

Inhaltsverzeichnis

0	Der Vektorraum \mathbb{R}^n	7
0.1	Satz (Rechenregeln in \mathbb{R}^n)	8
0.2	Definition	9
0.3	Beispiele	9
0.4	Satz	10
0.5	Beispiel	11
0.6	Definition	12
0.7	Beispiel	13
0.9	Definition	15
0.10	Beispiel	15
0.11	Satz	17
0.12	Satz	18
0.13	Definition	19
0.14	Beispiel	19
0.15	Satz	20
0.16	Satz	21
0.17	Definition	21
0.18	Satz (Basisergänzungssatz)	21
0.19	Korollar	21
0.20	Definition	22
0.21	Beispiele	22
1	Algebraische Strukturen	23
1.1	Definition	23
1.2	Beispiele	23
1.3	Definition	24
1.4	Bemerkung	25
1.5	Proposition	25
1.6	Beispiel	26
1.7	Satz	28
1.8	Beispiel	29

1.9 Beispiel	29
1.10 Satz (Gleichungslösen in Gruppen)	30
1.11 Beispiel	30
1.12 Definition	30
1.13 Beispiele	31
1.14 Proposition	32
1.15 Bemerkung	32
1.16 Definition	32
1.17 Beispiel	33
1.18 Proposition (Nullteilerfreiheit in Körpern)	33
1.19 Definition	33
1.20 Satz und Definition	34
1.21 Bemerkung	34
1.22 Definition	35
1.23 Satz	35
1.24 Korollar	35
1.25 Bemerkung	36
1.26 Definition	37
1.27 Satz	37
1.28 Beispiel	38
1.29 Korollar	38
1.30 Definition	39
1.31 Beispiel	39
1.32 Satz	39
1.33 Korollar	40
1.34 Bemerkung	40
1.35 Fundamentalsatz der Algebra	41
2 Vektorräume	41
2.1 Definition	41
2.2 Beispiel	41
2.3 Proposition	43
2.4 Definition	43

2.5 Proposition	43
2.6 Beispiel	44
2.7 Proposition	44
2.8 Definition	44
2.9 Satz	45
2.10 Definition	45
2.11 Beispiel	45
2.12 Definition	46
2.13 Beispiel	46
2.14 Bemerkung	48
2.15 Satz !!!	48
2.16 Definition	48
2.17 Beispiel	49
2.18 Satz (Existenz von Basen)	50
2.19 Lemma	50
2.20 Satz (Austauschsatz von Steinitz)	51
2.21 Korollar	52
2.22 Satz	52
2.23 Definition	53
2.24 Korollar	53
2.25 Beispiel	53
2.26 Satz	55
2.27 Definition	55
2.28 Beispiel	55
2.29 Definition	57
2.30 Satz	57
2.31 Bemerkung	58
2.32 Bemerkung	58
2.33 Satz	59
2.34 Beispiel	60
3 Lineare Abbildungen	60
3.1 Definition	60

3.2	Bemerkung	61
3.3	Beispiel	61
3.4	Satz	62
3.5	Satz	63
3.6	Satz	64
3.7	Definition	64
3.8	Satz	65
3.9	Beispiel	66
3.10	Satz	67
3.11	Beispiel	68
3.12	Satz	68
3.13	Korollar	69
3.14	Korollar – Wichtigster Spezialfall	69
3.15	Satz (Dimensionsformel)	69
3.16	Korollar	70
4	Der Rang einer Matrix und lineare Gleichungssysteme	71
4.1	Definition	71
4.2	Satz	71
4.3	Bemerkung	71
4.4	Korollar	72
4.5	Satz	72
4.6	Satz und Definition	73
4.7	Korollar	73
4.8	Satz	73
4.9	Beispiel	74
5	Matrizen und lineare Abbildungen	74
5.1	Definition	74
5.2	Bemerkung	75
5.3	Beispiel	75
5.4	Satz	76
5.5	Beispiel	76
5.6	Korollar	77

5.7 Satz	77
5.8 Beispiel	78
5.9 Definition	78
5.10 Korollar	79
5.11 Satz	79
5.12 Lemma	79
5.13 Bestimmung der Inversen einer invertierbaren Matrix (Gauß-Jordan- Verfahren)	80
5.14 Beispiel	80
5.15 Bemerkung	81
5.16 Definition	81
5.17 Satz	81
5.18 Satz	82
5.19 Beispiel	82
5.20 Satz	82
5.21 Korollar	83
5.22 Beispiel	83
6 Determinanten	83
6.1 Definition	84
6.2 Laplacescher Entwicklungssatz	84
6.3 Beispiel	85
6.4 Korollar	86
6.5 Rechenregeln für Determinante	86
6.6 Bemerkung	87
6.7 Beispiel	87
6.8 Satz	87
6.9 Definition	87
6.10 Satz	88
6.11 Beispiel	88

Abbildungsverzeichnis

1	Ein Vektor dargestellt durch seinen Ortsvektor	8
2	Vektoraddition durch Parallelogrammbildung	8
3	Gerade dargestellt durch Vektoren	10
4	Eindimensionale Unterräume im \mathbb{R}^2	56

Ende des SS 2015

0 Der Vektorraum \mathbb{R}^n

$$n \in \mathbb{N} \quad \mathbb{R}^n = \left\{ \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} : a_i \in \mathbb{R} \right\}$$

Spaltenvektoren der Länge n : $\begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} = (a_1, \dots, a_n)^t$

a_1, \dots, a_n Komponente der Spaltenvektoren.

Wie bei Matrizen:

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 + b_1 \\ \vdots \\ a_n + b_n \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{(Multiplikation entspricht der Matri-} \\ \text{zenmultiplikation und ist nicht mög-} \\ \text{lich falls } n > 1) \end{array}$$

Multiplikation eines Spaltenvektors mit einer Zahl (Skalar)

$$a \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} aa_1 \\ \vdots \\ aa_n \end{pmatrix}$$

Addition+Abbildung : $\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$

\mathbb{R}^n mit Addition und Multiplikation mit Skalaren : \mathbb{R} -Vektorraum

Die Vektoren im $\mathbb{R}^1 (= \mathbb{R})$, \mathbb{R}^2 und \mathbb{R}^3 entsprechen Punkten auf der Zahlengerade, Ebene, dreidimensionalen Raums. Punkte des $\mathbb{R}^2, \mathbb{R}^3$ lassen sich identifizieren mit, Ortsvektoren Pfeile mit Beginn in 0 (Komp = 0) und Ende im entsprechenden Punkt

Addition von Spaltenvektoren entspricht der Addition von Ortsvektoren entsprechend der Parallelogrammregel. Multiplikation mit Skalaren a :

Streckung (falls $|a| > 1$)

Stauchung (falls $0 \geq |a| \geq 1$)

Richtungspunkt, falls $a < 0$

Abbildung 1: Ein Vektor dargestellt durch seinen Ortsvektor

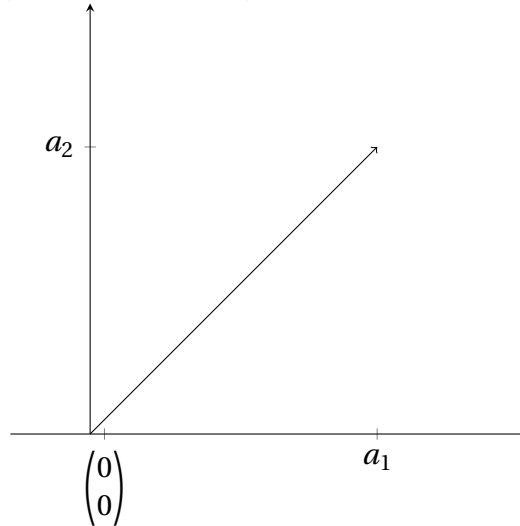
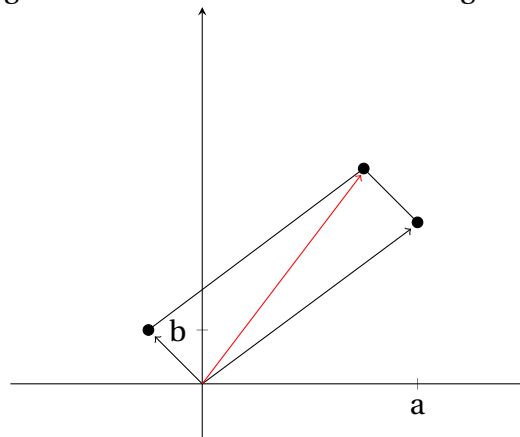


Abbildung 2: Vektoraddition durch Parallelogrammbildung



0.1 Satz (Rechenregeln in \mathbb{R}^n)

Seien $u, v, w \in \mathbb{R}^n$, $a, b \in \mathbb{R}$ Dann gilt:

a)

$$(1.1) \quad u + (v + w) = (u + v) + w$$

$$(1.2) \quad v + 0 = 0 + v = v, \text{ wobei } 0 \text{ Nullvektor}$$

$$(1.3) \quad v + -v = 0$$

$$(1.4) \quad u + v = v + u$$

$$(2.1) \quad (a + b)v = av + bv$$

$$(2.2) \quad a(u + v) = au + av$$

$$(2.3) \quad (a \cdot b)v = a(bv)$$

$$(2.4) \quad 1v = v$$

\mathbb{R}^n kommutative
Gruppe

b) $0 \cdot v = 0$ und $a \cdot 0 = 0$

Beweis folgt aus entsprechenden Rechenregeln in 0

0.2 Definition

Eine nicht-leere Teilmenge $\mathcal{U} \subset \mathbb{R}^n$ heißt *Unterraum* (oder *Teilraum* von \mathbb{R}^n), falls gilt:

(1) $\forall u_1, u_2 \in \mathcal{U} : u_1 + u_2 \in \mathcal{U}$ (Abgeschlossenheit bezüglich +)(2) $\forall u \in \mathcal{U} \forall a \in \mathbb{R} : au \in \mathcal{U}$ (Abgeschlossenheit bezüglich Mult. mit Skalaren) \mathcal{U} enthält Nullvektor $\{0\}$ Unterraum von \mathbb{R}^n (Nullraum) \mathbb{R}^n ist Unterraum von \mathbb{R}

0.3 Beispiele

a) $0 \neq v \in \mathbb{R}^2$ $G = \{av : a \in \mathbb{R}\}$ ist Unterraum von \mathbb{R}^2

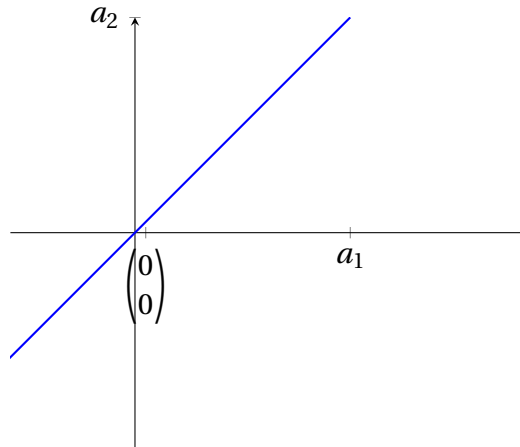
$$(a_1 v, a_2 v \in G, (a_1 +$$

$$a_2)v \in G \quad 2.1 \text{ in } 0.2$$

$$av \in G, b \in \mathbb{R} (ba)v \in G)$$

$G =$ Ursprungsgerade durch $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ und $v = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} n = 2:$

Abbildung 3: Gerade dargestellt durch Vektoren

b) $v, w \in \mathbb{R}^n$ $E = \{av + bw : a, b \in \mathbb{R}\}$ ist Unterraum von \mathbb{R}^n $v = o, w = o : E = \{o\}$ $v \neq o \quad w \notin \{av : a \in \mathbb{R}\}$ $E = \mathbb{R}^2 \quad n = 3 : \text{Ebene durch } \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ und durch } v, w$ Ist $w \in \{av : a \in \mathbb{R}\}$, so ist $E = G$ (aus a))c) $v, w \neq o$ $G' = \{w + av : a \in \mathbb{R}\}$ $[v \in G' \Leftrightarrow \exists a \in \mathbb{R} : w + av \in o \Leftrightarrow \exists a \in \mathbb{R} : w = (-a)v \in G]$ **0.4 Satz**Seien $\mathcal{U}_1, \mathcal{U}_2$ Unterräume von \mathbb{R}^n a) $\mathcal{U}_1 \cap \mathcal{U}_2$ ist Unterraum von \mathbb{R}^n b) $\mathcal{U}_1 \cup \mathcal{U}_2$ ist im Allgemeinen KEIN Unterraum von \mathbb{R}^n c) $\mathcal{U}_1 + \mathcal{U}_2 := \{u_1 + u_2 : u_1 \in \mathcal{U}_1, u_2 \in \mathcal{U}_2\}$ (Summe von \mathcal{U}_1 und \mathcal{U}_2) ist Unterraum von \mathbb{R}^n .

- d) $\mathcal{U}_1 \subseteq \mathcal{U}_1 + \mathcal{U}_2$ $\mathcal{U}_2 \subseteq \mathcal{U}_1 + \mathcal{U}_2$ und $\mathcal{U}_1 + \mathcal{U}_2$ ist der kleinste Unterraum von \mathbb{R}^n , der \mathcal{U}_1 und \mathcal{U}_2 enthält. (d.h ist w Unterraum von \mathbb{R}^n mit $\mathcal{U}_1, \mathcal{U}_2 \subseteq w$, so $\mathcal{U}_1 + \mathcal{U}_2 \subseteq w$)

Beweis. a) ✓

b) c)

□

0.5 Beispiel

- a) ??b) $G_1 = \{av : a \in \mathbb{R}\}$

$$G_2 = \{aw : a\}$$

$$G_1 + G_2 = E$$

- b) \mathbb{R}^3

$$E_1 = \left\{ r \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} : r, s \in \mathbb{R} \right\}$$

$$= \left\{ \begin{pmatrix} r \\ 0 \\ s \end{pmatrix} : r, s \in \mathbb{R} \right\}$$

$$E_2 = \left\{ t \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + u \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$$

$$= \left\{ \begin{pmatrix} u \\ t+u \\ u \end{pmatrix} \right\}$$

$E_1 + E_2$ Unterräume von \mathbb{R}^3 (10.3.b)

$$E_1 \cap E_2 = ?$$

$$v \in E_1 \cap E_2 \Leftrightarrow v = \begin{pmatrix} r \\ 0 \\ s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u \\ t+u \\ u \end{pmatrix} \Leftrightarrow r = u, t+u = 0, s = u$$

$$E_1 \cap E_2 = \left\{ \begin{pmatrix} u \\ 0 \\ u \end{pmatrix} : u \in \mathbb{R} \right\}$$

$$= \left\{ u \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} : u \in \mathbb{R} \right\}$$

$$E_1 + E_2 = ?$$

$$E_1 + E_2 = \mathbb{R}^3, \text{ denn :}$$

Es gilt sogar:

$$\mathbb{R}^3 = E_1 + G_2, \text{ wobei}$$

$$G_2 = \left\{ t \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} : t \in \mathbb{R} \right\} \subseteq E_{@}$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = x \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + z \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + y \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ 0 \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ y \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = (x - y) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + (z - y) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + y \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} x - y \\ 0 \\ z - y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} y \\ y \\ y \end{pmatrix}$$

0.6 Definition

a) $v_1, \dots, v_m \in \mathbb{R}^n, a_1, \dots, a_m \in \mathbb{R}$

Dann heißt $a_1 v_1 + \dots + a_m v_m = \sum_{i=1}^m a_i v_i$

Linearkombination von v_1, \dots, v_m (mit Koeffizienten a_1, \dots, a_m).

[Zwei formal verschiedene Linearkombinationen der gleichen v_1, \dots, v_m können den gleichen Vektor darstellen

$$1 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + 2 \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} + 3 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = 2 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + 3 \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} + 2 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 \\ 4 \\ 5 \end{pmatrix}]$$

b) Ist $M \subseteq \mathbb{R}^n$, so ist der von M *erzeugte* (oder *aufgespannte*) Unterraum $\langle M \rangle_{\mathbb{R}}$ (oder $\langle M \rangle$) die Menge aller (endlichen) Linearkombinationen, die man mit Vektoren aus M bilden kann.

$$\langle M \rangle_{\mathbb{R}} = \left\{ \sum_{i=1}^n a_i v_i : n \in \mathbb{N}, a_i \in \mathbb{R}, v_i \in M \right\} \text{ falls } M \neq \emptyset$$

$$\langle \emptyset \rangle_{\mathbb{R}} := \{\emptyset\}$$

$$M = \{v_1, \dots, v_m\}, \text{ so}$$

0.7 Beispiel

$$\text{a) } e_i = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n$$

$$\langle e_1, \dots, e_n \rangle = \mathbb{R}^n$$

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = x_1 e_1 + x_2 e_2 + \dots + x_n e_n$$

$$\text{b) } \mathcal{U} = \left\langle \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix} \right\rangle_{\mathbb{R}}$$

$$\text{Ist } \mathcal{U} = \mathbb{R}^3?$$

$$\text{Für welche } \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3 \text{ gibt es geeignete Skalare } a, b, c \in \mathbb{R} \text{ mit } a \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} + b \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} +$$

$$c \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix}?$$

$$a + 3b + 2c = x$$

$$2a + 2b + 3c = y$$

$$3a + b + 4c = z$$

LGS für die Unbekannten a, b, c mit variabler rechter Seite : Gauß

$$\begin{pmatrix} 1 & 3 & 2 & x \\ 2 & 2 & 3 & y \\ 3 & 1 & 4 & z \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 3 & 2 & x \\ 2 & -4 & -1 & y-2x \\ 0 & -8 & -2 & z-3x \end{pmatrix}$$

$$\rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 3 & 2 & x \\ 0 & 1 & \frac{1}{4} & \frac{2x-y}{4} \\ 0 & 0 & 0 & x-2y+z \end{pmatrix}$$

LGS ist lösbar $\Leftrightarrow x-2y+z=0$.

Dass heißt $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \in \mathcal{U} \Leftrightarrow x-2y+z=0$

$$\mathcal{U} = \left\{ \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} : x-2y+z=0, x, y, z \in \mathbb{R} \right\}$$

$$= \left\{ \begin{pmatrix} x \\ y \\ -x+2y \end{pmatrix} : x, y \in \mathbb{R} \right\}$$

$$\begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix} \in \mathcal{U}$$

Lösungen des LGS: c frei wählen, b, a ergeben sich, (falls $x-2y+z=0$) z.B

$$c=0, b=\frac{1}{2}x-\frac{1}{4}y, a=x-3b=-\frac{1}{2}x+\frac{3}{4}y$$

Ist $x-2y+z=0$, so ist

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \left(-\frac{1}{2}x + \frac{3}{4}y\right) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \left(\frac{1}{2}x - \frac{1}{4}y\right) \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix} = \frac{5}{4} \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} + \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\mathcal{U} = \left\langle \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} \right\rangle_{\mathbb{R}}$$

$$\begin{array}{rcl} 6x^2 & -3xy & +y^3 = 5 \\ 7x^3 & +3x^2y^2 & -xy = 7 \end{array}$$

0.9 Definition

$v_1, \dots, v_n \in \mathbb{R}^n$ heißen *linear abhängig*, falls $a_1, \dots, a_n \in \mathbb{R}$ existieren, *nicht alle* $= 0$, mit $a_1 v_1 + \dots + a_n v_n = 0$.

Gibt es solche Skalare nicht, so heißen v_1, \dots, v_m *linear unabhängig* (d.h. aus $a_1 v_1 + \dots + a_n v_n = 0$ folgt $a_1 = \dots = a_n = 0$).

(Entsprechend $\{v_1 \dots v_n\}$ linear abhängig/linear unabhängig)

Per Definition : \emptyset ist linear unabhängig.

0.10 Beispiel

a) $\sigma + v \in \mathbb{R}^n$ Dann ist v linear unabhängig:

Zu zeigen : Ist $av = \sigma \Rightarrow a = 0$

Sei $v = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}$ Da $v \neq \sigma$,

existiert mindestens ein i mit $b_i \neq 0$.

Angenommen $\sigma v = \begin{pmatrix} 0b_1 \\ \vdots \\ 0b_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \sigma$.

Dann $ab_i = 0$ Da $b_i \neq 0$, folgt $a = 0$.

