

Lineare Algebra I

N. Perrin

Düsseldorf

Wintersemester 2012/2013

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen	6
1.1	Mengenlehre	6
1.2	Natürliche Zahlen	10
1.3	Auswahlaxiom	11
1.4	Abbildungen	11
1.5	Relationen	14
2	Gruppen, Körper und Ringe	18
2.1	Gruppen	18
2.2	Körper	22
2.3	Ringe	25
3	Vektorräume und lineare Abbildungen	28
3.1	Vektorräume	28
3.2	Lineare Abbildungen	31
4	Linear Unabhängigkeit	34
4.1	Linearkombinationen	34
4.2	Linear Unabhängigkeit	36
5	Basen und Dimension	39
5.1	Definition und Beispiele	39
5.2	Basen und Abbildungen	40
5.3	Existenz	41
5.4	Dimension	44
5.5	Basen in Unendlich dimensionale Vektorräume	45
6	Direkte Summe	46
6.1	Definition und Beispiele	46
6.2	Karakterisierung	47
6.3	Komplement	49
6.4	Projektion	51
7	Lineare Abbildungen	52
7.1	Der Vektorraum $\text{Hom}(V, W)$	52
7.2	Lineare Abbildungen und Dimension	52

7.3	Der Dualraum	54
7.4	Quotienten Vektorräume	57
7.5	Lineare Abbildungen und Basen	60
8	Matrizen	63
8.1	Definition	63
8.2	Operationen auf Matrizen	64
8.3	Kanonische Basis	65
8.4	Matrizen als lineare Abbildungen	66
8.5	Lineare Abbildungen und Matrizen	70
8.6	Elementarmatrizen	70
8.7	Gauß-Algorithmus	72
8.8	Invertierbare Matrizen	78
8.9	Duale Abbildung	80
9	Linear Gleichungssysteme	82
9.1	Definition	82
9.2	Lösung Verfahren	83
9.3	Ein Beispiel	85
10	Basis Wechsel	86
10.1	Koordinaten Abbildungen	86
10.2	Basiswechsel	87
10.3	Berechnung von $\text{Mat}_{\mathcal{C},\mathcal{B}}(\text{Id}_V)$ für $V = K^n$	88
11	Normalformenprobleme	91
11.1	Äquivalenz von Matrizen	91
11.2	Basiswechsel für Endomorphismen	93
12	Bilineare Formen	95
12.1	Bilineare Formen, Skalarprodukte	95
12.2	Euklidische Vektorräume	96
13	Determinanten	104
13.1	Determinantenfunktion	104
13.2	Existenz	106
13.3	Rechenregeln für Determinanten	109
13.4	Cramersche Regel für lineare Gleichungssysteme	111
13.5	Determinanten von Endomorphismen	112
14	Polynomringe	113
14.1	Definition	113
14.2	Das charakteristische Polynom eines Endomorphismus	117

15 Eigenwerte, Eigenvektoren und Diagonalisierbarkeit	118
15.1 Eigenwerte und Eigenvektoren	118
15.2 Diagonalisierbare Matrizen	120
15.3 Eigenwerte und das charakteristische Polynom	122
15.4 Trigonalisierbarkeit	124
15.5 Minimal Polynom	125
15.6 Satz von Cayley-Hamilton	128
16 Symmetrische reelle Matrizen	129
16.1 Komplexe Konjugation	129
16.2 Skalar produkt und mehr	130
16.3 Symmetrische Matrizen	130
16.4 Diagonalisierbarkeit	131

1 Grundlagen

1.1 Mengenlehre

Erste Definitionen und Beispiele

Die Mengenlehre ist einen nicht trivialen Teil der Mathematik. Wir werden Mengen nicht richtig definieren.

Wir werden mit den folgenden vagen (aber für unseren Zwecke ausreichenden) Definition arbeiten.

Definition 1.1.1 Eine **Menge** M ist eine Zusammenfassung von verschiedenen Objekte (die man **Elemente** nennt) zu einem neuen Objekt.

Axiom 1.1.2 (Extensionalitätsaxiom) Zwei Mengen M und N sind genau dann **gleich**, wenn sie die selbe Elementen enthalten.

Notation 1.1.3 Wir werden die folgende Symbole benutzen.

$\{ \}$ die Mengenklammern: z.b. $M = \{0; 1; 2\}$.
 \in ist Element von: z.b. $1 \in \{0; 1; 2\}$.
 \notin ist nicht Element von: z.b. $3 \notin \{0; 1; 2\}$.

\forall alle: z.b. $\forall n \in \mathbb{N}$ es gilt $n \geq 0$.
 \exists es gibt: z.b. $\exists n \in \mathbb{N}$ so dass $n \geq 5$.
 \Rightarrow dann: z.b. $n \geq 1 \Rightarrow n \geq 0$.

Bemerkung 1.1.4 Mit Symbole: $M = N$ genau dann, wenn

$$x \in M \Rightarrow x \in N \text{ und } x \in N \Rightarrow x \in M.$$

Definition 1.1.5 Sei M eine Menge.

1. Eine **Teilmenge** N von einer Menge M ist eine Menge so dass alle elemente in N auch in M enthalten sind. Mit Symbole: $x \in N \Rightarrow x \in M$.
2. Eine **echte** Teilmenge N von einer Menge M ist eine Teilmenge die nicht gleich M ist.

Notation 1.1.6 Hier sind weitere Symbole.

\subseteq, \subset ist Teilmenge von: z.b. $\{0; 1; 2\} \subseteq \{0; 1; 2\}$ oder $\mathbb{N} \subseteq \mathbb{Z}$.
 \subsetneq ist eine echte Teilmenge von: z.b. $\{1; 2\} \subsetneq \{0; 1; 2\}$.

Bemerkung 1.1.7 Es gilt $\{0; 1; 2\} = \{2; 0; 1\} = \{0; 0; 1; 2; 2; 2\}$.

Konstruktion in der Mengenlehre

Aussonderungsaxiom

Axiom 1.1.8 (Aussonderungsaxiom) Zu jeder Menge M und jeder eigenschaft P gibt es eine Teilmenge N von M , die gerade aus den Elementen von M mit dieser eigenschaft besteht.

Notation 1.1.9 Weitere Symbole.

$|$ mit der Eigenschaft: z.b. $\{0; 1; 2\} = \{n \in \mathbb{N} \mid n \leq 2\}$.

Satz 1.1.10 Es gibt eine Menge, die keine Elemente enthält: Mann nennt diese Menge die **leere Menge** und bezeichnet sie mit \emptyset . \square

Beweis. Wir behaupten, dass es mindestens eine Menge M gibt. Dann kann man, dank dem Aussonderungsaxiom die Menge

$$\emptyset = \{x \in M \mid x \neq x\}$$

definieren. Die Menge \emptyset enthält keine Elemente. \blacksquare

Bemerkung 1.1.11 Die leere Menge ist in jede Menge enthalten: für jede Menge M gilt $\emptyset \subset M$.

Satz 1.1.12 Es gibt keine Menge die jede Menge als Element enthält \square

Beweis. Siehe Tutorium 1. \blacksquare

Vereinigungsaxiom

Axiom 1.1.13 (Vereinigungsaxiom)

1. Seien M und N zwei Mengen, dann gibt es eine Menge $M \cup N$, die **Vereinigung** von M und N , die genau alle Elemente von M und N enthält. Mit Symbole

$$M \cup N = \{x \mid x \in M \text{ oder } x \in N\}.$$

2. Verallgemeinerung. Sei I eine Indexmenge und $(M_i)_{i \in I}$ eine Familie von Mengen, dann gibt es eine Menge

$$\bigcup_{i \in I} M_i,$$

die **Vereinigung** von $(M_i)_{i \in I}$, die genau alle Elemente von M_i für alle $i \in I$ enthält. Mit Symbole

$$\bigcup_{i \in I} M_i = \{x \mid \text{es gibt ein } i \in I \text{ so dass } x \in M_i\}.$$

Beispiel 1.1.14 Here sind Beispiele von Mengen.

1. Die leere Menge \emptyset .
2. Zu jedes Element $x \in M$ kan man die einelementige Menge $\{x\}$ definieren.
2. Zu zwei Elemente x und y kann mann die Paarmenge

$$\{x, y\} = \{x\} \cup \{y\} = \{y\} \cup \{x\} = \{y, x\}$$

definieren. Es ist die Menge, die genau x und y enthält.

Aus dem Vereinigungsaxiom und dem Aussonderungsaxiom ergibt sich die Existenz des Durchschnitts von Mengen.

Satz 1.1.15 (Durchschnitt)

1. Seien M und N zwei Mengen, dann gibt es genau eine Menge $M \cap N$, der **Durchschnitt** von M und N , die genau die Elementen von M und N enthält. Mit Symbole

$$M \cap N = \{x \in M \cup N \mid x \in M \text{ und } x \in N\}.$$

2. Verallgemeinerung. Sei I eine Indexmenge und $(M_i)_{i \in I}$ eine Familie von Mengen, dann gibt es genau eine Menge

$$\bigcap_{i \in I} M_i,$$

der **Durchschnitt** von $(M_i)_{i \in I}$, welche genau die Elemente, die in jeder Menge M_i für all $i \in I$ enthalten sind. Mit Symbole

$$\bigcap_{i \in I} M_i = \left\{ x \in \bigcup_{i \in I} M_i \mid \text{für alle } i \in I \text{ gilt } x \in M_i \right\}.$$

Satz 1.1.16 Seien M , N und O drei Mengen. Dann gilt.

1. $M \cup M = M$ und $M \cap M = M$.
2. $M \cup N = N \cup M$ und $M \cap N = N \cap M$.
3. $M \cup (N \cup O) = (M \cup N) \cup O$ und $M \cap (N \cap O) = (M \cap N) \cap O$

□

Beweis. Übung ■

Satz 1.1.17 Seien M , N und O drei Mengen. Dann gilt.

$$1. M \cap (N \cup O) = (M \cap N) \cup (M \cap O).$$

$$2. M \cup (N \cap O) = (M \cup N) \cap (M \cup O). \quad \square$$

Beweis. Siehe Übungsblatt 0. ■

Definition 1.1.18 Das **Komplement** von N in M ist die Menge $M \setminus N$ von elemente die in M und nicht in N enthalten sind. Mit Symbole:

$$M \setminus N = \{x \in M \mid x \notin N\}.$$

Satz 1.1.19 Seien M , N und O drei Mengen. Dann gilt.

$$1. M \setminus (N \cup O) = (M \setminus N) \cap (M \setminus O).$$

$$2. M \setminus (N \cap O) = (M \setminus N) \cup (M \setminus O). \quad \square$$

Beweis. Siehe Übungsblatt 0. ■

Potenzmengensaxiom

Axiom 1.1.20 Sei M eine Menge, dann gibt es genau eine Menge, die **Potenzmenge** $\mathfrak{P}(M)$ von M , welche Elemente genau alle Teilmenge von M sind.

Beispiel 1.1.21

$$1. \mathfrak{P}(\emptyset) = \{\emptyset\}.$$

$$2. \mathfrak{P}(\{\emptyset\}) = \{\emptyset; \{\emptyset\}\}.$$

$$3. \mathfrak{P}(\{0; 1; 2\}) = \{\emptyset; \{0\}; \{1\}; \{2\}; \{0; 1\}; \{0; 2\}; \{1; 2\}; \{0; 1; 2\}\}.$$

Kartesisches Produkt

Definition 1.1.22 Seien M und N zwei Mengen.

1. Ein **geordnetes Paar** von Elementen $x \in M$ und $y \in N$ besteht aus der Angabe eines ersten Elements $x \in M$ und eines zweiten Elements $y \in N$. Paaren werden als (x, y) geschrieben.

2. Die Menge aller geordneten Paare von Elementen aus M und N heißt das **Kartesische Produkt** und ist durch $M \times N = \{(x, y) \mid x \in M, y \in N\}$ bezeichnet.

Satz 1.1.23 Es gilt $(x, y) = (y, x)$ genau dann wenn $x = y$. □

Beispiel 1.1.24 Sei $M = \{0; 1; 2\}$ und $N = \{A, B\}$ dann gilt

$$M \times N = \{(0, A); (0, B); (1, A); (1, B); (2, A); (2, B)\}.$$

1.2 Natürliche Zahlen

Definition

Wir haben noch keine unendliche Menge, *i. e.* Menge mit unendlichen vielen Elementen, gesehen. Wir brauchen eigentlich ein neues Axiom dafür.

Axiom 1.2.1 (Peano Axiome) Es gibt eine Menge \mathbb{N} , die Meger der natürlichen Zahlen mit den folgenden Eigenschaften:

- zu jeder $n \in \mathbb{N}$, gibt es genau einen Nachfolger $N(n) \in \mathbb{N}$ (später $N(n) = n+1$).
- Es gibt ein Element $0 \in \mathbb{N}$, so dass für alle $n \in \mathbb{N}$ gilt $N(n) \neq 0$.
- Jede $n \in \mathbb{N}$ ist Nachfolger höchstens einer natürlichen Zahlen.
- Sei M eine Teilmenge von \mathbb{N} , so dass

$$- 0 \in M$$

$$- n \in M \Rightarrow N(n) \in M$$

dann gilt $M = \mathbb{N}$ (**Induktionseigenschaftaxiom**).

Notation 1.2.2 Konkret kann man die natürliche Zahlen wie folgt definieren: 0 , $1 = N(0)$, $2 = N(1)$, $3 = N(2)$... $n+1 = N(n)$.

Man kann mit dieser Definiton die klassische arthmetische Eigenschaften von \mathbb{N} zurück finden.

Beispiel 1.2.3 Here sind weitere Beispiele von unendliche Mengen die man dank der Existenz von \mathbb{N} konstruieren kann.

Die Menge der ganzen Zahlen ist \mathbb{Z} .

Die Mende der rationale Zahlen ist \mathbb{Q} .

Die Mende der reelen Zahlen ist \mathbb{R} .

Die Mende der komplexen Zahlen ist \mathbb{C} .

Induktion

Satz 1.2.4 Sei P eine eigenschaft die eine natürliche Zahl haben kann. Wenn $P(0)$ und $P(n) \Rightarrow P(n+1)$ wahr sind, dann ist $P(n)$ wahr für jede $n \in \mathbb{N}$. □

Beweis. Sei $M = \{n \in \mathbb{N} \mid P(n) \text{ ist wahr}\}$, dann gilt $0 \in M$ und $n \in M \Rightarrow N(n) \in M$. Vom Induktionseigenschaftaxiom folgt $M = \mathbb{N}$. ■

Beispiel 1.2.5

1. Für alle $n \in \mathbb{N}$ gilt $0 + 1 + 2 + \dots + n = \frac{n(n+1)}{2}$.
2. Für alle $n \in \mathbb{N}$ gilt $0^2 + 1^2 + 2^2 + \dots + n^2 = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}$.
3. Für alle $n \in \mathbb{N}$ gilt $0^3 + 1^3 + 2^3 + \dots + n^3 = \frac{n^2(n+1)^2}{4}$.

Beweis. 1. Sei $P(n)$ die Eigenschaft

$$0 + 1 + 2 + \dots + n = \frac{n(n+1)}{2}.$$

Dann gilt $P(0)$. Angenommen, dass $P(n)$ gilt, dann gilt

$$0 + 1 + 2 + \dots + n + (n+1) = \frac{n(n+1)}{2} + (n+1) = \frac{n^2 + n + 2n + 2}{2} = \frac{(n+1)(n+2)}{2}.$$

2. und 3. Siehe Übungsblatt 0. ■

1.3 Auswahlaxiom

Wir geben noch ein Axiom, das nicht von den Anderen abhängt.

Axiom 1.3.1 (Auswahlaxiom) Sei $(M_i)_{i \in I}$ ein Mengensystem so dass für jedes $i \in I$, gilt $M_i \neq \emptyset$ und für jede $i, j \in I$, gilt $M_i \cap M_j = \emptyset$. Dann gibt es eine Menge M , so dass für jedes $i \in I$ die Menge $M_i \cap M$ genau ein Element enthält.

Dieses Axiom wird später benutzt, um zu beweisen, dass jeder Vektorraum eine Basis enthält.

1.4 Abbildungen

Definition 1.4.1 Seien M und N zwei Mengen. Eine **Abbildung** f von M nach N ist eine Vorschrift, durch die jede Elemente $x \in M$ genau ein Element $f(x) \in N$ zugeordnet wird. In Symbol man schreibt:

$$\begin{aligned} f : M &\rightarrow N \\ x &\mapsto f(x). \end{aligned}$$

Die Menge M heißt **Definitionsbereich** und N heißt **Wertebereich** der Abbildung f .

Beispiel 1.4.2

1. Sei M eine Menge, es gibt die **identische Abbildung** $\text{Id}_M : M \rightarrow M, x \mapsto x$.
2. Sei $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto x^2$.

Definition 1.4.3 Seien $f : M \rightarrow N$ und $g : N \rightarrow O$, dann kann man f mit g **componieren**. Als Resultat erhält man eine Abbildung $g \circ f : M \rightarrow O$ definiert durch $x \mapsto g(f(x))$.

Definition 1.4.4 Sei $f : M \rightarrow N$ eine Abbildung und seien $X \subset M$ und $Y \subset N$ Teilmengen von M und N . Das **Bild** von X unter f ist die Teilmenge von N definiert durch

$$f(X) = \{y \in N \mid \exists x \in X \text{ mit } y = f(x)\} = \{f(x) \mid x \in X\}.$$

Das **Urbild** von Y ist die Teilmenge von M definiert durch

$$f^{-1}(Y) = \{x \in M \mid f(x) \in Y\}.$$

Für eine Teilmenge $\{y\}$ mit einem einzigen Element schreibt man $f^{-1}(y) = f^{-1}(\{y\})$.

Beispiel 1.4.5 Sei $f : \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}$ die Abbildung definiert durch $x \mapsto x^2$. Dann gilt $f(\{-1; 1\}) = \{1\}$ und $f^{-1}(1) = \{-1; 1\}$.

Definition 1.4.6 Sei $f : M \rightarrow N$ eine Abbildung.

1. Die Abbildung f heißt **injektiv** wenn, für alle $x, x' \in M$ gilt die Implikation $f(x) = f(x') \Rightarrow x = x'$ (oder $x \neq x' \Rightarrow f(x) \neq f(x')$).
2. Die Abbildung f heißt **surjektiv** wenn, $f(M) = N$.
3. Die Abbildung f heißt **bijektiv** wenn sie injektiv und surjektiv ist.

Satz 1.4.7 Sei $f : M \rightarrow N$ eine Abbildung. Die Abbildung f ist bijektiv genau dann wenn existiert eine Abbildung $g : N \rightarrow M$ mit $g \circ f = \text{Id}_M$ und $f \circ g = \text{Id}_N$.

Für f bijektiv ist die Abbildung g eindeutig definiert. □

Beweis. Angenommen f sei bijektiv. Sei $y \in N$. Als f surjektiv ist, existiert ein Element $x \in M$ mit $f(x) = y$. Das Element x ist von y eindeutig definiert weil für $x' \in M$ mit $f(x) = f(x')$ gilt $x = x'$. Man definiert $g : N \rightarrow M$ mit $g(y) = x$. Dann gilt $f \circ g(y) = f(g(y)) = f(x) = y$ und $g \circ f(x) = g(f(x)) = g(y) = x$.

Die Abbildung g ist eindeutig: sei $h : N \rightarrow M$ mit $h \circ f = \text{Id}_M$ und $f \circ h = \text{Id}_N$, dann gilt für $y = f(x) \in N$: $h(y) = g(f(x)) = x = g(y)$. Da f surjetiv gilt die Gleichheit $h(y) = g(y)$ für alle $y \in N$.

Angenommen es gibt g , dann für $x, y \in M$ mit $f(x) = f(y)$ gilt $x = g(f(x)) = g(f(y)) = y$, so dass f injektiv ist. Sei $y \in N$ dann gilt $y = f(g(y))$ und f ist surjektiv. ■

Definition 1.4.8 Sei $f : M \rightarrow N$ eine bijektive Abbildung, dann ist die einzige Abbildung g so dass $g \circ f = \text{Id}_M$ und $f \circ g = \text{Id}_N$ die **Umkehrabbildung** genannt und wird mit $f^{-1} : N \rightarrow M$ geschrieben.

Bemerkung 1.4.9 Sei $f : M \rightarrow N$ eine Abbildung und Y eine Teilmenge von N . Die Urbild $f^{-1}(Y)$ ist für jede (auch nicht bijektive) Abbildung definiert und für $y \in N$ ist die Urbild $f^{-1}(y)$ für jede (auch nicht bijektive) Abbildung definiert.

Satz 1.4.10 Seien $f : M \rightarrow N$ und $g : N \rightarrow O$ zwei Abbildungen. Dann gilt.

1. f und g injektiv $\Rightarrow g \circ f$ injektiv.

2. f und g surjektiv $\Rightarrow g \circ f$ surjektiv.

3. f und g bijektiv $\Rightarrow g \circ f$ bijektiv. □

Beweis. 1. Seien $x, y \in M$, so dass $g \circ f(x) = g \circ f(y)$, dann gilt $g(f(x)) = g(f(y))$ und als g injektiv ist, gilt $f(x) = f(y)$. Als f injektiv ist, gilt $x = y$ so dass $g \circ f$ injektiv ist.

2. Sei $z \in O$. Als g surjektiv ist, gibt es $y \in N$ mit $g(y) = z$. Als f surjektiv ist, gibt es $x \in M$ mit $f(x) = y$. Dann gilt $g \circ f(x) = g(f(x)) = g(y) = z$ und $g \circ f$ ist surjektiv.

3. Folgt aus 1. und 2. ■

Satz 1.4.11 Sei $f : M \rightarrow N$ eine Abbildung zwischen nicht leere Mengen.

1. Die Abbildung f ist injektiv genau dann wenn, es eine Abbildung $g : N \rightarrow M$ mit $g \circ f = \text{Id}_M$ gibt.

2. Die Abbildung f ist surjektiv genau dann wenn, es eine Abbildung $h : N \rightarrow M$ mit $f \circ h = \text{Id}_N$ gibt.

3. Wenn f bijektiv ist dann sind die beide Abbildungen $g : N \rightarrow M$ und $h : N \rightarrow M$ gleich die Umkehrabbildung f^{-1} . □

Beweis. Siehe Tutorium 2. ■

Definition 1.4.12 Sei $f : M \rightarrow N$ eine Abbildung, der **Graph** von f ist die Teilmenge $\Gamma(f) \subset M \times N$ von $M \times N$ definiert durch

$$\Gamma(f) = \{(x, y) \in M \times N \mid y = f(x)\} = \{(x, f(x)) \mid x \in M\}.$$

Definition 1.4.13 Seien M und N zwei Mengen, dann ist N^M die **Menge aller Abbildungen** von M nach N .

Abbildungen und Mengenoperationen

Satz 1.4.14 Seien $f : M \rightarrow N$ eine Abbildung, $M_1, M_2 \subset M$ und $N_1, N_2 \subset N$ dann gilt:

1. $M_1 \subset M_2 \Rightarrow f(M_1) \subset f(M_2)$ und $N_1 \subset N_2 \Rightarrow f^{-1}(N_1) \subset f^{-1}(N_2)$.
2. $f(M_1 \cup M_2) = f(M_1) \cup f(M_2)$ und $f^{-1}(N_1 \cup N_2) = f^{-1}(N_1) \cup f^{-1}(N_2)$.
3. $f(M_1 \cap M_2) \subset f(M_1) \cap f(M_2)$ und $f^{-1}(N_1 \cap N_2) = f^{-1}(N_1) \cap f^{-1}(N_2)$.
4. $f(M_1) \setminus f(M_2) \subset f(M_1 \setminus M_2)$ und $f^{-1}(N_1 \setminus N_2) = f^{-1}(N_1) \setminus f^{-1}(N_2)$. □

Beweis. Siehe Übungsblatt 2. ■

1.5 Relationen

Erste Definition

Definition 1.5.1 Sei M eine Menge. Eine **Relation** auf der Menge M ist eine Teilmenge R von $M \times M$. Seien x, y zwei Elemente in M , für $(x, y) \in R$ schreibt man $x \sim_R y$.

Beispiel 1.5.2 1. Sei M eine Menge, die Relation $R = \{(x, y) \in M \times M \mid x = y\}$ ist die Gleichheitsrelation. Es gilt $x \sim_R y \Leftrightarrow x = y$.

2. Sei $M = \mathbb{N}$ und $R = \{(x, y) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \mid x \leq y\}$. Dann ist R eine Relation auf \mathbb{N} .

3. Sei M eine Menge und $R = \{(A, B) \in \mathfrak{P}(M) \mid A \cap B = \emptyset\}$. Dann ist R eine Relation auf M .

Definition 1.5.3 Sei R eine Relation auf einer Menge M .

1. R heißt **reflexiv**, wenn $x \sim_R x$ für alle $x \in M$.
2. R heißt **symmetrisch**, wenn $x \sim_R y \Rightarrow y \sim_R x$.
3. R heißt **antisymmetrisch**, wenn $(x \sim_R y \text{ und } y \sim_R x) \Rightarrow x = y$.
4. R heißt **transitiv**, wenn $(x \sim_R y \text{ und } y \sim_R z) \Rightarrow x \sim_R z$.

Beispiel 1.5.4 1. Sei M eine Menge, die Gleichheitsrelation $R = \{(x, y) \in M \times M \mid x = y\}$ ist reflexiv, symmetrisch, antisymmetrisch und transitiv.

2. Sei $M = \mathbb{N}$ die Relation $R = \{(x, y) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \mid x \leq y\}$ ist reflexiv, antisymmetrisch und transitiv aber nicht symmetrisch.

3. Sei M eine nichtleere Menge. Die Relation $R = \{(A, B) \in \mathfrak{P}(M) \mid A \cap B = \emptyset\}$ auf der Menge M ist nicht reflexiv, symmetrisch, nicht antisymmetrisch und nicht transitiv.

Ordnungsrelationen

Definition 1.5.5 Sei M eine Menge und R eine Relation auf M . Die Relation R heißt **Ordnungsrelation**, wenn R reflexiv, antisymmetrisch und transitiv ist.

Beispiel 1.5.6 1. Sei M eine Menge, die Gleichheitsrelation ist eine Ordnungsrelation.

2. Sei $M = \mathbb{N}$ die Relation $R = \{(x, y) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \mid x \leq y\}$ ist eine Ordnungsrelation.

3. Sei M eine nichtleere Menge. Die Relation $R = \{(A, B) \in \mathfrak{P}(M) \mid A \cap B = \emptyset\}$ ist nicht eine Ordnungsrelation.

