

WESTFÄLISCHE HOCHSCHULE

INFORMATIK

SLA

Stochastik und Lineare Algebra
Übungsaufgaben

L^AT_EX

Author(s):

Eric Seidel, Malte Gaelings,
Paul Sandow, Mikel
Lautsch, Mario Zinta

Supervisor(s):

Prof. Dr. Frau Anderle

June 7, 2025

Copyright © 2025 Westfälische hochschule

This document, including appendices, is property of Westfälische hochschule and is confidential, privileged and only for use of the intended addressees and may not be used, published or redistributed without the prior written consent of Westfälische hochschule.

Einleitung

Die vorliegende Aufgabensammlung wurde von Frau Prof. Dr. Anderle dankenswerterweise zur Verfügung gestellt. Sie dient der Vertiefung und Anwendung der Inhalte der Vorlesung *Stochastik und Lineare Algebra*.

Die Aufgaben decken alle für die Klausur 2025 relevanten Themen ab und sollen Ihnen die Möglichkeit geben, Ihr Verständnis zu festigen und sich gezielt auf die Prüfung vorzubereiten.

Obwohl die Aufgaben mit Sorgfalt ausgewählt und aufbereitet wurden, kann **für die vollständige Richtigkeit und Fehlerfreiheit keine Gewähr übernommen werden**. Wir empfehlen, die Lösungswege kritisch zu reflektieren und bei Unklarheiten Rücksprache zu halten.

Diese Aufgabensammlung dient als Hilfestellung. Sie sollten versuchen, die Aufgaben selbstständig und nur mit den erlaubten Hilfsmitteln zu bearbeiten und erst nach deren Bearbeitung Ihren eigenen Lösungsweg mit den hier vorliegenden Lösungsvorschlägen zu überprüfen.

Diese Aufgabensammlung enthält auch Lösungen zu den Bonustests. Da diese Tests teilweise viele Variationen aufweisen, ist es wahrscheinlich, dass Ihre konkreten Zahlenwerte und Ihr Ergebnis von den hier dargestellten abweichen werden. Beachten Sie des Weiteren, dass auch die Reihenfolge der Bonustests variieren kann. Achten Sie deswegen bitte auf den Titel des jeweiligen Tests, um die korrekte Lösung zuzuordnen.

Die hier vorgestellten Rechenwege sind der Verständlichkeit halber bewusst sehr detailliert gehalten. In der Prüfung sollten Sie aus zeitlichen Gründen eine kompaktere Darstellung wählen. Es empfiehlt sich, Ihren Professor oder Ihre Professorin mit einer Ihrer Beispielrechnungen zu konsultieren. So können Sie sicherstellen, dass Ihre Notation korrekt ist, keine wesentlichen Schritte fehlen und Ihre Ausführungen den Anforderungen entsprechen, ohne unnötig ausführlich zu sein.

Haben Sie des Weiteren keine Bedenken, einen anderen Lösungsweg zu verfolgen. Die hier aufgezeigten Lösungswege sind lediglich Vorschläge und sind keineswegs die einzig korrekten Wege.

Wir wünschen Ihnen viel Erfolg bei der Bearbeitung und eine gute Klausurvorbereitung!

Contents

I Semesterzusammenfassung	1
1 Vektoren	2
1.1 Definition eines Vektors	2
1.2 Parallelität	3
2 Vektorraum	4
2.1 Definition	4
3 Lineare Abbildungen	6
3.1 Was ist überhaupt eine lineare Abbildung? (Der einfache Fall)	6
3.2 Lineare Abbildungen zwischen zwei Vektorräumen	6
3.2.1 Homogenität ("Skalierungstreue")	7
3.2.2 Additivität ("Summentreue")	7
4 Linearkombinationen	9
4.1 Beispiel	9
5 Gauß-Jordan Verfahren	11
5.1 Grundlagen des Gauß-Jordan-Verfahrens	11
5.1.1 Was ist das Ziel?	11
5.1.2 Erlaubte Umformungen: Elementare Zeilenumformungen	11
5.2 Die Schritte des Verfahrens	11
5.2.1 Phase 1: Vorwärtselimination (Zeilenumformungen erreichen)	12
5.2.2 Phase 2: Rückwärtselimination (Reduzierte Zeilenumformungen erreichen)	12
5.3 Beispiel: Lösen eines Linearen Gleichungssystems (LGS) . . .	12
6 Lineare Unabhängigkeit	14
6.1 Zwei Vektoren	14
6.2 Beliebige viele Vektoren	15
7 Basis von Vektorräumen	17
7.1 Bedingungen für eine Basis im \mathbb{R}^n	17
7.2 Beispiel: Überprüfung einer Basis im \mathbb{R}^3	18
8 Spannraum, Dimension und Kern von Untervektorräumen	20
8.1 Untervektorraum	20

8.2	Spannraum	20
8.3	Dimension	21
8.4	Kern	22
8.4.1	Dimensionssatz	22
8.5	Injektive lineare Abbildungen	23
8.6	Surjektive lineare Abbildungen	23
8.7	Bijektive lineare Abbildungen	23
8.8	Orthogonale Projektion	24
8.9	Orthogonale und Spezielle Orthogonale Gruppen	24
8.9.1	Die Orthogonale Gruppe $O(n)$	24
8.9.2	Die Spezielle Orthogonale Gruppe $SO(n)$	24
8.9.3	Der Quotient $O(n)/SO(n)$	25
9	Skalar- und Kreuzprodukt	26
9.1	Skalarprodukt	26
9.2	Kreuzprodukt	26
9.2.1	Berechnungsschema	27
10	Matrizen	29
10.1	Matrix-Vektor-Produkt	29
10.2	Diagonalmatrix	30
10.2.1	Einheitsmatrix	30
10.3	Drehmatrizen	30
10.3.1	Drehung um mehrere Achsen	31
10.4	Spiegelungen	32
10.4.1	Anmerkung zur Spiegelung an der x-Achse	32
10.5	Spiegelungen im 3-dimensionalen Raum	32
10.5.1	Berechnung von Spiegelungsmatrizen (Householder-Transformation)	32
10.5.2	Beispiel	33
11	Determinante	34
11.1	Determinante einer 2×2 Matrix	34
11.2	Determinanten von nicht 2×2 Matrizen	34
11.2.1	Regel von Sarrus	34
11.2.2	Leibniz-Formel (nicht prüfungsrelevant)	35
11.2.3	Kästchenregel	36
11.3	Transponiertheit	38
12	Matritzen Multiplizieren	39
13	Matrizen Invertieren	40
13.1	Beispiel	40
13.2	Umkehrabbildung	41
13.2.1	Beispiel zur Umkehrabbildung	42
14	Definitheit	43
14.1	Bestimmung über Eigenwerte	43
14.1.1	Beispiel	43
14.2	Hurwitz-Kriterium	43
14.2.1	Beispiel	44

15 Eigenwerte und Eigenvektoren	45
15.1 Eigenwerte Berechnen	45
15.2 Eigenvektoren Berechnen	45
16 Arithmetisches Mittel, Median und Moduls	46
16.1 Arithmetisches Mittel	46
16.1.1 Beispiel	46
16.2 Median	46
16.2.1 Beispiel	46
16.3 Modus	46
II Bonusteste	47
17 Bonustest 1 - Rechnen mit Vektoren	48
17.1 Frage 1	48
17.2 Frage 2	48
17.3 Frage 3	49
17.3.1 a	49
17.3.2 b	50
17.4 Frage 4	52
17.5 Frage 5	53
17.5.1 a	53
17.5.2 b	54
17.6 Frage 6	54
17.6.1 a	54
17.6.2 b	55
17.7 Frage 7	56
17.7.1 a	57
17.7.2 b	57
17.7.3 c	58
17.7.4 d	58
17.8 Frage 8	58
17.8.1 a	59
17.8.2 b	59
18 Bonustest 2 - Skalarprodukt, Kreuzprodukt, lineare Gleichungssystem, Matzitzen und lineare Abbildungen	61
18.1 Frage 1	61
18.2 Frage 2	63
18.3 Frage 3	64
18.4 Frage 4	65
18.5 Frage 5	65
18.6 Frage 6	67
18.7 Frage 7	68
III Übungsaufgaben Lineare Algebra	69
19 Übungsblatt 5	70

19.1	Aufgabe 1	70
19.1.1	a	70
19.1.2	b	70
19.2	Aufgabe 2	70
19.2.1	a	71
19.2.2	b	72
19.3	Aufgabe 3	73
20	Übungsblatt 6	75
20.1	Aufgabe 1	75
20.1.1	a	75
20.1.2	b)	75
20.1.3	c)	76
20.2	Aufgabe 2	77
20.2.1	a)	77
20.2.2	b)	78
20.3	Aufgabe 3	87
21	Übungsblatt 7	89
21.1	Aufgabe 1	89
21.1.1	a	89
21.1.2	b	89
21.1.3	c	89
21.2	Aufgabe 2	90
21.2.1	a	90
21.2.2	b	91
21.2.3	c	91
21.2.4	d	92
21.3	Aufgabe 3	95
21.3.1	a	95
21.3.2	b	95
21.4	Aufgabe 4	96
21.4.1	a	96
21.4.2	b	96
22	Übungsblatt 8	98
22.1	Aufgabe 1	98
22.1.1	a	98
22.1.2	b	98
22.1.3	c	99
22.2	Aufgabe 2	100
22.2.1	a	100
22.2.2	b	101
22.2.3	c	102
22.3	Aufgabe 3	102
22.3.1	a	102
22.3.2	b	103
23	Übungsblatt 9	104

23.1	Aufgabe 1	104
23.1.1	a	104
23.1.2	b	105
23.2	Aufgabe 2 - nicht klausurrelevant?	105
23.2.1	a	105
23.2.2	b	106
23.3	Aufgabe 3	106
23.3.1	a	106
23.3.2	b	106
23.3.3	c	108
24	Übungsblatt 10	109
24.1	Aufgabe 1	109
24.1.1	a	109
24.1.2	b	110
24.1.3	c	111
24.1.4	d	112
24.2	Aufgabe 2	112
24.2.1	a	112
24.2.2	b	113
24.3	Aufgabe 3	113
24.3.1	a	113
24.3.2	b	114
25	Übungsblatt 11	115
25.1	Aufgabe 1	115
25.1.1	a	115
25.1.2	b	119
25.1.3	c	122
25.1.4	d	123
IV	Übungsaufgaben Stochastik	125
26	Übungsblatt 5	126
26.1	Aufgabe 1	126
26.1.1	a	126
26.1.2	b	126
26.2	Aufgabe 2	126
26.3	Aufgabe 3	126
26.3.1	a	126
26.3.2	b	126
26.3.3	c	126
27	Übungsblatt 6	127
27.1	Aufgabe 1	127
27.1.1	a	127
27.1.2	b	127
27.2	Aufgabe 2	127

27.2.1	a	127
27.2.2	b	127
27.2.3	c	127
28	Übungsblatt 7	128
28.1	Aufgabe 1	128
28.2	Aufgabe 2	128

Part I

Semesterzusammenfassung

1. Vektoren

1.1 Definition eines Vektors

Sollen nicht nur einzelne Zahlen festgehalten werden, sondern mehrere Zahlen, die in einer bestimmten Reihenfolge zusammengehören, kommen Vektoren ins Spiel.

Ein **Vektor** im \mathbb{R}^n ist formal betrachtet ein Element des mathematischen Raumes \mathbb{R}^n . Das bedeutet, ein Vektor ist ein geordnetes n-Tupel reeller Zahlen. Ein solcher Vektor wird oft als Spalte geschrieben:

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix}$$

wobei v_1, v_2, \dots, v_n reelle Zahlen sind, die sogenannten **Komponenten** oder **Koordinaten** des Vektors. Die Zahl n gibt die **Dimension** des Vektors an.

- Für $n=2$ liegen Vektoren in der Ebene (\mathbb{R}^2) vor, z.B. $\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}$.
- Für $n=3$ liegen Vektoren im Raum (\mathbb{R}^3) vor, z.B. $\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}$.
- Für $n > 3$ wird von höherdimensionalen Räumen gesprochen, die schwerer vorstellbar, aber mathematisch ebenso bedeutsam sind.

Vektoren werden normalerweise mit einem Pfeil gekennzeichnet \vec{v} , jedoch wird der Einfachheit halber oft darauf verzichtet.

Ein Vektor (zumindest in \mathbb{R}^2 und \mathbb{R}^3) kann als ein **Pfeil** interpretiert werden, der von einem Punkt zu einem anderen zeigt. Dieser Pfeil hat eine bestimmte **Länge** (Betrag) und eine bestimmte **Richtung**. Wichtig ist, dass Vektoren oft als "frei" betrachtet werden, d.h., ein Pfeil repräsentiert denselben Vektor, egal wo sein Anfangspunkt im Raum liegt, solange Länge und Richtung gleich bleiben. Häufig wird der Pfeil im Ursprung des Koordinatensystems begonnen; dann zeigen seine Koordinaten direkt auf den Endpunkt des Pfeils.

Mit Vektoren können zwei grundlegende Rechenoperationen durchgeführt werden:

1. **Vektoraddition:** Zwei Vektoren derselben Dimension n können addiert werden, indem ihre entsprechenden Komponenten addiert werden.

den. Wenn $\vec{u} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{pmatrix}$ und $v = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix}$, dann ist ihre Summe:

$$u + v = \begin{pmatrix} u_1 + v_1 \\ u_2 + v_2 \\ \vdots \\ u_n + v_n \end{pmatrix}$$

Geometrisch entspricht die Addition von Vektoren dem Aneinanderhängen der Pfeile (Parallelogrammregel oder Spitze-an-Schaft-Regel).

2. **Skalare Multiplikation:** Ein Vektor kann mit einer reellen Zahl (einem sogenannten **Skalar**) multipliziert werden. Dabei wird jede Komponente des Vektors mit diesem Skalar multipliziert. Wenn $c \in \mathbb{R}$

ein Skalar ist und $\vec{v} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix}$ ein Vektor, dann ist das Produkt:

$$c \cdot \vec{v} = \begin{pmatrix} c \cdot v_1 \\ c \cdot v_2 \\ \vdots \\ c \cdot v_n \end{pmatrix}$$

Geometrisch bewirkt die skalare Multiplikation eine Streckung oder Stauchung des Vektors. Wenn der Skalar negativ ist, kehrt sich zusätzlich die Richtung des Vektors um.

Diese beiden Operationen sind fundamental und bilden die Grundlage für die Struktur eines **Vektorraums**, ein zentrales Konzept in der linearen Algebra. Ein Vektor ist also nicht nur ein Tupel von Zahlen, sondern ein Objekt, das sich auf definierte Weise mit anderen Vektoren (Addition) und Skalaren (skalare Multiplikation) kombinieren lässt.

1.2 Parallelität

Zwei Vektoren sind Parallel zueinander, falls ein Vektor ein vielfaches eines anderen ist. Um zu prüfen, ob zwei Vektoren \vec{a}, \vec{b} parallel zueinander sind, können einfach die einzelnen Einträge dividiert werden. Wenn alle Ergebnisse gleich sind, sind die Vektoren Parallel.

2. Vektorraum

2.1 Definition

Ein Vektorraum über einem Körper \mathbb{K} (Hier inden Vorlesungen immer \mathbb{R}) ist eine Menge V , deren Elemente Vektoren genannt werden, zusammen mit zwei Operationen:

- der Vektoraddition $+: V \times V \rightarrow V$, $(v, w) \mapsto v + w$,
- der Skalarmultiplikation $\cdot: \mathbb{K} \times V \rightarrow V$, $(s, v) \mapsto s \cdot v$.

Damit $(V, +, \cdot)$ als Vektorraum über \mathbb{K} bezeichnet werden kann, müssen die folgenden Axiome für alle Vektoren $u, v, w \in V$ und alle Skalare $s, t \in \mathbb{K}$ erfüllt sein:

Axiome der Vektoraddition (d.h. $(V, +)$ ist eine abelsche Gruppe):

- $v + w = w + v$ (Kommutativgesetz der Addition)
- $u + (v + w) = (u + v) + w$ (Assoziativgesetz der Addition)
- Es existiert ein Nullelement $\vec{0} \in V$, sodass für alle $v \in V$ gilt: $\vec{0} + v = v$ (Existenz des neutralen Elements der Addition)
- Zu jedem $v \in V$ existiert ein inverses Element $-v \in V$, sodass gilt: $v + (-v) = \vec{0}$ (Existenz des inversen Elements der Addition)

Axiome der Skalarmultiplikation (und Kompatibilität mit der Vektoraddition):

- $s \cdot (v + w) = s \cdot v + s \cdot w$ (Distributivgesetz bezüglich der Vektoraddition)
- $(s + t) \cdot v = s \cdot v + t \cdot v$ (Distributivgesetz bezüglich der Skalaraddition)
- $(s \cdot t) \cdot v = s \cdot (t \cdot v)$ (Assoziativgesetz der Skalarmultiplikation)
- $1 \cdot v = v$, wobei 1 das Einselement des Körpers \mathbb{K} ist (Neutralität des Einselements des Körpers)

Erläuterung Die Vektorraumaxiome stellen sicher, dass die Addition von Vektoren und die Multiplikation von Vektoren mit Skalaren sich in einer Weise verhalten, die konsistent und "vernünftig" ist. Die ersten vier Axiome definieren die Eigenschaften der Vektoraddition (die Vektoren bilden eine abelsche Gruppe), während die übrigen Axiome die Wechselwirkung mit der Skalarmultiplikation regeln. Obwohl die Liste der Axiome zunächst umfangreich erscheinen mag, fassen sie im Kern zusammen, dass sich das

Rechnen mit Vektoren und Skalaren in vielerlei Hinsicht analog zum Rechnen mit "normalen" Zahlen (wie den reellen Zahlen \mathbb{R}) und deren bekannten Rechengesetzen verhält. Es sind also genau die Eigenschaften, die man intuitiv von Operationen erwarten würde, die man "Addition" und "skalare Multiplikation" nennt.

3. Lineare Abbildungen

Lineare Abbildungen sind ein fundamentales Konzept in der Mathematik, besonders in der linearen Algebra. Sie beschreiben auf eine sehr spezielle Weise, wie ein Vektor (oder eine Zahl) in einen anderen transformiert wird.

3.1 Was ist überhaupt eine lineare Abbildung? (Der einfache Fall)

Eine Lineare Abbildung ist eine Abbildung mit Konstanten Anteil 0.

Das bedeutet, wenn man sich den Graphen der Funktion vorstellt, muss er **immer durch den Ursprung gehen** (also durch den Punkt $(0,0)$).

Beispiele:

- $f(x) = 3x$
 - Hier wird jede Zahl x einfach mit 3 multipliziert.
 - Wenn $x = 0$ eingesetzt wird, kommt $f(0) = 3 \cdot 0 = 0$ raus. Der konstante Anteil ist 0.
 - Grafisch ist das eine Gerade, die durch den Ursprung geht.
 - **Das ist eine lineare Abbildung.**
- $f(x) = 3x + 3$
 - Hier wird x mit 3 multipliziert, und dann wird noch 3 addiert.
 - Wenn $x = 0$ eingesetzt wird, kommt $f(0) = 3 \cdot 0 + 3 = 3$ raus.
 - Dieser "+3"-Teil ist der "konstante Anteil", der eben nicht Null ist.
 - Grafisch ist das eine Gerade, die die y-Achse bei 3 schneidet, nicht im Ursprung.
 - **Das ist KEINE lineare Abbildung.**

3.2 Lineare Abbildungen zwischen zwei Vektorräumen

Nun wird es etwas allgemeiner. Man stelle sich vor, man hat nicht nur einzelne Zahlen, sondern ganze Räume voller Vektoren. Eine lineare Abbildung kann nun Vektoren aus einem Vektorraum in Vektoren eines anderen

Vektorraums überführen. Damit das "linear" im Sinne der linearen Algebra ist, müssen zwei ganz wichtige Eigenschaften erfüllt sein: **Additivität** und **Homogenität**.

3.2.1 Homogenität ("Skalierungstreue")

Die Homogenität besagt:

$$f(\lambda \cdot v) = \lambda \cdot f(v)$$

Bedeutung:

- λ (Lambda) ist ein Skalar.
- v ist ein Vektor.
- $\lambda \cdot v$ bedeutet: Man nimmt den Vektor v und streckt oder staucht ihn um den Faktor λ .
- $f(v)$ ist das Ergebnis, wenn die Abbildung f auf den Vektor v angewendet wird.

Die Regel besagt: Es ist egal, ob ein Vektor **zuerst skaliert** und **dann die Abbildung angewendet wird**, ODER ob **zuerst die Abbildung auf den Vektor angewendet wird** und **das Ergebnis dann skaliert wird**. Es muss dasselbe Ergebnis resultieren.

Beispiel $f(x) = 3x$ (hier ist x ein eindimensionaler Vektor):

Sei $\lambda = 2$ und der "Vektor" $x = 2$.

- **Linke Seite der Gleichung:** $f(\lambda \cdot x)$
 1. Zuerst skalieren: $\lambda \cdot x = 2 \cdot 2 = 4$.
 2. Dann f anwenden: $f(4) = 3 \cdot 4 = 12$.
- **Rechte Seite der Gleichung:** $\lambda \cdot f(x)$
 1. Zuerst f anwenden: $f(x) = f(2) = 3 \cdot 2 = 6$.
 2. Dann das Ergebnis skalieren: $\lambda \cdot f(2) = 2 \cdot 6 = 12$.

Es gilt $12 = 12$. Die Homogenität ist erfüllt.

Der Ausdruck $f(4) = 3 \cdot 4 = 2 \cdot f(2) = f(2 \cdot 2)$ zeigt genau das:

- $f(2 \cdot 2)$ ist die linke Seite (erst skalieren, dann abbilden).
- $2 \cdot f(2)$ ist die rechte Seite (erst abbilden, dann skalieren).

3.2.2 Additivität ("Summentreue")

Die Additivität besagt:

$$f(v + w) = f(v) + f(w)$$

Bedeutung:

- v und w sind zwei Vektoren (aus demselben Vektorraum).
- $v + w$ ist die Summe der beiden Vektoren.

Die Regel besagt: Es ist egal, ob zwei Vektoren **zuerst addiert** und **dann die Abbildung auf die Summe angewendet wird**, ODER ob **zuerst die Abbildung auf jeden Vektor einzeln angewendet wird** und **dann die Ergebnisse addiert werden**. Es muss dasselbe Ergebnis resultieren.

Beispiel mit $f(x) = 3x$:

Seien $v = 1$ und $w = 5$.

- **Linke Seite der Gleichung:** $f(v + w)$
 1. Zuerst addieren: $v + w = 1 + 5 = 6$.
 2. Dann f anwenden: $f(6) = 3 \cdot 6 = 18$.
- **Rechte Seite der Gleichung:** $f(v) + f(w)$
 1. f auf v anwenden: $f(v) = f(1) = 3 \cdot 1 = 3$.
 2. f auf w anwenden: $f(w) = f(5) = 3 \cdot 5 = 15$.
 3. Die Ergebnisse addieren: $3 + 15 = 18$.

Es gilt $18 = 18$. Die Additivität ist erfüllt.

Zusammenfassend für Vektorräume: Eine Abbildung f zwischen zwei Vektorräumen ist linear, wenn sie

1. **homogen** ist: $f(\lambda \cdot v) = \lambda \cdot f(v)$
2. **additiv** ist: $f(v + w) = f(v) + f(w)$

Diese beiden Bedingungen sind der Kern dessen, was eine lineare Abbildung ausmacht. Sie sorgen dafür, dass die Struktur des Vektorraums durch die Abbildung "respektiert" wird.

Warum ist das wichtig? Lineare Abbildungen sind grundlegend für viele Transformationen und haben Eigenschaften, die in Bereichen wie Computergrafik, Physik und Ingenieurwesen nützlich sind.

4. Linearkombinationen

Eine Linearkombination von Vektoren ist eine Summe dieser Vektoren, wobei jeder Vektor zuvor mit einem Skalar (einer reellen Zahl) multipliziert wird. Das Ergebnis einer solchen Operation ist wiederum ein Vektor.

Ein Vektor \vec{x} wird als Linearkombination der Vektoren $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_n$ bezeichnet, falls Skalare $k_1, k_2, \dots, k_n \in \mathbb{R}$ existieren, sodass gilt:

$$\vec{x} = k_1 \cdot \vec{v}_1 + k_2 \cdot \vec{v}_2 + \dots + k_n \cdot \vec{v}_n$$

Um festzustellen, ob ein gegebener Vektor \vec{x} als Linearkombination anderer Vektoren dargestellt werden kann und um die entsprechenden Skalare k_i zu bestimmen, wird in der Regel ein lineares Gleichungssystem aufgestellt und gelöst.

4.1 Beispiel

Gegeben sind die Vektoren

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \vec{v} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \text{und} \quad \vec{w} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Es soll geprüft werden, ob \vec{w} eine Linearkombination von \vec{u} und \vec{v} ist. Gesucht sind also Skalare $a, b \in \mathbb{R}$, sodass die Gleichung $a \cdot \vec{u} + b \cdot \vec{v} = \vec{w}$ erfüllt ist.

Einsetzen der Vektorkomponenten führt zu:

$$a \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \\ 1 \end{pmatrix} + b \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Daraus ergibt sich das folgende lineare Gleichungssystem:

$$\begin{cases} \text{I:} & a \cdot 2 + b \cdot 0 = 1 \\ \text{II:} & a \cdot 4 + b \cdot 0 = 2 \\ \text{III:} & a \cdot 1 + b \cdot 1 = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{I:} & a \cdot 2 = 1 \quad | : 2 \Leftrightarrow a = \frac{1}{2} \\ \text{II:} & a \cdot 4 = 2 \quad | : 4 \Leftrightarrow a = \frac{1}{2} \\ \text{III:} & a \cdot 1 + b \cdot 1 = 0 \end{cases}$$

Einsetzen von $a = \frac{1}{2}$ in Gleichung III:

$$\begin{cases} \text{I:} & a = \frac{1}{2} \\ \text{II:} & a = \frac{1}{2} \\ \text{III:} & \frac{1}{2} \cdot 1 + b \cdot 1 = 0 \Leftrightarrow \frac{1}{2} + b = 0 \quad | -\frac{1}{2} \Leftrightarrow b = -\frac{1}{2} \end{cases}$$

Die Skalare sind $a = \frac{1}{2}$ und $b = -\frac{1}{2}$. Damit ist die Bedingung erfüllt und der Vektor \vec{w} lässt sich als Linearkombination der Vektoren \vec{u} und \vec{v} darstellen:

$$\vec{w} = \frac{1}{2}\vec{u} - \frac{1}{2}\vec{v}$$

Zur Überprüfung kann das Ergebnis eingesetzt werden:

$$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \\ 1 \end{pmatrix} - \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ \frac{1}{2} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix} = \vec{w}$$

5. Gauß-Jordan Verfahren

5.1 Grundlagen des Gauß-Jordan-Verfahrens

Das Gauß-Jordan-Verfahren ist ein Rechenverfahren (Algorithmus) aus der linearen Algebra. Man nutzt es hauptsächlich, um lineare Gleichungssysteme (LGS) zu lösen oder um die Inverse einer Matrix zu finden. Es ist eine Erweiterung des Gaußschen Eliminationsverfahrens.

5.1.1 Was ist das Ziel?

Das Hauptziel des Gauß-Jordan-Verfahrens ist es, eine Matrix durch bestimmte Umformungen in eine spezielle, sehr einfache Form zu bringen: die **reduzierte Zeilenstufenform**. Aus dieser Form kann man die Lösung eines Gleichungssystems oder die Inverse einer Matrix direkt ablesen. Die Matrix ist in reduzierter Zeilenstufenform, wenn:

- Das erste Element ungleich Null in jeder Zeile (das sogenannte Pivot-Element) eine 1 ist.
- Alle anderen Elemente in der Spalte eines Pivot-Elements Null sind.
- Nullzeilen (falls vorhanden) ganz unten stehen.

5.1.2 Erlaubte Umformungen: Elementare Zeilenumformungen

Um die Matrix umzuformen, sind nur drei Arten von Operationen erlaubt. Diese ändern die Lösungsmenge eines Gleichungssystems nicht:

- **Zeilen vertauschen** ($Z_i \leftrightarrow Z_j$): Zwei komplette Zeilen der Matrix werden miteinander getauscht.
- **Zeile mit Zahl multiplizieren** ($Z_i \rightarrow c \cdot Z_i$): Jedes Element einer Zeile wird mit derselben Zahl c multipliziert. Wichtig: c darf nicht Null sein.
- **Vielfaches einer Zeile zu einer anderen addieren** ($Z_i \rightarrow Z_i + k \cdot Z_j$): Ein Vielfaches einer Zeile wird zu den entsprechenden Elementen einer anderen Zeile addiert (oder subtrahiert).

5.2 Die Schritte des Verfahrens

Das Verfahren läuft in zwei Hauptphasen ab:

5.2.1 Phase 1: Vorwärtselimination (Zeilenstufenform erreichen)

In dieser Phase, ähnlich dem Gaußschen Eliminationsverfahren, erzeugt man Nullen unterhalb der Pivot-Elemente. Ein Pivot-Element ist das erste von links gesehene Element einer Zeile, das nicht Null ist.

1. **Pivot finden:** Man beginnt mit der obersten Zeile. Das erste Element ungleich Null (von links) ist das Pivot-Element dieser Zeile. Wenn dieses Element an der Position (i, j) ist, dann werden alle Elemente unterhalb in der Spalte j zu Null gemacht.
2. **Nullen erzeugen:** Mit Hilfe der Zeile, die das aktuelle Pivot-Element enthält (Pivot-Zeile), werden alle Zahlen direkt unter diesem Pivot zu Null. Dies geschieht, indem man passende Vielfache der Pivot-Zeile von den darunterliegenden Zeilen subtrahiert (oder addiert).
3. **Wiederholen:** Man geht zur nächsten Zeile und zum nächsten Pivot-Element und wiederholt den Vorgang, bis unter allen Pivot-Elementen nur noch Nullen stehen. Das Ergebnis nennt man Zeilenstufenform.