σ ist linear abhängig:

$$1 \cdot \sigma = \sigma$$

b) $v_1 = \sigma, v_2, \dots, v_m$ ist linear abhängig :

$$\sigma = 1 \cdot \sigma + 0 \cdot v_2 + \dots + 0 \cdot v_m$$

c) $v, w \in \mathbb{R}^n$

$$v \neq \sigma \neq w$$

v, w sind linear

① abhängig \Leftrightarrow

② $v \in \langle w \rangle_{\mathbb{R}} \Leftrightarrow$

③ $w \in \langle v \rangle_{\mathbb{R}} \Leftrightarrow$

④ $\langle v \rangle_{\mathbb{R}} = \langle w \rangle_{\mathbb{R}}$

①

v, w linear abhängig $\rightarrow \exists a_1, a_2 \in \mathbb{R}$, nicht beide $= 0$, $a_1 v + a_2 w = \sigma$. Dann beide $(a_1, a_2) \neq 0$

$$a_1 v = -a_2 w \mid \cdot \frac{1}{a_1}$$

$$v = -\frac{-a_2}{-a_1} w \in \langle w \rangle_{\mathbb{R}} \textcircled{2}$$

②

$v \in \langle w \rangle_{\mathbb{R}}$ dass heißt $v = aw$ für ein $a \in \mathbb{R}$ Dann $a \neq 0$, da $v \neq \sigma$. $w = \frac{1}{a} \cdot v \in \langle v \rangle_{\mathbb{R}} \textcircled{3}$

③

$w = bv$ für ein $b \in \mathbb{R} b \neq 0$, da $w \neq \sigma$.

$$aw \in \langle w \rangle_{\mathbb{R}} \Rightarrow aW = (ab)v \in \langle v \rangle_{\mathbb{R}}$$

$$\langle w \rangle_{\mathbb{R}} \subseteq \langle v \rangle_{\mathbb{R}}$$

$$w = \frac{1}{b} w \text{ Dann analog } \langle v \rangle_{\mathbb{R}} \subseteq \langle w \rangle_{\mathbb{R}}$$

$$\text{Also } \langle v \rangle_{\mathbb{R}} = \langle w \rangle_{\mathbb{R}} \textcircled{4}$$

④

$v \in \langle v \rangle_{\mathbb{R}} = \langle w \rangle_{\mathbb{R}}$, dass heißt.

$$v = a \cdot w \text{ für ein } a \in \mathbb{R}$$

$$a \cdot v + (-a)w = \sigma \Rightarrow v, w \text{ sind linear abhängig } \textcircled{1}$$

$$\text{d) } e_i = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n$$

e_1, \dots, e_n sind linear unabhängig.

$$\sigma = a_1 e_1 + \dots a_n e_n = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ a_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \Rightarrow a_1 = a_2 = \dots = a_n = 0$$

e) $\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -3 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 6 \\ 2 \end{pmatrix}$ sind linear abhängig \mathbb{R}^2 :

Gesucht sind alle $a_i, b_i \in \mathbb{R}$ mit $a \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} + b \cdot \begin{pmatrix} -3 \\ 1 \end{pmatrix} + c \cdot \begin{pmatrix} 6 \\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$

Führt auf LGS für a,b,c:

$$\begin{pmatrix} 1 & -3 & 6 & 0 \\ 2 & 1 & 2 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & -3 & 6 & 0 \\ 0 & 7 & -10 & 0 \end{pmatrix}$$

c ist frei wählbar

f) $\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix}$ sind linear abhängig in \mathbb{R}^3 ,

$$10.8b) : \frac{5}{4} \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} + \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} + (-1) \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

0.11 Satz

Seien $v_1, \dots, v_n \in \mathbb{R}^n$

a) v_1, \dots, v_m sind linear abhängig ①

$$\Leftrightarrow \exists i \dots v_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m b_j v_j \text{ ②}$$

$$\Leftrightarrow \exists i : \langle v_1, \dots, v_m \rangle_{\mathbb{R}} = \langle v_1, \dots, v_{i-1}, v_{i+1}, \dots, v_m \rangle_{\mathbb{R}} \text{ ③}$$

b) v_1, \dots, v_m sind linear unabhängig \Leftrightarrow Jedes $v \in \langle v_1, \dots, v_m \rangle_{\mathbb{R}}$ lässt sich auf *genau eine* Weise als Linearkombination von v_1, \dots, v_m schreiben.

c) Sind v_1, \dots, v_m linear unabhängig und es existiert $v \in \mathbb{R}^n$ mit $v \notin \langle v_1, \dots, v_m \rangle_{\mathbb{R}}$ dann sind auch v_1, \dots, v_m, v linear unabhängig

Beweis. a) ① \Rightarrow ②

v_1, \dots, v_m sind linear abhängig

$\Rightarrow \exists a_1, \dots, a_m$ nicht alle = 0,

$$a_1 v_1 + \dots + a_m v_m = 0$$

Sei $a_i \neq 0$

$$a_i v_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m -a_j v_j$$

$$v_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m -\frac{a_j}{a_i} v_j \quad \textcircled{2}$$

$$\textcircled{2} \Rightarrow \textcircled{3}$$

Klar: $\langle v_1, \dots, v_{i-1}, v_{i+1}, v_m \rangle_{\mathbb{R}} \subseteq \langle v_1, \dots, v_m \rangle_{\mathbb{R}}$

Zeige \supseteq $v = \langle v_1, \dots, v_m \rangle_{\mathbb{R}}$, d.h.

$$v = \sum_{j=1}^m a_j v_j = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m a_j v_j + a_i \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m b_j v_j \right) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m (a_j + a_i b_j) v_j \in \langle v_1, \dots, v_{i-1}, v_{i+1}, \dots, v_m \rangle_{\mathbb{R}} \quad \textcircled{2}$$

$$\textcircled{3} \Rightarrow \textcircled{1}$$

$v_i \in \langle v_1, \dots, v_m \rangle_{\mathbb{R}} = \langle v_1, \dots, v_{i-1}, v_{i+1}, \dots, v_m \rangle_{\mathbb{R}}$, dass heißt es existiert

$a_1, \dots, a_{i-1}, a_{i+1}, \dots, a_m \in \mathbb{R}$ mit

$$v_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m a_j v_j$$

$\Rightarrow \sigma = a_1 v_1 + \dots + a_{i-1} v_{i-1} + (-1) v_i + a_{i+1} v_{i+1} + \dots + a_m v_m$ v_1, \dots, v_m linear abhängig □

0.12 Satz

Sind $v_i, \dots, v_{n+1} \in \mathbb{R}^n$, so

v_i, \dots, v_{n+1} linear abhängig.

(Insbesondere ist $m > n$ und $v_i, v_m \in \mathbb{R}^n$, so sind v_1, \dots, v_m linear abhängig)

Beweis. Suche alle $a_1, \dots, a_{n+1} \in \mathbb{R}$ mit $a_i v_i + \dots + a_{n+1} v_{n+1} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$

Führt zu LGS für a_1, \dots, a_{n+1} mit Koeffizientenmatrix $(v_1, \dots, v_{n+1}) = A$

Frage: Hat $A \cdot \begin{pmatrix} a_i \\ \vdots \\ a_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n$ nicht triviale Lösung?

Gauß:

$$\left(\mathbf{A} \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \rightarrow \right)$$

□

0.13 Definition

Sei \mathcal{U} ein Unterraum von \mathbb{R}^n

$B \subseteq \mathcal{U}$ heißt Basis von \mathcal{U} falls:

(1) $\langle B \rangle_{\mathbb{R}} = \mathcal{U}$

(2) B ist linear unabhängig

($\mathcal{U} = \{\sigma\}, B = \emptyset$)

0.14 Beispiel

a) e_1, \dots, e_n ist Basis von \mathbb{R}^n (kanonische Basis)

$$e_i = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \leftarrow i$$

$$\begin{pmatrix} a_i \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^n a_i e_i$$

b) $\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \end{pmatrix}$ ist Basis von \mathbb{R}^2 :

Sei $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^2$. Gesucht: $a, b \in \mathbb{R}$ mit $a \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} + b \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$

LGS mit variabler rechter Seite

$$\begin{array}{rcl} 1a & +3b & = x \\ 2a & +2b & = y \end{array}$$

Gauß:

$$\begin{pmatrix} 1 & 3 & x \\ 2 & 2 & y \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 3 & x \\ 0 & -4 & y-2x \end{pmatrix}$$

Eindeutige Lösung: $b = -\frac{1}{4}y + \frac{1}{2}x$ $a = x - 3b = x + \frac{3}{4}y - \frac{3}{2}x = -\frac{1}{2}x + \frac{3}{4}y$

$$\text{z.B. } \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = -\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^2 \langle \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \end{pmatrix} \rangle$$

$\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \end{pmatrix}$ sind linear unabhängig nach 0.10c)

$$\left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \end{pmatrix} \right\} \text{ Basis.}$$

$$\text{c) } \mathcal{U} = \left\langle \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix} \right\rangle_{\mathbb{R}}$$

$$\begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix} = \frac{5}{4} \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} + \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\mathcal{U} = \left\langle \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} \right\rangle_{\mathbb{R}}$$

$\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}$ linear unabhängig (0.10c))

$$\left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} \right\} \text{ Basis von } \mathcal{U}$$

0.15 Satz

Jeder Unterraum \mathcal{U} des \mathbb{R}^n besitzt eine Basis.

Beweis. Ist $\mathcal{U} = \{\sigma\}$, so $b = \emptyset$.

Sei also $\mathcal{U} \neq \{\sigma\}$.

v_1 ist linear unabhängig.

$\langle v_1 \rangle_{\mathbb{R}} \subseteq \mathcal{U}$.

Ist $\mathcal{U} = \langle v_1 \rangle_{\mathbb{R}}$, so ist $\{v_1\}$ Basis von \mathcal{U}

Ist $\langle v_1 \rangle_{\mathbb{R}} \subsetneq \mathcal{U}$.

Sei $v_2 \in \mathcal{U} \setminus \langle v_1 \rangle_{\mathbb{R}}$.

Nach 0.11c) ist $\{v_1, v_2\}$ linear unabhängig. Ist $\langle v_1, v_2 \rangle = \mathcal{U}$, so ist $\{v_1, v_2\}$ Basis von \mathcal{U} .

Ist $\langle v_1, v_2 \rangle_{\mathbb{R}} \subsetneq \mathcal{U}$ so wähle v_3 usw.

Es existiert $m \neq n$ mit $\langle v_1, \dots, v_m \rangle_{\mathbb{R}} = \mathcal{U}$ und v_1, \dots, v_m sind linear unabhängig.

(Denn noch 0.12 gibt es im \mathbb{R}^n keine $n+1$ linear unabhängige Vektoren) \square

0.16 Satz

Je zwei Basen B_1, B_2 eines Unterraums \mathcal{U} des \mathbb{R}^n enthalten die gleiche Anzahl von Vektoren $|B_1| = |B_2|$.

Insbesondere:

Je zwei Basen des \mathbb{R}^n enthalten n Vektoren

0.17 Definition

Ist \mathcal{U} Unterraum von \mathbb{R}^n , B Basis von \mathcal{U} , $|B| = m$.

Dann ist m die *Dimension* von \mathcal{U} , $\dim(\mathcal{U}) = m$.

$\dim(\mathbb{R}^n) = n$, $\dim(\mathcal{U}) \neq n$.

0.18 Satz (Basisergänzungssatz)

Sei \mathcal{U} Unterraum der \mathbb{R}^n , $M \subseteq \mathcal{U}$ eine Menge m linear unabhängiger Vektoren.

Dann lässt sich M zu einer Basis von \mathcal{U} ergänzen.

Beweis. Analog zu 0.15 \square

0.19 Korollar

Ist \mathcal{U} Unterraum des \mathbb{R}^n und $\dim(\mathcal{U}) = n$, dann ist $\mathcal{U} = \mathbb{R}^n$

Beweis. Sei B Basis von \mathcal{U} , also $|B| = n$.

Nach 0.18 (dort mit $\mathcal{U} = \mathbb{R}^n$, $M = B$) lässt sich B zu Basis B' von \mathbb{R}^n ergänzen.

$$\dim(\mathbb{R}^n) = n \Rightarrow |B'| = n.$$

Also $B = B'$

$$\mathbb{R}^n = \langle B' \rangle_{\mathbb{R}} = \langle B \rangle_{\mathbb{R}} = \mathcal{U}$$

□

0.20 Definition

Ist \mathcal{U} Unterraum von \mathbb{R}^n , $B = (u_1 \dots, u_m)$ eine geordnete Basis von \mathcal{U} . Nach 0.11b), lässt sich jeder Vektorraum $\mathcal{U} = \langle B \rangle_{\mathbb{R}}$ *eindeutig* als Linearkombination

$$\mathcal{U} = \sum_{i=1}^m a_i u_i \quad , a_i \in \mathbb{R}$$

schreiben.

$(a_1 \dots, a_m)$ heißen *Koordinaten* von u bzgl. der Basis B .

0.21 Beispiele

a) $B(e_1 \dots, e_m)$ kanonische Basis von \mathbb{R}^n .

Koordinaten von $\begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n$ bzgl. B :

$(a_1 \dots, a_n)$ *kartesische* Koordinaten.

(Rene Descartes, 1596-1650)

Anfang des WS 2015/16

1 Algebraische Strukturen

13.10.2015

1.1 Definition

Sei $X \neq \emptyset$. Eine *Verknüpfung* auf X ist :

$$\begin{cases} X \times X & \longrightarrow X \\ (a, b) & \longrightarrow a \star b \end{cases} \quad (\text{'Produkt' von a und b})$$

\star ist Platzhalter für andere Verknüpfungssymbole, die in speziellen Beispielen auftreten können.

1.2 Beispiele

a) Addition $+$ und Multiplikation \cdot sind Verknüpfungen auf $\mathbb{N}, \mathbb{Z}, \mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}$. Multiplikation ist *keine* Verknüpfung auf der Menge der negativen ganzen Zahlen.

b) Division ist keine Verknüpfung auf \mathbb{N} . Division ist Verknüpfung auf $\mathbb{Q} \setminus \{0\}, \mathbb{R} \setminus \{0\}, \mathbb{C} \setminus \{0\}$

c) $\mathbb{Z}_n := \{0, 1, \dots, n-1\}$ $(n \in \mathbb{N})$

$$a \oplus b := (a + b) \bmod n \quad n \in \mathbb{Z}_n$$

$$a \odot b := (a \cdot b) \bmod n \quad n \in \mathbb{Z}_n$$

Verknüpfungen auf \mathbb{Z}_n

$$n = 7: \quad 5 \odot 6 = 2$$

$$5 \oplus 6 = 4$$

$$n = 2: \quad \mathbb{Z}_n = \{0, 1\}$$

$$0 \oplus 0 = 0, 1 \oplus 0 = 1, 0 \oplus 1 = 1, 1 \oplus 1 = 0$$

$$\odot = \cdot$$

d) M Menge, $X =$ Menge aller Abbildungen $M \longrightarrow M$. Verknüpfung auf X : Hintereinanderausführung von Abbildungen: \circ

$$(f, g): M \longrightarrow M, \text{ So } f \circ g: M \rightarrow M$$

$$(f \circ g)(m) = f(g(m)) \in M, m \in M$$

Im Allgemeinen ist $g \circ f \neq f \circ g$

e) $X = \{0, 1\}$

2-stellige Aussagen, Junktoren wie $\wedge, \vee, \text{XOR}, \Rightarrow, \Leftrightarrow$ heißen Verknüpfungen auf X . 0 entspricht f, 1 entspricht w.

$$0 \vee 0 = 0, 1 \vee 0 = 1, 0 \vee 1 = 1, 1 \vee 1 = 1$$

$$0 \wedge 0 = 0, 0 \wedge 1 = 0, 1 \wedge 0 = 0, 1 \wedge 1 = 1 \text{ (= 'Multiplikation')}$$

$$0 \text{ XOR } 0 = 0, 1 \text{ XOR } 0 = 1, 0 \text{ XOR } 1 = 1, 1 \text{ XOR } 1 = 0 \text{ (= Addition mod 2)}$$

f) $X = M_n(\mathbb{R})$ = Menge der $n \times n$ - Matrizen über \mathbb{R} .

Matrizenaddition ist Verknüpfung auf X .

Matrizenmultiplikation ist Verknüpfung auf X .

g) M Menge. X Menge aller endlichen Folgen von Elementen aus M ('Wörter' über M).

Verknüpfung: Hintereinanderausführung zweier Folgen (Konkatenation).

$$M = \{0, 1\}, w_1 = 1101, w_2 = 001$$

$$w_1 w_2 = 110111$$

$$w_2 w_1 = 0011101$$

1.3 Definition

Sei $X \neq \emptyset$ eine Menge mit Verknüpfung \star .

a) X , genauer (X, \star) ist *Halbgruppe*, falls $(a \star b) \star c = a \star (b \star c)$ für alle $a, b, c \in X$.
(Assoziativgesetz)

b) (X, \star) heißt *Monoid*, falls (X, \star) Halbgruppe ist und ein $e \in X$ existiert mit $e \star a = a$ und $a \star e = a$ für alle $a \in X$. e heißt *neutrales Element* (später, e ist eindeutig bestimmt).

c) Sei (X, \star) ein Monoid. Ein Element $a \in X$ heißt *invertierbar*, falls $b \in X$ existiert (abhängig von a) mit $a \star b = b \star a = e$. b heißt *inverses Element* (das *Inverse*) zu a (später: wenn b existiert, so ist es eindeutig bestimmt).

d) Monoid (X, \star) heißt *Gruppe*, falls jedes Element in X bezüglich \star invertierbar ist.

- e) Halbgruppe, Monoid, Gruppe (X, \star) bezüglich kommutativ (oder *abelsch*) falls $a \star b = b \star a$ für alle $a, b \in X$ (Kommutativgesetz).

(Nach: Abel, 1802-1829)

14.10.2015

1.4 Bemerkung

In Halbgruppe liefert jede sinnvolle Klammerung eines Produktes mit endlich vielen Faktoren das gleiche Element.

(n = 4)

$$(a \star (b \star c)) \star d \underset{\text{AG}^1}{=} ((a \star b) \star c) \star d \underset{\text{AG}^1}{=} (a \star b) \star (c \star d) \underset{\text{AG}^1}{=} a \star (b \star (c \star d)) \underset{\text{AG}^1}{=} a \star ((b \star c) \star d)$$

Klammern werden daher meist weggelassen.

$a^n = a \star \dots \star a$ "Potenzen eindeutig definiert"

1.5 Proposition

- a) In einem Monoid (X, \star) ist das neutrale Element eindeutig bestimmt.
- b) Ist (X, \star) Monoid und ist $a \in X$ invertierbar, so ist das Inverse zu a eindeutig bestimmt. Bezeichnung: a^{-1}
- c) Ist (X, \star) Monoid und wenn $a, b \in X$ invertierbar sind, so auch $a \star b$.
 $(a \star b)^{-1} = b^{-1} \star a^{-1}$
- d) Die Menge der invertierbaren Elemente in einem Monoid (X, \star) bilden bezüglich \star eine Gruppe.

Beweis. a) Angenommen: e_1, e_2 sind neutrale Elemente. Dann:

$$e_1 = e_1 \star e_2 = e_1 \star e_2 = e_2 \quad \text{!}$$

¹Assoziativgesetz

b) Angenommen a hat 2 inverse Elemente b_1, b_2 also.

$$\begin{aligned} a \star b_1 &= e, b_2 \star a = e \\ b_1 &= e \star b_1 = (b_2 \star a) \star b_1 = b_2 \star (a \star b_1) = b_2 \star e = b_2 \quad \neq \end{aligned}$$

c)

$$(a \star b) \star (b^{-1} \star a^{-1}) = a \star (b \star b^{-1}) \star a^{-1} = a \star e \star a^{-1} = e$$

Analog: $(b^{-1} \star a^{-1}) \star (a \star b) = e$

Also: $(a \star b)^{-1} = b^{-1} \star a^{-1}$

d) \mathcal{J} = Menge der inversen Elemente in (X, \star) ,

$e \in \mathcal{J}$, dann $e \star e = e$, dass heißt $e^{-1} = e$, \star ist Verknüpfung auf \mathcal{J} .