Äquivalenzrelationen

Definition 1.5.7 Sei R eine Relation auf einer Menge M . 4. R heißt **Äquivalenzrelation**, wenn R reflexiv, symmetrisch und transitiv ist.

Beispiel 1.5.8 1. Sei M eine Menge, die Gleichheitsrelation ist eine Äquivalenzrelation.

2. Sei $M = \mathbb{N}$ die Relation $R = \{(x, y) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \mid x \leq y\}$ ist keine Äquivalenzrelation.

3. Sei M eine nichtleere Menge. Die Relation $R = \{(A, B) \in \mathfrak{P}(M) \mid A \cap B = \emptyset\}$ ist keine Äquivalenzrelation.

Lemma 1.5.9 Sei $R = \{(x, y) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \mid x - y \text{ ist gerade}\}$. Dann ist R eine Äquivalenzrelation auf \mathbb{N} . □

Beweis. Siehe Übungsblatt 2. ■

Satz 1.5.10 Sei $f : M \rightarrow N$ eine Abbildung. Dann ist $R = \{(x, y) \in M \mid f(x) = f(y)\}$ eine Äquivalenzrelation. □

Beweis. Als $f(x) = f(x)$, gilt $x \sim_R x$. Für $x \sim_R y$, gilt $f(x) = f(y)$ und $f(y) = f(x)$, so dass $y \sim_R x$ gilt. Für $x \sim_R y$ und $y \sim_R z$, gilt $f(x) = f(y)$ und $f(y) = f(z)$, so dass $f(x) = f(z)$ und $x \sim_R z$ gilt. ■

Quotient

Definition 1.5.11 Sei R eine Äquivalenzrelation auf einer Menge M .

1. Die **Äquivalenzklasse** $[x]$ von x ist die Menge aller Elemente y mit $x \sim_R y$. Mit Symbol:

$$[x] = \{y \in M \mid x \sim_R y\}.$$

2. Die Gesamtheit der Äquivalenzklassen bildet eine Teilmenge der Potenzmenge $\mathfrak{P}(M)$ die man M/R bezeichnet und **Quotientenmenge von M nach R** . Mit Symbol

$$\begin{aligned} M/R &= \{N \in \mathfrak{P}(M) \mid \exists x \in M \text{ mit } N = [x]\} \\ &= \{[x] \in \mathfrak{P}(M) \mid x \in M\}. \end{aligned}$$

Lemma 1.5.12 Sei R eine Äquivalenzrelation auf einer Menge M und sei $x, y \in M$. Dann sind die folgende Aussagen äquivalent:

1. $[x] = [y]$;

2. $[x] \cap [y] \neq \emptyset$;

3. $x \sim_R y$. □

Beweis. 1. \Rightarrow 2. Trivial: $x \in [x] = [y]$ also $x \in [x] \cap [y]$.

2. \Rightarrow 3. Sei $z \in [x] \cap [y]$. Dann gilt $x \sim_R z$ und $y \sim_R z$. Als R symmetrisch ist gilt $z \sim_R y$ und von der transitivität gilt $x \sim_R y$.

3. \Rightarrow 1. Sei $z \in [x]$, dann gilt $x \sim_R z$. Als R symmetrisch und transitiv ist gilt $y \sim_R z$ i. e. $z \in [y]$ und $[x] \subset [y]$. Die Inklusion $[y] \subset [x]$ kann man mit der selben Methode beweisen. ■

Korollar 1.5.13 Sei $O \in M/R$ eine Äquivalenzklasse dann gilt $x \in O \Leftrightarrow [x] = O$.

Definition 1.5.14 Sei M eine Menge, eine **Partition** von M ist eine Familie $(M_i)_{i \in I}$ von Teilmengen $M_i \subset M$ so dass

- $M_i \cap M_j = \emptyset$ für $i \neq j$,
- $\bigcup_{i \in I} M_i = M$.

Satz 1.5.15 Sei R eine Äquivalenzrelation auf einer Menge M . Dann bildet die Familie von Äquivalenzklassen eine Partition von M . □

Beweis. Aus Lemma 1.5.12 gilt $[x] \cap [y] = \emptyset$ für $[x] \neq [y]$. Außerdem, gibt es für jedes Element $x \in M$ eine Klasse: $[x]$ so dass $x \in [x]$. Es gilt daher

$$M \subset \bigcup_{[x] \in M/R} [x].$$

Die umgekehrte Inklusion gilt auch da $[x] \subset M$ für alle $[x]$. ■

Definition 1.5.16 Sei R eine Äquivalenzrelation auf einer Menge M . Die Abbildung $p_R : M \rightarrow M/R$ definiert durch $x \mapsto [x]$ heißt die **kanonische Projektion**.

Lemma 1.5.17 Sei R eine Äquivalenzrelation auf einer Menge M .

1. Die kanonische Projektion p_R ist surjektiv.
2. Es gilt für $x, y \in M$: $[x] = [y] \Leftrightarrow p_R(x) = p_R(y)$. □

Beweis. 1. Sei $[x] \in M/R$, dann gilt $[x] = p_R(x)$.

2. Trivial aus der Definition. ■

Satz 1.5.18 Sei R eine Äquivalenzrelation auf einer Menge M . Sei $f : M \rightarrow N$ eine Abbildung, so dass $[x] = [y] \Rightarrow f(x) = f(y)$. Dann gibt es eine Abbildung $\bar{f} : M/R \rightarrow N$, so dass $f = \bar{f} \circ p_R$.

$$\begin{array}{ccc} M & \xrightarrow{f} & N \\ p_R \downarrow & \nearrow \bar{f} & \\ M/R & & \end{array}$$

Beweis. M/R ist eine Menge von Teilmengen von M . Sei $O \in M/R$ (z.b. $O = [z]$ für $z \in M$). Wenn die Abbildung \bar{f} existiert, dann gilt für $x \in O$: $f(x) = \bar{f}(p_R(x)) = \bar{f}([x]) = \bar{f}(O)$ i.e. $\bar{f}(O) = f(x)$.

Seien $x, y \in O$, dann gilt aus Lemma 1.5.17: $[x] = O = [y]$ und $f(x) = f(y)$. Die Abbildung $O \rightarrow N$ definiert durch $x \mapsto f(x)$ ist konstant gleich $n \in N$. Wir definieren $\bar{f}(O) = n$. Es gilt $n = f(x)$ für jeder $x \in O$.

Es gilt $\bar{f} \circ p_R(x) = \bar{f}([x]) = f(x)$. ■

2 Gruppen, Körper und Ringe

2.1 Gruppen

Definition und Beispiele

Definition 2.1.1 Eine **Gruppe** ist ein geordnetes Paar (G, m) mit G einer Menge und m einer Abbildung $m : G \times G \rightarrow G$ (auch **Verknüpfung** genannt) so dass die folgenden Eigenschaften erfüllt sind:

- Es existiert ein **neutrales Element** e in G mit $m(e, x) = m(x, e) = x$ für alle $x \in G$.
- Die Verknüpfung m ist **assoziativ**, dass heißt $m(x, m(y, z)) = m(m(x, y), z)$ für alle $x, y, z \in G$.
- Für jedem $x \in G$ gibt es ein **inverses Element**, dass heißt eine Element $y \in G$ mit $m(x, y) = m(y, x) = e$.

Definition 2.1.2 Eine Gruppe (G, m) heißt **kommutativ** oder **abelsch** falls gilt: $m(x, y) = m(y, x)$ für alle $x, y \in G$.

Notation 2.1.3 Wir werden oft die Verknüpfung $m : G \times G \rightarrow G$ mit einem multiplikativen Symbol schreiben: $m(x, y) = x \cdot y$. Die Axiome für die Definition einer Gruppen sehen wie folgt aus:

- **Neutrales Element:** $e \in G$ mit $e \cdot x = x \cdot e = x$ für alle $x \in G$.
- **Assoziativität:** $x \cdot (y \cdot z) = (x \cdot y) \cdot z$ für alle $x, y, z \in G$.
- **Inverses Element:** für jedem $x \in G$ existiert $y \in G$ mit $x \cdot y = y \cdot x = e$.

Die **Kommutativität** sieht wie folgt aus:

$$x \cdot y = y \cdot x.$$

Beispiel 2.1.4 Hier sind Beispiele von Gruppen:

- $(\mathbb{Z}, +)$, wo $+$: $\mathbb{Z} \times \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}$ durch $(x, y) \mapsto x + y$ definiert ist, ist eine abelsche Gruppe.

- $(\mathbb{Q}, +)$, wo $+: \mathbb{Q} \times \mathbb{Q} \rightarrow \mathbb{Q}$ durch $(x, y) \mapsto x + y$ definiert ist, ist eine abelsche Gruppe.
- $(\mathbb{R}, +)$, wo $+: \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ durch $(x, y) \mapsto x + y$ definiert ist, ist eine abelsche Gruppe.
- $(\mathbb{C}, +)$, wo $+: \mathbb{C} \times \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ durch $(x, y) \mapsto x + y$ definiert ist, ist eine abelsche Gruppe.
- $(\mathbb{Q} \setminus \{0\}, \times)$, wo $\times: \mathbb{Q} \setminus \{0\} \times \mathbb{Q} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{Q} \setminus \{0\}$ durch $(x, y) \mapsto x \times y$ definiert ist, ist eine abelsche Gruppe.
- Für eine Menge M , die Menge $\text{Bij}(M)$ der bijektiven Selbstabbildungen $f: M \rightarrow M$ mit der Verknüpfung $\text{Bij}(M) \times \text{Bij}(M) \rightarrow \text{Bij}(M)$ gegeben durch Komposition von Abbildungen: $(f, g) \mapsto f \circ g$ ist eine Gruppe. Die Gruppe $(\text{Bij}(M), \circ)$ ist nicht kommutativ sofern M mindestens drei paarweise verschiedene Elemente enthält.
- $(\mathbb{N}, +)$ ist keine Gruppe: 1 hat kein inverses Element.

Satz 2.1.5 Sei (G, \cdot) eine Gruppe.

1. Das neutral Element ist eindeutig bestimmt.

2. Sei $x \in G$, das inverse Element von x ist eindeutig bestimmt. □

Beweis. 1. Seien e und e' zwei neutrale Elemente. Dann gilt $e' = e \cdot e'$ weil e' neutral ist und $e \cdot e' = e'$ weil e neutral ist. Es folgt $e' = e \cdot e' = e$.

2. Seien y und y' zwei inverse Elemente von x . Dann gilt

$$y = e \cdot y = (y' \cdot x) \cdot y = y' \cdot (x \cdot y) = y'.$$

Beispiel 2.1.6 Wir beschreiben das neutral Element und das inverse von einem Element x in den obigen Beispielen von Gruppen.

- $(\mathbb{Z}, +)$: neutral Element 0. Inverse von x : $-x$.
- $(\mathbb{Q}, +)$: neutral Element 0. Inverse von x : $-x$.
- $(\mathbb{R}, +)$: neutral Element 0. Inverse von x : $-x$.
- $(\mathbb{C}, +)$: neutral Element 0. Inverse von x : $-x$.
- $(\mathbb{Q} \setminus \{0\}, \times)$: neutral Element 1. Inverse von x : $\frac{1}{x} = x^{-1}$.
- $(\text{Bij}(M), \circ)$: neutral Element Id_M . Inverse von f : f^{-1} .

Notation 2.1.7

1. Oft (aber nicht immer) werden wir allgemeine Verknüpfungen auf G die eine Gruppe definieren mit \cdot bezeichnen. In diesem Fall werden wir das neutral Element mit 1 bezeichnen und das inverse Element von x mit x^{-1} bezeichnen.
2. Wenn eine Gruppe abelsch ist werden wir oft (aber nicht immer) die Verknüpfung mit $+$ bezeichnen. Dann werden wir das neutral Element mit 0 bezeichnen und das inverse Element von x mit $-x$ bezeichnen.
3. Sei (G, \cdot) eine Gruppe und seien $(a_i)_{i \in [1, n]}$ n Elemente in G . Dann werden wir das Produkt von diesen Elementen mit

$$\prod_{i=1}^n a_i$$

bezeichnen. Falls $n = 0$ zugelassen ist, dann handelt es sich um die **leere Folge**. Man erklärt das zugehörige leere Produkt durch

$$\prod_{i=1}^0 a_i = 1.$$

4. Sei $(G, +)$ eine Gruppe und seien $(a_i)_{i \in [1, n]}$ n Elemente in G . Dann werden wir die Summe von diesen Elementen mit

$$\sum_{i=1}^n a_i$$

bezeichnen. Falls $n = 0$ zugelassen ist, dann handelt es sich um die **leere Folge**. Man erklärt das zugehörige leere Summe durch

$$\sum_{i=1}^0 a_i = 0.$$

Untergruppe

Definition 2.1.8 Sei (G, \cdot) eine Gruppe und $H \subset G$ eine Teilmenge, dann heißt H eine **Untergruppe** von G wenn gilt:

1. $1 \in H$,
2. $x, y \in H \Rightarrow x \cdot y \in H$,
3. $x \in H \Rightarrow x^{-1} \in H$.

Satz 2.1.9 Sei H eine Untergruppe von (G, \cdot) , dann ist (H, \cdot) eine Gruppe. □

Beweis. Siehe Übungsblatt 3. ■

Satz 2.1.10 Sei (G, \cdot) eine Gruppe und seien x, y, z Elemente in G . Dann gilt:

1. $xy = xz \Rightarrow y = z$,
2. $yx = zx \Rightarrow y = z$,
3. $(x^{-1})^{-1} = x$,
4. $(xy)^{-1} = y^{-1}x^{-1}$. □

Beweis. 1. Es gilt $y = (x^{-1}x)y = x^{-1}(xy) = x^{-1}(xz) = (x^{-1}x)z = z$.

2. Es gilt $y = y(xx^{-1}) = (yx)x^{-1} = (zx)x^{-1} = z(xx^{-1}) = z$.

3. Es gilt $xx^{-1} = x^{-1}x = 1$, das heißt x ist das inverse Element für x^{-1} .

3. Es gilt $(xy)(y^{-1}x^{-1}) = x(yy^{-1})x^{-1} = xx^{-1} = 1$ und $(y^{-1}x^{-1})xy = y^{-1}(x^{-1}x)y = y^{-1}y = 1$, das heißt $y^{-1}x^{-1}$ ist das inverse Element für xy . ■

Gruppenhomomorphismus

Definition 2.1.11 Seien (G, \cdot) und (G', \star) Gruppen. Eine Abbildung $f : G \rightarrow G'$ heißt **Gruppenhomomorphismus** wenn für jeden $x, y \in G$ gilt:

$$f(xy) = f(x) \star f(y).$$

Satz 2.1.12 Sei $f : G \rightarrow G'$ ein Gruppenhomomorphismus dann gilt für alle $x \in G$

$$f(1) = e_{G'} \text{ und } f(x^{-1}) = f(x)^{-1}.$$

wo 1 das neutral Element von G ist und $e_{G'}$ das neutral Element von G' ist. □

Beweis. Es gilt $f(1) \star f(1) = f(1 \cdot 1) = f(1) = f(1) \star e_{G'}$ und von Satz 2.1.10.1 folgt $f(1) = e_{G'}$.

Es gilt $f(x) \star f(x^{-1}) = f(xx^{-1}) = f(1) = e_{G'}$ und $f(x^{-1}) \star f(x) = f(x^{-1}x) = f(1) = e_{G'}$, das heißt $f(x^{-1})$ ist das inverse Element von $f(x)$. ■

Satz 2.1.13 Sei $f : G \rightarrow G'$ ein Gruppenhomomorphismus, dann ist $\text{Ker}(f) = \{x \in G \mid f(x) = e_{G'}\}$ eine Untergruppe von G . □

Beweis. Es gilt $1 \in \text{Ker}(f)$. Für $x, y \in \text{Ker}(f)$ gilt $f(xy) = f(x) \star f(y) = e_{G'} \star e_{G'} = e_{G'}$, das heißt $xy \in \text{Ker}(f)$ und $f(x^{-1}) = f(x)^{-1} = e_{G'}^{-1} = e_{G'}$ das heißt $x \in \text{Ker}(f)$. ■

Definition 2.1.14 Sei $f : G \rightarrow G'$ ein Gruppenhomomorphismus, dann heißt die Untergruppe $\text{Ker}(f) = \{x \in G \mid f(x) = e_{G'}\}$ der **Kern** von f .

Satz 2.1.15 Sei $f: G \rightarrow G'$ ein Gruppenhomomorphismus. Die Abbildung f ist genau dann injektiv, wenn $\text{Ker}(f) = \{1\}$. \square

Beweis. Angenommen f sei injektiv, dann gilt für $x \in \text{Ker}(f)$: $f(x) = e_{G'} = f(1)$ und $x = 1$ folgt von der Injektivität.

Angenommen $\text{Ker}(f) = \{1\}$, dann gilt für $x, y \in G$ mit $f(x) = f(y)$: $f(xy^{-1}) = f(x)f(y)^{-1} = f(x)f(x)^{-1} = e_{G'}$, dass heißt $xy^{-1} \in \text{Ker}(f)$. Weiter folgt $xy^{-1} = 1$ und $x = y$. \blacksquare

Satz 2.1.16 Sei $f: G \rightarrow G'$ ein Gruppenabbildung, dann ist das Bild von f eine Untergruppe von G' \square

Beweis. Siehe Übungsblatt 3. \blacksquare

2.2 Körper

Definition und Beispiele

Definition 2.2.1 Ein **Körper** ist ein geordnetes Paar $(K, +, \cdot)$ mit K einer Menge und $+$, \cdot Verknüpfungen auf K , so dass die folgenden Eigenschaften erfüllt sind:

- $(K, +)$ ist eine kommutative Gruppe mit neutral Element 0.
- $(K \setminus \{0\}, \cdot)$ ist eine kommutative Gruppe mit neutral Element 1.
- Für jeden $x, y, z \in K$ gilt $x(y + z) = xy + xz$ (**Distributivgesetz**).

Das Element 0 heißt das **Nullelement** von K und das Element 1 heißt das **Einselement** von K .

Notation 2.2.2

1. In die Gleichung $x(y + z) = xy + xz$ hätten Wir eigentlich $x(y + z) = (xy) + (xz)$ schreiben müssen. Implizit hier ist, dass die Multiplication \cdot Vorrang der Addition $+$ hat.

2. Wir schreiben K^\times für $K \setminus \{0\}$.

3. Für $x \in K$ und $y \in K^\times$ schreiben wir $\frac{x}{y} = xy^{-1}$.

Beispiel 2.2.3 Hier sind Beispiele von Körpern:

- $(\mathbb{Q}, +, \cdot)$ ist ein Körper.
- $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ ist ein Körper.
- $(\mathbb{C}, +, \cdot)$ ist ein Körper.

- $(\mathbb{Z}, +, \cdot)$ ist keiner Körper: 2 hat kein inverses Element.

Satz 2.2.4 Sei $(K, +, \cdot)$ ein Körper.

1. Es gilt $(y + z)x = yx + zx$ für alle $x, y, z \in K$,
2. Es gilt $x0 = 0x = 0$ für alle $x \in K$,
3. Es gilt $\frac{x}{y} + \frac{z}{t} = \frac{xt + yz}{yt}$ für alle $x, z \in K$ und $y, t \in K^\times$.
4. Seien $x, y \in K$, dann gilt $xy = 0_K \Rightarrow x = 0_K$ oder $y = 0_K$. □

Beweis. 1. Es gilt $(y + z)x = z(y + z) = xy + xz = yx + zx$.

2. Es gilt $0x = x0 = x(0 + 0) = x0 + x0$ und mit Satz 2.1.10.1 gilt $0x = x0 = 0$.

3. Es gilt

$$\begin{aligned} \frac{x}{y} + \frac{z}{t} &= xy^{-1} + zt^{-1} = xtt^{-1}y^{-1} + zyy^{-1}t^{-1} = xt(yt)^{-1} + yz(yt)^{-1} \\ &= (xt + yz)(yt)^{-1} = \frac{xt + yz}{yt}. \end{aligned}$$

4. Seien $x, y \in K$, mit $xy = 0_K$. Falls $x \neq 0_K$, dann gilt $y = (x^{-1}x)y = x^{-1}(xy) = x^{-1}0_K = 0_K$. ■

Teilkörper

Definition 2.2.5 Sei $(K, +, \cdot)$ ein Körper $L \subset K$ eine Teilmenge, dann heißt L ein **Teilkörper** von K wenn L eine Untergruppe von $(K, +)$ ist und L^\times eine Untergruppen von (K^\times, \cdot) ist.

Satz 2.2.6 Sei L ein Teilkörper von $(K, +, \cdot)$, dann ist $(L, +, \cdot)$ ein Körper. □

Beweis. Folgt von Satz 2.1.9. ■

Beispiel 2.2.7

1. \mathbb{Q} ist ein Teilkörper von $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ und von $(\mathbb{C}, +, \cdot)$.
2. \mathbb{R} ist ein Teilkörper von $(\mathbb{C}, +, \cdot)$.
3. $\mathbb{Q}(\sqrt{2}) = \{x + y\sqrt{2} \in \mathbb{R} \mid x, y \in \mathbb{Q}\}$ ist ein Teilkörper von \mathbb{R} (siehe Übungsblatt 3).

Körperhomomorphismus

Definition 2.2.8 Seien $(K, +, \cdot)$ und $(K', +, \cdot)$ zwei Körper. Eine Abbildung $f : K \rightarrow K'$ heißt **Körperhomomorphismus** wenn $f : (K, +) \rightarrow (K', +)$ und $f : (K^\times, \cdot) \rightarrow (K'^\times, \cdot)$ Gruppenhomomorphismen sind.

Satz 2.2.9 Sei $f : K \rightarrow K'$ ein Körperhomomorphismus dann gilt für alle $x \in K$ und $y \in K^\times$:

$$f(0_K) = 0_{K'}, \quad f(1_K) = 1_{K'}, \quad f(-x) = -f(x) \quad \text{und} \quad f(y^{-1}) = f(y)^{-1}.$$

Beweis. Folgt von Satz 2.1.12. ■

Beispiel 2.2.10 Sei $f : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ mit $f(z) = \bar{z}$ die komplexe Konjugation, dann ist f ein Körperhomomorphismus (siehe Übungsblatt 3).

Satz 2.2.11 Sei $f : K \rightarrow K'$ ein Körperhomomorphismus, dann ist f injektiv. □

Beweis. Wir berechnen $\text{Ker}(f) = \{x \in K \mid f(x) = 0_{K'}\}$. Sei $x \in \text{Ker}(f)$ mit $x \neq 0_K$, dann gilt $0_{K'} \neq 1_{K'} = f(1_K) = f(xx^{-1}) = f(x)f(x^{-1}) = 0_{K'}f(x^{-1}) = 0_{K'}$ ein Widerspruch. Weiter folgt $x \in \text{Ker}(f) \Rightarrow x = 0_K$ und $\text{Ker}(f) = \{0_K\}$ und aus Satz 2.1.15 folgt, dass f injektiv ist. ■

Die Charakteristik eines Körper

Definition 2.2.12 Sei K ein Körper, $n \in \mathbb{N}$ und $x \in K$. Man definiert $n \cdot x$ durch

$$n \cdot x = \underbrace{x + x + \cdots + x}_{n \text{ mal}}.$$

Man definiert $\text{char}(K)$, die **Charakteristik** von K , durch $\text{char}(K) = 0$ falls $n \cdot 1_K \neq 0$ für alle $n \neq 0$, und $\text{char}(K) = \min\{n \in \mathbb{N} \setminus \{0\} \mid n \cdot 1_K = 0_K\}$ andernfalls.

Satz 2.2.13 Sei K ein Körper, dann gilt $\text{char}(K) = 0$ oder $\text{char}(K)$ ist eine Primzahl. □

Beweis. Angenommen dass $\text{char}(K) \neq 0$, seien $n, m \in \mathbb{N}$ mit $\text{char}(K) = nm$. Dann gilt $\text{char}(K) \cdot 1_K = (nm) \cdot 1_K = (n \cdot 1_K)(m \cdot 1_K)$ und aus Satz 2.2.4 folgt $n \cdot 1_K = 0_K$ und $m \cdot 1_K = 0_K$. Aus der Definition folgt $\text{char}(K) = n$ oder $\text{char}(K) = m$, dass heißt $\text{char}(K)$ ist eine Primzahl. ■

2.3 Ringe

Definition und Beispiele

Definition 2.3.1 Ein **Ring** ist ein geordnetes Paar $(R, +, \cdot)$ mit R einer Menge und $+, \cdot$ Verknüpfungen so dass die folgenden Eigenschaften erfüllt sind:

- $(R, +)$ ist eine kommutative Gruppe,
- es existiert ein **Einselement** 1_R in R mit $1_R \cdot x = x \cdot 1_R = x$ für alle $x \in R$,
- die Verknüpfung \cdot ist assoziativ,
- für jeden $x, y, z \in R$ gilt $x(y + z) = xy + xz$ und $(y + z)x = yx + zx$.

Definition 2.3.2 Ein Ring $(R, +, \cdot)$ heißt **kommutativ** falls gilt: $xy = yx$ für alle $x, y \in R$

Beispiel 2.3.3 Hier sind Beispiele von Ringe:

- $(\mathbb{Z}, +, \cdot)$, ist ein kommutativer Ring.
- Ein Körper $(K, +, \cdot)$ ist ein kommutativer Ring also sind $(\mathbb{Q}, +, \cdot)$, $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ und $(\mathbb{C}, +, \cdot)$ kommutative Ringe.

Unterringe

Definition 2.3.4 Sei $(R, +, \cdot)$ ein Ring und $S \subset R$ eine Teilmenge, dann heißt S eine **Unterring** von R wenn gilt:

1. $(S, +)$ ist eine Untergruppe von $(R, +)$,
2. $x, y \in S \Rightarrow xy \in S$.
3. $1 \in S$.

Satz 2.3.5 Sei S ein Unterring von $(R, +, \cdot)$, dann ist $(S, +, \cdot)$ ein Ring. □

Beweis. Übung. ■

Ringhomomorphismus

Definition 2.3.6 Seien $(R, +, \cdot)$ und $(R', +, \cdot)$ Ringe. Eine Abbildung $f : R \rightarrow R'$ heißt **Ringhomomorphismus** wenn gilt:

1. $f : (R, +) \rightarrow (R', +)$ ist ein Gruppenhomomorphismus.
2. $f(1_R) = 1_{R'}$.
3. $f(xy) = f(x)f(y)$ für jeden $x, y \in R$.

