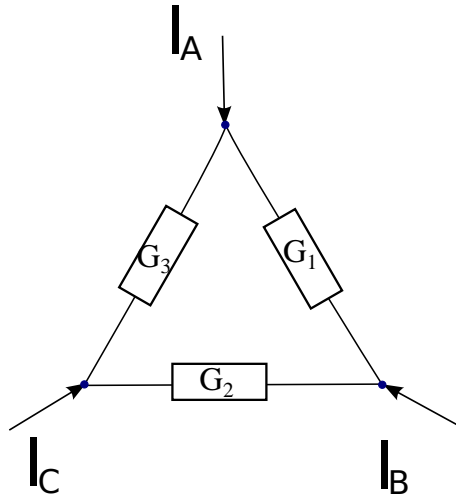
## 13.8 Knotenpotentialverfahren

### Beispiel 13.31 Knotenpotentialverfahren

GINUXN

$$G_1 = 0.2, G_2 = 0.8, G_3 = 0.84, I_1 = 1, I_2 = 1.2, I_3 = -2.4$$

- Knoten des Netzwerkes nummerieren + Bezugspfeile für Einströmungen einheitlich definieren (in das Netzwerk hinein)
- Aufstellen der UAM: Eigenleitwerte der Knoten auf der Hauptdiagonalen, Koppelleitwerte zwischen den Knoten negativ eintragen
- Einströmungsvektor aufstellen (positive Zählrichtung, für Bezugspfeil ins Netzwerk hinein)
- Potenzialnullpunkt wählen und entsprechende Zeile und Spalte streichen ( $V_3 = 0$ ).
- Gleichungssystem numerisch lösen



- a) Knoten nummerieren
- b) Bezugspfeile für Einströmungen einheitlich definieren (in das Netzwerk hinein)
- c) UAM

$$\begin{pmatrix} G_1 + G_3 & -G_1 & -G_3 \\ -G_1 & G_1 + G_2 & -G_2 \\ -G_3 & -G_2 & G_2 + G_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix},$$

- d) Einströmungsvektor oben
- e)  $V_3 = 0$ :

$$\begin{pmatrix} G_1 + G_3 & -G_1 \\ -G_1 & G_1 + G_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix},$$

- f) Gleichungssystem numerisch lösen

$$\begin{pmatrix} 1.04 & -0.2 \\ -0.2 & 1. \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.8 \\ 1 \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \mathbf{Y}^{-1} \odot \begin{pmatrix} 0.8 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1.2 \end{pmatrix}$$

### 13.9 Orthogonale Matrizen und ihre Inverse\*

#### Definition Orthogonale Matrix

Ein Matrix  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$  heisst orthogonal, wenn die Spaltenvektoren zueinander senkrecht stehen **und** normiert sind.

Achtung: Die Spalten einer orthogonalem Matrix bilden eine orthonormale Basis!

#### Beispiel 13.32 $\mathbf{A} \odot \mathbf{A}^T$

ISWNGT

Überprüfen Sie ob die Matrix  $\mathbf{A}$  orthogonal ist. Berechnen Sie dann  $\mathbf{A} \odot \mathbf{A}^\top$ .

$$\mathbf{A} = \frac{1}{\sqrt{10}} \begin{pmatrix} 1 & -3 \\ 3 & 1 \end{pmatrix}$$

**Lösung:**

Die Spalten der Matrix sind

$$\vec{A}_1 = \frac{1}{\sqrt{10}} \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \vec{A}_2 = \frac{1}{\sqrt{10}} \begin{pmatrix} -3 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Die Skalarprodukte sind

$$\begin{aligned} \vec{A}_1 \odot \vec{A}_1 &= \frac{1}{\sqrt{10}\sqrt{10}}(1 \cdot 1 + 3 \cdot 3) = 1 \\ \vec{A}_2 \odot \vec{A}_2 &= \frac{1}{\sqrt{10}\sqrt{10}}(3 \cdot 3 + 1 \cdot 1) = 1 \\ \vec{A}_1 \odot \vec{A}_2 &= \frac{1}{\sqrt{10}\sqrt{10}}(1 \cdot (-3) + 3 \cdot 1) = 0 \end{aligned}$$

$\mathbf{A}$  ist also eine orthogonale Matrix.

$$\mathbf{A} \odot \mathbf{A}^\top = \frac{1}{\sqrt{10}} \frac{1}{\sqrt{10}} \begin{pmatrix} 1 & -3 \\ 3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ -3 & 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{10} \begin{pmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{pmatrix} = \mathbf{1}$$

Wir wollen nun das Produkt  $\mathbf{A}^\top \odot \mathbf{A}$  für alle orthogonale Matrizen  $\mathbf{A}$  berechnen. Dafür schreiben wir die Matrix mit Hilfe ihrer Spalten als

$$\mathbf{A} = [\vec{A}_1, \vec{A}_2, \dots]$$

Beim Transponieren verwandeln sich die Spalten in die Zeilen

$$\mathbf{A}^\top = \begin{pmatrix} \vec{A}_1^\top \\ \vec{A}_2^\top \\ \dots \end{pmatrix}$$

Wie in Matlab können wir durch die Transposition um einen Spaltenvektor in einen Zeilenvektor umwandeln! So ergibt das Produkt

$$\mathbf{A}^\top \odot \mathbf{A} = \begin{pmatrix} \vec{a}_1^\top \\ \vec{a}_2^\top \\ \dots \end{pmatrix} \odot \begin{bmatrix} \vec{a}_1, \vec{a}_2, \dots \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{a}_1^\top \odot \vec{a}_1 & \vec{a}_1^\top \odot \vec{a}_2 & \dots \\ \vec{a}_2^\top \odot \vec{a}_1 & \vec{a}_2^\top \odot \vec{a}_2 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix}$$

Die Spalten stehen senkrecht aufeinander, deshalb verschwinden alle Vektorprodukte ausserhalb der Diagonalen. Auf der Diagonalen bleiben Vektorprodukte der Form

$$\vec{a}_1^\top \odot \vec{a}_1 = \vec{a}_2^\top \odot \vec{a}_2 = 1$$

Sie ergeben 1, weil die Vektoren normiert sind.

### **Satz Das Inverse einer orthogonalen Matrix**

Die Inverse der orthogonalen Matrix  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$  ist  $\mathbf{A}^\top$ .

## 13.10 Die inverse Matrix mit der Adjungierten\*

### Beispiel 13.33 Kofaktoren,

837230

Zu jedem Matrix-Element  $a_{i,j}$  einer quadratischen Matrix  $\mathbf{A}$  gehört ein Kofaktor  $a_{m,n}$ . Er ist wie folgt definiert

$$\text{cof}(a_{m,n}) = (-1)^{m+n} \cdot \det(\mathbf{A}_{m,n})$$

Dabei entsteht die Matrix  $\mathbf{A}_{m,n}$  durch streichen der  $m$ -ten Zeile und  $n$ -ten Spalte in  $\mathbf{A}$ .

Bestimme die Kofaktoren  $\text{cof}(a_{1,1})$  und  $\text{cof}(a_{2,3})$  der Matrix

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -2 & 3 & 1 \\ 0 & 4 & 5 \\ 2 & 1 & 4 \end{pmatrix} .$$

#### Lösung

Für den Kofaktor  $a_{1,1}$  streichen wir die erste Zeile und die erste Spalte:

$$\mathbf{A}_{1,1} = \begin{pmatrix} 4 & 5 \\ 1 & 4 \end{pmatrix}$$

mit der Determinanten

$$\det(\mathbf{A}_{1,1}) = 4 \cdot 4 - 1 \cdot 5 = 11 .$$

Der Kofaktor ist also  $\text{cof}(a_{1,1}) = (-1)^{1+1} \cdot 11 = 11$ . Für den Kofaktor  $a_{2,3}$  streichen wir die zweite Zeile und die dritte Spalte:

$$\mathbf{A}_{2,3} = \begin{pmatrix} -2 & 3 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}$$

mit der Determinanten

$$\det(\mathbf{A}_{2,3}) = -2 \cdot 1 - 2 \cdot 3 = -8 .$$

Der Kofaktor ist also  $\text{cof}(a_{2,3}) = (-1)^{2+3} \cdot 11 = 8$ .

### Beispiel 13.34 Die Adjungierte,

237356

Die Kofaktoren der Matrix  $\mathbf{A}$  können wieder in Matrixform aufgeschrieben werden. Wird die Matrix der Kofaktoren transponiert, erhalten wir die Adjungierte Matrix

$$\text{adj}(\mathbf{A}) = \begin{pmatrix} \text{cof}(a_{1,1}) & \dots & \text{cof}(a_{1,n}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{cof}(a_{m,1}) & \dots & \text{cof}(a_{m,n}) \end{pmatrix}^T$$

Berechnen Sie die Adjungierte der Matrix

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -2 & 3 & 1 \\ 0 & 4 & 5 \\ 2 & 1 & 4 \end{pmatrix}.$$

### Lösung

Die Matrix der Kofaktoren ist

$$\text{cof}(\mathbf{A}) = \begin{pmatrix} 11 & 6 & -7 \\ -11 & -10 & 8 \\ 11 & 11 & -11 \end{pmatrix}$$

und die Adjungierte ist also

$$\text{adj}(\mathbf{A}) = \text{cof}(\mathbf{A})^T = \begin{pmatrix} 11 & 6 & -7 \\ -11 & -10 & 8 \\ 11 & 11 & -11 \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} 11 & -11 & 11 \\ 6 & -10 & 11 \\ -7 & 8 & -11 \end{pmatrix}$$

### Beispiel 13.35 Die inverse Matrix mit der Adjungierten

431045

Mit Matrix-Inverse lässt sich mit der Adjungierten schnell berechnen:

$$\mathbf{A}^{-1} = \frac{1}{\det(\mathbf{A})} \cdot \text{adj}(\mathbf{A}).$$

Berechnen Sie die Determinante der Matrix  $\mathbf{A}$  und die Inverse  $\mathbf{A}^{-1}$ . Überprüfen Sie Ihr Resultat indem Sie  $\mathbf{A} \odot \text{cof}(\mathbf{A})^T$  berechnen.

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -2 & 3 & 1 \\ 0 & 4 & 5 \\ 2 & 1 & 4 \end{pmatrix}.$$

### Lösung

Die Determinante ist

$$\det(\mathbf{A}) = -32 + 30 + 1 - 8 + 10 - 12 = -11.$$

Die Inverse Matrix ist also

$$\mathbf{A}^{-1} = \frac{1}{-11} \cdot \begin{pmatrix} 11 & -11 & 11 \\ 6 & -10 & 11 \\ -7 & 8 & -11 \end{pmatrix}.$$

Als Kontrolle berechnen wir

$$\mathbf{A} \odot \text{cof}(\mathbf{A})^T = \begin{pmatrix} -11 & 0 & 0 \\ 0 & -11 & 0 \\ 0 & 0 & -11 \end{pmatrix}$$

Würde die zweite Matrix noch durch  $\det(\mathbf{A}) = -11$  geteilt, wäre das Resultat die Einheitsmatrix  $\mathbf{1}$ . Deshalb ist  $\frac{1}{\det(\mathbf{A})} \cdot \text{adj}(\mathbf{A})$  die Inverse von  $\mathbf{A}$ .

**Beispiel 13.36 Die inverse Matrix mit der Adjungierten**

332409

Berechnen Sie die Determinante der Matrix  $\mathbf{F}$  und die Inverse  $\mathbf{F}^{-1}$  mit Kofaktoren. Überprüfen Sie Ihr Resultat indem Sie  $\frac{1}{\det(\mathbf{F})} \cdot \mathbf{F} \odot \text{cof}(\mathbf{F})^T$  berechnen.

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} 5 & -1 & 6 \\ -3 & 3 & 6 \\ 7 & 1 & -6 \end{pmatrix}.$$

**Lösung**

Die Determinante ist

$$\det(\mathbf{F}) = -90 - 42 - 18 - 126 - 30 + 18 = -288.$$

Die Kofaktoren sind

$$\text{cof}(\mathbf{F}) = \begin{pmatrix} -24 & 24 & -24 \\ 0 & -72 & -12 \\ -24 & -48 & 12 \end{pmatrix}.$$

Die Inverse Matrix ist also

$$\mathbf{F}^{-1} = \frac{1}{-288} \cdot \begin{pmatrix} -24 & 24 & -24 \\ 0 & -72 & -12 \\ -24 & -48 & 12 \end{pmatrix}^T = \frac{1}{-288} \begin{pmatrix} -24 & 0 & -24 \\ 24 & -72 & -48 \\ -24 & -12 & 12 \end{pmatrix}.$$

Als Kontrolle berechnen wir

$$\begin{aligned} \frac{1}{\det(\mathbf{F})} \cdot \mathbf{F} \odot \text{cof}(\mathbf{F})^T &= \frac{1}{-288} \cdot \begin{pmatrix} 5 & -1 & 6 \\ -3 & 3 & 6 \\ 7 & 1 & -6 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} -24 & 0 & -24 \\ 24 & -72 & -48 \\ -24 & -12 & 12 \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{-288} \cdot \begin{pmatrix} -288 & 0 & 0 \\ 0 & -288 & 0 \\ 0 & 0 & -288 \end{pmatrix} = \mathbf{1} \end{aligned}$$

Deshalb ist  $\frac{1}{\det(\mathbf{F})} \cdot \text{adj}(\mathbf{F})$  die Inverse von  $\mathbf{F}$ .

**Beispiel 13.37 Inverse mit der Adjungierten**

246885

Berechnen Sie die Inverse der Rotations-Matrix  $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \\ -\cos(\varphi) & \sin(\varphi) \end{pmatrix}$  mit Hilfe der Adjungierten.

**Übrigens:**

Die Inversion mit der Adjungierten ist aufwändig, weil die Berechnung der Determinanten aufwändig ist. Deshalb wird sie nur bei kleinen Matrizen angewandt oder bei Problemen mit (vielen) Parametern. Das Beispiel hier ist also eine *typische* Anwendung.

**Lösung**

Die Determinante der Matrix ist



$$\det(\mathbf{A}) = \sin^2(\varphi) + \cos^2(\varphi) = 1$$

Deshalb ergibt sich die Inverse direkt aus der Adjungierten:

$$\mathbf{A}^{-1} = \begin{pmatrix} \sin(\varphi) & -\cos(\varphi) \\ \cos(\varphi) & \sin(\varphi) \end{pmatrix}$$

---

RCL-Netzwerke mit Wechselstrom

---



---

14.1 Lineare Elemente . . . . .	386
14.2 Herleitung Impedanzen in Zeigerdarstellung . . . . .	387
14.3 Gesamt-Impedanz eines Netzwerks . . . . .	391
14.4 Übungen . . . . .	395

---

Im Folgenden wollen wir RCL-Netzwerke mit linearen Elementen betrachten, die mit einer festen Wechselspannung der Frequenz oder (Kreisfrequenz)

$$\nu = \frac{1}{T} \text{ oder } \omega = \frac{2\pi}{T}$$

betrieben werden; also

$$u_Q(t) = \hat{u} \cdot \cos(t\omega) .$$

Beachten Sie, dass nur *eine* der Grössen  $\nu$ ,  $T$  und  $\omega$  bekannt sein muss und sich die anderen beiden daraus ergeben, Oder anders ausgedrückt:  $\nu$ ,  $T$  und  $\omega$  sind drei verschiedene Arten die Frequenz der Schwingung anzugeben.

**Definition Transiente/stationäre Lösung**

Ausserdem interessieren wir uns ausschliesslich für das Verhalten lange nach dem Einschaltvorgang. Dieses Verhalten wird **stationäre** Lösung genannt. Das Verhalten um den Zeitpunkt herum, wo die Wechselspannung ein- oder ausgeschalten wird, heisst **transiente** Lösung.<sup>a</sup>

<sup>a</sup>lateinisch für "vorübergehend".

Die Erfahrung zeigt, dass physische lineare Netzwerke, die mit einer Wechselspannung der Frequenz  $\omega$  betrieben werden, nach kurzer Zeit mit der Frequenz  $\omega$  schwingen. D.h. die transiente Lösung fällt schnell ab (sie verschwindet exponentiell), und es bleibt die **stationäre** Lösung bestehen. Diese Lösung wollen wir in diesem Kapitel berechnen.