Zu zeigen: $a, b \in \mathcal{J} \Rightarrow a \star b \in \mathcal{J}$ Folgt aus c).

Assoziativgesetz gilt in \mathcal{J} , $a \in \mathcal{J} \Rightarrow a^{-1} \in \mathcal{J}$, denn $(a^{-1})^{-1} = a$ □

Bemerkung: Multiplikation mit a^{-1} macht Multiplikation mit a (Verknüpfung) rückgängig.

1.6 Beispiel

a) $\mathbb{N}, \mathbb{Z}, \mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}$ sind Halbgruppen bezüglich $+$.

$\mathbb{Z}, \mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}$ sind bezüglich $+$ Monoide mit neutralen Element 0.

$\mathbb{N} = \{1, 2, \dots\}$ ist kein Monoid bezüglich $+$, aber \mathbb{N}_0 .

$\mathbb{Z}, \mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}$ sind Gruppen bezüglich $+$. Inverses Element zu a : $-a$

\mathbb{N} ist keine Gruppe bezüglich $+$, Inverse Elemente in \mathbb{N}_0 : $\{0\}$

b) $\mathbb{N}, \mathbb{Z}, \mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}$ sind Monoide bezüglich \cdot (neutrales Element 1). Keine Gruppen (in $\mathbb{Z}, \mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}$ ist 0 nicht invertierbar).

$\mathbb{Q} \setminus \{0\}, \mathbb{R} \setminus \{0\}, \mathbb{C} \setminus \{0\}$ Gruppen.

Invertierbare Elemente in \mathbb{Z} : $\{1, -1\}$ \leftarrow Gruppe bezüglich \cdot
↑
Eigenes Inverses

c) M Menge.

X = Menge aller Abbildungen $M \longrightarrow M$ mit Hintereinanderausführung \circ als

Verknüpfung.

Monoid, neutrales Element. id_M

$$f \circ id_M = f = id_M \circ f$$

$$id_M(m) = m \text{ für alle } m \in M.$$

Invertierbar sind genau die bijektiven Abbildungen $M \rightarrow M$, Inverse = Umkehrabbildung.

$f : M \rightarrow M$ bijektiv

$$f \circ f^{-1} = f^{-1} \circ f = id_M$$

‘Proposition’ on page 25 d): Die bijektive n Abbildung, $M \rightarrow M$ bilden bezüglich \circ eine Gruppe

- d) $M =$ Menge z.B $\{0, 1\}$, x Menge aller endlichen Folgen über m . Halbgruppe mit Verknüpfung Konkatenation . Nimmt man die leere Folge mit hinzu, ist es das neutrale Element. Dann: Monoid.

- e) $M_n(\mathbb{R})$ Menge der Matrizen über \mathbb{R} .

Addition: neutrales Element 0 – *Matrix*, Inverse zu A ist $-A$. $(M, \text{Addition})$ ist Gruppe

Multiplikation: $(A \cdot B) \cdot C = A \cdot (B \cdot C)$ Halbgruppe mit neutralem Element I_m

- f) $n \in \mathbb{N}$ $\mathbb{Z}_n = \{0, \dots, n-1\}$ Verknüpfung \oplus

$$a \oplus b = a + b \mod n$$

(\mathbb{Z}_n, \oplus) ist Gruppe.

Assoziativgesetz: $a, b, c \in \mathbb{Z}_n$

$$\begin{aligned} (a \oplus b) \oplus c &= (a + b \mod n) \mod n \\ &\stackrel{\text{Mathe I}}{=} ((a + b) + c) \mod n \\ &= (a + (b + c)) \mod n \\ &\stackrel{\text{Mathe I}}{=} (a + (b + c) \mod n) \mod n \\ &= (a + (b \oplus c)) \mod n \\ &= (a \oplus (b \oplus c)) \end{aligned}$$

0 ist neutrales Element bezüglich \oplus

0 ist sein eigenes Inverse.

$1 \leq i \leq n$ $n - i \in \mathbb{Z}_n$ Inverses zu i

$$i \oplus (n - i)$$

$$= (i + (n - i)) \bmod n = n \bmod n = 0$$

g) $n \in \mathbb{N}, \mathbb{Z}_0$ Verknüpfung \odot $n > 1$

$$a \odot b = a \cdot b \bmod n$$

(\mathbb{Z}_n, \odot) ist Monoid

Assoziativgesetz wie bei \oplus .

1 ist neutrales Element bei \odot Keine Gruppe bezüglich \odot , denn 0 hat kein Inverses

1.7 Satz

Sei $n \in \mathbb{N}, n > 1$

a) Die Elemente in (\mathbb{Z}_n, \odot) , die invertierbar bezüglich \odot sind, sind genau diejenigen $a \in \mathbb{Z}_n$ mit $\text{ggT}(a, n) = 1$.

Für solche a bestimmt man das Inverse folgendermaßen:

Bestimme $s, t \in \mathbb{Z}$ mit $s \cdot a + t \cdot n = 1$ (Erweiterter Euklidischer Algorithmus)

Dann ist $a^{-1} = s \bmod n$

b) $\mathbb{Z}_n^* := \{a \in \mathbb{Z}_n : \text{ggT}(a, n) = 1\}$ ist Gruppe bezüglich \odot .

$|\mathbb{Z}_n^*| =: \varphi(n)$ Euler'sche φ -Funktion (Leonard Euler 1707-1783)

c) Ist p eine Primzahl so ist $(\mathbb{Z}_p \setminus \{0\}, \odot)$ eine Gruppe. Beweis folgt aus b)

Beweis. a) Angenommen $a \in \mathbb{Z}_n$ invertierbar bezüglich \odot

D.h es existiert $b \in \mathbb{Z}_n$ mit $a \odot b = 1$

$a \cdot b \bmod n = 1$, d.h es existiert $k \in \mathbb{Z}$ mit $a \cdot b = 1 + k \cdot n, 1 = a \cdot b - k \cdot n$

Sei $d = \text{ggT}(a, n)$:

$$d \mid a \Rightarrow d \mid a \cdot b$$

$$d \mid n \Rightarrow d \mid k \cdot n$$

$$\Rightarrow d \mid a \cdot b - k \cdot n = 1$$

$$\Rightarrow d = 1 \quad \text{ggT}(a, n) = 1.$$

Umgekehrt sei $a \in \mathbb{Z}_n$ mit $\text{ggT}(a, n) = 1$

EEA liefert $s, t \in \mathbb{Z}$ mit $s \cdot a + t \cdot n = 1$.

$$\begin{aligned}
& (s \bmod n) \odot a &= ((s \bmod n) \cdot a) \bmod n \\
& \stackrel{\text{Mathe I}}{=} (s \cdot a) \bmod n &= (1 - t \cdot n) \bmod n \\
& = \underbrace{(1 - (t \cdot n) \bmod n)}_{=0} \bmod n = 1 \bmod n = 1
\end{aligned}$$

b) 'Proposition' on page 25 d)

□

1.8 Beispiel

$n = 24$, $a = 7$ ist invertierbar in (Z_{24}, \odot)

EEA:

$$\begin{aligned}
1 &= (-2) \cdot 24 + 7 \cdot 7 \\
a^{-1} &= 7 \bmod 24 = 7 = a
\end{aligned}$$

1.9 Beispiel

Sei $M = \{1, \dots, n\}$

Die Menge der bijektiven Abbildungen auf M (*Permutationen*) bilden nach 1.6c) eine Gruppe bezüglich Hintereinanderausführung \circ .

Bezeichnung: S_n *systematische Gruppe von Grad n*

Es ist $|S_n| = n!$

(Mathe I)

$$\text{z.B. : } \pi = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 1 \end{pmatrix} \in S_3$$

$$\pi^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 1 \end{pmatrix} = \pi$$

$$\varrho = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 1 & 2 \end{pmatrix} \in S_3$$

$$\varrho^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\varrho \circ \varrho^{-1} = id$$

$$\pi \circ \varrho = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 3 & 2 \end{pmatrix}$$

$$\varrho \circ \pi = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix}$$

S_n ist für $n \geq 3$ nicht abelsch (nicht kommutativ)

1.10 Satz (Gleichungslösen in Gruppen)

Sei (G, \cdot) eine Gruppe $a, b \in G$ (in allgemeinen Gruppen schreibt man Verknüpfungen oft als \cdot statt \star , oft auch ab statt $a \cdot b$)

- a) Es gibt genau ein $x \in G$ mit $ax = b$ (nämlich $x = a^{-1}b$) ["Teilen durch" a von links = Multiplikation von links mit a^{-1}]
- b) Es gibt genau ein $y \in G$ mit $ya = b$ (nämlich $y = ba^{-1}$)
- c) Ist $ax = bx$ für ein $x \in G$, so ist $a = b$
Ist $ya = yb$ für ein $y \in G$, so ist $a = b$

Beweis. a) Setze $x = a^{-1}b \in G$.

$a \cdot (a^{-1} \cdot b) = (a \cdot a^{-1})b = a \cdot b = b$ Eindeutigkeit : Sei $x \in G$ mit $ax = b$

Multiplikation beide Seiten mit a^{-1} ,

$$x = (a^{-1}a)x = a^{-1}b$$

b) analog

c) $ax = bx$ Multiplikation mit x^{-1} Dann $a = b$ □

1.11 Beispiel

- a) Suche Permutation $\xi \in S_3$ mit $\varrho \circ \xi = \pi$ (vgl. 1.9). 'Satz (Gleichungslösen in Gruppen)' on page 30a):

$$\begin{aligned}\xi = \varrho^{-1} \circ \pi &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix} \circ \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 3 & 2 \end{pmatrix}\end{aligned}$$

- b) 1.10c) gilt in Monoiden, die keine Gruppen sind, im Allgemeinen nicht:

Beispiel: (\mathbb{Z}_0, \odot)

$$2 \odot 3 - 0 = 3 \odot 3, \text{ aber } 2 \neq 4$$

1.12 Definition

- a) $R \neq \emptyset$ Menge mit 2 Verknüpfungen $+$ und \cdot heißt *Ring*, falls

- (1) $(R, +)$ ist kommutative Gruppe (neutrales Element: 0, *Nullelement*, Inverses zu a : $-a$ $b + (-a) =: b - a$)
- (2) (R, \cdot) ist Halbgruppe
- (3) $(a + b) \cdot c = a \cdot c + b \cdot c$ und $a \cdot (b + c) = a \cdot b + a \cdot c$ (\cdot vor $+$)
Distributivgesetz

b) Ring R heißt *kommutativer Ring* falls (R, \cdot) kommutative Halbgruppe ist.

c) Ring R heißt *Ring mit Eins*, falls (R, \cdot) Monoid, neutrales Element $1 \neq 0$ (*Eins-element*, *Eins*)

1.13 Beispiele

a) $(\mathbb{Z}, +, \cdot)$ ist kommutativer Ring mit 1, invertierbare Elemente bezüglich \cdot sind 1 und -1 .

b) $(\mathbb{Q}, +, \cdot), (\mathbb{R}, +, \cdot), (\mathbb{C}, +, \cdot)$ sind kommutative Ringe mit Eins.
 Alle Elemente $\neq 0$ sind invertierbar bezüglich \cdot

c) $n \in \mathbb{N}, n > 1$.

$$\mathbb{Z}_n = \{0, \dots, n-1\}$$

$(\mathbb{Z}_n, \oplus, \odot)$ ist kommutativer Ring mit Eins:

Wegen 'Beispiel' on page 26 f),g) sind nur die Distributivgesetz zu zeigen:

$$\begin{aligned}
 (a \oplus b) \odot c &= ((a \oplus b) \cdot c) \bmod n \\
 &= (((a + b) \bmod n) \cdot c) \bmod n \\
 &= ((a + b) \cdot c) \bmod n \\
 \text{Mathe I} \quad &= (a \cdot c + b \cdot c) \bmod n \\
 &= ((a \cdot c) \bmod n + (b \cdot c) \bmod n) \bmod n \\
 \text{Mathe I} \quad &= a \odot c \oplus b \odot c
 \end{aligned}$$

d) $M_n(\mathbb{R}), n \times n$ -Matrizen über \mathbb{R} , mit Matrizenaddition $+$ und, Multiplikation \cdot ist Ring mit Eins.

(Folgt aus Rechenregeln für Matrizen, Mathe II) Eins: E_n $n \times n$ -Einheitsmatrix

Für $n \geq 2$ ist $M_n(\mathbb{R})$ kein kommutativer Ring

1.14 Proposition

Sei $(R, +, \cdot)$ ein Ring. Dann gilt für alle $a, b \in R$.

a) $0 \cdot a = a \cdot 0 = 0$

b) $(-a) \cdot b = a \cdot (-b) = -(a \cdot b)$

c) $(-a) \cdot (-b) = a \cdot b$

Beweis.

a) $0 \cdot a = (0 + 0) \cdot a \stackrel{\text{DG}^2}{=} 0 \cdot a + 0 \cdot a$

Addiere auf beiden Seiten $-(0 \cdot a)$

$$0 = 0 \cdot a + 0 = 0 \cdot a$$

b) $(-a) \cdot b + ab = ((-a) + a) \cdot b \stackrel{\text{a)}}{=} 0 \cdot b = 0$

$$\Rightarrow (-a) \cdot b = -(ab) \text{ Analog } a \cdot (-b) = -(ab)$$

c) $(-a) \cdot (-b) \stackrel{\text{b)}}{=} -(a \cdot (-b)) \stackrel{\text{b)}}{=} -(-(a \cdot b)) = a \cdot b$

□

1.15 Bemerkung

a) In einem Ring mit Eins sind 1 und -1 bezüglich \cdot invertierbar.

$$1 \cdot 1 = 1 \quad (1^{-1} = 1)$$

$$(-1) \cdot (-1) = 1 \quad (1.14c)), \text{ dass heißt. } (-1)^{-1} = -1$$

0 ist nie bezüglich Multiplikation invertierbar, denn $0 \cdot a = 0 \neq 1$. 1.14a)

b) Es kann sein dass $1 = -1$ gilt. Zum Beispiel:

$$(\mathbb{Z}_2, \oplus, \odot) \quad 1 \oplus 1 = 0 \quad 1 = -1$$

1.16 Definition

Ein kommutativer Ring $(R, +, \cdot)$ mit Eins heißt *Körper*, wenn jedes Element $\neq 0$ bezüglich Multiplikation invertierbar ist.

²Distributivgesetz

1.17 Beispiel

- a) $\mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}$ sind Körper, \mathbb{Z} nicht.
- b) $(\mathbb{Z}_n, \oplus, \odot)$ ist genau dann ein Körper, wenn n eine Primzahl.
 \mathbb{Z}_n ist kommutativer Ring mit 1.
 ‘Beispiele’ on page 31c: Die invertierbaren Elemente in \mathbb{Z}_n sind alle $a \in \mathbb{Z}_n$ mit $\text{ggT}(a, n) = 1$

1.18 Proposition (Nullteilerfreiheit in Körpern)

Ist K ein Körper, $a, b \in K$, mit $a \cdot b = 0$, so ist $a = 0$ oder $b = 0$

Beweis.

Sei $a \cdot b = 0$ Angenommen $a \neq 0$. Dann existiert $a^{-1} \in K$

$$0 \underset{1.14a)}{=} a^{-1} \cdot 0 \underset{\text{Vor.}}{=} a^{-1}(a \cdot b) = (a^{-1} \cdot a) \cdot b = b$$

□

Beispiel: $R = (\mathbb{Z}_6, \oplus, \odot)$

$$2 \odot 3 = 0 \quad 2 \neq 0, 3 \neq 0$$

1.19 Definition

Sei K ein Körper,

- a) Ein (Formales) *Polynom* über K ist ein Ausdruck $f = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n = \sum_{i=0}^n a_i x^i$ wobei $n \in \mathbb{N}_0, a_i \in K$. (Manchmal $f(x)$ statt f , +-Zeichen hat zunächst nichts mit einer Addition zu tun. a_i *Koeffizienten* von f
 Ist $a_i = 0$ so kann man in der Schreibweise von f $0 \cdot x^i$ auch weglassen.
 Statt a_0x^0 schreibt man a_0 , statt a_1x^1 schreibt man a_1x . Sind alle $a_i = 0$, so $f = 0$, *Nullpolynom*.
 Ist $a_i = 1$, so schreibt man x^i statt $1x^i$
- b) Zwei Polynome f und g sind *gleich*, wenn *entweder* $f = 0$ und $g = 0$ oder $f \neq 0$ und $g \neq 0$
 d.h. $f = \sum_{i=0}^n a_i x^i, a_n \neq 0$

$$g = \sum_{i=0}^m a_i x^i, b_m \neq 0$$

und $n = m$ und $a_i = b_i$ für $i = 0 \dots n$

c) Menge aller Polynome über K . $K[x]$

Wir wollen $K[x]$ zu einem Ring machen. Wie?

Beispiel: $f = 3x^2 + 2x + 1$,

$$g = 5x^3 + x^2 + x \in Q[x]$$

$$f + g = 5x^3 + 4x^2 + 3x + 1$$

$$\begin{aligned} f \cdot g &= (3x^2 + 2x + 1) \cdot (5x^3 + x^2 + x) \\ &= 15x^5 + 10x^4 + 5x^3 + 3x^4 + 2x^3 + x^2 + 3x^2 + 2x^2 + x \\ &= 15x^5 + 13x^4 + 10x^3 + 3x^2 + x \end{aligned}$$

27.10.2015

1.20 Satz und Definition

K Körper. $K[x]$ wird zu einem kommutativen Ring mit Eins durch folgenden Verknüpfungen.

$$f = \sum_{i=0}^n a_i x^i, g = \sum_{i=0}^m b_i x^i \text{ so}$$

$$f + g = \sum_{i=0}^{\max(n,m)} (a_i + b_i) x^i$$

$$f \cdot g = \sum_{i=0}^{n+m} c_i x^i, \text{ wobei } c_i = \sum_{j=0}^i a_j b_{i-j} \quad (\text{Faltungsprodukt})$$

In beiden Fällen sind Koeffizienten a_i mit $i > n$ bzw. b_i mit $i > m$ gleich 0 zu setzen. Das Einselement ist $1 (= 1x^0)$

Das Nullelement ist das Nullpolynom.

$$-f = \sum_{i=0}^n (-a_i) x^i$$

$(K[x], +, \cdot)$ heißt *Polynomring* in einer Variable *Beweis:* Nachrechnen

1.21 Bemerkung

$$a) f = \sum_{i=0}^n a^i x^i \in K[x], a \in K \subseteq K[x]$$

$$a \cdot f = \sum_{i=0}^n (a \cdot a^i) x^i$$

$$x \cdot f = \sum_{i=0}^n a_i x^{i+1} = a_n x^{n+1} + \dots + a_0 x$$

- b) Das $+$ - Zeichen in der Definition der Polynome entspricht genau der Addition der *Monome* $a_i x^i$.

$$(a_0 x^0 \quad + \quad a_1 x^1) = a_0 x^0 \quad + \quad a_1 x^1$$

\uparrow Add. aus 1.20 \uparrow + aus 1.19

1.22 Definition

Sei $0 \neq f \in k[x]$, $f = \sum_{i=0}^n a_i x^i$, $a_n \neq 0$.

Dann heißt n der *Grad* in f , $\text{Grad}(f) = n$

$\text{Grad}(0) := -\infty$

$\text{Grad}(f) := 0$: *Konstante Polynome* $\neq 0$

1.23 Satz

Sei K ein Körper, $f, g \in K[x]$.

Dann ist $\text{Grad}(f \cdot g) = \text{Grad}(f) + \text{Grad}(g)$

(Konvention: $-\infty + n = n + (-\infty) = (-\infty + \infty)$,

Sei $f \neq 0$ und $g \neq 0$

$$f = \sum_{i=0}^n a_i x^i, a_n \neq 0, n = \text{Grad}(f)$$

$$g = \sum_{i=0}^m b_i x^i, b_m \neq 0, m = \text{Grad}(g)$$

Koeffizienten von x^{n+m} in $f \cdot g$: $a_n b_m \neq 0$
1.18

1.24 Korollar

Sei K ein Körper

- a) Genau die konstanten Polynome $\neq 0$ sind in $K[x]$ bezüglich \cdot invertierbar

Insbesondere ist $K[x]$ *kein* Körper

- b) Sind $f, g \in K[x]$ mit $f \cdot g = 0$, so ist $f = 0$ oder $g = 0$ (Nullteilerfreiheit in $K[x]$)

- c) Sind $f, g_1, g_2 \in K[x]$ mit $f \cdot g_1$ und ist $f \neq 0$, so ist $g_1 = g_2$

Beweis.