Beispiel 2.3.7

1. Eine Körperhomomorphismus ist ein Ringhomomorphismus.
2. Sei K ein Körper, die Abbildung $\mathbb{Z} \rightarrow K$ definiert durch $n \mapsto n \cdot 1_K$ ist ein Ringhomomorphismus.

Die Ringe \mathbb{Z}_n

Lemma 2.3.8 (Schulwissen) Seien $x, n \in \mathbb{Z}$, mit $n \neq 0$. Dann existieren eindeutig bestimmte Elemente $r, q \in \mathbb{Z}$ mit $0 \leq r < n$ und $x = qn + r$.

Setze $r_n(x) = r$. □

Definition 2.3.9 Sei $n \in \mathbb{N}$ mit $n \geq 2$ und sei $\mathbb{Z}_n = \{0, 1, 2, \dots, n-1\}$. Für $x, y \in \mathbb{Z}_n$ sei $x + y = r_n(x + y)$ und $x \cdot y = r_n(xy)$.

Satz 2.3.10 $(\mathbb{Z}_n, +, \cdot)$ ist ein kommutativer Ring. □

Beweis. Übung. ■

Satz 2.3.11 $(\mathbb{Z}_n, +, \cdot)$ ist ein Körper genau dann wenn n eine Primzahl ist. □

Beweis. Es gilt $n \cdot 1_{\mathbb{Z}_n} = 0_{\mathbb{Z}_n}$ und $m \cdot 1_{\mathbb{Z}_n} \neq 0_{\mathbb{Z}_n}$ für $0 < m < n$. Falls \mathbb{Z}_n ein Körper ist, gilt $\text{char}(\mathbb{Z}_n) = n$ und n ist eine Primzahl.

Angenommen, dass n eine Primzahl ist, wir beweisen, dass jedem $x \in \mathbb{Z}_n \setminus \{0_{\mathbb{Z}_n}\}$ ein inverses Element hat. Wir zeigen zuerst ein Lemma.

Lemma 2.3.12 Sei n eine Primzahl ist. Dann ist \mathbb{Z}_n Nullteilerfrei, das heißt: für $x, y \in \mathbb{Z}_n$ mit $x \cdot y = 0_{\mathbb{Z}_n}$ gilt $x = 0_{\mathbb{Z}_n}$ oder $y = 0_{\mathbb{Z}_n}$. □

Beweis. Seien $x, y \in \mathbb{Z}_n$ mit $x \cdot y = 0_{\mathbb{Z}_n}$. Dann ist xy ist durch n teilbar. Da n eine Primzahl ist, folgt: n teilt x oder y . Damit ist aber $x = 0$ oder $y = 0$, da $0 \leq x, y \leq n-1$. ■

Sei nun $x \in \mathbb{Z}_n \setminus \{0_{\mathbb{Z}_n}\}$. Definiere eine Abbildung $m_x : \mathbb{Z}_n \rightarrow \mathbb{Z}_n$ durch $m_x(y) = x \cdot y$. Dann ist m_x injektiv: seien y, z mit $m_x(y) = m_x(z)$, es folgt $x(y - z) = 0_{\mathbb{Z}_n}$. Vom Lemma folgt $y - z = 0_{\mathbb{Z}_n}$ und $y = z$.

Alle Elemente $m_x(0), m_x(1), m_x(2), \dots, m_x(n-1)$ sind paarweise verschieden. Es sind dann n Elemente im Bild $m_x(\mathbb{Z}_n)$ von m_x . Da \mathbb{Z}_n genau n Elemente hat gilt: m_x ist surjektiv. Insbesondere gilt: es gibt ein $y \in \mathbb{Z}_n$ mit $m_x(y) = 1_{\mathbb{Z}_n}$. Dann ist y das inverses Element von x und \mathbb{Z}_n ist ein Körper. ■

3 Vektorräume und lineare Abbildungen

3.1 Vektorräume

Definitionen und Beispiele

Definition 3.1.1 Sei K ein Körper. Ein **Vektorraum** über K (oder K -**Vektorraum**) ist eine Menge V zusammen mit zwei Abbildungen $+: V \times V \rightarrow V$ (**Addition** genannt) und $\cdot: K \times V \rightarrow V$ (**Skalarmultiplikation** genannt) mit den folgenden Eigenschaften:

- $(V, +)$ ist eine kommutative Gruppe,
- für alle $x, y \in K$ und $v \in V$, es gilt $(xy) \cdot v = x \cdot (y \cdot v)$,
- für alle $v \in V$ gilt $1_K \cdot v = v$,
- für alle $x \in K$ und $v_1, v_2 \in V$ es gilt $x \cdot (v_1 + v_2) = x \cdot v_1 + x \cdot v_2$.
- für alle $x, y \in K$ und $v \in V$ es gilt $(x + y) \cdot v = x \cdot v + y \cdot v$.

Die Elemente in V heißen **Vektoren**, die Elemente in K heißen **Skalare**. Das Nullelement 0_v von $(V, +)$ heißt **Nullvektor** (oder **die 0 von V**).

Notation 3.1.2 Sei V ein K -Vektorraum man setze

- $v_1 - v_2 = v_1 + (-1) \cdot v_2$ für alle $v_1, v_2 \in V$,
- $xv = x \cdot v$ für alle $x \in K$ und $v \in V$.

Beispiel 3.1.3 Sei K ein Körper.

1. Der **Nullvektorraum** $V = \{0\}$ über K (für $+$ und \cdot gibt es nur eine Möglichkeit). Man schreibt einfach $V = 0$.
2. Der Vektorraum $V = K$: Addition und Skalarmultiplikation sind durch Addition und Multiplikation von K definiert.

3. Sei $V = K^n$ das n -fache Kartesische Produkt von K . Wir schreiben Elemente als Spalten:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

wobei $x_i \in K$. Wir definieren $+: V \times V \rightarrow V$ durch

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 + y_1 \\ \vdots \\ x_n + y_n \end{pmatrix}$$

und $\cdot: K \times V \rightarrow V$ durch

$$x \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} xx_1 \\ \vdots \\ xx_n \end{pmatrix}$$

Dann ist $(V, +, \cdot)$ ein Vektorraum (siehe Übungsblatt 4).

4. Sei I eine Menge, dann ist $K^I = \{\text{Abbildungen } f: I \rightarrow K\}$ ein Vektorraum, wobei für $f, g \in K^I$ und $x \in K$, sind $f + g$ und $x \cdot f$ die Abbildungen definiert durch

$$(f + g)(i) = f(i) + g(i) \text{ und } (x \cdot f)(i) = xf(i)$$

für alle $i \in I$.

5. Sei L ein Körper so das K ein Teilkörper von L ist ($K \subset L$). Dann ist L ein K -Vektorraum mit Addition und Skalarmultiplikation gegen durch Addition und Multiplikation von L .

Zum Beispiel sind \mathbb{R} und \mathbb{C} Vektorräume über \mathbb{Q} (und auch über \mathbb{R}).

Der Körper $\mathbb{Q}(\sqrt{2}) = \{x + y\sqrt{2} \in \mathbb{R} \mid x, y \in \mathbb{Q}\}$ ist ein \mathbb{Q} -Vektorraum.

6. Seien V und W zwei K -Vektorräume, dann ist $V \times W$ auch ein K -Vektorraum wobei Addition und Skalarmultiplikation durch

$$(v_1, w_1) + (v_2, w_2) = (v_1 + v_2, w_1 + w_2) \text{ und } x \cdot (v, w) = (x \cdot v, x \cdot w)$$

gegeben sind.

Definition 3.1.4 Seien V und W zwei Vektorräume. Der K -Vektorraum $V \times W$ wird mit $V \oplus W$ bezeichnet und heißt **(externe) direkte Summe** von V und W .

Unterräume

Definition 3.1.5 Sei V ein K -Vektorraum, ein **Unterraum** W von V ist eine Teilmenge W von V , so dass gilt:

- $(W, +)$ ist eine Untergruppe von $(V, +)$,
- $xw \in W$ für alle $x \in K$ und $w \in W$.

Lemma 3.1.6 Sei V ein K -Vektorraum und sei W ein Unterraum von V . Dann ist W ein K -Vektorraum mit Addition und Skalarmultiplikation durch Einschränkung der Addition und Skalarmultiplikation von V gegeben. \square

Beweis. Übung. ■

Beispiel 3.1.7 Sei K ein Körper.

1. Sei V ein K -Vektorraum, dann ist $\{0_V\}$ ein Unterraum von V . Statt $\{0_V\}$ schreibt man einfach 0_V oder sogar 0 .

2. Sei V ein K -Vektorraum und sei $v \in V$. Dann ist $\langle v \rangle = \{xv \in V \mid x \in K\}$ ein Unterraum von V . Für $v = 0_V$ gilt $\langle v \rangle = 0_V$. Für $v \neq 0_V$ heißt $\langle v \rangle$ eine **Gerade** von V .

3. Seien W_1 und W_2 zwei Unterräume von ein K -Vektorraum V . Dann sind

$$W_1 \cap W_2 \quad \text{und} \quad W_1 + W_2 = \{w_1 + w_2 \in V \mid w_1 \in W_1 \text{ und } w_2 \in W_2\}$$

Unterräume.

4. Sei I eine Menge, dann ist

$$K^{(I)} = \{f \in K^I \mid f(i) \neq 0 \text{ für nur endliche viele } i \in I\}$$

ein Unterraum von K^I .

5. Für ein Intervall I in \mathbb{R} , dann ist

$$C^0(I) = \{f \in \mathbb{R}^I \mid f \text{ ist stetig}\}$$

ein Unterraum von \mathbb{R}^I .

Definition 3.1.8 Sei V ein K -Vektorraum. Zwei Unterräume W_1 und W_2 sind in **direkte Summe** falls $W_1 \cap W_2 = 0_V$. In diesem Fall schreibt man $W_1 \oplus W_2 = W_1 + W_2$ und nennt man $W_1 \oplus W_2$ die **interne direkte Summe**.

3.2 Lineare Abbildungen

Definitionen und Beispiele

Definition 3.2.1 Seien V und W zwei K -Vektorräume. Eine Abbildung $f : V \rightarrow W$ heißt **linear** oder **K -linear** falls gilt:

- $f : (V, +) \rightarrow (W, +)$ ist ein Gruppenhomomorphismus,
- $f(x \cdot v) = x \cdot f(v)$ für alle $x \in K$ und $v \in V$.

Eine lineare Abbildung heißt auch **Homomorphismus**. Falls $W = V$, heißt dann eine lineare Abbildung auch **Endomorphismus**.

Definition 3.2.2 Seien V und W zwei K -Vektorräume. Wir definieren

$$\begin{aligned}\text{Hom}_K(V, W) &= \{f : V \rightarrow W \mid f \text{ ist ein Homomorphismus}\} \\ \text{End}_K(V) &= \text{Hom}_K(V, V).\end{aligned}$$

Lemma 3.2.3 Seien V und W zwei K -Vektorräume. Eine Abbildung $f : V \rightarrow W$ ist **K -linear** genau dann wenn

$$f(x_1v_1 + x_2v_2) = x_1f(v_1) + x_2f(v_2)$$

für alle $x_1, x_2 \in K$ und $v_1, v_2 \in V$. □

Beweis. Siehe Übungsblatt 4. ■

Definition 3.2.4 Sei $f : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung.

1. f heißt **Monomorphismus** falls f injektiv ist.
2. f heißt **Epimorphismus** falls f surjektiv ist.
3. f heißt **Isomorphismus** falls f bijektiv ist.

Lemma 3.2.5 Sei $f : V \rightarrow W$ ein Isomorphismus, dann ist die Umkehrabbildung $f^{-1} : W \rightarrow V$ auch ein Isomorphismus. □

Beweis. Siehe Übungsblatt 4. ■

Definition 3.2.6 Zwei K -Vektorräume V und W heißen **isomorph** falls es ein Isomorphismus $f : V \rightarrow W$ gibt. Dann schreibt man $V \simeq W$.

Lemma 3.2.7 Sei $f : V \rightarrow W$ dann gilt $f(0) = 0$. □

Beweis. Folgt aus Satz 2.1.12, weil $f : (V, +) \rightarrow (W, +)$ ein Gruppenhomomorphismus ist. ■

Lemma 3.2.8 Seien $f : V \rightarrow W$ und $g : W \rightarrow U$ zwei Homomorphismen dann ist $g \circ f$ auch ein Homomorphismus. \square

Beweis. Seien $x_1, x_2 \in K$ und $v_1, v_2 \in V$, dann gilt

$$\begin{aligned} g \circ f(x_1 v_1 + x_2 v_2) &= g(f(x_1 v_1 + x_2 v_2)) = g(x_1 f(v_1) + x_2 f(v_2)) \\ &= x_1 g(f(v_1)) + x_2 g(f(v_2)) = x_1 g \circ f(v_1) + x_2 g \circ f(v_2). \end{aligned}$$

Aus Lemma 3.1.6 folgt, dass $g \circ f$ ein Homomorphismus ist. \blacksquare

Beispiel 3.2.9 1. Seien V und W zwei K -Vektorräume. Die **Nullabbildung** $f : V \rightarrow W$ ist die Abbildung definiert durch $f(v) = 0$ für alle $v \in V$. Die Nullabbildung ist linear. Man schreibt $f = 0$.

2. Sei V ein K -Vektorraum, die Identitätsabbildung Id_V ist linear.

3. Sei V ein K -Vektorraum und sei $x \in K$. Dann ist die Abbildung $f_x : V \rightarrow V$, welche definiert durch $f_x(v) = xv$ ist, linear. Die Abbildung f_x heißt **Homothetie (oder zentrische Streckung)** von **Streckfaktor** x .

4. Die Abbildung $K^2 \rightarrow K^2$ definiert durch

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} ax + by \\ cx + dy \end{pmatrix}$$

wobei $a, b, c, d \in K$, ist linear.

4. Die Abbildung $K \rightarrow K$, $x \mapsto x^2$ ist nicht linear.

Definition 3.2.10 Sei $f : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung. Der **Kern** von f ist $\text{Ker}(f) = \{v \in V \mid f(v) = 0\}$.

Bemerkung 3.2.11 Der Kern von einer linearen Abbildung f ist der Kern von f als Gruppenhomomorphismus $f : (V, +) \rightarrow (W, +)$.

Lemma 3.2.12 Sei $f : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung.

1. $\text{Ker}(f)$ ist ein Unterraum von V .

2. f ist injektiv genau dann, wenn $\text{Ker}(f) = 0$. \square

Beweis. 1. Seien $v, v' \in \text{Ker}(f)$ und $x \in K$, dann gilt $f(v + v') = f(v) + f(v') = 0$ i.e. $v + v' \in \text{Ker}(f)$ und $f(xv) = xf(v) = 0$ i.e. $x \in \text{Ker}(f)$.

2. Folgt aus Satz 2.1.15, weil $f : (V, +) \rightarrow (W, +)$ ein Gruppenhomomorphismus ist. \blacksquare

Lemma 3.2.13 Sei $f : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung und seien $V' \subset V$ und $W' \subset W$ Unterräume.

1. Dann ist $f(V')$ ein Unterraum von W .

2. Dann ist $f^{-1}(W')$ ein Unterraum von V . \square

Beweis. 1. Seien $w, w' \in f(V')$ und sei $x \in K$. Aus der Definition von $f(V')$, gibt es $v, v' \in V'$ so dass, $f(v) = w$ und $f(v') = w'$. Dann gilt $w + w' = f(v) + f(v') = f(v + v') \in f(V')$, weil $v + v' \in V'$. Es gilt auch $xw = xf(v) = f(xv) \in f(V')$, weil $xv \in V'$.

2. Seien $v, v' \in f^{-1}(W')$ und sei $x \in K$. Aus der Definition, gilt $f(v) \in W'$ und $f(v') \in W'$. Dann gilt $f(v + v') = f(v) + f(v') \in W'$. Es gilt auch $f(xv) = xf(v) \in W'$. ■

4 Linear Unabhängigkeit

4.1 Linearkombinationen

Definition 4.1.1 Sei V ein K -Vektorraum und seien $v_1, \dots, v_m \in V$. Dann ist $v \in V$ eine **Linearkombination von** v_1, \dots, v_m falls es Skalar $x_1, \dots, x_m \in K$ gibt mit

$$v = \sum_{i=1}^m x_i v_i = x_1 v_1 + \dots + x_m v_m.$$

Beispiel 4.1.2 1. Der Nullvektor ist eine Linearkombination von alle Vektoren $v_1, \dots, v_m \in V$: es gibt Skalar: $x_1 = \dots = x_m = 0$ so dass $0_V = \sum_i 0 \cdot v_i = \sum_i x_i v_i$.

2. Seien $v_1, v_2, v_3 \in \mathbb{Q}^2$ mit

$$v_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad v_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad v_3 = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

und sei

$$v = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Dann gilt $v = 2 \cdot v_1 + 1 \cdot v_2 + 0 \cdot v_3 = 3 \cdot v_1 + 0 \cdot v_2 + 1 \cdot v_3$ und v ist eine Linearkombination von v_1, v_2, v_3 . Man kann hier schon bemerken, dass Linearkombinationen nicht immer eindeutig sind.

Definition 4.1.3 Sei V ein K -Vektorraum. Die **lineare Hülle** einer Teilmenge M von V ist definiert als:

$$\langle M \rangle := \{v \in V \mid v \text{ ist eine Linearkombination von Vektoren in } M\}.$$

(Wir setzen $\langle \emptyset \rangle = \{0\}$). Wir schreiben $\langle v_1, \dots, v_m \rangle$ für $\langle \{v_1, \dots, v_m\} \rangle$.

Lemma 4.1.4 Die lineare Hülle $\langle M \rangle$ ist ein Unterraum. □

Beweis. Der Nullvektor ist immer eine Linearkombination also $0_V \in \langle M \rangle$. Seien $v, w \in \langle M \rangle$. Dann gibt es Elemente $v_1, \dots, v_m \in M$ und Elemente $w_1, \dots, w_l \in M$ und Skalare $x_1, \dots, x_m, y_1, \dots, y_l \in K$ so dass:

$$v = \sum_{i=1}^m x_i v_i \quad \text{und} \quad w = \sum_{j=1}^l y_j w_j.$$

Dann gilt

$$v + w = \sum_{i=1}^m x_i v_i + \sum_{j=1}^l y_j w_j$$

i.e. $v + w \in \langle M \rangle$. Für $x \in K$ gilt auch

$$xv = x \sum_{i=1}^m x_i v_i = \sum_{i=1}^m (xx_i) v_i$$

i.e. $xv \in \langle M \rangle$. ■

Definition 4.1.5 Sei U ein Unterraum von V ein K -Vektorraum. Eine Teilmenge M von U **erzeugt** U falls $\langle M \rangle = U$. In diesem fall heißt M ein **Erzeugendensystem (EVS)** von U .

Definition 4.1.6 Ein Vektorraum V ist **endlich erzeugt**, falls $V = \langle M \rangle$ mit M einer endlichen Teilmenge von V .

Beispiel 4.1.7 1. $\{0\} = \langle \emptyset \rangle$ i.e. \emptyset ist ein EVS von $V = \{0\}$.

2. Es gilt $K^2 = \langle v_1, v_2 \rangle$ i.e. $\{v_1, v_2\}$ ist ein EVS von K^2 wobei

$$v_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ und } v_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

2. Sei $v \in K^2$, dann ist $\{v_1, v_2, v\}$ ein EVS von K^2 .

3. Seien $1, \sqrt{2} \in \mathbb{Q}(\sqrt{2}) = \{x + y\sqrt{2} \mid x, y \in \mathbb{Q}\}$. Dann ist $(1, \sqrt{2})$ ein EVS von $\mathbb{Q}(\sqrt{2})$ über \mathbb{Q} .

Lemma 4.1.8 Sei I eine unendliche Menge, dann ist $K^{(I)}$ nicht endlich erzeugt. □

Beweis. Per Definitionem gilt

$$K^{(I)} = \{f : I \rightarrow K \mid f(i) \neq 0 \text{ nur für endliche viele } i \in I\}.$$

Nehmen wir an, dass es Elemente $f_1, \dots, f_n \in K^{(I)}$ gibt so dass $K^{(I)} = \langle f_1, \dots, f_n \rangle$. Sei

$$J = \{j \in I \mid f_i(j) \neq 0 \text{ für ein } i \text{ mit } 1 \leq i \leq n\}.$$

Dann ist J endlich. Da I unendlich ist gibt es ein Element $k \in I \setminus J$. Sei $f : I \rightarrow K$ definiert durch

$$f(i) = \delta_{i,k} = \begin{cases} 1 & \text{falls } i = k \\ 0 & \text{andernfalls.} \end{cases}$$

Es gilt $f \in K^{(I)}$ aber $f \notin \langle f_1, \dots, f_n \rangle$. ■

4.2 Linear Unabhängigkeit

Definition 4.2.1 1. Ein n -Tupel (v_1, \dots, v_n) von Vektoren in V heißt ein **Vektorsystem**.

2. Ein Vektorsystem (v_1, \dots, v_n) heißt **linear abhängig**, falls es Skalare $x_1, \dots, x_n \in K$ gibt, welche nicht alle gleich 0 sind (i.e. $(x_1, \dots, x_n) \neq (0, \dots, 0)$), mit

$$\sum_{i=1}^n x_i v_i = 0.$$

Andernfalls heißt (v_1, \dots, v_n) **linear unabhängig**.

Definition 4.2.2 Eine Teilmenge $M \subset V$ heißt **linear unabhängig**, falls alle Vektorsysteme (v_1, \dots, v_n) mit $v_1, \dots, v_n \in M$ linear unabhängig sind. Andernfalls, heißt M **linear abhängig**.

Die leere Menge ist immer linear unabhängig.

Beispiel 4.2.3 1. Sei $v \in V$, dann ist $\{v\}$ genau dann linear unabhängig, wenn $v \neq 0$.

2. Sei $v \in V$, dann ist (v, v) linear abhängig.

3. Seien $v_1, v_2 \in V$, dann ist (v_1, v_2) linear abhängig genau dann wenn es $x_1, x_2 \in K$ gibt, die nicht beide gleich null sind, mit $x_1 v_1 + x_2 v_2 = 0$.

Gilt $v_1 \neq 0$ und $v_2 \neq 0$, dann ist (v_1, v_2) linear abhängig genau dann wenn $Kv_1 = Kv_2$ wobei $Kv_i = \{xv_i \mid x \in K\}$.

4. 2. Seien $v_1, v_2, v_3 \in \mathbb{Q}^2$ mit

$$v_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, v_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \text{ und } v_3 = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Dann ist (v_1, v_2, v_3) linear abhängig, weil $1 \cdot v_1 + (-1) \cdot v_2 + 1 \cdot v_3 = 0$.

5. $(1, \sqrt{2})$ ist in $\mathbb{Q}(\sqrt{2})$ linear unabhängig (als \mathbb{Q} -Vektorraum): seien $x, y \in \mathbb{Q}$ mit $x \cdot 1 + y\sqrt{2} = 0$. Fall $y \neq 0$ gilt $\sqrt{2} = \frac{x}{y} \in \mathbb{Q}$ ein Widerspruch also gilt $y = 0$ und dann $x = 0$.

Lemma 4.2.4 Sei (v_1, \dots, v_n) ein linear unabhängiges System, dann ist ein Untersystem $(v_{i_1}, \dots, v_{i_k})$ von (v_1, \dots, v_n) auch linear unabhängig. \square

Beweis. Seien Skalare x_{i_1}, \dots, x_{i_k} so dass

$$x_{i_1}v_{i_1} + \dots + x_{i_k}v_{i_k} = \sum_{j=1}^k x_{i_j}v_{i_j} = 0.$$

Dann setzen wir $x_i = 0$ für $i \in \{1, \dots, n\} \setminus \{i_1, \dots, i_k\}$. Es gilt

$$x_1v_1 + \dots + x_nv_n = \sum_{j=1}^n x_jv_j = 0.$$

Als (v_1, \dots, v_n) linear unabhängig ist gilt $x_1 = \dots = x_n = 0$ so dass $x_{i_1} = \dots = x_{i_k} = 0$ und $(v_{i_1}, \dots, v_{i_k})$ ist linear unabhängig. ■

Lemma 4.2.5 Sei V ein Vektorraum.

1. Sei (v_1, \dots, v_m, v) ein linear abhängiges Vektorsystem. Ist (v_1, \dots, v_m) linear unabhängig, dann gilt $v \in \langle v_1, \dots, v_m \rangle$.
2. Sei $M \cup \{v\}$ linear abhängig wobei $M \subset V$ und $v \in V$. Ist M linear unabhängig, dann gilt $v \in \langle M \rangle$. □

Beweis. 1. Es gibt Skalare (x_1, \dots, x_m, x) , nicht alle gleich 0, so dass

$$x_1v_1 + \dots + x_mv_m + xv = 0.$$

Falls $x = 0$ dann gilt $x_1v_1 + \dots + x_mv_m = 0$ mit x_1, \dots, x_m nicht alle gleich 0 i.e. (v_1, \dots, v_m) ist linear abhängig. Ein Widerspruch. Also ist $x \neq 0$ und wir haben

$$x = \frac{x_1}{x}v_1 + \dots + \frac{x_m}{x}v_m \in \langle v_1, \dots, v_m \rangle.$$

2. Es gibt Elemente $v_1, \dots, v_m \in M$, so dass (v_1, \dots, v_m, v) ein linear abhängiges Vektorsystem ist. Aber als M linear unabhängig ist, ist (v_1, \dots, v_m) linear unabhängig, dann gilt aus 1, dass $w \in \langle v_1, \dots, v_m \rangle \subset \langle M \rangle$. ■

Korollar 4.2.6 Sei $M \subset V$ linear unabhängig und sei $v \in V$ mit $v \notin \langle M \rangle$, dann ist $M \cup \{v\}$ linear unabhängig.

Lemma 4.2.7 Sei V ein Vektorraum so dass V nicht endlich erzeugt ist.