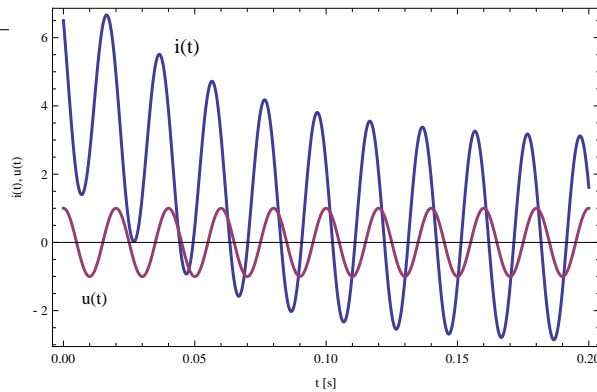


Abbildung 14.1: Ein RCL-Kreis wird an eine Wechselstromquelle angeschlossen. Zunächst schwingt sich der Kreis ein [0-0.10 s]. In dieser Zeit ist die transiente Lösung wichtig. Danach schwingen Strom und Spannung mit der selben Frequenz aber mit verschiedenen Amplituden und phasenverschoben. Das ist die stationäre Lösung.

Da in der stationären Lösung Strom und Spannung mit Frequenz  $\omega$  schwingen, führen wir für beide die Basis  $\vec{e}_1 \hat{=} \cos(\omega t)$  und  $\vec{e}_2 \hat{=} \sin(\omega t)$  ein. D.h. wir stellen Ströme, die aus einer Überlagerung von  $\cos(\omega t)$  und  $\sin(\omega t)$  bestehen, als Vektoren dar, z.B.

$$i(t) = 3 \cos(\omega t) + 2 \sin(\omega t) \rightarrow \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \end{pmatrix} = \vec{i}$$

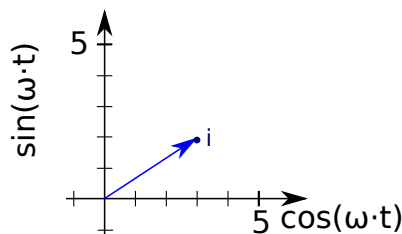
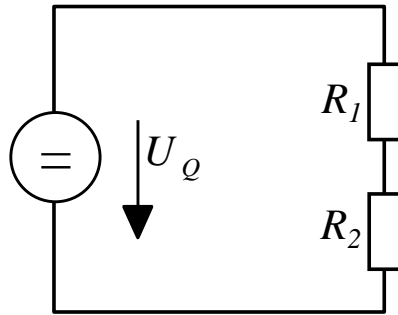


Abbildung 14.2: Wir wählen  $\cos(\omega t)$  und  $\sin(\omega t)$  als Basisvektoren. In dieser Ebenen können wir Ströme der Frequenz  $\omega$  darstellen als Pfeile.

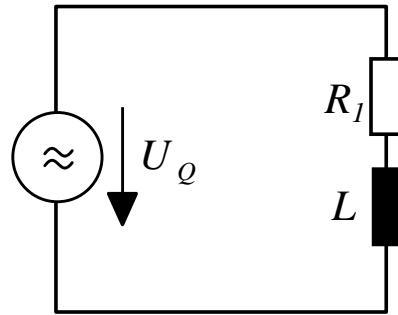
Bevor wir weiterarbeiten, tragen wir die Grundlagen aus der Elektrotechnik zusammen.

**Beispiel 14.1 Gesamtimpedanz**

6KCCFY



**a)**



**b)**

- a) Berechnen Sie den Gesamtwiderstand und geben Sie den resultierenden Strom an.

$$U_q = 6 \text{ V}, R_1 = 0.5 \text{ } \Omega, R_2 = 2.5 \text{ } \Omega,$$

- b) Berechnen Sie die Gesamtimpedanz und geben Sie den resultierenden Strom an.

$$u_q(t) = 6 \cdot \cos(\omega \cdot t) \text{ V}, \omega = \frac{2\pi}{6} \frac{1}{\text{s}}, R_1 = 0.5 \text{ } \Omega, L = 0.8 \text{ H},$$

wobei für die Einheit Henry (H) gilt  $\text{H} = \Omega \cdot \text{s}$

**Lösung:**

- a) Der Gesamtwiderstand ist

$$R_{\text{tot}} = R_1 + R_2 = 3 \text{ } \Omega$$

Der resultierende Strom berechnet sich aus dem Gesetz von Ohm

$$U = R_{\text{tot}} \cdot I \Rightarrow I = \frac{U_q}{R_{\text{tot}}} = 2 \text{ A}$$

- b) Die Gesamtimpedanz ist

$$\mathbf{Z}_{\text{tot}} = \mathbf{Z}_{R1} + \mathbf{Z}_L = \begin{pmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & \omega L \\ -\omega L & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.83 \\ -0.83 & 0.5 \end{pmatrix} \text{ } \Omega$$

Der resultierende Strom berechnet sich aus der Definition einer Impedanz

$$\vec{u} = \mathbf{Z}_{\text{tot}} \odot \vec{i} \Rightarrow \vec{i} = (\mathbf{Z}_{\text{tot}})^{-1} \odot \vec{u} = \begin{pmatrix} 0.53 & -0.88 \\ 0.88 & 0.53 \end{pmatrix} \odot \begin{pmatrix} 6 \\ 0 \end{pmatrix} \frac{\text{V}}{\Omega} = \begin{pmatrix} 3.18 \\ 5.30 \end{pmatrix} \text{ A}$$

Der resultierende Strom ist also

$$i(t) = [3.18 \cdot \cos(\omega \cdot t) + 5.30 \cdot \sin(\omega \cdot t)] \text{ A}$$

Für die Matrix-Inversionen benutzen wir folgendes:

## 14.1 Lineare Elemente

Wir wollen nun den Spannungsabfall an den linearen Elementen betrachten. Wir können dann die Kirchhoffsche-Maschenregel benutzen um auch im Falle des Wechselstroms zu schreiben

### Satz Kirchhoff'sche -Maschenregel

$$\sum_i u_i(t) = u_q(t)$$

dabei sind  $u_i(t)$  die Spannung an den jeweiligen Elementen und  $u_q(t)$  ist die Quell-Spannung.

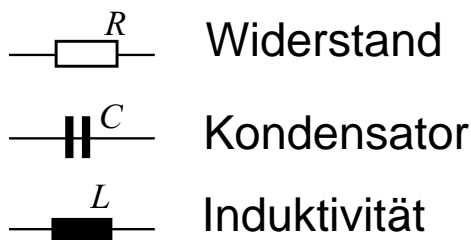


Abbildung 14.3: Die linearen Elemente in einem elektrischen Schaltkreis: Widerstand, Kapazität und Induktivität.

### 14.1.1 Die Kapazität $C$

Eine Kapazität  $C$  ist definiert durch

$$q = C \cdot u$$

d.h. je grösser die Kapazität  $C$  und je grösser die angelegte Spannung  $u$ , desto grösser die Ladung  $q$  auf der Kapazität.

Um den Strom in Verbindung mit der Spannung zu bringen, leiten wir auf beiden Seiten nach der Zeit ab und erhalten

$$\underbrace{\frac{dq}{dt}}_{=i(t)} = \frac{d}{dt}C \cdot u + C \cdot \frac{d}{dt}u .$$

In den Wechselstromkreisen, die wir betrachten, ist eine feste Kapazität eingebaut. Sie ändert sich nicht mit der Zeit. Deshalb ist  $\frac{d}{dt}C = 0$  und es bleibt

$$i(t) = C \cdot \frac{d}{dt}u$$

### Definition Kondensator

Der Spannungsabfall am Kondensator ist

$$\frac{d}{dt}u = \frac{i}{C}$$

oder integriert (d.h. auf beiden Seiten  $\int dt$ )

$$u(t) = \int_{-\infty}^t \frac{i(\tau)}{C} d\tau$$

d.h. wir können den Spannungsabfall nicht direkt berechnen, sondern nur die zeitliche Änderung des Spannungsabfalls  $\frac{d}{dt}u$ .

### Der Widerstand $R$ und die Induktivität $L$

#### Definition Widerstand

An einem Ohmschen Widerstand ( $R$ ) fällt folgende Spannung ab

$$u(t) = R \cdot i(t)$$

Hier ist der Spannungsabfall schnell berechnet.

Auch bei der Induktivität ergibt sich der Spannungsabfall aus der Definition:

#### Definition Induktivität

An einer Induktivität fällt die folgende Spannung ab

$$u(t) = L \cdot \frac{d}{dt}i(t)$$

## 14.2 Herleitung Impedanzen in Zeigerdarstellung

#### Definition Impedanz

$$u(t) = Z(\omega) \cdot i(t)$$

dabei ist  $u(t)$  eine Wechselspannung und  $i(t)$  ein Wechselstrom. Beide haben die selbe Winkel-Frequenz  $\omega$ .

Wir können die Impedanz aus der Analogie mit dem Widerstand verstehen. Für den Widerstand gilt  $u(t) = R \cdot i(t)$ , was erlaubt, aus dem Strom die Spannung zu berechnen und umgekehrt. In der Basis  $\vec{e}_1 \hat{=} \cos(\omega t)$  und  $\vec{e}_2 \hat{=} \sin(\omega t)$  lässt sich zumindest für die stationäre Lösung dieses Konzept auf  $C$  und  $L$  verallgemeinern. Wir ersetzen dafür  $R$  mit  $Z$

$$u(t) = R \cdot i(t) \rightarrow u(t) = Z(\omega) \cdot i(t) .$$

Die Details folgen den den Aufgaben 14.3, 14.4, 14.5 und 14.6. Hier noch eine weitere Definition zur Vorbereitung dieser Aufgaben: Wir kennen den Leitwert  $G$ , mit dem wir den Strom aus der Spannung berechnen  $i(t) = G \cdot u(t)$ . Es gilt

$$G = \frac{1}{R}$$

In Analogie definieren wir die Admittanz.

### Definition Admittanz

$$Y(\omega) = Z(\omega)^{-1}$$

dabei ist  $Z(\omega)$  eine Impedanz.

Wir haben also folgende Entsprechungen. Die linke Seite gilt für Gleichstrom, die rechte für Wechselströme:

$$\begin{aligned} \text{Widerstand } R &\leftrightarrow \text{ Impedanz } Z \\ \text{Leitwert } G &\leftrightarrow \text{ Admittanz } Y \end{aligned}$$

### Beispiel 14.2 Ist $L$ ein lineares Element?

IYTGLQ

Wir betrachten den Operator  $\mathcal{L}$ . Er berechnet aus dem Strom durch die Induktivität  $L$  die resultierende Spannung.

$$\mathcal{L}(i(t)) = L \cdot \frac{d}{dt} i(t)$$

ist dieser Operator linear?

**Lösung:**

i) Homogenität:

$$\mathcal{L}(\lambda \cdot i(t)) = L \cdot \frac{d}{dt} \lambda \cdot i(t) = \lambda \cdot L \cdot \frac{d}{dt} i(t) = \lambda \cdot \mathcal{L}(i(t))$$

ii) Additivität:

$$\mathcal{L}(i_1(t) + i_2(t)) = L \cdot \frac{d}{dt} (i_1(t) + i_2(t)) = L \cdot \frac{d}{dt} i_1(t) + L \cdot \frac{d}{dt} i_2(t) = \mathcal{L}(i_1(t)) + \mathcal{L}(i_2(t))$$

Es ist also ein linearer Operator.

### Beispiel 14.3 Impedanz der Induktivität

V2URZT

Basis:

$$\vec{e}_1 \hat{=} \cos(\omega t) \text{ und } \vec{e}_2 \hat{=} \sin(\omega t)$$

Berechnen Sie

- a)  $\mathcal{L}(\cos(\omega t))$ ,  
 b)  $\mathcal{L}(\sin(\omega t))$ .  
 c) Bestimmen Sie schliesslich die Matrix des Operators  $\mathcal{L}(i(t))$  in der Zeigerdarstellung.

**Lösung:**

Wir berechnen die Bilder der Basisvektoren:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}\left(\underbrace{\cos(\omega t)}_{\hat{=}\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}=\vec{e}_1}\right) &= -L\omega \underbrace{\sin(\omega t)}_{\hat{=}\vec{e}_2} \hat{=} \begin{pmatrix} 0 \\ -L\omega \end{pmatrix} \\ \mathcal{L}\left(\underbrace{\sin(\omega t)}_{\hat{=}\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}=\vec{e}_2}\right) &= L\omega \underbrace{\cos(\omega t)}_{\hat{=}\vec{e}_1} \hat{=} \begin{pmatrix} \omega L \\ 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Also

$$\mathbf{Z}_L = \left[ \begin{pmatrix} 0 \\ -\omega L \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \omega L \\ 0 \end{pmatrix} \right]$$

**Definition Impedanz der Induktivität**

$$\mathbf{Z}_L = \begin{pmatrix} 0 & \omega L \\ -\omega L & 0 \end{pmatrix}$$

**Beispiel 14.4 Impedanz des Widerstandes**

XMBTPW

- a) Bestimmen Sie den Operator, der aus dem Strom durch den Widerstand die resultierende Spannung über den Widerstand  $R$  berechnet

$$\underbrace{\mathcal{R}(i(t))}_{=u(t)} = ?$$

- b) Berechnen Sie die Bilder der Basisvektoren  $\mathcal{R}(\cos(\omega t))$  und  $\mathcal{R}(\sin(\omega t))$ .  
 c) Bestimmen Sie schliesslich die Matrix des Operators  $\mathcal{R}(i(t))$  in der Zeigerdarstellung.

**Lösung:**

$$\mathcal{R}(i(t)) = R \cdot i(t)$$



Wir berechnen die Bilder der Basisvektoren:

$$\mathcal{R}\left(\underbrace{\cos(\omega t)}_{\hat{=} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \vec{e}_1}\right) = R \cos(\omega t) \hat{=} \begin{pmatrix} R \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathcal{R}\left(\underbrace{\sin(\omega t)}_{\hat{=} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \vec{e}_2}\right) = R \sin(\omega t) \hat{=} \begin{pmatrix} 0 \\ R \end{pmatrix}$$

Also

$$\mathbf{Z}_R = \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} R \\ 0 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 0 \\ R \end{pmatrix} \end{bmatrix}$$

### Definition Impedanz des Widerstandes

$$\mathbf{Z}_R = \begin{pmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{pmatrix}$$

### Beispiel 14.5 Matrix des Admittanz der Kapazität

AVAFHJ

- a) Bestimmen Sie den Operator, der aus der Spannung  $u(t)$  den Strom durch eine Kapazität  $C$  berechnet

$$\underbrace{\mathcal{C}(u(t))}_{=i(t)} = ?$$

- b) Berechnen Sie die Bilder der Basisvektoren  $\mathcal{C}(\cos(\omega t))$  und  $\mathcal{C}(\sin(\omega t))$ .  
c) Bestimmen Sie schliesslich die Matrix des Operators  $\mathcal{C}(u(t))$  in der Zeigerdarstellung.

**Lösung:**

$$\underbrace{\mathcal{C}(u(t))}_{=i(t)} = C \cdot \frac{d}{dt} u(t)$$

Wir berechnen die Bilder der Basisvektoren:

$$\mathcal{C}\left(\underbrace{\cos(\omega t)}_{\hat{=} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \vec{e}_1}\right) = -C\omega \sin(\omega t) \hat{=} \begin{pmatrix} 0 \\ -C\omega \end{pmatrix}$$

$$\mathcal{C}\left(\underbrace{\sin(\omega t)}_{\hat{=} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \vec{e}_2}\right) = C\omega \cos(\omega t) \hat{=} \begin{pmatrix} \omega C \\ 0 \end{pmatrix}$$

Also

$$\mathbf{Y}_C = \left[ \begin{pmatrix} 0 \\ -\omega C \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \omega C \\ 0 \end{pmatrix} \right]$$

### Beispiel 14.6 Admittanz → Impedanz (Leitwert → Widerstand)

13PU3X

Berechnen Sie aus

$$\mathbf{Y}_C = \begin{pmatrix} 0 & \omega C \\ -\omega C & 0 \end{pmatrix}$$

die Matrix der Impedanz der Kapazität  $C$  in der Zeigerdarstellung.