- a) Sei $f \in K[x]$ invertierbar bezüglich \cdot . Dann ist $f \neq 0$ und es existiert $g \in K[x]$ mit $f \cdot g = 1$.

Mit 1.23:

$$\begin{aligned} 0 = \text{Grad}(1) &= \text{Grad}(f \cdot g) \\ &= \text{Grad}(f) + \text{Grad}(g). \end{aligned}$$

$$\text{Also: } \text{Grad}(f) = 0 (= \text{Grad}(g))$$

Dass heißt f ist konstantes Polynom.

Ist umgekehrt $f = a \in L, a \neq 0$, so $f^{-1} = a^{-1} \in K$

- b) Folgt aus 1.23:

$$\begin{aligned} -\infty = \text{Grad}(0) &= \text{Grad}(f \cdot g) \\ &= \text{Grad}(f) + \text{Grad}(g) \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \text{Grad}(f) = -\infty \text{ oder } \text{Grad}(g) = -\infty, \text{ d.h. } f = 0, \text{ oder } g = 0$$

- c) $f g_1 = f g_2$

$$\Rightarrow 0 = f g_1 - f g_2 = f \cdot (g_1 - g_2)$$

Da $f \neq 0$, folgt mit b)

$$g_1 - g_2 = 0, \text{ d.h. } g_1 = g_2$$

□

1.25 Bemerkung

- a) Jedem Polynom $f = \sum_{i=0}^n a_i x^i \in K[x]$

kann man eine Funktion $K \rightarrow K$ zuordnen. $a \in K \mapsto f(a) = \sum_{i=0}^n a_i a^i \in K$

(Polynomfunktion aus Analysis $K = \mathbb{R}$)

Aufgrund der Definition von Addition/Multiplikation von Polynomen gilt:

$$(f + g)(a) = f(a) + g(a)$$

$$(f \cdot g)(a) = f(a) \cdot g(a)$$

Es kann passieren, dass zwei verschiedene Polynome die gleiche Funktion beschreiben.

$$\text{Z.B. } K = \mathbb{Z}_2 = \{0, 1\}$$

$$f = x^2, g = x$$

$$f \neq g$$

$$f(1) = 1 = g(1)$$

$$f(0) = -g(0)$$

Über unendlichen Körpern passiert das nicht (später)

b) Schnelle Berechnung von $f(a)$:

$$f = a_0 + a_1 x + \dots + a_n x^n$$

$$f(a) = a_0 + a(a_1 + a(a_2 + \dots + a(a_{n-1} + a a_n)))$$

Horner-Schema

1.26 Definition

K Körper, $f, g \in K[x]$

f teilt g ($f \mid g$) falls $q \in K[x]$ existiert mit $g = q \cdot f$ (Falls $g \neq 0 \pmod f \mid g$, so ist $\text{Grad}(f) \leq \text{Grad}(g)$ nach 'Satz' on page 35)

1.27 Satz

K Körper, $0 \neq f \in K[x], g \in K[x]$

Dann existiert eindeutig bestimmte Polynome q, r

$$(1) \quad g = q \cdot f + r$$

$$(2) \quad \text{Grad}(r) < \text{Grad}(f)$$

(Beweis WHK, Satz 4.69)

Division mit Rest

1.28 Beispiel

28.10.2015

a) $g = x^4 + 2x^3 - x + 2, f = 3x^2 - 1, f, g \in Q[x]$

$$\begin{array}{r} (x^4 + 2x^3 - x + 2) : (3x^2 - 1) = \frac{1}{3}x^2 + \frac{2}{3}x + \frac{1}{9} + \frac{-\frac{1}{3}x + \frac{19}{9}}{3x^2 - 1} \\ \underline{-x^4 + \frac{1}{3}x^2} \\ 2x^3 + \frac{1}{3}x^2 - x \\ \underline{-2x^3 \phantom{+ \frac{1}{3}x^2} + \frac{2}{3}x} \\ \frac{1}{3}x^2 - \frac{1}{3}x + 2 \\ \underline{-\frac{1}{3}x^2 \phantom{- \frac{1}{3}x} + \frac{1}{9}} \\ -\frac{1}{3}x + \frac{19}{9} \end{array}$$

b) $g = x^4 - x^2 + 1, f = x^2 + x, f, g \in \mathbb{Z}_3[x]$

$$\begin{array}{r} x^4 + 3x^3 + 1 : x^2 + x = x^2 + 2x \\ \underline{-(x^4 + x^3)} \\ 2x^3 + 2x^2 + 1 \\ \underline{-(2x^3 + 2x^2)} \\ 1 \leftarrow r \end{array}$$

1.29 Korollar

K Körper, $a \in K$.

$f \in K[x]$ ist genau dann durch $(x - a)$ teilbar, wenn $f(a) = 0$ (d.h. a ist Nullstelle von f)

$$[f = g \cdot (x - a), g \in K[x]]$$

Beweis.

Falls $x - a \mid f$, so existiert $q \in K[x]$ mit $f \stackrel{1.25}{=} q(x - a)$.

$$\text{Dann } f(a) = q(a) \cdot \underbrace{(a - a)}_{=0} = 0.$$

Umgekehrt: Angenommen $f(a) = 0$. Division mit Rest von f durch $x - a$:

$$f = q \cdot (x - a)r, q, r \in K[x]$$

$$\text{Grad}(r) < \text{Grad}(x - a) = 1, r \in K$$

Zeige: $r = 0$.

$$r = f - q \cdot (x - a)$$

Setze $a \in K$ ein.

$$\begin{aligned} r &= f(a) - q(a) \cdot (a - a) = 0 - 0 = 0 \\ f &= q \cdot (x - a) \end{aligned}$$

□

1.30 Definition

K Körper $a \in K$ heißt m -fache Nullstelle von $f \in K[x]$, falls $(x - a)^m \mid f$ und $(x - a)^{m+1} \nmid f$.

Dass heißt $f = q \cdot (x - a)^m$ und $q(a) \neq 0$

1.31 Beispiel

$$x^5 + x^4 + 1 \in \mathbb{Z}_3[x]$$

In \mathbb{Z}_3 hat f die Nullstelle 1

‘Korollar’ on page 38: $x - 1 (= x + 2)$ teilt f

Dividiere f durch $x - 1$:

$$f = (x^4 + 2x^3 + 2x + 2) \cdot (x - 1)$$

1.32 Satz

K Körper, $f \in K[x]$, $\text{Grad}(f) = n \geq 0$ (dass heißt $f \neq 0$).

Dann hat f höchstens n Nullstellen in K (einschließend Vielfachheit). Genauer:

Sind a_1, \dots, a_k die verschiedenen Nullstellen von f , so ist

$f = g \cdot (x - a_1)^{m_1} \cdot \dots \cdot (x - a_k)^{m_k}$, m_i Vielfachheiten der Nullstellen a_i , g hat keine Nullstelle in K

Beweis. Durch Induktion nach n .

$n = 0$: $f = a_0 \neq 0$, ohne Nullstelle. ✓

Sei $n > 0$. Behauptung sei richtig für alle Polynome von $\text{Grad} < n$.

Hat f keine Nullstellen, $g = f$ ✓

Hat f Nullstellen a_1, \dots, a_k , $k \geq 1$

so $f = q \cdot (x - a_1)^{m_1}$ (nach Definition) $q(a_1) \neq 0$.

$$\text{Grad}(q) = n - m_1 \underset{m_1 > 0}{<} n$$

Wir zeigen:

q hat genau die Nullstellen a_2, \dots, a_k mit Vielfachheiten m_2, \dots, m_k .

Klar: Jede Nullstelle von q ist Nullstelle von f , Dass heißt q hat höchstens Nullstellen a_2, \dots, a_k .

Diese Nullstellen hat q mit Vielfachheit $0 \geq n_i \geq m_i$, denn $(x - a_i)^{m_i} | q \Rightarrow (x - a_i)^{n_i} | f$

Sei $i \in \{2, \dots, k\}$. Es ist $f = s \cdot (x - a_i)^{m_i}$, $s \in K[x]$, $s(a_i) \neq 0$

$$q = q_1 \cdot (x - a_i)^{n_i}, q_1 \in K[x], q(a_i) \neq 0, \quad ((x - a_i)^0 = 1)$$

$$f = q_1(x - a_1)^{n_i} \cdot (x - a_1)^{m_1} \text{ 'Korollar' on page 35c):}$$

$$s(x - a_i)^{m_i - n_i} = q_1 \cdot (x - a_1)^{m_1}$$

Ist $m_i > n_i$, so ist $m_i - n_i > 0$

$$0 = s(a_i)(a_i - a_i)^{m_i - n_i} = q(a_i)(a_i - a_i) \neq 0E$$

Dass heißt $n_i = m_i, i = 2, \dots, k$

$$q = g(x - a_2)^{m_2} \dots (x - a_k)^{m_k}, g \text{ ohne Nullstelle in } K$$

$$f = g(x - a_1)^{m_2} \dots (x - a_2)^{m_1} \quad (\text{Nach Induktionsvoraussetzung}) \quad \square$$

1.33 Korollar

K Körper, $f, g \in K[x]$, $m = \max(\text{Grad}(f), \text{Grad}(g))$

Gibt es $m + 1$ Elemente $a_1, \dots, a_{m+1} \in K$, paarweise verschieden, mit $f(a_i) = g(a_i), i = 1, \dots, m + 1$ so $f = g$.

Insbesondere: Ist K unendlich, $f, g \in K[x]$ mit $f(a) = g(a)$ für alle $a \in K$, so ist $f = g$

Beweis. $f - g \in K[x]$, $\text{Grad}(f - g) \leq m$.

$f - g$ hat $m + 1$ Nullstellen a_1, \dots, a_{m+1}

$$1.32 \quad f - g = 0, f = g \quad \square$$

1.34 Bemerkung

Über $\mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{Z}_p$ (p Primzahl) gibt es Polynome beliebig hohen Grades ohne Nullstellen

Über \mathbb{Q}, \mathbb{R} : $(x^2 + 1)^m$ hat $\text{Grad}(2m)$, keine Nullstellen in \mathbb{Q}, \mathbb{R}

über \mathbb{Z}_p z.B. $(x^p - x + 1)^m$ hat $\text{Grad } pm$, ohne Nullstellen (ohne Beweis)

1.35 Fundamentalsatz der Algebra

Ist $f \in \mathbb{C}[x]$, $f \neq 0$ so ist $(f = a_n x^n + \dots + a_0)$

$f = a_n(x-c_1)^{m_1} \dots (x-c_k)^{m_k}$, $a_n, c_1, \dots, c_k \in \mathbb{C}$ (Nullstellen mit Vielfachen m_1, m_2)

$m_1 + \dots + m_k = \text{Grad}(f)$

$\text{Grad}(f) = n$ f hat n Nullstellen (einschließend Vielfachheit)

2 Vektorräume

3.11.2015

2.1 Definition

Sei K ein Körper. Ein K -Vektorraum V besitzt Verknüpfung $+$ bezüglich derer eine kommutative Gruppe ist (Neutrales Element σ , Nullvektor, Inverses zu $v \in V : -v$). Außerdem existiert Abbildung $K \times V \rightarrow V$

$(a, v) \mapsto av, a \in K, v \in V$

(„Multiplikation“ von Elementen aus V , („Vektoren“) mit Körperelementen („Skalare“)), so dass gilt:

$(a + b)v = av + bv$ für alle $a, b \in K, v \in V$

$a(v + w) = av + aw$ für alle $a \in K, v, w \in V$

$(ab)v = a(bv)$ für alle $a, b \in K, v \in V$

$1v = v$ für alle $v \in V$.

2.2 Beispiel

a) K Körper, $n \in \mathbb{N}$

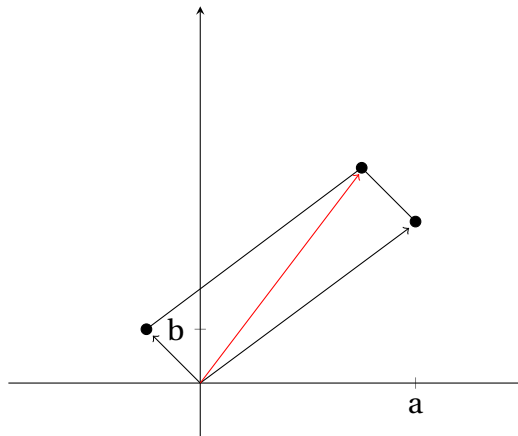
$K^n = \left\{ \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} : a_i \in K \right\}$ ist K -Vektorraum bezüglich $\begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 + b_1 \\ \vdots \\ a_n + b_n \end{pmatrix}$

$a \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} aa_1 \\ \vdots \\ aa_n \end{pmatrix}$ für alle $a \in K, \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} \in K^n$. Raum der Spaltenvektoren der Länge n über K .

Entsprechend: Raum der Zeilenvektor, $\begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} = (a_1, \dots, a_n)^t$

Für $K = \mathbb{R} : \mathbb{R}^n$

$n = 2, 3$ Elemente aus $\mathbb{R}^2, \mathbb{R}^3$, identifizierbar mit Ortsvektor der Ebene oder des 3-dimensionalen Raumes.



b) Sei K ein Körper Polynomring $K[x]$ ist ein K -Vektorraum, bezüglich

- Addition von Polynomen
- Multiplikation von Körperelementen mit Polynomen

$$a \left(\sum_{i=0}^n a_i x^i \right) := \sum_{i=0}^n (a a_i) x^i \in K[x]$$

(Multiplikation von Polynomen mit Polynom Grad ≤ 0)

2.1 folgt aus den Ringeigenschaften von $K[x]$

c) K Körper. $V = \text{Abbildung } (K, K) = \{ \alpha : K \rightarrow K : \alpha \text{ Abbildung} \}$ Addition auf V

$\alpha + \beta \in V (\alpha + \beta)(x) = \alpha(x) + \beta(x)$ für alle $x \in K$

Skalare Multiplikation:

$a \in \mathbb{R}, \alpha \in V (a\alpha)(x) = a \cdot \alpha(x)$ Für alle $x \in K$

Nachrechnen : Damit wird V ein K -Vektorraum

2.3 Proposition

K Körper, $V, K - VR$

a) $a \cdot \sigma = \sigma$

b) $0 \cdot v = \sigma$

c) $(-1) \cdot v = -v$

a,b,c Für alle $v \in V$

2.4 Definition

K Körper, $V, K - VR$.

$\emptyset + U \subseteq V$ heißt *Unterraum* (*Untervektorraum*, oder *Teilraum*) von V , falls U bezüglich Addition auf V und der skalaren Multiplikation mit Elementen aus K selbst K Vektorraum ist.

2.5 Proposition

U ist Unterraum von V

\Leftrightarrow

(1) $u_1 + u_2 \in U$ für alle $u_1, u_2 \in U$

(2) $au \in U$ für alle $u \in U, a \in K$
(Nullvektor in U = Nullvektor in V)

Beweis. $\Rightarrow \checkmark \Leftarrow$: Da $U \neq \emptyset$, existiert $u \in U$.

$\sigma = 0 \cdot u \in U$

$u \in U \Rightarrow -u = (-1)u \in U$

Mit (1): $(U, +)$ ist kommutative Gruppe. Restliche Axiome gelten auch für U, K .

□

2.6 Beispiel

- a) $V - K - VR$, so ist V Unterraum von V .
und $\{0\}$ ist Unterraum von V (*Nullraum*)
- b) Betrachte $K[x]$ als $K - VR$. (2.2).
Sei $n \in \mathbb{N}_0$.
 $U = \{f \in K[x] : \text{Grad}(f) \leq n\}$ Unterraum von $K[x]$

2.7 Proposition

Seien U_1, U_2 Unterräume von K -VR V .

- a) $U_1 \cap U_2$ ist Unterraum
- b) $U_1 + U_2 := \{u_1 + u_2 : u_1 \in U_1, u_2 \in U_2\}$ ist Unterraum von V (*Summe* von Unterräumen)
- c) $U_1 + U_2$ ist der kleinste Unterraum von V , der $U_1 \cup U_2$ enthält.
- d) $U_1 \cap U_2$ ist im Allgemeinen kein Unterraum.
Beweis: 0.4

2.8 Definition

V K -VR

- a) $v_1, \dots, v_m \in V, a_1, \dots, a_m \in K$

Dann heißt

$$a_1 v_1 + \dots + a_m v_m = \sum_{i=1}^m a_i v_i \in V$$

Linearkombination von v_1, \dots, v_m (mit Koeffizienten a_1, \dots, a_m).

[Beachte: Zwei formell verschiedene Linearkombinationen derselben Vektoren können den gleichen Vektor darstellen z.B. in \mathbb{R}^2 :

$$\begin{aligned} & 1 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + 2 \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} + 3 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \\ & 2 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + 3 \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} + 2 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 \\ 5 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

- b) Ist $M \subseteq V$, so ist der von M erzeugte oder aufgespannte Unterraum $\langle M \rangle_K$ (oder kurz $\langle M \rangle$) die Menge aller endlichen Linearkombination, die man mit Vektoren aus M bilden kann:

$$\langle M \rangle = \left\{ \sum_{i=1}^n a_i v_i : n \in \mathbb{N}, a_i \in K, v_i \in M \right\}$$

$$\langle \emptyset \rangle_K := \{\emptyset\}$$

$$M = \{v_1, \dots, v_m\} : \langle M \rangle = \langle v_1, \dots, v_m \rangle$$

- c) Ist $\langle M \rangle_K = V$, so heißt M Erzeugungssystem

2.9 Satz

V K -VR, $M \subseteq V$

- a) $\langle M \rangle_K$ ist Unterraum von V
- b) $\langle M \rangle_K$ ist der kleinste Unterraum von V , der M enthält.
Insbesondere: Sind U_1, U_2 Unterräume von V , so ist $\langle U_1 \cup U_2 \rangle_K = U_1 + U_2$
Beweis: 0.7

2.10 Definition

V K -VR V heißt endlich erzeugt, falls es eine endliche Teilmenge $M \subseteq V$ gibt mit $V = \langle M \rangle_K$

2.11 Beispiel

- a) $K^n = \left\{ \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} : a_i \in K \right\}$
 K^n ist endlich erzeugt.

$$e_1, \dots, e_n \text{ Einheitsvektor } e_i = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \leftarrow i$$

$$K^n = \langle e_1, \dots, e_n \rangle_K, \text{ denn } \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} = a_1 e_1 + \dots + a_n e_n$$

- b) $K[x]$ als K -Vr ist nicht endlich erzeugt. Angenommen es existiert $f_1, \dots, f_n \in K[x]$ mit $K[x] = \langle f_1, \dots, f_n \rangle_K$.

Sei $t, \max \text{Grad}(f_i) \in \mathbb{N}_0 \cup \{-\infty\}$

Dann haben alle Polynome in $\langle f_1, \dots, f_n \rangle_K$ höchstens Grad t . Also $x^{t+1} \in K[x] \setminus \langle f_1, \dots, f_n \rangle_K$

$M = \{1, x, x^2, x^3, \dots\} = \{x^i : i \in \mathbb{N}_0\}$

$$K[x] = \langle M \rangle_K. \quad f = \sum_{n=0}^t a_i x^i$$

- c) $n \in \mathbb{N}. \quad U = \{f \in K[x] : \text{Grad}(f) = n\}$

Unterraum von $K[x]$, endlich erzeugt

2.12 Definition

Sei V K -VR, $v_1, \dots, v_m \in V$ heißen *linear abhängig*, wenn es $a_1, \dots, a_n \in K$, *nicht alle* $= 0$, gibt mit

$$a_1 v_1 + \dots + a_m v_m = \sigma$$

(Beachte: Immer mit $0 \cdot v_1 + \dots + 0 \cdot v_m = \sigma$, aber bei linearer Abhängigkeit soll es noch eine andere Möglichkeit geben) Andernfalls nennt man v_1, \dots, v_m *linear unabhängig*:

(D.h. aus $a_1 v_1 + \dots + a_m v_m = \sigma$ folgt $a_1 = \dots = a_m = 0$)

Entsprechend: $\{v_1, \dots, v_m\}$ linear abhängig, linear unabhängig.