Dann gibt es für jedes $n \in \mathbb{N}$ ein n -elementige Teilmenge M_n von V mit M_n linear unabhängig und $M_0 \subset M_1 \subset M_2 \subset \dots$. □

Beweis. Wir konstruieren M_n per Induktion. Sei $M_0 = \emptyset$, die leere Menge ist linear unabhängig. Sei M_n schon definiert. Da V nicht endlich erzeugt ist gilt $\langle M_n \rangle \neq V$. Sei $v \in V \setminus \langle M_n \rangle$. Dann ist $M_{n+1} = M_n \cup \{v\}$ linear unabhängig (siehe Korollar oben) und hat $n + 1$ Elemente. ■

Satz 4.2.8 Seien $v_1, \dots, v_m \in V$. Dann ist äquivalent

1. Die Vektoren sind linear unabhängig.
2. Ist $v = x_1 v_1 + \dots + x_m v_m$ eine Darstellung eines Elementes $v \in \langle v_1, \dots, v_m \rangle$ mit Koeffizienten $x_1, \dots, x_m \in K$, so sind diese eindeutig durch v bestimmt. \square

Beweis. (1. \Rightarrow 2.) Seien $v = x_1 v_1 + \dots + x_m v_m$ und $v = x'_1 v_1 + \dots + x'_m v_m$ zwei Darstellungen. Dann gilt $(x_1 - x'_1)v_1 + \dots + (x_m - x'_m)v_m = 0$ und weil (v_1, \dots, v_m) linear unabhängig ist gilt $x_1 = x'_1, \dots, x_m = x'_m$. Die zwei Darstellungen sind gleich.

(2. \Rightarrow 1.) Seien $x_1, \dots, x_m \in K$ mit $x_1 v_1 + \dots + x_m v_m = 0$. Dann gibt es auch eine weitere Darstellung $0 \cdot v_1 + \dots + 0 \cdot v_m = 0$ von $0 \in V$. Diese zwei Darstellungen sind gleich i.e. $x_1 = 0, \dots, x_m = 0$. \blacksquare

5 Basen und Dimension

5.1 Definition und Beispiele

Definition 5.1.1 Sei V ein K -Vektorraum

1. Ein System (v_1, \dots, v_n) von Vektoren, heißt eine (**endliche**) **Basis** wenn
 - (v_1, \dots, v_n) ein EZS ist und
 - (v_1, \dots, v_n) linear unabhängig sind.
2. Ein System $(v_i)_{i \in I}$ (gegebenfalls I unendlich) von Vektoren, heißt eine **Basis** wenn
 - $(v_i)_{i \in I}$ ein EZS ist und
 - $(v_i)_{i \in I}$ linear unabhängig sind.

Beispiel 5.1.2 1. Die leere Menge \emptyset ist die einzige basis von $V = 0$.

2. Sei $V = K^n$. Für $i \in \mathbb{N}$ mit $0 \leq i \leq n$, sei $e_i \in V$ definiert als

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

wo die Eins auf die i -te Zeile ist. Dann ist (e_1, \dots, e_n) eine Basis von V . Diese Basis heißt **Standardbasis von K^n** .

3. Sei $V = \mathbb{Q}(\sqrt{2})$. Dann ist V ein \mathbb{Q} -Vektorraum und $(1, \sqrt{2})$ ist eine Basis von V .

Satz 5.1.3 Ein System (v_1, \dots, v_n) von Vektoren, ist eine Basis genau dann, wenn für alle Vektoren $v \in V$ es genau eine Darstellung

$$v = \sum_{i=1}^n x_i v_i$$

gibt, wobei x_i in K für alle i ist.

□

Beweis. Alle Vektoren $v \in V$ haben eine Darstellung

$$v = \sum_{i=1}^n x_i v_i$$

genau dann, wenn (v_1, \dots, v_n) ein EZS ist. Nach Satz 4.2.8 ist die Darstellung eindeutig genau dann, wenn (v_1, \dots, v_n) linear unabhängig sind. ■

5.2 Basen und Abbildungen

Satz 5.2.1 Sei (v_1, \dots, v_n) eine Basis von V . Dann gilt $V \simeq K^n$. □

Beweis. Sei $f : K^n \rightarrow V$ definiert als

$$f \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^n x_i v_i.$$

Wir zeigen, dass f ein Isomorphismus ist. Zuerst zeigen wir, dass f linear ist. Es gilt

$$\begin{aligned} f \left(x \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} + y \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} \right) &= f \begin{pmatrix} xx_1 + yy_1 \\ \vdots \\ xx_n + yy_n \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^n (xx_i v_i + yy_i v_i) \\ &= x \sum_{i=1}^n x_i v_i + y \sum_{i=1}^n y_i v_i = xf \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} + yf \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Nach Lemma 3.2.3 ist dann f linear. Sei $(x_1, \dots, x_n) \in \text{Ker}(f)$, dann gilt

$$\sum_{i=1}^n x_i v_i = 0$$

und als (v_1, \dots, v_n) linear unabhängig sind gilt $(x_1, \dots, x_n) = (0, \dots, 0) = 0_{K^n}$. Also ist f injektiv. Das Bild von f ist $\langle v_1, \dots, v_n \rangle$ und weil (v_1, \dots, v_n) ein EZS ist, ist f surjektiv. ■

Korollar 5.2.2 Sei V ein Vektorraum und sei (v_1, \dots, v_n) eine Basis.

1. Seien $f : V \rightarrow W$ und $g : V \rightarrow W$ zwei lineare Abbildungen. Es gilt $f = g$ genau dann, wenn $f(v_i) = g(v_i)$ für alle $1 \leq i \leq n$.
2. Seien w_1, \dots, w_n Vektoren in ein Vektorraum W , es gibt genau eine lineare Abbildung $f : V \rightarrow W$ mit $f(v_i) = w_i$ für alle $1 \leq i \leq n$.

Beweis. 1. Falls $f = g$, dann gilt $f(v_i) = g(v_i)$ für alle $1 \leq i \leq n$. Umgekehrt, Falls $f(v_i) = g(v_i)$ für alle $1 \leq i \leq n$, sei $v \in V$, dann gibt es Elemente $x_1, \dots, x_n \in K$ mit $v = x_1 v_1 + \dots + x_n v_n$ und es gilt

$$f(v) = \sum_{i=1}^n x_i f(v_i) = \sum_{i=1}^n x_i g(v_i) = g(v).$$

2. Eindeutigkeit folgt von 1. Sei $v \in V$, dann gibt es eindeutig bestimmte Elemente $x_1, \dots, x_n \in K$ mit $v = x_1 v_1 + \dots + x_n v_n$ und wir definieren

$$f(v) = \sum_{i=1}^n x_i f(v_i) = \sum_{i=1}^n x_i w_i \in W.$$

Eine einfache Rechnung zeigt, dass f linear ist. ■

Satz 5.2.3 Sei $f : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung und sei (v_1, \dots, v_n) eine Basis von V .

1. f ist injektiv genau dann, wenn $(f(v_1), \dots, f(v_n))$ linear unabhängig ist.
2. f ist surjektiv genau dann, wenn $(f(v_1), \dots, f(v_n))$ ein EZS ist.
3. f ist bijektiv genau dann, wenn $(f(v_1), \dots, f(v_n))$ eine Basis ist. □

Beweis. Siehe Übungsblatt 6. ■

5.3 Existenz

Satz 5.3.1 Jeder endlich erzeugte Vektorraum besitzt eine Basis und jede solche Basis ist endlich. □

Beweis. Sei (v_1, \dots, v_n) ein EZS von V mit n minimal *i.e.* es gibt kein EZS mit weniger als n Elemente. Falls (v_1, \dots, v_n) linear unabhängig ist, ist (v_1, \dots, v_n) eine Basis. Andernfalls gibt es ein $k < n$ so dass (v_1, \dots, v_k) linear unabhängig ist und $(v_1, \dots, v_k, v_{k+1})$ linear abhängig ist. Nach Lemma 4.2.5.1. gilt $v_{k+1} \in \langle v_1, \dots, v_k \rangle$. Also ist $(v_1, \dots, \widehat{v_k}, \dots, v_n) = (v_1, \dots, v_k, v_{k+2}, \dots, v_n)$ ein EZS. Ein Widerspruch als n minimal war. ■

Satz 5.3.2 Sei V ein Vektorraum und (v_1, \dots, v_n) ein System von Vektoren aus V . Dann ist äquivalent:

1. (v_1, \dots, v_n) bildet eine Basis,
2. (v_1, \dots, v_n) ist ein maximales linear unabhängiges System,
3. (v_1, \dots, v_n) ist ein minimales EZS. □

Beweis. ($1 \Rightarrow 2$) Angenommen (v_1, \dots, v_n) sei eine Basis, dann ist (v_1, \dots, v_n) linear unabhängig. Wenn (v_1, \dots, v_n) nicht maximal wäre, dann würde es ein Vektor $v \in V$ geben, so dass (v_1, \dots, v_n, v) linear unabhängig ist. Aber als (v_1, \dots, v_n) eine Basis ist gilt $v \in \langle v_1, \dots, v_n \rangle$ i.e. es gibt Skalare $(x_1, \dots, x_n) \in K^n$ mit

$$v = \sum_{i=1}^n x_i v_i \text{ das heißt } -v + \sum_{i=1}^n x_i v_i = 0$$

und (v_1, \dots, v_n, v) ist linear abhängig, ein Widerspruch.

($2 \Rightarrow 1$) Angenommen (v_1, \dots, v_n) sei maximales linear unabhängiges System und sei $v \in V$. Dann ist (v_1, \dots, v_n, v) linear abhängig und aus Lemma 4.2.5.1. gilt $v \in \langle v_1, \dots, v_n \rangle$. Also ist (v_1, \dots, v_n) ein EZS und eine basis.

($1 \Rightarrow 3$) Angenommen (v_1, \dots, v_n) sei eine Basis, dann ist (v_1, \dots, v_n) ein EZS. Wenn (v_1, \dots, v_n) nicht minimal wäre, dann würde es ein Vektor v_k geben, so dass $(v_1, \dots, \widehat{v_k}, \dots, v_n)$ ein EZS ist. Dann gilt $v_k \in \langle v_1, \dots, \widehat{v_k}, \dots, v_n \rangle$ i.e. es gibt Skalare $(x_1, \dots, \widehat{x_k}, \dots, x_n) \in K^{n-1}$ mit

$$v_k = \sum_{i=1, i \neq k}^n x_i v_i \text{ das heißt } -v_k + \sum_{i=1, i \neq k}^n x_i v_i = 0$$

und (v_1, \dots, v_n) ist linear abhängig, ein Widerspruch.

($3 \Rightarrow 1$) Angenommen (v_1, \dots, v_n) sei ein minimales EZS. Falls (v_1, \dots, v_n) linear abhängig ist, dann gibt es gibt Skalare $(x_1, \dots, x_n) \in K^n$ nicht alle nul mit

$$\sum_{i=1}^n x_i v_i = 0.$$

Sei k mit $x_k \neq 0$, dann gilt

$$v_k = - \sum_{i=1, i \neq k}^n \frac{x_i}{x_k} v_i,$$

also gilt $v_k \in \langle v_1, \dots, \widehat{v_k}, \dots, v_n \rangle$ und $\langle v_1, \dots, \widehat{v_k}, \dots, v_n \rangle = \langle v_1, \dots, v_n \rangle$ ein Widerspruch als (v_1, \dots, v_n) ein minimales EZS war. ■

Satz 5.3.3 (Basisergänzungssatz) Sei (v_1, \dots, v_r) ein linear unabhängiges system und sei (w_1, \dots, w_m) ein EZS. Dann lässt sich (v_1, \dots, v_r) durch Elemente in (w_1, \dots, w_m) zu einer Basis ergänzen, i.e. es gibt paarweise verschiedene Indizes $i_1, \dots, i_k \in \{1, \dots, m\}$ so dass

$$(v_1, \dots, v_r, w_{i_1}, \dots, w_{i_k})$$

eine Basis bildet. □

Beweis. Sei $(w_{i_1}, \dots, w_{i_k})$ minimal so dass $(v_1, \dots, v_r, w_{i_1}, \dots, w_{i_k})$ ein EZS ist. Wir zeigen, dass $(v_1, \dots, v_r, w_{i_1}, \dots, w_{i_k})$ linear unabhängig ist. Wenn nicht, würde das System $(v_1, \dots, v_r, w_{i_1}, \dots, w_{i_k})$ linear abhängig sein. Dann würde es Skalare, die nicht alle nul sind, $(x_1, \dots, x_r, y_{i_1}, \dots, y_{i_k})$ geben mit

$$\sum_{j=1}^r x_j v_j + \sum_{j=1}^k y_{i_j} w_{i_j} = 0.$$

Da (v_1, \dots, v_n) linear unabhängig ist gibt es ein j_0 mit $y_{i_{j_0}} \neq 0$. Es gilt

$$w_{j_0} = - \sum_{j=1}^r x_j v_j - \sum_{j=1, j \neq j_0}^k y_{i_j} w_{i_j}$$

also $w_{j_0} \in \langle v_1, \dots, v_r, w_{i_1}, \dots, \widehat{w}_{j_0}, \dots, w_{i_k} \rangle$ und $\langle v_1, \dots, v_r, w_{i_1}, \dots, \widehat{w}_{j_0}, \dots, w_{i_k} \rangle$ ist ein EZS. Ein Widerspruch weil $(w_{i_1}, \dots, w_{i_k})$ minimal war, so dass das System $(v_1, \dots, v_r, w_{i_1}, \dots, w_{i_k})$ ein EZS ist. ■

Theorem 5.3.1 Sei (v_1, \dots, v_r) eine linear unabhängiges system, sei (w_1, \dots, w_m) ein EZS und sei (e_1, \dots, e_n) eine Basis. Dann gilt $r \leq n \leq m$. □

Beweis. Das System (e_2, \dots, e_n) ist linear unabhängig und kann, dank Basisergänzungssatz, mit Elemente $(w_{i_1}, \dots, w_{i_{k_1}})$ aus dem EZS (w_1, \dots, w_m) in eine Basis $(w_{i_1}, \dots, w_{i_{k_1}}, e_2, \dots, e_n)$ ergänz werden. Da $e_1 \notin \langle e_2, \dots, e_n \rangle$ ist $k_1 \geq 1$.

Dann ist $(w_{i_1}, \dots, w_{i_{k_1}}, e_3, \dots, e_n)$ auch linear unabhängig und kann, dank Basisergänzungssatz, mit Elemente $(w_{i_{k_1+1}}, \dots, w_{i_{k_1+k_2}})$ aus (w_1, \dots, w_m) in eine Basis $(w_{i_1}, \dots, w_{i_{k_1}}, w_{i_{k_1+1}}, \dots, w_{i_{k_1+k_2}}, e_3, \dots, e_n)$ ergänz werden mit $k_2 \geq 1$. Wenn wir alle Elemente e_i ersetzen haben wir eine Basis

$$(w_{i_1}, \dots, w_{i_{k_1}}, w_{i_{k_1+1}}, \dots, w_{i_{k_1+k_2}}, \dots, w_{i_{k_1+\dots+k_{n-1}+1}}, \dots, w_{i_{k_1+\dots+k_n}}).$$

Es gibt also $k_1 + \dots + k_n \leq m$ und als $k_i \geq 1$ für alle i gilt $n \leq m$.

Dank Basisergänzungssatz gibt es Elemente $(e_{i_1}, \dots, e_{i_k})$ aus dem EZS (e_1, \dots, e_n) so dass $(v_1, \dots, v_r, e_{i_1}, \dots, e_{i_k})$ eine Basis ist. Dann ist $(v_1, \dots, v_r, e_{i_1}, \dots, w_{i_k})$ eine Basis und (e_1, \dots, e_n) ein EZS, so dass $r + k \leq n$ also $r \leq n$. ■

Korollar 5.3.4 Sei V ein endlich erzeugten Vektorraum. Jede zwei Basen bestehen aus gleichviel Elementen.

Beweis. Seien (v_1, \dots, v_n) und (e_1, \dots, e_m) zwei basen. Dann sind beide Systeme auch EZS und linear unabhängig. Es gilt also $n \leq m$ und $m \leq n$ aus Theorem 5.3.1. ■

5.4 Dimension

Definition 5.4.1 Sei V ein endlich erzeugten Vektorraum. Die Anzahl von Elementen in jeder Basis heißt **die Dimension** von V und ist $\dim V$ oder $\dim_K V$ bezeichnet.

Wenn V nicht endlich erzeugt ist, sagt man das V **unendlich dimensional** ist und schreibt man $\dim_K V = \infty$.

Korollar 5.4.2 Sei V ein Vektorraum und $n \in \mathbb{N}$. Dann ist äquivalent:

1. $\dim V = n$,
2. es existiert ein linear unabhängiges System von n Vektoren und alle Systeme von mehr als $n + 1$ Vektoren sind linear abhängig.

Beweis. (1. \Rightarrow 2.) Es gibt eine Basis (e_1, \dots, e_n) mit n Elemente, insbesondere gibt es ein linear unabhängiges System (e_1, \dots, e_n) von n Vektoren. Sei (v_1, \dots, v_r) ein linear unabhängiges System, dann gilt aus Theorem 5.3.1 $r \leq n$. Also sind alle Systeme von mehr als $n + 1$ Vektoren linear abhängig.

(2. \Rightarrow 1.) Es gibt in V ein maximales unabhängiges System von n Vektoren. Also eine Basis mit n Vektoren, und es folgt $\dim V = n$. ■

Korollar 5.4.3 Sei V ein Vektorraum und $n \in \mathbb{N}$. Dann ist äquivalent:

1. $\dim V \geq n$,
2. es existiert ein linear unabhängiges System von n Vektoren.

Beweis. (1. \Rightarrow 2.) Falls $\dim V \neq \infty$, dann gibt es eine Basis mit $\dim V$ Elemente und diese Basis ist ein linear unabhängiges System. Ein Untersystem mit n Elemente ist auch linear unabhängig nach Lemma 4.2.4.

Falls $\dim V = \infty$, dann gilt nach Lemma 4.2.7, dass es ein linear unabhängiges System mit n Elemente gibt.

(2. \Rightarrow 1.) Falls $\dim V = \infty$ dann gilt $\dim V \geq n$. Andernfalls, gibt es eine Basis mit $\dim V$ Elemente. Nach Theorem 5.3.1 gilt $n \leq \dim V$. ■

Korollar 5.4.4 Sei V ein Vektorraum mit $\dim V < \infty$.

1. Ein unabhängiges System mit $\dim V$ Elemente ist eine Basis.
2. Ein EZS mit $\dim V$ Elemente ist eine Basis.

Beweis. Wir setzen $n = \dim V$ und betrachten eine Basis (e_1, \dots, e_n) .

1. Sei (v_1, \dots, v_n) ein unabhängiges System, dann können wir (v_1, \dots, v_n) mit (e_1, \dots, e_n) ergänzen, um eine Basis zu bilden. Aber Basen haben n Elemente *i.e.* (v_1, \dots, v_n) war schon eine Basis.

2. Das leere System ist ein unabhängiges System und kann mit (v_1, \dots, v_n) ergänzt werden, um eine Basis zu bilden. Diese Basis hat genau n Elemente *i.e.* die Ergänzung war (v_1, \dots, v_n) und (v_1, \dots, v_n) ist eine Basis. ■

Korollar 5.4.5 Sei U ein Unterraum in V , dann gilt $\dim U \leq \dim V$. Gleichheit gilt genau dann, wenn $U = V$.

Beweis. Falls $\dim V = \infty$ sind wir schon fertig. Andernfalls, gibt eine Basis mit $\dim V$ Elemente in V . Sei (v_1, \dots, v_r) ein unabhängiges System in U . Dann ist (v_1, \dots, v_r) auch ein unabhängiges System in V . Nach Theorem 5.3.1 gilt $r \leq \dim V$. Es gilt also ein maximales unabhängiges System in U *i.e.* eine Basis in U . Diese Basis besteht aus $\dim U$ Elementen und ist linear unabhängig. Dann gilt $\dim U \leq \dim V$.

Wenn $U = V$ dann gilt Gleichheit. Angenommen $\dim U = \dim V$, gibt es eine Basis (v_1, \dots, v_n) von U mit n Elementen. Diese Basis ist dann ein unabhängiges System von V mit n Elementen, also eine Basis nach Korollar 5.4.4. Es gilt $U = \langle v_1, \dots, v_n \rangle = V$. ■

5.5 Basen in Unendlich dimensionale Vektorräume

Wir werden den folgende Satz nicht beweisen:

Satz 5.5.1 Alle Vektorräume (auch unendlich dimensional) besitzen eine Basis. □

Bemerkung 5.5.2 Dieser Satz ist äquivalent zum Auswahlaxiom 1.3.1.

6 Direkte Summe

6.1 Definition und Beispiele

Definition 6.1.1 Sei V ein Vektorraum.

1. Seien U und W zwei Unterräume in V . Die **Summe von U und W** ist die Teilmenge

$$U + W = \{v \in V \mid v = u + w \text{ mit } u \in U \text{ und } w \in W\}.$$

1. Seien $(U_i)_{i \in I}$ eine Familie von Unterräumen in V . Die **Summe von $(U_i)_{i \in I}$** ist die Teilmenge

$$\sum_{i \in I} U_i = \left\{ v \in V \mid v = \sum_{i \in I} u_i \text{ mit } u_i \in U_i \text{ und } u_i \neq 0 \text{ für nur endliche viele } i \in I \right\}.$$

Beispiel 6.1.2 1. Sei $V = \mathbb{R}^3$ und seien

$$e_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad e_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad v_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad v_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad v_3 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Sei $U = \langle e_1 \rangle$ und $W = \langle e_2 \rangle$. Dann sind $v_1, v_2 \in U + W$ aber $v_3 \notin U + W$.

2. Sei $V = \mathbb{R}^3$ und seien e_1, e_2, v_1, v_2, v_3 wie oben. Sei $U = \langle e_1, e_2 \rangle$ und $W = \langle v_1 \rangle$ dann gilt $U + W = U$.

3. Sei $V = \mathbb{R}^3$ und seien e_1, e_2, v_1, v_2, v_3 wie oben. Sei $U = \langle e_1, e_2 \rangle$ und $W = \langle v_3 \rangle$ dann gilt $U + W = V = \mathbb{R}^3$.

Lemma 6.1.3 Die Summe von Unterräumen ist ein Unterraum. □

Beweis. Übung. ■

6.2 Charakterisierung

Lemma 6.2.1 Seien U und W zwei Unterräume von V . Die folgenden Aussagen sind äquivalent:

1. Die Unterräume U und W sind in direkte Summe.
2. Für alle $v \in U + W$ gibt es genau eine Darstellung $v = u + w$ mit $u \in U$ und $w \in W$.
3. Aus der Gleichung $u + w = 0$ mit $u \in U$ und $w \in W$, folgt $u = 0 = w$.

In diesem Fall schreibt man $U + W = U \oplus W$. □

Beweis. (1. \Rightarrow 2.) Angenommen U und W sind in direkte Summe i.e. $U \cap W = 0$. Seien $u + w = v = u' + w'$ zwei Darstellungen von v mit $u, u' \in U$ und $w, w' \in W$. Dann gilt $u - u' = w' - w$ und dieser Vektor ist in U und in W enthalten also ist gleich der Nullvektor. Daraus folgt $u = u'$ und $w = w'$.

(2. \Rightarrow 3.) Nehmen wir an dass es für alle $v \in U + W$ genau eine Darstellung $v = u + w$ gibt mit $u \in U$ und $w \in W$. Seien $u \in U$ und $w \in W$ mit $u + w = 0$. Es gibt eine zweite Darstellung von 0 und zwar für $u' = 0$ und $w' = 0$ gilt $u + w = 0 = u' + w'$. Als es nur eine solche Darstellung gibt, haben wir $u = u'$ und $w = w'$ also $u = 0$ und $w = 0$.

(3. \Rightarrow 1.) Nehmen wir an dass für alle $u + w = 0$ mit $u \in U$ und $w \in W$ gilt $u = w = 0$. Sei $v \in U \cap W$ und seien $u = v \in U$ und $w = -v \in W$. Dann gilt $u + w = 0$. Daraus folgt $u = w = 0$ und $v = 0$. ■

Beispiel 6.2.2 Im Beispiel 6.1.2 sind U und W in direkte Summe in den Fällen 1 und 3.

Definition 6.2.3 Sei $(U_i)_{i \in I}$ eine Familie von Unterräumen von V . Die Unterräume sind in **direkte Summe**, wenn es für alle $v \in \sum_{i \in I} U_i$ genau eine Darstellung

$$v = \sum_{i \in I} u_i$$

mit $u_i \in U_i$ gibt. In diesem Fall schreibt man

$$\sum_{i \in I} U_i = \bigoplus_{i \in I} U_i.$$

Satz 6.2.4 Sei $(U_i)_{i \in I}$ eine Familie von Unterräumen von V . Die folgenden Aussagen sind äquivalent:

1. Die Unterräume $(U_i)_{i \in I}$ sind in direkte Summe.

2. Aus der Gleichung $\sum_{i \in I} u_i = 0$ mit $u_i \in U_i$ für alle $i \in I$, folgt $u_i = 0$ für alle $i \in I$.
3. Für alle $j \in I$ gilt $U_j \cap \sum_{i \in I, i \neq j} U_i = 0$. □

Beweis. (1. \Rightarrow 2.) Seien Elemente $u_i \in U_i$ für alle $i \in I$ mit $\sum_{i \in I} u_i = 0$. Wir setzen $u'_i = 0 \in U_i$ für alle $i \in I$. Dann sind $\sum_{i \in I} u_i = 0$ und $\sum_{i \in I} u'_i = 0$ zwei Darstellungen von 0 und als die Unterräume $(U_i)_{i \in I}$ in direkte Summe sind gilt $u_i = u'_i = 0$ für alle $i \in I$.

(2. \Rightarrow 3.) Sei $v \in U_j \cap \sum_{i \in I, i \neq j} U_i$. Es gibt also Elemente $u_i \in U_i$ für alle $i \neq j$ mit $\sum_{i \in I, i \neq j} u_i = v$. Sei $u_j = -v \in U_j$, dann gilt

$$\sum_{i \in I} u_i = 0.$$

Daraus folgt, dass $u_i = 0$ für alle $i \in I$ insbesondere $v = -u_j = 0$.