**Lösung:**

Wir invertieren die Matrix  $\mathbf{Y}_C$

$$\mathbf{Z}_C = (\mathbf{Y}_C)^{-1} = \frac{1}{0 + (\omega C)^2} \begin{pmatrix} 0 & -\omega C \\ \omega C & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{\omega C} \\ \frac{1}{\omega C} & 0 \end{pmatrix}$$

### Definition Impedanz der Kapazität

$$\mathbf{Z}_C = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{\omega C} \\ \frac{1}{\omega C} & 0 \end{pmatrix}$$

## 14.3 Gesamt-Impedanz eines Netzwerks

Wir benutzen die Maschenregel um die Impedanz einer Serienschaltung von zwei Impedanzen zu berechnen. Für Widerstände würde gelten

$$u_Q(t) = R_1 \cdot i_1(t) + R_2 \cdot i_2(t)$$

und da die Ströme  $i_1(t)$  und  $i_2(t)$  in einer Serienschaltung gleich sind würde auch gelten

$$u_Q(t) = R_1 \cdot i(t) + R_2 \cdot i(t) = (R_1 + R_2) \cdot i(t),$$

d.h. Widerstände können addiert werden. Analog gilt daher auch für Impedanzen

$$\vec{u}_Q = (\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2) \cdot \vec{i}.$$

### Satz Gesamt Impedanz

Serie-Schaltung:

$$\mathbf{Z}_t = \mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 ,$$

Parallelschaltung:

$$\mathbf{Z}_t = [(\mathbf{Z}_1)^{-1} + (\mathbf{Z}_2)^{-1}]^{-1} ,$$

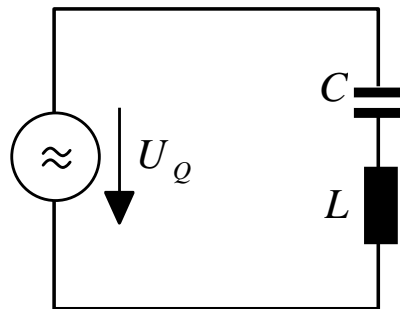
Vergleichen Sie auch mit der Darstellung des Gesamtwiderstands einer Parallelschaltung von Widerständen:

$$R_{\text{tot}} = \frac{1}{1/R_1 + 1/R_2}$$

Der Beweis für die Parallelschaltung wird hier ausgelassen. Er ist analog zur Herleitung des Gesamtwiderstands einer Parallelschaltung von Widerständen.

### Beispiel 14.7 CL Schaltkreis

RYWQZG



Berechne den elektrischen Strom im eingeschwungenen Zustand für den Schaltkreis, der mit einer Wechselspannung

$$u(t) = \hat{u} \cdot \cos(t\omega)$$

der Frequenz  $\omega$  betrieben wird. Rechnen Sie

a) mit den Werten

$$u_q(t) = 6 \cdot \cos(\omega \cdot t) \text{ V}, \quad \omega = \frac{2\pi}{6} \frac{1}{\text{s}}, \quad L = 0.5 \text{ H}, \quad C = 0.8 \text{ F},$$

b) allgemein für die Anregung

$$u(t) = \hat{u} \cdot \cos(t\omega)$$

mit der Frequenz  $\omega$  und den Elementen  $L$  und  $C$ .

Für die Einheit Farad (F) gilt übrigens  $\text{F} = \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V}}$ .

**Lösung:**

a) Die Gesamtimpedanz ist  $\mathbf{Z}_{\text{tot}} = \mathbf{Z}_C + \mathbf{Z}_L$  (Serienschaltung), also

$$\mathbf{Z}_{\text{tot}} \odot \vec{i} = \begin{pmatrix} \hat{u} \\ 0 \end{pmatrix}$$

Der Vektor  $\begin{pmatrix} \hat{u} \\ 0 \end{pmatrix}$  entspricht der Quellspannung  $u(t) = \hat{u} \cdot \cos(t\omega)$ . Wir setzen die Werte ein und erhalten mit  $\omega = 1.0472$  Hz,

$$\mathbf{Z}_{\text{tot}} = \begin{pmatrix} 0 & -0.67 \\ 0.67 & 0 \end{pmatrix}$$

Schliesslich berechnen wir

$$\vec{i} = (\mathbf{Z}_{\text{tot}})^{-1} \odot \begin{pmatrix} \hat{u} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -8.954 \end{pmatrix}$$

d.h. mit den Werten

$$i(t) = [0 - 8.954 \cdot \sin(\omega \cdot t)] \text{ A}$$

b) Wir schreiben die Matrix der Impedanz aus und invertieren sie:

$$\mathbf{Z}_{\text{tot}} = \begin{pmatrix} 0 & L\omega - \frac{1}{C\omega} \\ \frac{1}{C\omega} - L\omega & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 & \frac{C\omega}{1 - CL\omega^2} \\ \frac{C\omega}{CL\omega^2 - 1} & 0 \end{pmatrix} = (\mathbf{Z}_t)^{-1}$$

Also ist der Strom

$$\vec{i} = (\mathbf{Z}_t)^{-1} \odot (\hat{u} \ 0) = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{C\hat{u}\omega}{CL\omega^2 - 1} \end{pmatrix}$$

oder

$$i(t) = \frac{C\hat{u}\omega}{CL\omega^2 - 1} \sin(\omega t)$$

### Beispiel 14.8 *RL-Kreis*

G832E4

Berechne die Amplitude und den Phasenwinkel des Stromes

$$i(t) = A \cdot \cos(\omega t + \varphi)$$

am Schaltkreis im eingeschwungenen Zustand. Anregung

$$u(t) = \hat{u} \cdot \cos(t\omega)$$

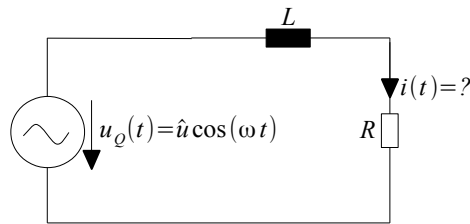
i) mit den Werten

$$\omega = 2\pi \cdot 10 \frac{1}{\text{s}}, \hat{u} = 12 \text{ V}, L = 0.08 \text{ H}, R = 0.5 \ \Omega$$

ii) mit den Werten

$$\omega = 2\pi \cdot 10^4 \frac{1}{\text{s}}, \hat{u} = 5 \text{ V}, L = 5 \ \mu\text{H}, R = 3 \ \Omega$$

iii) allgemein.



**Lösung:**

i)

$$\mathbf{Z}_t = \begin{pmatrix} 0.5 & 5.0265 \\ -5.0265 & 0.5 \end{pmatrix}$$

Es resultiert der Strom

$$\vec{i} = (\mathbf{Z}_t)^{-1} \odot \begin{pmatrix} 12 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.2351 \\ 2.3639 \end{pmatrix}$$

Der Strom lässt sich aus darstellen als

$$i(t) = 2.3756A \cdot \cos(\omega t - 1.4717)$$

ii)

$$\mathbf{Z}_t = \begin{pmatrix} 3.0 & 0.3142 \\ -0.3142 & 3.0 \end{pmatrix}$$

Es resultiert der Strom

$$\vec{i} = (\mathbf{Z}_t)^{-1} \odot \begin{pmatrix} 5 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.6486 \\ 0.1726 \end{pmatrix}$$

Der Strom lässt sich aus darstellen als

$$i(t) = 1.6576A \cdot \cos(\omega t - 0.1043)$$

iii) Wir schreiben die Matrix der Impedanz aus und invertieren sie:

$$\mathbf{Z}_t = \begin{pmatrix} R & L\omega \\ -L\omega & R \end{pmatrix} \rightarrow (\mathbf{Z}_t)^{-1} = \frac{1}{1 + (L\omega/R)^2} \cdot \begin{pmatrix} 1/R & -L\omega/R^2 \\ L\omega/R^2 & 1/R \end{pmatrix}$$

Also ist der Strom

$$\vec{i} = (\mathbf{Z}_t)^{-1} \odot \begin{pmatrix} \hat{u} \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{\hat{u}}{1 + (L\omega/R)^2} \cdot \begin{pmatrix} 1/R \\ L\omega/R^2 \end{pmatrix}$$

oder

$$i(t) = \frac{\hat{u}/R^2}{(L\omega/R)^2 + 1} \cdot [R \cos(t\omega) + L\omega \sin(t\omega)]$$

Die Amplitude und Phase sind

$$A = \frac{\hat{u}/R^2}{(L\omega/R)^2 + 1} \cdot \sqrt{(L\omega)^2 + R^2} = \frac{\hat{u}/R}{\sqrt{(L\omega/R)^2 + 1}}$$
$$\varphi = -\arctan\left(\frac{L\omega}{R}\right)$$

Der Ausdruck für  $\varphi$  gilt solange  $L, R > 0$ , also

$$i(t) = \frac{\hat{u}/R}{\sqrt{(L\omega/R)^2 + 1}} \cdot \cos\left(t\omega - \arctan\left(\frac{L\omega}{R}\right)\right)$$

### Infobox Matlab-Bibliothek Impedanzen

```
% Impedanzen (Zeigerdarstellung)
% Basis: e1=cos(w*t) ; e2=sin(w*t)
Zr=@(R)[ R 0 ; 0 R ]
Zc=@(w,C)[ 0 -1/(w*C) ; 1/(w*C) 0 ]
Zl=@(w,L) [ 0 w*L ; -w*L 0 ]

% Phasenverschiebung
% aa*cos(x)+bb*sin(x)= A*cos(x+cosphas)
% A=sqrt(aa^2+bb^2)
cosphas=@(aa,bb) (aa<0)*pi-atan(bb/aa)
% aa*cos(x)+bb*sin(x)= A*sin(x+sinphas)
sinphas=@(aa,bb) (bb<0)*pi+atan(aa/bb)
```

## 14.4 Übungen

### Beispiel 14.9 Gesamt-Impedanz

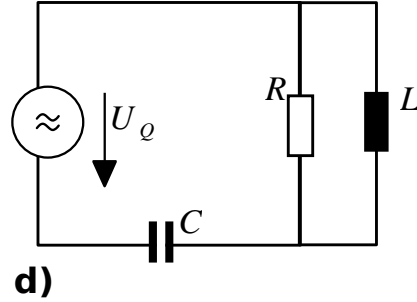
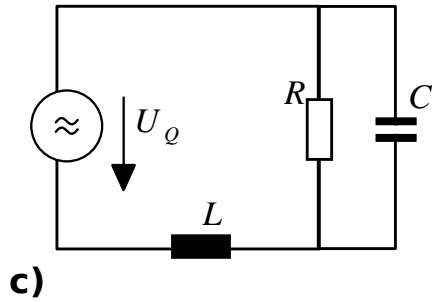
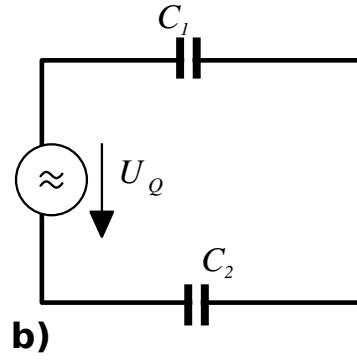
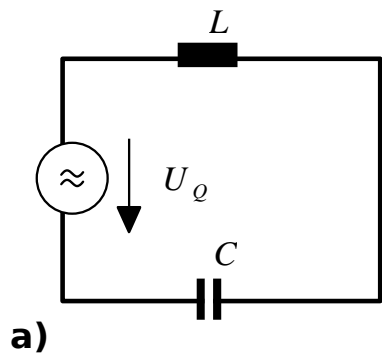
86MM2L

Bestimmen Sie die Gesamt-Impedanz des Netzwerks. Rechnen Sie

i) mit den Werten

$$\omega = \frac{2\pi}{10} \frac{1}{s}, L = 0.8 \text{ H}, C = 0.5 \text{ F}, C_1 = 0.1 \text{ F}, C_2 = 0.3 \text{ F}, R = 1 \Omega,$$

ii) allgemein.



**Lösung:**

Numerisch:

a)

$$\mathbf{Z}_{\text{tot}} = \begin{bmatrix} 0 & -2.6804 \\ 2.6804 & 0 \end{bmatrix}$$

b)

$$\mathbf{Z}_{\text{tot}} = \begin{bmatrix} 0 & -21.2207 \\ 21.2207 & 0 \end{bmatrix}$$

c)

$$\mathbf{Z}_{\text{tot}} = \begin{bmatrix} 0.9102 & 0.2167 \\ -0.2167 & 0.9102 \end{bmatrix}$$

d)

$$\mathbf{Z}_{\text{tot}} = \begin{bmatrix} 0.2017 & -2.7818 \\ 2.7818 & 0.2017 \end{bmatrix}$$

Formal:

a)

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_T &= \mathbf{Z}_C + \mathbf{Z}_L \\ &= \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C\omega} \\ \frac{1}{C\omega} & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & L\omega \\ -L\omega & 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & L\omega - \frac{1}{C\omega} \\ \frac{1}{C\omega} - L\omega & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

b)

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_T &= \mathbf{Z}_{C_1} + \mathbf{Z}_{C_2} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C_1\omega} \\ \frac{1}{C_1\omega} & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C_2\omega} \\ \frac{1}{C_2\omega} & 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C_1\omega} - \frac{1}{C_2\omega} \\ \frac{1}{C_1\omega} + \frac{1}{C_2\omega} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{C_1+C_2}{C_1C_2\omega} \\ \frac{C_1+C_2}{C_1C_2\omega} & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

c)

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_T &= \mathbf{Z}_L + (\mathbf{Z}_C^{-1} + \mathbf{Z}_R^{-1})^{-1} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & L\omega \\ -L\omega & 0 \end{bmatrix} + \left\{ \begin{bmatrix} \frac{1}{R} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & C\omega \\ -C\omega & 0 \end{bmatrix} \right\}^{-1} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{1}{R(C^2\omega^2 + \frac{1}{R^2})} & L\omega - \frac{C\omega}{C^2\omega^2 + \frac{1}{R^2}} \\ \frac{C\omega}{C^2\omega^2 + \frac{1}{R^2}} - L\omega & \frac{1}{R(C^2\omega^2 + \frac{1}{R^2})} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{(CR\omega)^2 + 1} & L\omega - \frac{C\omega R^2}{(CR\omega)^2 + 1} \\ -L\omega + \frac{C\omega R^2}{(CR\omega)^2 + 1} & \frac{R}{(CR\omega)^2 + 1} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

d)

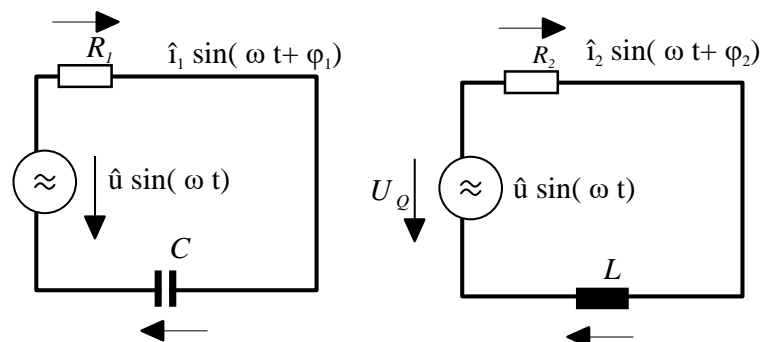
$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_T &= \mathbf{Z}_C + (\mathbf{Z}_R^{-1} + \mathbf{Z}_L^{-1})^{-1} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C\omega} \\ \frac{1}{C\omega} & 0 \end{bmatrix} + \left\{ \begin{bmatrix} \frac{1}{R} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L\omega} \\ \frac{1}{L\omega} & 0 \end{bmatrix} \right\}^{-1} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{1}{R(\frac{1}{L^2\omega^2} + \frac{1}{R^2})} & \frac{1}{L(\frac{1}{L^2\omega^2} + \frac{1}{R^2})} - \frac{1}{C\omega} \\ \frac{1}{C\omega} - \frac{1}{L(\frac{1}{L^2\omega^2} + \frac{1}{R^2})} & \frac{1}{R(\frac{1}{L^2\omega^2} + \frac{1}{R^2})} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{(\frac{R}{L\omega})^2 + 1} & \frac{L\omega}{1 + (\frac{L\omega}{R})^2} - \frac{1}{C\omega} \\ -\frac{1}{1 + (\frac{L\omega}{R})^2} + \frac{1}{C\omega} & \frac{R}{(\frac{R}{L\omega})^2 + 1} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

### Beispiel 14.10 Zeigerdiagramm

P5DDG1

Gegeben sind die beiden Netzwerke mit den Komponenten  $R_1 = 4 \Omega$ ,  $R_2 = 2 \Omega$ ,  $C = 300 \text{ nF}$ , und  $L = 3 \mu \text{ H}$ . Für die Amplitude und Frequenz der sinusförmigen Quellenspannung gelten  $\hat{u} = 10 \text{ V}$  und  $f = 100 \text{ kHz}$ .

Bestimmen Sie die Ströme  $i_1(t)$  und  $i_2(t)$  mit Hilfe der Zeigerdarstellung.