\emptyset per Definition linear unabhängig. Klar: Teilmenge von linear unabhängigen Vektoren wieder linear unabhängig

2.13 Beispiel

- a) σ ist linear abhängig: $1 \cdot \sigma = \sigma$

- b) $v, w \in V, v \neq \sigma \neq w$.

Wann sind v und w linear abhängig?

v, w linear abhängig $\Rightarrow \exists a, b \in K$, nicht beide $= 0$ mit $a \cdot v + b \cdot w = \sigma$

Angenommen: $a \neq 0$ $a \cdot v = -b \cdot w \mid a^{-1}$ (K Körper)

$$v = 1 \cdot v = (a^{-1}a)v = a^{-1}(av) = a^{-1}(-bw) = (-a^{-1}b)w \in \langle w \rangle_K = \{cw : c \in K\}$$

$$d \in K$$

$$dv = (-da^{-1}b)w \in \langle w \rangle_K$$

$$\langle v \rangle_K \subseteq \langle w \rangle_K$$

Dann auch $b \neq 0$.

Angenommen $b = 0$, $a \cdot v = -0w = \sigma$

$$v = a^{-1}\sigma = \sigma E \text{ Vertausche Rollen von } v, w : \langle w \rangle_K \subseteq \langle v \rangle_K$$

$$v \in \langle w \rangle_K$$

$$v, w \text{ linear abhängig} \Leftrightarrow \langle v \rangle_K = \langle w \rangle_K$$

Beweis. $\Rightarrow \checkmark$

$$\Leftarrow v \in \langle v \rangle_K = \langle w \rangle_K$$

$$\Rightarrow v = c \cdot w \text{ für ein } c \in K.$$

$$\Rightarrow \sigma = -v + c \cdot w = (-1)v + c \cdot w$$

$$\Rightarrow v, w \text{ linear abhängig.} \quad \square$$

c) $e_1, \dots, e_n \in K^n$ sind linear unabhängig.

$$\begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} = a_1 e_1 + \dots + a_n e_n = \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow a_1 = \dots = a_n = 0.$$

d) $\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3$ linear abhängig, linear unabhängig? Für welche $a, b, c \in \mathbb{R}$

$$\text{gilt } a \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} + b \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} + c \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}?$$

Führt auf LGS für die unbekannten a, b, c

$$1a \quad 3b \quad 2c = 0$$

$$2a \quad 2b \quad 3c = 0$$

$$3a \quad 1b \quad 4c = 0$$

Gauß:

$$\begin{pmatrix} 1 & 3 & 2 & 0 \\ 2 & 2 & 3 & 0 \\ 3 & 1 & 4 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 3 & 2 & 0 \\ 0 & -4 & -1 & 0 \\ 0 & -8 & -2 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 3 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$c \text{ frei wählbar, } b = -\frac{1}{4}c \quad a = -3b - 2c = -\frac{3}{4}c - 2c = -\frac{5}{4}c$$

$$\text{z.B. } c = 4, b = -1, a = -5$$

$$(-5) \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} + (-1) \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} + 4 \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix} = 0$$

Vektoren sind linear abhängig.

2.14 Bemerkung

Man kann auch für unendliche Mengen $M \subseteq V$ lineare Unabhängigkeit definieren.

Jede endliche Teilmenge von M ist linear unabhängig. Zum Beispiel $\{x^i : i \in \mathbb{N}_0\}$ linear unabhängig in $K[x]$.

2.15 Satz !!!

V K -VR, v_1, \dots, v_m sind linear abhängig

$$1. \Leftrightarrow \exists i : v_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m b_j v_j \text{ für geeignete } b_j \in K$$

$$\Leftrightarrow \exists i : \langle v_1, \dots, v_m \rangle_K = \langle v_1, \dots, v_{i-1}, v_{i+1}, \dots, v_m \rangle_K$$

$$2. v_1, \dots, v_m \text{ linear unabhängig}$$

$$\Leftrightarrow \text{jedes } v \in \langle v_1, \dots, v_m \rangle \text{ lässt sich als } v_1, \dots, v_m \text{ schreiben.}$$

$$3. \text{ Sind } v_1, \dots, v_m \text{ linear unabhängig und ist } v \notin \langle v_1, \dots, v_m \rangle_K, \text{ so sind } v_1, v_m, v \text{ linear unabhängig.}$$

Beweis. Wie in 0.11, aber $v_1, \dots, v_m \in V$

□

2.16 Definition

Sei V endliche erzeugter K -VR.

Eine endliche Teilmenge $B \subseteq V$ heißt *Basis* von V , falls

(1) $V\langle B \rangle_K$

(2) B linear unabhängig

($V = \{\sigma\} : \emptyset$ ist Basis von V)

2.17 Beispiel

a) e_1, \dots, e_n Basis K^n (*kanonische Basis*)

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} = a_1 e_1 + \dots + a_n e_n$$

b) $\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \end{pmatrix}, K = \mathbb{Z}_5 :$

$$3 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} = 3 \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \end{pmatrix} = 3 \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} + 4 \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \end{pmatrix} \text{ bilden keine Basis von } \mathbb{Z}_5^2$$

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \end{pmatrix}, K = \mathbb{Z}_7 :$$

Lineare Unabhängigkeit:

$$a \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} + b \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Führt auf LGS für a,b:

$$1 \cdot a + 3 \cdot b = 0$$

$$2 \cdot a + 1 \cdot b = 0$$

Gauß-Algorithmus (funktioniert über jedem Körper K)

$$\begin{pmatrix} 1 & 3 & 0 \\ 2 & 1 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 3 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \end{pmatrix} \xrightarrow{II \cdot 4} \begin{pmatrix} 1 & 3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$b = 0, a + 3b = 0, a = 0$$

$$\left\langle \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \end{pmatrix} \right\rangle_{\mathbb{Z}_5} = \mathbb{Z}_7^2$$

$$\text{Sei } \begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix} \in \mathbb{Z}_7^2$$

Gesucht sind $a, b \in \mathbb{Z}_7$

Gauß:

$$\begin{aligned}
1 \cdot a + 3 \cdot b &= c \\
2 \cdot a + 1 \cdot b &= d \\
\begin{pmatrix} 1 & 3 & c \\ 2 & 1 & d \end{pmatrix} &\rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 3 & c \\ 0 & 2 & d-2c \end{pmatrix} \xrightarrow{II \cdot 4} \begin{pmatrix} 1 & 3 & c \\ 0 & 2 & 4d-2c \end{pmatrix} \\
b = 4d - c &= 4d + 6c \\
a = c - 3b = 4c + 2d \\
\begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix} &= (4c + 2d) \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} + (4d + 6c) \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

2.18 Satz (Existenz von Basen)

Sei V endliches Erzeugter K -VR. Dann enthält jedes endliche Erzeugendensystem von V eine Basis von V .

Beweis. Sei $M \subseteq V$ endlich mit $V = \langle M \rangle_K$. Ist M linear unabhängig, so ist M Basis ✓

ist M linear abhängig, so existiert nach 2.15a)

$$v \in M \text{ mit } V = \langle M \rangle_K = \langle M \setminus \{v\} \rangle_K$$

Da M endlich, endet dieses Verfahren mit Basis □

2.19 Lemma

V endlich erzeugter K -VR

$B = \{v_1, \dots, v_n\}$ Basis von V . Sei $\sigma \neq w \in V$.

Dann $w = \sum_{j=1}^n a_j v_j, a_j \in K$.

Ist $a_i \neq 0$, so ist $(B \setminus \{v_i\}) \cup \{w\}$ wieder eine Basis von V

$$\text{Beweis. } w = \sum_{j=1}^n a_j v_j \Rightarrow a_i v_i = w - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n a_j v_j$$

$$\Rightarrow v_i = a_i^{-1} (a_i v_i) = a_i^{-1} w + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (a_i^{-1} a_j) v_j$$

$$v_i \in \langle (B \setminus \{v_i\}) \cup \{w\} \rangle_K$$

$$V = \langle B \rangle_K = \langle B \cup \{w\} \rangle_K \stackrel{2.15}{=} \langle B \setminus \{v_i\} \cup \{w\} \rangle_K$$

Zeige $(B \setminus \{v_i\}) \cup \{w\}$ ist linear unabhängig:

$$\text{Angenommen } \sigma = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^6 c_j v_j + c w = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^6 c_i v_j + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^6 c a_j v_j = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^6 (c_j + c a_j) v_j + c a_i v_i$$

v_1, \dots, v_n linear unabhängig

$\Rightarrow (1) c a_i = 0$ und

(2) $c_j + c a_j = 0$ für alle $j \neq i$

(1) $c a_i = 0, a_i \neq 0 \Rightarrow c = 0$

(2) $c_j = 0$ für alle $j \neq i$.

Fertig. □

2.20 Satz (Austauschsatz von Steinitz)

(Ernst Steinitz, 1871-1928, Kiel)

V endlich. erzeugter K -VR, B Basis von V , M endliche linear unabhängige Teilmenge von V . Dann existiert $C \subseteq B$ mit $|C| = |M|$, so dass $(B \setminus C) \cup M$ Basis von V ist.

Insbesondere $|M| \leq |B|$.

Beweis. Sei $|M| = k$

Induktions nach k .

$k = 0$ ✓

$k > 0$. Sei $M = \tilde{M} \cup \{w\}, |\tilde{M}| = k - 1$

Induktionsvoraussetzung: Existiert $\tilde{C} \subseteq B$ mit $|\tilde{C}| = |\tilde{M}|$ und $(B \setminus \tilde{C}) \cup \tilde{M}$ ist Basis von V

$$w = \sum_{u \in B \setminus \tilde{C}} a_u u + \sum_{v \in \tilde{M}} a_v v$$

Mindestens eines der a_u ist $\neq 0$, denn sonst $w = \sum_{v \in \tilde{M}} a_v v$, also $M = \tilde{M} \cup \{w\}$

linear abhängig E

Also sei $a_i \neq 0$ für ein $u \in B \setminus \tilde{C}$.

Nach 2.19 ist $(B \setminus C) \cup M$ Basis von V wobei $C = \tilde{C} \cup \{w\}$.

Fertig. □

2.21 Korollar

V endlich erzeugte K -VR

- a) Je zwei Basen von V enthalten gleich viele Vektoren
- b) Jede linear unabhängige Teilmenge von V ist endlich
- c) (Basisergänzungssatz)

Jede linear unabhängige Menge von Vektoren lässt sich zu Basis ergänzen.

Beweis. a) B, \tilde{B} Basen von V .

$$2.20: |B| \leq |\tilde{B}|$$

$$: |\tilde{B}| \leq |B|$$

$$\text{Also } |B| = |\tilde{B}|.$$

b) Angenommen V enthält unendlich linear abhängige Teilmenge M , Sei B Basis von V . Wähle $M_0 \subset M$ mit M_0 endlich, $|M_0| > |B|$.

Nach Voraussetzung ist M_0 linear abhängig Widerspruch zu 2.20

c) Sei M linear unabhängige Teilmenge von V . Nach b) ist M endlich.

Sei B eine Basis von V 2.20: $\exists c \subseteq B, |c| = |M|$ so dass $(\underbrace{B \setminus c}_{\text{Basisergänzung}}) \cup M$ Basis. \square

Basisergänzung

2.22 Satz

V endlich erzeugter K -VR,

$B \subseteq V$. Dann sind äquivalent:

- (1) B ist Basis von V
- (2) B ist maximal unabhängige Teilmenge von V
- (3) B ist minimales Erzeugungssystem von V (d.h. $\langle B \setminus \{w\} \rangle_K \neq V$ für alle $w \in B$.)

Beweis. (2) \Rightarrow (1)

Angenommen $\langle B \rangle_K \neq V$

Sei $v \in V \setminus \langle B \rangle_K$.

2.15c): $B \cup \{v\}$ linear abhängig \nexists . $\langle B \rangle_K = V$ B ist Basis

(1) \Rightarrow (2): Angenommen $B \subseteq C$, C linear unabhängig.

2.21 c ist endlich.

2.20 $|c| \leq |B|$ Daher $B = c$.

(3) \Rightarrow (1). Angenommen B ist linear abhängig

2.15a): $\exists w \in B : V = \langle B \rangle_K = \langle B \setminus \{w\} \rangle_K \nexists$

B ist linear unabhängig also Basis.

(1) \Rightarrow (3). Angenommen $\exists w \in B$ mit $\langle B \setminus \{w\} \rangle_K = V_i = \langle B \rangle_K$

2.15a): B ist linear abhängig \nexists □

2.23 Definition

V K -VR.

a) Ist V endlich erzeugt, B ist Basis von V , $|B| = n$, so hat V *Dimension* n ,
 $\dim_K(V) = n$ (oder einfach $\dim(V) = n$)

b) (V heißt nicht endlich erzeugt, so heißt V *unendlich-dimensional*)
 (Also endlich erzeugt = endlich-dimensional)

2.24 Korollar

V K -VR, $\dim_K(V) = n$, $B \subseteq V$, $|B| = n$

a) Ist B linear unabhängig, dann ist B Basis.

b) Ist $\langle B \rangle_K = V$, dann ist B Basis

Beweis: Folgt aus 2.22

2.25 Beispiel

a) $\dim_K(K^n) = n$, da e_1, \dots, e_n Basis.

b) $V = \mathbb{R}^4$
 $U = \left\langle \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right\rangle$
 $\quad \quad \quad = u_1 \quad = u_2 \quad \mathbb{R}$

u_1, u_2 sind linear unabhängig.

$$a \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + b \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ nur für } a, b = 0$$

$\{u_1, u_2\}$ Basis von U $\dim_R(U) = 2$.

Ergänze u_1, u_2 zu Basis von $V = \mathbb{R}^4$:

Erste Möglichkeit:

e_1, e_2, e_3, e_4 kanonische Basis des \mathbb{R}^4

$$U_1 = 1e_1 + 2e_2 + 0e_3 + 1e_4$$

2.19: U_1, e_3, e_4 Basis von \mathbb{R}^4

$$U_2 = au_1 + be_2 + ce_3 + de_4 =$$

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = a \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ b \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ c \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ d \end{pmatrix} \quad c = 1$$

2.19 : u_1, u_2, e_3, e_4 Basis von \mathbb{R}^4

Zweite Möglichkeit:

2.15c):

v_1, \dots, v_m linear unabhängig

$$v \notin \langle v_1, \dots, v_m \rangle \Rightarrow v_1, \dots, v_m \text{ linear unabhängig. } U = \left\{ \begin{pmatrix} a \\ 2a+2b \\ b \\ a \end{pmatrix} : a, b \in \mathbb{R} \right\}$$

$e_1 \notin U$ (1. Koordinate \neq 4. Koordinate)

2.15c) U_1, U_2, e_1 linear unabhängig.

$\langle u_1, u_2, e_1 \rangle = ?$

$$U_1 := \left\{ \begin{pmatrix} a+c \\ 2a+2b \\ b \\ a \end{pmatrix} : a, b, c \in \mathbb{R} \right\}$$

$e_2 \notin U$

2.15c): u_1, U_2, e_1, e_2 linear unabhängig

2.24: $\{u_1, u_2, e_1, e_2\}$ Basis von \mathbb{R}^4

2.26 Satz

V K -VR, $\dim_K(V) = n$.

a) Ist U Unterraum von V , so ist $\dim_K(U) \leq n$. Ist $\dim_K(U) = n$, so ist $U = V$.

b) (Dimensionenformel)

U, W Unterräume von V , so gilt:

$$\dim(U + W) = \dim(U) + \dim(W) - \dim(U \cap W)$$

Beweis. a) Ergänze Basis von U zu Basis von V . (2.21c)

b) Basis von $U \cup W \rightarrow$ Basis von U

\rightarrow Basis von w (WHK 9.23)

□

A, B endliche
Mengen

$$(|A \cup B| =$$

$$|A| + |B| - |A \cap B|)$$

2.27 Definition

V K -VR, $\dim_K(V) = n$, $B = (v_1, \dots, v_n)$ geordnete von V .

Jedes $v \in V$ hat *eindeutige* Darstellung $v = \sum_{i=1}^n a_i v_i \quad a_i \in K \quad 2.15b)$

(a_1, a_n) (in dieser Anordnung) heißen *Koordinaten* von V bezüglich B) Insbesondere v_i hat Koordinaten $(0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)$

2.28 Beispiel

a) $V = K^n, (e_1, \dots, e_n) = B$ kanonische Basis.

Koordinaten von $v = \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix}$ bezüglich $B: (a_1, \dots, a_n)$

Kartesische Koordinaten

(R. Decartes, 1596-1650)

b) $V = \mathbb{Q}^3, B = \left(\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix} \right)$

B ist geordnete Basis von V . (nachprüfen)

Koordinaten von $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ bezüglich B :

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = a_1 \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix} + a_2 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + a_3 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}$$

Gauß Algorithmus:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & -2 & 1 & -2 \\ 0 & 1 & 2 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -0.5 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -0.5 & 1 \\ 0 & 0 & 2.5 & -1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -0.5 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -0.4 \end{pmatrix}$$

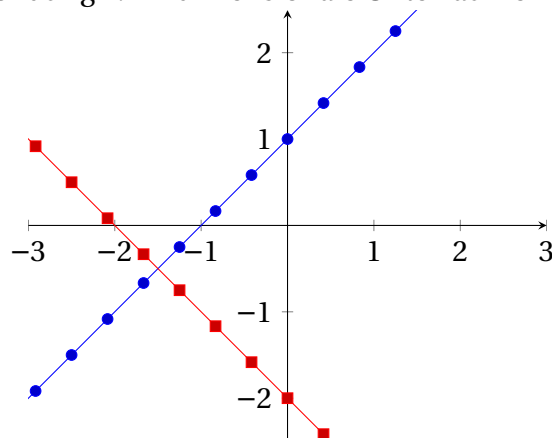
$$a_3 = -0,4$$

$$a_2 = 0.8$$

$$a_1 = 0.2$$

Koordinaten von $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ bezüglich $B \left(\frac{1}{5}, \frac{4}{5}, -\frac{2}{5} \right)$

Abbildung 4: Eindimensionale Unterräume im \mathbb{R}^2



2.29 Definition

V K -VR, U Unterraum von V , $w \in V$. Dann heißt $w + U := \{w + u : u \in U\}$ *affiner Unterraum* von v .

($w +$ ist im allgemeinen kein Untervektorraum)

$$\dim(w + u) := \dim(U)$$

2.30 Satz

V K -VR, U, W Unterräume von V ,

- a) $w + U$ ist Unterraum ①
 $\Leftrightarrow W \in U$ ②
 $\Leftrightarrow w + U = U$ ③
- b) Ist $v \in w + U$, so ist $v + U = w + U$
- c) Sind $v_1 + U, v_2 + W$ affine Unterräume, so ist entweder $(v_1 + U) \cap (v_2 + W) = \emptyset$ oder es existiert $v \in V$ mit $(v_1 + U) \cup (v_2 + W) = v + (U \cup W)$ affiner Unterraum.