(3. \Rightarrow 1.) Seien $u_i, u'_i \in U_i$ für alle $i \in I$ mit

$$\sum_{i \in I} u_i = \sum_{i \in I} u'_i.$$

Sei $j \in I$, es gilt

$$u_j - u'_j = \sum_{i \in I, i \neq j} u'_i - \sum_{i \in I, i \neq j} u_i.$$

Dieser Vektor liegt in $U_j \cap \sum_{i \in I, i \neq j} U_i = 0$. Also $u_j - u'_j = 0$ und $u_j = u'_j$. Dies ist für alle $j \in J$ wahr also gilt $u_i = u'_i$ für alle $i \in I$. ■

Satz 6.2.5 Seien U und W zwei Unterräume, dann sind äquivalent:

1. U und W sind in direkte Summe,
2. $\dim(U + W) = \dim U + \dim W$. □

Beweis. (1. \Rightarrow 2.) Seien (u_1, \dots, u_m) eine Basis von U und (w_1, \dots, w_r) eine Basis von W . Es gilt also $m = \dim U$ und $r = \dim W$. Dann ist die Familie $(u_1, \dots, u_m, w_1, \dots, w_r)$ ein EZS System von $U \oplus W$. Wir zeigen, dass es eine Basis ist *i.e.* das dieses System linear unabhängig ist. Seien $x_1, \dots, x_m, y_1, \dots, y_r$ Skalare mit

$$x_1 u_1 + \dots + x_m u_m + y_1 w_1 + \dots + y_r w_r = 0.$$

Als die Summe direkte ist gilt $i \in I$:

$$x_1 u_1 + \dots + x_m u_m = 0 \text{ und } y_1 w_1 + \dots + y_r w_r = 0.$$

Aber beide Systeme (u_1, \dots, u_m) und (w_1, \dots, w_r) ($v_1^i, \dots, v_{n_i}^i$) sind Basen von U und W also linear unabhängig und es gilt für alle: $x_i = 0y_j$ für alle $i \in [1, m]$ und $j \in [1, r]$. Die Familie $(u_1, \dots, u_m, w_1, \dots, w_r)$ ist also eine Basis. Daraus folgt die Dimensionsformel.

(2. \Rightarrow 1.) Seien (u_1, \dots, u_m) eine Basis von U und (w_1, \dots, w_r) eine Basis von W . Es gilt also $m = \dim U$ und $r = \dim W$ und $m + r = \dim(U + W)$. Die Familie $(u_1, \dots, u_m, w_1, \dots, w_r)$ ist ein EZS System von $U + W$ mit $\dim(U + W)$ Elemente. Es ist also eine Basis.

Sei $u \in U$ und $w \in W$ mit $u + w = 0$. Es gibt Skalare Seien $x_1, \dots, x_m, y_1, \dots, y_r$ Skalare mit

$$u = x_1 u_1 + \dots + x_m u_m \text{ und } w = y_1 w_1 + \dots + y_r w_r.$$

Es gilt also

$$x_1 u_1 + \dots + x_m u_m + y_1 w_1 + \dots + y_r w_r = 0.$$

Aber $(u_1, \dots, u_m, w_1, \dots, w_r)$ ist eine Basis, also gilt es $x_1 = \dots = x_m = y_1 = \dots = y_r = 0$ i.e. $u = 0$ und $w = 0$. Die Summe ist direkte. ■

6.3 Komplement

Definition 6.3.1 Sei U ein Unterraum von V . Ein Unterraum W von V heißt **ein Komplement von U in V** , wenn $V = U \oplus W$.

Beispiel 6.3.2 1. V ist ein Komplement von 0 in V und $=$ ist eine Komplement von V in V .

2. Seien U und W mit $U \oplus W = V$, dann ist W ein Komplement von U und U ein Komplement von W .

3. Sei $V = K^2$ und seien $v_1, v_2, v_2 \in V$ wie folgt:

$$v_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad v_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad v_3 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

sei $U = \langle e_1 \rangle$ dann sind $W_2 = \langle v_2 \rangle$ und $W_3 = \langle v_3 \rangle$ zwei Komplemente von U in V .

Lemma 6.3.3 Sei U ein Unterraum von V , dann existiert ein Komplement W von U in V . □

Beweis. Seien (u_1, \dots, u_m) eine Basis von U und (v_1, \dots, v_n) eine Basis von V . Das System (u_1, \dots, u_m) ist linear unabhängig und (v_1, \dots, v_n) ist ein EZS. Wir können (u_1, \dots, u_m) mit Elemente von (v_1, \dots, v_n) ergänzen so dass $(u_1, \dots, u_m, v_{i_1}, \dots, v_{i_k})$ eine Basis ist. Sei $W = \langle v_{i_1}, \dots, v_{i_k} \rangle$.

Es gilt $V = U + W$, wir zeigen, dass die Summe direkte ist so dass W ein Komplement von U in V ist. Seien $u \in U$ und $w \in W$ mit $u + w = 0$. Es gibt Skalare Seien $x_1, \dots, x_m, y_1, \dots, y_k$ Skalare mit

$$u = x_1 u_1 + \dots + x_m u_m \text{ und } w = y_1 v_{i_1} + \dots + y_k w_{i_k}.$$

Es gilt also

$$x_1 u_1 + \dots + x_m u_m + y_1 v_{i_1} + \dots + y_k w_{i_k} = 0.$$

Aber $(u_1, \dots, u_m, v_{i_1}, \dots, w_{i_k})$ ist eine Basis, also gilt es $x_1 = \dots = x_m = y_1 = \dots = y_k = 0$ i.e. $u = 0$ und $w = 0$. Die Summe ist direkte. ■

Satz 6.3.4 (Dimensionsformel) Seien U und W Unterräume, dann gilt

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

Beweis. Sei R ein Komplement von $U \cap W$ in $U + W$ und seien U' und W' Komplemente von $U \cap W$ in U und in W . Es gilt

$$U + W = R \oplus (U \cap W), \quad U = (U \cap W) \oplus U' \text{ und } W = (U \cap W) \oplus W'.$$

Es gilt also $\dim(U + W) = \dim R + \dim(U \cap W)$, $\dim U = \dim U' + \dim(U \cap W)$ und $\dim W = \dim W' + \dim(U \cap W)$. Daraus folgt $\dim(U + W) + \dim(U \cap W) - (\dim U + \dim W) = \dim R - (\dim U' + \dim W')$.

Lemma 6.3.5 Es gilt: $U' + W' = U' \oplus W'$ und $U' \oplus W'$ ist ein Komplement von $U \cap W$ in $U + W$. □

Beweis. Sei $v \in U' \cap W'$, dann gilt $v \in U \cap W$ und $v \in U'$. Aber $U' \cap (U \cap W) = 0$ also $v = 0$. Die Summe $U' + W'$ ist eine direkte Summe.

Sei $v \in U + W$, es gibt also $u \in U$ und $w \in W$ mit $v = u + w$. Als $U = U' \oplus (U \cap W)$ und $W = W' \oplus (U \cap W)$ gibt es $u' \in U'$, $v' \in U \cap W$ mit $u = u' + v'$ und $w' \in W'$, $v'' \in U \cap W$ mit $w = w' + v''$. Es gilt also

$$v = u + w = u' + v' + w' + v'' = u' + w' + (v' + v''),$$

mit $u' \in U'$, $w' \in W'$ und $v' + v'' \in U \cap W$. Also $v \in (U' \oplus W') + (U \cap W)$. Sei $v \in (U' \oplus W') \cap (U \cap W)$. Es gibt $u' \in U'$ und $w' \in W'$ mit $v = u' + w' \in U \cap W$. Aber $u' \in U' \subset U$ und $v \in U$ so dass $w' = v - u' \in U$. Also gilt $w' \in W' \cap U \subset U \cap W$ und $w' \in W'$ so dass $w' = 0$. Die selbe Beweis gibt $U' = 0$ und $V = 0$. ■

Nach dem Lemma gilt $\dim U' + \dim W' = \dim(U' \oplus W') = \dim(U + W) - \dim(U \cap W) = \dim R$. Daraus folgt der Satz. ■

6.4 Projektion

Definition 6.4.1 Seien U und W Unterräume von V so dass $V = U \oplus W$. Die **Projektion auf U parallel zu W** ist die Abbildung $p_{U,W} : V \rightarrow V$ definiert wie folgt. Sei $v \in V$. Es gibt genau eine Darstellung $v = u + w$ mit $u \in U$ und $w \in W$. Man definiert $p_{U,W}(v) = u$.

Lemma 6.4.2 Die Projektion $p_{U,W}$ ist eine lineare Abbildung. □

Beweis. Übung. ■

Satz 6.4.3 Sei $p_{U,W}$ die Projektion auf U parallel zu W .

1. Es gilt $p_{U,W}^2 = p_{U,W} \circ p_{U,W} = p_{U,W}$.
2. $\text{Imp}_{U,W} = U$.
3. $\text{Ker} p_{U,W} = W$. □

Beweis. 1. Sei $v \in V$ und sei $v = u + w$ mit $u \in U$ und $w \in W$ die einzige Darstellung von v . Dann gilt $p_{U,W}(v) = u$. Aber $u = u + 0$ ist die einzige Darstellung von u als Element in $U \oplus W$, also gilt $p_{U,W}(u) = u$. Es folgt $p_{U,W}^2(v) = p_{U,W}(p_{U,W}(v))$ für alle $v \in V$.

2. Aus der Definition gilt $\text{Imp}_{U,W} \subset U$. Sei $u \in U$, in der Beweis von 1. haben wir gezeigt: $u = p_{U,W}(u)$ also $u \in \text{Imp}_{U,W}$.

3. Sei $w \in W$, dann ist $w = 0 + w$ die einzige Darstellung von w als Element in $U \oplus W$. Aus der Definition gilt also $p_{U,W}(w) = 0$ und $w \in \text{Ker} p_{U,W}$. Sei $v \in \text{Ker} p_{U,W}$ und sei $v = u + w$ die einzige Darstellung von v als Element von $U \oplus W$. Dann gilt $0 = p_{U,W}(v) = u$. Es gilt also $v = w \in W$. ■

7 Lineare Abbildungen

7.1 Der Vektorraum $\text{Hom}(V, W)$

Seien V und W zwei Vektorräume. Die Menge aller linearen Abbildungen $f : V \rightarrow W$ wird $\text{Hom}(V, W)$ bezeichnet. Wir definieren zwei Abbildungen $+$: $\text{Hom}(V, W) \times \text{Hom}(V, W) \rightarrow \text{Hom}(V, W)$ und \cdot : $K \times \text{Hom}(V, W) \rightarrow \text{Hom}(V, W)$ wie folgt:

$$(f + g)(v) = f(v) + g(v) \text{ für } f, g \in \text{Hom}(V, W),$$

$$(x \cdot f)(v) = xf(v) \text{ für } x \in K, f \in \text{Hom}(V, W).$$

Lemma 7.1.1 Das Triple $(\text{Hom}(V, W), +, \cdot)$ ist ein Vektorraum. □

Beweis. Siehe Übungsblatt 6. ■

7.2 Lineare Abbildungen und Dimension

Lemma 7.2.1 Sei $f : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung und seien v_1, \dots, v_n Vektoren in V . Dann gilt $f(\langle v_1, \dots, v_n \rangle) = \langle f(v_1), \dots, f(v_n) \rangle$. □

Beweis. Siehe Übungsblatt 6. ■

Lemma 7.2.2 Sei $f : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung und sei (v_1, \dots, v_n) ein System. Falls $(f(v_1), \dots, f(v_n))$ linear unabhängig ist, dann ist (v_1, \dots, v_n) linear unabhängig. □

Beweis. Siehe Übungsblatt 6. ■

Lemma 7.2.3 Sei $f : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung, dann gilt $\dim f(V) \leq \dim V$. □

Beweis. Sei (e_1, \dots, e_n) eine Basis von V . Dann ist $(f(e_1), \dots, f(e_n))$ ein EZS von $f(V)$. Also gilt nach Theorem 5.3.1, dass eine Basis von $f(V)$ weniger als n Elemente hat, also $\dim f(V) \leq n = \dim V$. ■

Korollar 7.2.4 Seien V und W zwei Vektorräume mit $V \simeq W$, dann gilt $\dim V = \dim W$.

Beweis. Sei $f : V \rightarrow W$ ein Isomorphismus. Angenommen $\dim V = n < \infty$. Dann gilt $W = f(V)$ also $\dim W = \dim f(V) \leq \dim V$ also W ist auch endlich dimensional. Es gibt ein Isomorphismus $f^{-1} : W \rightarrow V$ also der selbe Beweis zeigt, dass $\dim V \leq \dim W$. ■

Lemma 7.2.5 Seien V und W zwei Vektorräume mit $\dim V = \dim W < \infty$, dann gilt $V \simeq W$. □

Beweis. Aus Satz 5.2.1, gilt für $n = \dim V = \dim W$: $V \simeq K^n$ und $W \simeq K^n$. Es gilt also ein Isomorphismus $f : V \rightarrow K^n$ und ein Isomorphismus $g : K^n \rightarrow W$. Die Komposition $g \circ f : V \rightarrow W$ ist ein Isomorphismus. ■

Definition 7.2.6 Sei $f : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung, das Bild von f wird $\text{Im}(f)$ bezeichnet also $\text{Im}(f) = f(V)$.

Satz 7.2.7 Sei $f : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung. Dann gilt:

$$\dim \text{Ker}(f) + \dim \text{Im}(f) = \dim V.$$

Beweis. Sei (w_1, \dots, w_r) eine Basis von $f(V)$. Für alle $i \in [1, r]$ gilt $w_i \in f(V)$ also es gibt $v_i \in V$ mit $f(v_i) = w_i$ für alle $i \in [1, r]$. Sei (e_1, \dots, e_k) eine Basis von $\text{Ker}(f)$. Wir zeigen, dass $(e_1, \dots, e_k, v_1, \dots, v_r)$ eine Basis von V ist.

Sei $v \in V$, dann ist $f(v) \in f(V)$ und es gibt Skalare $x_1, \dots, x_r \in K$ mit

$$f(v) = \sum_{i=1}^r x_i f(v_i) = f\left(\sum_{i=1}^r x_i v_i\right).$$

Also gilt $v - \sum_{i=1}^r x_i v_i \in \text{Ker}(f)$ und es gibt Skalare $y_1, \dots, y_k \in K$ mit

$$v - \sum_{i=1}^r x_i v_i = \sum_{j=1}^k y_j e_j.$$

v ist also eine lineare Kombination der Vektoren $(e_1, \dots, e_k, v_1, \dots, v_r)$. Dies bedeutet, dass $(e_1, \dots, e_k, v_1, \dots, v_r)$ ein EZS ist.

Seien $x_1, \dots, x_r \in K$ und $y_1, \dots, y_k \in K$ Skalare mit

$$\sum_{i=1}^r x_i v_i + \sum_{j=1}^k y_j e_j = 0.$$

Dann gilt

$$0 = f\left(\sum_{i=1}^r x_i v_i + \sum_{j=1}^k y_j e_j\right) = \sum_{i=1}^r x_i f(v_i) + \sum_{j=1}^k y_j f(e_j) = \sum_{i=1}^r x_i w_i.$$

Aber (w_1, \dots, w_r) ist eine Basis also gilt $x_i = 0$ für alle $i \in [1, r]$. Es gilt also

$$\sum_{j=1}^k y_j e_j = 0$$

aber (v_1, \dots, v_k) ist eine Basis. Daraus folgt $y_j = 0$ für alle $j \in [1, k]$. Das System $(e_1, \dots, e_k, v_1, \dots, v_r)$ ist linear unabhängig und also eine Basis.

Es gilt $\dim V = k + r = \dim \operatorname{Ker}(f) + \dim \operatorname{Im}(f)$.

Der selbe Beweis gilt für $\dim V = \infty$ mit unendlichen Basen. ■

Definition 7.2.8 Sei $f : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung. **Der Rang** $\operatorname{Rg}(f)$ ist $\operatorname{Rg}(f) = \dim \operatorname{Im}(f)$.

Korollar 7.2.9 Seien V und W zwei Vektorräume mit $\dim V = \dim W < \infty$ und sei $f : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung. Dann sind die folgenden Eigenschaften äquivalent:

1. f ist injektiv,
2. f ist surjektiv,
3. f ist bijektiv.

Beweis. (1. \Rightarrow 2.) Angenommen, dass f injektiv ist. Dann gilt $\operatorname{Ker}(f) = 0$ also $\dim \operatorname{Ker}(f) = 0$ und es gilt $\dim f(V) = \dim V = \dim W$. Daraus folgt $f(V) = W$ und f ist surjektiv.

(1. \Rightarrow 2.) Angenommen, dass f surjektiv ist. Dann gilt $\dim f(V) = \dim W = \dim V$. Daraus folgt $\dim \operatorname{Ker}(f) = 0$ und $\operatorname{Ker}(f) = 0$ i.e. f ist injektiv.

(3. \Rightarrow 1.) Folgt aus der Definition. ■

7.3 Der Dualraum

Definition 7.3.1 Sei V ein Vektorraum. Der Vektorraum $\operatorname{Hom}(V, K)$ heißt **der Dualraum** von V und wird V^\vee (oder V^*) bezeichnet. Eine lineare Abbildung $\varphi \in V^\vee = \operatorname{Hom}(V, K)$ heißt **eine Linearform**.

Beispiel 7.3.2 Die Abbildung $K^n \rightarrow K$ definiert durch

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \mapsto x_i,$$

ist eine Linearform. Wir werden diese Linearform mit e_i^\vee bezeichnen. Das System $(e_1^\vee, \dots, e_n^\vee)$ von $(K^n)^\vee$ heißt **die Dualbasis** von (e_1, \dots, e_n) . Es gilt

$$e_i^\vee(e_j) = \delta_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{falls } i = j \\ 0 & \text{andernfalls.} \end{cases}$$

Lemma 7.3.3 Das System $(e_1^\vee, \dots, e_n^\vee)$ ist eine Basis von $(K^n)^\vee$. □

Beweis. Siehe Übungsblatt 7. ■

Bemerkung 7.3.4 Sei $\varphi : K^n \rightarrow K$ eine Linearform. Es gibt Skalare $a_1, \dots, a_n \in K$ mit $\varphi = \sum_{i=1}^n a_i e_i^\vee$. Es gilt also

$$\varphi \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \left(\sum_{i=1}^n a_i e_i^\vee \right) \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^n a_i x_i.$$

Satz 7.3.5 Sei $f : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung.

1. Die Abbildung $f^\vee : W^\vee \rightarrow V^\vee$ definiert durch $f^\vee(\varphi) = \varphi \circ f$ ist linear. Die Abbildung f^\vee heißt **die duale Abbildung**.

2. Sei $g : W \rightarrow U$ eine lineare Abbildung. Dann gilt $(g \circ f)^\vee = f^\vee \circ g^\vee$. □

Beweis. 1. Seien $\varphi, \psi \in W^\vee$. Es gilt $(f^\vee(\varphi + \psi))(v) = ((\varphi + \psi) \circ f)(v) = (\varphi + \psi)(f(v)) = \varphi(f(v)) + \psi(f(v)) = (f^\vee(\varphi))(v) + (f^\vee(\psi))(v)$. Sei $x \in K$, es gilt $(f^\vee(x \cdot \varphi))(v) = ((x \cdot \varphi) \circ f)(v) = (x \cdot \varphi)(f(v)) = x \cdot \varphi(f(v)) = (x \cdot (f^\vee(\varphi)))(v)$.

2. Sei $\varphi \in U^\vee$, es gilt $((g \circ f)^\vee)(\varphi)(v) = (\varphi \circ (g \circ f))(v) = \varphi(g(f(v)))$. Es gilt auch $((f^\vee \circ g^\vee)(\varphi))(v) = (f^\vee(g^\vee(\varphi)))(v) = (f^\vee(\varphi \circ g))(v) = (\varphi \circ g \circ f)(v) = \varphi(g(f(v)))$. ■

Satz 7.3.6 Sei $f : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung und sei $f^\vee : W^\vee \rightarrow V^\vee$ die duale Abbildung.

1. Ist f injektiv, dann ist f^\vee surjektiv.

2. Ist f surjektiv, dann ist f^\vee injektiv. □

Beweis. 1. Sei $\varphi \in V^\vee$. Sei $g : V \rightarrow f(V)$ definiert durch $g(v) = f(v)$. Da die Abbildung f injektiv ist, ist auch g injektiv. Die Abbildung g ist auch surjektiv, also g ist eine Bijektion von V nach $f(V)$. Sei g^{-1} die Umkehrabbildung. Sei U ein Komplement von $f(V)$ in W . Wir definieren $\psi \in W^\vee$ als

$$\psi = \varphi \circ g^{-1} \circ p_{f(V), U}.$$

Es gilt

$$(f^\vee(\psi))(v) = \psi(f(v)) = \varphi(g^{-1}(p_{f(V), U}(f(v)))) = \varphi(g^{-1}(f(v))) = \varphi(v).$$

Es gilt also $f^\vee(\psi) = \varphi$ und f^\vee ist surjektiv.

2. Sei $\varphi \in W^\vee$ mit $f^\vee(\varphi) = 0$. Dann gilt $\varphi(f(v)) = 0$ für alle $v \in V$. Sei $w \in W$. Da f surjektiv ist, gibt es ein $v \in V$ mit $f(v) = w$. Es gilt also $\varphi(w) = \varphi(f(v)) = 0$ und $\varphi = 0$. ■

Sei V ein Vektorraum und sei (v_1, \dots, v_n) eine Basis. Nach Korollar 5.2.2, gibt es Abbildungen $\varphi_i : V \rightarrow K$ mit $\varphi_i(v_j) = \delta_{i,j}$ für alle $i \in [1, n]$.

Satz 7.3.7 Das System $(\varphi_1, \dots, \varphi_n)$ von V^\vee ist eine Basis. Die Basis heißt **die dual Basis von** (v_1, \dots, v_n) . □

Beweis. Sei φ eine lineare Abbildung und sei $x_i = \varphi(v_i) \in K$ für alle $i \in [1, n]$ und sei $\psi = \sum_{i=1}^n x_i \varphi_i$. Es gilt

$$\psi(v_j) = \sum_{i=1}^n x_i \varphi_i(v_j) = x_j = \varphi(v_j).$$

Nach Korollar 5.2.2, gibt $\psi = \varphi$ und $\varphi \in \langle \varphi_1, \dots, \varphi_n \rangle$ und $(\varphi_1, \dots, \varphi_n)$ ist ein EZS von V^\vee .

Seien $x_1, \dots, x_n \in K$ Skalare mit $\sum_{i=1}^n x_i \varphi_i = 0$. Dann gilt

$$0 = \left(\sum_{i=1}^n x_i \varphi_i \right) (v_j) = x_j$$

für alle $j \in [1, n]$ und $(\varphi_1, \dots, \varphi_n)$ ist linear unabhängig. ■

Korollar 7.3.8 Sei V mit $\dim V < \infty$, dann gilt $\dim V = \dim V^\vee$.

Korollar 7.3.9 Sei V mit $\dim V < \infty$, dann gilt $V \simeq V^\vee$.

Beweis. Es gilt $\dim V^\vee = \dim V$, daraus folgt $V \simeq V^\vee$. ■

Satz 7.3.10 Sei $f : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung mit $\dim V < \infty$ und $\dim W < \infty$. Dann gilt $\text{Rg}(f) = \text{Rg}(f^\vee)$. □

Beweis. Wir betrachten $g : V \rightarrow f(V)$ definiert durch $g(v) = f(v)$ und $h : f(V) \rightarrow W$ definiert durch $h(w) = w$. Es gilt $f = h \circ g$. Es gilt also $f^\vee = g^\vee \circ h^\vee$ wobei $g^\vee : f(V)^\vee \rightarrow V^\vee$ und $h^\vee : W^\vee \rightarrow f(V)^\vee$.

Wir zeigen, dass $\text{Im} f^\vee = \text{Im} g^\vee$. Sei $\varphi \in \text{Im} f^\vee$, dann gilt $\varphi = f^\vee(\psi) = \psi \circ f$ für ein $\psi \in W^\vee$. Es gilt $\varphi = \psi \circ h \circ g = g^\vee(\psi \circ h)$ und $\varphi \in \text{Im} g^\vee$. Sei $\varphi \in \text{Im} g^\vee$, dann gilt $\varphi = g^\vee(\psi) = \psi \circ g$ für ein $\psi \in f(V)^\vee$. Die Abbildung h ist injektiv also ist h^\vee surjektiv und es gibt $\psi' \in W^\vee$ mit $\psi = h^\vee(\psi') = \psi' \circ h$. Es gilt $\varphi = \psi \circ g = \psi' \circ h \circ g = \psi' \circ f = f^\vee(\psi')$ und $\varphi \in \text{Im} f^\vee$.

Für die Abbildung $g^\vee : f(V)^\vee \rightarrow V^\vee$, gilt $\dim \text{Im} g^\vee = \dim f(V)^\vee - \dim \text{Ker}(g^\vee)$. Aber g ist surjektiv also ist g^\vee injektiv und $\text{Ker}(g^\vee) = 0$. Es gilt also $\text{Rg}(f^\vee) = \dim \text{Im}(f^\vee) = \dim \text{Im}(g^\vee) = \dim f(V)^\vee = \dim f(V) = \text{Rg}(f)$. ■

Definition 7.3.11 Sei V ein Vektorraum. Der **doppelt duale Vektorraum** $V^{\vee\vee}$ von V ist $V^{\vee\vee} = (V^\vee)^\vee$.

Satz 7.3.12 Sei V ein Vektorraum.

1. Die Abbildung $\Phi : V \rightarrow V^{\vee\vee}$ definiert durch $\Phi(v) = v^\vee$ wobei

$$v^\vee : V^\vee \rightarrow K, \varphi \mapsto v^\vee(\varphi) = \varphi(v),$$

ist eine lineare Abbildung.

2. Die Abbildung Φ ist injektiv.

3. Für $\dim V < \infty$ ist Φ ein Isomorphismus. □

Beweis. 1. Seien $v, v' \in V$ und $x, y \in K$. Es gilt

$$\begin{aligned} \Phi(xv + yv')(\varphi) &= \varphi(xv + yv') = x\varphi(v) + y\varphi(v') = x\Phi(v)(\varphi) + y\Phi(v')(\varphi) \\ &= (x\Phi(v) + y\Phi(v'))(\varphi). \end{aligned}$$

2. Sei $u \in \text{Ker}(\Phi)$. Dann gilt $\Phi(u) = 0$ also gilt für alle $\varphi \in V^\vee$, $\varphi(u) = \Phi(u)(\varphi) = 0$.

Lemma 7.3.13 Wenn $u \neq 0$, dann gibt es ein linear Form $\varphi : V \rightarrow K$ mit $\varphi(u) = 1$. □

Beweis. Sei W ein Komplement von $U = \langle u \rangle$. Angenommen $u \neq 0$, dann gilt $\dim U = 1$ und (u) ist eine Basis von U . Sei u^\vee die duale Basis also $u^\vee : U \rightarrow K$ mit $u^\vee(u) = 1$.

Für $v \in V$, sei $\varphi : V \rightarrow K$ definiert durch $\varphi(v) = u^\vee(p_{U,W}(v))$. Diese Abbildung ist linear und $\varphi(u) = 1$. ■

Wenn $u \neq 0$, dann gibt es, nach dem obigen Lemma, ein linear Form φ mit $\varphi(u) = 1$. Also gilt $1 = \varphi(u) = \Phi(u)(\varphi) = 0$, ein Widerspruch.