5.2.2 Phase 2: Rückwärtselimination (Reduzierte Zeilenstufenform erreichen)

Nun wird die Zeilenstufenform zur einfacheren reduzierten Zeilenstufenform umgewandelt:

1. **Pivots zu 1 machen:** Man beginnt mit dem untersten Pivot-Element (also in der untersten Zeile, die nicht nur Nullen enthält). Dieses Pivot-Element wird zu 1 gemacht, indem man seine gesamte Zeile durch den Wert des Pivot-Elements teilt. (Dieser Schritt kann auch schon während der Vorwärtselimination für jedes Pivot gemacht werden.)
2. **Nullen oberhalb der Pivots erzeugen:** Mit der Zeile, deren Pivot-Element nun 1 ist, werden alle Zahlen in derselben Spalte direkt *über* diesem Pivot zu Null gemacht. Dazu addiert/subtrahiert man Vielfache dieser Pivot-Zeile von den oberen Zeilen.
3. **Wiederholen:** Diese Schritte (Pivot zu 1 machen, Nullen darüber erzeugen) wiederholt man für die darüberliegenden Pivot-Zeilen, von unten nach oben.

Am Ende dieses Prozesses ist die Matrix in reduzierter Zeilenstufenform.

5.3 Beispiel: Lösen eines Linearen Gleichungssystems (LGS)

Gegeben sei folgendes LGS:

$$x + 2y = 5$$

$$3x - y = 1$$

Wir schreiben dies als erweiterte Matrix $[A|b]$:

$$\left[\begin{array}{cc|c} 1 & 2 & 5 \\ 3 & -1 & 1 \end{array} \right]$$

Phase 1: Vorwärtselimination

1. Das erste Pivot-Element ist die 1 in der ersten Zeile, ersten Spalte ($a_{11} = 1$).
2. Wir wollen die 3 unter diesem Pivot zu Null machen. Dazu rechnen wir: $R_2 \rightarrow R_2 - 3R_1$. Die zweite Zeile wird: $(3 - 3 \cdot 1, -1 - 3 \cdot 2 \mid 1 - 3 \cdot 5) = (0, -7 \mid -14)$. Die Matrix ist jetzt:

$$\left[\begin{array}{cc|c} 1 & 2 & 5 \\ 0 & -7 & -14 \end{array} \right]$$

Die Vorwärtselimination ist für dieses kleine Beispiel schon fertig (Zeilenstufenform erreicht).

Phase 2: Rückwärtselimination

1. Wir beginnen mit dem untersten Pivot, hier die -7 in der zweiten Zeile ($a_{22} = -7$). Wir machen es zu 1 durch $R_2 \rightarrow -\frac{1}{7}R_2$. Die zweite Zeile wird: $(0 \cdot (-\frac{1}{7}), -7 \cdot (-\frac{1}{7}) \mid -14 \cdot (-\frac{1}{7})) = (0, 1 \mid 2)$. Die Matrix ist jetzt:

$$\left[\begin{array}{cc|c} 1 & 2 & 5 \\ 0 & 1 & 2 \end{array} \right]$$

2. Jetzt erzeugen wir eine Null über dem Pivot der zweiten Zeile (also über der $a_{22} = 1$). Das ist die 2 in der ersten Zeile ($a_{12} = 2$). Dazu rechnen wir: $R_1 \rightarrow R_1 - 2R_2$. Die erste Zeile wird: $(1 - 2 \cdot 0, 2 - 2 \cdot 1 \mid 5 - 2 \cdot 2) = (1, 0 \mid 1)$. Die Matrix ist jetzt in reduzierter Zeilenstufenform:

$$\left[\begin{array}{cc|c} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{array} \right]$$

Lösung ablesen: Die Matrix entspricht den Gleichungen:

$$\begin{aligned} 1x + 0y &= 1 &\Rightarrow x &= 1 \\ 0x + 1y &= 2 &\Rightarrow y &= 2 \end{aligned}$$

Die Lösung des LGS ist also $x = 1$ und $y = 2$.

6. Lineare Unabhängigkeit

6.1 Zwei Vektoren

Zwei Vektoren \vec{a} und \vec{b} , die beide nicht der Nullvektor sind, werden als linear **abhängig** bezeichnet, wenn einer ein skalares Vielfaches des anderen ist. Das bedeutet, es existiert eine Zahl (Skalar) $k \in \mathbb{R}$, für die $\vec{a} = k \cdot \vec{b}$ gilt.

Sind die Vektoren nicht linear abhängig, so sind sie linear **unabhängig**. Äquivalent dazu kann die lineare Unabhängigkeit/Abhängigkeit über die Linearkombination zum Nullvektor geprüft werden: Die Vektoren \vec{a} und \vec{b} sind linear **unabhängig**, wenn die Vektorgleichung

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

nur die triviale Lösung $x_1 = 0$ und $x_2 = 0$ besitzt. Gibt es hingegen eine nichttriviale Lösung (bei der x_1 oder x_2 oder beide ungleich Null sind), sind die Vektoren linear **abhängig**.

Beispiel

Gegeben seien die Vektoren

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} 4 \\ 6 \\ 8 \end{pmatrix}.$$

Es wird geprüft, ob ein Skalar k existiert, sodass $\vec{a} = k \cdot \vec{b}$:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} &= k \cdot \begin{pmatrix} 4 \\ 6 \\ 8 \end{pmatrix} \\ \Rightarrow \quad \begin{cases} 2 = k \cdot 4 & \Rightarrow k = \frac{2}{4} = \frac{1}{2} \\ 0 = k \cdot 6 & \Rightarrow k = \frac{0}{6} = 0 \\ 1 = k \cdot 8 & \Rightarrow k = \frac{1}{8} \end{cases} \end{aligned}$$

Da die Werte für k ($\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{8}$) nicht übereinstimmen, existiert kein einheitlicher Skalar k , der alle drei Gleichungen gleichzeitig erfüllt. Somit ist \vec{a} kein skalares Vielfaches von \vec{b} . Die Vektoren \vec{a} und \vec{b} sind daher linear **unabhängig**.

Zur Überprüfung mit dem alternativen Ansatz $x_1\vec{a} + x_2\vec{b} = \vec{0}$:

$$x_1 \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + x_2 \begin{pmatrix} 4 \\ 6 \\ 8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{cases} 2x_1 + 4x_2 = 0 \\ \quad + 6x_2 = 0 \\ x_1 + 8x_2 = 0 \end{cases}$$

Aus der zweiten Gleichung ($6x_2 = 0$) folgt direkt $x_2 = 0$. Setzt man $x_2 = 0$ in die erste Gleichung ein, erhält man $2x_1 + 4 \cdot 0 = 0 \Rightarrow 2x_1 = 0 \Rightarrow x_1 = 0$. Die dritte Gleichung ($x_1 + 8x_2 = 0$) ist mit $x_1 = 0$ und $x_2 = 0$ ebenfalls erfüllt ($0 + 8 \cdot 0 = 0$). Da $x_1 = 0$ und $x_2 = 0$ die einzige Lösung ist (triviale Lösung), sind die Vektoren \vec{a} und \vec{b} linear **unabhängig**.

6.2 Beliebige viele Vektoren

Eine Menge von n Vektoren $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_n$ heißt linear **unabhängig**, wenn die Vektorgleichung

$$x_1\vec{v}_1 + x_2\vec{v}_2 + \dots + x_n\vec{v}_n = \vec{0}$$

ausschließlich die triviale Lösung $x_1 = x_2 = \dots = x_n = 0$ besitzt. Existiert hingegen mindestens eine nichttriviale Lösung (d.h. mindestens ein Koeffizient $x_i \neq 0$), so sind die Vektoren linear **abhängig**.

Beispiel

Es soll geprüft werden, ob die folgenden Vektoren linear unabhängig oder abhängig sind:

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

Dazu wird der Ansatz $x_1\vec{a} + x_2\vec{b} + x_3\vec{c} = \vec{0}$ verfolgt. Dies führt zu dem homogenen linearen Gleichungssystem:

$$\begin{aligned} 1x_1 - 2x_2 + 4x_3 &= 0 \\ 2x_1 + 1x_2 + 3x_3 &= 0 \\ 1x_1 + 3x_2 - 1x_3 &= 0 \end{aligned}$$

Dieses System wird mithilfe des Gauß-Jordan Verfahrens (Gauß-Jordan-Elimination) gelöst. Betrachtet wird die Koeffizientenmatrix:

Linearkombination		
1	-2	4
2	1	3
1	3	-1
Operation: III - I		
1	-2	4
2	1	3
0	-5	5
Operation: II - 2I		
1	-2	4
0	5	-5
0	-5	5
Operation: III + II		
1	-2	4
0	5	-5
0	0	0
Hier ist jetzt eine Nullzeile entstanden. Das bedeutet nur, dass das Gleichungssystem nicht eindeutig lösbar ist. Diese muss nicht mehr betrachtet werden, da sie als einzige Aussage $0 = 0$ liefert.		
Operation: 5I + 2II		
1	0	10
0	5	-5
Operation: II + 2I		
1	0	10
0	5	0

Aus der reduzierten Zeilenstufenform lassen sich die folgenden Gleichungen ablesen:

$$\text{I: } x_1 + 2x_3 = 0 \quad \Rightarrow \quad x_1 = -2x_3$$

$$\text{II: } x_2 - x_3 = 0 \quad \Rightarrow \quad x_2 = x_3$$

Setzt man $x_3 = t$, wobei $t \in \mathbb{R}$ ein freier Parameter ist, so erhält man die allgemeine Lösung des Gleichungssystems:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2t \\ t \\ t \end{pmatrix} = t \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Da es nichttriviale Lösungen gibt (z.B. für $t = 1$ ergibt sich die Lösung $x_1 = -2, x_2 = 1, x_3 = 1$), sind die Vektoren $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ linear **abhängig**.

Lineare abhängigkeit kann auch über die Determinante geprüft werden. Hierbei sind die Vektoren Linear abhängig, wenn $\det(A) = 0$ ist, wobei A die Matrixkombination aus den Vektoren ist. In dem o.g. Beispiel ist

$$A = \begin{pmatrix} 1 & -2 & 4 \\ 2 & 1 & 3 \\ 1 & 3 & -1 \end{pmatrix}$$

7. Basis von Vektorräumen

Eine Basis eines Vektorraums V ist eine Menge von Vektoren $\mathcal{B} = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, die zwei grundlegende Eigenschaften erfüllen:

- Die Vektoren in \mathcal{B} sind linear unabhängig.
- Die Vektoren in \mathcal{B} spannen den Vektorraum V auf (d.h., jeder Vektor in V lässt sich als Linearkombination der Vektoren in \mathcal{B} darstellen).

Jeder Vektor im Vektorraum V kann eindeutig als Linearkombination der Basisvektoren dargestellt werden. Alle Basen eines gegebenen Vektorraums haben dieselbe Anzahl von Elementen. Diese Anzahl wird als die Dimension des Vektorraums bezeichnet, geschrieben als $\dim(V)$.

Ein Vektorraum besitzt im Allgemeinen unendlich viele verschiedene Basen (sofern der zugrundeliegende Körper, wie z.B. \mathbb{R} , unendlich viele Elemente enthält). Für den häufig betrachteten Vektorraum \mathbb{R}^n bilden die sogenannten Standardeinheitsvektoren e_1, e_2, \dots, e_n eine spezielle Basis, die als Standardbasis oder kanonische Basis bekannt ist. Beispielsweise ist für \mathbb{R}^3 die

Standardbasis gegeben durch $\left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$.

Die Dimension des Vektorraums \mathbb{R}^n ist n . Folglich muss jede Basis des \mathbb{R}^n aus genau n Vektoren bestehen.

- Eine Menge von mehr als n Vektoren im \mathbb{R}^n ist immer linear abhängig und kann daher keine Basis bilden. Beispielsweise können vier Vektoren im \mathbb{R}^3 keine Basis des \mathbb{R}^3 bilden, da sie zwangsläufig linear abhängig sind.
- Eine Menge von weniger als n Vektoren im \mathbb{R}^n kann den Raum \mathbb{R}^n nicht vollständig aufspannen. Beispielsweise können zwei Vektoren im \mathbb{R}^3 höchstens eine Ebene aufspannen, aber nicht den gesamten dreidimensionalen Raum.

7.1 Bedingungen für eine Basis im \mathbb{R}^n

Eine Menge von Vektoren $\{v_1, v_2, \dots, v_k\}$ aus dem Vektorraum \mathbb{R}^n bildet genau dann eine Basis für den \mathbb{R}^n , wenn die folgenden beiden Bedingungen erfüllt sind:

1. Die Vektoren v_1, v_2, \dots, v_k sind linear unabhängig.

2. Die Anzahl der Vektoren k ist gleich der Dimension des Raumes, also $k = n$.

Es ist wichtig zu beachten: Wenn bekannt ist, dass $k = n$ (d.h., die Anzahl der Vektoren entspricht der Dimension des Raumes \mathbb{R}^n), dann ist die Bedingung der linearen Unabhängigkeit bereits ausreichend. Alternativ ist auch die Bedingung, dass die n Vektoren den Raum \mathbb{R}^n aufspannen, ausreichend. In der Praxis wird oft die lineare Unabhängigkeit von n Vektoren überprüft.

7.2 Beispiel: Überprüfung einer Basis im \mathbb{R}^3

Um zu prüfen, ob die Vektoren $\left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$ eine Basis des \mathbb{R}^3

bilden, müssen diese auf lineare Unabhängigkeit geprüft werden. Da es sich um drei Vektoren im \mathbb{R}^3 handelt, ist die Anzahl der Vektoren gleich der Dimension des Raumes ($n = 3$). Somit genügt es, die lineare Unabhängigkeit nachzuweisen.

Dazu wird das homogene lineare Gleichungssystem $c_1 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} + c_2 \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} + c_3 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ betrachtet. Dies führt auf die Koeffizientenmatrix:

Linearkombination / Gauß-Algorithmus			
1	3	1	
0	2	1	
2	1	1	
Operation: III - 2I			
1	3	1	
0	2	1	
0	-5	-1	
Operation: 2III + 5II			
1	3	1	
0	2	1	
0	0	3	
Operation: 2I - 3II			
1	0	-1	
0	2	1	
0	0	3	
Operation: I + $\frac{1}{3}$ III			
1	0	0	
0	2	1	
0	0	3	
Operation: II - $\frac{1}{3}$ III			

Fortsetzung siehe nächste Seite

Table 7.1 – <i>Fortführung von vorheriger Seite</i>		
Linearkombination / Gauß-Algorithmus		
1	0	0
0	2	0
0	0	3
Operation: II : 2		
Operation: III : 3		
1	0	0
0	1	0
0	0	1

Da die reduzierte Zeilenstufenform der Koeffizientenmatrix die Einheitsmatrix ist, hat das homogene lineare Gleichungssystem nur die triviale Lösung $c_1 = 0, c_2 = 0, c_3 = 0$. Dies bedeutet, dass die Vektoren linear unabhängig sind. Weil es sich um drei linear unabhängige Vektoren im dreidimensionalen Raum \mathbb{R}^3 handelt (Anzahl der Vektoren = Dimension des Raumes), bilden sie eine Basis des \mathbb{R}^3 .

8. Spannraum, Dimension und Kern von Untervektorräumen

8.1 Untervektorraum

Ganz einfach gesagt ist ein Untervektorraum ein Teil eines größeren Vektorraums, der selbst alle Eigenschaften eines Vektorraums erfüllt. Betrachtet man den \mathbb{R}^3 (den normalen 3D-Raum) als gesamten Raum, so ist ein Untervektorraum ein bestimmter Bereich darin, zum Beispiel:

- Eine Ebene, die genau durch den Ursprung (den Nullpunkt $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$) geht.

Wenn zwei Vektoren in dieser Ebene addiert werden, so liegt das Ergebnis wieder in dieser Ebene. Wenn ein Vektor in dieser Ebene gestreckt oder gestaucht wird, verbleibt man ebenfalls in der Ebene.

- Eine Gerade, die genau durch den Ursprung geht, ist auch ein Untervektorraum.

Wichtig ist: Ein Untervektorraum darf nicht leer sein; er muss mindestens den Nullvektor enthalten (der Ursprung muss Teil davon sein). Eine Ebene, die den Ursprung nicht enthält, ist **kein** Untervektorraum des \mathbb{R}^3 .

Ein Beispiel im \mathbb{R}^3 : Die Menge aller Vektoren der Form $\begin{pmatrix} x \\ y \\ 0 \end{pmatrix}$ (also die xy-Ebene) ist ein Untervektorraum von \mathbb{R}^3 . Die Menge aller Vektoren der Form $\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}$ ist **kein** Untervektorraum, da sie den Nullvektor nicht enthält und die

Addition zweier solcher Vektoren $\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 + x_2 \\ y_1 + y_2 \\ 2 \end{pmatrix}$ nicht wieder in der Menge liegt.

8.2 Spannraum

Der Spannraum (auch lineare Hülle genannt) umfasst alles, was mit einer gegebenen Menge von Vektoren "erreicht" oder "aufgespannt" werden kann,

indem diese beliebig verlängert, verkürzt und addiert werden. Man kann sich das anhand von Vektoren als Pfeile vorstellen:

- Mit einem einzigen Vektor (der nicht der Nullvektor ist), z.B. $\vec{v} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}$, kann eine Gerade aufgespannt werden. Der Spannraum $\text{span}\{\vec{v}\}$ besteht aus allen Vielfachen dieses Vektors (z.B. $2\vec{v}$, $-0.5\vec{v}$, etc.), was eben diese Gerade durch den Ursprung ergibt.
- Mit zwei Vektoren, die in unterschiedliche Richtungen zeigen, z.B. $\vec{a} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ und $\vec{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ im \mathbb{R}^3 , kann eine ganze Ebene aufgespannt werden (hier die xy-Ebene). Der Spannraum ist dann $\text{span}\{\vec{a}, \vec{b}\} = \{\lambda_1 \vec{a} + \lambda_2 \vec{b}\}$.

Der gesamte \mathbb{R}^3 wird zum Beispiel von den drei Einheitsvektoren aufgespannt:

$$\mathbb{R}^3 = \text{span} \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$$

Man sagt, diese Vektoren sind ein Erzeugendensystem für den \mathbb{R}^3 .

Wenn die Vektoren, die den Raum aufspannen, linear unabhängig sind (also keiner der Vektoren durch die anderen ausgedrückt werden kann), dann bilden sie eine Basis für diesen Spannraum. Sind sie linear abhängig, gibt es "überflüssige" Vektoren, die man weglassen könnte, ohne den Spannraum zu verkleinern. Zum Beispiel spannen $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$, $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ und $\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ immer noch die \mathbb{R}^2 -Ebene auf, aber $\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ ist nicht nötig, da er eine Kombination der ersten beiden ist.

8.3 Dimension

Die Dimension eines Vektorraums (oder Untervektorraums) ist einfach die Anzahl der Vektoren, die mindestens benötigt werden, um diesen Raum aufzuspannen. Diese "minimal notwendigen" Vektoren müssen linear unabhängig sein und bilden eine sogenannte Basis.

- Eine Gerade hat die Dimension 1 (es wird ein Vektor benötigt, um sie aufzuspannen).
- Eine Ebene hat die Dimension 2 (es werden zwei linear unabhängige Vektoren benötigt, um sie aufzuspannen).
- Der Raum \mathbb{R}^3 hat die Dimension 3 (es werden drei linear unabhängige Vektoren benötigt, z.B. die Einheitsvektoren).
- Der \mathbb{R}^n hat die Dimension n .
- Ein Punkt (nur der Nullvektor) hat die Dimension 0.

Die Dimension gibt also an, wie viele "Freiheitsgrade" oder "unabhängige Richtungen" es in dem Raum gibt.

8.4 Kern

Der Kern bezieht sich nicht auf einen Vektorraum allein, sondern auf eine lineare Abbildung (oft dargestellt durch eine Matrix A). Ganz einfach gesagt: Der Kern einer Matrix A ist die Menge aller Vektoren \vec{x} , die von der Matrix A auf den Nullvektor $\vec{0}$ abgebildet werden. Also alle \vec{x} , für die gilt: $A\vec{x} = \vec{0}$.

Man kann sich eine Maschine (die Matrix) vorstellen, in die Vektoren hineingegeben werden. Der Kern sind all die Vektoren, die nach der Verarbeitung durch die Maschine "verschwinden" (also zum Nullvektor werden).

Beispiel: Gegeben sei die Matrix $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 4 \end{pmatrix}$. Es werden Vektoren $\vec{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$ gesucht, sodass $A\vec{x} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$.

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 + 2x_2 \\ 2x_1 + 4x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Das führt zu der Gleichung $x_1 + 2x_2 = 0$, also $x_1 = -2x_2$. Alle Vektoren im Kern haben also die Form $\begin{pmatrix} -2x_2 \\ x_2 \end{pmatrix} = x_2 \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \end{pmatrix}$. Der Kern ist also der

Spannraum des Vektors $\begin{pmatrix} -2 \\ 1 \end{pmatrix}$, was einer Geraden im \mathbb{R}^2 entspricht. Alle Vektoren auf dieser Geraden werden von der Matrix A auf den Nullvektor abgebildet.

8.4.1 Dimensionssatz

Für eine lineare Abbildung $f : V \rightarrow W$, die durch eine Matrix $A \in K^{m \times n}$ repräsentiert wird, setzt der Dimensionssatz die Dimension des Definitionsbereichs V in Beziehung zur Dimension des Kerns und des Bildes von f .

$$n = \dim(\text{Kern}(A)) + \text{Rang}(A)$$

Beispiel

Gegeben sei die Matrix $A \in \mathbb{R}^{2 \times 3}$:

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

Der Definitionsraum ist \mathbb{R}^3 , also ist $n = 3$.

- **Kern:** Gesucht sind alle $x \in \mathbb{R}^3$ mit $Ax = 0$. Dies führt zum Gleichungssystem $x_1 - x_3 = 0$ und $x_2 - 2x_3 = 0$. Daraus folgt $x_1 = x_3$ und $x_2 = 2x_3$. Der Kern wird also von Vektoren der Form $(t, 2t, t) = t \cdot (1, 2, 1)$ aufgespannt. Eine Basis des Kerns ist $\{(1, 2, 1)\}$, somit ist $\dim(\text{Kern}(A)) = 1$.

- **Rang:** Die ersten beiden Spaltenvektoren $(1, 0)$ und $(0, 1)$ sind linear unabhängig und spannen \mathbb{R}^2 auf. Der Rang ist also $\text{Rang}(A) = 2$.

Die Dimensionsformel gilt: $3 = 1 + 2$.

8.5 Injektive lineare Abbildungen

Eine lineare Abbildung $f : V \rightarrow W$ ist genau dann injektiv, wenn $\text{Kern}(f) = \{0_V\}$, also $\dim(\text{Kern}(f)) = 0$.

Beispiel

Die Abbildung $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3$ mit $f(x, y) = (x, y, x + y)$ wird durch die Matrix

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$$

dargestellt. Aus $Ax = 0$ folgt $x = 0$ und $y = 0$. Der Kern ist $\text{Kern}(f) = \{(0, 0)\}$, die Abbildung ist injektiv.

8.6 Surjektive lineare Abbildungen

Eine lineare Abbildung $f : V \rightarrow W$ ist surjektiv, wenn $\text{Bild}(f) = W$, also $\dim(\text{Bild}(f)) = \dim(W)$.

Beispiel

Die Abbildung $f : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$ aus dem Beispiel zum Dimensionssatz ist surjektiv, da der Rang der Matrix A gleich 2 ist, was der Dimension des Zielraums \mathbb{R}^2 entspricht. Jeder Vektor in \mathbb{R}^2 kann als Bild eines Vektors aus \mathbb{R}^3 dargestellt werden.

8.7 Bijektive lineare Abbildungen

Eine lineare Abbildung $f : V \rightarrow W$ ist bijektiv, wenn sie injektiv und surjektiv ist. Dies ist nur möglich, wenn $\dim(V) = \dim(W)$.

Beispiel

Die Drehung um 90 Grad in \mathbb{R}^2 wird durch die Matrix

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

beschrieben. Die Determinante ist $\det(A) = 1 \neq 0$, die Matrix ist also invertierbar. Daraus folgt, dass die Abbildung bijektiv ist. Der Kern ist $\{(0, 0)\}$ (injektiv) und der Rang ist 2 (surjektiv).

8.8 Orthogonale Projektion

Die orthogonale Projektion des Vektors b auf den Vektor a .

$$\text{proj}_a(b) = \frac{\langle b, a \rangle}{\|a\|^2} a$$

Beispiel

Seien die Vektoren $b = (2, 3)$ und $a = (4, 0)$ in \mathbb{R}^2 .

- Skalarprodukt: $\langle b, a \rangle = 2 \cdot 4 + 3 \cdot 0 = 8$.
- Norm-Quadrat: $\|a\|^2 = 4^2 + 0^2 = 16$.

Die Projektion ist:

$$\text{proj}_a(b) = \frac{8}{16} \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \end{pmatrix} = 0.5 \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Der Vektor $(2, 0)$ ist der Anteil von b , der in Richtung von a zeigt.

8.9 Orthogonale und Spezielle Orthogonale Gruppen

Orthogonale Matrizen beschreiben Transformationen (Isometrien), die Längen und Winkel erhalten, wie Drehungen und Spiegelungen.

8.9.1 Die Orthogonale Gruppe $O(n)$

Die Menge aller reellen $n \times n$ -Matrizen A , deren Inverse ihre Transponierte ist.

$$O(n) = \{A \in \mathbb{R}^{n \times n} \mid A^T A = I_n\}$$

Für jede Matrix $A \in O(n)$ gilt $\det(A)^2 = 1$, woraus folgt, dass $\det(A) \in \{+1, -1\}$.

8.9.2 Die Spezielle Orthogonale Gruppe $SO(n)$

Dies ist die Untergruppe von $O(n)$, die nur die Matrizen mit Determinante $+1$ enthält.

$$SO(n) = \{A \in O(n) \mid \det(A) = 1\}$$

Matrizen in $SO(n)$ repräsentieren reine Drehungen und erhalten die Orientierung des Raumes. Die Matrix für die 90-Grad-Drehung im obigen Beispiel ist ein Element von $SO(2)$. Eine Spiegelung an der y-Achse in \mathbb{R}^2 wird durch $A = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ dargestellt. Hier ist $\det(A) = -1$, also $A \in O(2)$, aber $A \notin SO(2)$.

8.9.3 Der Quotient $O(n)/SO(n)$

Da $SO(n)$ ein Normalteiler von $O(n)$ ist, kann die Quotientengruppe $O(n)/SO(n)$ gebildet werden. Diese Gruppe beschreibt die "Orientierung".

$$O(n)/SO(n) \cong \mathbb{Z}_2 = \{+1, -1\}$$

Es gibt zwei Elemente (Nebenklassen) in dieser Gruppe:

1. Die Menge aller orientierungserhaltenden Transformationen (Drehungen), was $SO(n)$ selbst ist.
2. Die Menge aller orientierungsumkehrenden Transformationen (Spiegelungen und Drehspiegelungen).

Der Quotient fasst also alle Drehungen zu einem Element und alle Spiegelungen/orientierungsumkehrenden Abbildungen zum anderen Element zusammen.

9. Skalar- und Kreuzprodukt

9.1 Skalarprodukt

Das Skalarprodukt zweier Vektoren \vec{a} und \vec{b} wird in dieser Veranstaltung als $\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle$ notiert. Andere gebräuchliche Schreibweisen sind $\vec{a} \circ \vec{b}$ oder $\vec{a} \cdot \vec{b}$. Eine Grundvoraussetzung für die Berechnung des Skalarprodukts ist, dass die beiden Vektoren dieselbe Anzahl von Komponenten besitzen, also aus demselben Vektorraum \mathbb{R}^n stammen.

Das Skalarprodukt wird berechnet, indem die korrespondierenden Komponenten der beiden Vektoren multipliziert und die resultierenden Produkte summiert werden. Für zwei Vektoren

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \vec{w} = \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix}$$

ist das Skalarprodukt definiert als:

$$\langle \vec{v}, \vec{w} \rangle = v_1 \cdot w_1 + v_2 \cdot w_2 + \cdots + v_n \cdot w_n = \sum_{i=1}^n v_i \cdot w_i$$

9.2 Kreuzprodukt

Das Kreuzprodukt (auch Vektorprodukt genannt) ist eine mathematische Operation, die zwei Vektoren im dreidimensionalen Raum (\mathbb{R}^3) nimmt und einen neuen Vektor erzeugt. Dieser resultierende Vektor $\vec{c} = \vec{a} \times \vec{b}$ steht senkrecht (orthogonal) auf der Ebene, die von den beiden ursprünglichen Vektoren \vec{a} und \vec{b} aufgespannt wird. Die Richtung des Ergebnisvektors wird durch die Rechte-Hand-Regel bestimmt.

Der Betrag (die Länge) des resultierenden Vektors $\|\vec{a} \times \vec{b}\|$ entspricht der Fläche des Parallelogramms, das von den Vektoren \vec{a} und \vec{b} aufgespannt wird.

Für zwei Vektoren $\vec{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix}$ und $\vec{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix}$ im \mathbb{R}^3 berechnet sich das

Kreuzprodukt $\vec{a} \times \vec{b}$ wie folgt:

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

9.2.1 Berechnungsschema

Das Schema zur Berechnung der Komponenten c_1, c_2, c_3 des Kreuzprodukts $\vec{c} = \vec{a} \times \vec{b}$ kann visualisiert werden. Die folgende Grafik zeigt eine Methode, die auf der Regel von Sarrus basiert.

$$\begin{array}{cc} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \\ a_3 & b_3 \\ a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{array} = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_2 b_3 - a_3 b_2 \\ a_3 b_1 - a_1 b_3 \\ a_1 b_2 - a_2 b_1 \end{pmatrix}$$

Figure 9.1: Berechnungsschema des Kreuzprodukts nach der Regel von Sarrus. Die ersten beiden Komponenten jedes Vektors werden unterhalb wiederholt (hier in blau dargestellt).

Erläuterung der Zeichnung zur Kreuzproduktberechnung

Die oben dargestellte Grafik (siehe Abbildung 9.1) veranschaulicht eine Methode zur Berechnung des Kreuzprodukts $\vec{c} = \vec{a} \times \vec{b}$, die oft als Erweiterung der Regel von Sarrus bezeichnet wird. So wird die Zeichnung verwendet:

1. **Komponenten aufschreiben:** Die Komponenten der beiden Vektoren $\vec{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix}$ und $\vec{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix}$ werden nebeneinander notiert.