Lösung:



Netzwerk 1: Die Impedanz des Netzwerks ist

$$\mathbf{Z}_T = \mathbf{Z}_{R_1} + \mathbf{Z}_C = \begin{bmatrix} R_1 & -\frac{1}{C\omega} \\ \frac{1}{C\omega} & R_1 \end{bmatrix}$$

Die Spannungsquelle ist in der Zeigerdarstellung  $\vec{u} = \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{u} \end{bmatrix}$ . Es ergibt sich aus  $\vec{u} = \mathbf{Z} \odot \vec{i}$

$$\vec{i} = \mathbf{Z}^{-1} \odot \vec{u} = \begin{bmatrix} 4 & -\frac{50}{3\pi} \\ \frac{50}{3\pi} & 4 \end{bmatrix}^{-1} \odot \vec{u} = \begin{bmatrix} 1.20177 \\ 0.90611 \end{bmatrix}$$

Die Amplitude des Stromes ist

$$|\vec{i}| = \sqrt{1.20177^2 + 0.90611^2} = 1.5 \text{ A}$$

und die Phasenverschiebung

$$\phi_1 = \arctan\left(\frac{1.20177}{0.90611}\right) = 0.924 = 53^\circ$$

Also ist der Strom

$$i_1(t) = 1.5 \text{ A} \sin(\omega \cdot t + 53^\circ)$$

Netzwerk 2: Die Impedanz des Netzwerks ist

$$\mathbf{Z}'_T = \mathbf{Z}_{R_2} + \mathbf{Z}_L = \begin{bmatrix} R & L\omega \\ -L\omega & R \end{bmatrix}$$

Die Spannungsquelle ist in der Zeigerdarstellung  $\vec{u} = \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{u} \end{bmatrix}$ . Es ergibt sich aus  $\vec{u} = \mathbf{Z} \odot \vec{i}$

$$\vec{i} = (\mathbf{Z}')^{-1} \odot \vec{u} = \begin{bmatrix} 2 & \frac{3\pi}{5} \\ -\frac{3\pi}{5} & 2 \end{bmatrix}^{-1} \odot \vec{u} = \begin{bmatrix} -2.49562 \\ 2.64793 \end{bmatrix}$$

Die Amplitude und Phasenverschiebung des Stromes sind

$$|\vec{i}| = \sqrt{(-2.50)^2 + 2.65^2} = 3.64 \text{ A} \text{ und } \phi_2 = \arctan\left(\frac{-2.50}{2.65}\right) = -43^\circ$$

Also ist der Strom  $i_2(t) = 3.64 \text{ A} \sin(\omega \cdot t - 43^\circ)$ .

### Beispiel 14.11 Zeigerdiagramm

MZ8213

Gegeben ist das Netzwerke mit den Komponenten  $R_1 = 4 \Omega$ ,  $R_2 = 2 \Omega$ ,  $C = 300 \text{ nF}$ , und  $L = 3 \mu \text{ H}$ .

a) Für die Amplitude und Frequenz der sinusförmigen Quellenspannung gilt

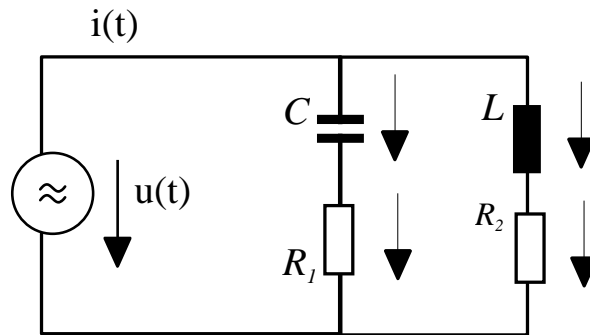
$$u(t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega t) \text{ mit } \hat{u} = 10 \text{ V und } f = 100 \text{ kHz} .$$

Bestimmen Sie den Strom  $i(t) = \hat{i} \cdot \sin(\omega t + \varphi')$  mit Hilfe der Zeigerdarstellung.

b) Für die Amplitude und Frequenz des sinusförmigen Quellen-Stroms gilt

$$i(t) = \hat{i} \cdot \sin(\omega t) \text{ mit } \hat{i} = 5 \text{ A und } f = 100 \text{ kHz .}$$

Bestimmen Sie die Spannung  $u(t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega t + \varphi'')$  mit Hilfe der Zeigerdarstellung.



**Lösung:**

Die Impedanz des Netzwerkes ist

$$\mathbf{Z}_T = \left( \underbrace{(\mathbf{Z}_{R_1} + \mathbf{Z}_C)^{-1}}_{=\mathbf{Z}_a} + \underbrace{(\mathbf{Z}_{R_1} + \mathbf{Z}_L)^{-1}}_{=\mathbf{Z}_b} \right)^{-1} = \left( \begin{bmatrix} R_1 & -\frac{1}{C\omega} \\ \frac{1}{C\omega} & R_1 \end{bmatrix}^{-1} + \begin{bmatrix} R & L\omega \\ -L\omega & R \end{bmatrix}^{-1} \right)^{-1}$$

a) Die Spannungsquelle ist in der Zeigerdarstellung  $\vec{u} = \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{u} \end{bmatrix}$ . Wir bemerken

$$(\mathbf{Z}_T)^{-1} = \left[ \left( (\mathbf{Z}_a)^{-1} + (\mathbf{Z}_b)^{-1} \right)^{-1} \right]^{-1} = (\mathbf{Z}_a)^{-1} + (\mathbf{Z}_b)^{-1}$$

also

$$\vec{i} = (\mathbf{Z}_T)^{-1} \odot \vec{u} = \begin{bmatrix} 0.355404 & -0.129385 \\ 0.129385 & 0.355404 \end{bmatrix} \odot \vec{u} = \begin{bmatrix} -1.29385 \\ 3.55404 \end{bmatrix}$$

Die Amplitude des Stromes ist

$$|\vec{i}| = \sqrt{(-1.29385)^2 + 3.55404^2} = 3.78223 \text{ A}$$

und die Phasenverschiebung

$$\phi' = \arctan \left( \frac{-1.29385}{3.55404} \right) = -0.349137 = -20.00^\circ$$

Also ist der Strom

$$i(t) = 3.78 \text{ A} \cdot \sin(\omega \cdot t - 20^\circ)$$

b) Die Stromquelle ist in der Zeigerdarstellung  $\vec{i} = \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{i} \end{bmatrix}$ . Wir berechnen also

$$\vec{u} = \mathbf{Z}_T \odot \vec{i} = \begin{bmatrix} 2.48443 & 0.904459 \\ -0.904459 & 2.48443 \end{bmatrix} \odot \vec{i} = \begin{bmatrix} 4.52229 \\ 12.4221 \end{bmatrix}$$

Amplitude und Phasenverschiebung der Spannung sind

$$|\vec{u}| = \sqrt{4.52^2 + 12.4^2} = 13.22 \text{ V und } \phi'' = \arctan\left(\frac{4.52}{12.4}\right) = 20^\circ$$

Die Spannung ist also  $u(t) = 13.22 \text{ V} \cdot \sin(\omega \cdot t + 20^\circ)$ .

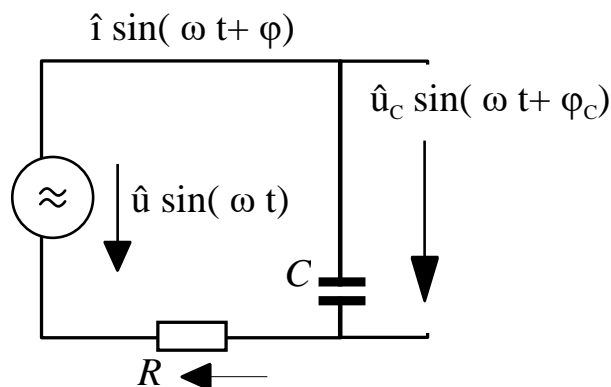
### Beispiel 14.12 Tiefpassfilter

D1A5N3

Gegeben ist das Netzwerke mit den Komponenten  $R$ ,  $C$ . Für die Amplitude und Frequenz der sinusförmigen Quellenspannung gelten  $\hat{u}$  V und  $\omega$  Hz. Bestimmen Sie die Ausgangsspannung  $u_o(t) = \hat{u}_C \cdot \sin(\omega t + \varphi_C)$ .

Gehen Sie dabei wie folgt vor:

- Bestimmen Sie die Impedanz der Kapazität und des gesamten Netzwerks in Zeigerdarstellung.
- Berechnen Sie damit den Strom  $i(t)$  im Netzwerk in Zeigerdarstellung.
- Benutzen Sie  $\vec{u} = \mathbf{Z} \odot \vec{i}$  um aus dem Strom die Spannung über der Kapazität  $C$  zu berechnen.
- Wandeln Sie den Zeiger für die Spannung in die Form  $\hat{u}_C \cdot \sin(\omega t + \varphi_C)$  um.
- Berechnen Sie die Ausgangsspannung  $\hat{u}_C$  bei  $f_0 = 0$  und  $f_1 = 230 \text{ kHz}$ ,  $\hat{u} = 10 \text{ V}$  und ein Netzwerk mit  $R = 4 \Omega$  und  $C = 300 \text{ nF}$ .



Lösung:

a) Die Impedanzen in Zeigerform sind

$$\mathbf{Z}_C = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C\omega} \\ \frac{1}{C\omega} & 0 \end{bmatrix} \text{ und } \mathbf{Z}_T = \begin{bmatrix} R & -\frac{1}{C\omega} \\ \frac{1}{C\omega} & R \end{bmatrix}$$

b) Der Strom ergibt sich aus  $\vec{u} = \mathbf{Z}_T \odot \vec{i}$  d.h.

$$\vec{i} = (\mathbf{Z}_T)^{-1} \odot \vec{u} = \begin{bmatrix} R & -\frac{1}{C\omega} \\ \frac{1}{C\omega} & R \end{bmatrix}^{-1} \odot \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{u} \end{bmatrix}$$

also

$$\vec{i} = \frac{1}{R^2 + 1/(C\omega)^2} \cdot \begin{bmatrix} R & \frac{1}{C\omega} \\ -\frac{1}{C\omega} & R \end{bmatrix} \odot \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{u} \end{bmatrix} = \frac{\hat{u}}{R^2 + 1/(C\omega)^2} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{C\omega} \\ R \end{bmatrix}$$

c)

$$\begin{aligned} \vec{u}_C &= \mathbf{Z}_C \odot \vec{i} = \frac{\hat{u}}{R^2 + 1/(C\omega)^2} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C\omega} \\ \frac{1}{C\omega} & 0 \end{bmatrix} \odot \begin{bmatrix} \frac{1}{C\omega} \\ R \end{bmatrix} = \frac{\hat{u}}{R^2 + 1/(C\omega)^2} \cdot \begin{bmatrix} -\frac{R}{C\omega} \\ \frac{1}{(C\omega)^2} \end{bmatrix} \\ &= \frac{\hat{u}}{R^2 \cdot (C\omega)^2 + 1} \cdot \begin{bmatrix} -R \cdot C\omega \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Beim letzten Schritt wurde der Bruch erweitert mit  $(C\omega)^2$ .

d) Amplitude :

$$\hat{u}_C = \frac{\hat{u}}{R^2 \cdot (C\omega)^2 + 1} \cdot \sqrt{(-R \cdot C\omega)^2 + 1^2} = \frac{\hat{u}}{\sqrt{R^2 \cdot (C\omega)^2 + 1}}$$

Phase:

$$\varphi_C = \arctan\left(\frac{-R \cdot C\omega}{1}\right) = -\arctan(R \cdot C\omega)$$

Also ist die Ausgangsspannung

$$u_o(t) = \frac{\hat{u}}{\sqrt{R^2 \cdot (C\omega)^2 + 1}} \cdot \sin(\omega t - \arctan(R \cdot C\omega))$$

Für hohe Frequenzen ist der Ausdruck  $\sqrt{R^2 \cdot (C\omega)^2 + 1}$  gross, also ist die Amplitude von  $u_o(t)$  klein. D.h. an dieser Schaltung werden hohe Frequenzen stärker gedämpft als tiefe.

e) Die Ausgangsspannungen sind

$$\begin{aligned} \hat{u}_C &= \frac{\hat{u}}{\sqrt{R^2 \cdot (C \cdot 0)^2 + 1}} = 10 \text{ V} \\ \hat{u}_C &= \frac{10 \text{ V}}{\sqrt{(R \cdot C \cdot 2\pi \cdot 230 \cdot 10^3)^2 + 1}} = 5 \text{ V} \end{aligned}$$

da  $R \cdot C \cdot 2\pi \cdot 230 \cdot 10^3 = 1.734$

Gegeben ist das Netzwerke mit den Komponenten  $R, C$ . Für die Amplitude und Frequenz der sinusförmigen Quellenspannung gelten  $\hat{u}$  V und  $\omega$  Hz. Bestimmen Sie die Gangs-Spannung  $u_o(t) = \hat{u}_R \cdot \sin(\omega t + \varphi_C)$ .

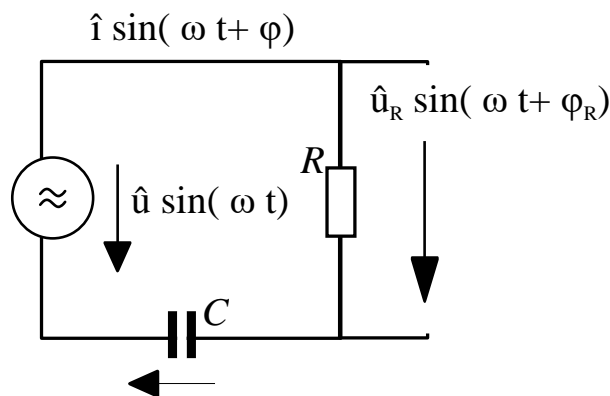
Gehen Sie dabei wie folgt vor:

- a) Das Netzwerk ist hat die selbe Struktur wie in der vorherigen Aufgababe. Deshalb können wir den resultierenden Strom in Zeigerform

$$\vec{i} = \frac{\hat{u}}{R^2 + 1/(C\omega)^2} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{C\omega} \\ R \end{bmatrix}$$

verwenden. Benutzen Sie  $\vec{u} = \mathbf{Z} \odot \vec{i}$  um aus dem Strom die Spannung über dem Widerstand  $R$  zu berechnen.

- b) Wandeln Sie den Zeiger für die Spannung in die Form  $\hat{u}_R \cdot \sin(\omega t + \varphi_R)$  um.  
 c) Berechnen Sie die Ausgangsspannung  $\hat{u}_C$  bei  $f_0 = 0$  und  $f_1 = 274$  kHz,  $\hat{u} = 10$  V und ein Netzwerk mit  $R = 4\Omega$  und  $C = 300$  nF.



**Lösung:**

- a) Die Spannung ist

$$\begin{aligned} \vec{u}_R &= \mathbf{Z}_R \odot \vec{i} = \frac{\hat{u}}{R^2 + 1/(C\omega)^2} \cdot \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \odot \begin{bmatrix} \frac{1}{C\omega} \\ R \end{bmatrix} \\ &= \frac{\hat{u}}{R^2 + 1/(C\omega)^2} \cdot \begin{bmatrix} R \\ R^2 \end{bmatrix} \\ &= \frac{\hat{u}}{(RC\omega)^2 + 1} \cdot \begin{bmatrix} \omega \cdot RC \\ (RC\omega)^2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Beim letzten Schritt wurde der Bruch erweitert mit  $(C\omega)^2$ .

- b) Die Amplitude ist

$$\begin{aligned}
\hat{u}_R &= \frac{\hat{u}}{(RC\omega)^2 + 1} \cdot \sqrt{(\omega \cdot RC)^2 + (RC\omega)^4} \\
&= \frac{\hat{u}}{(RC\omega)^2 + 1} \cdot (\omega \cdot RC) \cdot \sqrt{1 + (RC\omega)^2} \\
&= \frac{\hat{u} \cdot (\omega \cdot RC)}{\sqrt{1 + (RC\omega)^2}}
\end{aligned}$$

Die Phasenverschiebung

$$\varphi_R = \arctan\left(\frac{\omega \cdot RC}{(RC\omega)^2}\right) = \arctan\left(\frac{1}{RC\omega}\right)$$

- c) Berechnen Sie die Ausgangsspannung  $\hat{u}_C$  bei  $f_0 = 0$  und  $f_1 = 230$  kHz,  $\hat{u} = 10$  V und ein Netzwerk mit  $R = 4 \Omega$  und  $C = 300$  nF.

Die Ausgangsspannungen sind

$$\begin{aligned}
\hat{u}_C &= \frac{\hat{u} \cdot (0 \cdot RC)}{\sqrt{1 + (RC \cdot 0)^2}} = 0 \text{ V} \\
\hat{u}_C &= \frac{\hat{u} \cdot (\omega \cdot RC)}{\sqrt{1 + (RC\omega)^2}} = 9 \text{ V}
\end{aligned}$$

da  $\omega \cdot RC = 2.06591$

Der Gleichstromanteil verschwindet, während Wechselströme um so weniger gedämpft werden, je höher ihre Frequenz liegt.