3. Es gilt $\dim V^{\vee\vee} = \dim V^\vee = \dim V$ und Φ ist injektiv. Diese Abbildung ist also bijektiv nach Korollar 7.2.9. ■

7.4 Quotienten Vektorräume

Definition 7.4.1 Sei U ein Unterraum in V . Die **Kongruenz modulo U** Relation ist die Relation

$$R_U = \{(v, v') \in V \times V \mid v - v' \in U\}.$$

Lemma 7.4.2 Die Relation R_U ist eine Äquivalenzrelation. □

Beweis. Sei $v \in V$. Es gilt $v - v = 0 \in U$ also R_U ist reflexiv. Seien $v, v' \in V$ mit $v - v' \in U$, dann gilt $v' - v = -(v - v') \in U$ und R_U ist symmetrisch. Seien $v, v', v'' \in V$ mit $v - v' \in U$ und $v' - v'' \in U$, dann gilt $v - v'' = (v - v') + (v' - v'') \in U$ und R_U ist transitiv. ■

Definition 7.4.3 Sei U ein Unterraum in V und sei $v \in V$. Wir schreiben $v + U$ für die Teilmenge

$$v + U = \{v + u \in V \mid u \in U\}.$$

Lemma 7.4.4 Die Äquivalenzklasse $[v]$ von v für die Relation R_U ist $v + U$. □

Beweis. Sei $v' \in [v]$, dann gilt $v' - v \in U$. Es gibt also ein $u \in U$ mit $v' = v + u$ und $v' \in v + U$. Umgekehrt, sei $v' \in v + U$. Es gibt ein $u \in U$ mit $v' = v + u$ also gilt $v' - v = u \in U$ und $v' \in [v]$. ■

Definition 7.4.5 Die Äquivalenzklasse $[v] = v + U$ heißt die **Restklasse von v modulo U** . Das Quotient V/R_U i.e. die Menge aller Äquivalenzklassen wird V/U bezeichnet und heißt der **Quotientenvektorraum**.

Satz 7.4.6 Sei U ein Unterraum in V .

1. Es gelte $[v] = [v']$ und $[w] = [w']$ für $v, v', w, w' \in V$. Dann folgt $[v + w] = [v' + w']$ sowie $[xv] = [xv']$ für alle $x \in K$.
2. Man definiert $[v] + [v'] = [v + v']$ und $x[v] = [xv]$, dann ist $(V/U, +, \cdot)$ ein Vektorraum.
3. Die kanonische Projektion $p_{R_U} : V \rightarrow V/U$ definiert durch $v \mapsto [v]$ ist eine surjektive lineare Abbildung.
4. $\text{Ker}(p_{R_U}) = U$. □

Beweis. 1. Aus den Gleichungen $[v] = [v']$ und $[w] = [w']$ folgt, dass es Elemente $u, u' \in U$ gibt mit $v - v' = u$ und $w - w' = u'$. Es gilt also $(v + w) - (v' + w') = u + u' \in U$ und $xv - xv' = xu$. Daraus folgt $[v + w] = [v' + w']$ und $[xv] = [xv']$.

2. Aus 1. sind die Addition und die Multiplikation $+$ und \cdot wohl definiert. Es gilt $[v] + [0] = [v + 0] = [v] = [0 + v] = [v] + [0]$ also ist $[0]$ ein neutrales Element. Es gilt $[v] + ([w] + [u]) = [v] + [w + u] = [v + w + u] = [v + w] + [u] = ([v] + [w]) + [u]$ und $+$ ist assoziativ. Es gilt $[v] + [-v] = [0] = [0] + [v]$ also ist $[-v]$ ein Inverse für $[v]$. Es gilt auch $[v] + [w] = [v + w] = [w + v] = [w] + [v]$, so dass $(V/U, +)$ eine kommutative Gruppe ist.

Es gilt $(xy)[v] = [x y v] = [x(yv)] = x[yv] = x(y[v])$, $1[v] = [v]$, $x[v + w] = [x(v + w)] = [xv + xw] = [xv] + [xw] = x[v] + x[w]$ und $(x + y)[v] = [(x + y)v] = [xv + yv] = x[v] + y[v]$, so dass $(V/U, +, \cdot)$ ein Vektorraum ist.

3. Die kanonische Projektion ist immer surjektiv (Lemma 1.5.17), wir zeigen, dass sie linear ist. Seien $v, v' \in V$ und $x, y \in K$, dann gilt $p_{R_U}(xv + yv') = [xv + yv'] = x[v] + y[v'] = xp_{R_U}(x) + yp_{R_U}(v')$.

4. Sei $v \in \text{Ker}(p_{R_U})$, dann gilt $[v] = p_{R_U}(v) = [0]$ also $v \in U$. Umgekehrt, sei $v \in U$, dann gilt $p_{R_U}(v) = [v] = [0]$. ■

Korollar 7.4.7 Sei U ein Unterraum von V mit $\dim V < \infty$. Dann gilt $\dim(V/U) = \dim V - \dim U$.

Beweis. Die Abbildung $p_{R_U} : V \rightarrow V/U$ ist linear, surjektiv mit $\text{Ker}(p_{R_U}) = U$. Daraus folgt, $\dim V = \text{Rg}(p_{R_U}) + \dim \text{Ker}(p_{R_U}) = \dim V/U + \dim U$. ■

Satz 7.4.8 (Homomorphiesatz) Seien U ein Unterraum vom Vektorraum V und sei $p_{R_U} : V \rightarrow V/U$ die kanonische Projektion.

1. Dann existiert zu jeder linearen Abbildung $f : V \rightarrow W$ mit $U \subset \text{Ker}(f)$, genau eine lineare Abbildung $\bar{f} : V/U \rightarrow W$ so dass das Diagramm

$$\begin{array}{ccc} V & \xrightarrow{f} & W \\ p_{R_U} \downarrow & \nearrow \bar{f} & \\ V/U & & \end{array}$$

kommutiert i.e. $f = \bar{f} \circ p_{R_U}$.

2. Weiter ist \bar{f} genau dann injektiv, wenn $U = \text{Ker}(f)$ gilt und genau dann surjektiv wenn f surjektiv ist. □

Beweis. 1. Sei $f : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung mit $U \subset \text{Ker}(f)$. Wir zeigen, dass, wenn $[v] = [v']$, dann $f(v) = f(v')$ gilt. Wenn $[v] = [v']$, dann gilt $v - v' = u \in U$. Also gilt $f(v) - f(v') = f(v - v') = f(u) = 0$ weil $U \subset \text{Ker}(f)$.

Nach Satz 1.5.18, gilt es eine Abbildung $\bar{f} : V/U \rightarrow W$ mit $\bar{f} \circ p_{R_U} = f$. Es gilt also $\bar{f}([v]) = f(v)$. Wir zeigen, dass \bar{f} linear ist. Seien $v, v' \in V$ und $x, y \in K$, dann gilt $\bar{f}(x[v] + y[v']) = \bar{f}([xv + yv']) = f(xv + yv') = xf(v) + yf(v') = x\bar{f}([v]) + y\bar{f}([v'])$ und \bar{f} ist linear.

Wir zeigen, dass \bar{f} mit $\bar{f} \circ p_{R_U} = f$ eindeutig bestimmt ist. Sei g mit $g \circ p_{R_U} = f$, dann gilt $g([v]) = g(p_{R_U}(v)) = f(v) = \bar{f}([v])$ also $g = \bar{f}$.

2. Wir zeigen $U = \text{Ker}(f) \Leftrightarrow \bar{f}$ ist injektiv.

Angenommen $U = \text{Ker}(f)$, sei $[v] \in \text{Ker}(\bar{f})$. Dann gilt $f(v) = \bar{f}([v]) = 0$ also $v \in \text{Ker}(f) = U$ und $[v] = [0]$.

Angenommen \bar{f} ist injektiv. Sei $v \in \text{Ker}(f)$, dann gilt $\bar{f}([v]) = f(v) = 0$. Aber \bar{f} ist injektiv also $[v] = [0]$ und $v \in U$.

Wir zeigen f ist surjektiv $\Leftrightarrow \bar{f}$ ist surjektiv.

Angenommen \bar{f} ist surjektiv, dann ist f eine Komposition von zwei surjektive Abbildungen und ist auch surjektiv.

Angenommen f ist surjektive, sei $w \in W$. Es gibt ein $v \in V$ mit $f(v) = w$. Daraus folgt $\bar{f}([v]) = f(v) = w$ und \bar{f} ist surjektiv. ■

Korollar 7.4.9 (Isomorphiesatz) Sei $f : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung, dann induziert f in kanonischer Weise einen Isomorphismus $V/\text{Ker}(f) \simeq \text{Im}(f)$.

Beweis. Sei $g : V \rightarrow \text{Im}(V)$ die Abbildung definiert durch $g(v) = f(v)$. Aus dem Satz 7.4.8 folgt, dass es eine lineare Abbildung $\bar{g} : V/\text{Ker}(f) \rightarrow \text{Im}(V)$ gibt mit \bar{g} injektiv und \bar{g} bijektiv also \bar{g} ein Isomorphismus. ■

Korollar 7.4.10 Sei $f : V \rightarrow W$ eine surjektive lineare Abbildung, dann induziert f in kanonischer Weise einen Isomorphismus $V/\text{Ker}(f) \simeq W$.

Beweis. Die Abbildung ist surjektiv also gilt $\text{Im}(f) = f(V) = W$ und aus Korollar 7.4.9 folgt $V/\text{Ker}(f) \simeq W$. ■

7.5 Lineare Abbildungen und Basen

Seien V und W zwei endlich dimensionale Vektorräume. Wir wollen in diesem Abschnitt eine Basis für den Vektorraum $\text{hom}(V, W)$ beschreiben. Sei $n = \dim V$ und $m = \dim W$ und seien $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$ eine Basis von V und $\mathcal{B} = (w_1, \dots, w_m)$ eine Basis von W .

Wir haben den folgenden Satz bewiesen (siehe Korollar 5.2.2):

Satz 7.5.1 Sei V ein Vektorraum und sei (v_1, \dots, v_n) eine Basis.

1. Seien $f : V \rightarrow W$ und $g : V \rightarrow W$ zwei lineare Abbildungen. Es gilt $f = g$ genau dann, wenn $f(v_i) = g(v_i)$ für alle $1 \leq i \leq n$.
2. Seien w'_1, \dots, w'_n Vektoren in ein Vektorraum W , es gibt genau eine lineare Abbildung $f : V \rightarrow W$ mit $f(v_i) = w'_i$ für alle $1 \leq i \leq n$. □

Nach dem zweiten Punkt vom Satz 7.5.1, gibt es für jedes $i \in [1, n]$ und jedes $j \in [1, m]$ genau eine Abbildung $f_{i,j}$ mit

$$f_{i,j}(v_k) = \begin{cases} w_j & \text{für } k = i \\ 0 & \text{andernfalls.} \end{cases}$$

Satz 7.5.2 Das System $(f_{i,j})_{i \in [1,n], j \in [1,m]}$ ist eine Basis von $\text{Hom}(V, W)$. □

Beweis. Wir zeigen zuerst, dass das System $(f_{i,j})_{i \in [1,m], j \in [1,n]}$ linear unabhängig ist. Seien für alle $i \in [1, m]$ und $j \in [1, n]$ Skalare $x_{i,j} \in K$ mit

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{i,j} f_{i,j} = 0.$$

Dies ist eine Gleichung zwischen lineare Abbildungen also gilt es für alle $v \in V$:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{i,j} f_{i,j}(v) = 0.$$

Für $v = v_k$ haben wir

$$0 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{i,j} f_{i,j}(v_k) = \sum_{i=1}^m x_{i,k} w_i.$$

Aber (w_1, \dots, w_m) ist eine Basis also gilt $x_{i,k} = 0$ für alle $i \in [1, m]$. Dies ist wahr für alle $k \in [1, n]$ also gilt $x_{i,k} = 0$ für alle $k \in [1, n]$ und $i \in [1, m]$ und das System $(f_{i,j})_{i \in [1,m], j \in [1,n]}$ ist linear unabhängig.

Wir zeigen jetzt, dass das System $(f_{i,j})_{i \in [1,m], j \in [1,n]}$ ein EZS ist. Sei $f \in \text{hom}(V, W)$. Für alle $k \in [1, n]$ es gilt $f(v_k) \in W = \langle w_1, \dots, w_m \rangle$. Es gilt also Skalare $x_{1,k}, \dots, x_{m,k} \in K$ mit

$$f(v_k) = x_{1,k} w_1 + \dots + x_{m,k} w_m.$$

Wir zeigen, dass die Gleichung

$$f = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{i,j} f_{i,j}$$

gilt. Nach Punkt 1. vom Satz 7.5.1 reicht es zu zeigen, dass

$$f(v_k) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{i,j} f_{i,j}(v_k)$$

für alle $k \in [1, n]$. Auf einer Seite gilt

$$f(v_k) = x_{1,k} w_1 + \dots + x_{m,k} w_m.$$

Auf der anderen Seite gilt

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{i,j} f_{i,j}(v_k) = \sum_{i=1}^m x_{i,k} w_i.$$

Die Gleichung

$$f(v_k) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{i,j} f_{i,j}(v_k)$$

ist also wahr und $(f_{i,j})_{i \in [1,m], j \in [1,n]}$ ist ein EZS. ■

Korollar 7.5.3 Es gilt $\dim \operatorname{Hom}(V, W) = nm = \dim V \cdot \dim W$.

Definition 7.5.4 Sei f eine lineare Abbildung und seien $(x_{i,j})_{i \in [1,m], j \in [1,n]}$ die eindeutig bestimmte Skalare so dass

$$f = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{i,j} f_{i,j}.$$

Wir schreiben die Skalare $(x_{i,j})_{i \in [1,m], j \in [1,n]}$ in eine Tabelle

$$\operatorname{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}(f) = \begin{pmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,n} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m,1} & x_{m,2} & \cdots & x_{m,n} \end{pmatrix}$$

die die Matrix von f in die Basen \mathcal{B} und \mathcal{B}' heißt.

8 Matrizen

8.1 Definition

Definition 8.1.1 Sei K ein Körper. **Eine** $m \times n$ -**Matrix** A (mit einträgen in K) ist eine Anordnung von Elementen $(a_{i,j})_{i \in [1,n], j \in [1,m]}$ von K in eine Tabelle

$$A = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,n} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m,1} & a_{m,2} & \cdots & a_{m,n} \end{pmatrix}.$$

Die Menge aller $m \times n$ -Matrizen wird mit $M_{m,n}(K)$ bezeichnet. Das m -Tupel

$$\begin{pmatrix} a_{1,j} \\ a_{2,j} \\ \vdots \\ a_{m,j} \end{pmatrix}$$

ist die j -te Spalte von A , und das n -Tupel $(a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,n})$ ist die i -te Zeile von A .

Notation 8.1.2 1. Statt

$$A = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,n} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m,1} & a_{m,2} & \cdots & a_{m,n} \end{pmatrix}$$

schreibt man auch $A = (a_{i,j})_{i \in [1,m], j \in [1,n]}$ oder $A = (a_{i,j})$.

2. Statt $M_{n,n}(K)$ schreibt man auch $M_n(K)$.

3. Sei $A = (a_{i,j})$ mit $a_{i,j} = 0$ für alle i, j . Dann schreibt man $A = 0$. Diese Matrix heißt **die Nullmatrix**.

8.2 Operationen auf Matrizen

Definition 8.2.1 Seien $A = (a_{i,j})$ und $B = (b_{i,j})$ in $M_{m,n}(K)$ zwei Matrizen. Wir definieren die **Summe** $A + B$ von A und B durch

$$A + B = (a_{i,j} + b_{i,j}) = \begin{pmatrix} a_{1,1} + b_{1,1} & a_{1,2} + b_{1,2} & \cdots & a_{1,n} + b_{1,n} \\ a_{2,1} + b_{2,1} & a_{2,2} + b_{2,2} & \cdots & a_{2,n} + b_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m,1} + b_{m,1} & a_{m,2} + b_{m,2} & \cdots & a_{m,n} + b_{m,n} \end{pmatrix}.$$

Die Abbildung $M_{m,n}(K) \times M_{m,n}(K) \rightarrow M_{m,n}(K)$, $(A, B) \mapsto A + B$ heißt **die Addition von Matrizen**.

Definition 8.2.2 Seien $A = (a_{i,j})$ in $M_{m,n}(K)$ eine Matrix und sei $x \in K$. Wir definieren die **Skalarmultiplikation** von x und A durch

$$xA = (xa_{i,j}) = \begin{pmatrix} xa_{1,1} & xa_{1,2} & \cdots & xa_{1,n} \\ xa_{2,1} & xa_{2,2} & \cdots & xa_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ xa_{m,1} & xa_{m,2} & \cdots & xa_{m,n} \end{pmatrix}.$$

Die Abbildung $K \times M_{m,n}(K) \rightarrow M_{m,n}(K)$, $(x, A) \mapsto xA$ heißt **die Skalarmultiplikation von Matrizen**.

Lemma 8.2.3 $(M_{m,n}(K), +, \cdot)$ ist ein Vektorraum. Der Nullvektor ist die Nullmatrix. □

Beweis. Siehe Übungsblatt 8. ■

Definition 8.2.4 Sei $A = (a_{i,j}) \in M_{m,n}(K)$ und $B = (b_{i,j}) \in M_{n,p}(K)$. Wir definieren das **Produkt** oder die **Multiplikation** AB von A und B durch

$$AB = (c_{i,j}) \in M_{m,p}(K) \text{ durch}$$

$$c_{i,j} = \sum_{k=1}^n a_{i,k} b_{k,j}.$$

Die Abbildung $M_{m,n}(K) \times M_{n,p}(K) \rightarrow M_{m,p}(K)$, $(A, B) \mapsto AB$ heißt **die Multiplikation von Matrizen**.

Beispiel 8.2.5 1. Es gilt

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

2. Es gilt

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

3. Es gilt

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}.$$

4. Es gilt

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}.$$

8.3 Kanonische Basis

Definition 8.3.1 Seien $k \in [1, m]$ und $l \in [1, n]$. Wir definieren die Matrix $E_{k,l} \in M_{m,n}(K)$ durch $E_{k,l} = (e_{i,j})$ wobei

$$e_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{für } i = k \text{ und } j = l, \\ 0 & \text{andernfalls} \end{cases}$$

Lemma 8.3.2 Das System $(E_{k,l})_{k \in [1,m], l \in [1,n]}$ ist eine Basis von $M_{m,n}(K)$. □

Beweis. Seien $(x_{k,l})_{k \in [1,m], l \in [1,n]}$ Skalare mit

$$\sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n x_{k,l} E_{k,l} = 0.$$

Als Matrizen können wir schreiben

$$(x_{i,j}) = \begin{pmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,n} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m,1} & x_{m,2} & \cdots & x_{m,n} \end{pmatrix} = 0.$$

Es gilt also $x_{i,j} = 0$ für alle i und j und das System ist linear unabhängig.

Sei $A = (a_{i,j})$ eine Matrix, es gilt

$$A = \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n a_{k,l} E_{k,l}$$

und das System ist ein EZS. ■

Korollar 8.3.3 Es gilt $\dim M_{m,n}(K) = mn$.

8.4 Matrizen als lineare Abbildungen

Sei $\mathcal{B} = (e_1, \dots, e_n)$ die kanonische Basis von K^n und sei $\mathcal{B}' = (v_1, \dots, v_m)$ die kanonische Basis von K^m . Sei $f : K^n \rightarrow K^m$ eine lineare Abbildung und sei $A = \text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}(f)$ die Matrix von f in die Basen \mathcal{B} und \mathcal{B}' . Es gilt $A \in M_{m,n}(K)$.

Lemma 8.4.1 Sei $(f_{i,j})$ die Basis von $\text{Hom}(K^n, K^m)$ definiert durch $f_{i,j}(e_k) = \delta_{j,k}v_i$. Es gilt

$$\text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}(f_{i,j}) = E_{i,j}.$$

Beweis. Wir schreiben $f_{i,j}$ als lineare Kombination von Elementen von der Basis $(f_{k,l})$. Es gilt $f_{i,j} = \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n a_{k,l} f_{k,l}$ mit

$$a_{k,l} = \delta_{i,k} \delta_{j,l}.$$

Die Matrix $\text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}(f_{i,j})$ ist $(a_{k,l})$, es gilt also $\text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}(f_{i,j}) = E_{i,j}$. ■

Definition 8.4.2 Sei $\text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'} : \text{Hom}(K^n, K^m) \rightarrow M_{m,n}(K)$ die Abbildung definiert durch $f \mapsto \text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}(f)$.

Satz 8.4.3 Die Abbildung $\text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}$ ist ein Isomorphismus. □

Beweis. Wir zeigen zuerst, dass $\text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}$ linear ist. Seien $f, g \in \text{Hom}(K^n, K^m)$ und seien $x, y \in K$. Wir schreiben

$$f = \sum_{i,j} a_{i,j} f_{i,j} \text{ und } g = \sum_{i,j} b_{i,j} f_{i,j}$$

wobei $(f_{i,j})$ die Basis von $\text{Hom}(K^n, K^m)$ definiert durch $f_{i,j}(e_k) = \delta_{j,k}v_i$ ist. Es gilt also

$$\text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}(f) = (a_{i,j}) \text{ und } \text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}(g) = (b_{i,j}).$$

Es gilt auch

$$xf + yg = x \sum_{i,j} a_{i,j} f_{i,j} + y \sum_{i,j} b_{i,j} f_{i,j} = \sum_{i,j} (xa_{i,j} + yb_{i,j}) f_{i,j}.$$

Es gilt also

$$\text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}(xf + yg) = (xa_{i,j} + yb_{i,j}) = x\text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}(f) + y\text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}(g).$$

Die Abbildung $\text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}$ ist linear. Diese Abbildung schickt die Basis $(f_{i,j})$ über die Basis $(E_{i,j})$. Daraus folgt, dass $\text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}$ ein Isomorphismus ist. ■

Definition 8.4.4 Sei $A = (a_{i,j}) \in M_{m,n}(K)$ eine Matrix. Wir definieren eine Abbildung, die wir ebenfalls mit A bezeichnen, wie folgt:

$$A : K^n \longrightarrow K^m$$

$$v \longmapsto A(v) = Av$$

wobei Av das Produkt von der Matrix $A \in M_{m,n}(K)$ und der Matrix $v \in M_{n,1}(K)$ bezeichnet. Wir nennen $A : K^n \rightarrow K^m$ dann **Matrixabbildung**.

Lemma 8.4.5 Sei $f \in \text{Hom}(K^n, K^m)$ mit $\text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}(f) = A$. Es gilt $Av = f(v)$. \square

Beweis. Wie schreiben $v = \sum_{k=1}^n x_k e_k$. Es gilt also

$$v = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}.$$

Wir schreiben $A = (a_{i,j})$, es gilt also

$$f = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{i,j} f_{i,j}.$$

Daraus folgt

$$\begin{aligned} f(v) &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{i,j} f_{i,j}(v) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{i,j} f_{i,j} \left(\sum_{k=1}^n x_k e_k \right) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n x_k a_{i,j} f_{i,j}(e_k) \\ f(v) &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n x_k a_{i,j} \delta_{j,k} v_i = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_j a_{i,j} v_i = \sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1}^n a_{i,j} x_j \right) v_i. \end{aligned}$$

Es gilt auch per Definition

$$Av = \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^n a_{1,k} x_k \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^n a_{m,k} x_k \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^m \left(\sum_{k=1}^n a_{i,k} x_k \right) v_i.$$

Daraus folgt $Av = f(v)$. \blacksquare

Korollar 8.4.6 Sei $A = (a_{i,j}) \in M_{m,n}(K)$ eine Matrix, die Abbildung $A : K \rightarrow K$ ist linear.

Der folgende Satz ist sehr nützlich, um die Matrix einer linearen Abbildungen zu berechnen.

Satz 8.4.7 Sei $f : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung. Sei $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$ eine Basis von V und sei $\mathcal{B}' = (w_1, \dots, w_m)$ eine Basis von W . Wir schreiben $f(v_1), \dots, f(v_n)$ als lineare combination von w_1, \dots, w_m :

$$f(v_1) = x_{1,1}w_1 + \dots + x_{m,1}w_m, \quad \dots, \quad f(v_n) = x_{1,n}w_1 + \dots + x_{m,n}w_m.$$

Dann gilt

$$\text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}'}(f) = \begin{pmatrix} x_{1,1} & \dots & x_{1,n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{m,1} & \dots & x_{m,n} \end{pmatrix}.$$

Beweis. Sei A die obige Matrix. Es genügt zu zeigen, dass $Av = f(v)$. Es genügt also zu zeigen, dass $Av_i = f(v_i)$ für alle $i \in [1, n]$. Dies folgt aus der Definition der Matrix A . ■

Sei \mathcal{B}'' die kanonische Basis von K^p .

Korollar 8.4.8 Seien $A = (a_{i,j}) \in M_{m,n}(K)$ und $B = (b_{i,j}) \in M_{n,p}(K)$ Matrizen und seien $f \in \text{Hom}(K^n, K^m)$ und $g \in \text{Hom}(K^p, K^n)$ mit $\text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}'}(f) = A$ und $\text{Mat}_{\mathcal{B}'',\mathcal{B}}(g) = B$. Dann gilt für alle $v \in K^p$:

$$(f \circ g)(v) = A(Bv) \text{ und } \text{Mat}_{\mathcal{B}'',\mathcal{B}'}(f \circ g) = AB.$$

Beweis. Sei $v \in K^p$, dann gilt $g(v) = Bv \in K^n$. Es gilt also $(f \circ g)(v) = f(g(v)) = Ag(v) = A(Bv)$. Insbesondere gilt diese Formel für $v \in \mathcal{B}''$. Daraus folgt die zweite Formel. ■

Korollar 8.4.9 Seien $A = (a_{i,j}) \in M_{m,n}(K)$ und $B = (b_{i,j}) \in M_{m,n}(K)$ Matrizen und seien $f \in \text{Hom}(K^n, K^m)$ und $g \in \text{Hom}(K^n, K^m)$ mit $\text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}'}(f) = A$ und $\text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}'}(g) = B$. Dann gilt für alle $v \in K^n$:

$$(f + g)(v) = (A + B)v \text{ und } \text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}'}(f + g) = A + B.$$

Korollar 8.4.10 Die Matrixmultiplikation ist associativ, i.e. für alle $A \in M_{m,n}(K)$, $B \in M_{n,p}(K)$, $C \in M_{p,q}(K)$ gilt

$$(AB)C = A(BC).$$

Beweis. Sei \mathcal{B}''' die kanonische Basis von K^q . Sei $f \in \text{Hom}(K^n, K^m)$, $g \in \text{Hom}(K^p, K^n)$ und $h \in \text{Hom}(K^q, K^p)$ mit $\text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}'}(f) = A$, $\text{Mat}_{\mathcal{B}'',\mathcal{B}}(g) = B$ und $\text{Mat}_{\mathcal{B}''',\mathcal{B}''}(h) = C$. Es gilt

$$\begin{aligned} (AB)C &= \text{Mat}_{\mathcal{B}'',\mathcal{B}'}(f \circ g) \text{Mat}_{\mathcal{B}''',\mathcal{B}''}(h) = \text{Mat}_{\mathcal{B}'',\mathcal{B}'}((f \circ g) \circ h) \\ &= \text{Mat}_{\mathcal{B}'',\mathcal{B}'}(f \circ (g \circ h)) = \text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}'}(f) \text{Mat}_{\mathcal{B}''',\mathcal{B}}(g \circ h) = A(BC). \end{aligned}$$

Korollar 8.4.11 $(M_n(K), +, \cdot)$ wobei \cdot die Matrixmultiplikation ist, ist ein Ring.