Beweis. ③ \Rightarrow ① \checkmark

a) ① \Rightarrow ②

$$w + U \text{ Unterraum} \Rightarrow \sigma \in w + U$$

$$\Rightarrow \exists u \in U \text{ mit } w + u = \sigma$$

$$\Rightarrow w = -u \in U$$

② \Rightarrow ③: $w \in U, w + U \subseteq U$ (da U Unterraum)

$$\text{Sei } u \in U. \text{ Dann } u - w \in U \quad u = w + (u - w) \in w + U$$

b) $v \in w + U, v = w + u$ für ein $u \in U$

$$v + U = w + \underbrace{u + U}_{=U \text{ nach a)}} = w + U$$

c) Angenommen $(v_1 + U) \cup (v_2 + W) \neq \emptyset$

$$\text{Sei } v \in (v_1 + U) \cup (v_2 + W)$$

Nach b) $v + U = v_1 + U$

$$v + W = v_2 + W$$

$$\begin{aligned}(v_1 + U) \cup (v_2 + W) &= (v + U) \cup (v + W) \\ &= v + (U \cap W)\end{aligned}$$

$\supseteq \checkmark$

$$\begin{aligned}\subset x \in (v + U) \cup (v + W), x &= v + u = v + w, u \in U, w \in W \\ u &= w \in U \cap W.\end{aligned}$$

$$x = v + u = v + (U \cap W)$$

□

2.31 Bemerkung

affine Unterräume:

spezielle Rolle von σ ist aufgehoben. Zur Beschreibung eines $x \in K^n$ kann man jeden Punkt p als „Nullpunkt“ wählen und dann die Koordinaten von x bezüglich einer nach p „verschobenen“ Basis berechnen. p hat Koordinaten (p_1, \dots, p_n) bezüglich Basis v_1, \dots, v_n

Ursprüngliche Koordinatensystem I : σ, v_1, \dots, v_n

Neues Koordinatensystem II: $:p, v_1 + p, \dots, v_n + p$

x hat Koordinaten (a_1, \dots, a_n) bezüglich I

$$\begin{aligned}\Rightarrow \text{Koordinaten von } x \text{ bezüglich II} &= (a_1 - p_1, \dots, a_n - p_n) \\ &= \text{Koordinaten von } x - p \text{ bezüglich I}\end{aligned}$$

x hat Koordinaten (a'_1, \dots, a'_n) bezüglich II

$\Rightarrow x$ hat Koordinaten $(a'_1 + p_1, \dots, a'_n + p_n)$ bezüglich I. (Robotik)

2.32 Bemerkung

a) In Mathe II:

$x \times m$ über $\mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}$. Das geht auch bei den Körpern K .

Addition, Multiplikation mit Skalaren, Matrixmultiplikation werden analog definiert.

Es gelten die gleichen Rechenregeln wie in (Mathe II, 9.5 www.ffgti.org)

b) In Mathe II, wurden Matrizen verwendet zur Beschreibung von LGS $\begin{matrix} A \\ m \times n \end{matrix} x =$

$$\begin{matrix} b \\ n \times 1 \end{matrix} x =$$

Analog: LGS über beliebigen Körpern K . GaußAlgorithmus funktioniert analog.

$$(a_1, \dots, a_n), a_1 \neq 0 \\ \rightarrow (1, a_1^{-1}, a_2, \dots)$$

(K Körper!)

2.33 Satza) Die Menge der Lösungen eines *homogenen* LGS.

$$A \cdot x = 0$$

$$(A \in \mathcal{M}_{n,m}(K), x \in K^m \\ 0 \text{ ist Nullvektor in } K^n)$$

b) Ist das *inhomogene* LGS

$$A \cdot x = b$$

lösbar und ist $x_0 \in K^n$ eine spezielle Lösung (d.h. $A \cdot x_0 = b$), so erhält man alle Lösungen von $A \cdot x = b$ durch $\{x_0 + y : Ay = 0\}$, y = Zugehöriges homogenes LGS.

Ist U der Lösungsraum von $Ax = 0$, so ist die Lösungsmenge von $Ax = B$ gerade der affine Unterraum $x_0 + U$ von K^n

Beweis. a) Folgt aus Rechenregeln für Matrizen: $x_1, x_2 \in K^m$ Lösungen von $A \cdot x = 0$.

$$A(x_1 + x_2) = Ax_1 + Ax_2 = 0 + 0 = 0$$

 $x_1 + x_2$ Lösung. $a \in K$.

$$A(a \cdot x_1) = a \cdot (Ax_1) = a \cdot 0 = 0$$

 $a \cdot x_1$ Lösung.Null-Lösung existiert. b) $Ax_0 = b$. Sei $y \in K^m$ mit $Ay = 0$.

$$A \cdot (x_0 + y) = Ax_0 + Ay = b + 0 = b$$

 $x_0 + y$ ist Lösung von $Ax = b$ Zeige: Jede Lösung von $Ax = b$ ist von der Form $x_0 + y$ für ein y mit $Ay = 0$.Sei x Lösung von $Ax = b$.

$$x = x_0 + (x - x_0)$$

$$A(x - x_0) = Ax - Ax_0 = b - b = 0$$

□

2.34 Beispiel

gegebenes LGS:

$$\begin{array}{rrrrr} x_1 & +x_2 & +x_3 & -x_4 & = 0 \\ x_1 & -2x_2 & & x_4 & = 1 \end{array}$$

Über \mathbb{Q} :

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

Gauß:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & -1 & 0 \\ 1 & -2 & & 1 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & -3 & -1 & 2 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & \frac{1}{3} & -\frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \end{pmatrix}$$

x_3, x_4 Frei wählbar.

Zugehöriges homogenes System:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & -1 & 0 \\ 1 & -2 & & 1 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & \frac{1}{3} & -\frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \end{pmatrix}$$

Lösungsmenge = Unterraum.

Basis des Lösungsraum:

Setze die frei wählbaren x_4, x_3 .

- $x_4 = 1, x_3 = 0 \leadsto$ Lösung
- $x_4 = 0, x_3 = 1 \leadsto$ Lösung

$$\begin{pmatrix} * \\ * \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} ** \\ ** \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Jede Lösung $d \cdot \begin{pmatrix} \frac{1}{3} \\ \frac{2}{3} \\ 0 \\ c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{2}{3} \\ -\frac{1}{3} \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} * \\ * \\ c \\ d \end{pmatrix}$

Lösungsraum vom zugehörigen homogenen LGS:

$$\left\langle \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \\ 2 \\ 3 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -\frac{2}{3} \\ -\frac{1}{3} \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right\rangle$$

3 Lineare Abbildungen

3.1 Definition

V, W, K -VR

a) $\alpha : V \longrightarrow$ heißt (K -) *lineare Abbildung* (oder *Vektorraum-Homomorphismus*)

falls:

$$\text{Additivität} \quad \leftarrow (1) \quad \alpha(u + v) = \alpha(u) + \alpha(v) \text{ für alle } u, v \in V$$

$$\text{Homogenität} \quad \leftarrow (2) \quad \alpha(kv) = k\alpha(v) \text{ für alle } k \in K, v \in V$$

3.2 Bemerkung

$\alpha : V \rightarrow W$ lineare Abbildung.

a) $\alpha(\sigma) = \sigma$

b) $\alpha\left(\sum_{i=1}^n k_i v_i\right) = \sum_{i=1}^n k_i \alpha(v_i)$

Beweis. a) $\alpha(\sigma) = \alpha(\sigma + \sigma) = \alpha(\sigma)$

b) Definition + Induktion nach n. □

3.3 Beispiel

a) Nullabbildung $\alpha : V \rightarrow W$

$$\alpha(v) = 0 \text{ für alle } v \in V$$

b) $c \in K$

$$\alpha : V \rightarrow V, \alpha(v) = c \cdot v \text{ lineare Abbildung } c = 1 : \text{ id}_V$$

$$\text{c) } \zeta : \begin{cases} \mathbb{R}^3 & \longrightarrow \mathbb{R}^3 \\ \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} & \mapsto \begin{pmatrix} 3 \\ x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} - x_3 \end{cases}$$

Spiegelung an der $\{x_1, x_2\}$ -Ebene in \mathbb{R}^3

$$\text{d) } \alpha = \begin{cases} \mathbb{R}^2 & \rightarrow \mathbb{R}^n \\ \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} & \rightarrow x_1^2 \end{cases}$$

nicht linear

3.4 Satz

Sei $A \in \mathcal{M}_{m,n}(K)$.

Definiere $\alpha : K^n \rightarrow K^m$ (Spaltenvektor)

durch $\alpha(x) = A \cdot x \in K^m$ für alle $x \in K^n$

Dann ist α lineare Abbildung

Beweis. folgt aus Rechenregeln für Matrizenmultiplikation.:

$$\begin{aligned}\alpha(x+y) &= A(x+y) = Ax + Ay \\ &= \alpha(x) + \alpha(y)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\alpha(k \cdot x) &= A(kx) = k \cdot (Ax) \\ &= k\alpha(x)\end{aligned}$$

□

Beispiel aus 3.3 a)-c)

- $V = K^n$ Nullabbildung $K^n \rightarrow K^m$

Von der Form in 3.4 mit $A = \begin{pmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix}$ Nullmatrix

- $\alpha = \begin{cases} K^n & \rightarrow K^n \\ x & \mapsto cx (c \in K) \end{cases}$

3.4 mit $A = \begin{pmatrix} c & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & c \end{pmatrix}$

- Spiegelung aus 3.3c)

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

Später: Alle lineare Abbildung. $K^n \rightarrow K^m$ sind von der Form 3.4

3.5 Satz

U, V, W K -VR.

- a) $\alpha, \beta : V \rightarrow W$ linear so *auch* $\alpha + \beta$ (definiert durch $(\alpha + \beta)(v) := \alpha(v) + \beta(v) \forall v \in V$),
 und $k \cdot \alpha$ (definiert durch $(k \cdot \alpha)(v) := k \cdot \alpha(v) \forall v \in V$ linear von V nach W
- b) $\alpha : V \rightarrow W, \gamma : W \rightarrow U$ linear. so auch $\gamma \circ \alpha : V \rightarrow U$ linear A (oft $\gamma\alpha$ statt $\gamma \circ \alpha$)

Beweis. a) ADDITIVITÄT:

$$\begin{aligned}
 & u, v \in V \\
 & (\alpha + \beta)(u) + (\alpha + \beta)(v) \\
 &= \alpha(u) + \beta(u) + \alpha(v) + \beta(v) \\
 &= \alpha(u) + \alpha(v) + \beta(v) + \beta(u) \\
 &= \alpha(u + v) + \beta(u + v) \\
 &= (\alpha + \beta)(u + v)
 \end{aligned}$$

HOMOGENITÄT:

$$\begin{aligned}
 & v \in V \quad k \in K \\
 & (\alpha + \beta)(kv) \\
 &= (k\alpha + k\beta)(v) \\
 &= k(\alpha + \beta)(v)
 \end{aligned}$$

- b) U, V, W K Vektorräume

ADDITIVITÄT:

$$\begin{aligned}
 & u, v \in V \\
 & (\gamma \circ \alpha)(u) + (\gamma \circ \alpha)(v) \\
 &= \gamma(\alpha(u)) + \gamma(\alpha(v)) \\
 &= \gamma(\alpha(u) + \alpha(v)) \\
 &= \gamma(\alpha(u + v)) \\
 &= (\gamma \circ \alpha)(u + v)
 \end{aligned}$$

HOMOGENITÄT:

$$v \in V \quad k \in K$$

$$\begin{aligned}
& (\alpha \circ \gamma)(kv) \\
&= \gamma(\alpha(kv)) \\
&= \gamma(k\alpha(v)) \\
&= k\gamma(\alpha(v)) \\
&= k(\gamma \circ \alpha)(v)
\end{aligned}$$

□

3.6 Satz

$\alpha : V \rightarrow W$ lineare Abbildung

- a) Ist U Unterraum von V , so ist $\alpha(U) := \{\alpha(u), u \in U\}$ Unterraum von W .
 Insbesondere ist $\alpha(U)$, *Bild von α* , Unterraum von W ,
- b) Ist U endlich-dimensional, so auch $\alpha(U)$ und es gilt $\dim(\alpha(U)) \leq \dim(U)$

Beweis. a), $\alpha(U_1), \alpha(U_2) \in \alpha(U)$

dass heißt $u_1, u_2 \in U$, so $\alpha(U_1) + \alpha(U_2) = \alpha(u_1 + u_2) \in \alpha(U)$

$k \in K$

$k \cdot \alpha(U_1) = \alpha(ku_1) \in \alpha(U)$

b) Sei u_1, \dots, u_k Basis von U

$u \in U, u = \sum_{i=1}^k c_i u_i, c_i \in K$

$\alpha(u) = \sum_{i=1}^k c_i \alpha(u_i)$

Also : $\alpha(U) = \langle \alpha(u_1), \dots, \alpha(u_k) \rangle_K$

Nach ?? $\{\alpha(u_1), \dots, \alpha(u_k)\}$

$\dim(\alpha(U)) \leq k \leq \dim(U)$

□

3.7 Definition

V, W K -VR, V endlich dimensional. $\alpha : V \rightarrow W$ linear Abbildung.

Dann $\dim(\alpha(V)) =: \text{rg}(\alpha)$, *Rang* von α

3.8 Satz

V, W K -VR, $\alpha : V \rightarrow W$ lineare Abbildung

a) $\ker(\alpha) := \{v \in V : \alpha(v) = \sigma\},$

Kern von α , ist Unterraum von V .

b) α injektiv $\Leftrightarrow \ker(\alpha) = \{\sigma\}$

c) Ist α bijektiv, so ist die Umkehrabbildung $\alpha^{-1} : W \rightarrow V$ bijektiv *und linear*

Beweis. a) $v_1, v_2 \in \ker(\alpha)$

$$\alpha(v_1 + v_2) = \alpha(v_1) + \alpha(v_2)$$

$$= \sigma + \sigma = \sigma$$

Also: $v_1 + v_2 \in \ker(\alpha)$

$$\alpha(k \cdot v_1) = k \cdot \alpha(v_1) = k \cdot \sigma = \sigma$$

Also $k v_1 \in \ker(\alpha)$ b) \Rightarrow : \checkmark , denn falls $\sigma \neq v \in \ker(\alpha)$ so $\alpha(v) = \sigma = \alpha(\sigma)$, $\alpha(\sigma), \alpha$ nicht injektiv. \nexists

\Leftarrow : Angenommen $v_1, v_2 \in V$ mit $\alpha(v_1) = \alpha(v_2)$.

Zu zeigen: $v_1 = v_2$.

$$\sigma = \alpha(v_1) - \alpha(v_2)$$

$$= \alpha(v_1 - v_2)$$

α linear.

$$\Rightarrow v_1 - v_2 \in \ker(\alpha) = \{\sigma\}$$

$$\Rightarrow v_1 - v_2 = \sigma, v_1 = v_2.$$

c) Zu zeigen: α^{-1} ist linear.

Seien $w_1, w_2 \in W$.

$$\text{Zeige } \alpha^{-1}(w_1 + w_2) = \alpha^{-1}(w_1) + \alpha^{-1}(w_2)$$

$$\alpha \text{ bijektiv} \Rightarrow v_1, v_2 \in V \text{ mit } \alpha(v_1) = w_1, \alpha(v_2) = w_2. v_1 = \alpha^{-1}(w_1), v_2 = \alpha^{-1}(w_2).$$

$$\alpha^{-1}(w_1 + w_2) = \alpha^{-1}(\alpha(v_1) + \alpha(v_2)) = v_1 + v_2 = \alpha^{-1}(w_1) + \alpha^{-1}(w_2)$$

Homogenität analog. □

3.9 Beispiel

$$\alpha : \begin{cases} \mathbb{R}^3 & \rightarrow \mathbb{R}^3 \\ \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} & \rightarrow \begin{pmatrix} x_1 \\ 2x_1 + x_2 + 2x_3 \\ x_2 \end{pmatrix} \end{cases} \text{ ist lineare Abbildung, da}$$

$$\alpha \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \quad 3.4$$

$$\alpha(e_1) = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}, \alpha(e_2) = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \alpha(e_3) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix}$$

Bild von $\alpha(e_1), \alpha(e_2), \alpha(e_3)$ linear abhängig.

$$\alpha(\mathbb{R}^3) = \langle \alpha(e_1), \alpha(e_2) \rangle$$

$$\text{rg} = 2$$

$U = \langle e_2, e_3 \rangle$ 2-dimensional Unterraum von \mathbb{R}^3

$$\alpha(U) = \langle \alpha(e_2) \rangle = \langle e_3 \rangle \text{ 1-dimensional.}$$

$$\ker \alpha = ?$$

$$\text{Suche alle } \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \text{ mit } \begin{pmatrix} x_1 \\ 2x_1 \\ x_1 + x_2 + x_3 \end{pmatrix}$$

$$\text{LGS : } x_1 = 0$$

$$2x_1 = 0$$

$$x_1 + x_2 + 2x_3 = 0$$

$$\ker(\alpha) = \left\{ \begin{pmatrix} 0 \\ -2c \\ c \end{pmatrix} : c \in \mathbb{R} \right\}$$

$$\left\langle \begin{pmatrix} 0 \\ -2 \\ 1 \end{pmatrix} \right\rangle \text{ 1-dimensional.}$$

3.10 Satz

V, W K -VR, $\dim(V) = n$, $\{v_1, \dots, v_n\}$ sei Basis von V .

$w_1, \dots, w_n \in W$ beliebig (nicht notwendig verschieden). Dann existiert genau eine lineare Abbildung $\alpha : V \rightarrow W$ mit $\alpha(v_i) = w_i, i = 1, \dots, n$, nämlich

$$\alpha\left(\sum_{i=1}^n c_i v_i\right) := \sum_{i=1}^n c_i w_i, (\star)$$

Also: kennt man die Bilder einer Basis so kennt man die lineare Abbildung vollständig.

Beweis. Die in (\star) definiert Abbildung α ist linear und es gilt $\alpha(v_i) = w_i$ für $i = 1 \dots n$ (Nachrechnen)

α eindeutig:

Angenommen $\beta : V \rightarrow W$ linear mit $\beta(v_i) = w_i$, so gilt $\beta\left(\sum_{i=1}^n c_i v_i\right) = \sum_{i=1}^n c_i \beta(v_i) =$

$$\sum_{i=1}^n c_i w_i = \alpha\left(\sum_{i=1}^n c_i v_i\right)$$

$$\alpha = \beta$$

□

Beispiel:

$$V = W = \mathbb{R}^3$$

$$\alpha(e_1) = \begin{pmatrix} 2 \\ -17 \\ 3 \end{pmatrix}, \alpha(e_2) = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \alpha(e_3) = \begin{pmatrix} 0 \\ -5 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\alpha\left(\begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix}\right) = ?$$

$$\alpha\left(\begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix}\right) = 2 \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ -17 \\ 3 \end{pmatrix} + 3 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} + 4 \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ -5 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7 \\ -51 \\ 9 \end{pmatrix}$$

3.11 Beispiel

$$V = \mathbb{R}^n, \alpha : V \rightarrow V$$

Drehung um Winkel ϕ , $0 \leq \phi < 2\pi$, um Nullpunkt (entgegen Uhrzeigersinn).

α ist linear Abbildung (elementar geometrisch).

$$\alpha(e_1) = \alpha \phi \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\phi) \\ \sin(\phi) \end{pmatrix}$$

$$\alpha(e_2) = \alpha \phi \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin(\phi) \\ \cos(\phi) \end{pmatrix}$$

3.10

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$$

$$\alpha(x) = x_1 \alpha(e_1) + x_2 \alpha(e_2) = \begin{pmatrix} \cos(\phi) x_1 - \sin(\phi) x_2 \\ \sin(\phi) x_1 + \cos(\phi) x_2 \end{pmatrix}$$

Drehmatrix

3.12 Satz

$\alpha : V \rightarrow W$ lineare Abbildung:

$\dim(V) = n$, $\{v_1, \dots, v_n\}$ Basis von V .

a) α ist injektiv $\Rightarrow \{\alpha(v_1), \dots, \alpha(v_n)\}$ ist linear unabhängig.

b) α surjektiv $\Leftrightarrow W = \langle \alpha(v_1), \dots, \alpha(v_n) \rangle_K$

c) α bijektiv $\Leftrightarrow \{\alpha(v_1), \dots, \alpha(v_n)\}$ Basis von W

Beweis. a) \Rightarrow

$$\text{Zeige } \sum_{i=1}^n c_i \alpha(v_i) = \sigma$$

$$\Rightarrow c_1 = \dots = c_n = 0$$

$$\sigma = \sum_{i=1}^n c_i \alpha(v_i) = \alpha\left(\sum_{i=1}^n c_i v_i\right)$$

$$\sum_{i=1}^n c_i v_i \in \ker(\alpha) = \{\sigma\}$$

$$\Rightarrow \sum_{i=1}^n c_i v_i = \sigma \Rightarrow c_1 = \dots = c_n = 0$$

$$\Leftarrow: \text{Zeige } \ker(\alpha) = \{\sigma\}$$

Angenommen $\sum_{i=1}^n c_i v_i \in \ker(\alpha) \Rightarrow \alpha(\sum_{i=1}^n c_i v_i) = 0$
 $\stackrel{\alpha \text{ linear}}{=} \sum_{i=1}^n c_i \alpha(v_i) \stackrel{\alpha(v_1) \dots \alpha(v_n) \text{ linear unabhängig}}{=} 0$
 $\Rightarrow \sum_{i=1}^n c_i \alpha(v_i) = 0$
 $\Rightarrow \sum_{i=1}^n c_i v_i = 0$ b) $\alpha(V) = \langle \alpha(v_1) \dots \alpha(v_n) \rangle$ Behauptung folgt. c) Folgt aus a) und b) \square

3.13 Korollar

Seien V, W K -VR, $\dim(V) = \dim(W)$.