2. **Komponenten wiederholen:** Die ersten beiden Komponenten jedes Vektors (a_1, a_2 und b_1, b_2) werden unterhalb der ursprünglichen drei Komponenten erneut aufgeschrieben. In der Zeichnung sind diese wiederholten Komponenten zur Verdeutlichung blau markiert.

3. **Produkte bilden und Komponenten berechnen:** Nun werden die Komponenten des Ergebnisvektors $\vec{c} = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix}$ durch diagonale Multiplikation bestimmt:

- **Für c_1 :** Man betrachtet die zweite und dritte Zeile der ursprünglichen Komponenten. Die blau gestrichelte Linie von a_2 nach b_3 zeigt das Produkt $+a_2 b_3$. Die rot gestrichelte Linie von a_3 nach b_2 zeigt das Produkt $-a_3 b_2$. Somit ist $c_1 = a_2 b_3 - a_3 b_2$.
- **Für c_2 :** Man betrachtet die dritte Zeile der ursprünglichen Komponenten (a_3, b_3) und die erste Zeile der wiederholten Komponenten (a_1, b_1 , in blau). Die blau gestrichelte Linie von a_3 (Original) nach b_1 (blau, wiederholt) zeigt das Produkt $+a_3 b_1$. Die

rot gestrichelte Linie von a_1 (blau, wiederholt) nach b_3 (Original) zeigt das Produkt $-a_1b_3$. Somit ist $c_2 = a_3b_1 - a_1b_3$.

- **Für c_3 :** Man betrachtet die erste und zweite Zeile der wiederholten Komponenten (alle blau). Die blau gestrichelte Linie von a_1 (blau, wiederholt) nach b_2 (blau, wiederholt) zeigt das Produkt $+a_1b_2$. Die rot gestrichelte Linie von a_2 (blau, wiederholt) nach b_1 (blau, wiederholt) zeigt das Produkt $-a_2b_1$. Somit ist $c_3 = a_1b_2 - a_2b_1$.
4. **Ergebnisvektor:** Die berechneten Werte c_1, c_2, c_3 bilden die Komponenten des Kreuzproduktvektors, wie auf der rechten Seite der Zeichnung dargestellt.

10. Matrizen

Eine Matrix ist eine rechteckige Anordnung von Zahlen oder anderen mathematischen Objekten, die in Zeilen und Spalten organisiert sind. Die Notation $M \in \mathbb{R}^{m \times n}$ wird hier verwendet, um eine Matrix zu beschreiben, welche n Zeilen (Höhe) und m Spalten (Breite) besitzt. Die einzelnen Elemente der Matrix werden mit a_{ij} bezeichnet, wobei i den Zeilenindex (von 1 bis n) und j den Spaltenindex (von 1 bis m) angibt.

Eine solche Matrix M mit n Zeilen und m Spalten hat die allgemeine Form:

$$M = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{pmatrix}$$

Eine Matrix kann auch als eine Zusammenfassung von Spaltenvektoren (wenn jede Spalte als Vektor betrachtet wird) oder Zeilenvektoren (wenn jede Zeile als Vektor betrachtet wird) angesehen werden.

10.1 Matrix-Vektor-Produkt

Das Produkt einer Matrix $M \in \mathbb{R}^{n \times m}$ (also n Zeilen, m Spalten) mit einem Spaltenvektor $V \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ (also ein Vektor mit m Elementen) ist ein neuer Spaltenvektor $W \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ (also ein Vektor mit n Elementen). Die Multiplikation ist nur definiert, wenn die Anzahl der Spalten der Matrix M gleich der Anzahl der Zeilen (Elemente) des Vektors V ist. Hier müssen also beide die Dimension m aufweisen.

$$\text{Sei } M = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{pmatrix} \text{ und } V = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_m \end{pmatrix}.$$

Das Matrix-Vektor-Produkt MV wird berechnet, indem das Skalarprodukt jeder Zeile der Matrix M mit dem Vektor V gebildet wird:

$$MV = \begin{pmatrix} a_{11}v_1 + a_{12}v_2 + \cdots + a_{1m}v_m \\ a_{21}v_1 + a_{22}v_2 + \cdots + a_{2m}v_m \\ \vdots \\ a_{n1}v_1 + a_{n2}v_2 + \cdots + a_{nm}v_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{j=1}^m a_{1j}v_j \\ \sum_{j=1}^m a_{2j}v_j \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^m a_{nj}v_j \end{pmatrix}$$

Das Ergebnis ist ein Vektor mit n Elementen.

10.2 Diagonalmatrix

Eine Diagonalmatrix ist eine quadratische Matrix, d.h. sie besitzt gleich viele Zeilen wie Spalten ($n = m$). Bei einer Diagonalmatrix sind alle Elemente außerhalb der Hauptdiagonalen (die von links oben nach rechts unten verläuft) gleich Null. Nur die Elemente auf der Hauptdiagonalen können von Null verschieden sein.

Eine Diagonalmatrix $D \in \mathbb{R}^{n \times n}$ hat die Form:

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & d_{22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & d_{nn} \end{pmatrix}$$

Beispiel einer 3×3 Diagonalmatrix (hier ist $n = m = 3$):

$$D = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 7 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$$

Das Matrix-Vektor-Produkt mit einer Diagonalmatrix ist besonders einfach zu berechnen. Jedes Element des Vektors wird mit dem entsprechenden

Diagonalelement der Matrix multipliziert: Sei $V = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix}$. Dann ist

$$DV = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 7 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \cdot v_1 \\ 2 \cdot v_2 \\ 7 \cdot v_3 \end{pmatrix}$$

10.2.1 Einheitsmatrix

Die Einheitsmatrix, oft mit I oder I_n (wobei n die Dimension angibt) bezeichnet, ist eine spezielle Diagonalmatrix. Bei der Einheitsmatrix sind alle Elemente auf der Hauptdiagonalen gleich Eins, und alle anderen Elemente sind Null. Sie ist ebenfalls quadratisch.

Beispiel der 3×3 Einheitsmatrix I_3 :

$$I_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$$

Die Multiplikation einer Matrix oder eines Vektors mit der Einheitsmatrix passender Dimension verändert diese nicht (d.h. $IM = M$ und $Iv = v$). Sie ist das neutrale Element der Matrizenmultiplikation.

10.3 Drehmatrizen

Drehmatrizen sind quadratische Matrizen, die verwendet werden, um Vektoren um einen Ursprung (in 2D) oder eine Achse (in 3D) um einen bestimmten Winkel zu drehen.

Drehmatrix in \mathbb{R}^2

Eine Drehung eines Vektors in der Ebene (\mathbb{R}^2) um den Ursprung um den Winkel α (üblicherweise gegen den Uhrzeigersinn) wird durch die folgende 2×2 -Matrix $R(\alpha)$ beschrieben:

$$R(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix}$$

Wird ein Vektor $v = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ mit dieser Matrix multipliziert, $v' = R(\alpha)v$, so ist v' der um α gedrehte Vektor.

Drehmatrizen in \mathbb{R}^3

Im dreidimensionalen Raum (\mathbb{R}^3) erfolgen Drehungen typischerweise um die Koordinatenachsen (x, y, z) . Die entsprechenden Drehmatrizen sind 3×3 -Matrizen.

Drehung um die x -Achse

Eine Drehung um den Winkel α um die x -Achse wird durch die Matrix $R_x(\alpha)$ repräsentiert:

$$R_x(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix}$$

Drehung um die y -Achse

Eine Drehung um den Winkel α (oder β zur Unterscheidung) um die y -Achse wird durch die Matrix $R_y(\alpha)$ repräsentiert:

$$R_y(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & 0 & \sin(\alpha) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) \end{pmatrix}$$

Drehung um die z -Achse

Eine Drehung um den Winkel α (oder γ) um die z -Achse wird durch die Matrix $R_z(\alpha)$ repräsentiert:

$$R_z(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

10.3.1 Drehung um mehrere Achsen

Wenn ein Vektor in \mathbb{R}^3 nacheinander um mehrere Achsen gedreht werden soll, können die entsprechenden Drehmatrizen miteinander multipliziert werden (siehe Matrizen Multiplizieren). Das Ergebnis dieser Matrizenmultiplikation ist eine einzelne Matrix, die die Gesamttransformation (also die verkettete Drehung) darstellt. Wird beispielsweise zuerst eine Drehung R_1

und danach eine Drehung R_2 auf einen Vektor v angewendet, so ist der transformierte Vektor $v' = R_2(R_1v) = (R_2R_1)v$. Die Gesamttransformationsmatrix ist $R_{ges} = R_2R_1$. Es ist wichtig zu beachten, dass die Matrizenmultiplikation im Allgemeinen nicht kommutativ ist, d.h. die Reihenfolge der Multiplikation (und somit der Drehungen) ist entscheidend ($R_2R_1 \neq R_1R_2$ im Allgemeinen). Die Matrix, die der zuerst auszuführenden Drehung entspricht, steht im Produkt rechts.

10.4 Spiegelungen

Eine Spiegelungsmatrix ist eine orthogonale Matrix, welche Vektoren an einer Hyperebene spiegelt. Im \mathbb{R}^2 ist dies eine Gerade.

Die Matrix

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

spiegelt Vektoren an der Winkelhalbierenden $y = x$. Der Vektor $\begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix}$ wird durch die Multiplikation mit der Matrix A auf den Vektor $\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}$ abgebildet:

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \cdot 2 + 1 \cdot 1 \\ 1 \cdot 2 + 0 \cdot 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}$$

10.4.1 Anmerkung zur Spiegelung an der x-Achse

Die Spiegelung an der x-Achse wird durch die folgende Matrix realisiert:

$$S_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Die Anwendung auf den Vektor $\begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix}$ ergibt:

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

10.5 Spiegelungen im 3-dimensionalen Raum

Im dreidimensionalen Raum erfolgt die Spiegelung eines Vektors an einer Ebene. Eine Spiegelung an einer Achse oder einem Punkt ist ebenfalls möglich, kann aber als eine Kombination von Drehungen und einer Ebenenspiegelung verstanden werden.

10.5.1 Berechnung von Spiegelungsmatrizen (Householder-Transformation)

Eine Spiegelungsmatrix H für die Spiegelung an einer Ebene durch den Ursprung kann mit Hilfe des Normalenvektors \vec{n} dieser Ebene berechnet werden. Der Normalenvektor ist ein Vektor, der senkrecht auf der Ebene steht.

Für die Berechnung wird ein auf die Länge 1 normierter Normalenvektor \vec{v} benötigt.

Sei \vec{v} der normierte Normalenvektor der Ebene, an der gespiegelt werden soll. Die Spiegelungsmatrix H (oft auch als Householder-Matrix bezeichnet) wird wie folgt berechnet:

$$H = I - 2\vec{v}\vec{v}^T$$

Hierbei ist:

- I die 3x3-Einheitsmatrix.
- \vec{v} der normierte Normalenvektor als Spaltenvektor.
- \vec{v}^T der transponierte Normalenvektor (ein Zeilenvektor).
- Das Produkt $\vec{v}\vec{v}^T$ ist das äußere Produkt, das eine 3x3-Matrix ergibt.

10.5.2 Beispiel

Gesucht ist die Spiegelungsmatrix für die Spiegelung an der xy -Ebene.

1. **Normalenvektor bestimmen:** Der Normalenvektor der xy -Ebene ist der z -Vektor, da er senkrecht auf dieser Ebene steht.

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

2. **Normalenvektor normieren:** Der Vektor hat bereits die Länge 1, also ist $\vec{v} = \vec{n}$.

$$\|\vec{n}\| = \sqrt{0^2 + 0^2 + 1^2} = 1$$

Somit ist

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

3. **Äußeres Produkt $\vec{v}\vec{v}^T$ berechnen:**

$$\vec{v}\vec{v}^T = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \cdot 0 & 0 \cdot 0 & 0 \cdot 1 \\ 0 \cdot 0 & 0 \cdot 0 & 0 \cdot 1 \\ 1 \cdot 0 & 1 \cdot 0 & 1 \cdot 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

4. **Spiegelungsmatrix H berechnen:**

$$H = I - 2(\vec{v}\vec{v}^T) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} - 2 \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Diese Matrix spiegelt jeden Vektor $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$ auf $\begin{pmatrix} x \\ y \\ -z \end{pmatrix}$, was der Spiegelung an der xy -Ebene entspricht.

11. Determinante

Die Determinante ist eine spezielle Zahl, die einer quadratischen Matrix zugeordnet wird. Sie liefert wichtige Informationen über die Matrix und die lineare Transformation, die sie repräsentiert. Geometrisch kann die Determinante einer $n \times n$ Matrix als der Skalierungsfaktor des n -dimensionalen Volumens des Parallelepipeds interpretiert werden, das von den Spaltenvektoren (oder Zeilenvektoren) der Matrix aufgespannt wird. Ist die Determinante gleich null, so ist das Volumen null. Dies bedeutet, dass die Vektoren, welche die Matrix bilden, linear abhängig sind und die Transformation den Raum auf eine niedrigere Dimension abbildet (z.B. eine Ebene auf eine Gerade oder einen Punkt). Eine Determinante ist nur für quadratische Matrizen definiert.

11.1 Determinante einer 2×2 Matrix

Um die Determinante einer 2×2 Matrix $A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$ zu berechnen, werden ganz einfach die Diagonalen multipliziert und subtrahiert.

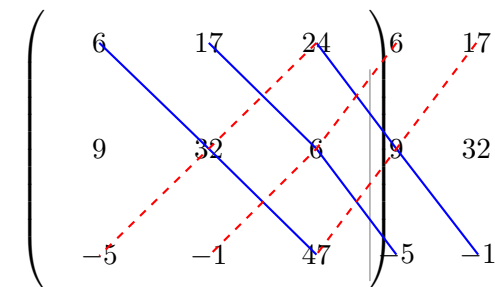
$$\det(A) = a \cdot d - c \cdot b$$

11.2 Determinanten von nicht 2×2 Matrizen

Um die Determinante einer nicht 2×2 Matrix zu berechnen, gibt es im Wesentlichen drei Herangehensweisen:

11.2.1 Regel von Sarrus

Die Regel von Sarrus funktioniert **nur bei 3×3 Matrizen**.



Die Zahlen an den Linien werden multipliziert. Blaue Linien werden miteinander addiert und Rote subtrahiert.

$$\begin{aligned}
& (6 \cdot 32 \cdot 47) + (17 \cdot 6 \cdot (-5)) + (24 \cdot 9 \cdot (-1)) \\
& -((-5) \cdot 32 \cdot 24) - ((-1) \cdot 6 \cdot 6) - (47 \cdot 9 \cdot 17) \\
& = 9024 - 510 - 216 - (-3840) - (-36) - 7191 \\
& = 9024 - 510 - 216 + 3840 + 36 - 7191 \\
& = 4983
\end{aligned}$$

11.2.2 Leibniz-Formel (nicht prüfungsrelevant)

Die Leibniz-Formel ist eine allgemeine Definition der Determinante für eine $n \times n$ -Matrix $A = (a_{ij})$. Die Determinante wird als eine Summe über alle möglichen Permutationen der Spaltenindizes berechnet:

$$\det(A) = \sum_{\sigma \in S_n} \operatorname{sgn}(\sigma) \prod_{i=1}^n a_{i,\sigma(i)}$$

Hierbei ist:

- S_n die Menge aller Permutationen der Zahlen $\{1, 2, \dots, n\}$. Eine Permutation σ ist eine bijektive Abbildung dieser Menge auf sich selbst; $\sigma(i)$ ist das i -te Element in einer Anordnung der Zahlen $1, \dots, n$.
- $\operatorname{sgn}(\sigma)$ das Signum (Vorzeichen) der Permutation σ . Es ist $+1$, wenn die Permutation durch eine gerade Anzahl von Vertauschungen zweier Elemente (Transpositionen) aus der Grundreihenfolge $(1, 2, \dots, n)$ hervorgeht. Es ist -1 , wenn sie durch eine ungerade Anzahl von Vertauschungen hervorgeht. Alternativ kann das Signum über die Anzahl k der Fehlstände (Inversionen) der Permutation berechnet werden als $\operatorname{sgn}(\sigma) = (-1)^k$. Ein Fehlstand ist ein Paar von Indizes (i, j) derart, dass $i < j$ ist, aber $\sigma(i) > \sigma(j)$ gilt.
- $\prod_{i=1}^n a_{i,\sigma(i)}$ das Produkt von n Matrixelementen $a_{1,\sigma(1)} \cdot a_{2,\sigma(2)} \cdot \dots \cdot a_{n,\sigma(n)}$. Dabei wird aus jeder Zeile i genau ein Element ausgewählt, und zwar aus der Spalte $\sigma(i)$, sodass auch aus jeder Spalte genau ein Element stammt.

Für $n = 2$ und $A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}$ ergibt sich: S_2 enthält die Permutationen $\sigma_1 = (1, 2)$ (Identität, $\sigma_1(1) = 1, \sigma_1(2) = 2$) und $\sigma_2 = (2, 1)$ (Vertauschung, $\sigma_2(1) = 2, \sigma_2(2) = 1$).

- $\sigma_1 = (1, 2)$: Anzahl Fehlstände = 0. $\operatorname{sgn}(\sigma_1) = (-1)^0 = +1$. Term: $a_{1\sigma_1(1)}a_{2\sigma_1(2)} = a_{11}a_{22}$.
- $\sigma_2 = (2, 1)$: Ein Fehlstand: $(1, 2)$, da $1 < 2$ aber $\sigma_2(1) = 2 > \sigma_2(2) = 1$. $\operatorname{sgn}(\sigma_2) = (-1)^1 = -1$. Term: $a_{1\sigma_2(1)}a_{2\sigma_2(2)} = a_{12}a_{21}$.

Somit ist $\det(A) = (+1) \cdot a_{11}a_{22} + (-1) \cdot a_{12}a_{21} = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$. Dies entspricht der bekannten Formel für 2×2 -Matrizen.

Beispiel für eine 3×3 -Matrix

Betrachtet sei die Matrix $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & 4 & 5 \\ 1 & 0 & 6 \end{pmatrix}$. Für $n = 3$ gibt es $3! = 6$

Permutationen in S_3 . Die Elemente sind $a_{11} = 1, a_{12} = 2, a_{13} = 3, a_{21} = 0, a_{22} = 4, a_{23} = 5, a_{31} = 1, a_{32} = 0, a_{33} = 6$.

1. $\sigma_1 = (1, 2, 3)$ (d.h. $1 \mapsto 1, 2 \mapsto 2, 3 \mapsto 3$). Fehlstände: 0. $\text{sgn}(\sigma_1) = +1$.
Produkt: $a_{11}a_{22}a_{33} = 1 \cdot 4 \cdot 6 = 24$. Term: $(+1) \cdot 24 = 24$.
2. $\sigma_2 = (1, 3, 2)$ (d.h. $1 \mapsto 1, 2 \mapsto 3, 3 \mapsto 2$). Fehlstand: $(2, 3)$ (weil $2 < 3$, aber $\sigma_2(2) = 3 > \sigma_2(3) = 2$). Anzahl Fehlstände: 1. $\text{sgn}(\sigma_2) = -1$.
Produkt: $a_{11}a_{23}a_{32} = 1 \cdot 5 \cdot 0 = 0$. Term: $(-1) \cdot 0 = 0$.
3. $\sigma_3 = (2, 1, 3)$ (d.h. $1 \mapsto 2, 2 \mapsto 1, 3 \mapsto 3$). Fehlstand: $(1, 2)$ (weil $1 < 2$, aber $\sigma_3(1) = 2 > \sigma_3(2) = 1$). Anzahl Fehlstände: 1. $\text{sgn}(\sigma_3) = -1$.
Produkt: $a_{12}a_{21}a_{33} = 2 \cdot 0 \cdot 6 = 0$. Term: $(-1) \cdot 0 = 0$.
4. $\sigma_4 = (2, 3, 1)$ (d.h. $1 \mapsto 2, 2 \mapsto 3, 3 \mapsto 1$). Fehlstände: $(1, 3)$ (weil $1 < 3, \sigma_4(1) = 2 > \sigma_4(3) = 1$); $(2, 3)$ (weil $2 < 3, \sigma_4(2) = 3 > \sigma_4(3) = 1$). Anzahl Fehlstände: 2. $\text{sgn}(\sigma_4) = +1$.
Produkt: $a_{12}a_{23}a_{31} = 2 \cdot 5 \cdot 1 = 10$. Term: $(+1) \cdot 10 = 10$.
5. $\sigma_5 = (3, 1, 2)$ (d.h. $1 \mapsto 3, 2 \mapsto 1, 3 \mapsto 2$). Fehlstände: $(1, 2)$ (weil $1 < 2, \sigma_5(1) = 3 > \sigma_5(2) = 1$); $(1, 3)$ (weil $1 < 3, \sigma_5(1) = 3 > \sigma_5(3) = 2$). Anzahl Fehlstände: 2. $\text{sgn}(\sigma_5) = +1$.
Produkt: $a_{13}a_{21}a_{32} = 3 \cdot 0 \cdot 0 = 0$. Term: $(+1) \cdot 0 = 0$.
6. $\sigma_6 = (3, 2, 1)$ (d.h. $1 \mapsto 3, 2 \mapsto 2, 3 \mapsto 1$). Fehlstände: $(1, 2)$ (weil $1 < 2, \sigma_6(1) = 3 > \sigma_6(2) = 2$); $(1, 3)$ (weil $1 < 3, \sigma_6(1) = 3 > \sigma_6(3) = 1$); $(2, 3)$ (weil $2 < 3, \sigma_6(2) = 2 > \sigma_6(3) = 1$). Anzahl Fehlstände: 3. $\text{sgn}(\sigma_6) = -1$.
Produkt: $a_{13}a_{22}a_{31} = 3 \cdot 4 \cdot 1 = 12$. Term: $(-1) \cdot 12 = -12$.

Die Determinante ist die Summe dieser Terme:

$$\det(A) = 24 + 0 + 0 + 10 + 0 - 12 = 22$$

Dies ist dasselbe Ergebnis, das man mit der Regel von Sarrus für 3×3 -Matrizen erhalten würde. Die Leibniz-Formel ist jedoch allgemeingültig für Matrizen beliebiger quadratischer Größe, während die Sarrus-Regel nur für 3×3 -Matrizen gilt.

11.2.3 Kästchenregel

Bei der Kästchenregel, auch bekannt als Determinantenformel für Blockmatrizen, kann die Determinante einer Matrix berechnet werden, indem die Matrix in Blöcke (Kästchen) unterteilt wird. Dies ist besonders nützlich, wenn einige der Blöcke Nullmatrizen sind. Für eine Blockmatrix der Form

$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ 0 & D \end{pmatrix} \quad \text{oder} \quad M = \begin{pmatrix} A & 0 \\ C & D \end{pmatrix}$$

wobei A und D quadratische Matrizen sind (und 0 eine Nullmatrix passender Größe ist), ist die Determinante gegeben durch

$$\det(M) = \det(A) \cdot \det(D)$$

Diese Regel vereinfacht die Berechnung erheblich, wenn Matrizen in eine solche obere oder untere Blockdreiecksform gebracht werden können. Die Kästchenregel bietet sich besonders bei $\mathbb{R}^{n \times n}$ Matrizen an, bei denen $n \geq 4$ ist und eine geeignete Blockstruktur vorliegt oder erzeugt werden kann.

Linearkombination
$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 & 0 \\ 1 & 2 & 9 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 5 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$
I und IV tauschen (Vorzeichenwechsel für Determinante: $\cdot(-1)$)
$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 9 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 5 \\ 1 & 0 & 2 & 0 \end{pmatrix}$
II - I \rightarrow II III - 2I \rightarrow III IV - I \rightarrow IV
$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 8 & -1 \\ 0 & -2 & -1 & 3 \\ 0 & -1 & 1 & -1 \end{pmatrix}$
III + 2II \rightarrow III IV + II \rightarrow IV
$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 8 & -1 \\ 0 & 0 & 15 & 1 \\ 0 & 0 & 9 & -2 \end{pmatrix}$

Die im Beispiel umgeformte Matrix (nennen wir sie M') nach Zeilentausch und Umformungen ist:

$$M' = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 8 & -1 \\ 0 & 0 & 15 & 1 \\ 0 & 0 & 9 & -2 \end{pmatrix}$$

Diese Matrix hat eine obere Dreiecksblockstruktur, wenn man sie betrachtet als:

$$M' = \left(\begin{array}{cc|cc} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 8 & -1 \\ 0 & 0 & 15 & 1 \\ 0 & 0 & 9 & -2 \end{array} \right) = \begin{pmatrix} A' & B' \\ 0 & D' \end{pmatrix}$$

wobei $A' = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ und $D' = \begin{pmatrix} 15 & 1 \\ 9 & -2 \end{pmatrix}$. Die Determinante ist $\det(M') = \det(A') \cdot \det(D')$.

$\begin{array}{cc} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{array}$	$\begin{array}{cc} 1 & 1 \\ 8 & -1 \end{array}$	$\det(A') = (1 \cdot 1 - 1 \cdot 0) = 1$ $\det(D') = (15 \cdot (-2) - 1 \cdot 9) = -30 - 9 = -39$ $\det(M') = \det(A') \cdot \det(D') = 1 \cdot (-39) = -39$
$\det(A')$ $\begin{array}{cc} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{array}$	$\begin{array}{cc} 15 & 1 \\ 9 & -2 \end{array}$	
$\det(D')$		

Da die Matrix M' aus der ursprünglichen Matrix durch einen Zeilentausch und elementare Zeilenumformungen, die die Determinante nicht ändern (Addition eines Vielfachen einer Zeile zu einer anderen), hervorgegangen ist, gilt: $\det(\text{ursprüngliche Matrix}) = (-1) \cdot \det(M') = (-1) \cdot (-39) = 39$.

11.3 Transponiertheit

- Die Transponierte einer Matrix A , bezeichnet als A^T , entsteht durch Spiegelung der Elemente an der Hauptdiagonalen.
- Das Element $A_{m,n}$ der Ursprungsmatrix wird zum Element $A_{n,m}$ der transponierten Matrix.
- Eine $m \times n$ -Matrix wird zu einer $n \times m$ -Matrix.
- **Beispiel:**

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \end{pmatrix} \rightarrow A^T = \begin{pmatrix} 1 & 4 \\ 2 & 5 \\ 3 & 6 \end{pmatrix}$$

12. Matrizen Multiplizieren

Zwei Matrizen A und B dürfen nur miteinander Multipliziert werden, wenn

A so viele Spalten hat, wie B Zeilen. Seien die Matrizen $A = \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 0 & 1 \\ 1 & 3 \end{pmatrix}$, $B =$

$\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 4 \end{pmatrix}$, so werden sie wie folgt Multipliziert

$$\begin{aligned}
 & A \cdot B \\
 & \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 0 & 1 \\ 1 & 3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 4 \end{pmatrix} \\
 & = \begin{pmatrix} 1 \cdot 1 + 3 \cdot 2 & 1 \cdot 3 + 3 \cdot 4 \\ 0 \cdot 1 + 1 \cdot 2 & 0 \cdot 3 + 1 \cdot 4 \\ 1 \cdot 1 + 3 \cdot 2 & 1 \cdot 3 + 3 \cdot 4 \end{pmatrix} \\
 & = \begin{pmatrix} 7 & 15 \\ 2 & 4 \\ 7 & 15 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

13. Matrizen Invertieren

Die Inverse einer quadratischen Matrix A ist eine Matrix A^{-1} , sodass das Produkt von A und A^{-1} die Einheitsmatrix I ergibt:

$$AA^{-1} = A^{-1}A = I$$

Eine Methode zur Berechnung der Inversen einer Matrix ist das Gauß-Jordan Verfahren. Bei diesem Verfahren wird die zu invertierende Matrix A um die Einheitsmatrix I derselben Dimension erweitert, sodass eine Matrix $[A|I]$ entsteht. Durch elementare Zeilenumformungen wird der linke Teil A in die reduzierte Zeilenstufenform überführt. Wenn A in die Einheitsmatrix I transformiert werden kann, ist die resultierende rechte Seite die Inverse A^{-1} , also $[I|A^{-1}]$.

Eine notwendige und hinreichende Bedingung für die Invertierbarkeit einer quadratischen Matrix ist, dass ihre Determinante ungleich Null ist. Ist $\det(A) = 0$, so ist die Matrix singulär und besitzt keine Inverse.

13.1 Beispiel

Es soll die Inverse der Matrix A bestimmt werden:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 4 \\ 5 & 6 & 0 \end{pmatrix}$$

Zuerst wird die Determinante von A berechnet, um die Invertierbarkeit zu prüfen. Nach der Regel von Sarrus (für 3x3-Matrizen):

$$\begin{aligned} \det(A) &= (1 \cdot 1 \cdot 0) + (2 \cdot 4 \cdot 5) + (3 \cdot 0 \cdot 6) \\ &\quad - (5 \cdot 1 \cdot 3) - (6 \cdot 4 \cdot 1) - (0 \cdot 0 \cdot 2) \\ &= 0 + 40 + 0 - 15 - 24 - 0 \\ &= 1 \end{aligned}$$

Da $\det(A) = 1 \neq 0$, ist die Matrix A invertierbar.

Nun wird das Gauß-Jordan-Verfahren angewendet. Die erweiterte Matrix ist:

$$[A|I] = \left[\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 2 & 3 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 4 & 0 & 1 & 0 \\ 5 & 6 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

Matrix	Inverse
1 2 3	1 0 0
0 1 4	0 1 0
5 6 0	0 0 1
Operation: III - 5I	
1 2 3	1 0 0
0 1 4	0 1 0
0 -4 -15	-5 0 1
Operation: III + 4II	
1 2 3	1 0 0
0 1 4	0 1 0
0 0 1	-5 4 1
Operation: I - 2II	
1 0 -5	1 -2 0
0 1 4	0 1 0
0 0 1	-5 4 1
Operation: II - 4III	
1 0 -5	1 -2 0
0 1 0	20 -15 -4
0 0 1	-5 4 1
Operation: I + 5III	
1 0 0	-24 18 5
0 1 0	20 -15 -4
0 0 1	-5 4 1

Die linke Seite ist nun die Einheitsmatrix. Die rechte Seite ist die Inverse A^{-1} .

$$A^{-1} = \begin{pmatrix} -24 & 18 & 5 \\ 20 & -15 & -4 \\ -5 & 4 & 1 \end{pmatrix}$$

13.2 Umkehrabbildung

Eine Matrix $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ kann als eine lineare Abbildung von \mathbb{R}^n nach \mathbb{R}^n interpretiert werden. Ein Vektor $\vec{x} \in \mathbb{R}^n$ wird durch die Matrix A auf einen Vektor $\vec{y} \in \mathbb{R}^n$ abgebildet:

$$\vec{y} = A\vec{x}$$

Diese Abbildung $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, $\vec{x} \mapsto A\vec{x}$ ist bijektiv (also sowohl injektiv als auch surjektiv) genau dann, wenn die Matrix A invertierbar ist.