Beweis. Wir wissen, dass $(M_n(K), +)$ eine kommutative Gruppe ist (weil $(M_n(K))$ ein Vektorraum ist). Die Matrixmultiplikation ist auch assoziativ. Wir setzen

$$I_n = \text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}}(\text{Id}_{K^n}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Sei $A \in M_n(K)$ und sei $f \in \text{Hom}(K^n, K^n)$ mit $A = \text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}}(f)$. Es gilt,

$$AI_n = \text{Mat}_{\mathcal{C}\mathcal{B},\mathcal{B}}(f \circ \text{Id}_{K^n}) = \text{Mat}_{\mathcal{C}\mathcal{B},\mathcal{B}}(f) = A = \text{Mat}_{\mathcal{C}\mathcal{B},\mathcal{B}}(f) = \text{Mat}_{\mathcal{C}\mathcal{B},\mathcal{B}}(\text{Id}_{K^n} \circ f) = I_n A.$$

Seien $A, B, C \in M_n(K)$ und seien $f, g, h \in \text{Hom}(K^n, K^n)$ mit $A = \text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}}(f)$, $B = \text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}}(g)$ und $C = \text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}}(h)$. Es gilt

$$A(B + C) = \text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}}(f)(\text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}}(g + h)) = \text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}}(f \circ (g + h)).$$

Sei $v \in K^n$, es gilt $(f \circ (g + h))(v) = (f(g + h))(v) = f(g(v) + h(v)) = f(g(v)) + f(h(v)) = (f \circ g)(v) + (f \circ h)(v)$. Es gilt also

$$\begin{aligned} A(B + C) &= \text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}}(f \circ (g + h)) = \text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}}(f \circ g + f \circ h) \\ &= \text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}}(f \circ g) + \text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}}(f \circ h) = AB + AC. \end{aligned}$$

Es gilt auch

$$(B + C)A = (\text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}}(g + h))\text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}}(f) = \text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}}((g + h) \circ f).$$

Sei $v \in K^n$, es gilt $((g + h) \circ f)(v) = (g + h)(f(v)) = g(f(v)) + h(f(v)) = (g \circ f)(v) + (h \circ f)(v)$. Es gilt also

$$\begin{aligned} (B + C)A &= \text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}}((g + h) \circ f) = \text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}}(g \circ f + h \circ f) \\ &= \text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}}(g \circ f) + \text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}}(h \circ f) = BA + CA. \end{aligned}$$

Bemerkung 8.4.12 $(M_n(K), +, \cdot)$ ist nicht kommutativ. Zum Beispiel, gilt es:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \end{pmatrix}.$$

Definition 8.4.13 Ein Ring $(R, +, \cdot)$ mit einer Skalarmultiplikation $*$: $K \times R \rightarrow R$ heißt **K -Algebra** falls gilt:

1. $(R, +, *)$ ist ein K -Vektorraum,
2. für alle $x \in K$, $r, s \in R$ gilt $x * (r \cdot s) = (x * r) \cdot s = r \cdot (x * s)$.

Lemma 8.4.14 $(M_n(K), +, \cdot, *)$, wobei $*$ die Skalarmultiplikation von Matrizen ist, ist eine K -algebra. □

Beweis. Übung. ■

8.5 Lineare Abbildungen und Matrizen

Sei V mit $\dim V = n$ und W mit $\dim W = m$ zwei Vektorräume. Sei \mathcal{B} eine Basis von V und \mathcal{B}' eine Basis von W . Wir für $\text{Hom}(K^n, K^m)$ kann man ein Isomorphismus zwischen $\text{Hom}(V, W)$ und $M_{m,n}(K)$ geben. Wir werden nur eine vereinfachte Beweis geben.

Satz 8.5.1 Die Abbildung $\Phi : \text{Hom}(V, W) \rightarrow M_{m,n}(K)$ definiert durch $\Phi(f) = \text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}'}(f)$ ist ein Isomorphismus. \square

Beweis. Man beweist zuerst, dass diese Abbildung linear ist (siehe Übungsblatt 8). Dann zwingt man, dass die Basis $(f_{i,j})$ (siehe Satz 7.5.2) die Gleichung $\Phi(f_{i,j}) = E_{i,j}$ erfüllt (siehe Lemma 8.4.1). Dann ist Φ ein Isomorphismus. \blacksquare

Wir schreiben $f(v_k) = \sum_{i=1}^m x_{i,k} w_i$.

Satz 8.5.2 Es gilt

$$\text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}'}(f) = \begin{pmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,n} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m,1} & \cdots & \cdots & x_{m,n} \end{pmatrix}.$$

Beweis. Es genügt zu zeigen, dass

$$f = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{i,j} f_{i,j}$$

mit $(f_{i,j})$ die Basis von $\text{Hom}(V, W)$ im Satz 7.5.2 definiert. Es gilt

$$\left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{i,j} f_{i,j} \right) (v_k) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{i,j} f_{i,j}(v_k) = \sum_{i=1}^m x_{i,k} w_i = f(v_k).$$

8.6 Elementarmatrizen

Definition 8.6.1 Für $1 \leq p, q \leq n$ mit $p \neq q$ und $a \in K$, definieren wir eine Matrix $T_{p,q}^{(n)}(a) = T_{p,q}(a) = (t_{i,j}) \in M_n(K)$ durch

$$t_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{falls } i = j, \\ a & \text{falls } (i, j) = (p, q), \\ 0 & \text{andernfalls.} \end{cases}$$

Für $1 \leq p \leq n$ und $b \in K^\times$, definieren wir eine Matrix $D_p^{(n)}(b) = D_p(b) = (d_{i,j}) \in M_n(K)$ durch

$$d_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{falls } i = j \neq p, \\ a & \text{falls } i = j = p, \\ 0 & \text{andernfalls.} \end{cases}$$

Für $1 \leq p, q \leq n$, definieren wir eine Matrix $E_{p,q}^{(n)} = E_{p,q} = (e_{i,j}) \in M_n(K)$ durch

$$e_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{falls } q \neq i = j \neq p, \\ 1 & \text{falls } (i,j) = (p,q), \\ a & \text{falls } (i,j) = (q,p), \\ 0 & \text{andernfalls.} \end{cases}$$

Es gilt $E_{p,q} = E_{q,p}$ und $E_{p,p} = I_n$.

Matrizen der Form $T_{p,q}^{(n)}(a)$, $D_p^{(n)}(b)$ und $E_{p,q}^{(n)}$ nennt man **Elementarmatrizen vom Typ I, II bzw. III**.

Beispiel 8.6.2

$$\begin{aligned} T_{2,3}^{(4)}(a) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & a & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & T_{3,2}^{(4)}(a) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & a & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ D_1^{(4)}(b) &= \begin{pmatrix} b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & D_3^{(4)}(b) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ E_{2,3}^{(4)} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & E_{1,4}^{(4)}(a) &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Lemma 8.6.3 Die Matrizen $T_{p,q}^{(n)}(a)$, $D_p^{(n)}(b)$ und $E_{p,q}^{(n)}$ sind invertierbar. □

Beweis. Es gilt

$$\begin{aligned} T_{p,q}^{(n)}(a)T_{p,q}^{(n)}(-a) &= I_n = T_{p,q}^{(n)}(-a)T_{p,q}^{(n)}(a) \\ D_p^{(n)}(b)D_p^{(n)}(b^{-1}) &= I_n = D_p^{(n)}(b^{-1})D_p^{(n)}(b) \\ E_{p,q}^{(n)}E_{p,q}^{(n)} &= I_n \end{aligned}$$

Lemma 8.6.4 (Zeilenoperationen) Seien $A \in M_{m,n}(K)$, $a \in K$ und $b \in K^\times$.

- (I) $T_{p,q}^{(n)}(a)A$ entsteht aus A , indem man zur p -ten Zeile von A das a -fache q -ten Zeile addiert.

ist in redizierter Zeilenstufenform, wobei $r = 4$ und $\text{Zeilenform}(B) = \{2, 5, 7, 8\}$.

2. Eine Matrix B in reduzierter Zeilenstufenform ist also von der Form

1	j_1				j_2	j_3				j_r	n											
0	...	0	1	★	...	★	0	★	...	★	0	★	...	★	1							
0							1	★	...	★	...	0	⋮	⋮	2							
							0					0	★	...	★	0	⋮	⋮	3			
												1	★	...	★	0	⋮	⋮	4			
							0											0	⋮	⋮	⋮	⋮
																		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
0	⋮	⋮	⋮	⋮																		
1	★	...	★	r																		
0															$r + 1$							
															⋮							
															n							

wobei die Sternen für beliebige Elemente aus K stehen. Hier ist $\text{Zeilenform}(B) = \{j_1, \dots, j_r\}$.

Satz 8.7.3 (Gauß-Algorithmus) Sei $A = (a_{i,j}) \in M_{m,n}(K)$ eine Matrix. Dann gibt es Elementarmatrizen T_1, \dots, T_t , so dass $B = T_1 \cdots T_t A$ in reduzierter Zeilenstufenform ist. Wir nennen dann B eine **reduzierte Zeilenstufenform von A** . \square

Beweis. Falls $A = 0$, so ist A bereits in Zeilenstufenform und der Algorithmus stoppt.

Sei also $A \neq 0$. Man setze $A^{(0)} = (a_{i,j}^{(0)}) = A$. Sei $j_1 \in [1, n]$ definiert durch

$$j_1 = \min\{s \in [1, n] \mid \text{es gibt ein } p \in [1, m] \text{ mit } a_{p,s}^{(0)} \neq 0\}.$$

In Worten: wir suchen die erste Spalte die nicht nul ist und nennen j_1 sein Indiz. Sei $p \in [1, m]$ definiert durch

$$p = \min\{l \in [1, m] \mid a_{l,j_1}^{(0)} \neq 0\}.$$

In Worten: wir suchen, in der j_1 -te Spalte (die nicht nul ist), den erste Eintrag der nicht nul ist und nennen p sein Indiz. Wir setzen

$$C^{(0)} = (c_{i,j}^{(0)}) = D_1((a_{p,j_1}^{(0)})^{-1})E_{1,p}A^{(0)} \text{ und}$$

$$A^{(1)} = (a_{i,j}^{(1)}) = T_{m,1}(-c_{m,j_1}^{(0)}) \cdots T_{2,1}(-c_{2,j_1}^{(0)})C^{(0)}.$$

Man bemerkt, dass die erte Zeile von $C^{(0)}$ ist von der Form

$$\text{Erste Zeile von } C^{(0)}: (\underbrace{0 \cdots 0}_{j_1-1 \text{ Einträge}}, 1, *, \dots, *)$$

wobei die Sternchen für beliebige Elemente aus K stehen. Man bemerkt auch, dass die ersten $j_1 - 1$ Spalten von $A^{(1)}$ nul sind und die j_1 -te Spalte von $A^{(1)}$ von der folgenden Form ist:

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

Wir definieren induktiv Matrizen $A^{(k)} \in M_{m,n}(K)$ und natürliche Zahlen $j_1 < \dots < j_k$ wie folgt: Angenommen $A^{(k-1)} = (a_{i,j}^{(k-1)})$ und $j_1 < \dots < j_{k-1}$ sind bereits definiert für ein $k \geq 2$. Sei

$$j_k = \min\{s \in [j_{k-1} + 1, n] \mid \text{es gibt ein } p \in [k, m] \text{ mit } a_{p,s}^{(k-1)} \neq 0\}.$$

In Worten: wir suchen, in den letzten $m - k + 1$ Zeilen, die erste Spalte mit Indiz größer als j_{k-1} die nicht nul ist und nennen j_k sein Indiz. Wenn ein solches j_k nicht existiert sind alle Zeilen mit Indiz größer als $k - 1$ nul und der Algorithmus stoppt.

Angenommen j_k existiert. Sei $p \in [k, m]$ definiert durch

$$p = \min\{l \in [k, m] \mid a_{l,j_k}^{(k-1)} \neq 0\}.$$

In Worten: wir suchen, in den letzten $m - k + 1$ Zeilen und in der j_k -te Spalte (die nicht nul ist), den erste Eintrag der nicht nul ist und nennen p sein Indiz. Wir setzen

$$C^{(k-1)} = (c_{i,j}^{(k-1)}) = D_1((a_{p,j_k}^{(k-1)})^{-1})E_{k,p}A^{(0)} \text{ und } A^{(k)} = (a_{i,j}^{(k)}) \text{ mit}$$

$$A^{(k)} = T_{m,k}(-c_{m,j_k}^{(k-1)}) \cdots T_{k+1,k}(-c_{k+1,j_k}^{(k-1)})T_{k-1,k}(-c_{k-1,j_k}^{(k-1)}) \cdots T_{1,k}(-c_{1,j_k}^{(k-1)})C^{(k-1)}.$$

Man bemerkt, dass die $(m \times j_k)$ -Matrix, welche aus den ersten j_k Spalten von $A^{(k)}$ besteht, in reduzierter Zeilenstufenform ist.

Jetzt sieht man leicht, dass $A^{(k)}$, spätestens nach $k = \min(m, n)$ schritten, in reduzierter Zeilenstufenform ist. ■

Beispiel 8.7.4 Hier ist ein Beispiel vom Gauß-Algorithmus.

$$\begin{aligned} A^{(0)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 2 \\ 0 & 2 & 4 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} &\mapsto C^{(0)} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \mapsto A^{(1)} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \mapsto \\ &\mapsto C^{(1)} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \mapsto A^{(2)} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Bemerkung 8.7.5 Analog können wir die **reduzierte Spaltenstufenform** einer Matrix $A \in M_{m,n}(K)$ definieren. Die entsprechende Formulierung und Beweis des Gauß-Algorithmus ist eine Übungsaufgabe.

Definition 8.7.6 Sei $A \in M_{m,n}(K)$ eine Matrix. **Der Kern von A** ist die Teilmenge von K^n definiert durch

$$\text{Ker}(A) = \{v \in K^n \mid Av = 0\}.$$

Bemerkung 8.7.7 1. Sei $f : K^n \rightarrow K^m$ eine lineare Abbildung und seien \mathcal{B} und \mathcal{B}' die kanonische Basen von K^n und K^m . Sei $A = \text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}'}(f)$. Dann gilt

$$\text{Ker}(f) = \text{Ker}(A).$$

2. Sei $f : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung und seien $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$ und $\mathcal{B}' = (w_1, \dots, w_m)$ Basen von V und W . Sei $A = \text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}'}(f)$. Dann gilt

$$\text{Ker}(f) = \left\{ v = x_1 v_1 + \dots + x_n v_n \mid \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \in \text{Ker}(A) \right\}.$$

Lemma 8.7.8 Sei $B \in M_{m,n}(K)$ in Zeilenstufenform mit $\text{Zeilenform}(B) = \{j_1, \dots, j_r\}$. Für $j \in [1, n] \setminus \{j_1, \dots, j_r\}$ definieren wir

$$K_j^B = e_j - \sum_{i=1}^r b_{i,j} e_{j_i}$$

wobei (e_1, \dots, e_n) die kanonische Basis von K^n ist. Dann gilt $\text{Ker}(B) = \langle K_j^B, j \in [1, n] \setminus \{j_1, \dots, j_r\} \rangle$ und $\dim \text{Ker}(B) = n - r$. \square

Beweis. Dank einfache Matrixmultiplikationen kann man die Enthaltung $\langle K_j^B, j \in [1, n] \setminus \{j_1, \dots, j_r\} \rangle \subset \text{Ker}(B)$ einfach beweisen. Sei $U = \langle e_{j_1}, \dots, e_{j_r} \rangle$ und sei $u = x_1 e_{j_1} + \dots + x_r e_{j_r} \in U$. Es gilt

$$Bu = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_r \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

Daraus folgt, dass $u \in \text{Ker}(B) \cap U \Leftrightarrow u = 0$. Also gilt $U + \text{Ker}(B) = U \oplus \text{Ker}(B)$. Daraus folgt $\dim \text{Ker}(B) = \dim(U + \text{Ker}(B)) - \dim U = \dim(U + \text{Ker}(B)) - r \leq n - r$. Es genügt also zu zeigen, dass die Vektoren K_j^B für $j \in [1, n] \setminus \{j_1, \dots, j_r\}$ linear unabhängig sind.

Für $j \in [1, n] \setminus \{j_1, \dots, j_r\}$, sei $x_j \in K$ so dass

$$\sum_{j \in [1, n] \setminus \{j_1, \dots, j_r\}} x_j K_j^B = 0.$$

Dann gilt

$$0 = \sum_{j \in [1, n] \setminus \{j_1, \dots, j_r\}} \left(x_j e_j - \sum_{i=1}^r b_{i,j} e_{j_i} \right) = \sum_{j \in [1, n] \setminus \{j_1, \dots, j_r\}} x_j e_j - \sum_{j \in [1, n] \setminus \{j_1, \dots, j_r\}} \sum_{i=1}^r x_j b_{i,j} e_{j_i}.$$

Da die Elemente e_j für $j \in [1, n] \setminus \{j_1, \dots, j_r\}$ und e_{j_1}, \dots, e_{j_r} linear unabhängig sind gilt $x_j = 0$ für alle $j \in [1, n] \setminus \{j_1, \dots, j_r\}$. ■

Beispiel 8.7.9 Sei

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 1 & b_{1,3} & 0 & b_{1,5} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & b_{2,5} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \in M_{4,5}(K).$$

Es gilt Zeilenform = $\{j_1, j_2\} = \{2, 4\}$ und $[1, 5] \setminus \{2, 4\} = \{1, 3, 5\}$. Die Vektoren K_j^B sind

$$K_1^B = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad K_3^B = \begin{pmatrix} 0 \\ -b_{1,3} \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad K_5^B = \begin{pmatrix} 0 \\ -b_{1,5} \\ 0 \\ -b_{2,5} \\ 1 \end{pmatrix},$$

Lemma 8.7.10 Sei $A \in M_{m,n}(K)$ eine Matrix und sei E eine Elementarmatrix. Dann gilt $\text{Ker}(A) = \text{Ker}(EA)$. □

Beweis. Sei $v \in \text{Ker}(A)$, dann gilt $Av = 0$ und $EAv = E0 = 0$. Umgekehrt, sei $v \in \text{Ker}(EA)$, dann gilt $EAv = 0$. Aber E ist invertierbar, es gilt also $Av = E^{-1}EAv = E^{-1}0 = 0$. ■

Korollar 8.7.11 Sei $A \in M_{m,n}(K)$ eine Matrix und sei B die reduzierte Zeilenstufenform von A . Dann gilt $\text{Ker}(A) = \text{Ker}(B)$.

Korollar 8.7.12 Sei $A \in M_{m,n}(K)$ eine Matrix und sei B eine reduzierte Zeilenstufenform von A mit $\text{Zeilenform}(B) = \{j_1, \dots, j_r\}$, dann gilt $\text{Rg}(A) = \text{Rg}(B) = r$.

Beweis. Es gilt $\text{Rg}(A) = n - \dim \text{Ker}(A) = n - \dim \text{Ker}(B) = n - (n - r) = r$. ■

Bemerkung 8.7.13 Der Gauß-Algorithmus liefert ein explizites Verfahren zur Konstruktion einer Basis von $\text{Ker}(A)$.

Satz 8.7.14 Sei $A \in M_{m,n}(K)$ eine Matrix. Dann gibt es genau eine reduzierte Zeilenstufenform B von A . \square

Beweis. Die Existenz ist bereits durch den Gauß-Algorithmus bewiesen. Es bleibt zu zeigen, dass B eindeutig ist. Seien B, B' reduzierte Zeilenstufenformen der Matrix A . Wir zeigen $B = B'$.

Es gilt $\text{Zeilenform}(B) = \text{Zeilenform}(B')$ genau dann wenn $\text{Ker}(B) = \text{Ker}(B')$. Wegen $\text{Ker}(B) = \text{Ker}(A) = \text{Ker}(B')$ gilt also $\text{Zeilenform}(B) = \text{Zeilenform}(B')$ genau dann, wenn $\text{Rg}(B) = \text{Rg}(B')$. In diesem Fall folgt sofort $B = B' = 0$.

Wir nehmen an, dass $\text{Zeilenform}(B)$ und $\text{Zeilenform}(B')$ nicht leer sind. Wir schreiben $\text{Zeilenform}(B) = \{j_1, \dots, j_r\}$ und $\text{Zeilenform}(B') = \{j'_1, \dots, j'_t\}$ mit $r, t \geq 1$. Es gilt $r = \text{Rg}(B) = \text{Rg}(A) = \text{Rg}(B') = t$.

Schritt 1: Angenommen $j_1 < j'_1$. Dann gilt $B'(e_{j_1}) = 0$ und $B(e_{j_1}) = e_1 \neq 0$. Ein Widerspruch mit $\text{Ker}(B) = \text{Ker}(A) = \text{Ker}(B')$. Also gilt $j_1 \geq j'_1$. Der Fall $j_1 > j'_1$ wird analog behandelt. Also es gilt $j_1 = j'_1$.

Schritt 2: Sei $P > j_1$ mit der eigenschaft: Für $k \in [1, p-1]$ ist die k -te Spalte von B gleich der k -ten Spalte von B' . Wir werden zeigen, dass dann auch die p -te Spalte von B gleich der p -ten Spalte von B' ist. Damit hätten wir dann per Induktion bewiesen, dass $B = B'$ gilt.

Sei $1 \leq s-1 \leq r$ maximal mit $j_1 < \dots < j_{s-1} < p$. Wir haben $j_k = j'_k$ für alle $1 \leq k \leq s-1$. Falls $s-1 < r$ haben wir auch $p \leq j_s$ und $p \leq j'_s$.

Fall I: $p \notin \text{Zeilenform}(B)$ und $p \notin \text{Zeilenform}(B')$. Seien $B = (b_{i,j})$ und $B' = (b'_{i,j})$. Dann gilt

$$B(K_p^B) = \begin{pmatrix} -b_{1,p} + b_{1,p} \\ -b_{2,p} + b_{2,p} \\ \vdots \\ -b_{m,p} + b_{m,p} \end{pmatrix} = 0$$

und wegen $\text{Ker}(B) = \text{Ker}(B')$ gilt

$$B'(K_p^B) = \begin{pmatrix} -b_{1,p} + b'_{1,p} \\ -b_{2,p} + b'_{2,p} \\ \vdots \\ -b_{m,p} + b'_{m,p} \end{pmatrix} = 0.$$

Daraus folgt $b_{i,p} = b'_{i,p}$ für alle $i \in [1, m]$.

Fall II: Sei $s-1 < r$ und $p = j_s = j'_s$. Dann sind die p -ten Spalten von B und B' gleich e_s , stimmen also überein.

Fall III: Sei $s-1 < r$ und $p = j_s < j'_s$. Es folgt $B'(K_p^{B'}) = 0$ aber $B(L_p^{B'}) = e_s - \sum_{k=1}^{s-1} b'_{k,p} e_k \neq 0$ (weil (e_1, \dots, e_s) linear unabhängig ist). Widerspruch zu $\text{Ker}(B) = \text{Ker}(B')$.

Der Fall Sei $s - 1 < r$ und $p = j'_s < j_s$ wird analog zu Fall III bewiesen. ■

8.8 Invertierbare Matrizen

Definition 8.8.1 Eine Matrix $A \in M_n(K)$ heißt **invertierbar** wenn es eine Matrix $B \in M_n(K)$ gibt mit $AB = BA = I_n$.

Lemma 8.8.2 Sei A eine invertierbare Matrix, dann ist die Matrix $B \in M_n(K)$ mit $AB = BA = I_n$ eindeutig bestimmt. Man schreibt $B = A^{-1}$. □

Beweis. Seien B und C zwei Matrizen mit $AB = BA = I_n$ und $AC = CA = I_n$. Dann gilt $C = CI_n = C(AB) = (CA)B = I_n B = B$. ■

Lemma 8.8.3 Sei $A \in M_n(K)$ und sei $f \in \text{Hom}(K^n, K^n)$ mit $\text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}}(f) = A$. Dann ist A invertierbar genau dann, wenn f bijektiv ist. In diesem Fall gilt $A^{-1} = \text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}}(f^{-1})$. □

Beweis. Angenommen, dass f bijektiv ist. Wir setzen $B = \text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}}(f^{-1})$, es gilt $AB = \text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}}(f \circ f^{-1}) = \text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}}(\text{Id}) = I_n$ und $BA = \text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}}(f^{-1} \circ f) = \text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}}(\text{Id}) = I_n$. Dies zeigt auch die letzte Aussage.

Angenommen, dass A invertierbar ist. Wir definieren $g \in \text{Hom}(K^n, K^n)$ mit $A^{-1} = \text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}}(g)$, es gilt $\text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}}(f \circ g) = AB = I_n = \text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}}(\text{Id})$ und $\text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}}(g \circ f) = BA = I_n = \text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}}(\text{Id})$. Es gilt also $f \circ g = \text{Id} = g \circ f$ und f ist bijektiv mit g als Umkehrabbildung. ■

Definition 8.8.4 1. Eine Matrix $A \in M_n(K)$ heißt **linksinvertierbar**, wenn es eine Matrix $B \in M_n(K)$ gibt mit $BA = I_n$.