**Teil III**

**Komplexe Zahlen**

15.1 Komplexe Zahlen, $\mathbb{C}$ , Zahlenebene von Gauss . . . . .	406
15.2 Addieren und Multiplizieren . . . . .	408
15.3 Polarform . . . . .	415
15.4 Potenzen und Wurzeln . . . . .	421
15.5 Gleichung $n$ -ten Grades, Fundamentalsatz der Algebra . . . . .	424
15.6 Zerlegen in Real- und Imaginärteil . . . . .	427
15.7 Harmonischen Schwingungen . . . . .	428

**Beispiel 15.1 Gleichungen lösen**

Lösen sie die Gleichungen. Diskutieren Sie: Wieviele Lösungen hat eine quadratische Gleichung hat?

a)  $x^2 = 9$

d)  $x^2 + 25 = 0$

b)  $x^2 - 25 = 0$

c)  $x^2 - 6x + 9 = 0$

e)  $x^2 - 10x + 34 = 0$

**Lösung:**

a)  $x = 3, -3$

b)  $x = 5, -5$

c)  $(x - 3)^2 = 0 \Rightarrow x = 3$  (zweifach)



d)  $x = 5i, -5i$

e)  $x = \frac{10 \pm \sqrt{100 - 4 \cdot 34}}{2} = \frac{10 \pm \sqrt{-16}}{2} = 5 + 3i, 5 - 3i$

## 15.1 Komplexe Zahlen, $\mathbb{C}$ , Zahlenebene von Gauss

Keine reelle Zahl erfüllt die Gleichung  $x^2 = -1$ , denn Quadrate von reellen Zahlen sind immer positiv.

### Definition Imaginäre Einheit

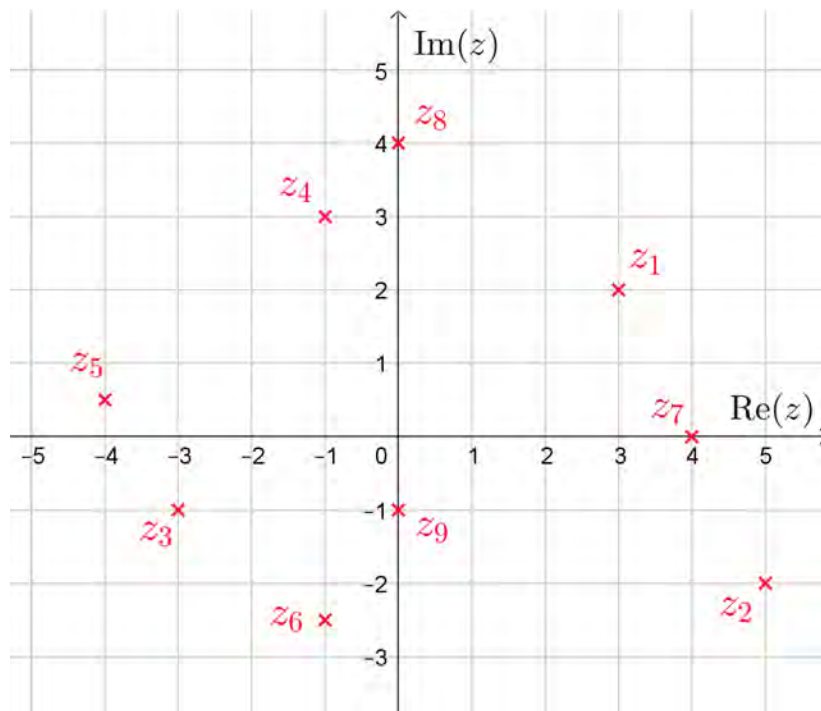
Für  $i$  gilt

$$i^2 = -1$$

### Beispiel 15.2 Komplexe Zahlenebene

KICGBV

- Lesen Sie  $z_1, \dots, z_9$  aus und geben Sie die Zahlen in der kartesischen Darstellung an.
- Wie gross ist der Abstand von  $z_1, z_7$  und  $z_9$  vom Ursprung?
- Geben Sie eine allgemeine Formel an um für  $z = x + iy$  den Abstand vom Ursprung  $|z|$  zu berechnen.
- Wir nennen  $|z|$  den Betrag. Was ist der Betrag von  $z_2, z_3$  und  $z_4$ ?



**Lösung:**

- a)  $z_1 = 3 + 2i$ ,  $z_2 = 5 - 2i$ ,  $z_3 = -3 - i$ ,  $z_4 = -1 + 3i$ ,  $z_5 = -4 + i/2$ ,  $z_6 = -1 - 2.5i$ ,  
 $z_7 = 4$ ,  $z_8 = 4i$ ,  $z_9 = -i$
- b)  $|z_1| = \sqrt{13}$ ,  $|z_7| = 4$  und  $|z_9| = 1$
- c)  $|z| = \sqrt{x^2 + y^2}$  zu berechnen.
- d)  $|z_2| = \sqrt{29} \approx 5.385165$ ,  $|z_3| = \sqrt{10} \approx 3.16228$  und  $|z_4| = \sqrt{10} \approx 3.16228$

### Beispiel 15.3 Gausschen Zahlenebene

KGX8MQ

Wo liegen in der Gausschen Zahlenebene jeweils alle komplexen Zahlen  $z$  mit folgender Eigenschaft?

- a) Der Realteil ist 2.
- b) Der Imaginarteil ist 2.
- c) Der Realteil und der Imaginarteil sind gleich.
- d) Der Realteil ist das Doppelte des Imaginarteils.
- e)  $\text{Im}(z) > 0$

- f)  $\operatorname{Re}(z) \cdot \operatorname{Im}(z) < 0$
- g)  $3 \leq \operatorname{Re}(z) \leq 4$
- h)  $\operatorname{Im}(z)^2 < 0$
- i)  $\operatorname{Re}(z)^2 + \operatorname{Im}(z)^2 = 1$
- j)  $(\operatorname{Re}(z) + \operatorname{Im}(z))^2 = 1$

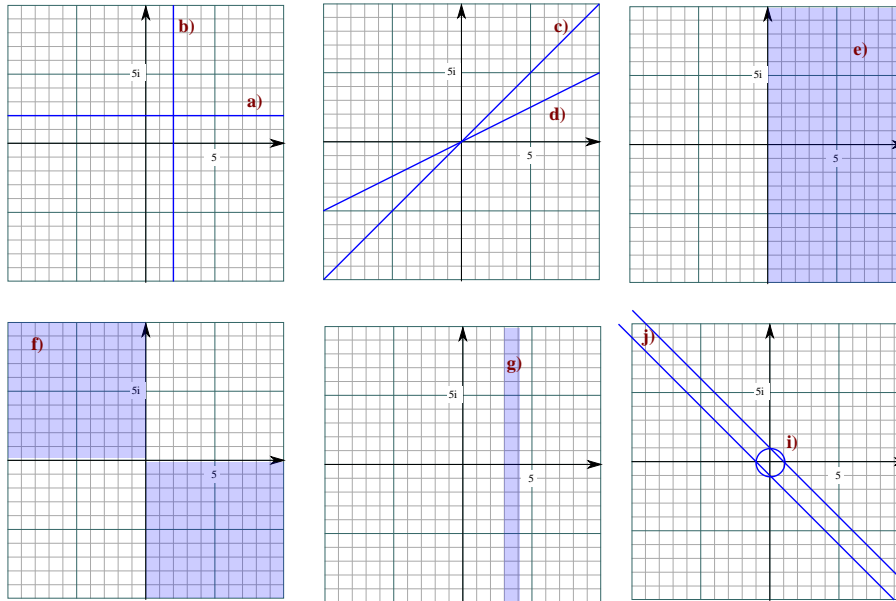
**Lösung:**

- a) Gerade parallel zu imaginären Achse.
- b) Gerade parallel zu reellen Achse.
- c) Winkelhalbierende mit  $z = t + i \cdot t, t \in \mathbb{R}$
- d) Gerade mit  $z = 2t + i \cdot t, t \in \mathbb{R}$
- e) Obere Halbebene  $\operatorname{Im}(z) > 0$
- f) 2 Quadranten
- g) Streifen
- h)  $\{\}$
- i) Einheitskreis
- j) Entweder gilt  $\operatorname{Re}(z) + \operatorname{Im}(z) = 1$ , d.h.  $x + y = 1$ . Wir wählen Realteil mit  $t \in \mathbb{R} \Rightarrow y = 1 - t$ . So erhalten wir die Lösungsmenge

$$z = t + i(1 - t).$$

Oder es gilt  $\operatorname{Re}(z) + \operatorname{Im}(z) = -1$ . Mit der Notation von oben erhalten wir die Gerade

$$z = t + i(-1 - t)$$



## 15.2 Addieren und Multiplizieren

### Beispiel 15.4 Addition, Multiplikation

1EUM2V

- Wie können Sie folgende Ausdrücke vereinfachen?
  - Bestimmen Sie Real- und Imaginärteil.
  - Welche Gesetze benutzen Sie dafür?
- $a, b, c, d \in \mathbb{R}$ .

a)  $i^2$

b)  $-i^3$

c)  $-i^4$

d)  $i^5$

e)  $i^{100} - i^{98}$

f)  $i + i + i$

g)  $(2 + i) + (4 + 2i)$

h)  $2 \cdot (1 + 3i)$

i)  $a \cdot (c + id)$

j)  $(2 + i) \cdot (4 + 2i)$

k)  $(2 + i) \cdot (2 - i)$

l)  $(a + ib) \cdot (c + id)$

**Lösung:**

a)  $i^2 = -1$

b)  $-i^3 = i$

c)  $-i^4 = -1$

d)  $i^5 = i$

e)  $i^{100} - i^{98} = 2$

f)  $i + i + i = 3i$

g)  $(2 + i) + (4 + 2i) = 6 + 3i$

h)  $2 \cdot (1 + 3i) = 2 + 6i$

i)  $a \cdot (c + id) = ac + iad$

j)  $(2 + i) \cdot (4 + 2i) = 6 + 8i$

k)  $(2 + i) \cdot (2 - i) = 5$

l)  $(a + ib) \cdot (c + id) = (ac - bd) - i(ad + bc)$

### Infobox Reelle Zahlen Addition, Multiplikation

Für  $a, b, c, d \in \mathbb{R}$  gilt u.a.

i)  $a + (b + c) = (a + b) + c$ , Assoziativgesetz der Addition

ii)  $a + b = b + a$ , Kommutativgesetz der Addition

iii)  $a \cdot (b \cdot c) = (a \cdot b) \cdot c$ , Assoziativgesetz der Multiplikation

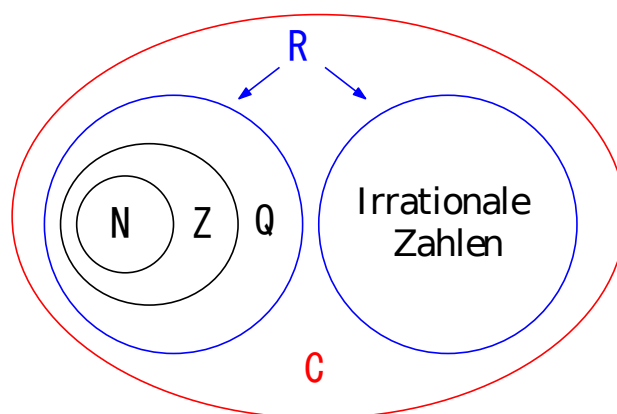
iv)  $a \cdot b = b \cdot a$ , Kommutativgesetz der Multiplikation

v)  $a \cdot (b + c) = a \cdot b + a \cdot c$ , Distributivgesetz

vi)  $|a| \cdot |b| = |a \cdot b|$

Wir wollen die bisher bekannten Zahlenmenge in  $\mathbb{C}$  einbetten.

$$\mathbb{N} \subseteq \mathbb{Z} \subseteq \mathbb{Q} \subseteq \mathbb{R} \subseteq \mathbb{C}$$



Dann sollten alle Rechengesetze, die in  $\mathbb{R}$  gelten, auch in  $\mathbb{C}$  gelten.

### Infobox Multiplikation, Addition

Multiplikation und Addition in  $\mathbb{C}$  erfolgen durch

- i) Zusammenfassen von Realteil und Imaginärteil (Addition)
- ii) Ausmultiplizieren (Multiplikation)

### Beispiel 15.5 Addition, Multiplikation

2FXNNA

Berechnen Sie Real- und Imaginärteil.

- a)  $i + 2i + 3i + 4i$
- b)  $i \cdot 2i$
- c)  $i \cdot 2i \cdot 3i \cdot 4i$
- d)  $(3i)^2$
- e)  $(\sqrt{3}i)^2$
- f)  $(1 + i)^2$
- g)  $(1 + 2i) \cdot (3 + 4i)$
- h)  $(2 - 5i) + (5 + 2i)$
- i)  $(1 + i)^4$

**Lösung:**

- |  |  |
|--|--|
| a) $i + 2i + 3i + 4i = 10i$            | f) $(1 + i)^2 = 2i$                      |
| b) $i \cdot 2i = -2$                   | g) $(1 + 2i) \cdot (3 + 4i) = -5 + i 10$ |
| c) $i \cdot 2i \cdot 3i \cdot 4i = 24$ | h) $(2 - 5i) + (5 + 2i) = 7 - 3i$        |
| d) $(3i)^2 = -9$                       | i) $(1 + i)^4 = (2i)^2 = -4$             |
| e) $(\sqrt{3}i)^2 = -3$                |  |

### 15.2.1 Subtraktion und Division

#### Beispiel 15.6 Komplexe Zahlen Dividieren

R3LX15

Stimmt die Gleichung  $\frac{3+4i}{1-2i} = -1 + 2i$ ? Wie könnte man dies überprüfen?

**Lösung:**

Erweitern mit  $1 + 2i$ , d.h.

$$\frac{3 + 4i}{1 - 2i} = \frac{(3 + 4i) \cdot (1 + 2i)}{(1 - 2i) \cdot (1 + 2i)} = \frac{3 + 4i + 6i - 8}{1^2 + 2^2} = -1 + 2i$$

Wir haben dabei den Bruch in einen Real- und einen Imaginärteil zerlegt.

### Beispiel 15.7 Addition, Multiplikation

1IDMNV

Berechnen Sie Real- und Imaginärteil.

- |                          |                        |
|--------------------------|------------------------|
| a) $i - 2i$              | d) $\frac{1}{2i}$      |
| b) $(2 - 5i) - (5 + 2i)$ | e) $\frac{1+2i}{3+4i}$ |
| c) $\frac{i}{2i}$        | f) $\frac{2-5i}{5+2i}$ |

**Lösung:**

- |                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| a) $i - 2i = -i$                  | d) $\frac{1}{2i} = -1/2i$                              |
| b) $(2 - 5i) - (5 + 2i) = 3 - 7i$ | e) $\frac{1+2i}{3+4i} = \frac{11}{25} + \frac{2}{25}i$ |
| c) $\frac{i}{2i} = 1/2$           | f) $\frac{2-5i}{5+2i} = -i$                            |

### Beispiel 15.8 Subtraktion, Division

9KJS56

Berechnen Sie Real- und Imaginärteil.