Wenn die Matrix A invertierbar ist, existiert eine Umkehrabbildung $f^{-1} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$. Diese Umkehrabbildung bildet den Vektor \vec{y} zurück auf den ursprünglichen Vektor \vec{x} ab. Die Abbildungsmatrix dieser Umkehrabbildung ist die Inverse A^{-1} :

$$\vec{x} = A^{-1}\vec{y}$$

Somit macht die Umkehrabbildung die ursprüngliche Abbildung rückgängig. Wendet man beide Abbildungen nacheinander an, erhält man die identische

Abbildung, bei der jeder Vektor auf sich selbst abgebildet wird:

$$A^{-1}(A\vec{x}) = (A^{-1}A)\vec{x} = I\vec{x} = \vec{x}$$

$$A(A^{-1}\vec{y}) = (AA^{-1})\vec{y} = I\vec{y} = \vec{y}$$

Die Existenz einer Umkehrabbildung ist also direkt an die Invertierbarkeit der Abbildungsmatrix A geknüpft, was wiederum bedeutet, dass $\det(A) \neq 0$ sein muss.

13.2.1 Beispiel zur Umkehrabbildung

Betrachten wir die Matrix A aus dem vorherigen Beispiel und ihre Inverse A^{-1} :

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 4 \\ 5 & 6 & 0 \end{pmatrix}, \quad A^{-1} = \begin{pmatrix} -24 & 18 & 5 \\ 20 & -15 & -4 \\ -5 & 4 & 1 \end{pmatrix}$$

Sei $\vec{x} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$. Die Abbildung mit A ergibt:

$$\vec{y} = A\vec{x} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 4 \\ 5 & 6 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + 3 \cdot 1 \\ 0 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 4 \cdot 1 \\ 5 \cdot 1 + 6 \cdot 1 + 0 \cdot 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6 \\ 5 \\ 11 \end{pmatrix}$$

Nun wird die Umkehrabbildung mit A^{-1} auf \vec{y} angewendet, um \vec{x} zurückzuerhalten:

$$\begin{aligned} A^{-1}\vec{y} &= \begin{pmatrix} -24 & 18 & 5 \\ 20 & -15 & -4 \\ -5 & 4 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 6 \\ 5 \\ 11 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -24 \cdot 6 + 18 \cdot 5 + 5 \cdot 11 \\ 20 \cdot 6 - 15 \cdot 5 - 4 \cdot 11 \\ -5 \cdot 6 + 4 \cdot 5 + 1 \cdot 11 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} -144 + 90 + 55 \\ 120 - 75 - 44 \\ -30 + 20 + 11 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \vec{x} \end{aligned}$$

Dies demonstriert, wie die durch A^{-1} repräsentierte Umkehrabbildung den Vektor \vec{y} auf den ursprünglichen Vektor \vec{x} zurückführt.

14. Definitheit

Eine quadratische Matrix $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ kann eine der folgenden Eigenschaften haben:

- Positiv definit
- Positiv semidefinit
- Negativ definit
- Negativ semidefinit
- Indefinit

14.1 Bestimmung über Eigenwerte

Die Definitheit lässt sich anhand der Vorzeichen der Eigenwerte λ_i einer Matrix bestimmen.

- **Positiv definit**, wenn alle $\lambda_i > 0$.
- **Positiv semidefinit**, wenn alle $\lambda_i \geq 0$.
- **Negativ definit**, wenn alle $\lambda_i < 0$.
- **Negativ semidefinit**, wenn alle $\lambda_i \leq 0$.
- **Indefinit**, wenn es sowohl positive als auch negative Eigenwerte gibt.

14.1.1 Beispiel

Bei einer Dreiecksmatrix stehen die Eigenwerte auf der Hauptdiagonalen. Die Matrix

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 4 & 2 \\ 0 & 2 & 4 \\ 0 & 0 & 3 \end{pmatrix}$$

hat die Eigenwerte $\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 2, \lambda_3 = 3$. Da alle Eigenwerte größer als Null sind, ist die Matrix **positiv definit**.

14.2 Hurwitz-Kriterium

Um die aufwändige Berechnung der Eigenwerte zu umgehen, kann das Hurwitz-Kriterium (auch Kriterium der Hauptminoren) genutzt werden. Dabei werden die Determinanten der führenden Hauptminoren Δ_k betrachtet.

Δ_1	Δ_2	Δ_3		Δ_n
$a_{1,1}$	$a_{1,2}$	$a_{1,3}$	\dots	$a_{1,n}$
$a_{2,1}$	$a_{2,2}$	$a_{2,3}$	\dots	$a_{2,n}$
$a_{3,1}$	$a_{3,2}$	$a_{3,3}$	\dots	$a_{3,n}$
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots
$a_{n,1}$	$a_{n,2}$	$a_{n,3}$	\dots	$a_{n,n}$

Figure 14.1: Schematische Darstellung der Hauptminoren Δ_k .

Die Vorzeichenfolge der Determinanten $\det(\Delta_k)$ ist entscheidend:

- **Positiv definit:** Alle Vorzeichen sind positiv. (+, +, +, ...)
- **Negativ definit:** Die Vorzeichen alternieren, beginnend mit negativ. (-, +, -, +, ...)
Achtung: Die Vorzeichenfolgen +, -, +, -, ... und -, -, -, -, ... sind kontraintuitiv **NICHT** Negativ definit.
- **Indefinit:** Alle anderen Vorzeichenfolgen.
- **Negativ bzw Positiv semidefinit:** Wenn durch auftauchende Nullen die Zeichenkette unterbrochen wird (z.B. -, +, 0, +, 0, 0, -, ...), *kann* die Matrix Positiv bzw Negativ semidefinit sein. **Sie kann aber auch Indefinit sein!** Hier müssen die Eigenwerte ausgerechnet werden, um die Definitheit sicher bestimmen zu können.

Wichtig: Noch einmal; treten Nullen bei den Determinanten auf, kann dieses vereinfachte Kriterium nicht zuverlässig zwischen semidefinit und indefinit unterscheiden.

14.2.1 Beispiel

Untersuchung der Matrix

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

- $\det(\Delta_1) = -2$
- $\det(\Delta_2) = \begin{vmatrix} -2 & 1 \\ 1 & -2 \end{vmatrix} = 3$
- $\det(\Delta_3) = \det(A) = -4$

Die Vorzeichenfolge ist -, +, -. Die Matrix ist somit **negativ definit**.

15. Eigenwerte und Eigenvektoren

Die Multiplikation einer quadratischen Matrix A mit einem ihrer Eigenvektoren \vec{v} resultiert in einem skalierten Vielfachen des selben Vektors. Der Skalierungsfaktor wird als Eigenwert λ bezeichnet.

15.1 Eigenwerte Berechnen

Die Eigenwerte λ einer Matrix A werden durch das Nullsetzen der Determinante von $(A - \lambda I)$ ermittelt.

$$\det(A - \lambda I) = 0$$

Die resultierenden Nullstellen für λ sind die Eigenwerte der Matrix.

15.2 Eigenvektoren Berechnen

Für jeden Eigenwert λ_i wird der zugehörige Eigenvektor \vec{x} durch das Lösen des folgenden linearen Gleichungssystems gefunden:

$$(A - \lambda_i I)\vec{x} = \vec{0}$$

Der Lösungsraum (Spannraum) dieses Systems stellt die Menge der Eigenvektoren zum jeweiligen Eigenwert λ_i dar.

16. Arithmetisches Mittel, Median und Modus

16.1 Arithmetisches Mittel

Das Arithmetische Mittel beschreibt den Durchschnitt. Beispielsweise ist der Notendurchschnitt das Arithmetische Mittel.

16.1.1 Beispiel

Note	1	2	3	4	5	6
Anzahl	5	3	3	7	2	1

Das Arithmetische Mittel wird hier berechnet, indem die Anzahl mit der Wertigkeit multipliziert und durch die gesamtanzahl geteilt wird

$$\frac{5 \cdot 1 + 3 \cdot 2 + 3 \cdot 3 + 7 \cdot 4 + 2 \cdot 5 + 1 \cdot 6}{21} \approx 3.0476$$

16.2 Median

Der Durchschnitt kann von der Realität stark abweichen. Beispielsweise hat eine Stadt 999 Einwohner, welche je 2000, und einen Einwohner, welcher 2000000 verdient. Das Durchschnittliche einkommen dieser Stadt ist 3998, allerdings verdient kein Einwohner annähernd so viel Geld.

Der Median beschreibt den mittleren Wert einer sortierten Folge. Gibt es keine Mitte, so wird das Arithmetische Mittel der beiden mittleren Werte gebildet.

16.2.1 Beispiel

Eine Stadt hat folgende Temperaturhistorie in grad Celsius:

12, 16, 17, 21, 25, 29, 32, 36

Das Median hier ist $\frac{21+25}{2} = 23$.

16.3 Modus

Der Modus ist der Wert mit der größten Häufigkeit.

Part II

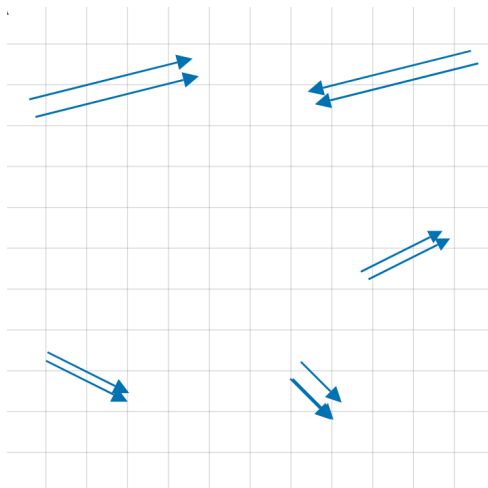
Bonusteste

17. Bonustest 1 - Rechnen mit Vektoren

17.1 Frage 1

Wie viele verschiedene Vektoren sind auf diesem Bild zu sehen?

In dieser Aufgabe geht es im wesentlichen darum, die **verschiedenen** Pfeile zu zählen. Es ist hilfreich, die Vektoren in dem Graphen so zu verschieben, dass gleiche Vektoren beieinander sind. So muss nur noch die Anzahl der Cluster gezählt werden.

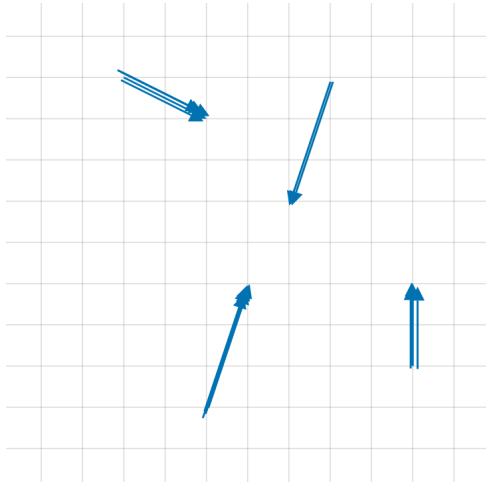


Hier gibt es **5** verschiedene Vektoren.

17.2 Frage 2

In der folgenden Abbildung sind verschiedene Vektoren dargestellt. Ein Kästchen entspricht einer Längeneinheit. Geben Sie die verschiedenen Vektoren, die im Bild zu sehen sind, als Liste in eckigen Klammern an. Die Einträge dieser Liste sind dabei die verschiedenen Vektoren dargestellt als Paare von Zahlen in eckigen Klammern. Ihre Antwort sollte also ein Ausdruck der Form $[[1,3],[-2,0],[1,1]]$ oder $[[0,3],[1,-1],[-1,1],[4,2]]$ etc. sein.

Hier ist es auch wieder Sinnvoll, die Vektoren zu sortieren. Dann müssen die Vektoren nur noch abgelesen werden. Die Vektoren werden über $[x, y]$ benannt, wobei x der weg ist, den der Vektor nach rechts "geht" und y die höhe des Vektors ist.



Hier befinden sich in der Abbildung die Vektoren $[[1, 3], [0, 2], [2, -1], [-1, -3]]$

17.3 Frage 3

Gegeben sind im \mathbb{R}^3 die beiden Vektoren \vec{u} und \vec{v} in Komponentendarstellung, wobei $B = (\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$ die Standardbasis des \mathbb{R}^3 ist.

17.3.1 a

Geben Sie die Vektoren \vec{u} und \vec{v} in Koordinatendarstellung an.

I

Es ist $\vec{u} = \frac{3\vec{e}_3}{2} + 2\vec{e}_2 + 3\vec{e}_1$

Hier muss der Vektor berechnet werden. Da die Vektoren $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ die Standardvektoren sind, ist deren Wert bekannt $\left(\vec{e}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{e}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{e}_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right)$.

Bevor das Ergebnis berechnet wird, sollte noch der Bruch aufgelöst werden:

$$\frac{3\vec{e}_3}{2} = \frac{3 \cdot \vec{e}_3}{2 \cdot 1} = \frac{3}{2} \cdot \frac{\vec{e}_3}{1} = \frac{3}{2}\vec{e}_3$$

Jetzt können die Einheitsvektoren einfach eingesetzt werden

$$\begin{aligned} & \frac{3}{2} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + 2 \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + 3 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \frac{3}{2} \cdot 0 \\ \frac{3}{2} \cdot 0 \\ \frac{3}{2} \cdot 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2 \cdot 0 \\ 2 \cdot 1 \\ 2 \cdot 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 3 \cdot 1 \\ 3 \cdot 0 \\ 3 \cdot 0 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{3}{2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$= \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ \frac{3}{2} \end{pmatrix}$$

Der Vektor \vec{u} ist also $\begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ \frac{3}{2} \end{pmatrix}$.

II

es ist $\vec{v} = 2\vec{e}_3 + 2\vec{e}_2$.

Hier können wieder die Einheitsvektoren eingesetzt werden.

$$\begin{aligned} & 2 \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + 2 \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 2 \cdot 0 \\ 2 \cdot 0 \\ 2 \cdot 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2 \cdot 0 \\ 2 \cdot 1 \\ 2 \cdot 0 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

17.3.2 b

Berechnen Sie für die Vektoren \vec{u} und \vec{v} aus Teilaufgabe a folgende Größen.
Geben Sie die Lösung exakt, also nicht näherungsweise an.

I

Es ist $\vec{u} - 2\vec{v}$

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ \frac{3}{2} \end{pmatrix} - 2 \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ \frac{3}{2} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 4 \\ 4 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 3 - 0 \\ 2 - 4 \\ \frac{3}{2} - 4 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$= \begin{pmatrix} 3 \\ -2 \\ -\frac{5}{2} \end{pmatrix}$$

II

Es ist $|3\vec{u} + 3\vec{v}|$

Die Betragsstriche meinen hier, dass die Länge des Vektors berechnet werden soll. Diese kann über die Formel $\sqrt{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2}$ berechnet werden. Es muss also zunächst der resultierende Vektor von $3\vec{u} + 3\vec{v}$ berechnet werden und von diesen Vektor muss dann die Länge bestimmt werden.

$$\begin{aligned} & \left| 3 \cdot \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ \frac{3}{2} \end{pmatrix} + 3 \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix} \right| \\ &= \left| \begin{pmatrix} 3 \cdot 3 \\ 3 \cdot 2 \\ 3 \cdot \frac{3}{2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 3 \cdot 0 \\ 3 \cdot 2 \\ 3 \cdot 2 \end{pmatrix} \right| \\ &= \left| \begin{pmatrix} 9 \\ 6 \\ \frac{9}{2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 6 \\ 6 \end{pmatrix} \right| \\ &= \left| \begin{pmatrix} 9 \\ 12 \\ \frac{21}{2} \end{pmatrix} \right| \\ &= \sqrt{9^2 + 12^2 + \frac{21^2}{2}} \\ &= \sqrt{\frac{1341}{2}} \end{aligned}$$

III

Es ist $\langle \vec{u}, \vec{v} \rangle$

Hier soll das Skalarprodukt berechnet werden. Das Skalarprodukt $\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle$ berechnet sich aus $a_1 \cdot b_1 + a_2 \cdot b_2 + \dots + a_n \cdot b_n$

$$\begin{aligned} & \left\langle \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ \frac{3}{2} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix} \right\rangle \\ &= 3 \cdot 0 + 2 \cdot 2 + \frac{3}{2} \cdot 2 \\ &= 0 + 4 + 3 \\ &= 7 \end{aligned}$$

IV

Es ist $\vec{u} \times \vec{v}$

Hier soll das Kreuzprodukt berechnet werden. Das Kreuzprodukt zweier Vektoren \vec{a}, \vec{b} der Länge 3 lässt sich über

$$\begin{pmatrix} a_2b_3 - a_3b_2 \\ a_3b_1 - a_1b_3 \\ a_1b_2 - a_2b_1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ \frac{3}{2} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 2 \cdot 2 - \frac{3}{2} \cdot 2 \\ \frac{3}{2} \cdot 0 - 3 \cdot 2 \\ 3 \cdot 2 - 2 \cdot 0 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 4 - 3 \\ 0 - 6 \\ 6 - 0 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 \\ -6 \\ 6 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

17.4 Frage 4

In welchem der folgenden Bilder ist das Skalarprodukt $\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle$ negativ?

Das Skalarprodukt zweier Vektoren ist negativ, wenn der Winkel zwischen den Vektoren größer als 90° beträgt.

Herleitung: Vorzeichen des Skalarprodukts

Das Skalarprodukt zweier Vektoren \vec{a} und \vec{b} ist fundamental durch ihre Beträge und den von ihnen eingeschlossenen Winkel θ definiert:

$$\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \cos(\theta)$$

Hierbei sind $|\vec{a}|$ und $|\vec{b}|$ die Längen der Vektoren. Der Winkel θ ist der kleinste Winkel zwischen \vec{a} und \vec{b} , sodass $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$.

Die Rolle des Kosinus

Die Beträge $|\vec{a}|$ und $|\vec{b}|$ sind per Definition stets nicht-negativ. Wenn wir annehmen, dass weder \vec{a} noch \vec{b} der Nullvektor ist (d.h. $|\vec{a}| > 0$ und $|\vec{b}| > 0$), dann sind ihre Beträge positive Zahlen. Das Produkt zweier positiver Zahlen ($|\vec{a}| \cdot |\vec{b}|$) ist ebenfalls positiv. Folglich hängt das Vorzeichen des gesamten Skalarprodukts $\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle$ ausschließlich vom Vorzeichen des Terms $\cos(\theta)$ ab:

$$\text{Vorzeichen}(\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle) = \text{Vorzeichen}(\cos(\theta))$$

Verhalten von $\cos(\theta)$ im relevanten Winkelbereich

Betrachten wir das Vorzeichen von $\cos(\theta)$ für die möglichen Werte des Winkels θ zwischen zwei Vektoren:

- **Spitzer Winkel:** $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$

Für Winkel in diesem Bereich ist der Kosinus positiv: $\cos(\theta) > 0$. Das Skalarprodukt ist somit:

$$\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle = \underbrace{|\vec{a}| \cdot |\vec{b}|}_{\text{positiv}} \cdot \underbrace{\cos(\theta)}_{\text{positiv}} \implies \langle \vec{a}, \vec{b} \rangle > 0$$

- **Rechter Winkel:** $\theta = 90^\circ$

Für einen rechten Winkel ist der Kosinus Null: $\cos(90^\circ) = 0$. Das Skalarprodukt ist somit:

$$\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \underbrace{\cos(90^\circ)}_0 \implies \langle \vec{a}, \vec{b} \rangle = 0$$

In diesem Fall stehen die Vektoren orthogonal (senkrecht) aufeinander.

- **Stumpfer Winkel:** $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$

Für Winkel in diesem Bereich ist der Kosinus negativ: $\cos(\theta) < 0$. Das Skalarprodukt ist somit:

$$\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle = \underbrace{|\vec{a}| \cdot |\vec{b}|}_{\text{positiv}} \cdot \underbrace{\cos(\theta)}_{\text{negativ}} \implies \langle \vec{a}, \vec{b} \rangle < 0$$

Schlussfolgerung aus der Herleitung

Das Skalarprodukt $\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle$ ist **genau dann negativ**, wenn der Kosinus des von den Vektoren eingeschlossenen Winkels θ negativ ist. Dies ist der Fall, wenn der Winkel θ ein stumpfer Winkel ist, also $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$.

17.5 Frage 5

Gegeben sind zwei \mathbb{R}^3 -Vektoren

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} -\frac{3}{2} \\ \frac{8}{3} \\ 1 \end{pmatrix} \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \frac{8}{3} \end{pmatrix}$$

Bestimmen Sie den Winkel zwischen a und b und runden diesen auf zwei Dezimalstellen genau in Grad und Bogenmaß.

17.5.1 a

Der Winkel zwischen zwei Vektoren kann berechnet werden, über $\cos(\theta) = \frac{\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle}{|\vec{a}| \cdot |\vec{b}|}$. Hier müssen ganz einfach die Vektoren eingesetzt werden

$$\cos(\theta) = \frac{\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle}{|\vec{a}| \cdot |\vec{b}|}$$

$$\begin{aligned}\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle &= -\frac{3}{2} \cdot 1 + \frac{8}{3} \cdot 0 + 1 \cdot \frac{8}{3} \\ &= -\frac{3}{2} + \frac{8}{3} \\ &= \frac{7}{6}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}|a| &= \sqrt{\left(-\frac{3}{2}\right)^2 + \frac{8^2}{3} + 1^2} \\ &= \sqrt{\frac{9}{4} + \frac{64}{9} + 1} = \sqrt{\frac{373}{36}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}|b| &= \sqrt{1^2 + 0^2 + \frac{8^2}{3}} \\ &= \sqrt{1 + 0 + \frac{64}{9}} = \sqrt{\frac{73}{9}}\end{aligned}$$

$$\cos(\theta) = \frac{\frac{7}{6}}{\sqrt{\frac{373}{36}} \cdot \sqrt{\frac{73}{9}}} = \frac{21\sqrt{27229}}{27229}$$

$$\arccos\left(\frac{21\sqrt{27229}}{27229}\right) \approx 1.44 \text{ rad}$$

$$\arccos\left(\frac{21\sqrt{27229}}{27229}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \approx 82.71^\circ$$

Der Winkel zwischen den gegebenen Vektoren beträgt in Gradmaß $\theta_{grad} = 82.71$.

17.5.2 b

Der Winkel zwischen den gegebenen Vektoren beträgt in Bogenmaß $\theta_{Bogen} = 1.44$.

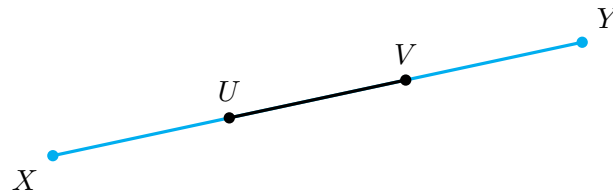
17.6 Frage 6

Gegeben sind die zwei Ortsvektoren

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} 5 \\ -1 \\ 4 \end{pmatrix}, \quad \vec{v} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ -2 \end{pmatrix} \text{ der beiden Punkte } U \text{ und } V.$$

17.6.1 a

Wie in der folgenden Abbildung dargestellt, unterteilen die Punkte U und V die Strecke von Punkt X zu Punkt Y in drei gleich lange Teile.



Bestimmen Sie die Ortsvektoren \vec{x} und \vec{y} der Punkte X und Y .

Lösung

Der Verbindungsvektor von Punkt U nach Punkt V lässt sich aus den zugehörigen Ortsvektoren \vec{u} und \vec{v} berechnen:

$$\begin{aligned} \vec{UV} &= \vec{v} - \vec{u} \\ &= \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ -2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 5 \\ -1 \\ 4 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} -6 \\ 1 \\ -6 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Da die Strecke in drei gleich lange Teile unterteilt ist, gilt $\vec{XU} = \vec{UV} = \vec{VY}$.

Der Ortsvektor \vec{x} des Punktes X kann somit durch Subtraktion des Vektors \vec{UV} vom Ortsvektor \vec{u} bestimmt werden:

$$\begin{aligned} \vec{x} &= \vec{u} - \vec{UV} \\ &= \begin{pmatrix} 5 \\ -1 \\ 4 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -6 \\ 1 \\ -6 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 11 \\ -2 \\ 10 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Analog ergibt sich der Ortsvektor \vec{y} des Punktes Y aus der Addition des Vektors \vec{UV} zum Ortsvektor \vec{v} :

$$\begin{aligned} \vec{y} &= \vec{v} + \vec{UV} \\ &= \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ -2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -6 \\ 1 \\ -6 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} -7 \\ 1 \\ -8 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

17.6.2 b

Bestimmen Sie die Ortsvektoren \vec{x} und \vec{y} als Linearkombination von \vec{u} und \vec{v} .

Lösung

Aus Teil a sind die Beziehungen $\vec{x} = \vec{u} - U\vec{V}$ und $\vec{y} = \vec{v} + U\vec{V}$ bekannt, sowie $U\vec{V} = \vec{v} - \vec{u}$. Durch Einsetzen von $U\vec{V}$ lässt sich \vec{x} als Linearkombination von \vec{u} und \vec{v} darstellen:

$$\begin{aligned}\vec{x} &= \vec{u} - (\vec{v} - \vec{u}) \\ &= \vec{u} - \vec{v} + \vec{u} \\ &= 2\vec{u} - \vec{v}\end{aligned}$$

Ebenso für \vec{y} :

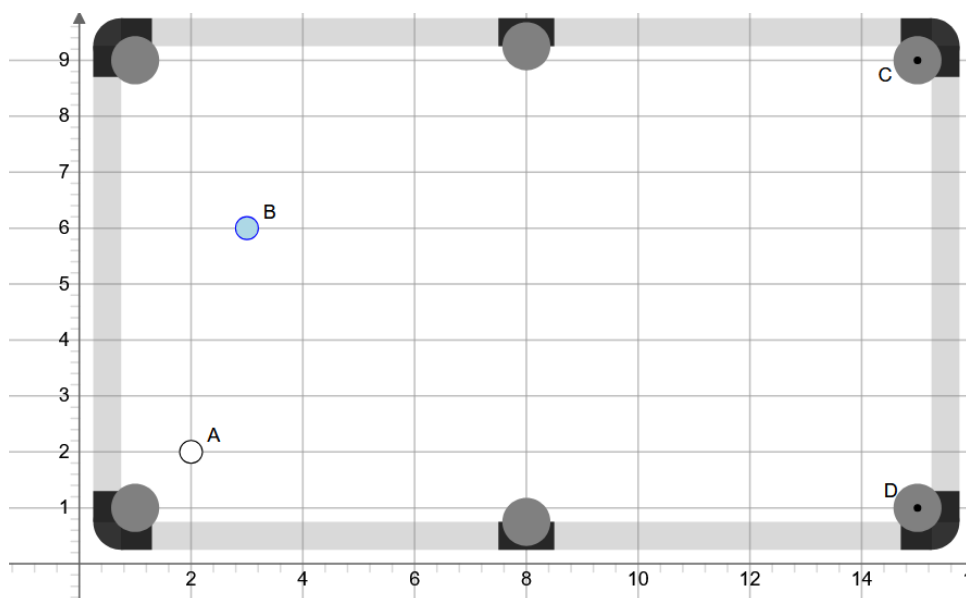
$$\begin{aligned}\vec{y} &= \vec{v} + (\vec{v} - \vec{u}) \\ &= \vec{v} + \vec{v} - \vec{u} \\ &= 2\vec{v} - \vec{u}\end{aligned}$$

Die gesuchten Linearkombinationen lauten somit:

$$\vec{x} = 2\vec{u} - \vec{v} \quad \text{und} \quad \vec{y} = -\vec{u} + 2\vec{v}$$

17.7 Frage 7

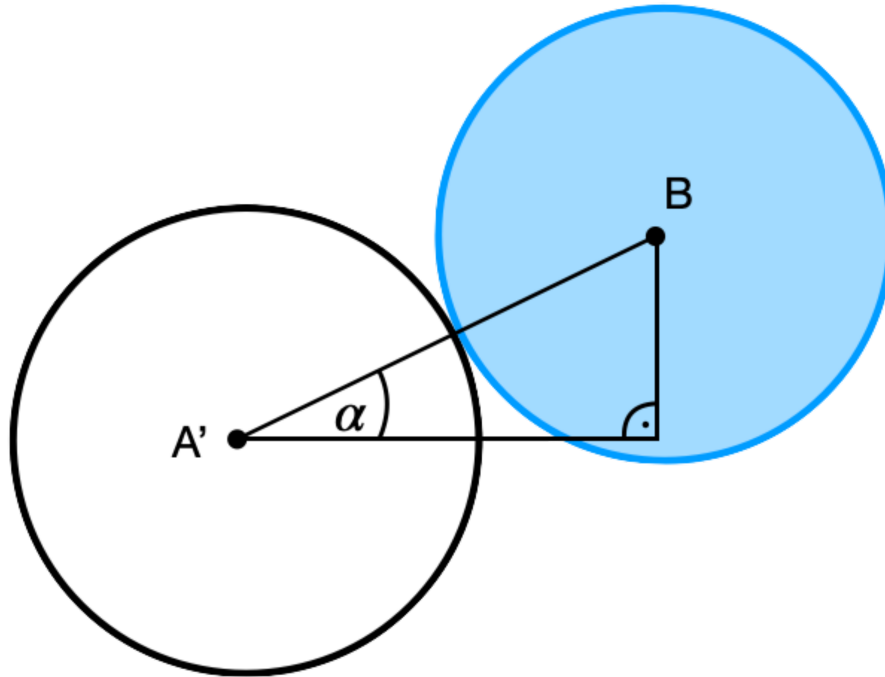
Auf einem Billardtisch befinden sich eine blaue und eine weiße Kugel. Die weiße Kugel und die blaue Kugel haben beide einen Durchmesser $d = 57.2 \text{ mm}$. In der folgenden Abbildung ist der Billardtisch dargestellt. Der Punkt A bezeichnet den Mittelpunkt der weißen Kugel und der Punkt B den Mittelpunkt der blauen Kugel. Die Punkte liegen jeweils auf einem Gitterpunkt des quadratischen Rasters, wobei ein Kästchen eine Skalierung von 1 dm hat. Die obere rechte Tasche des Billardtisches wird mit C und die untere rechte Tasche mit D bezeichnet.