Dann sind V und W isomorph.

Beweis. Sei v_1, \dots, v_n Basis von V , w_1, \dots, w_n Basis von W . Nach 3.10 existiert genau eine lineare Abbildung $\alpha(v_i) = w_i$. Nach 3.12c) ist α bijektiv $V \cong W$. \square

3.14 Korollar – Wichtigster Spezialfall

$V = n - \dim$. VR über K , $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$ geordnete Basis von V . Dann ist die Abbildung.

$$\kappa_{\mathcal{B}} : \begin{cases} V & \rightarrow K^n \text{ Zeilenvektor} \\ \sum_{i=1}^n c_i v_i & \mapsto (c_1, \dots, c_n) \end{cases}$$

(Koordinatenabbildung bezüglich \mathcal{B}) ein Isomorphismus. Dass heißt $V \cong K^n$.

Beweis.

$$\kappa_{\mathcal{B}} = (0, \dots, 0, \overset{i}{\underset{\downarrow}{1}}, 0, \dots, 0)$$

v_i werden auf die kanonische Basis des K^n abgebildet. $\kappa_{\mathcal{B}}$ ist Isomorph \square

3.15 Satz (Dimensionsformel)

V endlich dimensional. K -VR $\alpha : V \rightarrow W$ lineare Abbildung.

$$\begin{aligned} \dim(V) &= \text{rg}(\alpha) + \dim(\ker(\alpha)) \\ &= \dim(\alpha(v_i)) + \dim(\ker(\alpha)) \end{aligned}$$

Beweis. Sei u_1, \dots, u_k

Basis von $\ker(\alpha)$ Basisergänzungssatz 2.21

Ergänze zu Basis $u_1, \dots, u_k, u_{k+1}, \dots, u_n$ von V . Sei $U = \langle u_{k+1}, \dots, u_n \rangle_K$ Unterraum von V .

$\ker(\alpha) \cap U = \{\sigma\}$:

Angenommen $V \in \ker(\alpha) \cap U$

$$\begin{aligned} v &= \sum_{i=1}^k c_i u_i = \sum_{i=k+1}^n c_i u_i \\ \Rightarrow \sum_{i=1}^k c_i u_i + \sum_{i=k+1}^n (-c_i) u_i &= \sigma \\ c_1 \dots c_n &= 0 \end{aligned}$$

□

$\ker(\alpha) \cap U = \{\sigma\}$, also $\alpha|_U$ ist injektiv, dass heißt $\dim(V) = \alpha(U)$

$$v \in V, v = \sum_{i=1}^k c_i u_i + \sum_{i=k+1}^n c_i u_i$$

$$\alpha(v) = \sum_{i=1}^k c_i \alpha(u_i) + \sum_{i=k+1}^n c_i \alpha(u_i) \in \alpha(U)$$

$$V = \ker(\alpha) + U$$

$$\dim(v) = \dim(\ker(\alpha)) + \dim(U) - \dim(\ker(\alpha) \cap U)$$

$$= \dim(\ker(\alpha)) + \dim(\alpha(U)) = \dim(\ker(\alpha)) + \dim(\alpha(V)) = \dim(\ker(\alpha)) + \text{rg}(\alpha)$$

3.16 Korollar

V, W endlich-dimensionaler K -VR mit $\dim(V) = \dim(W)$, $\alpha : V \rightarrow W$ linear.

Dann gilt:

α ist injektiv $\Rightarrow \alpha$ ist surjektiv $\Rightarrow \alpha$ ist bijektiv.

Beweis.

$$\alpha \text{ ist surjektiv} \Leftrightarrow \alpha(V) = W$$

$$\Leftrightarrow \dim(\alpha(V)) = \dim(W) = \dim(V)$$

$$\stackrel{3.15}{\Leftrightarrow} \dim(\ker(\alpha)) = 0 \Leftrightarrow \ker(\alpha) = \{\sigma\} \Leftrightarrow \alpha \text{ ist injektiv}$$

□

4 Der Rang einer Matrix und lineare Gleichungssysteme

4.1 Definition

Der *Zeilenrang* einer Matrix A über Körper ist die Maximalzahl linear unabhängiger Zeilen in A . Dass heißt sind z_1, \dots, z_m die Zeilen von A so ist Zeilenrang von $A = \dim = (\langle z_1, \dots, z_m \rangle)$

Analog : Spaltenrang

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

Spaltenrang von $A = 2$

Zeilenrang von $A = 2$

4.2 Satz

Bei elementaren Zeilenumformungen ändert sich der Zeilenrang einer Matrix nicht.

(Analog Spaltenumformung/Spaltenrang)

Beweis. $\dim(\langle z_1, \dots, a \cdot z_i, \dots, z_m \rangle, a \neq 0$
 $\langle z_1, \dots, z_m \rangle = \langle z_1, \dots, z_i + az_j, \dots, z_m \rangle, i \neq j$

□

4.3 Bemerkung

Zeilenrangbestimmung von A :

Bringe A mit Gauß auf Zeilenstufenform (ändert Zeilenrang nicht)

$$\begin{pmatrix} \star & \star & \star & \star & \star & \star & \star \\ 0 & \star & \star & \star & \star & \star & \star \\ 0 & 0 & \star & \star & \star & \star & \star \\ 0 & 0 & 0 & \star & \star & \star & \star \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \star & \star & \star \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \star & \star \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \star \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$\star \neq 0$

Zeilenrang = Anzahl der von Nullzeilen
verschiedenen Zeilen

4.4 Korollar

Sei $Ax = b$ ein LGS über K , $A \in \mathcal{M}_{m,n}(K)$, $x \in K^n$, $b \in K^m$ (m Gleichungen, n Unbekannte)

- $Ax = b$ ist genau dann lösbar, wenn Zeilenrang von A = Zeilenrang von $(A \mid b)$
- $Ax = b$ ist genau dann eindeutig lösbar, wenn: Zeilenrang von A = Zeilenrang von $(A \mid b) = n$ (= Anzahl der Unbekannten)
- Dimension des Lösungsraums von $Ax = 0 = n$ - Zeilenrang von A .

4.5 Satz

Sei $A \in \mathcal{M}_{m,n}(K)$,

$$\alpha = \begin{cases} K^n & \rightarrow K^m \\ x & \mapsto Ax \end{cases}$$

α ist lineare Abbildung und es gilt:

$\text{rg}(\alpha) = \text{Spaltenrang von } A$.

Beweis. $\alpha(K^n) = \langle \alpha(e_1), \dots, \alpha(e_n) \rangle$
 e_1, \dots, e_n kanonische Basis von K^n

$$\alpha(e_1) = A \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad 0i = \begin{pmatrix} a_1 i \\ a_2 i \\ \vdots \\ a_m i \\ = \end{pmatrix} \quad i\text{te Spalte von } A =: s_i$$

$$\text{rg} = \dim(\alpha(K^m)) = \dim(\langle \alpha(e_1), \dots, \alpha(e_n) \rangle) = \text{Spaltenrang von } A, \quad \square$$

4.6 Satz und Definition

Sei $A \in \mathbb{K}^{n \times m}$.

Dann ist Zeilenrang von A = Spaltenrang von A .

Diese gemeinsame Zahl heißt *Rang von A*, $\text{rg}(A)$.

Beweis. Betrachte homogenes LGS

$$Ax = 0(\star)$$

Dimension des Lösungsraumes von $(\star) = \dim(\ker(\alpha))$, α in 4.5

‘Satz (Dimensionsformel)’ on page 69 $\dim(\ker(\alpha)) = n - \text{rg}(\alpha) = n - \text{Spaltenrang von } A$. Korollar \dim Lösungsraum von $Ax = 0 = n - \text{Zeilenrang von } A$ \square

4.7 Korollar

$A \in \mathcal{M}_{m,n}(K)$.

$$\text{rg}(A) = \text{rg}(A^t)$$

Beweis. Zeilenrang von A = Spaltenrang von A^t \square

4.8 Satz

Sei V endlich dimensionaler \mathbb{K} -VR

\mathcal{B} geordnete Basis von V $u_1, \dots, u_m \in V$ beliebig.

Seien $K_{\mathcal{B}}(U_i)$ die Koordinatenvektoren von u_i bezüglich \mathcal{B} (Zeilenvektoren).

Dann gilt : $\dim(\langle u_1, \dots, u_m \rangle) = \text{rg} \begin{pmatrix} K_{\mathcal{B}}(u_1) \\ \vdots \\ K_{\mathcal{B}}(u_m) \end{pmatrix}$ lässt sich durch Gauß Algorithmus bestimmen.

Beweis. Sei $U = \langle u_1, u_m \rangle$

$K_{\mathcal{B}} : V \rightarrow K^n$ wie in 3.14.

$K_{\mathcal{B}}$ Isomorphismus : $\dim(U) = \dim(K_{\mathcal{B}}) = \text{Zeilenrang von} \begin{pmatrix} K_{\mathcal{B}}(u_1) \\ \vdots \\ K_{\mathcal{B}}(u_m) \end{pmatrix}$ □

4.9 Beispiel

V \mathbb{R} -VR aller Polynome von Grad ≥ 3 , $\dim(V) = 4$,

Basis $\mathcal{B} = (1, x, x^2, x^3)$, $U = \langle 1 + 6x^2 + x^3, 2x - 2x^2 + 3x^3, 3x + x^2, 2 + x15x^2 - x^3 \rangle_{\mathbb{R}}$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 6 & 1 \\ 0 & 2 & -2 & 3 \\ 0 & 3 & 1 & 0 \\ 2 & 1 & 15 & -1 \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{Gauß}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 6 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 1.5 \\ 0 & 0 & 4 & -4.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Rand der Matrix = 3, $\dim(U) = 3$

5 Matrizen und lineare Abbildungen

5.1 Definition

Seien V, W K -VR, $\mathcal{B} = (v_1, v_n)$ und $\mathcal{C} = (w_1, \dots, w_m)$ geordnete Basen von V bzw. W .

Sei $\alpha : V \rightarrow W$ lineare Abbildung. Nach 3.10 ist α eindeutig bestimmt durch

$\alpha(v_1), \dots, \alpha(v_n)$

$$(v = \sum_{i=1}^n b_i v_i \Rightarrow \alpha(v) = \sum_{i=1}^n b_i \alpha(v_i))$$

Stelle $\alpha(v_1) \dots \alpha(v_n) \in W$ jeweils als Linearkombination von w_1, \dots, w_m dar,

$$\alpha(v_1) = a_{11} w_1 + \dots a_{m1} w_m$$

$$\alpha(v_2) = a_{12} w_1 + \dots a_{m2} w_m$$

\vdots

$$\alpha(v_n) = a_{1n}w_1 + \dots + a_{mn}v_m$$

(Ordnung der Indizes beachten!)

Dann heißt die $m \times n$ - Matrix

$$A^{\mathcal{B}, \mathcal{C}} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}$$

Die *Darstellungsmatrix* von α bezüglich \mathcal{B} und \mathcal{C} . (In den Spalten stehen die Koordinaten von $\alpha(v_1)$ bezüglich \mathcal{C})

(Abgekürzte Schreibweise A_α , falls \mathcal{B} und \mathcal{C} aus Kontext klar).

Falls $V = W$ und $\mathcal{B} = \mathcal{C}$, so $A^{\mathcal{B}} := A_\alpha^{\mathcal{B}, \mathcal{C}}$

5.2 Bemerkung

a) Bei Kenntnis von \mathcal{B} und \mathcal{C} ist α durch $A_\alpha^{\mathcal{A}, \mathcal{B}}$ eindeutig bestimmt:

Sei $\sigma \in V$

5.3 Beispiel

a) $V = W = \mathbb{R}^2$, α Drehung um σ mit Winkel ϕ (entgegen Uhrzeigersinn)

Nach Beispiel:

$$\mathcal{B} = \mathcal{C} = (e_1, e_2)$$

$$\alpha(e_1) = \cos(\phi)e_1 + \sin(\phi)e_2 \quad \alpha(e_2) = -\sin(\phi)e_1 + \cos(\phi)e_2$$

(3.11)

$$A_\alpha^{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} \cos(\phi) & \sin(\phi) \\ -\sin(\phi) & \cos(\phi) \end{pmatrix}$$

b) Nullabbildung.

$$\beta: \begin{cases} V \rightarrow W \\ V \rightarrow \sigma \end{cases}$$

hat bezüglich aller Basen \mathcal{B} und \mathcal{C} Nullmatrix als Darstellungsmatrix

c) V, \mathcal{B}, id_x

$$A_{id_x}^{\mathcal{B}} = E_n = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

d) $V = \mathbb{R}^2, \mathcal{B} = (e_1, e_2), \mathcal{C} = (e_2, e_1)$

$$A_{id_x}^{\mathcal{B}, \mathcal{C}} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

e) $V = \mathbb{R}^2, \mathcal{B} = (e_1, e_2)$

σ Spiegelung an $\langle e_1 \rangle$, dass heißt $\varsigma\left(\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}\right) = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$

$$A_{\sigma}^{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$A_{\sigma}^{\mathcal{B}, \mathcal{B}} = \begin{pmatrix} 0.5 & -0.5 \\ 0.5 & 0.5 \end{pmatrix}$$

5.4 Satz

$v, w, \mathcal{B}, \mathcal{C}, \alpha : V \rightarrow W$ linear.

$\kappa_{\mathcal{C}}(\alpha(v))^t = A_{\alpha}^{\mathcal{B}, \mathcal{C}} \cdot \kappa_{\mathcal{B}}(v)^t$ Spaltenvektoren.

Beweis folgt aus Bemerkung.

$$\begin{array}{ccc} \text{Basis } \mathcal{B} & \xrightarrow{\alpha} & \text{Basis } \mathcal{C} \\ V & & W \\ (\kappa_{\mathcal{B}})\downarrow & & \downarrow(\kappa_{\mathcal{C}}) \\ K^n & \xrightarrow{\text{Multi. mit Matrix } A_{\alpha}} & K^n \end{array}$$

5.5 Beispiel

V, W \mathbb{R} -VR, $\dim(v) = 4$,

$\dim(w) = 3, \mathcal{B} = (v_1, v_2, v_3, v_4)$

$\mathcal{C} = (w_1, w_2, w_3), \alpha : V \rightarrow W$.

$$A_{\alpha}^{\mathcal{B}, \mathcal{C}} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 & 3 \\ 2 & 0 & -1 & 1 \\ 3 & 2 & 0 & 2 \end{pmatrix}$$

$$V = 5v_1 - 6v_2 + 7v_3 - 2v_4$$

$$\alpha(v) = ?$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 & 3 \\ 2 & 0 & -1 & 1 \\ 3 & 2 & 0 & 2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 5 \\ -6 \\ 7 \\ -2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

$$5.4: \alpha(v) = 7w_1 + w_2 - w_3$$

5.6 Korollar

Jede lineare Abbildung $K^n \rightarrow K^m$ ist von der Form $\alpha(x) = A \cdot x$ für eine $A \in \mathcal{M}_{m,n}(K)$.

Es ist $A = A_{\alpha}^{\mathcal{B}, \mathcal{C}}$, wobei \mathcal{B}, \mathcal{C} die kanonischen Basen von K^n bzw. K^m sind.

$$\text{Beweis. } x \in K^m \quad \kappa_{\mathcal{B}}(x)^t = x \quad \kappa_{\mathcal{C}}(\alpha(x))^t = \alpha(x)$$

Behauptung folgt aus 5.4

□

5.7 Satz

α, β lineare Abbildung $U \rightarrow V$

γ lineare Abbildung $V \rightarrow W$.

$\mathcal{B}, \mathcal{C}, \mathcal{D}$ geordnete Basen von U, V, W

$$\begin{aligned} \text{a) } A_{\alpha+\beta}^{\mathcal{B}, \mathcal{C}} &= A_{\alpha}^{\mathcal{B}, \mathcal{C}} + A_{\beta}^{\mathcal{B}, \mathcal{C}} \\ A_{k\alpha}^{\mathcal{B}, \mathcal{C}} &= k \cdot A_{\alpha}^{\mathcal{B}, \mathcal{C}} \quad (k \in K) \end{aligned}$$

$$\text{b) } A_{\gamma \circ \alpha}^{\mathcal{B}, \mathcal{D}} = A_{\gamma}^{\mathcal{C}, \mathcal{D}} \underset{\substack{\text{Matrix} \\ \text{Mult.}}}{\cdot} A_{\alpha}^{\mathcal{B}, \mathcal{C}} \quad (\text{Reihenfolge beachten}). \text{ Beweisen: a) nachrechnen}$$

$$\begin{aligned} \text{c) } \mathcal{B} &= (u_1, \dots, u_l) \\ \mathcal{C} &= (v_1, \dots, v_m) \quad \mathcal{D} = (w_1, \dots, w_n) \\ A^{\mathcal{B}, \mathcal{C}} &= (a_{ij}) \quad n \times l\text{-Matrix} \\ A^{\mathcal{C}, \mathcal{D}} &= (b_{ij}) \quad n \times m\text{-Matrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(\gamma \circ \alpha)(u_i) &= \gamma(\alpha(u_i)) \\
&= \gamma\left(\sum_{j=1}^m a_{ji} v_j\right) \\
&= \sum_{j=1}^m a_{ji} \left(\sum_{k=1}^n b_{kj} w_k\right) \\
&= \sum_{k=1}^n \underbrace{\left(\sum_{j=1}^m b_{kj} a_{ji}\right)}_{\text{Koeff}(k,i)} w_k
\end{aligned}$$

5.8 Beispiel

$$U = V = W = \mathbb{R}^2$$

$$\mathcal{B} = \mathcal{C} = \mathcal{D} = (e_1, e_2)$$

α Drehung um ϕ ,

β Drehung um ψ (jeweils um 0)

$$A_{\alpha}^{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{pmatrix}$$

$$A_{\beta}^{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) \end{pmatrix}$$

$\beta \circ \alpha$ Drehung um $\phi + \psi$

$$A_{\beta \circ \alpha}^{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} \cos(\phi + \psi) & -\sin(\phi + \psi) \\ \sin(\phi + \psi) & \cos(\phi + \psi) \end{pmatrix}$$

Nach 5.7:

$$\alpha^{\beta \circ \alpha}() = A_{\beta}^{\mathcal{B}} \cdot A_{\alpha}^{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} \cos(\phi) \cos(\psi) - \sin(\phi) \sin(\psi) & -\sin(\phi) \cos(\psi) - \cos(\phi) \sin(\psi) \\ \cos(\phi) \sin(\psi) + \sin(\phi) \cos(\psi) & -\sin(\phi) \sin(\psi) + \cos(\phi) \cos(\psi) \end{pmatrix}$$

$$\cos(\phi + \psi) = \cos(\phi) \cos(\psi) - \sin(\phi) \sin(\psi)$$

$$\sin(\phi + \psi) = \sin(\phi) \cos(\psi) + \cos(\phi) \sin(\psi)$$

(Additionstheoreme der Trigonometrie)

5.9 Definition

Sei $A \in \mathcal{M}_n(K)$ ($n \times n$ -Matrix),

A heißt *invertierbar*, falls $A^{-1} \in \mathcal{M}_n(K)$ existiert (*Inverse, inverse Matrix* zu A). mit

$$A \cdot A^{-1} = A^{-1} \cdot A = E_n \text{ Bemerkung:}$$

Gilt $A \cdot A^{-1} = E_n$ so auch $A^{-1} \cdot A = E_n$ (und umgekehrt). (Folgt aus 5.10 und 3.16)

5.10 Korollar

$\dim_{\kappa}(V) = n$, \mathcal{B} geordnete Basis von V , $\alpha : V \rightarrow V$ linear. Dann gilt:

α invertierbar (d.h. bijektiv) $\Leftrightarrow A_{\alpha}^{\mathcal{B}}$ invertierbar.