- |  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| a) $5i - 6i$                                 | i) $\frac{1+i}{1-i}$                 |
| b) $(8 - 15i) - (15 + 12i)$                  | j) $1 + \frac{1}{i}$                 |
| c) $(1 + i) + (1 - i) + (-1 + i) + (-1 - i)$ | k) $\frac{2/3 - i5/6}{1/2 - i7/3}$   |
| d) $(1 + i) - (1 - i) - (-1 + i) - (-1 - i)$ | l) $\frac{7/6 + 5/2i}{1/3 - 2/3i}$   |
| e) $\frac{2i}{i}$                            | m) $\frac{7i}{\sqrt{2}} + i\sqrt{5}$ |
| f) $\frac{2}{2+2i}$                          | n) $\frac{9+i\sqrt{3}}{\sqrt{3}-i9}$ |
| g) $\frac{1}{i}$                             |                                      |
| h) $\frac{4+5i}{3-4i}$                       |                                      |

**Lösung:**





a)  $\bar{z}_1 = -7 + 8i$

c)  $\bar{z}_3 = -17$

b)  $\bar{z}_2 = -4i$

d)  $\bar{z}_4 = -2 - 3i$

**Beispiel 15.10 Real- und Imaginärteil****5UF7TR**

$$z_0 = 1 - 2i$$

a) Berechnen Sie:  $\operatorname{Re}(z_0)$ ,  $\operatorname{Im}(z_0)$ ,  $\bar{z}_0$ ,  $\operatorname{Im}(i \cdot z_0)$ ,  $\overline{\operatorname{Im}(z_0)}$ ,  $\overline{i \cdot \operatorname{Re}(z_0)}$ ,  $\operatorname{Re}(1/z_0)$ .b) Bestimmen Sie alle komplexen Zahlen  $z = x + iy$  mit  $\operatorname{Im}(2z + 7 - 5i) = 1$ .c) Für  $z_1 = 2 + i$  und  $z_2 = -5 + 2i$  berechnen Sie

$$\operatorname{Re}(z_1 + 4z_2);, \operatorname{Im}((z_1)^2 \cdot z_2);, \operatorname{Re}(z_1 \cdot (z_2)^2);, \operatorname{Im}(2z_1 - 3z_2)$$

d) Für  $z = x + iy$  schreiben Sie  $\operatorname{Re}(z)$  und  $\operatorname{Im}(z)$  nur mit Hilfe von  $z$  und  $\bar{z}$ .**Lösung:**

- |    |                                 |  |
|----|---------------------------------|--|
| a) | • $\operatorname{Re}(z_0) = 1$  | • $\operatorname{Im}(i \cdot z_0) = i$             |
|    | • $\operatorname{Im}(z_0) = -2$ | • $\overline{\operatorname{Im}(z_0)} = -2$         |
|    | • $\bar{z}_0 = 1 + 2i$          | • $\overline{i \cdot \operatorname{Re}(z_0)} = -i$ |

$$\operatorname{Re}(1/z_0) = \frac{1}{1 - 2i} = \frac{1 + 2i}{5} = 1/5 + 2/5i$$

b) Für  $z = x + iy$  erhalten wir

$$2z + 7 - 5i = 2x + i2y + 7 - 5i = (2x + 7) + i(2y - 5)$$

Der Imaginärteil ist  $2y - 5$ . Für diesen soll gelten  $2y - 5 = 1$ , also  $y = 6/2 = 3$ . Die gesuchte Menge ist also  $z = x + i3$ , mit  $x \in \mathbb{R}$ .

- |    |  |   |
|----|--|---|
| c) | • $\operatorname{Re}(z_1 + 4z_2) = -18$        | • $\operatorname{Re}(z_1 \cdot (z_2)^2) = 62$ |
|    | • $\operatorname{Im}((z_1)^2 \cdot z_2) = -14$ | • $\operatorname{Im}(2z_1 - 3z_2) = -4$       |

d) Wir schreiben  $z = x + iy$  und  $\bar{z} = x - iy$  nebeneinander. Andererseits wissen wir, dass  $\operatorname{Re}(z) = x$  und  $\operatorname{Im}(z) = y$ . Durch Addition lässt sich der Imaginärteil entfernen:

$$z + \bar{z} = 2x \Rightarrow \operatorname{Re}(z) = x = \frac{z + \bar{z}}{2}$$

In der Differenz entfällt der Realteil:

$$z - \bar{z} = 2iy \Rightarrow \operatorname{Im}(z) = y = \frac{z - \bar{z}}{2i}$$

### Beispiel 15.11 Betrag bei der Multiplikation

FDE1CP

Überprüfen Sie, ob bei der oben gefundenen Multiplikation von komplexen Zahlen, das Gesetz für den Betrag

$$|z_1| \cdot |z_2| = |z_1 \cdot z_2|$$

erhalten ist. Benutzen Sie, dass auch gilt

$$|z_1|^2 \cdot |z_2|^2 = |z_1 \cdot z_2|^2$$

a)  $z_1 = 3 - 4i, z_2 = 6 + 8i$

c)  $z_1 = a + ib, z_2 = c + id$

b)  $z_1 = 3 - 4i, z_2 = 5 + 12i$

**Lösung:**

a)  $|z_1| = 5, |z_2| = 10, z_1 \cdot z_2 = 50, |z_1| \cdot |z_2| = 50$

b)  $|z_1| = 5, |z_2| = 13, z_1 \cdot z_2 = 63 + 16i, |z_1 \cdot z_2| = 65, |z_1| \cdot |z_2| = 65$

c)  $|z_1|^2 = a^2 + b^2, |z_2|^2 = c^2 + d^2$   $|z_1 \cdot z_2|^2 = (ac)^2 + (ad)^2 + (bc)^2 + (bd)^2$   
 $z_1 \cdot z_2 = (ac - bd) + (ad + bc)i$   $|z_1| \cdot |z_2| = (ac)^2 + (ad)^2 + (bc)^2 + (bd)^2$

### Infobox Rechenregeln für konjugiert-komplexe Zahlen

i)  $\overline{z_1 + z_2} = \overline{z_1} + \overline{z_2}$

ii)  $\overline{z_1 - z_2} = \overline{z_1} - \overline{z_2}$

iii)  $\overline{z_1 \cdot z_2} = \overline{z_1} \cdot \overline{z_2}$

iv)  $\overline{z_1/z_2} = \overline{z_1}/\overline{z_2}$

### Beispiel 15.12 Betrag bei der Multiplikation (Beweis 2)

GEH2DQ

Überprüfen Sie allgemein, ob bei der oben gefundenen Multiplikation von komplexen Zahlen, das Gesetz für den Betrag

$$|z_1| \cdot |z_2| = |z_1 \cdot z_2|$$

erhalten ist. Benutzen Sie, dass dann auch gilt

$$|z_1|^2 \cdot |z_2|^2 = |z_1 \cdot z_2|^2 \text{ und } |z|^2 = z \cdot \bar{z}$$

**Lösung:**

Wir schreiben  $|z_1|^2 \cdot |z_2|^2 = |z_1 \cdot z_2|^2$  mit Hilfe der Konjugierten

$$(z_1 \cdot \bar{z}_1) \cdot (z_2 \cdot \bar{z}_2) = (z_1 \cdot z_2) \cdot \overline{(z_1 \cdot z_2)}$$

Mit den Gesetzen oben für die komplex Konjugiert können wir umstellen

$$z_1 \cdot \bar{z}_1 \cdot z_2 \cdot \bar{z}_2 = z_1 \cdot \bar{z}_1 \cdot z_2 \cdot \bar{z}_2$$

Nun sehen wir, dass auf beiden Seiten der selbe Ausdruck steht.

### Infobox Betrag bei der Multiplikation

i)  $|z_1 \cdot z_2| = |z_1| \cdot |z_2|$

ii)  $\left| \frac{z_1}{z_2} \right| = \frac{|z_1|}{|z_2|}$

## 15.3 Polarform

### Satz Satz von Euler

Für  $\varphi \in \mathbb{R}$  gilt

$$e^{i\varphi} = \cos(\varphi) + i \sin(\varphi)$$

Der Satz kann z.B. mit der Reihenentwicklungen der drei Funktionen gezeigt werden.

### Beispiel 15.13 Sinus und Cosinus

F663GL

a) Vereinfachen Sie so weit wie möglich

$$e^{i\varphi} + e^{-i\varphi} \text{ und } e^{i\varphi} - e^{-i\varphi}$$

b) Stellen Sie  $\cos(\varphi)$  mit Hilfe von  $e^{i\varphi}$  und  $e^{-i\varphi}$  dar.

c) Stellen Sie  $\sin(\varphi)$  mit Hilfe von  $e^{i\varphi}$  und  $e^{-i\varphi}$  dar.

**Lösung:**

a) Wir erhalten

$$e^{i\varphi} + e^{-i\varphi} = 2 \cos(\varphi)$$

und

$$e^{i\varphi} - e^{-i\varphi} = 2i \sin(\varphi)$$

b) Wir lösen a) auf nach  $\cos(\varphi)$  und erhalten

$$\cos(\varphi) = \frac{1}{2} (e^{i\varphi} + e^{-i\varphi})$$

c) Wir lösen b) auf nach  $\sin(\varphi)$  und erhalten

$$\sin(\varphi) = \frac{1}{2i} (e^{i\varphi} - e^{-i\varphi})$$

### 15.3.1 Von der Polardarstellung zur karthesischen Darstellung

#### Beispiel 15.14 Polardarstellung

246ZKY

Stellen Sie folgende Zahlen in der Form  $a + ib$  mit  $a, b \in \mathbb{R}$  dar und markieren Sie sie in der Zahlenebene ( $\varphi$  ist das Argument von  $z$ ).  
Zeichnen Sie auch  $\bar{z}$  ein.

a)  $|z| = \sqrt{2}$ ,  $\varphi = \frac{7\pi}{36}$

c)  $|z| = 2$ ,  $\varphi = \frac{5\pi}{9}$

b)  $|z| = 4$ ,  $\varphi = \frac{25\pi}{36}$

d)  $|z| = a$ ,  $\varphi = \frac{3\pi}{2}$

**Lösung:**

a)  $z_1 = 1.15846 + 0.81116i$

b)  $z_2 = -2.29431 + 3.27661i$

c)  $z_3 = -0.347296 + 1.96962i$

d)  $z_4 = -ia$

### 15.3.2 Von der karthesischen Darstellung zur Polardarstellung

#### Beispiel 15.15 Polardarstellung aus der karthesischen Darstellung Y4PQ8E

a) Wir betrachten  $z = r \cdot (\cos(\varphi) + i \sin(\varphi))$  mit  $\varphi, r \in \mathbb{R}$ . Berechnen Sie

$$\frac{\operatorname{Im}(z)}{\operatorname{Re}(z)}$$

und lösen Sie den Ausdruck formal nach  $\varphi$  auf.

b) Berechnen Sie  $\frac{\operatorname{Im}(z)}{\operatorname{Re}(z)}$  für  $z_1 = 3 + 4i$  und für  $z_2 = -3 - 4i$ . Welche Schwierigkeiten erwarten Sie bei der Berechnung von  $\varphi$ ?

c) Berechnen Sie nun das Argument für die Paare

$$\begin{aligned}z_3 &= 5 + 12i, & z_4 &= -5 - 12i \\z_5 &= 5 - 12i, & z_6 &= -5 + 12i \\z_7 &= -4 - 13i, & z_8 &= 4 + 13i\end{aligned}$$

d) Wie kann man allgemein das Argument berechnen für  $z = a + ib$  mit  $a, b \in \mathbb{R}$ ?

**Lösung:**

a) Wir betrachten  $z = r \cdot (\cos(\varphi) + i \sin(\varphi))$  mit  $\varphi, r \in \mathbb{R}$ . Berechnen Sie

$$\frac{\operatorname{Im}(z)}{\operatorname{Re}(z)} = \frac{r \cdot \sin(\varphi)}{r \cdot \cos(\varphi)} = \tan(\varphi)$$

also  $\varphi = \arctan\left(\frac{\operatorname{Im}(z)}{\operatorname{Re}(z)}\right)$ .

b) Für  $z_1 = 3 + 4i$ :  $\frac{\operatorname{Im}(z)}{\operatorname{Re}(z)} = \frac{4}{3}$  und für  $z_2 = -3 - 4i$ :  $\frac{\operatorname{Im}(z)}{\operatorname{Re}(z)} = \frac{4}{3}$ . Ziehen wir den  $\arctan()$  aus den beiden Werten erhalten wir das selbe Resultat, obwohl  $\varphi$  bei den Zahlen verschieden ist.

c)

$$\begin{aligned}z_3 &= 13 \cdot e^{1.17601i}, & z_4 &= 13 \cdot e^{-1.96559i} \\z_5 &= 13 \cdot e^{-1.17601i}, & z_6 &= 13 \cdot e^{1.96559i} \\z_7 &= 13.6015e^{-1.8693i}, & z_8 &= 13.6015e^{1.2723i}\end{aligned}$$

d) Für  $z = a + ib$  mit  $a, b \in \mathbb{R}$  ist das Argument

$$\varphi = \arctan\left(\frac{b}{a}\right) + \begin{cases} \pi & (a < 0) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

### Beispiel 15.16 Polarform

A2ELY3

Geben Sie in Polarform an (ohne Taschenrechner).

a)  $2 + 2i$

e)  $1 + \sqrt{3}i$

b)  $-2 + 2i$

f)  $-1 + \sqrt{3}i$

c)  $-2 - 2i$

g)  $1 - \sqrt{3}i$

d)  $2 - 2i$

h)  $-1 - \sqrt{3}i$

**Lösung:**

a)  $2 + 2i = 2\sqrt{2}e^{\frac{\pi i}{4}}$

- b)  $-2 + 2i = 2\sqrt{2}e^{\frac{3\pi i}{4}}$
- c)  $-2 - 2i = 2\sqrt{2}e^{-\frac{3\pi i}{4}}$
- d)  $2 - 2i = 2\sqrt{2}e^{-\frac{\pi i}{4}}$
- e)  $1 + \sqrt{3}i = 2e^{\frac{\pi i}{3}}$
- f)  $-1 + \sqrt{3}i = 2e^{\frac{2\pi i}{3}}$
- g)  $1 - \sqrt{3}i = 2e^{-\frac{\pi i}{3}}$
- h)  $-1 - \sqrt{3}i = 2e^{-\frac{2\pi i}{3}}$

### Beispiel 15.17 Polarform 2

DWGXLH

Stellen Sie folgende Zahlen in Polarform dar und markieren Sie sie in der Zahlenebene:

- |                     |                                    |
|---------------------|------------------------------------|
| a) $i$              | h) $2e^{i7\pi/6}$                  |
| b) $-1$             | i) $2e^{i0}$                       |
| c) $1 + i$          | j) $6e^{-i\frac{\pi}{3}}$          |
| d) $3 + \sqrt{3}i$  | k) $3e^{i\pi}$                     |
| e) $-1 - \sqrt{3}i$ | l) $6e^{i3\pi/4}$                  |
| f) $0.6 - 0.8i$     | m) $\frac{2}{3} \cdot e^{i3\pi/2}$ |
| g) $4e^{i\pi/2}$    | n) $8e^{-\pi i}$                   |

#### Lösung:

- a)  $i = e^{i\frac{\pi}{2}}$
- b)  $-1 = e^{\pi i}$
- c)  $1 + i = \sqrt{2}e^{i\frac{\pi}{4}}$
- d)  $3 + \sqrt{3}i = 2\sqrt{3}e^{i\frac{\pi}{6}}$
- e)  $-1 - \sqrt{3}i = 2e^{-i\frac{2\pi}{3}}$
- f)  $0.6 - 0.8i = 0.8e^{-0.9273i}$
- g)  $4e^{i\pi/2} = 4e^{i\frac{\pi}{2}}$
- h)  $2e^{i7\pi/6} = 2e^{-i\frac{5\pi}{6}}$
- i)  $2e^{i0} = 2$

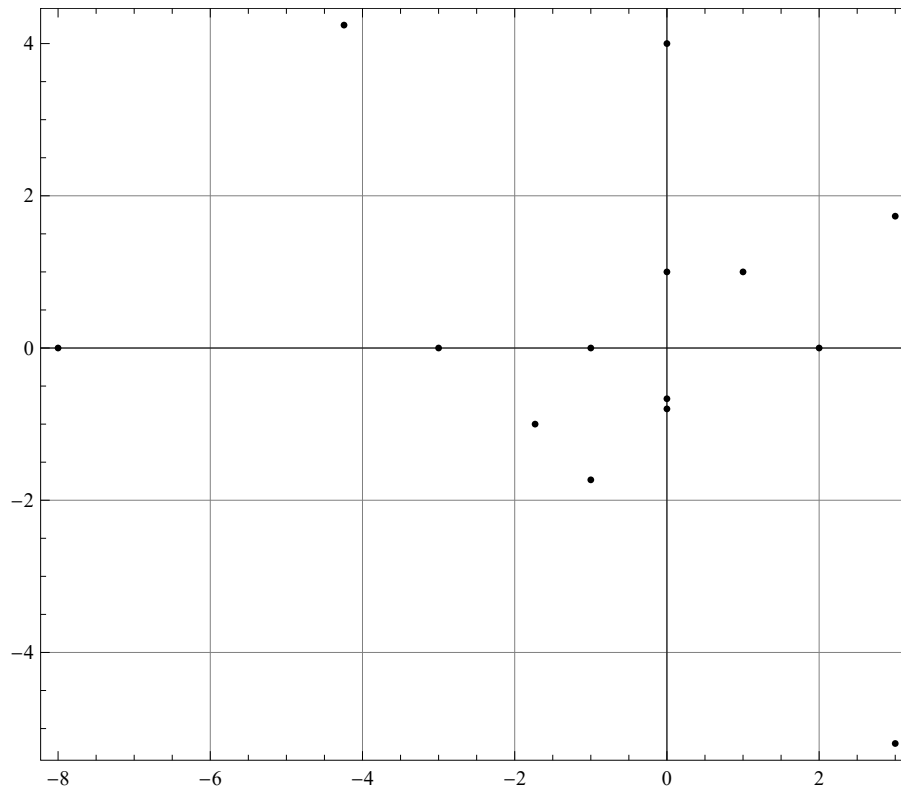
j)  $6e^{-i\frac{\pi}{3}} = 6e^{-i\frac{\pi}{3}}$

k)  $3e^{i\pi} = 3e^{\pi i}$

l)  $6e^{i3\pi/4} = 6e^{i\frac{3\pi}{4}}$

m)  $\frac{2}{3} \cdot e^{i3\pi/2} = \frac{2}{3}e^{-i\frac{\pi}{2}}$

n)  $8e^{-\pi i} = 8e^{\pi i}$



### 15.3.3 Die Grundrechenarten in der Polardarstellung

#### Beispiel 15.18 Polardarstellung

2FG7T1

Führen Sie die Multiplikation aus und vereinfachen Sie so weit wie möglich.