Hier ist die Kugel B bei $\begin{pmatrix} 3 \\ 6 \end{pmatrix}$ und die Kugel A bei $\begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix}$.

Die weiße Kugel wird so gespielt, dass die blaue Kugel danach direkt zu Punkt C rollt. Die folgende Abbildung zeigt die weiße und blaue Kugel beim

Stoß. Dabei ist A' die Position der weißen Kugel, wenn diese auf die blaue Kugel trifft. Der Impuls wird hierbei entlang der Linie $A'B$ übertragen.



17.7.1 a

Berechnen Sie den Winkel α , unter dem die weiße Kugel die blaue Kugel treffen muss, damit die blaue Kugel direkt in Loch C trifft. Geben Sie den Winkel in Gradmaß und auf zwei Dezimalstellen genau ein.

Der Richtungsvektor der blauen Kugel ist \vec{BC} .

$$\vec{BC} = \vec{C} - \vec{B} = \begin{pmatrix} 15 \\ 9 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 3 \\ 6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 12 \\ 3 \end{pmatrix}$$

Der Winkel θ dieses Vektors zur x-Achse $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ ist:

$$\cos(\theta) = \frac{\begin{pmatrix} 12 \\ 3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}}{\left| \begin{pmatrix} 12 \\ 3 \end{pmatrix} \right| \cdot \left| \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right|} = \frac{12}{\sqrt{12^2 + 3^2} \cdot \sqrt{1^2}} = \frac{12}{\sqrt{153}}$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{12}{\sqrt{153}}\right) \approx 14.04^\circ$$

17.7.2 b

Berechnen Sie den Vektor $\vec{A'B}$ in dm und auf zwei Dezimalstellen genau.

Der Vektor $\vec{A'B}$ verläuft vom Zentrum der weißen Kugel (A') zum Zentrum der blauen Kugel (B) im Moment des Stoßes. Er hat die Richtung von \vec{BC} und die Länge des Kugeldurchmessers $d = 0.572$ dm.

$$\vec{A'B} = d \cdot \frac{\vec{BC}}{|\vec{BC}|} = 0.572 \cdot \frac{1}{\sqrt{153}} \begin{pmatrix} 12 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$\approx 0.572 \cdot \begin{pmatrix} 0.9701 \\ 0.2425 \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 0.55 \\ 0.14 \end{pmatrix}$$

17.7.3 c

Bestimmen Sie den Vektor $A\vec{A}'$, in dessen Richtung die weiße Kugel gespielt wird, in dm und auf zwei Dezimalstellen genau.

Zuerst wird die Position von A' bestimmt: $\vec{A}' = \vec{B} - \vec{A'B}$.

$$\vec{A}' \approx \begin{pmatrix} 3 \\ 6 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0.55 \\ 0.14 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.45 \\ 5.86 \end{pmatrix}$$

Der Vektor der Stoßrichtung $A\vec{A}'$ ist dann $\vec{A}' - \vec{A}$.

$$A\vec{A}' \approx \begin{pmatrix} 2.45 \\ 5.86 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.45 \\ 3.86 \end{pmatrix}$$

17.7.4 d

Berechnen Sie den Winkel β zwischen dem Stoßvektor $A\vec{A}'$ und der Horizontalen.

Der gesuchte Winkel β ist der Winkel zwischen dem Stoßvektor $A\vec{A}'$ und der horizontalen Achse.

$$\cos(\beta) = \frac{A\vec{A}' \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}}{|A\vec{A}'| \cdot \left| \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right|}$$

$$A\vec{A}' \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \approx 0.45 \cdot 1 + 3.86 \cdot 0 = 0.45$$

$$|A\vec{A}'| \approx \sqrt{0.45^2 + 3.86^2} = \sqrt{0.2025 + 14.8996} = \sqrt{15.1021} \approx 3.886$$

$$\left| \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right| = 1$$

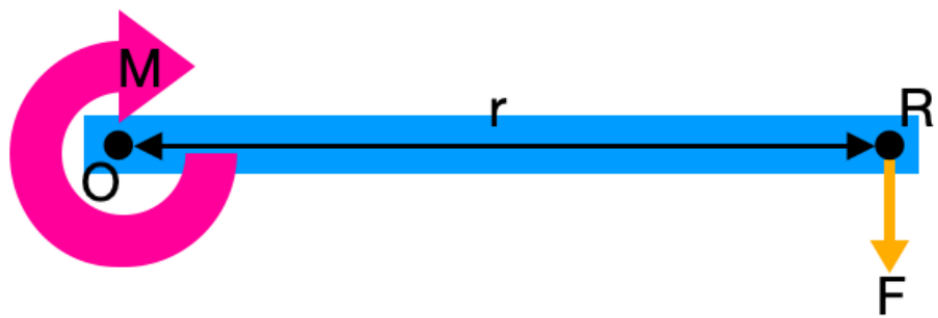
$$\cos(\beta) \approx \frac{0.45}{3.886 \cdot 1} \approx 0.1158$$

$$\beta = \arccos(0.1158) \approx 83.35^\circ$$

Der gesuchte Winkel beträgt also 83.35° .

17.8 Frage 8

Auf einem Körper, der den Punkt O drehbar ist, wirkt eine am Punkt R angreifende Kraft \vec{F} . Der Vektor \vec{r} ist der Ortsvektor von Punkt O nach Punkt R . In der folgenden Abbildung ist der Körper dargestellt.



Das auf den Körper wirkende Drehmoment \vec{M} ist das Kreuzprodukt $\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$.

Im folgenden sei $\vec{r} = \begin{pmatrix} 4 \\ 2 \\ -1 \end{pmatrix}$ und $\vec{F} = \begin{pmatrix} 2 \\ -3 \\ -6 \end{pmatrix}$.

17.8.1 a

Berechnen Sie das auf den Körper wirkende Drehmoment \vec{M} .

$$\begin{aligned}
 \vec{M} &= \vec{r} \times \vec{F} \\
 &= \begin{pmatrix} 4 \\ 2 \\ -1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 2 \\ -3 \\ -6 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} 2 \cdot -6 - -1 \cdot -3 \\ -1 \cdot 2 - 4 \cdot -6 \\ 4 \cdot -3 - 2 \cdot 2 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} -12 - 3 \\ -2 - -24 \\ -12 - 4 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} -15 \\ 22 \\ -16 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

17.8.2 b

Berechnen Sie den Betrag des Drehmoments und geben Sie das Ergebnis exakt an.

$$\begin{aligned}
 &|\vec{M}| \\
 &= \left| \begin{pmatrix} -15 \\ 22 \\ -16 \end{pmatrix} \right| \\
 &= \sqrt{-15^2 + 22^2 - 16^2} \\
 &= \sqrt{225 + 484 + 256}
 \end{aligned}$$

$$= \sqrt{965}$$

18. Bonustest 2 - Skalarprodukt, Kreuzprodukt, lineare Gleichungssystem, Matritzen und lineare Abbildungen

18.1 Frage 1

Bilden die Vektoren

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 6 \\ 0 \\ 7 \\ -7 \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{c} = \begin{pmatrix} -2 \\ 3 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix} \text{ und } \vec{d} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Eine basis des \mathbb{R}^4 ?

Hierfür müssen die Vektoren auf Lineare unabhängigkeit geprüft werden

$$x_1 \begin{pmatrix} 6 \\ 0 \\ 7 \\ -7 \end{pmatrix} + x_2 \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} + x_3 \begin{pmatrix} -2 \\ 3 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix} + x_4 \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Linearkombination			
6	1	-2	1
0	3	3	-1
7	-1	0	0
-7	0	5	1
III + IV			

Fortsetzung siehe nächste Seite

Table 18.1 – <i>Fortführung von vorheriger Seite</i>				
Linearkombination				
6	1	–2	1	
0	3	3	–1	
0	–1	–5	–1	
–7	0	5	1	
6IV + 7I				
6	1	–2	1	
0	3	3	–1	
0	–1	–5	–1	
0	7	16	13	
IV + 7III				
6	1	–2	1	
0	3	3	–1	
0	–1	–5	–1	
0	0	–19	6	
3III + II				
6	1	–2	1	
0	3	3	–1	
0	0	–12	–4	
0	0	–19	6	
–12IV + 19III				
6	1	–2	1	
0	3	3	–1	
0	0	–12	–4	
0	0	0	–148	
IV : –148				
6	1	–2	1	
0	3	3	–1	
0	0	–12	–4	
0	0	0	1	
III + 4IV				
6	1	–2	1	
0	3	3	–1	
0	0	–12	0	
0	0	0	1	
II + IV				
6	1	–2	1	
0	3	3	0	
0	0	–12	0	
0	0	0	1	
I – IV				
6	1	–2	0	
0	3	3	0	
0	0	–12	0	
0	0	0	1	
III : –12				

Fortsetzung siehe nächste Seite

Table 18.1 – Fortführung von vorheriger Seite				
Linearkombination				
6	1	–2	0	
0	3	3	0	
0	0	1	0	
0	0	0	1	
II - 3III				
6	1	–2	0	
0	3	0	0	
0	0	1	0	
0	0	0	1	
I + 2III				
6	1	0	0	
0	3	0	0	
0	0	1	0	
0	0	0	1	
II : 3				
6	1	0	0	
0	1	0	0	
0	0	1	0	
0	0	0	1	
I - II				
6	0	0	0	
0	1	0	0	
0	0	1	0	
0	0	0	1	
I : 6				
1	0	0	0	
0	1	0	0	
0	0	1	0	
0	0	0	1	

Da das Gleichungssystem bestimmt und nicht unterbestimmt ist, bilden die Vektoren eine Basis des \mathbb{R}^4 .

18.2 Frage 2

Seien $a, b \in \mathbb{R}$ Parameter und

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} -4 \\ a \\ 1 \end{pmatrix}, \vec{v} = \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ b \end{pmatrix}, \vec{w} = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ -4 \end{pmatrix}$$

Vektoren im \mathbb{R}^3 .

Bestimmen Sie Werte der Parameter a und b , sodass \vec{u}, \vec{v} und \vec{w} linear abhängig sind. Geben Sie bei mehreren Lösungen eine für a und b beispielhaft an.

Ein möglicher Lösungsansatz besteht darin, die Bedingung für lineare Abhängigkeit zu nutzen. Drei Vektoren im \mathbb{R}^3 sind genau dann linear abhängig, wenn die Determinante der Matrix, die aus diesen Vektoren als Spalten gebildet wird, gleich Null ist.

Die aufgestellte Matrix lautet:

$$A = \begin{pmatrix} -4 & 3 & 2 \\ a & 1 & 2 \\ 1 & b & -4 \end{pmatrix}$$

Die Determinante dieser Matrix wird berechnet:

$$\begin{aligned} \det(A) &= (-4 \cdot 1 \cdot -4) + (3 \cdot 2 \cdot 1) + (2 \cdot a \cdot b) - (1 \cdot 1 \cdot 2) - (b \cdot 2 \cdot -4) - (-4 \cdot a \cdot 3) \\ &= 16 + 6 + 2ab - 2 - (-8b) - (-12a) \\ &= 20 + 2ab + 8b + 12a \end{aligned}$$

Für lineare Abhängigkeit muss die Determinante Null sein:

$$12a + 8b + 2ab + 20 = 0$$

Diese Gleichung lässt sich durch 2 dividieren, um sie zu vereinfachen:

$$6a + 4b + ab + 10 = 0$$

Es gibt unendlich viele Paare (a, b) , die diese Gleichung erfüllen. Um eine beispielhafte Lösung anzugeben, kann ein Wert für einen der Parameter frei gewählt und der andere berechnet werden.

Beispiel 1: $a = 0$ Wird $a = 0$ in die Gleichung eingesetzt, ergibt sich:

$$\begin{aligned} 6(0) + 4b + (0)b + 10 &= 0 \\ 4b + 10 &= 0 \\ 4b &= -10 \\ b &= -\frac{10}{4} = -\frac{5}{2} \end{aligned}$$

Ein mögliches Wertepaar ist $a = 0$ und $b = -2.5$.

Beispiel 2: $b = 1$ Wird $b = 1$ in die Gleichung eingesetzt, ergibt sich:

$$\begin{aligned} 6a + 4(1) + a(1) + 10 &= 0 \\ 7a + 14 &= 0 \\ 7a &= -14 \\ a &= -2 \end{aligned}$$

Ein weiteres mögliches Wertepaar ist $a = -2$ und $b = 1$.

18.3 Frage 3

Bestimmen Sie das folgende Kreuzprodukt

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 9 \\ -2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix} \\
\begin{pmatrix} 9 \cdot -1 - -2 \cdot -1 \\ -2 \cdot 2 - 1 \cdot -1 \\ 1 \cdot -1 - 9 \cdot 2 \end{pmatrix} \\
\begin{pmatrix} -9 - 2 \\ -2 - 1 \\ -1 - 18 \end{pmatrix} \\
\begin{pmatrix} -11 \\ -3 \\ -19 \end{pmatrix}$$

18.4 Frage 4

Bestimmen Sie das folgende Kreuzprodukt

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 3 \\ -2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix} \\
\begin{pmatrix} 3 \cdot 2 - -2 \cdot 2 \\ -2 \cdot 2 - 1 \cdot 2 \\ 1 \cdot 2 - 3 \cdot 2 \end{pmatrix} \\
\begin{pmatrix} 6 - -4 \\ -4 - 2 \\ 2 - 6 \end{pmatrix} \\
\begin{pmatrix} 10 \\ -6 \\ -4 \end{pmatrix}$$

18.5 Frage 5

Ein Tetraeder wird als Modell eines Methanmoleküls verwendet. Dabei stellen die vier Eckpunkte die vier Wasserstoffatome und der Punkt $C(1, 1, 1)$ das Kohlenstoffatom dar.

Die Wasserstoffatome befinden sich im Tetraeder an den Eckpnkten $H_1(2, 0, 0)$, $H_2(0, 2, 0)$, $H_3(0, 0, 2)$ und $H_4(2, 2, 2)$.

Für diese Aufgabe ist die Abbildung des Moleküls irrelevant.

Der winkel α zwischen den Strecken $\overline{CH_1}$ und $\overline{CH_2}$ wird Bindungswinkel genannt. Berechnen Sie den Bindungswinkel im Methanmolekül in Grad und auf zwei Nachkommastellen genau.

$$\begin{aligned}
\overline{CH_1} &= H_1 - C \\
&= \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\overline{CH_2} &= H_2 - C \\
&= \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

$$\cos(\theta) = \frac{\langle \overline{CH_1}, \overline{CH_2} \rangle}{|\overline{CH_1}| \cdot |\overline{CH_2}|}$$

$$\begin{aligned}
&\langle \overline{CH_1}, \overline{CH_2} \rangle \\
&= \left\langle \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix} \right\rangle \\
&= 1 \cdot -1 + -1 \cdot 1 + -1 \cdot -1 \\
&= -1 + -1 + 1 \\
&= -1
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&|\overline{CH_1}| \\
&= \left| \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix} \right| \\
&= \sqrt{1^2 + (-1)^2 + (-1)^2} \\
&= \sqrt{1 + 1 + 1} \\
&= \sqrt{3}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&|\overline{CH_2}| \\
&= \left| \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix} \right| \\
&= \sqrt{(-1)^2 + 1^2 + (-1)^2}
\end{aligned}$$

$$= \frac{\sqrt{1+1+1}}{\sqrt{3}}$$

$$\begin{aligned}\cos(\theta) &= \frac{\langle \overline{CH_1}, \overline{CH_2} \rangle}{|\overline{CH_1}| \cdot |\overline{CH_2}|} \\ &= \frac{-1}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{3}} \\ \arccos\left(\frac{-1}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{3}}\right) &\cdot \frac{180}{\pi} \\ &\approx 109.47^\circ\end{aligned}$$

18.6 Frage 6

Gegeben sei die Abbildung $T : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ mit $T(x, y, z) = \begin{bmatrix} 2x - y - z \\ z \\ x + y \end{bmatrix}$

Berechnen Sie die Abbildungsmatrix A von T bezüglich der Standardbasis \mathbb{R}^3 .

Die Spalten der Abbildungsmatrix A sind die Bilder der Standardbasisvektoren unter der linearen Abbildung T . Die Standardbasis des \mathbb{R}^3 besteht aus den Vektoren:

$$e_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad e_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad e_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Die Bilder dieser Basisvektoren werden wie folgt berechnet:

1. **Erste Spalte:**

$$T(e_1) = T(1, 0, 0) = \begin{pmatrix} 2(1) - 0 - 0 \\ 0 \\ 1 + 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

2. **Zweite Spalte:**

$$T(e_2) = T(0, 1, 0) = \begin{pmatrix} 2(0) - 1 - 0 \\ 0 \\ 0 + 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

3. **Dritte Spalte:**

$$T(e_3) = T(0, 0, 1) = \begin{pmatrix} 2(0) - 0 - 1 \\ 1 \\ 0 + 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Zusammensetzen der Spalten ergibt die Abbildungsmatrix A :

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

18.7 Frage 7

Sei $\mathbb{P}_n(\mathbb{R})$ der Vektorraum der reellen Polynome vom Grad kleiner oder gleich n .

Sei $T : \mathbb{P}_3 \rightarrow \mathbb{P}_2(\mathbb{R})$ die Abbildung mit $T(f) := f'$.

Berechnen sie die Dimension vom $\text{Bild}(T)$.

Gegeben ist der Vektorraum $\mathbb{P}_n(\mathbb{R})$ der reellen Polynome vom Grad kleiner oder gleich n . Die lineare Abbildung $T : \mathbb{P}_3(\mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{P}_2(\mathbb{R})$ ist definiert durch die Ableitung:

$$T(f) = f'$$

Gesucht ist die Dimension des Bildes von T , geschrieben als $\dim(\text{Bild}(T))$.

Anwendung des Dimensionssatzes

Der Dimensionssatz (auch Rang-Defekt-Satz) für eine lineare Abbildung $T : V \rightarrow W$ lautet:

$$\dim(V) = \dim(\text{Kern}(T)) + \dim(\text{Bild}(T))$$

1. **Dimension des Urbildraums bestimmen:** Der Urbildraum ist $V = \mathbb{P}_3(\mathbb{R})$. Eine Basis für diesen Raum ist $\{1, x, x^2, x^3\}$. Die Anzahl der Basisvektoren ist 4.

$$\dim(\mathbb{P}_3) = 4$$

2. **Dimension des Kerns bestimmen:** Der Kern von T enthält alle Polynome $f \in \mathbb{P}_3(\mathbb{R})$, für die $T(f) = 0$ gilt.

$$T(f) = f' = 0$$

Dies ist genau dann der Fall, wenn das Polynom f eine Konstante ist, d.h. $f(x) = c$ für ein $c \in \mathbb{R}$. Der Kern besteht also aus allen konstanten Polynomen.

$$\text{Kern}(T) = \{c \mid c \in \mathbb{R}\} = \text{span}\{1\}$$

Eine Basis des Kerns ist das Polynom $\{1\}$. Die Dimension des Kerns ist somit:

$$\dim(\text{Kern}(T)) = 1$$

3. **Dimension des Bildes berechnen:** Durch Umstellen des Dimensionssatzes ergibt sich:

$$\dim(\text{Bild}(T)) = \dim(\mathbb{P}_3) - \dim(\text{Kern}(T))$$

Einsetzen der bekannten Werte:

$$\dim(\text{Bild}(T)) = 4 - 1 = 3$$

Part III

Übungsaufgaben Lineare Algebra

19. Übungsblatt 5

19.1 Aufgabe 1

Bestimmen Sie die Ergebnisse der folgenden Rechenoperationen.

19.1.1 a

$$\begin{aligned} 3 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} + 5 \begin{pmatrix} 4 \\ 1 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 3 \cdot 1 \\ 3 \cdot 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 5 \cdot 4 \\ 5 \cdot 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 20 \\ 5 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 3 + 20 \\ 3 + 5 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 23 \\ 8 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

19.1.2 b

$$\begin{aligned} 10 \begin{pmatrix} 5 \\ 4 \\ 3 \end{pmatrix} + 4 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 10 \cdot 5 \\ 10 \cdot 4 \\ 10 \cdot 3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 4 \cdot 1 \\ 4 \cdot 1 \\ 4 \cdot 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 50 \\ 40 \\ 30 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 4 \\ 4 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 50 + 4 + 3 \\ 40 + 4 + 2 \\ 30 + 0 + 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 57 \\ 46 \\ 31 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

19.2 Aufgabe 2

Sind die folgenden Mengen von Vektoren linear unabhängig? Können sie durch Entfernen eines Vektors linear unabhängig gemacht werden?

Um auf lineare Unabhängigkeit zu prüfen, gibt es mehrere Möglichkeiten. Hier zwei gängige Ansätze:

1. Prüfung über die Determinante: Man bildet aus den Vektoren eine quadratische Matrix A . Die Vektoren sind linear unabhängig, wenn die Determinante dieser Matrix ungleich null ist ($\det(A) \neq 0$). Ist die Determinante gleich null ($\det(A) = 0$), sind die Vektoren linear abhängig. (Diese Methode ist direkt nur anwendbar, wenn die Anzahl der Vektoren der Dimension des Raumes entspricht, z.B. 2 Vektoren im \mathbb{R}^2 oder 3 Vektoren im \mathbb{R}^3).
2. Prüfung über die Definition der linearen Unabhängigkeit: Eine Menge von Vektoren $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ ist linear unabhängig, wenn die einzige Lösung der Vektorgleichung

$$x_1 v_1 + x_2 v_2 + \dots + x_n v_n = \mathbf{0}$$

die sogenannte triviale Lösung ist, bei der alle Skalare x_1, x_2, \dots, x_n gleich null sind ($x_1 = x_2 = \dots = x_n = 0$). Wenn es mindestens eine nicht-triviale Lösung gibt (d. h. mindestens ein $x_i \neq 0$), dann sind die Vektoren linear abhängig.

19.2.1 a

$$\left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right\}$$

Prüfung für a über Determinante

1. Matrix aus den Vektoren erstellen:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

2. Determinante der Matrix A berechnen

$$\det(A) = A_{1,1} \cdot A_{2,2} - A_{2,1} \cdot A_{1,2} = 1 \cdot 0 - 1 \cdot 1 = 0 - 1 = -1$$

Da die Determinante ungleich null ist, ist die Linearkombination linear unabhängig.

Prüfung für a über Linearkombination

$$\begin{aligned} x_1 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} + x_2 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 1 \cdot x_1 \\ 1 \cdot x_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \cdot x_2 \\ 0 \cdot x_2 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 1 \cdot x_1 + 1 \cdot x_2 \\ 1 \cdot x_1 + 0 \cdot x_2 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{cases} \text{I:} & 1 \cdot x_1 + 1 \cdot x_2 = 0 \\ \text{II:} & 1 \cdot x_1 + 0 \cdot x_2 = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{I:} & x_1 + x_2 = 0 \\ \text{II:} & x_1 = 0 \end{cases}$$

in I einsetzen

$$0 + x_2 = 0$$

$$x_2 = 0$$

Die einzige Lösung des linearen Gleichungssystems $x_1 = x_2 = 0$ ist, sind die Vektoren linear unabhängig.

19.2.2 b

$$\left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix} \right\}$$

Es können nur drei Vektoren aus \mathbb{R}^3 linear unabhängig sein. Jede Kombination aus mehr als drei Vektoren aus \mathbb{R}^3 ist linear abhängig. Daher sind die vier Vektoren linear abhängig.

Um auf lineare Unabhängigkeit zu prüfen, wird ein beliebiger Vektor entfernt. Hier wird der vierte Vektor entfernt.

Im schlimmsten Fall kann es passieren, dass vier Linearkombinationen auf lineare Unabhängigkeit prüfen müssen, bis wir eine Linearkombination gefunden wird, welche linear unabhängig ist.

Prüfung für b über Determinante

1. Matrix aus den Vektoren erstellen:

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

2. Determinante der Matrix B berechnen

$$\begin{aligned} \det(B) &= B_{1,1} \cdot B_{2,2} \cdot B_{3,3} + B_{1,2} \cdot B_{2,3} \cdot B_{3,1} + B_{1,3} \cdot B_{2,1} \cdot B_{3,2} \\ &\quad - B_{3,1} \cdot B_{2,2} \cdot B_{1,3} - B_{3,2} \cdot B_{2,3} \cdot B_{1,1} - B_{3,3} \cdot B_{2,1} \cdot B_{1,2} \\ &= 1 \cdot 0 \cdot 1 + 1 \cdot 1 \cdot 1 + 2 \cdot 1 \cdot 1 - 1 \cdot 0 \cdot 2 - 1 \cdot 1 \cdot 1 - 1 \cdot 1 \cdot 1 \\ &= 0 + 1 + 2 - 0 - 1 - 1 \\ &= 1 \end{aligned}$$

Da die Determinante ungleich null ist, kann die Vektormenge durch Entfernen des vierten Vektors linear unabhängig gemacht werden.

Prüfung für b über Linearkombination

$$\begin{aligned} x_1 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} + x_2 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + x_3 \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 1 \cdot x_1 \\ 1 \cdot x_1 \\ 1 \cdot x_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \cdot x_2 \\ 0 \cdot x_2 \\ 1 \cdot x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2 \cdot x_3 \\ 1 \cdot x_3 \\ 1 \cdot x_3 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\ \begin{cases} \text{I:} & 1 \cdot x_1 + 1 \cdot x_2 + 2 \cdot x_3 = 0 \\ \text{II:} & 1 \cdot x_1 + 0 \cdot x_2 + 1 \cdot x_3 = 0 \\ \text{III:} & 1 \cdot x_1 + 1 \cdot x_2 + 1 \cdot x_3 = 0 \end{cases} \\ \begin{cases} \text{I:} & x_1 + x_2 + 2x_3 = 0 \\ \text{II:} & x_1 + x_3 = 0 \quad | -x_3 \Leftrightarrow x_1 = -x_3 \\ \text{III:} & x_1 + x_2 + x_3 = 0 \end{cases} \\ x_1 \text{ in III einsetzen} \\ -x_3 + x_2 + x_3 = 0 \\ \Leftrightarrow x_2 = 0 \\ x_1 \text{ und } x_2 \text{ in I einsetzen} \\ -x_3 + 0 + 2x_3 = 0 \\ \Leftrightarrow -x_3 + 2x_3 = 0 \\ \Leftrightarrow x_3 = 0 \\ x_3 \text{ in II einsetzen} \\ x_1 + 0 = 0 \\ \Leftrightarrow x_1 = 0 \end{aligned}$$

Die einzige Lösung des linearen Gleichungssystems ist $x_1 = x_2 = x_3 = 0$, das heißt, dass die Vektormenge ohne den vierten Vektor linear unabhängig ist.

19.3 Aufgabe 3

Bestimmen Sie die Dimension des Untervektorraums

$$V := \text{span} \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right\}$$

Die Dimension eines Untervektorraums ist die Anzahl der Basisvektoren. Um herauszufinden, ob die gegebenen Vektoren eine Basis des \mathbb{R}^3 bilden, muss auf lineare Unabhängigkeit geprüft werden.

Hier bietet es sich nicht an, dies über die Determinante zu errechnen, da nur quadratische Matritzen eine Determinante besitzen.

$$x_1 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} + x_2 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 \cdot x_1 \\ 1 \cdot x_1 \\ 1 \cdot x_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \cdot x_2 \\ 1 \cdot x_2 \\ 0 \cdot x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} \text{I:} & 1 \cdot x_1 + 1 \cdot x_2 = 0 \\ \text{II:} & 1 \cdot x_1 + 1 \cdot x_2 = 0 \\ \text{III:} & 1 \cdot x_1 + 0 \cdot x_2 = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{I:} & x_1 + x_2 = 0 \\ \text{II:} & x_1 + x_2 = 0 \\ \text{III:} & x_1 = 0 \end{cases}$$

x_1 in I einsetzen

$$0 + x_2 = 0$$

$$\Leftrightarrow x_2 = 0$$

Da $x_1 = x_2 = 0$ ist, ist die Vektormenge linear unabhängig. Diese zwei linear unabhängigen Vektoren spannen den Untervektorraum V auf und bilden somit eine Basis dieses Untervektorraums V . Da diese Basis aus zwei Vektoren besteht, ist die Dimension des Untervektorraums V gleich 2.

20. Übungsblatt 6

20.1 Aufgabe 1

Bestimmen Sie die Lösungsmengen der folgenden linearen Gleichungssysteme mit Hilfe des Gauß-Jordan-Algorithmus.