Dann: $A_{\alpha^{-1}}^{\mathcal{B}}$

Dann: $A_{\alpha^{-1}}^{\mathcal{B}} = (A_{\alpha}^{\mathcal{B}})^{-1}$.

Beweis:

$$\Rightarrow: A_{\alpha}^{\mathcal{B}} \cdot A_{\alpha^{-1}}^{\mathcal{B}} \stackrel{5.7}{=} A_{\alpha \circ \alpha^{-1}}^{\mathcal{B}} = A_{id_x}^{\mathcal{B}} = E_n$$

$$A_{\alpha^{-1}}^{\mathcal{B}} \cdot A_{\alpha}^{\mathcal{B}} = E_n \text{ analog.}$$

\Leftarrow : Es existiert inverse Matrix B zu $A_{\alpha}^{\mathcal{B}}$, dass heißt $A_{\alpha}^{\mathcal{B}} \cdot B = B \cdot A_{\alpha}^{\mathcal{B}} = E_n$

Dann $B = A_{\beta}^{\mathcal{B}}$ für eine eindeutig bestimmte lineare Abbildung $\beta : V \rightarrow V$. (5.2).

$$A_{\alpha}^{\mathcal{B}} \cdot A_{\beta}^{\mathcal{B}} = A_{\beta}^{\mathcal{B}} \cdot A_{\alpha}^{\mathcal{B}} = E_n$$

$$A_{\alpha \cdot \beta}^{\mathcal{B}} = A_{\beta \cdot \alpha}^{\mathcal{B}} = E_n$$

$$\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n). \quad (\alpha \cdot \beta)(v_i) = 1 \cdot v_i = v_i \quad i = 1, \dots, n$$

$$\alpha \circ \beta = id_V$$

$$\text{Analog } \beta \circ \alpha = id_V$$

$$\beta = \alpha^{-1}$$

5.11 Satz

$$A \in \mathcal{M}_n(K)$$

$$A \text{ invertierbar} \Leftrightarrow \text{rg}(A) = n.$$

(Dass heißt Zeilen/Spalten von nA sind linear unabhängig).

Beweis. Definition: $\alpha : K^n \rightarrow K^n$ durch $\alpha(x) = A \cdot x$

$A = A_{\alpha}^{\mathcal{B}}$ bezüglich der kanonischen Basis \mathcal{B} von K^n .

$$A \text{ invertierbar} \stackrel{5.10}{\Leftrightarrow} \alpha \text{ invertierbar} \stackrel{3.16}{\Leftrightarrow} \text{rg}(\alpha) = n \stackrel{4.5/4.6}{\Leftrightarrow} \text{rg}(A) = n$$

□

5.12 Lemma

$$A \in \mathcal{M}_{m,n}(K), X \in \mathcal{M}_{n,l}(K),$$

$$C = AX \in \mathcal{M}_{m,l}(K)$$

Wendet man dieselben elementaren Zeilenumformung auf A und C an (beachte A und C haben beide m Zeilen), so gilt für die entstehende Matrizen A', C' .

$$C' = A'X$$

5.13 Bestimmung der Inversen einer invertierbaren Matrix (Gauß-Jordan-Verfahren)

A invertierbare $m \times n$ Matrix. Gesucht A^{-1} mit

$$A \cdot A^{-1} = E_n$$

Man kann A durch elementare Zeilenumformungen auf die Form E_n bringen. Analog zum GaußAlgorithmus. $\text{rg}(A) = n$: In der zweiten Spalte findet man Eintrag $\neq 0$ unterhalb der Diagonale. Erzeuge wie bei Gauß1 in der Diagonale, unterhalb der Diagonale erzeuge Nullen *und* auch oberhalb. So fortfahren. Durch elementare Zeilenumformungen entsteht aus A die Einheitsmatrix E_n

$$\begin{pmatrix} \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & \dots & \dots \\ 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dots \end{pmatrix}$$

Dieselben Zeilenumformungen Angewandt auf E_n liefert Matrix A' .

$$5.12 \ E_n \cdot A^{-1} = A'$$

$$(A \mid E_n) \rightarrow (E_n \mid A^{-1})$$

(Verfahren zeigt gleichzeitig, ob A invertierbar).

5.14 Beispiel

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 \\ 2 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_3(\mathbb{Q})$$

$$\begin{aligned} & \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \rightarrow \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & -3 & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \rightarrow \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1.5 & -1 & 0.5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \\ & \rightarrow \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1.5 & -1 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 1.5 & 1 & -0.5 & 1 \end{array} \right) \rightarrow \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1.5 & -1 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{array} \right) \rightarrow \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{4}{3} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{array} \right) \end{aligned}$$

$$A^{-1} = \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{4}{3} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{array} \right)$$

5.15 Bemerkung

Sei $Ax = b$ LGS mit n Gleichungen und n Unbekannte (d.h. A $n \times n$ -Matrix).

4.4b: $Ax = b$ hat eindeutige Lösung, wenn $\text{rg}(A) = n$. Dann existiert A^{-1} und es gilt:

$$x = A^{-1} \cdot b$$

5.16 Definition

V K -VR mit geordneten Basen $\mathcal{B} = \{v_1, \dots, v_n\}$, $\mathcal{B}' = \{v'_1, \dots, v'_n\}$.

$v'_j = \sum_{i=1}^n s_{ij} v_i$, $j = 1 \dots n$ (Reihenfolge beachten!)

$S_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'} = (s_{ij})_{i,j=1,\dots,n}$ heißt *Basiswechselmatrix* Spalten. Koordinaten der Basisvektoren aus \mathcal{B}' bezüglich \mathcal{B} .

Analog $v_k = \sum_{j=1}^n t_{jk} v'_j$

$S_{\mathcal{B}', \mathcal{B}} = (t_{jk})_{j,k=1,\dots,n}$

5.17 Satz

Bezeichnungen wie in ??.

$S_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}$ ist invertierbar und $S_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}^{-1} = S_{\mathcal{B}', \mathcal{B}}$, dass heißt $S_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'} \cdot S_{\mathcal{B}', \mathcal{B}} = E_n$

Beweis. $V_k = \sum_{j=1}^n t_{jk} v'_j =$

$$= \sum_{j=1}^n t_{jk} \left(\sum_{i=1}^n s_{ij} v_i \right) = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n s_{ij} t_{jk} \right) v_i$$

$$\sum_{j=1}^n s_{ij} t_{jk} = \begin{cases} 0 & \text{für } i \neq k \\ 1 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$S_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'} \cdot S_{\mathcal{B}', \mathcal{B}} = E$$

□

5.18 Satz

$V, \mathcal{B}, \mathcal{B}'$ wie oben, $v \in V$.

$$\kappa_{\mathcal{B}'}(v)^t = S_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'} \cdot \kappa_{\mathcal{B}}(v)^t$$

Beweis: Analog zu 5.4 (5.2a))

5.19 Beispiel

$$V = \mathbb{R}^2, \mathcal{B} = (e_1, e_2) = \left(\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{B}' &= (e_1 + e_2, e_1 - 2e_2) \\ &= \left(\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \end{pmatrix} \right) \end{aligned}$$

$$S_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -2 \end{pmatrix}$$

$$S_{\mathcal{B}', \mathcal{B}} \stackrel{5.17}{=} S_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}^{-1}$$

??:

$$\left(\begin{array}{cc|cc} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & -2 & 0 & 1 \end{array} \right) \rightarrow \left(\begin{array}{cc|cc} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & -3 & -1 & 1 \end{array} \right) \rightarrow \left(\begin{array}{cc|cc} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \end{array} \right) \rightarrow \left(\begin{array}{cc|cc} 1 & 0 & \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ 0 & 1 & \frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \end{array} \right)$$

$$S_{\mathcal{B}', \mathcal{B}} = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \end{pmatrix}$$

$$v = \begin{pmatrix} 5 \\ 3 \end{pmatrix} \in \kappa_{\mathcal{B}}(v)^t$$

$$\kappa_{\mathcal{B}}(v) = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 5 \\ 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{13}{3} \\ \frac{2}{3} \end{pmatrix}$$

5.20 Satz

$\alpha : V \longrightarrow W$ linear, $\mathcal{B}, \mathcal{B}'$ geordnete Basen von V

$\mathcal{C}, \mathcal{C}'$ geordnete Basen von W

Dann:

$$A_{\alpha}^{B', C'} = S_{\mathcal{C}', \mathcal{C}} \cdot A_{\alpha}^{\mathcal{B}, \mathcal{C}} \cdot S_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}$$

Beweis: Sei $v \in V$

$$A_{\alpha}^{\mathcal{B}', \mathcal{C}'} = \kappa_{\mathcal{C}'}(\alpha(v))^t \stackrel{5.4}{=} S_{\mathcal{C}', \mathcal{C}} \kappa_{\mathcal{C}}(\alpha(v))^t \stackrel{5.18}{=} S_{\mathcal{C}', \mathcal{C}} A_{\alpha}^{\mathcal{B}, \mathcal{C}} \cdot S_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'} \cdot \kappa_{\mathcal{B}}(v)^t$$

Wenn v alle Vektoren aus V durchläuft, durchläuft $\kappa_{\mathcal{B}}(v)^t$ alle Vektoren aus K^n ($n = \dim(V)$) Daraus folgt Behauptung.

5.21 Korollar

$\alpha : V \rightarrow V, \mathcal{B}, \mathcal{B}'$ geordnete Basen von V

$S = S_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}$. Dann

$$A_{\alpha}^{\mathcal{B}'} = S^{-1} \cdot A_{\alpha}^{\mathcal{B}} \cdot S$$

Beweis: Folgt aus 5.20 und 5.12 (Bemerkung: Zwei $n \times n$ Matrizen A, B heißen *ähnlich*, wenn es eine invertierbare Matrix S gibt mit $B = S^{-1}AS$.)

5.22 Beispiel

$$V = \mathbb{R}^2, \mathcal{B} = (e_1, e_2)$$

$$\mathcal{B}' = (e_1, e_2, e_1 - 2e_2)$$

$$S_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -2 \end{pmatrix},$$

$$S_{\mathcal{B}', \mathcal{B}} = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \end{pmatrix} \quad (5.19)$$

$$\text{Sei } A_{\alpha}^{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

α ist Spiegelung aus e_1 -Achse

$$A^{\mathcal{B}' \alpha} \stackrel{5.21}{=} \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{3} & \frac{4}{3} \\ \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \end{pmatrix}$$

$$\alpha(e_1 + e_2) = \frac{1}{3}(e_1 + e_2) + \frac{2}{3}(e_1 - 2e_2)$$

$$\alpha(e_1 - 2e_2) = \frac{4}{3}(e_1 + e_2) - \frac{12}{3}(e_1 - 2e_2)$$

6 Determinanten

$$\mathcal{N}_n(k) \longrightarrow K$$

6.1 Definition

$$A \in M_n(k), i, j \in \{1, \dots, n\}$$

$A_{ij} \in \mathcal{M}_{n-1}(k)$ ist die Matrix, die aus A entsteht wenn man A die i te Zeile und die j te Spalte streicht.

Beispiel:

$$A = \begin{pmatrix} 3 & 4 & 5 \\ 6 & 7 & 8 \\ 9 & 10 & 11 \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_3(\mathbb{R})$$

$$A_{11} = \begin{pmatrix} 7 & 8 \\ 10 & 11 \end{pmatrix}, A_{23} = \begin{pmatrix} 3 & 4 \\ 9 & 10 \end{pmatrix}$$

Definition Determinante einer *Quadratischen* Matrix rekursiv.

6.2 Laplacescher Entwicklungssatz

$\det M_n(k) \rightarrow K$ ist eine Abbildung, die *Determinante*, die folgendermaSSen berechnet wird:

$$(1) \quad \det((\alpha)) = \alpha$$

$$(2) \quad A \in \mathcal{M}_n(k) \text{ Wähle irgendein } i \in \{1, \dots, n\}. \det(A) = \sum_{j=1}^n (-1)^{i+j} a_{ij}$$

(Entwicklung nach der i -ten Zeile)

(Schachbrettmuster der Vorzeichen:

$$\begin{pmatrix} + & - & + & \dots \\ - & + & - & \dots \\ + & - & + & \dots \\ - & + & - & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix}$$

)

$$(3) \quad \text{Alternativ: Wähle } j \in \{1, \dots, n\} \det(A) = \sum_{i=1}^n (-1)^{i+j} a_{ij} \det(A_{ij})$$

(Entwicklung nach der j -ten Spalte)*Bemerkung:* Wichtig:

Egal nach welcher Zeile oder Spalte man entwickelt, es kommt immer dasselbe heraus!

(Schwierigster Beweis in der elementaren Determinantentheorie)

6.3 Beispiel

a)

$$\det \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} = a_{11} a_{22} - a_{12} \cdot a_{21}$$

Entwicklung nach der 1. Zeile

Entwicklung nach der 2. Spalte: $-a_{12} a_{21} + a_{22} a_{11}$

$$\text{b) } A = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 3 \\ -1 & 0 & 4 \\ 2 & 3 & -1 \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_3(\mathbb{Q}).$$

Entwicklung nach der 1. Zeile:

$$\det(A) = 2 \cdot \det \begin{pmatrix} 0 & 4 \\ 3 & -1 \end{pmatrix} - 0 \cdot \det \begin{pmatrix} -1 & 4 \\ 2 & -1 \end{pmatrix} + 3 \cdot \det \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 2 & 3 \end{pmatrix} = -24 - 0 - 9 = -33$$

Entwicklung nach der 2. Spalte:

$$\det(A) = -3 \cdot \det \begin{pmatrix} 2 & 3 \\ -1 & 4 \end{pmatrix} = -33.$$

Allgemeine Strategie:

Verwende nur Determinanten-Berechnungen einer Zeile oder Spalte, mit möglichst vielen Nullen!

$$c) \det \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 & 0 & \dots \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 & 0 & \dots \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & a_{n4} & a_{n5} & a_{nn} \end{pmatrix} = a_{11} \cdot a_{22} \cdot a_{nn} \text{ Induktion nach } n:$$

$n = 1 \checkmark$

$n - 1 \rightarrow n$

Entwicklung nach 1. Zeile:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & 0 & \dots \\ \star & \ddots & \dots \end{pmatrix} = a_{11} \cdot \det \begin{pmatrix} a_{22} & 0 & \dots \\ \star & \ddots & \dots \end{pmatrix} = a_{11} \cdot a_{22} \cdot \dots \cdot a_{nn} \quad \text{IV}$$

Analog: Obere Dreiecksmatrix

$$\text{Insbesondere: } \det(E_n) = \det \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots \\ 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 \end{pmatrix} = 1$$

6.4 Korollar

$$\det(A) = \det(A^t)$$

6.5 Rechenregeln für Determinante

Sei $A \in \mathcal{M}_n(K)$

- Zeilen bzw. Spaltenvertauschen ändern das Vorzeichen der Determinante.
- Addiert man den Vielfache einer Zeile/Spalte zu einer anderen Zeile/Spalte, so ändert sich die Determinante nicht.
- Multipliziert man eine Zeile/Spalte von A mit $a \in K$, so ändert sich $\det(A)$ um Faktor a . Insbesondere: $A \in \mathcal{M}_n(K)$
 $\det(a \cdot A) = a^n \cdot \det(A)$
 $A, B \in \mathcal{M}_n(K)$.
 $\det(A \cdot B) = \det(A) \cdot \det(B)$. (Determinantenmultiplikationssatz)
(Aber Im allgemeinen $\det(A + B) \neq \det(A) + \det(B)$)

$$A = B = E_2 \quad \det(A) = \det(B) = 1$$

$$\det(A + B) = \det \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix} = 4$$

6.6 Bemerkung

Strategie zur Determinantenberechnung. Wende auf A elementare Zeilen/Spaltenumformungen an, um Dreiecksgestalt zu erhalten. Dann ??c).

6.7 Beispiel

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 \\ -1 & 0 & 0 & 4 \\ 1 & 3 & 4 & 2 \\ 0 & 3 & 0 & 1 \end{pmatrix}, K = \mathbb{Q}$$

$$-\det \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 4 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 3 & 4 & 6 \\ 0 & 3 & 0 & 1 \end{pmatrix} = -\det \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 4 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & -2 & -3 \\ 0 & 0 & -6 & -8 \end{pmatrix} = -\det \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 4 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & -2 & -3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = -2$$

6.8 Satz

$A \in \mathcal{M}_n(k)$. Dann gilt:

A invertierbar $\Leftrightarrow \operatorname{rg}(A) = n \Leftrightarrow \det(A) \neq 0$.

In diesem Fall gilt: $\det(A^{-1}) = \det(A)^{-1} (= \frac{1}{\det(A)})$

$\Rightarrow: AA^{-1} = E_n$

$1 = \det(E_n) = \det(A \cdot A^{-1}) = \det(A) \cdot \det(A^{-1})$

Andere Berechnungsmethode von A^{-1} mit Hilfe der Determinante. Dann:

6.9 Definition

$A \in \mathcal{M}_n(k)$. Die Adjunkte $A^{\operatorname{ad}} = (b_{ij})_{i,j=1,\dots,n}$, wobei $b_{i,j} = (-1)^{i+j} \det(A_{ji})$ Indizes beachten!

6.10 Satz

$A \in \mathcal{M}_n(K)$.

$$\text{a) } A^{\text{ad}} \cdot A = A \cdot A^{\text{ad}} = (\det A) \cdot E_n = \begin{pmatrix} \det(A) & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & \dots \\ 0 & \dots & \det(A) \end{pmatrix}$$

b) Ist $\det(A) \neq 0$ so ist $A^{-1} = \frac{1}{\det(A)} \cdot A^{\text{ad}}$

6.11 Beispiel

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}$$

Angenommen: $\det(A) = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} \neq 0$.

$A^{-1} =$

$$\frac{1}{\det(A)} \begin{pmatrix} a_{22} & -a_{12} \\ -a_{21} & a_{11} \end{pmatrix}$$

Index

$(K-)$ lineare Abbildung, 60

Abbildung, 22

abelsch, 24

Additivität, 60

affine Unterräume, 57

affiner Unterraum, 56

Assoziativgesetz, 23

aufgespannte Unterraum, 44

Basis, 47

Basisergänzungssatz, 51

Bild, 63

Darstellungsmatrix, 74

Dimension, 52

Dimensionenformel, 54

Dimensionsformel, 68

Distributivgesetz, 30

Division mit Rest, 36

Drehmatrix, 67

Einheitsvektor, 44

Einselement, 30

elementaren Zeilenumformungen, 70

endlich erzeugt, 44

Erweiterter Euklidischer

Algorithmus, 27

Erzeugungssystem, 44

Euler'sche φ -Funktion, 27

geordnete Basis, 54

Grad, 34

Gruppe, 23

Halbgruppe, 23

homogenen, 58

Homogenität, 60

Horner-Schema, 36

inhomogene, 58

Inverse, 23, 77

inverse Matrix, 77

inverses Element, 23

invertierbar, 23

K-Vektorraum, 40

kanonische Basis, 48

Kartesische Koordinaten, 54

Kern, 64

Koeffizienten, 32

kommutativer Ring, 30

Kommutativgesetz, 24

Komponente, 6

Konkatenation, 23

Konstante Polynome, 34

Koordinaten, 54

Koordinatenabbildung, 68

Körper, 31

linear abhängig, 45

linear unabhängig, 45

Linearkombination, 11, 43

Matrizenaddition, 23, 30

Matrizenmultiplikation, 6, 23, 30

-
-
- Monoid, 23
Monome, 34

neutrales Element, 23
Nullelement, 30
Nullpolynom, 32
Nullpunkt, 57
Nullraum, 8, 43
Nullteilerfreiheit, 32, 34
Nullvektor, 40

Ortsvektoren, 6

Parallelogrammregel, 6
Permutationen, 28
Polynom, 32
Polynomring, 33

Rang, 63, 72
Ring, 29
Ring mit Eins, 30

Spaltenrang, 70
Spaltenvektoren, 6, 40
systematische Gruppe, 28

Teilraum, 42

unendlich-dimensional, 52
Unterraum, 8, 42
Untervektorraum, 42

Vektor, 7
Vektorraum, 6
Vektorraum-Homomorphismus, 60
Verknüpfung, 22
Verknüpfungssymbole, 22