a)  $z_1 \cdot z_2 = 2 \cdot e^{i\frac{7\pi}{5}} \cdot 7 \cdot e^{i\frac{3\pi}{5}}$

e)  $z_1 \cdot z_2 = e^i \cdot e^{i3}$

b)  $z_1 \cdot z_2 = e^{i\frac{3\pi}{5}} \cdot e^{i\frac{9\pi}{10}}$

f)  $z_1 \cdot z_2 = e^{-i\frac{21\pi}{40}} \cdot e^{-i\frac{9\pi}{40}}$

c)  $z_1 \cdot z_2 = 10 \cdot e^{i\frac{\pi}{4}} \cdot 5 \cdot e^{i\frac{3\pi}{4}}$

g)  $(z)^3 = \left(2 \cdot e^{i\frac{2\pi}{3}}\right)^3$

d)  $z_1 \cdot z_2 = e^{-i\frac{\pi}{6}} \cdot e^{i\frac{2\pi}{3}}$

h)  $(z)^5 = \left(3 \cdot e^{i\frac{\pi}{5}}\right)^5$

Führen Sie die Divisionen aus und vereinfachen Sie so weit wie möglich.

$$\text{i) } z_1/z_2 = \frac{36 \cdot e^{i5\pi}}{6 \cdot e^{i3\pi}}$$

$$\text{j) } z_1/z_2 = \frac{56 \cdot e^{i\frac{15\pi}{4}}}{8 \cdot e^{i\frac{9\pi}{4}}}$$

$$\text{k) } z_1/z_2 = \frac{24 \cdot e^{i\frac{\pi}{4}}}{48 \cdot e^{i\frac{3\pi}{4}}}$$

$$\text{l) } z_1/z_2 = \frac{63 \cdot e^{i\frac{5\pi}{2}}}{-7 \cdot e^{i\frac{3\pi}{2}}}$$

$$\text{m) } z_1/z_2 = \frac{-42 \cdot e^{i4}}{6 \cdot e^i}$$

$$\text{n) } z_1/z_2 = \frac{-21 \cdot e^{i\frac{5\pi}{8}}}{-3 \cdot e^{i\frac{11\pi}{8}}}$$

$$\text{o) } z_1 \cdot (z_2)^{-1} = 24 \cdot e^{i\frac{3\pi}{4}} \cdot \left(16 \cdot e^{i\frac{5\pi}{4}}\right)^{-1}$$

$$\text{p) } (z_1)^{-1} = \left(30 \cdot e^{i\frac{9\pi}{8}}\right)^{-1}$$

**Lösung:**

$$\text{a) } z_1 \cdot z_2 = 21 \cdot e^{i\frac{10\pi}{5}} = 14$$

$$\text{b) } z_1 \cdot z_2 = e^{i\frac{3\pi}{2}} = -i$$

$$\text{c) } z_1 \cdot z_2 = 50 \cdot e^{i\pi} = -50$$

$$\text{d) } z_1 \cdot z_2 = e^{i\frac{\pi}{2}} = i$$

$$\text{e) } z_1 \cdot z_2 = e^{4i}$$

$$\text{f) } z_1 \cdot z_2 = e^{-i\frac{3\pi}{4}}$$

$$\text{g) } (z)^3 = 8 \cdot e^{i2\pi} = 8$$

$$\text{h) } (z)^5 = 243 \cdot e^{i\pi} = -243$$

$$\text{i) } z_1/z_2 = 6 \cdot e^{i2\pi} = 6$$

$$\text{j) } z_1/z_2 = 7 \cdot e^{i\frac{6\pi}{4}} = -7i$$

$$\text{k) } z_1/z_2 = \frac{1}{2} \cdot e^{-i\frac{2\pi}{4}} = -i/2$$

$$\text{l) } z_1/z_2 = -i \cdot e^{i\frac{2\pi}{2}} = 9$$

$$\text{m) } z_1/z_2 = -7 \cdot e^{i3}$$

$$\text{n) } z_1/z_2 = 7e^{-i\frac{6\pi}{8}} = 7e^{-i\frac{3\pi}{4}}$$

$$\text{o) } z_1 \cdot (z_2)^{-1} = \frac{3}{2} \cdot e^{-i\frac{2\pi}{4}} = -\frac{3i}{2}$$

$$\text{p) } (z_1)^{-1} = \frac{1}{30} \cdot e^{-i\frac{9\pi}{8}}$$

### Beispiel 15.19 Grundrechenoperationen, Verallgemeinerung

5WJR7Y

Betrachten Sie die Beispiele oben. Versuchen Sie jetzt zu verallgemeinern

- Wie werden komplexe Zahlen in der Polardarstellung multipliziert?
- Wie werden komplexe Zahlen in der Polardarstellung dividiert?
- Wie berechnet man die  $n$ -te Potenz einer komplexe Zahl in der Polardarstellung?
- Wie berechnet man die  $n$ -te Wurzel einer komplexe Zahl in der Polardarstellung?
- Wir haben am Anfang des Kapitels besprochen, dass  $\mathbb{R}$  in  $\mathbb{C}$  eingebettet werden soll. Welche Gesetze aus  $\mathbb{R}$  haben wir auf  $\mathbb{C}$  übertragen?

**Lösung:**

a-d siehe Infobox 15.7



a) Für  $n \in \mathbb{N}$ ,  $a, b, c \in \mathbb{R}$  gilt

$$\begin{aligned} (a^b)^c &= a^{b \cdot c} \\ \sqrt[n]{a} &= a^{\frac{1}{n}} \\ a^{-b} &= \frac{1}{a^b} \end{aligned}$$

### Infobox Rechenoperationen Polardarstellung

- i) Multiplikation: Beträge multiplizieren, Argumente addieren.
- ii) Division: Beträge dividieren, Argumente subtrahieren.
- iii)  $n$ -te Potenz von  $z$ :  $(r \cdot e^{i\varphi})^n = r^n \cdot e^{i\varphi \cdot n}$
- iv)  $n$ -te Wurzel von  $z$ :  $\sqrt[n]{r \cdot e^{i\varphi}} = (r \cdot e^{i\varphi})^{1/n} = r^{1/n} \cdot e^{i\varphi/n}$  (1. Lösung von  $n$  Lösungen)

### Beispiel 15.20 Polarform

9G8NBZ

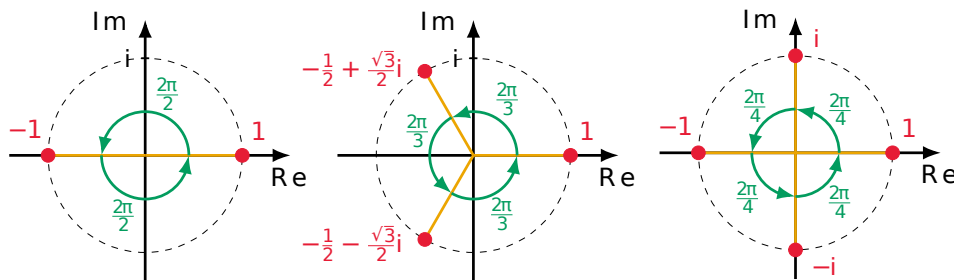
Geben Sie für  $-z$ ,  $\bar{z}$  und  $z^{-1}$  in der Polarform an (ohne Taschenrechner). Wie können Sie ihr Resultat überprüfen?

- a)  $z_1 = e^{i\frac{\pi}{3}}$
- b)  $z_2 = \frac{1}{3} \cdot e^{-i\frac{5\pi}{6}}$
- c)  $z_3 = 8 \cdot e^{-i\frac{5\pi}{9}}$

**Lösung:**

- a)  $-z = -e^{i\frac{\pi}{3}}$ ,  $\bar{z} = e^{-i\frac{\pi}{3}} = z^{-1}$
- b)  $-z = -\frac{1}{3} \cdot e^{-i\frac{5\pi}{6}}$ ,  $\bar{z} = \frac{1}{3} \cdot e^{i\frac{5\pi}{6}}$ ,  $z^{-1} = 3 \cdot e^{i\frac{5\pi}{6}}$
- c)  $-z = -8 \cdot e^{-i\frac{5\pi}{9}}$ ,  $\bar{z} = 8 \cdot e^{i\frac{5\pi}{9}}$ ,  $z^{-1} = \frac{1}{8} \cdot e^{i\frac{5\pi}{9}}$

## 15.4 Potenzen und Wurzeln



### Infobox Lösung (Wurzeln von komplexen Zahlen)

Die Gleichung

$$z^n = r \cdot e^{i\varphi}$$

mit  $r > 0$ ,  $\varphi \in \mathbb{R}$  hat die Lösungen

$$z_k = \sqrt[n]{r} \cdot e^{i\frac{\varphi+2k\pi}{n}}$$

wobei  $n \in \mathbb{N}$  und  $k = 0, 1, 2, \dots, n-1$ . Es sind  $n$  Lösungen.

### Beispiel 15.21 Potenzen und Wurzeln

JN82T5

- Berechnen Sie  $u = e^{i(\frac{2\pi}{3}+2\pi)}$  und  $v = e^{i(\frac{2\pi}{3}+4\pi)}$
- Geben Sie  $w^0, w^1, w^2, w^3, w^4, w^5, w^6$  an für  $w = e^{i\frac{2\pi}{3}}$ . Was beobachten Sie?
- Können Sie auch  $w^7, w^8$  angeben?
- Was folgt daraus für die Lösung von  $z^3 = 1$ ?
- Berechnen Sie  $(-1)^3$  und  $(e^{i\frac{\pi}{3}})^3$
- Was folgt daraus für die Lösung von  $z^3 = -1$ ?
- Wie berechnen Sie die Lösungen der Gleichungen  $z^6 = -1$  und  $z^4 = -1$ ?
- Wie können Sie Lösungen der folgenden Gleichungen bestimmen:  $z^6 = -125$ ,  $z^6 = -64$  und  $z^4 = 81$ .

**Lösung:**

a) Potenzen

$$\begin{array}{cccccccccc} w^0 & w & w^2 & w^3 & w^4 & w^5 & w^6 & w^7 & w^8 \\ \hline 1 & e^{-i\frac{\pi}{3}} & e^{-i\frac{2\pi}{3}} & -1 & e^{i\frac{2\pi}{3}} & e^{i\frac{\pi}{3}} & 1 & e^{-i\frac{\pi}{3}} & e^{-i\frac{2\pi}{3}} \end{array}$$

- Da  $w^6 = 1$ , gilt  $w^7 = w^6 \cdot w^1 = w^1$  und  $w^8 = w^6 \cdot w^2 = w^2$
- $u = v = w = e^{i\frac{5\pi}{3}}$ . Eine Drehung um  $2\pi$  auf dem Einheitskreis verändert den Wert nicht.
- Wir erhalten stets  $-1$
- $w = e^{i\frac{5\pi}{3}}$ ,  $-1$  und  $e^{i\frac{\pi}{3}}$  sind Lösungen von  $\sqrt[3]{-1}$ .
- Für  $a = \sqrt[6]{-1}$ :

$$a = e^{i\frac{\pi+k\cdot 2\pi}{6}} = \left\{ e^{i\frac{\pi}{6}}, e^{i\frac{\pi}{2}}, e^{i\frac{5\pi}{6}}, e^{i\frac{7\pi}{6}}, e^{i\frac{3\pi}{2}}, e^{i\frac{11\pi}{6}} \right\}$$

mit  $k = 0, \dots, 5$ .

Für  $\sqrt[4]{-1}$ :

$$b = e^{i\frac{\pi+k\cdot 2\pi}{4}} = \left\{ e^{i\frac{\pi}{4}}, e^{i\frac{3\pi}{4}}, e^{i\frac{5\pi}{4}}, e^{i\frac{7\pi}{4}} \right\}$$

g) Wie berücksichtigen jetzt noch den Betrag der Zahlen unter der Wurzel Für  $\sqrt[3]{-125}$ :

$$c = 5 \cdot e^{i\frac{\pi+k\cdot 2\pi}{3}} = \left\{ 5 \cdot e^{i\frac{\pi}{3}}, 5 \cdot e^{i\pi}, 5 \cdot e^{i\frac{5\pi}{3}} \right\}$$

mit  $k = 0, \dots, 2$ .

Für  $\sqrt[6]{-64}$ :

$$d = 2 \cdot e^{i\frac{\pi+k\cdot 2\pi}{6}} = \left\{ 2 \cdot e^{i\frac{\pi}{6}}, 2 \cdot e^{i\frac{\pi}{2}}, 2 \cdot e^{i\frac{5\pi}{6}}, 2 \cdot e^{i\frac{7\pi}{6}}, 2 \cdot e^{i\frac{3\pi}{2}}, 2 \cdot e^{i\frac{11\pi}{6}} \right\}$$

mit  $k = 0, \dots, 5$ .

Für  $\sqrt[4]{81}$ :

$$f = 3 \cdot e^{i\frac{0+k\cdot 2\pi}{6}} = \left\{ 3 \cdot 1, 3 \cdot e^{i\frac{\pi}{2}}, 3 \cdot e^{i\pi}, 3 \cdot e^{i\frac{3\pi}{2}} \right\} = \{3, 3i, -3, -3i\}$$

mit  $k = 0, \dots, 3$ .

### Beispiel 15.22 Wurzeln

HCH7NG

Berechnen Sie alle  $z \in \mathbb{C}$ , die die Gleichungen erfüllen

a)  $z^5 = -1$

b)  $z^8 = 256$

c)  $z^3 = 125i$

d)  $z^3 = 1000 \cdot e^{i\frac{\pi}{4}}$

**Lösung:**

a)  $\sqrt[5]{z} = -1$

$$a = 1 \cdot e^{i\frac{\pi+k\cdot 2\pi}{5}}$$

mit  $k = 0, \dots, 4$ .

b)  $\sqrt[8]{z} = 256$

$$b = 2 \cdot e^{i\frac{0+k\cdot 2\pi}{8}}$$

mit  $k = 0, \dots, 7$ .

c)  $\sqrt[3]{z} = 125i$

$$c = 5 \cdot e^{i\frac{\frac{\pi}{2}+k\cdot 2\pi}{3}}$$

mit  $k = 0, \dots, 2$ .

d)  $\sqrt[5]{z} = 1000 \cdot e^{i\frac{\pi}{4}}$

$$d = 10 \cdot e^{i\frac{\frac{\pi}{4} + k \cdot 2\pi}{3}}$$

mit  $k = 0, \dots, 2$ .

## 15.5 Gleichung $n$ -ten Grades, Fundamentalsatz der Algebra

### Beispiel 15.23 Gleichung $n$ -ten Grades

SAIP6W

a) Wenden Sie auf die Gleichung  $13 - 6x + x^2 = 0$  die Mitternachtsformel an.

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

Was beobachten Sie?

b) Berechnen Sie die dritte Potenz von  $i$ ,  $e^{i\frac{7\pi}{6}}$  und von  $e^{i\frac{11\pi}{6}}$

c) Lösen Sie nun die Gleichung  $z^3 = -i$ .

d) Wie viele Lösungen finden Sie bei der Berechnung der Wurzel? Was vermuten Sie aufgrund dieser Resultate?

**Lösung:**

a) Mitternachtsformel

$$x_{1;2} = 3 \pm 2i$$

Wir beobachten, dass es zwei Lösungen gibt *obwohl die Diskriminante negativ ist*.

b) Die dritten Potenzen ergeben alle  $-i$ .

c) Deshalb hat die Gleichung  $z^3 = -i$  die Lösungen  $i$ ,  $e^{i\frac{7\pi}{6}}$  und  $e^{i\frac{11\pi}{6}}$

d) Für die Gleichung 2. Grades finden wir 2 Lösungen, für die Gleichung 3. Grades finden wir 3 Lösungen. Wir vermuten:  
Für die Gleichung  $n$ -ten Grades gibt es  $n$  Lösungen.