20.1.1 a

$$\begin{cases} 3x_1 + 2x_2 = 1 \\ 5x_1 + 4x_2 = 5 \end{cases}$$

Linearkombination	Konstanten
3 2	1
5 4	5
Operation: 3II - 5I	
3 2	1
0 2	10
Operation: I - II	
3 0	-9
0 2	10
Operation: I : 3	
Operation: II : 2	
1 0	-3
0 1	5

$$x_1 = -3 \quad x_2 = 5$$

20.1.2 b)

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 - x_3 = 10 \\ 15x_1 + x_2 - 4x_3 = 10 \\ -x_1 - 3x_3 = 10 \end{cases}$$

Linearkombination	Konstanten
1 2 -1	10
15 1 -4	10
-1 0 -3	10
Operation: II + 15III	
1 2 -1	10
0 1 -49	160
-1 0 -3	10
Operation: III + I	
1 2 -1	10
0 1 -49	160
0 2 -4	20
Operation: III - 2II	
1 2 -1	10
0 1 -49	160
0 0 94	-300
Operation: III : 94	
1 2 -1	10
0 1 -49	160
0 0 1	$-\frac{150}{47}$
Operation: I + III	
1 2 0	$\frac{320}{47}$
0 1 -49	160
0 0 1	$-\frac{150}{47}$
Operation: II + 49III	
1 2 0	$\frac{320}{47}$
0 1 0	$\frac{170}{47}$
0 0 1	$-\frac{150}{47}$
Operation: I - 2II	
1 0 0	$-\frac{20}{47}$
0 1 0	$\frac{170}{47}$
0 0 1	$-\frac{150}{47}$

$$x_1 = -\frac{20}{47} \quad x_2 = \frac{170}{47} \quad x_3 = -\frac{150}{47}$$

20.1.3 c)

$$\begin{cases} x_1 - x_2 - x_3 = 1 \\ x_1 + x_2 - x_3 = 2 \end{cases}$$

Linearkombination	Konstanten
1 -1 -1	1
1 1 -1	2
Operation: II - I	
1 -1 -1	1
0 2 0	1
Operation: 2I + II	
2 0 -2	3
0 2 0	1
Operation: I : 2	
Operation: II : 2	
1 0 -1	$\frac{3}{2}$
0 1 0	$\frac{1}{2}$

$$x_2 = \frac{1}{2}$$

$$x_1 - x_3 = \frac{3}{2}$$

$$x_3 =: t \quad t \in \mathbb{R}$$

$$x_1 - t = \frac{3}{2} \quad | + t$$

$$\Leftrightarrow x_1 = \frac{3}{2} + t$$

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{3}{2} + t \\ \frac{1}{2} \\ t \end{pmatrix} \text{ wobei } t \in \mathbb{R}$$

20.2 Aufgabe 2

20.2.1 a)

Wenn fünf Ochsen und zwei Schafe acht Taels Gold kosten, sowie zwei Ochsen und acht Schafe auch acht Taels, was ist dann der Preis eines Tieres? (Chiu-Chang Suan-Chu, 300 n.Chr.)

$$x_1 := \text{Ochsen} \quad x_2 := \text{Schafe}$$

$$\begin{cases} 5x_1 + 2x_2 = 8 \\ 2x_1 + 8x_2 = 8 \end{cases}$$

Linearkombination	Konstanten
5 2	8
2 8	8
Operation: 5II - 2I	
5 2	8
0 36	24
Operation: 36I - 2II	

Fortsetzung siehe nächste Seite

Table 20.4 – Fortführung von vorheriger Seite									
Linearkombination					Konstanten				
180	0				240				
0	36				24				
Operation: I: 180									
Operation: II: 36									
1	0				$\frac{4}{3}$				
0	1				$\frac{3}{2}$				

20.2.2 b)

Ein 9-Tupel (x_1, \dots, x_9) nennt man “magisches Quadrat der Ordnung 3”, wenn gilt:

$$\begin{aligned} x_1 + x_2 + x_3 &= x_4 + x_5 + x_6 = x_7 + x_8 + x_9 = x_1 + x_4 + x_7 \\ &= x_2 + x_5 + x_8 = x_3 + x_6 + x_9 = x_1 + x_5 + x_9 = x_3 + x_5 + x_7 \end{aligned}$$

Stellen Sie ein lineares Gleichungssystem auf, das zu diesen sieben Bedingungen äquivalent ist, und bestimmen Sie den Lösungsraum in \mathbb{R}^9 . Wie kann man die Menge der rationalen Lösungen (also der $(x_1, \dots, x_9) \in \mathbb{Q}^9$) beschreiben? Gibt es auch eine Lösung in \mathbb{Z}^9 ? Oder gar in \mathbb{N}^9 ? (siehe J. W. von Goethe 1: Faust. Der Tragödie erster Teil, Hexenküche).

(Diese Aufgaben sind entnommen aus: *Peter Knaber, Wolf P. Barth: Lineare Algebra. Aufgaben und Lösungen. Springer Verlag, 2017. Seite 4.*)

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 + x_2 + x_3 - x_4 - x_5 - x_6 = 0 \\ x_4 + x_5 + x_6 - x_7 - x_8 - x_9 = 0 \\ x_7 + x_8 + x_9 - x_1 - x_4 - x_7 = 0 \Rightarrow -x_1 - x_4 + x_8 + x_9 = 0 \\ x_1 + x_4 + x_7 - x_2 - x_5 - x_8 = 0 \Rightarrow x_1 - x_2 + x_4 - x_5 + x_7 - x_8 \\ x_2 + x_5 + x_8 - x_3 - x_6 - x_9 = 0 \Rightarrow x_2 - x_3 + x_5 - x_6 + x_8 - x_9 \\ x_3 + x_6 + x_9 - x_1 - x_5 - x_9 = 0 \Rightarrow -x_1 + x_3 - x_5 + x_6 \\ x_1 + x_5 + x_9 - x_3 - x_5 - x_7 = 0 \Rightarrow x_1 - x_3 - x_7 + x_9 \end{array} \right.$$

Linearkombination									
I	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0
II	0	0	0	1	1	1	-1	-1	-1
III	-1	0	0	-1	0	0	0	1	1
IV	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0
V	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1
VI	-1	0	1	0	-1	1	0	0	0
VII	1	0	-1	0	0	0	-1	0	1

Ziel: erste Spalte bereinigen

Fortsetzung siehe nächste Seite

Table 20.5 – Fortführung von vorheriger Seite

Linearkombination									
Operation: III + I									
<i>I</i>	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0
<i>II</i>	0	0	0	1	1	1	-1	-1	-1
<i>III</i>	0	1	1	-2	-1	-1	0	1	1
<i>IV</i>	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0
<i>V</i>	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1
<i>VI</i>	-1	0	1	0	-1	1	0	0	0
<i>VII</i>	1	0	-1	0	0	0	-1	0	1
Operation: IV - I									
<i>I</i>	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0
<i>II</i>	0	0	0	1	1	1	-1	-1	-1
<i>III</i>	0	1	1	-2	-1	-1	0	1	1
<i>IV</i>	0	-2	-1	2	0	1	1	-1	0
<i>V</i>	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1
<i>VI</i>	-1	0	1	0	-1	1	0	0	0
<i>VII</i>	1	0	-1	0	0	0	-1	0	1
Operation: VI + I									
<i>I</i>	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0
<i>II</i>	0	0	0	1	1	1	-1	-1	-1
<i>III</i>	0	1	1	-2	-1	-1	0	1	1
<i>IV</i>	0	-2	-1	2	0	1	1	-1	0
<i>V</i>	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1
<i>VI</i>	0	1	2	-1	-2	0	0	0	0
<i>VII</i>	1	0	-1	0	0	0	-1	0	1
Operation: VII - I									
<i>I</i>	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0
<i>II</i>	0	0	0	1	1	1	-1	-1	-1
<i>III</i>	0	1	1	-2	-1	-1	0	1	1
<i>IV</i>	0	-2	-1	2	0	1	1	-1	0
<i>V</i>	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1
<i>VI</i>	0	1	2	-1	-2	0	0	0	0
<i>VII</i>	0	-1	-2	1	1	1	-1	0	1
Ziel: zweite Spalte bereinigen									
Operation: II und III tauschen									
<i>I</i>	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0
<i>II</i>	0	1	1	-2	-1	-1	0	1	1
<i>III</i>	0	0	0	1	1	1	-1	-1	-1
<i>IV</i>	0	-2	-1	2	0	1	1	-1	0
<i>V</i>	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1
<i>VI</i>	0	1	2	-1	-2	0	0	0	0
<i>VII</i>	0	-1	-2	1	1	1	-1	0	1
Operation: IV + 2V									

Fortsetzung siehe nächste Seite

Table 20.5 – Fortführung von vorheriger Seite

Linearkombination									
<i>I</i>	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0
<i>II</i>	0	1	1	-2	-1	-1	0	1	1
<i>III</i>	0	0	0	1	1	1	-1	-1	-1
<i>IV</i>	0	0	-3	2	2	-1	1	1	-2
<i>V</i>	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1
<i>VI</i>	0	1	2	-1	-2	0	0	0	0
<i>VII</i>	0	-1	-2	1	1	1	-1	0	1
Operation: V - VI									
<i>I</i>	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0
<i>II</i>	0	1	1	-2	-1	-1	0	1	1
<i>III</i>	0	0	0	1	1	1	-1	-1	-1
<i>IV</i>	0	0	-3	2	2	-1	1	1	-2
<i>V</i>	0	0	-3	1	3	-1	0	1	-1
<i>VI</i>	0	1	2	-1	-2	0	0	0	0
<i>VII</i>	0	-1	-2	1	1	1	-1	0	1
Operation: VI + VII									
<i>I</i>	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0
<i>II</i>	0	1	1	-2	-1	-1	0	1	1
<i>III</i>	0	0	0	1	1	1	-1	-1	-1
<i>IV</i>	0	0	-3	2	2	-1	1	1	-2
<i>V</i>	0	0	-3	1	3	-1	0	1	-1
<i>VI</i>	0	0	0	0	-1	1	-1	0	1
<i>VII</i>	0	-1	-2	1	1	1	-1	0	1
Operation: VII + II									
<i>I</i>	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0
<i>II</i>	0	1	1	-2	-1	-1	0	1	1
<i>III</i>	0	0	0	1	1	1	-1	-1	-1
<i>IV</i>	0	0	-3	2	2	-1	1	1	-2
<i>V</i>	0	0	-3	1	3	-1	0	1	-1
<i>VI</i>	0	0	0	0	-1	1	-1	0	1
<i>VII</i>	0	0	-1	-1	0	0	-1	1	2
Ziel: dritte Spalte bereinigen									
Operation: III und VII tauschen									
<i>I</i>	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0
<i>II</i>	0	1	1	-2	-1	-1	0	1	1
<i>III</i>	0	0	-1	-1	0	0	-1	1	2
<i>IV</i>	0	0	-3	2	2	-1	1	1	-2
<i>V</i>	0	0	-3	1	3	-1	0	1	-1
<i>VI</i>	0	0	0	0	-1	1	-1	0	1
<i>VII</i>	0	0	0	1	1	1	-1	-1	-1
Operation: IV - V									

Fortsetzung siehe nächste Seite

Table 20.5 – Fortführung von vorheriger Seite

Linearkombination									
<i>I</i>	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0
<i>II</i>	0	1	1	-2	-1	-1	0	1	1
<i>III</i>	0	0	-1	-1	0	0	-1	1	2
<i>IV</i>	0	0	0	1	-1	0	1	0	-1
<i>V</i>	0	0	-3	1	3	-1	0	1	-1
<i>VI</i>	0	0	0	0	-1	1	-1	0	1
<i>VII</i>	0	0	0	1	1	1	-1	-1	-1
Operation: V - 3III									
<i>I</i>	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0
<i>II</i>	0	1	1	-2	-1	-1	0	1	1
<i>III</i>	0	0	-1	-1	0	0	-1	1	2
<i>IV</i>	0	0	0	1	-1	0	1	0	-1
<i>V</i>	0	0	0	4	3	-1	3	-2	-7
<i>VI</i>	0	0	0	0	-1	1	-1	0	1
<i>VII</i>	0	0	0	1	1	1	-1	-1	-1
Operation: III · (-1)									
<i>I</i>	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0
<i>II</i>	0	1	1	-2	-1	-1	0	1	1
<i>III</i>	0	0	1	1	0	0	1	-1	-2
<i>IV</i>	0	0	0	1	-1	0	1	0	-1
<i>V</i>	0	0	0	4	3	-1	3	-2	-7
<i>VI</i>	0	0	0	0	-1	1	-1	0	1
<i>VII</i>	0	0	0	1	1	1	-1	-1	-1
Ziel: vierte Spalte bereinigen									
Operation: V - 4VII									
<i>I</i>	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0
<i>II</i>	0	1	1	-2	-1	-1	0	1	1
<i>III</i>	0	0	1	1	0	0	1	-1	-2
<i>IV</i>	0	0	0	1	-1	0	1	0	-1
<i>V</i>	0	0	0	0	-1	-5	7	2	-3
<i>VI</i>	0	0	0	0	-1	1	-1	0	1
<i>VII</i>	0	0	0	1	1	1	-1	-1	-1
Operation: VII - IV									
<i>I</i>	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0
<i>II</i>	0	1	1	-2	-1	-1	0	1	1
<i>III</i>	0	0	1	1	0	0	1	-1	-2
<i>IV</i>	0	0	0	1	-1	0	1	0	-1
<i>V</i>	0	0	0	0	-1	-5	7	2	-3
<i>VI</i>	0	0	0	0	-1	1	-1	0	1
<i>VII</i>	0	0	0	0	2	1	-2	-1	0
Ziel: fünfte Spalte bereinigen									
Operation: 2VI + VII									

Fortsetzung siehe nächste Seite

Table 20.5 – Fortführung von vorheriger Seite

Linearkombination									
<i>I</i>	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0
<i>II</i>	0	1	1	-2	-1	-1	0	1	1
<i>III</i>	0	0	1	1	0	0	1	-1	-2
<i>IV</i>	0	0	0	1	-1	0	1	0	-1
<i>V</i>	0	0	0	0	-1	-5	7	2	-3
<i>VI</i>	0	0	0	0	-1	1	-1	0	1
<i>VII</i>	0	0	0	0	0	3	-4	-1	2
Operation: VI - V									
<i>I</i>	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0
<i>II</i>	0	1	1	-2	-1	-1	0	1	1
<i>III</i>	0	0	1	1	0	0	1	-1	-2
<i>IV</i>	0	0	0	1	-1	0	1	0	-1
<i>V</i>	0	0	0	0	-1	-5	7	2	-3
<i>VI</i>	0	0	0	0	0	6	-8	-2	4
<i>VII</i>	0	0	0	0	0	3	-4	-1	2
Operation: V · (-1)									
<i>I</i>	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0
<i>II</i>	0	1	1	-2	-1	-1	0	1	1
<i>III</i>	0	0	1	1	0	0	1	-1	-2
<i>IV</i>	0	0	0	1	-1	0	1	0	-1
<i>V</i>	0	0	0	0	1	5	-7	-2	3
<i>VI</i>	0	0	0	0	0	6	-8	-2	4
<i>VII</i>	0	0	0	0	0	3	-4	-1	2
Ziel: sechste Spalte bereinigen									
Operation: 2VII - VI									
<i>I</i>	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0
<i>II</i>	0	1	1	-2	-1	-1	0	1	1
<i>III</i>	0	0	1	1	0	0	1	-1	-2
<i>IV</i>	0	0	0	1	-1	0	1	0	-1
<i>V</i>	0	0	0	0	1	5	-7	-2	3
<i>VI</i>	0	0	0	0	0	6	-8	-2	4
<i>VII</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Operation: VI : 6									
<i>I</i>	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0
<i>II</i>	0	1	1	-2	-1	-1	0	1	1
<i>III</i>	0	0	1	1	0	0	1	-1	-2
<i>IV</i>	0	0	0	1	-1	0	1	0	-1
<i>V</i>	0	0	0	0	1	5	-7	-2	3
<i>VI</i>	0	0	0	0	0	1	$-\frac{4}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$
<i>VII</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Die siebte Zeile (VII) besteht ausschließlich aus nullen. Das bedeutet, dass die ursprüngliche siebte Gleichung von den anderen linear abhängig war und keine neuen Informationen liefert. Diese Zeile wird daher im Folgenden nicht mehr berücksichtigt.

Fortsetzung siehe nächste Seite

Table 20.5 – Fortführung von vorheriger Seite

Linearkombination									
<i>I</i>	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0
<i>II</i>	0	1	1	-2	-1	-1	0	1	1
<i>III</i>	0	0	1	1	0	0	1	-1	-2
<i>IV</i>	0	0	0	1	-1	0	1	0	-1
<i>V</i>	0	0	0	0	1	5	-7	-2	3
<i>VI</i>	0	0	0	0	0	1	$-\frac{4}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$
Ziel: Einträge in Spalte sechs oberhalb des Pivots eliminieren									
Operation: V - 5VI									
<i>I</i>	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0
<i>II</i>	0	1	1	-2	-1	-1	0	1	1
<i>III</i>	0	0	1	1	0	0	1	-1	-2
<i>IV</i>	0	0	0	1	-1	0	1	0	-1
<i>V</i>	0	0	0	0	1	0	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
<i>VI</i>	0	0	0	0	0	1	$-\frac{4}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$
Operation: II + VI									
<i>I</i>	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0
<i>II</i>	0	1	1	-2	-1	0	$-\frac{4}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{5}{3}$
<i>III</i>	0	0	1	1	0	0	1	-1	-2
<i>IV</i>	0	0	0	1	-1	0	1	0	-1
<i>V</i>	0	0	0	0	1	0	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
<i>VI</i>	0	0	0	0	0	1	$-\frac{4}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$
Operation: I + VI									
<i>I</i>	1	1	1	-1	-1	0	$-\frac{4}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$
<i>II</i>	0	1	1	-2	-1	0	$-\frac{4}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{5}{3}$
<i>III</i>	0	0	1	1	0	0	1	-1	-2
<i>IV</i>	0	0	0	1	-1	0	1	0	-1
<i>V</i>	0	0	0	0	1	0	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
<i>VI</i>	0	0	0	0	0	1	$-\frac{4}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$
Ziel: Einträge in Spalte fünf oberhalb des Pivots eliminieren									
Operation: IV + V									
<i>I</i>	1	1	1	-1	-1	0	$-\frac{4}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$
<i>II</i>	0	1	1	-2	-1	0	$-\frac{4}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{5}{3}$
<i>III</i>	0	0	1	1	0	0	1	-1	-2
<i>IV</i>	0	0	0	1	0	0	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{4}{3}$
<i>V</i>	0	0	0	0	1	0	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
<i>VI</i>	0	0	0	0	0	1	$-\frac{4}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$
Operation: II + V									
<i>I</i>	1	1	1	-1	-1	0	$-\frac{4}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$
<i>II</i>	0	1	1	-2	0	0	$-\frac{5}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{4}{3}$
<i>III</i>	0	0	1	1	0	0	1	-1	-2
<i>IV</i>	0	0	0	1	0	0	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{4}{3}$
<i>V</i>	0	0	0	0	1	0	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
<i>VI</i>	0	0	0	0	0	1	$-\frac{4}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$
Operation: I + V									

Fortsetzung siehe nächste Seite

Table 20.5 – Fortführung von vorheriger Seite

Linearkombination									
<i>I</i>	1	1	1	-1	0	0	$-\frac{5}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$
<i>II</i>	0	1	1	-2	0	0	$-\frac{5}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{4}{3}$
<i>III</i>	0	0	1	1	0	0	1	-1	-2
<i>IV</i>	0	0	0	1	0	0	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{4}{3}$
<i>V</i>	0	0	0	0	1	0	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
<i>VI</i>	0	0	0	0	0	1	$-\frac{4}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$
Ziel: Einträge in Spalte vier oberhalb des Pivots eliminieren									
Operation: III - IV									
<i>I</i>	1	1	1	-1	0	0	$-\frac{5}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$
<i>II</i>	0	1	1	-2	0	0	$-\frac{5}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{4}{3}$
<i>III</i>	0	0	1	0	0	0	$\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$
<i>IV</i>	0	0	0	1	0	0	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{4}{3}$
<i>V</i>	0	0	0	0	1	0	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
<i>VI</i>	0	0	0	0	0	1	$-\frac{4}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$
Operation: II + 2IV									
<i>I</i>	1	1	1	-1	0	0	$-\frac{5}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$
<i>II</i>	0	1	1	0	0	0	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{4}{3}$
<i>III</i>	0	0	1	0	0	0	$\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$
<i>IV</i>	0	0	0	1	0	0	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{4}{3}$
<i>V</i>	0	0	0	0	1	0	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
<i>VI</i>	0	0	0	0	0	1	$-\frac{4}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$
Operation: I + IV									
<i>I</i>	1	1	1	0	0	0	-1	-1	-1
<i>II</i>	0	1	1	0	0	0	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{4}{3}$
<i>III</i>	0	0	1	0	0	0	$\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$
<i>IV</i>	0	0	0	1	0	0	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{4}{3}$
<i>V</i>	0	0	0	0	1	0	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
<i>VI</i>	0	0	0	0	0	1	$-\frac{4}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$
Ziel: Einträge in Spalte drei oberhalb des Pivots eliminieren									
Operation: II - III									
<i>I</i>	1	1	1	0	0	0	-1	-1	-1
<i>II</i>	0	1	0	0	0	0	$-\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$
<i>III</i>	0	0	1	0	0	0	$\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$
<i>IV</i>	0	0	0	1	0	0	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{4}{3}$
<i>V</i>	0	0	0	0	1	0	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
<i>VI</i>	0	0	0	0	0	1	$-\frac{4}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$
Operation: I - III									
<i>I</i>	1	1	0	0	0	0	$-\frac{4}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
<i>II</i>	0	1	0	0	0	0	$-\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$
<i>III</i>	0	0	1	0	0	0	$\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$
<i>IV</i>	0	0	0	1	0	0	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{4}{3}$
<i>V</i>	0	0	0	0	1	0	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
<i>VI</i>	0	0	0	0	0	1	$-\frac{4}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$
Ziel: Einträge in Spalte zwei oberhalb des Pivots eliminieren									
Operation: I - II									

Fortsetzung siehe nächste Seite

Table 20.5 – Fortführung von vorheriger Seite										
Linearkombination										
<i>I</i>	1	0	0	0	0	0	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	
<i>II</i>	0	1	0	0	0	0	$-\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$	
<i>III</i>	0	0	1	0	0	0	$\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	
<i>IV</i>	0	0	0	1	0	0	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{4}{3}$	
<i>V</i>	0	0	0	0	1	0	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	
<i>VI</i>	0	0	0	0	0	1	$-\frac{4}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	

Hieraus lässt sich jetzt Schließen, dass

$$\begin{aligned}
x_1 - \frac{2}{3}x_7 - \frac{2}{3}x_8 + \frac{1}{3}x_9 &= 0 \Leftrightarrow x_1 = \frac{2}{3}x_7 + \frac{2}{3}x_8 - \frac{1}{3}x_9, \\
x_2 - \frac{2}{3}x_7 + \frac{1}{3}x_8 - \frac{2}{3}x_9 &= 0 \Leftrightarrow x_2 = \frac{2}{3}x_7 - \frac{1}{3}x_8 + \frac{2}{3}x_9, \\
x_3 + \frac{1}{3}x_7 - \frac{2}{3}x_8 - \frac{2}{3}x_9 &= 0 \Leftrightarrow x_3 = -\frac{1}{3}x_7 + \frac{2}{3}x_8 + \frac{2}{3}x_9, \\
x_4 + \frac{2}{3}x_7 - \frac{1}{3}x_8 - \frac{4}{3}x_9 &= 0 \Leftrightarrow x_4 = -\frac{2}{3}x_7 + \frac{1}{3}x_8 + \frac{4}{3}x_9, \\
x_5 - \frac{1}{3}x_7 - \frac{1}{3}x_8 - \frac{1}{3}x_9 &= 0 \Leftrightarrow x_5 = \frac{1}{3}x_7 + \frac{1}{3}x_8 + \frac{1}{3}x_9, \\
x_6 - \frac{4}{3}x_7 - \frac{1}{3}x_8 + \frac{2}{3}x_9 &= 0 \Leftrightarrow x_6 = \frac{4}{3}x_7 + \frac{1}{3}x_8 - \frac{2}{3}x_9
\end{aligned}$$

Also gilt

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2}{3}x_7 + \frac{2}{3}x_8 - \frac{1}{3}x_9 \\ \frac{2}{3}x_7 - \frac{1}{3}x_8 + \frac{2}{3}x_9 \\ -\frac{1}{3}x_7 + \frac{2}{3}x_8 + \frac{2}{3}x_9 \\ -\frac{2}{3}x_7 + \frac{1}{3}x_8 + \frac{4}{3}x_9 \\ \frac{1}{3}x_7 + \frac{1}{3}x_8 + \frac{1}{3}x_9 \\ \frac{4}{3}x_7 + \frac{1}{3}x_8 - \frac{2}{3}x_9 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}
&= \begin{pmatrix} \frac{2}{3}x_7 \\ \frac{2}{3}x_7 \\ -\frac{1}{3}x_7 \\ -\frac{2}{3}x_7 \\ \frac{1}{3}x_7 \\ \frac{4}{3}x_7 \\ 1x_7 \\ 0x_7 \\ 0x_7 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{2}{3}x_8 \\ -\frac{1}{3}x_8 \\ \frac{2}{3}x_8 \\ \frac{1}{3}x_8 \\ \frac{1}{3}x_8 \\ \frac{1}{3}x_8 \\ 0x_8 \\ 1x_8 \\ 0x_8 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{1}{3}x_9 \\ \frac{2}{3}x_9 \\ \frac{2}{3}x_9 \\ \frac{4}{3}x_9 \\ \frac{1}{3}x_9 \\ -\frac{2}{3}x_9 \\ 0x_9 \\ 0x_9 \\ 1x_9 \end{pmatrix} \\
&= x_7 \begin{pmatrix} \frac{2}{3} \\ \frac{2}{3} \\ -\frac{1}{3} \\ -\frac{2}{3} \\ \frac{1}{3} \\ \frac{4}{3} \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + x_8 \begin{pmatrix} \frac{2}{3} \\ -\frac{1}{3} \\ \frac{2}{3} \\ \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + x_9 \begin{pmatrix} -\frac{1}{3} \\ \frac{2}{3} \\ \frac{2}{3} \\ \frac{4}{3} \\ \frac{1}{3} \\ -\frac{2}{3} \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

wobei $x_7, x_8, x_9 \in \mathbb{R}$

Der Lösungsraum des Tupels in \mathbb{R}^9 ist also

$$L = \left\{ x_7 \begin{pmatrix} \frac{2}{3} \\ \frac{2}{3} \\ -\frac{1}{3} \\ -\frac{2}{3} \\ \frac{1}{3} \\ \frac{4}{3} \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + x_8 \begin{pmatrix} \frac{2}{3} \\ -\frac{1}{3} \\ \frac{2}{3} \\ \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + x_9 \begin{pmatrix} -\frac{1}{3} \\ \frac{2}{3} \\ \frac{2}{3} \\ \frac{4}{3} \\ \frac{1}{3} \\ -\frac{2}{3} \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \mid x_7, x_8, x_9 \in \mathbb{R} \right\}$$

Die Menge der Rationalen Lösungen kann einfach beschrieben werden also

$$L = \left\{ x_7 \begin{pmatrix} \frac{2}{3} \\ \frac{2}{3} \\ -\frac{1}{3} \\ -\frac{2}{3} \\ \frac{1}{3} \\ \frac{4}{3} \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + x_8 \begin{pmatrix} \frac{2}{3} \\ -\frac{1}{3} \\ \frac{2}{3} \\ \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + x_9 \begin{pmatrix} -\frac{1}{3} \\ \frac{2}{3} \\ \frac{2}{3} \\ \frac{4}{3} \\ \frac{1}{3} \\ -\frac{2}{3} \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \mid x_7, x_8, x_9 \in \mathbb{Q} \right\}$$

Um eine Lösung in \mathbb{Z}^9 zu erhalten kann sichergestellt werden, dass alle Komponenten ein vielfaches von drei sind. Hierfür kann beispielsweise die hinreichende, aber nicht notwendige Bedingung dass $x_7 = 3a, x_8 = 3b, x_9 = 3c$ mit $a, b, c \in \mathbb{Z}$ aufgestellt werden.

Man wähle beispielsweise $a = 1, b = 1, c = 1$, so erhält man das magische Quadrat

$$\begin{pmatrix} 3 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & 3 \end{pmatrix}$$

Dieses ist auch eine Lösung für ein magisches Quadrat aus \mathbb{N}^9 .

20.3 Aufgabe 3

Schreiben Sie den Gauß-Jordan-Algorithmus in Pseudocode auf.

```

1 def gauss_jordan(matrix: list[list[float]], constants: ←
    list[list[float]] | None) -> list[list[float]]:
2     n = len(matrix)
3     m = len(matrix[0])
4     i = 0
5
6     while i < n and i < m:
7         pivot_zeile = i
8
9         for zeile in range(i + 1, n): # beste Zeile zum ←
            tauschen finden
10            if abs(matrix[zeile][i]) > abs(matrix[pivot_zeile ←
                ][i]):
11                pivot_zeile = zeile
12
13            if pivot_zeile != i: # Zeilen ggf. tauschen
14                matrix[i], matrix[pivot_zeile] = matrix[ ←
                    pivot_zeile], matrix[i]
15            if constants:
16                constants[i], constants[pivot_zeile] = constants ←
                    [pivot_zeile], constants[i]
17
18            if matrix[i][i] == 0:
19                i += 1
20                continue # Es gab keinen geeigneten Tauschkanidat. ←
                    Eliminierung wird uebersprungen.
21
22            pivot_wert = matrix[i][i]
23            for k_norm in range(i, m):
24                matrix[i][k_norm] = matrix[i][k_norm] / pivot_wert
25            if constants and i < len(constants) and constants[i] ←
                is not None:
26                for c_col in range(len(constants[i])):
27                    constants[i][c_col] = constants[i][c_col] / ←
                        pivot_wert
28
29            for j in range(0, i): # Nullen oberhalb
30                factor = matrix[j][i] / matrix[i][i]
31                for k in range(i, m):
32                    matrix[j][k] = matrix[j][k] - matrix[i][k] * ←
                        factor
33            if constants and len(constants[0]) > 0:

```



```

34         num_const_cols = len(constants[0])
35         for c_col in range(num_const_cols):
36             constants[j][c_col] = constants[j][c_col] ←
                ] - constants[i][c_col] * factor
37
38     for j in range(i + 1, n): # Nullen unterhalb
39         factor = matrix[j][i] / matrix[i][i]
40         for k in range(i, m):
41             matrix[j][k] = matrix[j][k] - matrix[i][k] * ←
                factor
42         if constants and len(constants[0]) > 0:
43             num_const_cols = len(constants[0])
44             for c_col in range(num_const_cols):
45                 constants[j][c_col] = constants[j][c_col] ←
                    ] - constants[i][c_col] * factor
46
47     i += 1
48
49     return matrix, constants

```

21. Übungsblatt 7

21.1 Aufgabe 1

21.1.1 a

$$\begin{aligned} A &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 5 & 0 \\ -1 & -1 & 7 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 4 & 2 & 1 \\ 1 & 6 & 1 \\ 0 & 1 & 7 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 \cdot 4 + 2 \cdot 1 + 3 \cdot 0 & 1 \cdot 2 + 2 \cdot 6 + 3 \cdot 1 & 1 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + 3 \cdot 7 \\ 1 \cdot 4 + 5 \cdot 1 + 0 \cdot 0 & 1 \cdot 2 + 5 \cdot 6 + 0 \cdot 1 & 1 \cdot 1 + 5 \cdot 1 + 0 \cdot 7 \\ -1 \cdot 4 - 1 \cdot 1 + 7 \cdot 4 & -1 \cdot 2 - 1 \cdot 6 + 7 \cdot 1 & -1 \cdot 1 - 1 \cdot 1 + 7 \cdot 7 \end{pmatrix} \\ &\quad \begin{pmatrix} 6 & 17 & 24 \\ 9 & 32 & 6 \\ -5 & -1 & 47 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

21.1.2 b

$$\begin{aligned} w &= \begin{pmatrix} 0 & 4 & 3 \\ 5 & 5 & 9 \\ 1 & 0 & 7 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 0 \cdot 1 + 4 \cdot 0 + 3 \cdot 5 \\ 5 \cdot 1 + 5 \cdot 0 + 9 \cdot 5 \\ 1 \cdot 1 + 0 \cdot 0 + 7 \cdot 5 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 15 \\ 50 \\ 36 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

21.1.3 c

$$\begin{aligned} &A \cdot w \\ &= \begin{pmatrix} 6 \cdot 15 + 17 \cdot 50 + 24 \cdot 36 \\ 9 \cdot 15 + 32 \cdot 50 + 6 \cdot 36 \\ -5 \cdot 15 - 1 \cdot 50 + 47 \cdot 36 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1804 \\ 1951 \\ 1567 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

21.2 Aufgabe 2

Gegeben seien die Vektoren

$$u_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}, u_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}, u_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, u_4 = \begin{pmatrix} 4 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix}, w = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 5 \end{pmatrix}$$

sowie die lineare Abbildung $\varphi : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ mit:

$$\varphi(u_1) = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \varphi(u_2) = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}, \varphi(u_3) = \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \\ 7 \end{pmatrix}$$

21.2.1 a

Zeigen Sie, dass die Vektoren $\{u_1, u_2, u_3\}$ eine Basis des \mathbb{R}^3 bilden.

Prüfen auf lineare Unabhängigkeit

$$\begin{aligned} & x_1 u_1 + x_2 u_2 + x_3 u_3 = 0 \\ \Leftrightarrow & x_1 \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix} + x_2 \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} + x_3 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\ \Leftrightarrow & \begin{pmatrix} x_1 \\ 2x_1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_2 \\ -x_2 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\ & \begin{cases} \text{I:} & x_1 + x_2 = 0 \\ \text{II:} & 2x_1 - x_2 = 0 \\ \text{III:} & x_3 = 0 \end{cases} \\ & \text{I} = \text{II} \\ & x_1 + x_2 = 2x_1 - x_2 \quad | -x_1 \quad | +x_2 \\ & \Leftrightarrow 2x_2 = x_1 \\ & \Leftrightarrow x_1 = 2x_2 \\ & \text{in I einsetzen} \\ & 2x_2 + x_2 = 0 \\ & \Leftrightarrow 3x_2 = 0 \quad | : 3 \\ & \Leftrightarrow x_2 = 0 \\ & x_1 = 2 \cdot 0 \\ & \Leftrightarrow x_1 = 0 \end{aligned}$$

Die einzige Lösung des linearen Gleichungssystems ist $x_1 = x_2 = x_3 = 0$. Das bedeutet, dass die Vektoren $\{u_1, u_2, u_3\}$ linear unabhängig sind. Dementsprechend bilden sie eine Basis des \mathbb{R}^3

21.2.2 b

Berechnen Sie $\varphi(u_4)$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix}$$
$$\begin{cases} \text{I:} & x_1 + x_2 = 4 \\ \text{II:} & 2x_1 - x_2 = 2 \\ \text{III:} & x_3 = 2 \end{cases}$$
$$\text{I} + \text{II} \begin{cases} \text{I:} & 3x_1 = 6 \quad | : 3 \Leftrightarrow x_1 = 2 \\ \text{II:} & 2x_1 - x_2 = 2 \\ \text{III:} & x_3 = 2 \end{cases}$$

in II einsetzen

$$2 \cdot 2 - x_2 = 2$$
$$\Leftrightarrow 4 - x_2 = 2 \quad | -4 \quad | \cdot (-1)$$
$$\Leftrightarrow x_2 = 2$$

u_4 ist linear abhängig zu den Vektoren $\{u_1, u_2, u_3\}$ mit den Faktor 2.

$$\begin{aligned} u_1, u_2, u_3 &= u_4 \\ \varphi(u_1), \varphi(u_2), \varphi(u_3) &= \varphi(u_4) \\ \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & -1 \\ 0 & 3 & 7 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix} &= \varphi(u_4) \\ 2 \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + 2 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} + 2 \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \\ 7 \end{pmatrix} &= \varphi(u_4) \\ = \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \\ 6 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 4 \\ -2 \\ 14 \end{pmatrix} &= \varphi(u_4) \\ = \begin{pmatrix} 6 \\ 4 \\ 20 \end{pmatrix} &= \varphi(u_4) \end{aligned}$$

21.2.3 c

Geben Sie einen Vektor u_5 an, mit $\varphi(u_5) = w$.

$$\begin{aligned} \varphi(u_5) &= x_1 \cdot \varphi(u_1) + x_2 \cdot \varphi(u_2) + x_3 \cdot \varphi(u_3) \\ \varphi(u_5) &= x_1 \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + x_2 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} + x_3 \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \\ 7 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 5 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{cases} \text{I:} & x_2 + 2x_3 = 2 \\ \text{II:} & x_1 + 2x_2 - x_3 = 3 \\ \text{III:} & 3x_2 + 7x_3 = 5 \end{cases}$$

Linearkombination	Konstanten
0 1 2	2
1 2 -1	3
0 3 7	5
Operation: I und II tauschen	
1 2 -1	3
0 1 2	2
0 3 7	5
Operation: III - 3II	
1 2 -1	3
0 1 2	2
0 0 1	-1
Operation: II - 2III	
1 2 -1	3
0 1 0	4
0 0 1	-1
Operation: I + III	
1 2 0	2
0 1 0	4
0 0 1	-1
Operation: I - 2II	
1 0 0	-6
0 1 0	4
0 0 1	-1

$$\begin{aligned}
x_1 &= -6, \quad x_2 = 4, \quad x_3 = -1 \\
u_5 &= -6 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix} + 4 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} - 1 \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} -6 \\ -12 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 4 \\ -4 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} -2 \\ -16 \\ -1 \end{pmatrix} = u_5
\end{aligned}$$

21.2.4 d

Geben Sie die lineare Abbildung φ in der Form $\varphi(x) = Ax$ an.

$$c_{1,1} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix} + c_{2,1} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} + c_{3,1} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} \text{I:} & c_{1,1} + c_{2,1} = 1 \\ \text{II:} & 2c_{1,1} - c_{2,1} = 0 \\ \text{III:} & c_{3,1} = 0 \end{cases}$$

I + II

$$\begin{cases} \text{I:} & 3c_{1,1} = 1 \quad | : 3 \Leftrightarrow c_{1,1} = \frac{1}{3} \\ \text{II:} & 2c_{1,1} - c_{2,1} = 0 \\ \text{III:} & c_{3,1} = 0 \end{cases}$$

in II einsetzen

$$\begin{cases} \text{I:} & c_{1,1} = \frac{1}{3} \\ \text{II:} & 2 \cdot \frac{1}{3} - c_{2,1} = 0 \quad | + c_{2,1} \Leftrightarrow \frac{2}{3} = c_{2,1} \\ \text{III:} & c_{3,1} = 0 \end{cases}$$

$$c_{1,2} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix} + c_{2,2} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} + c_{3,2} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} \text{I:} & c_{1,2} + c_{2,2} = 0 \\ \text{II:} & 2c_{1,2} - c_{2,2} = 1 \\ \text{III:} & c_{3,2} = 0 \end{cases}$$

I + II

$$\begin{cases} \text{I:} & 3c_{1,2} = 1 \quad | : 3 \Leftrightarrow c_{1,2} = \frac{1}{3} \\ \text{II:} & 2c_{1,2} - c_{2,2} = 1 \\ \text{III:} & c_{3,2} = 0 \end{cases}$$

in II einsetzen

$$\begin{cases} \text{I:} & c_{1,2} = \frac{1}{3} \\ \text{II:} & 2 \cdot \frac{1}{3} - c_{2,2} = 1 \quad | + c_{2,2} \quad | - 1 \Leftrightarrow -\frac{1}{3} = c_{2,2} \\ \text{III:} & c_{3,2} = 0 \end{cases}$$

$$c_{1,3} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix} + c_{2,3} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} + c_{3,3} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} \text{I:} & c_{1,3} + c_{2,3} = 0 \\ \text{II:} & 2c_{1,3} - c_{2,3} = 0 \\ \text{III:} & c_{3,3} = 1 \end{cases}$$

I + II

$$\begin{cases} \text{I:} & 3c_{1,3} = 0 \quad | : 3 \Leftrightarrow c_{1,3} = 0 \\ \text{II:} & 2c_{1,3} - c_{2,3} = 0 \\ \text{III:} & c_{3,3} = 1 \end{cases}$$

in II einsetzen

$$\begin{cases} \text{I:} & c_{1,3} = 0 \\ \text{II:} & 2 \cdot 0 - c_{2,3} = 0 \quad | \cdot (-1) \Leftrightarrow c_{2,3} = 0 \\ \text{III:} & c_{3,3} = 1 \end{cases}$$

$$\varphi(e_1) = \frac{1}{3} \cdot \varphi(u_1) + \frac{2}{3} \varphi(u_2)$$

$$\varphi(e_1) = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \frac{2}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$\varphi(e_1) = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{3} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{2}{3} \\ \frac{4}{3} \\ 2 \end{pmatrix}$$

$$\varphi(e_1) = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} \\ \frac{5}{3} \\ 2 \end{pmatrix}$$

$$\varphi(e_2) = \frac{1}{3} \cdot \varphi(u_1) - \frac{1}{3} \cdot \varphi(u_2)$$

$$\varphi(e_2) = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} - \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$\varphi(e_2) = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{3} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{1}{3} \\ -\frac{2}{3} \\ -1 \end{pmatrix}$$

$$\varphi(e_2) = \begin{pmatrix} -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} \\ -1 \end{pmatrix}$$

$$\varphi(e_3) = \varphi(u_3)$$

$$\varphi(e_3) = \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \\ 7 \end{pmatrix}$$

$$A = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & 2 \\ \frac{5}{3} & -\frac{2}{3} & -1 \\ 2 & -1 & 7 \end{pmatrix}$$

$$\varphi(x) = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & 2 \\ \frac{5}{3} & -\frac{2}{3} & -1 \\ 2 & -1 & 7 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}$$

21.3 Aufgabe 3

21.3.1 a

Bestimmen Sie eine lineare Abbildung $T : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$, deren Kern nur den Nullvektor enthält. Bestimmen Sie weiterhin eine lineare Abbildung $S : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$, deren Kern der gesamte Raum \mathbb{R}^3 ist.

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$S = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

21.3.2 b

Bestimmen Sie Bild und Kern der Matrix

$$A = \begin{pmatrix} 2 & 2 & 3 \\ 1 & 1 & 0 \\ -1 & -1 & 1 \end{pmatrix}$$

Bild

$$\begin{aligned} n &= \dim(\text{Bild}(A)) + \dim(\text{Kern}(A)) \\ 3 &= \dim(\text{Bild}(A)) + 1 \quad | -1 \\ &\Leftrightarrow 2 = \dim(\text{Bild}(A)) \end{aligned}$$

Kern

$$\begin{pmatrix} 2 & 2 & 3 \\ 1 & 1 & 0 \\ -1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} \text{I:} & 2x_1 + 2x_2 + 3x_3 = 0 \\ \text{II:} & x_1 + x_2 = 0 \\ \text{III:} & -x_1 - x_2 + x_3 = 0 \end{cases}$$

$$\text{III} + \text{II}$$

$$\begin{cases} \text{I:} & 2x_1 + 2x_2 + 3x_3 = 0 \\ \text{II:} & x_1 + x_2 = 0 \\ \text{III:} & x_3 = 0 \end{cases}$$

in I einsetzen

$$\begin{cases} \text{I:} & 2x_1 + 2x_2 + 3 \cdot 0 = 0 \Leftrightarrow 2x_1 + 2x_2 = 0 \\ \text{II:} & x_1 + x_2 = 0 \quad | -x_2 \Leftrightarrow x_1 = -x_2 \\ \text{III:} & x_3 = 0 \end{cases}$$

in I einsetzen

$$\begin{cases} \text{I:} & 2 \cdot -x_2 + 2x_2 = 0 \Leftrightarrow 0 = 0 \\ \text{II:} & x_1 = -x_2 \\ \text{III:} & x_3 = 0 \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -x_2 \\ x_2 \\ 0 \end{pmatrix}, \text{ wobei } x_2 \in \mathbb{R}$$

$$\text{span} \left\{ \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right\}$$

21.4 Aufgabe 4

21.4.1 a

Es sei $T : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ gegeben durch: $T \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2x \\ 4x - y \\ 2x + 3y \end{pmatrix}$. Zeigen Sie, dass T invertierbar ist, und geben Sie eine Formel für T^{-1} an.

Prüfen, ob Matrix invertierbar ist

Dass eine Matrix invertierbar ist, muss sie linear unabhängig sein. $\rightarrow \det(T) \neq 0$.

$$\begin{aligned} \det \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 4 & -1 & 0 \\ 2 & 3 & 0 \end{pmatrix} \end{pmatrix} &= 2 \cdot -1 \cdot 0 + 0 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot 4 \cdot 3 \\ &\quad - 2 \cdot -1 \cdot 0 - 3 \cdot 0 \cdot 0 - 0 \cdot 4 \cdot 0 \\ \det \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 4 & -1 & 0 \\ 2 & 3 & 0 \end{pmatrix} \end{pmatrix} &= 0 \end{aligned}$$

Die Matrix ist nicht invertierbar.

21.4.2 b

Bestimmen Sie die inverse Matrix für

$$A = \begin{pmatrix} 2 & 2 & 3 \\ 1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

Prüfen, ob Matrix invertierbar ist

$$\begin{aligned} \det \left(\begin{pmatrix} 2 & 2 & 3 \\ 1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & 1 \end{pmatrix} \right) &= 2 \cdot (-1) \cdot 1 + 2 \cdot 0 \cdot (-1) + 3 \cdot 1 \cdot 2 \\ &\quad - (-1 \cdot (-1) \cdot 3 - 2 \cdot 0 \cdot 2 - 1 \cdot 1 \cdot 2) \\ &= -2 + 0 + 6 - 3 - 0 - 2 \\ &= -1 \end{aligned}$$

Die Matrix ist invertierbar.

Linearkombination	Konstanten
2 2 3	1 0 0
1 -1 0	0 1 0
-1 2 1	0 0 1
Operation: II + III	
2 2 3	1 0 0
0 1 1	0 1 1
-1 2 1	0 0 1
Operation: I + III	
1 4 4	1 0 1
0 1 1	0 1 1
-1 2 1	0 0 1
Operation: III + I	
1 4 4	1 0 1
0 1 1	0 1 1
0 6 5	1 0 2
Operation: III - 6II	
1 4 4	1 0 1
0 1 1	0 1 1
0 0 -1	1 -6 -4
Operation: I - 4II	
1 0 0	1 -4 -3
0 1 1	0 1 1
0 0 -1	1 -6 -4
Operation: II + III	
1 0 0	1 -4 -3
0 1 0	1 -5 -3
0 0 -1	1 -6 -4
Operation: III · (-1)	
1 0 0	1 -4 -3
0 1 0	1 -5 -3
0 0 1	-1 6 4

Die Inverse der Matrix ist also $\begin{pmatrix} 1 & -4 & -3 \\ 1 & -5 & -3 \\ -1 & 6 & 4 \end{pmatrix}$.

22. Übungsblatt 8

22.1 Aufgabe 1

22.1.1 a

Bestimmen Sie Skalarprodukt und Kreuzprodukt der Einheitsvektoren $e_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ und $e_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$.

Skalarprodukt

$$\begin{aligned} & \langle e_1, e_2 \rangle \\ &= 1 \cdot 0 + 0 \cdot 1 + 0 \cdot 0 \\ &= 0 + 0 + 0 \\ &= 0 \end{aligned}$$

Kreuzprodukt

$$\begin{aligned} & e_1 \times e_2 \\ &= \begin{pmatrix} 0 \cdot 0 - 0 \cdot 1 \\ 0 \cdot 0 - 1 \cdot 0 \\ 1 \cdot 1 - 0 \cdot 0 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

22.1.2 b

Sei $v \in \mathbb{R}^n$ beliebig. Sei $e_i \in \mathbb{R}^n (i \in \{1, \dots, n\})$ der i-te Einheitsvektor in \mathbb{R}^n . Bestimmen Sie $\langle v, e_i \rangle$ und (für den Fall $n = 3$) $v \times e_i$.

Skalarprodukt

$$\begin{aligned} & \langle v, e_1 \rangle \\ &= v_1 \cdot 1 + v_2 \cdot 0 + v_3 \cdot 0 \\ &= v_1 \end{aligned}$$

allgemein

$$\begin{aligned} & \langle v, e_i \rangle \\ &= v_1 \cdot e_1 + v_2 \cdot e_2 + \cdots + v_n \cdot e_i \\ &= v_i \end{aligned}$$

Kreuzprodukt

$$\begin{aligned} & v \times e_1 \\ &= \begin{pmatrix} v_2 \cdot 0 - v_3 \cdot 0 \\ v_3 \cdot 1 - v_1 \cdot 0 \\ v_1 \cdot 0 - v_2 \cdot 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 0 \\ v_3 \\ -v_2 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & v \times e_2 \\ &= \begin{pmatrix} v_2 \cdot 0 - v_3 \cdot 1 \\ v_3 \cdot 0 - v_1 \cdot 0 \\ v_1 \cdot 1 - v_2 \cdot 0 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} -v_3 \\ 0 \\ v_1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & v \times e_3 \\ &= \begin{pmatrix} v_2 \cdot 1 - v_3 \cdot 0 \\ v_3 \cdot 0 - v_1 \cdot 1 \\ v_1 \cdot 0 - v_2 \cdot 0 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} v_2 \\ -v_1 \\ 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

22.1.3 c

Bestimmen Sie einen Vektor, der auf der von $\begin{pmatrix} 5 \\ 1 \\ 9 \end{pmatrix}$ und $\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 10 \end{pmatrix}$ aufgespannten

Ebene senkrecht steht.

Das Kreuzprodukt zweier Vektoren steht orthogonal auf der von diesen Vektoren aufgespannten Ebene.

$$\begin{pmatrix} 5 \\ 1 \\ 9 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 10 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \cdot 10 - 9 \cdot 2 \\ 9 \cdot 1 - 5 \cdot 10 \\ 5 \cdot 2 - 1 \cdot 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10 - 18 \\ 9 - 50 \\ 10 - 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -8 \\ -41 \\ 9 \end{pmatrix}$$

22.2 Aufgabe 2

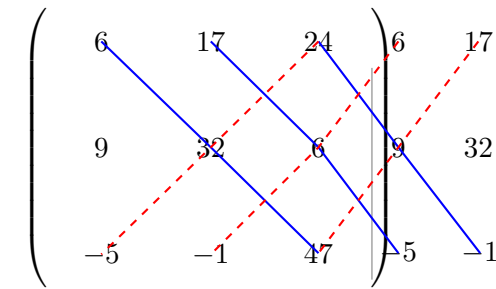
22.2.1 a

Sei $A = \begin{pmatrix} 6 & 17 & 24 \\ 9 & 32 & 6 \\ -5 & -1 & 47 \end{pmatrix}$.

Bestimmen Sie $\det(A)$

1. mittels der Saurrus-Regel
2. mittels der Leibniz-Formel
3. mittels der Kästchenregel

Saurrus Regel



Die Zahlen an den Linien werden Multipliziert. Blaue Linien werden miteinander addiert und Rote subtrahiert.

$$\begin{aligned}
 & 6 \cdot 32 \cdot 47 + 17 \cdot 6 \cdot -5 + 24 \cdot 9 \cdot -1 \\
 & - - 5 \cdot 32 \cdot 24 - -1 \cdot 6 \cdot 6 - 47 \cdot 9 \cdot 17 \\
 & = 4983
 \end{aligned}$$

Leibniz-Formel

Muss ich nachher machen

Kästchenregel

Linearkombination		
6	17	24
9	32	6
-5	-1	47
Operation: III + $\frac{5}{6}$ I		
6	17	24
9	32	6
0	$\frac{79}{6}$	67
Operation: II - $\frac{3}{2}$ I		

Fortsetzung siehe nächste Seite

Table 22.1 – Fortführung von vorheriger Seite			
Linearkombination			
6	17	24	
0	$\frac{13}{2}$	–30	
0	$\frac{79}{6}$	67	

$$\begin{aligned}
 & 6 \cdot \det \left(\begin{pmatrix} \frac{13}{2} & -30 \\ \frac{79}{6} & 67 \end{pmatrix} \right) \\
 &= 6 \cdot \frac{13}{2} \cdot 67 - \frac{79}{6} \cdot -30 \\
 &= 4983
 \end{aligned}$$

22.2.2 b

$$\text{Sei } B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 & 0 \\ 1 & 2 & 9 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 5 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Bestimmen Sie $\det(B)$

Linearkombination				
1	0	2	0	
1	2	9	0	
2	0	1	5	
1	1	1	1	
I und IV tauschen				
1	1	1	1	
1	2	9	0	
2	0	1	5	
1	0	2	0	
IV - 2I				
1	1	1	1	
–1	0	7	–2	
2	0	1	5	
1	0	2	0	
IV + II				
1	1	1	1	
–1	0	7	–2	
2	0	1	5	
0	0	9	–2	
III + 2II				
1	1	1	1	
–1	0	7	–2	
0	0	15	1	
0	0	9	–2	

$$B = \left(\begin{array}{cc|cc} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 7 & -2 \\ \hline 0 & 0 & 15 & 1 \\ 0 & 0 & 9 & -2 \end{array} \right) = \begin{pmatrix} A & B \\ 0 & D \end{pmatrix}$$

wobei $A = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$ und $D = \begin{pmatrix} 15 & 1 \\ 9 & -2 \end{pmatrix}$. Die Determinante ist $\det(M) = \det(A) \cdot \det(D)$.

$\begin{array}{cc} 1 & 1 \\ -1 & 0 \end{array}$	$\begin{array}{cc} 1 & 1 \\ 7 & -2 \end{array}$
$\det(A)$ $\begin{array}{cc} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{array}$	$\begin{array}{cc} 15 & 1 \\ 9 & -2 \end{array}$
	$\det(D)$

$$\begin{aligned} \det(B) &= \underbrace{(1 \cdot 0 - 1 \cdot -1)}_{\det(A)} \cdot \underbrace{(15 \cdot -2 - 9 \cdot 1)}_{\det(D)} = \\ &= (0 - 1) \cdot (-30 - 9) = -1 \cdot -39 = 39 \end{aligned}$$

22.2.3 c

Sei $C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 & 0 \\ 1 & 2 & 9 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 5 \\ 1 & 2 & 9 & 0 \end{pmatrix}$.

Bestimmen Sie ohne Rechnung $\det(C)$.

Die Matrix ist linear abhängig. Daher ist die Determinante $= 0$.

22.3 Aufgabe 3

22.3.1 a

Prüfen Sie die Vektoren $\begin{pmatrix} 5 \\ 1 \\ 9 \end{pmatrix}$, $\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}$ und $\begin{pmatrix} 4 \\ 4 \\ 1 \end{pmatrix}$ auf lineare Unabhängigkeit.

$$\begin{aligned} &\det \left(\begin{pmatrix} 5 & 1 & 4 \\ 1 & 2 & 4 \\ 9 & 3 & 1 \end{pmatrix} \right) \\ &= 5 \cdot 2 \cdot 1 + 1 \cdot 4 \cdot 9 + 4 \cdot 1 \cdot 3 \\ &\quad - 9 \cdot 2 \cdot 4 - 3 \cdot 4 \cdot 5 - 1 \cdot 1 \cdot 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 10 + 36 + 12 - 72 - 60 - 1 \\
&= -75
\end{aligned}$$

22.3.2 b

Ist das lineare Gleichungssystem $Ax = b$ mit $b = \begin{pmatrix} 5 \\ 10 \\ 1 \end{pmatrix}$ und $A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 \\ 1 & 2 & 0 \\ 2 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ eindeutig lösbar?

$$\begin{aligned}
&\det \left(\begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 \\ 1 & 2 & 0 \\ 2 & 0 & 1 \end{pmatrix} \right) \\
&= 1 \cdot 2 \cdot 1 + 0 \cdot 0 \cdot 2 + 2 \cdot 1 \cdot 0 \\
&\quad - 2 \cdot 2 \cdot 2 - 0 \cdot 0 \cdot 1 - 1 \cdot 1 \cdot 0 \\
&= 2 + 0 + 0 - 8 - 0 - 0 \\
&= -6
\end{aligned}$$

Da die Matrix Linear unabhängig ist, ist das Gleichungssystem eindeutig lösbar.

23. Übungsblatt 9

23.1 Aufgabe 1

23.1.1 a

Seien die Geraden G_1 und G_2 definiert durch:

$$G_1 := \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} : \lambda \in \mathbb{R} \right\}$$
$$G_2 := \left\{ \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix} + \mu \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} : \mu \in \mathbb{R} \right\}$$

Wie liegen G_1 und G_2 zueinander im Raum? Bestimmen Sie, je nach Lage, Schnittpunkt oder Abstand der beiden Geraden.

Da beide Vektoren die selben Richtungsvektoren besitzen, sind sie entweder echt parallel oder identisch. Um zu prüfen, ob die beiden Vektoren Identisch sind, muss das Gleichungssystem $G_1 = G_2 + \mu \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ gelöst werden.

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix} + \mu \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$
$$\begin{cases} \text{I:} & 1 = 3 + \mu & | -3 \Leftrightarrow -2 = \mu \\ \text{II:} & 2 = 3 + \mu & | -3 \Leftrightarrow -1 = \mu \\ \text{III:} & 3 = 3 + \mu & | -3 \Leftrightarrow 0 = \mu \end{cases}$$

Da das resultierende Gleichungssystem nicht lösbar ist, sind die Vektoren nicht identisch. Nun muss geprüft werden, ob sie echt parallel zueinander stehen. Hierfür muss der Abstand d der Vektoren $G_1 : r = p_1 + \lambda u$ und $G_2 : r = p_2 + \mu u$ bestimmt werden, welcher sich über die Formel $d = \frac{|(p_2 - p_1) \times u|}{|u|}$ berechnen lässt.

$$d = \frac{|(p_2 - p_1) \times u|}{|u|}$$

$$d = \frac{\left| \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} \right| \times \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}}{\left| \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right|}$$

$$d = \frac{\left| \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right|}{\left| \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right|}$$

$$d = \frac{\left| \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \\ 1 \end{pmatrix} \right|}{\left| \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right|}$$

$$d = \frac{\sqrt{6}}{\sqrt{3}}$$

$$d = \sqrt{2}$$

Der Abstand zwischen den beiden Vektoren beträgt $\sqrt{2}$. Das bedeutet, dass diese echt parallel zueinander sind.

23.1.2 b

Es sei E definiert durch:

$$E := \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} + \mu \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix} : \lambda, \mu \in \mathbb{R} \right\}$$

Geben Sie E in Normalenform an.

Nicht Klausurrelevant?

23.2 Aufgabe 2 - nicht klausurrelevant?

23.2.1 a

Sei $v = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ und $w = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ und $G := \{\lambda w : \lambda \in \mathbb{R}\}$. Bestimmen Sie die

Projektion v_w von v auf die von w aufgespannte Gerade G . Bestimmen Sie weiterhin die Matrix, die die lineare Abbildung $P : \mathbb{R}^3 \rightarrow G, a \mapsto aw$ darstellt. Was ist der Rang dieser Matrix? Was ist ihr Kern? Was ihr Bild?

23.2.2 b

(Transferfrage) Sei $E := \left\{ \lambda \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \mu \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} : \lambda \in \mathbb{R} \right\}$. Sei $v := \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}$. Wie kann man die orthogonale Projektion von v auf E bestimmen? Welcher Vektor kommt dabei heraus?

23.3 Aufgabe 3

23.3.1 a

Sei $D_\pi : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ die lineare Abbildung, die jeden Vektor aus \mathbb{R}^2 um π dreht. Sei $v := \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}$. Sellen Sie die Matrix zu D_π auf und bestimmen Sie $D_\pi(v)$. Bestimmen Sie $\langle v, D_\pi(v) \rangle$.

Die 2x2 Matrix zur Drehung ist $D_\alpha = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix}$. Die Drehmatrix, welche um π dreht, ist somit $D_\pi = \begin{pmatrix} \cos(\pi) & -\sin(\pi) \\ \sin(\pi) & \cos(\pi) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$.

$$\begin{aligned} & D_\pi \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} -1 \cdot 1 + 0 \cdot 2 \\ 0 \cdot 1 + (-1) \cdot 2 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} -1 \\ -2 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \langle v, D_\pi(v) \rangle \\ &= \left\langle \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -1 \\ -2 \end{pmatrix} \right\rangle \\ &= 1 \cdot -1 + 2 \cdot -2 \\ &= -1 + (-4) \\ &= -5 \end{aligned}$$

23.3.2 b

Sei $D : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ die Drehung, die den Vektor $(1, 0, 0)^t$ auf den Vektor $\frac{1}{\sqrt{3}}(1, 1, 1)$ abbildet. Bestimmen Sie die Drehmatrix, die D darstellt.

$$D = \begin{pmatrix} c_1 & c_2 & c_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}
& D \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\
&= \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} c_1 \\ c_1 \\ c_1 \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

Erste Bedingung an c_2

$$\langle c_1, c_2 \rangle = 0$$

$$\left\langle \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \right\rangle = 0$$

$$\begin{aligned}
\frac{1}{\sqrt{3}}x_1 + \frac{1}{\sqrt{3}}x_2 + \frac{1}{\sqrt{3}}x_3 &= 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} \\
x_1 + x_2 + x_3 &= 0
\end{aligned}$$

Zweite Bedingung an c_2

$$|c_2| = 1$$

$$\left| \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \right| = 1$$

$$x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 = 1$$

Wähle $x_3 = 0$

In erste Bedingung einsetzen

$$x_1 + x_2 + 0 = 0 \quad | -x_2$$

$$\Leftrightarrow x_1 = -x_2$$

In zweite Bedingung einsetzen

$$x_1^2 + (-x_1^2) + 0^2 = 1$$

$$x_1^2 + x_1^2 = 1$$

$$2x_1^2 = 1 \quad | :2$$

$$\Leftrightarrow x_1^2 = \frac{1}{2} \quad | \sqrt{}$$

$$\Leftrightarrow x_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$x_2 = -x_1$$

$$x_2 = -\frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$c_2 = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$c_3 = c_1 \times c_2$$

$$c_3 = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$c_3 = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot 0 - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot 0 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot -\frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

$$c_3 = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{6}}{6} \\ \frac{\sqrt{6}}{6} \\ -\frac{\sqrt{6}}{3} \end{pmatrix}$$

$$D = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{\sqrt{6}}{6} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{\sqrt{6}}{6} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & -\frac{\sqrt{6}}{3} \end{pmatrix}$$

23.3.3 c

Sei $\varphi \in [0, 2\pi)$. Bestimmen Sie für die Drehmatrix $A_\varphi \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ und $A_{3,\varphi} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ (Drehung um die x_3 -Achse) die Determinante. Bestimmen Sie weiterhin das Produkt $A_\varphi^t A_\varphi^t$ bzw. $A_{3,\varphi}^t A_{3,\varphi}$. Was ist also die Inverse A_φ^{-1} bzw. $A_{3,\varphi}^{-1}$?