### Beispiel 15.24 Quadratische Gleichungen

1TGWY4

Lösen Sie die folgenden quadratischen Gleichungen in  $\mathbb{C}$ .

a)  $z^2 + 6z + 9 = 0$

b)  $2z^2 + 9z - 5 = 0$



Aus  $2 = z^3$  ergeben sich die Lösungen

$$z_1 = \sqrt[3]{2}, z_2 = \sqrt[3]{2}e^{\frac{2\pi i}{3}}, z_3 = \sqrt[3]{2}e^{\frac{4\pi i}{3}}$$

und aus  $-4 = z^3$

$$z_4 = 2^{2/3}e^{\frac{\pi i}{3}}, z_5 = 2^{2/3}e^{\pi i}, z_6 = 2^{2/3}e^{\frac{5\pi i}{3}}$$

b)  $z^8 + 12z^4 - 64 = 0$  Wir substituieren  $p = z^4$  und erhalten

$$p^2 + 12p - 64 = 0 \Rightarrow p_1 = 4, p_2 = -16$$

Aus  $4 = z^4$  ergeben sich die Lösungen

$$z_1 = \sqrt{2}, z_2 = \sqrt{2}e^{\frac{\pi i}{2}}, z_3 = \sqrt{2}e^{\pi i}, z_4 = \sqrt{2}e^{\frac{3\pi i}{2}}$$

und aus  $-16 = z^4$

$$z_5 = 2e^{\frac{\pi i}{4}}, z_6 = 2e^{\frac{3\pi i}{4}}, z_7 = 2e^{\frac{5\pi i}{4}}, z_8 = 2e^{\frac{7\pi i}{4}}$$

### Infobox Komplex konjugierte Nullstellen

Solange ein Polynom reelle Koeffizienten hat, treten komplexe Nullstellen immer komplex konjugiert auf, d.h. falls  $z$  eine Nullstelle ist ist auch  $\bar{z}$  eine Nullstelle.

### Beispiel 15.26 Nullstellen

DJUTAZ

Berechnen Sie alle Nullstellen.

- a)  $P(z) = z^2 - 2z + 5$   
b)  $P(z) = (z^2 - 2)(z - 3)(3z + 2)$   
c)  $P(z) = (z^2 - 4)(z^2 + 1)$   
d)  $P(z) = z^4 - z^3 + z^2 + 9z - 10$ , Tipp:  $z_1 = 1 - 2i$ .

**Lösung:**

- a)  $z_{1,2} = \frac{2 \pm \sqrt{4-20}}{2} = 1 \pm i2$   
b) Wir betrachten jeden Faktor separat  $(z - 3) = 0 \Rightarrow z_1 = 3$ ,  $(3z + 2) = 0 \Rightarrow z_2 = -\frac{2}{3}$  und  
 $(z^2 - 2) = 0 \Rightarrow z_{3,4} = \pm 2$   
c) Wir betrachten jeden Faktor separat  $(z^2 - 4) = 0 \Rightarrow z_{1,2} = \pm 2$ ,  $(z^2 + 1) = 0 \Rightarrow z_{3,4} = \pm i$

- d) Wir verwenden den Tipp und die Infobox 15.9:  $z_2 = 1 + 2i$ . Wir erhalten damit schon

$$(z - (1 - 2i)) \cdot (z - (1 + 2i)) = z^2 - 2z + 5 =: Q(z)$$

Es fehlt uns ein zweiter Faktor  $R(z)$  für den gelten würde  $(z^2 - 2z + 5) \cdot R(z) = P(z)$ . Da  $Q(z)$  von Ordnung 2 ist und  $P(z)$  von Ordnung 4, sollte  $R(z)$  von Ordnung 2 sein. Ausserdem ist der Koeffizient der höchsten Potenz sowohl in  $Q(z)$  wie auch in  $P(z)$  1, deshalb machen wir den Ansatz  $R(z) = z^2 + b \cdot z + c$ . So erhalten wir

$$(z^2 - 2z + 5) \cdot R(z) = z^4 + z^3 \cdot (b - 2) + z^2 \cdot (c - 2b + 5) + z^1 \cdot (5b - 2c) + (5c)$$

Der Koeffizientenvergleich mit  $P(z)$  ergibt  $5c = -10 \Rightarrow c = -2$  und  $b - 2 = -1 \Rightarrow b = 1$ . Also

$$R(z) = z^2 + 1 \cdot z - 2$$

mit den Nullstellen  $z_3 = -2$  und  $z_4 = 1$ .

## 15.6 Zerlegen in Real- und Imaginärteil

### Beispiel 15.27 Real- und Imaginärteil bei Brüchen

QP7Y08

Berechnen Sie Real- und Imaginärteil der komplexen Zahlen (evtl. auch Betrag und Argument).

a)  $z = \frac{7+24j}{3+4j}$

e)  $z = \frac{e^{-j}}{5-12j}$

b)  $z = \frac{33+56j}{5-12j}$

f)  $z = \frac{e^{4+2j}}{-3+4j}$

c)  $z = \frac{36-77j}{-3+4j}$

g)  $z = \frac{e^{-2-j}}{5-12j}$

d)  $z = \frac{e^{2i}}{3+4j}$

h)  $z = \frac{e^{4+\frac{\pi}{3}j}}{-3+4j}$

**Lösung:**

a)  $\operatorname{Re}(z) = \frac{117}{25}$ ,  $\operatorname{Im}(z) = \frac{44}{25}$   
ausserdem  $\varphi = 0.359707$ ,  $|z| = 5$

b)  $\operatorname{Re}(z) = -3$ ,  $\operatorname{Im}(z) = 4$   
ausserdem  $\varphi = 2.2143$ ,  $|z| = 5$

c)  $\operatorname{Re}(z) = -\frac{416}{25}$ ,  $\operatorname{Im}(z) = \frac{87}{25}$   
ausserdem  $\varphi = 2.93543$ ,  $|z| = 17$

d)  $\operatorname{Re}(z) = \frac{3 \cos(2)}{25} + \frac{4 \sin(2)}{25}$ ,  $\operatorname{Im}(z) = -\frac{4 \cos(2)}{25} + \frac{3 \sin(2)}{25}$   
ausserdem  $\varphi = 1.0727$ ,  $|z| = 0.2$

e)  $\operatorname{Re}(z) = \frac{5 \cos(1)}{169} + \frac{12 \sin(1)}{169}$ ,  $\operatorname{Im}(z) = \frac{12 \cos(1)}{169} - \frac{5 \sin(1)}{169}$   
 ausserdem  $\varphi = 0.176005$ ,  $|z| = 0.0769231$

f)  $\operatorname{Re}(z) = -\frac{3}{25}e^4 \cos(2) + \frac{4}{25}e^4 \sin(2)$ ,  $\operatorname{Im}(z) = -\frac{4}{25}e^4 \cos(2) - \frac{3}{25}e^4 \sin(2)$   
 ausserdem  $\varphi = -0.214297$ ,  $|z| = 10.9196$

g)  $\operatorname{Re}(z) = \frac{5 \cos(1)}{169e^2} + \frac{12 \sin(1)}{169e^2}$ ,  $\operatorname{Im}(z) = \frac{12 \cos(1)}{169e^2} - \frac{5 \sin(1)}{169e^2}$   
 ausserdem  $\varphi = 0.176005$ ,  $|z| = 0.0104104$

h)  $\operatorname{Re}(z) = -\frac{3e^4}{50} + \frac{2\sqrt{3}e^4}{25}$ ,  $\operatorname{Im}(z) = -\frac{2e^4}{25} - \frac{3\sqrt{3}e^4}{50}$   
 ausserdem  $\varphi = -1.1671$ ,  $|z| = 10.9196$

## 15.7 Harmonischen Schwingungen

### Beispiel 15.28 Überlagerung von zwei harmonischen Schwingungen

a) Gehen Sie die Schritte unten durch. Was wird jeweils gemacht?

b) Versuchen Sie das Vorgehen zu verallgemeinern.

- Überlagerung von  $f_1(t) = 3 \sin(\omega t)$  und  $f_2(t) = 5 \cos(\omega t + \frac{\pi}{6})$ , d.h.

$$f_1(t) = 3 \cos(\omega t - \pi/2) \text{ und } f_2(t) = 5 \cos(\omega t + \frac{\pi}{6})$$

- Wir schreiben

$$\underline{f_1(t)} = 3e^{i(\omega t - \pi/2)} \text{ und } \underline{f_2(t)} = 5e^{i(\omega t + \frac{\pi}{6})}$$

- Addition

$$\underline{f_T(t)} = \underline{f_1(t)} + \underline{f_2(t)} = 3e^{i(\omega t - \pi/2)} + 5e^{i(\omega t + \frac{\pi}{6})} = (3e^{-i\pi/2} + 5e^{i\frac{\pi}{6}}) \cdot e^{i\omega t}$$

- Wir berechnen zunächst

$$(3e^{-i\pi/2} + 5e^{i\frac{\pi}{6}}) = -i/2 + (5\sqrt{3})/2$$

und damit

$$f_T(t) = \operatorname{Re}(\underline{f_T(t)}) = \operatorname{Re}\left((-i/2 + (5\sqrt{3})/2) \cdot (\cos(\omega t) + i \sin(\omega t))\right)$$

Wir erhalten

$$f_T(t) = \frac{5\sqrt{3}}{2} \cos(\omega t) + \frac{1}{2} \sin(\omega t)$$

**Lösung:**

Vorgehen und Verallgemeinerung in der Infobox



### Infobox Überlagerung gleichfrequenter harmonischer Schwingungen

- Darstellung der Schwingungen mit Hilfe der  $\cos$ -Funktion. Benutze

$$\sin(\omega t + \varphi) = \cos\left(\omega t + \varphi - \frac{\pi}{2}\right)$$

- Übergang von der reellen Form zur komplexen Form, d.h. die Einzelschwingungen  $f_i(t)$  werden in komplexer Form dargestellt, d.h.

$$\cos(\omega t + \varphi) \rightarrow e^{i(\omega t + \varphi)}$$

- Addition der komplexen Amplituden ( $e^{i(\omega t + \varphi)}$  kann ausgeklammert werden)
- Rücktransformation aus der komplexen Form in die reelle Form, d.h. Realteil berechnen.

### Beispiel 15.29 Überlagerung harmonischer Wellen

GDIMWT

Schreiben Sie die Superposition in der Form  $f_T(t) = A \cdot \cos(\omega t) + B \cdot \sin(\omega t)$  mit  $A, B \in \mathbb{R}$ .

- Überlagerung von  $f_1(t) = 2 \cdot \cos(\omega t)$  und  $f_2(t) = 3 \cdot \cos(\omega t)$
- Überlagerung von  $f_1(t) = 6 \cdot \sin(\omega t)$  und  $f_2(t) = 3 \cdot \sin(\omega t)$
- Überlagerung von  $f_1(t) = 5 \cdot \sin(\omega t)$  und  $f_2(t) = 3 \cdot \cos(\omega t)$
- Überlagerung von  $f_1(t) = 7 \cdot \cos(\omega t + \frac{\pi}{10})$  und  $f_2(t) = 6 \cdot \cos(\omega t + \frac{4\pi}{5})$
- Überlagerung von  $f_1(t) = 2 \cdot \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$  und  $f_2(t) = 7 \cdot \cos(\omega t + \frac{9\pi}{7})$
- Überlagerung von  $f_1(t) = 7 \cdot \sin(\omega t - \pi)$  und  $f_2(t) = 3 \cdot \cos(\omega t + \frac{5\pi}{8})$
- Überlagerung von  $f_1(t) = 2 \cdot \sin(\omega t - \frac{2}{3} + \frac{\pi}{2})$  und  $f_2(t) = 7 \cdot \cos(\omega t + 1)$
- Überlagerung von  $f_1(t) = 8 \cdot \cos(\omega t + \frac{3}{8})$  und  $f_2(t) = 8 \cdot \cos(\omega t + \frac{3}{7})$

#### Lösung:

- $f_T(t) = 5 \cdot \cos(\omega t)$
- $f_T(t) = 9 \cdot \sin(\omega t)$
- $f_T(t) = 3 \cdot \cos(\omega t) + 5 \cdot \sin(\omega t)$
- $f_T(t) = 1.80329 \cos(\omega t) - 5.68983 \cdot \sin(\omega t)$
- $f_T(t) = -4.36443 \cdot \cos(\omega t) + 3.47282 \cdot \sin(\omega t)$
- $f_T(t) = -1.14805 \cdot \cos(\omega t) - 9.77164 \cdot \sin(\omega t)$

**g)**  $f_T(t) = 5.35389 \cdot \cos(\omega t) - 4.65356 \cdot \sin(\omega t)$

**h)**  $f_T(t) = 14.7205 \cdot \cos(\omega t) - 6.25476 \cdot \sin(\omega t)$

---

Witz zu den Naturwissenschaften und zur Mathematik

---

- 10 Personen (inklusive Fahrer) fahren mit dem Bus. Der Bus hält an und 11 Leute steigen aus. Drei Wissenschaftler werden zu diesem Vorgang befragt.  
Der Physiker: "Das ist okay, 10% Abweichung sind noch in der Toleranz."  
Der Biologe: "Ganz klar, die haben sich unterwegs vermehrt."  
Der Mathematiker: "Wenn jetzt noch einer einsteigt, dann ist der Bus leer!"
- Warum verwechseln Mathematiker (und Informatiker) Weihnachten und Halloween?  
Weil Oct 31 = Dec 25<sup>1</sup>
- Warum können Piraten keinen Kreis berechnen?  
Weil sie  $\pi$ -raten!
- Was macht ein Mathematiker im Garten?  
Wurzeln ziehen.
- Ein Mathematiker, ein Physiker und ein Philosoph stehen auf dem Dach eines brennenden Hochhauses. Die einzige Rettung ist es, 40 Stockwerke herunterzuspringen. Glücklicherweise ist unten ein drei Mal drei Meter grosser Pool.  
Der Philosoph sagt: "Das Leben ist eh eine Illusion", springt, landet fünf Meter neben dem Pool und ist sofort tot.  
Der Physiker zückt seinen Taschenrechner, entwickelt eine komplizierte Formel unter Berücksichtigung der Windgeschwindigkeit, der Erddrehung usw., springt, landet im Pool und überlebt.  
Der Mathematiker zückt seinen Taschenrechner, entwickelt eine komplizierte Formel unter Einbeziehung aller möglicher Variablen, springt und fliegt senkrecht nach oben, bis er in den Wolken verschwindet! Was ist passiert?  
Ganz einfach: Vorzeichenfehler!
- Was macht ein Mathematiker auf der Toilette?  
 $\pi \pi$

---

<sup>1</sup>Hier wird im Dezimal- und im Oktal-System gerechnet.

- 
- Der kürzeste Mathe-Witz: Sei  $\epsilon < 0$ .<sup>2</sup>
  - Was ist der Unterschied zwischen einem Etymologen und einem Entomologen? Der Etymologe weiss den Unterschied.<sup>3</sup>
  - Ein Neutron will in einen Club. Der Türsteher: "Sorry, heute nur für geladene Gäste".
  - Treffen sich zwei Parallelen.<sup>4</sup>
  - Steht ein deprimierter Mann auf einer Brücke und überlegt sich zu springen. Kommt ein Physiker und sagt ihm, er würde das nicht tun. Als der Mann nach dem Grund fragt, antwortet der Physiker: "Sie haben so viel Potential!"
  - Zwei Mathematiker streiten sich im Restaurant, ob Mathematik jedem Menschen natürlich gegeben sei, oder ob man dafür ein Studium brauche. Der erste muss kurz auf die Toilette, da winkt der zweite die Kellnerin zu sich und sagt ihr, er werde sie nachher zu sich rufen und eine Frage stellen, die Antwort sei dann ' $x^3/3$ '.  
Als der erste zurück ist, sagt der zweite, er werde ihm beweisen, dass jeder Mensch Mathematik von Natur aus beherrsche, und ruft die Kellnerin zu sich. "Was ist das Integral von  $x^2$ ?" — " $x^3/3$ ", und beim weggehen dreht sie sich nochmals um: "plus  $C$ ".

---

<sup>2</sup>In der Analysis wird  $\epsilon$  immer für eine kleine und *positive* Zahl verwendet.

<sup>3</sup>Die Entomologie beschäftigt sich mit der Erforschung der Insekten, die Etymologie mit der Herkunft und Geschichte von Wörtern und ihren Bedeutungen. Der Etymologe sollte also über die unterschiedlichen Bedeutungen Bescheid wissen.

<sup>4</sup>In der Geometrie sind Parallelen so definiert, dass sie sich nicht schneiden, d.h. nicht treffen.