24. Übungsblatt 10

24.1 Aufgabe 1

Bestimmen Sie sämtliche Eigenwerte der folgenden Matrizen:

24.1.1 a

$$A := \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} & A - \lambda \cdot I \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} - \lambda \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1-\lambda & 2 & 3 \\ 4 & 5-\lambda & 6 \\ 0 & 0 & -\lambda \end{pmatrix} =: A_\lambda \\ \det(A_\lambda) &= (1-\lambda) \cdot (5-\lambda) \cdot (-\lambda) \\ &+ 2 \cdot 6 \cdot 0 + 3 \cdot 4 \cdot 0 - 0 \cdot (5-\lambda) \cdot 3 \\ &- 0 \cdot 6 \cdot (1-\lambda) - (-\lambda) \cdot 4 \cdot 2 \\ &= (5-\lambda-5\lambda+\lambda^2) \cdot (-\lambda) + 0 \\ &+ 0 - 0 - 0 + 4\lambda \cdot 2 \\ &= -5\lambda + \lambda^2 + 5\lambda^2 - \lambda^3 + 8\lambda \\ &= -\lambda^3 + 6\lambda^2 + 3\lambda \\ &\quad \lambda \text{ Ausklammern} \\ &\quad \lambda(-\lambda^2 + 6\lambda + 3) \end{aligned}$$

$$\lambda(-\lambda^2 + 6\lambda + 3) = 0$$

Ein Produkt ist null, wenn ein Faktor gleich null ist

$$\begin{aligned}
& \begin{cases} \lambda = 0 & \text{Oder} \\ -\lambda^2 + 6\lambda + 3 = 0 \end{cases} \\
& \lambda_1 = 0 \\
& -\lambda^2 + 6\lambda + 3 = 0 \quad | \cdot (-1) \\
& \Leftrightarrow \lambda^2 - 6\lambda - 3 = 0 \quad | \text{PQ-Formel} \\
& p = 6 \quad q = -3 \\
& \lambda_{2,3} = -\frac{-6}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{6}{2}\right)^2 + 3} \\
& \lambda_{2,3} = 3 \pm \sqrt{(3)^2 + 3} \\
& \lambda_{2,3} = 3 \pm \sqrt{9 + 3} \\
& \lambda_{2,3} = 3 \pm \sqrt{12}
\end{aligned}$$

$$\lambda_1 = 0, \quad \lambda_2 = 3 + \sqrt{12}, \quad \lambda_3 = 3 - \sqrt{12}$$

24.1.2 b

$$B := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}
& B - \lambda \cdot I \\
& \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} - \lambda \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
& \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{pmatrix} \\
& \begin{pmatrix} 1-\lambda & 1 & 1 \\ 1 & 1-\lambda & 1 \\ 1 & 1 & 1-\lambda \end{pmatrix} =: B_\lambda \\
& \det(B_\lambda) = (1-\lambda) \cdot (1-\lambda) \cdot (1-\lambda) \\
& + 1 \cdot 1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 \cdot 1 - 1 \cdot (1-\lambda) \cdot 1 \\
& - 1 \cdot 1 \cdot (1-\lambda) - (1-\lambda) \cdot 1 \cdot 1 \\
& = (1-\lambda - \lambda + \lambda^2) \cdot (1-\lambda) + 1 \\
& + 1 - (1-\lambda) - (1-\lambda) - (1-\lambda) \\
& = (1-2\lambda + \lambda^2) \cdot (1-\lambda) + 2 - 3(1-\lambda) \\
& = 1 - 2\lambda + \lambda^2 - \lambda + 2\lambda^2 - \lambda^3 + 2 - 3 + 3\lambda \\
& = -\lambda^3 + 3\lambda^2 \\
& -\lambda^3 + 3\lambda^2 = 0
\end{aligned}$$

λ Ausklammern

$$\lambda(-\lambda^2 + 3\lambda) = 0$$

Ein Produkt ist null, wenn mindestens ein Faktor gleich null ist.

$$\begin{cases} \lambda = 0 & \text{Oder} \\ -\lambda^2 + 3\lambda = 0 \end{cases}$$

$$\lambda_1 = 0$$

λ Ausklammern

$$\lambda(\lambda + 3) = 0$$

Ein Produkt ist null, wenn mindestens ein Faktor gleich null ist.

$$\begin{cases} \lambda = 0 & \text{Oder} \\ \lambda + 3 = 0 \end{cases}$$

$$\lambda_2 = 0$$

$$\lambda_3 + 3 = 0 \quad | -3$$

$$\lambda_3 = -3$$

$$\lambda_1 = 0, \quad \lambda_2 = 0, \quad \lambda_3 = -3$$

24.1.3 c

$$C := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$C - \lambda \cdot I$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} - \lambda \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} -\lambda & 0 & 0 \\ 0 & -\lambda & 0 \\ 0 & 0 & -\lambda \end{pmatrix} =: C_\lambda$$

$$\begin{aligned} \det(C_\lambda) &= -\lambda \cdot -\lambda \cdot -\lambda \\ &= -\lambda^3 \end{aligned}$$

$$-\lambda^3 = 0 \quad | \cdot (-1)$$

$$\Leftrightarrow \lambda^3 = 0 \quad | \sqrt[3]{}$$

$$\Leftrightarrow \lambda_{1,2,3} = 0$$

24.1.4 d

$$D := \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 2 & 3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} D - \lambda \cdot I \\ \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 2 & 3 \end{pmatrix} - \lambda \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 2 & 3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} -\lambda & 1 \\ 2 & 3 - \lambda \end{pmatrix} =: D_\lambda \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \det(D_\lambda) &= -\lambda \cdot (3 - \lambda) - 2 \cdot 1 \\ &= \lambda^2 - 3\lambda - 2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda^2 - 3\lambda - 2 &= 0 \quad |PQ \\ p &= -3 \quad q = -2 \\ -\frac{-3}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{-3}{2}\right)^2 + 2} \\ \frac{3}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{9}{4}\right) + 2} \\ \frac{3}{2} \pm \sqrt{\frac{17}{4}} \\ \lambda_1 &= \frac{3}{2} + \sqrt{\frac{17}{4}}, \quad \lambda_2 = \frac{3}{2} - \sqrt{\frac{17}{4}} \end{aligned}$$

24.2 Aufgabe 2

24.2.1 a

Ist die Matrix $A := \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{pmatrix}$ positiv definit?

$$\begin{aligned} \det(\Delta_1) &= 1 \\ \det(\Delta_2) &= 1 \cdot 5 - 2 \cdot 4 = -3 \end{aligned}$$

Die Determinante des dritten Hauptminoren ist hier uninteressant, da die Vorzeichenfolge für positive definitheit durch den zweiten Hauptminoren bereits verletzt wurde. Die Matrix ist *nicht* positiv definit, sondern Indefinit.

24.2.2 b

Wie kann man das Hauptminorenkriterium nutzen, um zu zeigen, dass eine Matrix negativ definit ist? Nutzen Sie Ihr Ergebnis, um zu zeigen, dass die Matrix $B := \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ -2 & 1 \end{pmatrix}$ (negativ definit ist??)

$$\det(\Delta_1) = -1$$

$$\det(\Delta_2) = -1 \cdot 1 - (-2) \cdot 1 = 1$$

Die Matrix ist negativ definit.

24.3 Aufgabe 3

24.3.1 a

Für welche Winkel $\varphi \in [0, 2\pi)$ hat eine Drehmatrix $A_\varphi \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ reelle Eigenwerte? Lösen Sie diese Aufgabe einerseits durch geometrische Argumentation, andererseits rechnerisch.

Geometrische Argumentation

Drehmatritzen mit gerader Dimension haben keine reellen Eigenwerte. Aus diesem Grund hat nur die Drehmatrix, welche um den Winkel 0 dreht (also gar nicht dreht) reelle Eigenwerte.

Rechnerisch

$$A_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \lambda_{1,2} = 1$$

$$\det \left(\begin{pmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix} \right) = 0$$

$$(\cos(\varphi) - \lambda) \cdot (\cos(\varphi) - \lambda) - \sin(\varphi) \cdot -\sin(\varphi) = 0$$

$$\cos(\varphi)^2 - \cos(\varphi) \cdot \lambda - \cos(\varphi) \cdot \lambda + \lambda^2 + \sin(\varphi)^2 = 0$$

$$\cos(\varphi)^2 + \sin(\varphi)^2 - 2 \cdot \cos(\varphi) \cdot \lambda + \lambda^2 = 0$$

$$1 - 2 \cdot \cos(\varphi) \cdot \lambda + \lambda^2 = 0 \quad |PQ$$

$$p = -2 \cdot \cos(\varphi), \quad q = 1$$

$$-\frac{-2 \cdot \cos(\varphi)}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{-2 \cdot \cos(\varphi)}{2}\right)^2 - 1}$$

$$\cos(\varphi) \pm \sqrt{(-\cos(\varphi))^2 - 1}$$

$$\cos(\varphi) \pm \sqrt{\cos(\varphi)^2 - 1}$$

$$\cos(\varphi) \pm \sqrt{-\sin(\varphi)^2}$$

Aus negativen Zahlen kann die Wurzel nicht gezogen werden.

Für alle $\varphi \neq 0$ Gibt es keine reellen Lösungen.

24.3.2 b

Bestimmen Sie mindestens eine Matrix, die in $O(n) \setminus SO(n)$ enthalten ist.

$$\det \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \end{pmatrix} = -1$$

25. Übungsblatt 11

25.1 Aufgabe 1

Bestimmen Sie jeweils sämtliche Eigenvektoren der folgenden Matritzen.
Hinweis: Die Eigenwerte haben Sie bereits auf dem letzten Übungsblatt bestimmt:

25.1.1 a

$$A := \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_1 = 0, \quad \lambda_2 = 3 + \sqrt{12}, \quad \lambda_3 = 3 - \sqrt{12}$$

$$\begin{pmatrix} 1 - \lambda & 2 & 3 \\ 4 & 5 - \lambda & 6 \\ 0 & 0 & -\lambda \end{pmatrix}$$

Für $\lambda_1 = 0$

$$\begin{pmatrix} 1 - 0 & 2 & 3 \\ 4 & 5 - 0 & 6 \\ 0 & 0 & 0 - 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} \text{I:} & 1 \cdot x_1 + 2 \cdot x_2 + 3 \cdot x_3 = 0 \\ \text{II:} & 4 \cdot x_1 + 5 \cdot x_2 + 6 \cdot x_3 = 0 \\ \text{III:} & 0 \cdot x_1 + 0 \cdot x_2 + 0 \cdot x_3 = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{I:} & 1x_1 + 2x_2 + 3x_3 = 0 \\ \text{II:} & 4x_1 + 5x_2 + 6x_3 = 0 \\ \text{III:} & 0 = 0 \end{cases}$$

Linearkombination		
1	2	3
4	5	6
II - 2I		
1	2	3
2	1	0
I - 2II		
-3	0	3
2	1	0
I : (-3)		
1	0	-1
2	1	0
II - 2I		
1	0	-1
0	1	-2

$$\begin{cases} \text{I:} & x_1 - x_3 = 0 \quad | + x_3 \Leftrightarrow x_1 = x_3 \\ \text{II:} & x_2 - 2x_3 = 0 \quad | + 2x_3 \Leftrightarrow x_2 = 2x_3 \end{cases}$$

$$x_3 = t, \text{ mit } t \in \mathbb{R}$$

$$L = \left\{ t \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$$

$$\text{span} = \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$$

Für $\lambda_2 = 3 + \sqrt{12}$

$$\begin{pmatrix} 1 - \lambda & 2 & 3 \\ 4 & 5 - \lambda & 6 \\ 0 & 0 & 0 - \lambda \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 - (3 + \sqrt{12}) & 2 & 3 \\ 4 & 5 - (3 + \sqrt{12}) & 6 \\ 0 & 0 & 0 - (3 + \sqrt{12}) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 - 3 - \sqrt{12} & 2 & 3 \\ 4 & 5 - 3 - \sqrt{12} & 6 \\ 0 & 0 & 0 - 3 - \sqrt{12} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} -2 - \sqrt{12} & 2 & 3 \\ 4 & 2 - \sqrt{12} & 6 \\ 0 & 0 & -3 - \sqrt{12} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} -2 - \sqrt{12} & 2 & 3 \\ 4 & 2 - \sqrt{12} & 6 \\ 0 & 0 & -3 - \sqrt{12} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} \text{I:} & (-2 - \sqrt{12})x_1 + 2x_2 + 3x_3 = 0 \\ \text{II:} & 4x_1 + (2 - \sqrt{12})x_2 + 6x_3 = 0 \\ \text{III:} & 0x_1 + 0x_2 + (-3 - \sqrt{12})x_3 = 0 \end{cases}$$

Linearkombination		
$-2 - \sqrt{12}$	2	3
4	$2 - \sqrt{12}$	6
0	0	$-3 - \sqrt{12}$
III : $(-3 - \sqrt{12})$		
$-2 - \sqrt{12}$	2	3
4	$2 - \sqrt{12}$	6
0	0	1
$(-2 - \sqrt{12})\text{II} - 4\text{I}$		
$-2 - \sqrt{12}$	2	3
0	0	$-24 - 12\sqrt{3}$
0	0	1
II - $(-24 - 12\sqrt{3})\text{III}$		
$-2 - \sqrt{12}$	2	3
0	0	0
0	0	1
I - 3III		
$-2 - \sqrt{12}$	2	0
0	0	0
0	0	1
I : $(-2 - \sqrt{12})$		
1	$\frac{2}{-2 - \sqrt{12}}$	0
0	0	0
0	0	1

$$x_2 = t, \text{ mit } t \in \mathbb{R}$$

$$\begin{cases} \text{I:} & x_1 + \frac{2}{-2 - \sqrt{12}}t = 0 \quad | - \frac{2}{-2 - \sqrt{12}}t \Leftrightarrow x_1 = -\frac{2}{-2 - \sqrt{12}}t \\ \text{II:} & 0 = 0 \\ \text{III:} & x_3 = 0 \end{cases}$$

$$L = \left\{ t \cdot \begin{pmatrix} -\frac{2}{-2 - \sqrt{12}}t \\ t \\ 0 \end{pmatrix} \right\}$$

$$\text{span} = \left\{ \begin{pmatrix} -\frac{2}{-2-\sqrt{12}} \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right\}$$

Für $\lambda_3 = 3 - \sqrt{12}$

$$\begin{pmatrix} 1-\lambda & 2 & 3 \\ 4 & 5-\lambda & 6 \\ 0 & 0 & 0-\lambda \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1-(3-\sqrt{12}) & 2 & 3 \\ 4 & 5-(3-\sqrt{12}) & 6 \\ 0 & 0 & 0-(3-\sqrt{12}) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} -2+\sqrt{12} & 2 & 3 \\ 4 & 2+\sqrt{12} & 6 \\ 0 & 0 & -3+\sqrt{12} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} -2+\sqrt{12} & 2 & 3 \\ 4 & 2+\sqrt{12} & 6 \\ 0 & 0 & -3+\sqrt{12} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} \text{I:} & (-2+\sqrt{12})x_1 + 2x_2 + 3x_3 = 0 \\ \text{II:} & 4x_1 + (2+\sqrt{12})x_2 + 6x_3 = 0 \\ \text{III:} & (-3+\sqrt{12})x_3 = 0 \end{cases}$$

Linearkombination		
$-2+\sqrt{12}$	2	3
4	$2+\sqrt{12}$	6
0	0	$-3+\sqrt{12}$
III : $(-3+\sqrt{12})$		
$-2+\sqrt{12}$	2	3
4	$2+\sqrt{12}$	6
0	0	1
I - 3III		
II - 6III		
$-2+\sqrt{12}$	2	0
4	$2+\sqrt{12}$	0
0	0	1
$(-2+\sqrt{12})\text{II} - 4\text{I}$		
$-2+\sqrt{12}$	2	0
0	0	0
0	0	1
I : $(-2+\sqrt{12})$		
1	$\frac{2}{-2+\sqrt{12}}$	0
0	0	0
0	0	1

$$\begin{cases} \text{I:} & x_1 + \frac{2}{-2+\sqrt{12}}x_2 = 0 \quad | - \frac{2}{-2+\sqrt{12}}x_2 \Leftrightarrow x_1 = \frac{-1+\sqrt{3}}{2}x_2 \\ \text{II:} & 0 = 0 \\ \text{III:} & x_3 = 0 \end{cases}$$

$$x_2 = t \text{ wobei } t \in \mathbb{R}$$

$$\begin{pmatrix} \frac{2}{-2+\sqrt{12}}t \\ t \\ 0 \end{pmatrix} \\ t \cdot \begin{pmatrix} \frac{2}{-2+\sqrt{12}} \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \\ \text{span} \left\{ \begin{pmatrix} \frac{2}{-2+\sqrt{12}} \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right\}$$

25.1.2 b

$$B := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_1 = 0, \quad \lambda_2 = 0, \quad \lambda_3 = -3$$

$$\text{Für } \lambda_1 = \lambda_2 = 0$$

$$\begin{pmatrix} 1-\lambda & 1 & 1 \\ 1 & 1-\lambda & 1 \\ 1 & 1 & 1-\lambda \end{pmatrix}$$

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

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} \text{I:} & x_1 + x_2 + x_3 = 0 \\ \text{II:} & x_1 + x_2 + x_3 = 0 \\ \text{III:} & x_1 + x_2 + x_3 = 0 \end{cases}$$

Linearkombination		
1	1	1
1	1	1
1	1	1
II - I		
1	1	1
0	0	0
1	1	1
III - I		
1	1	1
0	0	0
0	0	0

$$\begin{cases} \text{I:} & x_1 + x_2 + x_3 = 0 \quad | -x_2 - x_3 \Leftrightarrow x_1 = -x_2 - x_3 \\ \text{II:} & 0 = 0 \\ \text{III:} & 0 = 0 \end{cases}$$

$$x_2 = t \text{ wobei } t \in \mathbb{R}$$

$$x_3 = p \text{ wobei } p \in \mathbb{R}$$

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} -t-p \\ t \\ p \end{pmatrix} \\ & t \begin{pmatrix} -1-p \\ 1 \\ p \end{pmatrix} \\ & t \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + p \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \\ & \text{span} = \left\{ \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right\} \end{aligned}$$

$$\text{Für } \lambda_3 = -3$$

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} 1-\lambda & 1 & 1 \\ 1 & 1-\lambda & 1 \\ 1 & 1 & 1-\lambda \end{pmatrix} \\ & \begin{pmatrix} 1-(-3) & 1 & 1 \\ 1 & 1-(-3) & 1 \\ 1 & 1 & 1-(-3) \end{pmatrix} \\ & \begin{pmatrix} 4 & 1 & 1 \\ 1 & 4 & 1 \\ 1 & 1 & 4 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} 4 & 1 & 1 \\ 1 & 4 & 1 \\ 1 & 1 & 4 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} \text{I:} & 4x_1 + x_2 + x_3 = 0 \\ \text{II:} & x_1 + 4x_2 + x_3 = 0 \\ \text{III:} & x_1 + x_2 + 4x_3 = 0 \end{cases}$$

Linearkombination			
4	1	1	
1	4	1	
1	1	4	
II - III			
4	1	1	
0	3	-3	
1	1	4	
4III - I			
4	1	1	
0	3	-3	
0	-3	-15	
III + II			
4	1	1	
0	3	-3	
0	0	-18	
II : 3			
III : -18			
4	1	1	
0	1	-1	
0	0	1	
II + III			
4	1	1	
0	1	0	
0	0	1	
I - III			
4	1	0	
0	1	0	
0	0	1	
II - III			
4	0	0	
0	1	0	
0	0	1	
I : 4			
1	0	0	
0	1	0	
0	0	1	

$$\begin{cases} \text{I:} & x_1 = 0 \\ \text{II:} & x_2 = 0 \\ \text{III:} & x_3 = 0 \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{span} = \left\{ \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right\}$$

25.1.3 c

$$C := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_{1,2,3} = 0$$

$$\text{Für } \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 0$$

$$\begin{pmatrix} 0 - \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 - \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 - \lambda \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} \text{I:} & 0 = 0 \\ \text{II:} & 0 = 0 \\ \text{III:} & 0 = 0 \end{cases}$$

$$x_1 = t \text{ wobei } t \in \mathbb{R}$$

$$x_2 = p \text{ wobei } p \in \mathbb{R}$$

$$x_3 = u \text{ wobei } u \in \mathbb{R}$$

$$\begin{pmatrix} t \\ p \\ u \end{pmatrix}$$

$$t \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + p \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + u \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\text{span} = \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$$

25.1.4 d

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 2 & 3 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_1 = \frac{3}{2} + \sqrt{\frac{17}{4}}, \quad \lambda_2 = \frac{3}{2} - \sqrt{\frac{17}{4}}$$

$$\text{Für } \lambda_1 = \frac{3}{2} + \sqrt{\frac{17}{4}}$$

$$\begin{pmatrix} 0 - \lambda & 1 \\ 2 & 3 - \lambda \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0 - \left(\frac{3}{2} + \sqrt{\frac{17}{4}}\right) & 1 \\ 2 & 3 - \left(\frac{3}{2} + \sqrt{\frac{17}{4}}\right) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0 - \frac{3}{2} - \sqrt{\frac{17}{4}} & 1 \\ 2 & 3 - \frac{3}{2} - \sqrt{\frac{17}{4}} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} -\frac{3}{2} - \sqrt{\frac{17}{4}} & 1 \\ 2 & \frac{3}{2} - \sqrt{\frac{17}{4}} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} -\frac{3}{2} - \sqrt{\frac{17}{4}} & 1 \\ 2 & \frac{3}{2} - \sqrt{\frac{17}{4}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} \text{I:} & -\frac{3}{2} - \sqrt{\frac{17}{4}}x_1 + x_2 = 0 \\ \text{II:} & 2x_1 + \frac{3}{2} - \sqrt{\frac{17}{4}}x_2 = 0 \end{cases}$$

Linearkombination	
$-\frac{3}{2} - \sqrt{\frac{17}{4}}$	1
2	$\frac{3}{2} - \sqrt{\frac{17}{4}}$
$(-\frac{3}{2} - \sqrt{\frac{17}{4}})\text{II} - 2\text{I}$	
$-\frac{3}{2} - \sqrt{\frac{17}{4}}$	1
0	0

$$\begin{cases} \text{I:} & -\frac{3}{2} - \sqrt{\frac{17}{4}}x_1 + x_2 = 0 & -x_2 \\ \text{II:} & 0 = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{I:} & -\frac{3}{2} - \sqrt{\frac{17}{4}}x_1 = -x_2 & -x_2 \\ \text{II:} & 0 = 0 \end{cases}$$

$$x_2 = t \text{ wobei } t \in \mathbb{R}$$

$$\begin{pmatrix} -\frac{3}{2} - \sqrt{\frac{17}{4}} \\ t \end{pmatrix}$$

$$t \cdot \begin{pmatrix} -\frac{3}{2} - \sqrt{\frac{17}{4}} \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\text{span} = \left\{ \begin{pmatrix} -\frac{3}{2} - \sqrt{\frac{17}{4}} \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$$

$$\text{Für } \lambda_2 = \frac{3}{2} - \sqrt{\frac{17}{4}}$$

$$\begin{pmatrix} 0 - \lambda & 1 \\ 2 & 3 - \lambda \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0 - (\frac{3}{2} - \sqrt{\frac{17}{4}}) & 1 \\ 2 & 3 - (\frac{3}{2} - \sqrt{\frac{17}{4}}) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0 - \frac{3}{2} + \sqrt{\frac{17}{4}} & 1 \\ 2 & 3 - \frac{3}{2} + \sqrt{\frac{17}{4}} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} -\frac{3}{2} + \sqrt{\frac{17}{4}} & 1 \\ 2 & \frac{3}{2} + \sqrt{\frac{17}{4}} \end{pmatrix}$$

Linearkombination	
$-\frac{3}{2} + \sqrt{\frac{17}{4}}$	1
2	$\frac{3}{2} + \sqrt{\frac{17}{4}}$
$(-\frac{3}{2} + \sqrt{\frac{17}{4}})\text{II} - 2\text{I}$	
$-\frac{3}{2} + \sqrt{\frac{17}{4}}$	1
0	0

$$\begin{cases} \text{I:} & -\frac{3}{2} + \sqrt{\frac{17}{4}}x_1 + x_2 = 0 & -x_2 \\ \text{II:} & 0 = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{I:} & -\frac{3}{2} + \sqrt{\frac{17}{4}}x_1 = -x_2 & -x_2 \\ \text{II:} & 0 = 0 \end{cases}$$

$$x_2 = t \text{ wobei } t \in \mathbb{R}$$

$$\begin{pmatrix} -\frac{3}{2} + \sqrt{\frac{17}{4}} \\ t \end{pmatrix}$$

$$t \cdot \begin{pmatrix} -\frac{3}{2} + \sqrt{\frac{17}{4}} \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\text{span} = \left\{ \begin{pmatrix} -\frac{3}{2} + \sqrt{\frac{17}{4}} \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$$

Part IV

Übungsaufgaben Stochastik

26. Übungsblatt 5

26.1 Aufgabe 1

26.1.1 a

Wie viele Möglichkeiten gibt es, mit der rechten Hand eine zwei zu zeigen (also zwei Finger ausgestreckt, die andere eingeklappt zu lassen)? (Anatomisch schwierige Kombinationen und Verrenkungen werden mitgezählt!)

26.1.2 b

Wie viele Möglichkeiten gibt es, irgendeine Zahl zwischen 0 und 5 mit einer Hand zu zeigen? (Auch hier: missverständliche Handzeichen und Verrenkungen werden mitgezählt)

26.2 Aufgabe 2

Eine Freundin hat Ihnen zum Geburtstag sämtliche Buchstaben Ihres Vor- und Nachnamens aus Beton gegossen. Wie (unterscheidbare) viele Wörter können Sie damit bilden, ohne Buchstaben wegzulassen? Wie viele davon enthalten Ihren Vornamen?

26.3 Aufgabe 3

Sie werfen eine (faire) Münze dreimal.

26.3.1 a

Was ist ein passender Ereignisraum Ω ?

26.3.2 b

Wie viele Elemente hat die Potenzmenge $\mathcal{P}(\Omega)$?

26.3.3 c

Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass Sie dreimal dasselbe Ergebnis erzielen?

27. Übungsblatt 6

27.1 Aufgabe 1

27.1.1 a

In der Vorlesung wurde behauptet, dass die Binomalverteilung viele mit der Bernoulli-Verteilung zu tun hat. Sortieren Sie für sich selbst: wie hängen die beiden genau zusammen?

27.1.2 b

Zeichnen Sie das Stäbchendiagramm zu $B(5, \frac{1}{6})$

27.2 Aufgabe 2

27.2.1 a

Sie haben Geburtstag und Ihr Lieblingsonkel liebt seltsame Geschenke. Als Teil seines Geburtstagsgeschenks sollen Sie ein Spiel mit ihm spielen: sie müssen 10 Mal mit einem 12-seitigen Würfel würfeln. Würfeln Sie dabei mindestens 2 Mal den Monat Ihres Geburtstags, dann schenkt Ihr Onkel Ihnen ein neues Fahrrad. Wenn nicht, schenkt er Ihnen eine Tafel Schokolade. Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass Sie ein Fahrrad bekommen?

27.2.2 b

In einer Pralinschachtel sind 8 mit Marzipan und 8 mit Nougat gefüllte Pralinen, die von außen gleich aussehen, zufällig angeordnet. Sie entnehmen und verspeisen 5 Pralinen. Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass alle 5 Pralinen mit Marzipan gefüllt sind?

27.2.3 c

Erinnern Sie sich an Max aus dem PIN-Beispiel (Foliensatz zu ST-K03, Seite 2 und 3)? Angenommen, er braucht 20 Sekunden, um eine PIN zu probieren. Wie groß ist (im Szenario von Seite 3) die Wahrscheinlichkeit dafür, dass der innerhalb von 5 Minuten die richtige PIN errät, wenn er sich merkt, welche PINs er bereits durchprobiert hat? Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, wenn er sich nicht merkt, welche Zahlenkombinationen er bereits durchprobiert hat?

28. Übungsblatt 7

28.1 Aufgabe 1

Herr Huber hat eine Alarmanlage in seinem Auto installiert. Es werden die Ereignisse A: "Alarmanlage springt an" und E: "Jemand versucht, das Auto aufzubrechen" betrachtet. Beschreiben Sie die folgenden bedingten Wahrscheinlichkeiten mit Worten: $P(A|E)$, $P(E|A)$, $P(A|EC)$, $P(E|AC)$. Welche dieser bedingten Wahrscheinlichkeiten möglichst hoch bzw. niedrig sein?

28.2 Aufgabe 2

Bei einer Sportveranstaltung wird ein Dopingtest durchgeführt. Wenn ein Sportler gedopt hat, dann fällt der Test zu 99% positiv aus. Hat ein Sportler aber nicht gedopt, zeigt der Test trotzdem zu 5% ein positives Ergebnis an. Aus Erfahrung weiß man das 20% der Sportler gedopt sind.