2. Eine Matrix $A \in M_n(K)$ heißt **rechtsinvertierbar**, wenn es eine Matrix $B \in M_n(K)$ gibt mit $AB = I_n$.

Lemma 8.8.5 Sei $A \in M_n(K)$. Die folgenden Eigenschaften sind äquivalent:

1. A ist invertierbar,
2. A ist linksinvertierbar,
3. A ist rechtsinvertierbar.

Wenn diese Eigenschaften erfüllt sind, sind alle Matrizen $B, C \in M_n(K)$ mit $BA = I_n$ oder $AC = I_n$ gleich A^{-1} . □

Beweis. $(1 \Rightarrow 2)$ ist klar.

$(2 \Rightarrow 1)$ Sei $B \in M_n(K)$ mit $BA = I_n$. Sei \mathcal{B} die kanonische Basis von K^n und seien $f, g \in \text{hom}(K^n, K^n)$ mit $\text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}}(f) = A$ und $\text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}}(g) = B$. Es gilt

$$\text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}}(g \circ f) = \text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}}(g)\text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}}(f) = BA = I_n = \text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}}(\text{Id}_{K^n}).$$

Es gilt also $g \circ f = \text{Id}_{K^n}$. Wir zeigen, dass f injektiv ist. Sei $v \in \text{Ker}(f)$. Es gilt $v = g(f(v)) = g(0) = 0$. Daraus folgt, dass $\text{Ker}(f) = 0$ und f ist injektiv. Weil $f : K^n \rightarrow K^n$ linear ist, ist f eine Bijektion. Nach dem obigen Lemma ist A invertierbar.

Wir zeigen, dass $B = A^{-1}$. Sei f^{-1} die Umkehrabbildung, es gilt $\text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}}(f^{-1}) = A^{-1}$. Sei $v \in K^n$. Es gilt $f(f^{-1}(v)) = v$. Daraus folgt $g(v) = g(f(f^{-1}(v))) = f^{-1}(v)$ also $g = f^{-1}$ und $B = A^{-1}$.

$(1 \Rightarrow 3)$ ist klar.

$(3 \Rightarrow 1)$ Sei $B \in M_n(K)$ mit $AB = I_n$. Sei \mathcal{B} die kanonische Basis von K^n und seien $f, g \in \text{hom}(K^n, K^n)$ mit $\text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}}(f) = A$ und $\text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}}(g) = B$. Es gilt

$$\text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}}(f \circ g) = \text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}}(f)\text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}}(g) = AB = I_n = \text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}}(\text{Id}_{K^n}).$$

Es gilt also $f \circ g = \text{Id}_{K^n}$. Wir zeigen, dass f surjektiv ist. Sei $v \in K^n$. Es gilt $v = f(g(v))$. Daraus folgt, dass f injektiv ist. Weil $f : K^n \rightarrow K^n$ linear ist, ist f eine Bijektion. Nach dem obigen Lemma ist A invertierbar.

Wir zeigen, dass $B = A^{-1}$. Sei f^{-1} die Umkehrabbildung, es gilt $\text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}}(f^{-1}) = A^{-1}$. Sei $v \in K^n$. Es gilt $f^{-1}(v) = f^{-1}(f(g(v))) = (f \circ f^{-1})(g(v)) = g(v)$. Daraus folgt $g(v) = f^{-1}(v)$ also $g = f^{-1}$ und $B = A^{-1}$. ■

Definition 8.8.6 Die Teilmenge $\text{GL}_n(K)$ von $M_n(K)$ definiert durch

$$\text{GL}_n(K) = \{A \in M_n(K) \mid A \text{ ist invertierbar}\}$$

heißt die allgemeine lineare Gruppe.

Lemma 8.8.7 $(\text{GL}_n(K), \cdot)$, wobei \cdot die Matrixmultiplikation ist, ist eine Gruppe. □

Beweis. Übung. ■

Als Korollar vom Gauß-Algorithmus erhalten wir ein Algorithmus um das Inverse einer Matrix zu berechnen.

Satz 8.8.8 Eine Matrix A ist invertierbar genau dann, wenn es elementare Matrizen T_1, \dots, T_t gibt mit $T_t \cdots T_1 A = I_n$. □

Beweis. Wenn es elementare Matrizen T_1, \dots, T_t mit $T_t \cdots T_1 A = I_n$ gibt dann gibt es $B = T_t \cdots T_1$ mit $BA = I_n$ und A ist invertierbar.

Umgekehrt, wenn A invertierbar ist, dann gibt es elementare Matrizen T_1, \dots, T_t so dass $T_t \cdots T_1 A$ in reduzierte Zeilenstufenform ist. Es folgt $r = n$ weil sonst ist $\text{Ker}(A)$ nicht trivial. Also gilt $T_t \cdots T_1 A = I_n$. ■

Korollar 8.8.9 (Praktische Berechnung von A^{-1}) Sei $A \in M_n(K)$ invertierbar. Der Gauß-Algorithmus liefert elementare Matrizen T_1, \dots, T_t mit $T_t \cdots T_1 A = I_n$. Dann gilt

$$A^{-1} = T_t \cdots T_1.$$

8.9 Duale Abbildung

Definition 8.9.1 Sei $A \in M_{m,n}(K)$ eine Matrix mit

$$A = \begin{pmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m,1} & \cdots & a_{m,n} \end{pmatrix}.$$

Die **Transponierte Matrix von A** ist die Matrix $A^T \in M_{n,m}(K)$ gegeben durch

$$A^T = \begin{pmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{m,1} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{1,n} & \cdots & a_{m,n} \end{pmatrix}.$$

Satz 8.9.2 Sei $f : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung und seien $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$ und $\mathcal{B}' = (w_1, \dots, w_m)$ Basen von V und W . Sei $A = \text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}(f)$ und seien $\mathcal{B}^\vee = (v_1^\vee, \dots, v_n^\vee)$ und $\mathcal{B}'^\vee = (w_1^\vee, \dots, w_m^\vee)$, dann gilt

$$A^T = \text{Mat}_{\mathcal{B}'^\vee, \mathcal{B}^\vee}(f^\vee).$$

Beweis. Wir schreiben $A = (a_{i,j})$. Sei w_j^\vee ein Basisvektor von W^\vee . Wir schreiben $f^\vee(w_j^\vee)$ als lineare Kombination von $(e_1^\vee, \dots, v_n^\vee)$:

$$f^\vee(w_j^\vee) = \sum_{k=1}^n x_k e_k^\vee.$$

Es gilt

$$f^\vee(w_j^\vee)(v_i) = \sum_{k=1}^n x_k e_k^\vee(v_i) = x_i.$$

Es gilt auch

$$f^\vee(w_j^\vee)(v_i) = w_j^\vee \circ f(v_i) = w_j^\vee(f(v_i)) = w_j^\vee\left(\sum_{k=1}^m a_{k,i} w_k\right) = a_{j,i}.$$

Daraus folgt:

$$f^\vee(w_j^\vee) = \sum_{k=1}^n a_{j,k} e_k^\vee.$$

und die Gleichung

$$A^T = \begin{pmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{m,1} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{1,n} & \cdots & a_{m,n} \end{pmatrix}.$$

Definition 8.9.3 Sei $A \in M_{m,n}(K)$ eine Matrix.

1. Der **Zeilenrang** $\text{Rg}_z(A)$ von A ist die Dimension des Unterraums von K^n , welcher von den Zeilen von A erzeugt ist.
2. Der **Spaltenrang** $\text{Rg}_s(A)$ von A ist die Dimension des Unterraums von K^m , welcher von den Spalten von A erzeugt ist.

Lemma 8.9.4 Es gilt $\text{Rg}(A) = \text{Rg}_s(A)$. □

Beweis. Es gilt $\text{Rg}(A) = \dim \text{Im}(A) = \dim \langle A(e_1), \dots, A(e_n) \rangle$ wobei (e_1, \dots, e_n) die kanonische Basis von K^n ist. Aber $A(e_1), \dots, A(e_n)$ sind die Spalten von A und es folgt $\text{Rg}(A) = \text{Rg}_s(A)$. ■

Korollar 8.9.5 Es gilt $\text{Rg}_s(A) = \text{Rg}(A) = \text{Rg}_z(A)$.

Beweis. Sei \mathcal{B} die kanonische Basis von K^n und \mathcal{B}' die kanonische Basis von K^m . Sei $f \in \text{hom}(K^n, K^m)$ mit $\text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}(f) = A$. Es gilt $\text{Rg}(f) = \text{Rg}(A) = \text{Rg}_s(A)$.

Es gilt auch $A^T = \text{Mat}_{\mathcal{B}^\vee, \mathcal{B}'^\vee}(f^\vee)$ und $\text{Rg}(f^\vee) = \text{Rg}(A^T) = \text{Rg}_s(A^T)$. Aber die Spalten von A^T sind die Zeilen von A also gilt $\text{Rg}_s(A^T) = \text{Rang}_z(A)$. Wir haben auch gesehen, dass $\text{Rg}(f^\vee) = \text{Rg}(f)$. Daraus folgt $\text{Rg}_s(A) = \text{Rg}(A) = \text{Rg}(f) = \text{Rg}(f^\vee) = \text{Rg}(A^T) = \text{Rg}_s(A^T) = \text{Rg}_z(A)$. ■

9 Linear Gleichungssysteme

9.1 Definition

Definition 9.1.1 Ein **lineares Gleichungssystem (LGS)** besteht aus m Gleichungen der Form

$$(\star) \quad \begin{cases} a_{1,1}X_1 + a_{1,2}X_2 + \cdots + a_{1,n}X_n = b_1 \\ a_{2,1}X_1 + a_{2,2}X_2 + \cdots + a_{2,n}X_n = b_2 \\ \vdots \\ a_{m,1}X_1 + a_{m,2}X_2 + \cdots + a_{m,n}X_n = b_m \end{cases}$$

wobei X_1, \dots, X_n **Variablen** oder **Unbekannte** genannt werden und $a_{i,j}$ und b_j Skalare aus K sind.

Ein Vektor

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

ist eine **Lösung von** (\star) , falls gilt

$$\begin{cases} a_{1,1}v_1 + a_{1,2}v_2 + \cdots + a_{1,n}v_n = b_1 \\ a_{2,1}v_1 + a_{2,2}v_2 + \cdots + a_{2,n}v_n = b_2 \\ \vdots \\ a_{m,1}v_1 + a_{m,2}v_2 + \cdots + a_{m,n}v_n = b_m. \end{cases}$$

Eine Kurzschreibungsweise für (\star) ist $AX = b$ wobei

$$A = \begin{pmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m,1} & \cdots & a_{m,n} \end{pmatrix}$$

die **Koeffizientenmatrix von** (\star) und

$$b = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}$$

ist.

Das lineare Gleichungssystem $AX = b$ heißt **homogen** falls $b = 0$ und **inhomogen** falls $b \neq 0$. Die Matrix

$$[A|b] = \begin{pmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,n} & b_1 \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ a_{m,1} & \cdots & a_{m,n} & b_m \end{pmatrix}$$

ist die **erweiterte Koeffizientenmatrix von (\star)** .

Die **Lösungsmenge** $L(A, b)$ des lineares Gleichungssystemy (\star) ist definiert als

$$L(A, b) = \{v \in K^n \mid v \text{ ist eine Lösung von } (\star)\}.$$

Lemma 9.1.2 Es gilt

$$L(A, b) = \{v \in K^n \mid Av = b\} = A^{-1}(b).$$

Beweis. Übung. ■

Definition 9.1.3 Sei $AX = b$ ein lineares Gleichungssystem.

1. Das Gleichungssystem $AX = b$ ist **lösbar** falls $L(A, b) \neq \emptyset$.
2. Das Gleichungssystem $AX = b$ ist **eindeutig lösbar** falls $L(A, b)$ einelementig ist.
3. Das Gleichungssystem $AX = b$ ist **unlösbar** falls $L(A, b) = \emptyset$.

9.2 Lösung Verfahren

Lemma 9.2.1 Sei T eine Elementarmatrix, und sei $[A'|b'] = T \cdot [A|b]$. Dann gilt $L(A, b) = L(A', b')$. □

Bemerkung 9.2.2 Für $[A'|b'] = T \cdot [A|b]$ gilt es $A' = TA$ und $b' = TAb$.

Beweis. Sei $v \in L(A, b)$. Dann gilt $Av = b$. Es gilt also $TA v = T b$ i.e. $A'v = b'$ und $v \in L(A', b')$. Umgekehrt, sei $v \in L(A', b')$. Dann gilt $A'v = b'$ i.e. $TA v = T b$. Aber T ist invertiert bar. Nach Multiplikation mit T^{-1} gilt $Av = b$ und $v \in L(A, b)$. ■

Dank dem Gauß-Algorithmus können wir A mit B in reduzierter Zeilenstufenform ersetzen i.e. es gibt Elementarmatrizen T_1, \dots, T_t mit $T_t \cdots T_1 A = B$ wobei B die Zeilenstufenform von A ist. Es gilt

$$L(A, b) = L(B, T_t \cdots T_1 b).$$

Satz 9.2.3 Sei $AX = b$ ein lineares Gleichungssystem mit A in reduzierter Zeilenstufenform und sei $r = \text{Rg}(A)$.

1. Falls $b_k \neq 0$ für ein $k \in [r+1, m]$, dann gilt $L(A, b) = \emptyset$.
2. Falls $b_k = 0$ für alle $k \in [r+1, m]$, sei

$$v = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

in K^n definiert durch

$$x_k = \begin{cases} b_s & \text{falls } k = j_s \text{ für ein } s \in [1, r] \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$$

Dann gilt $L(A, b) = v + L(A, 0) = v + \text{Ker}(A) = \{v + v' \mid v' \in \text{Ker}(A)\}$. □

Beweis. 1. Sei $w \in K^m$ mit $w = Av$ für ein $v \in K^n$. Wir schreiben

$$w = \begin{pmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_m \end{pmatrix}.$$

Dann gilt $w_{r+1} = \dots = w_m = 0$. Also gilt 1.

2. Es gilt $Av = b$. Sei $v' \in \text{Ker}(A)$, dann gilt $A(v + v') = Av + Av' = b + 0 = b$. Daraus folgt $v + \text{Ker}(A) \subset L(A, b)$. Umgekehrt, sei $v'' \in L(A, b)$, dann gilt $Av'' = b$ und $A(v'' - v) = Av'' - Av = b - b = 0$. Es gilt $v'' - v = v' \in \text{Ker}(A)$ und $v'' = v + v' \in v + \text{Ker}(A)$. ■

Korollar 9.2.4 Sei $A \in M_{m,n}(K)$ in reduzierter Zeilenstufenform mit Zeileform(A) + $\{j_1, \dots, j_k\}$ und sei $b \in K^m$. Dann sind äquivalent:

- Das lineare Gleichungssystem $AX = b$ ist lösbar.
- $L(A, b) \neq \emptyset$
- $b_{r+1} = \dots = b_m = 0$.

Korollar 9.2.5 Sei $A \in M_{m,n}(K)$ in reduzierter Zeilenstufenform mit Zeileform(A) + $\{j_1, \dots, j_k\}$ und sei $b \in K^m$. Dann sind äquivalent:

- Das lineare Gleichungssystem $AX = b$ ist eindeutig lösbar.
- $b_{r+1} = \dots = b_m = 0$ und $\text{Ker}(A) = 0$.

9.3 Ein Beispiel

Sei $K = \mathbb{R}$ und sei

$$[A|b] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 2 & 4 & -6 & 1 & -1 & 0 \\ 2 & 1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 0 & -2 & 2 & 1 & 1 & 6 \\ 4 & 2 & 0 & -4 & 4 & 1 & 1 & 8 \\ 2 & 1 & 0 & -2 & 2 & -3 & 1 & -6 \end{pmatrix}$$

Der Gauß-Algorithmus liefert

$$[B|c] = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{2} & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ & & 1 & 2 & -3 & 0 & 0 & -1 \\ & & & & & 1 & 0 & 3 \\ & & & & & & 1 & 1 \\ & & & & & & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

wobei B in Zeilestufenform ist. An der letzten Spalte von $[B|c]$ sieht man bereits, dass das lineare Gleichungssystem $AX = b$ lösbar ist. Es gilt

$$\text{Zeilenform}(B) = \{1, 3, 6, 7\}$$

und

$$K_2^B = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad K_4^B = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -2 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad K_5^B = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 3 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Es gilt also $L(A, 0) = \text{Ker}(A) = \text{Ker}(B) = \{a_2 K_2^B + a_4 K_4^B + a_5 K_5^B \mid a_2, a_4, a_5 \in K\}$. Für

$$v = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Dann gilt $Bv = c$ also gilt

$$L(A, b) = v + L(A, 0).$$

10 Basis Wechsel

Frage 10.0.1 Sei $f : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung. Seien \mathcal{B}, \mathcal{C} Basen von V und seien $\mathcal{B}', \mathcal{C}'$ Basen von W . Welcher Zusammenhang besteht zwischen $\text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}(f)$ und $\text{Mat}_{\mathcal{C}, \mathcal{C}'}(f)$?

10.1 Koordinaten Abbildungen

Sei V ein endlich-dimensionaler Vektorraum mit $\dim V = n$.

Definition 10.1.1 Sei $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$ eine Basis und sei (e_1, \dots, e_n) die kanonische Basis von K^n . Sei

$$c_{\mathcal{B}} : V \rightarrow K^n$$

die lineare Abbildung definiert durch $c_{\mathcal{B}}(v_i) = e_i$. Die lineare Abbildung $c_{\mathcal{B}}$ heißt **Koordinatenabbildung von V bzgl. \mathcal{B}** . Für $v \in V$ ist $c_{\mathcal{B}}(v)$ der **Koordinatenvektor von v bzgl. \mathcal{B}** .

Bemerkung 10.1.2 Sei $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$ eine Basis und $v \in V$. Man schreibt

$$v = x_1 v_1 + \dots + x_n v_n.$$

Es gilt

$$c_{\mathcal{B}}(v) = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}.$$

Lemma 10.1.3 Die Abbildung $c_{\mathcal{B}} : V \rightarrow K^n$ ist ein Isomorphismus. □

Beweis. Das Bild von der Basis $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$ ist die Basis (e_1, \dots, e_n) . Also ist $c_{\mathcal{B}}$ ein Isomorphismus. ■

Beispiel 10.1.4 1. Sei $V = K^3$ mit $\mathcal{B} = (e_1, e_2, e_3)$ die kanonische Basis. Dann gilt

$$c_{\mathcal{B}} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}.$$

Die Abbildung $c_{\mathcal{B}}$ ist die Identitätsabbildung.

2. Sei $V = K^3$ und sei $\mathcal{B} = (e_3, e_1 + e_3, e_2)$. Dann gilt

$$c_{\mathcal{B}} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_3 - x_1 \\ x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}.$$

Lemma 10.1.5 Seien $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$ eine Basis von V und $\mathcal{B}' = (w_1, \dots, w_m)$ eine Basis von W . Sei $f : V \rightarrow W$ linear und sei $A = \text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}(f)$. Dann ist das folgende Diagramm kommutativ

$$\begin{array}{ccc} V & \xrightarrow{f} & W \\ c_{\mathcal{B}} \downarrow & & \downarrow c_{\mathcal{B}'} \\ K^n & \xrightarrow{A} & K^m \end{array}$$

i. e. $c_{\mathcal{B}'} \circ f = A \circ c_{\mathcal{B}}$. □

Beweis. Wir schreiben

$$f(v_j) = \sum_{i=1}^m a_{i,j} w_i.$$

Es gilt

$$A(e_j) = \begin{pmatrix} a_{1,j} \\ \vdots \\ a_{m,j} \end{pmatrix}.$$

Es gilt also

$$(c_{\mathcal{B}'} \circ f)(v_j) = c_{\mathcal{B}'} \left(\sum_{i=1}^m a_{i,j} w_i \right) = \sum_{i=1}^m a_{i,j} c_{\mathcal{B}'}(w_i) = \sum_{i=1}^m a_{i,j} e_i = \begin{pmatrix} a_{1,j} \\ \vdots \\ a_{m,j} \end{pmatrix}$$

und

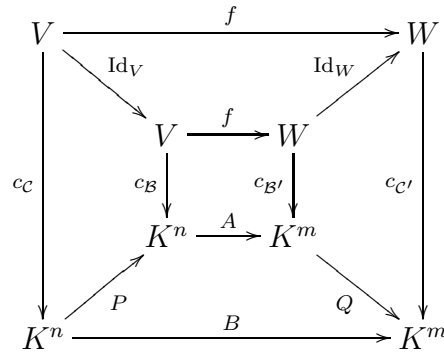
$$(A \circ c_{\mathcal{B}})(v_j) = A(e_j) = \begin{pmatrix} a_{1,j} \\ \vdots \\ a_{m,j} \end{pmatrix}.$$

Es gilt also $(c_{\mathcal{B}'} \circ f)(v_j) = (A \circ c_{\mathcal{B}})(v_j)$ für alle j und es folgt $c_{\mathcal{B}'} \circ f = A \circ c_{\mathcal{B}}$. ■

10.2 Basiswechsel

Satz 10.2.1 Sei $f : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung. Seien \mathcal{B}, \mathcal{C} Basen von V und seien $\mathcal{B}', \mathcal{C}'$ Basen von W . Sei $A = \text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}(f)$ und $B = \text{Mat}_{\mathcal{C}, \mathcal{C}'}(f)$. Dann ist das

folgende Diagramm kommutativ:



i. e. $B = QAP$ wobei $P = \text{Mat}_{\mathcal{C},\mathcal{B}}(\text{Id}_V)$ und $Q = \text{Mat}_{\mathcal{B}',\mathcal{C}'}(\text{Id}_W)$. \square

Beweis. Es gilt $c_{\mathcal{B}'} \circ f = c_{\mathcal{B}} \circ A$. Die Abbildung $c_{\mathcal{B}'}$ ist bijektiv. Es gilt also $f = c_{\mathcal{B}'}^{-1} \circ A \circ c_{\mathcal{B}}$. Es gilt auch $f = c_{\mathcal{C}'}^{-1} \circ B \circ c_{\mathcal{C}}$. Daraus folgt

$$B = c_{\mathcal{C}'} \circ c_{\mathcal{B}'}^{-1} \circ A \circ c_{\mathcal{B}} \circ c_{\mathcal{C}}^{-1}.$$

Für Id_V und Id_W gilt es auch $\text{Id}_V = c_{\mathcal{B}}^{-1} \circ \text{Mat}_{\mathcal{C},\mathcal{B}}(\text{Id}_V) \circ c_{\mathcal{C}} = c_{\mathcal{B}}^{-1} \circ P \circ c_{\mathcal{C}}$ und $\text{Id}_W = c_{\mathcal{C}'}^{-1} \circ \text{Mat}_{\mathcal{B}',\mathcal{C}'}(\text{Id}_W) \circ c_{\mathcal{B}'} = c_{\mathcal{C}'}^{-1} \circ Q \circ c_{\mathcal{B}'}$. Daraus folgt

$$P = c_{\mathcal{B}} \circ c_{\mathcal{C}}^{-1} \text{ und } Q = c_{\mathcal{C}'} \circ c_{\mathcal{B}'}^{-1}.$$

Es folgt $B = QAP$. \blacksquare

Definition 10.2.2 Seien \mathcal{B} und \mathcal{C} zwei Basen von V . Die Matrix $\text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{C}}(\text{Id}_V)$ heißt Basiswechselmatrix von \mathcal{B} nach \mathcal{C} .

Korollar 10.2.3 Es gilt $\text{Mat}_{\mathcal{C},\mathcal{C}'}(f) = \text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{C}'}(\text{Id}_W) \text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}'}(f) \text{Mat}_{\mathcal{C},\mathcal{B}}(\text{Id}_V)$.

Korollar 10.2.4 Es gilt $\text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{C}}(\text{Id}_V) = \text{Mat}_{\mathcal{C},\mathcal{B}}(\text{Id}_V)^{-1}$.

Beweis. Sei $V = W$, $\mathcal{B} = \mathcal{B}'$, $\mathcal{C} = \mathcal{C}'$ und $f = \text{Id}_V$. Dann gilt

$$I_n = \text{Mat}_{\mathcal{C},\mathcal{C}}(\text{Id}_V) = \text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{C}}(\text{Id}_V) \text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}}(\text{Id}_V) \text{Mat}_{\mathcal{C},\mathcal{B}}(\text{Id}_V) = \text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{C}}(\text{Id}_V) \text{Mat}_{\mathcal{C},\mathcal{B}}(\text{Id}_V).$$

Daraus folgt $\text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{C}}(\text{Id}_V) = \text{Mat}_{\mathcal{C},\mathcal{B}}(\text{Id}_V)^{-1}$. \blacksquare

10.3 Berechnung von $\text{Mat}_{\mathcal{C},\mathcal{B}}(\text{Id}_V)$ für $V = K^n$

Seien $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$ und $\mathcal{C} = (v'_1, \dots, v'_n)$ Basen von $V = K^n$. Wir definieren die Matrix $A \in M_{n,n}(K)$ durch

$$A = [v_1 | \dots | v_n | v'_1 | \dots | v'_n]$$

Die Matrix A ist die Matrix, welche die Vektoren v_1, \dots, v_n und v'_1, \dots, v'_n als Spalten hat.

Satz 10.3.1 Sei B die reduzierte Zeilenstufenform von A . Dann hat B der Form

$$B = [I_n | C]$$

wobei $C \in M_n(K)$. Es gilt $C = \text{Mat}_{\mathcal{C}, \mathcal{B}}(\text{Id}_V)$. \square

Beweis. Wir haben $L(A, 0) = L(B, 0) = \text{Ker}(B)$. Wir schreiben $C = (c_{i,j})$. Wir haben eine Basis vom $\text{Ker}(B)$ gegeben durch

$$K_{n+i}^B = (-c_{1,i}, \dots, -c_{n,i}, 0, \dots, 1, 0, \dots, 0)^T$$

wobei die 1 an der $(n+i)$ -ten Stelle steht und wobei $i \in [1, n]$. Es gilt $BK_{n+i}^B = 0$ also $AK_{n+i}^B = 0$, i, e ,

$$v'_j = \sum_{i=1}^n c_{i,j} v_i.$$

Daraus folgt $C = \text{Mat}_{\mathcal{C}, \mathcal{B}}(\text{Id}_V)$. \blacksquare

Beispiel 10.3.2 Sei

$$\mathcal{B} = \left(\begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right) \text{ und } \left(\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right)$$

Basen von \mathbb{R}^2 . Wir schreiben

$$A = [v_1 | v_2 | v'_1 | v'_2] = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Dan gilt

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} = [I_2 | C].$$

Also

$$C = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} = \text{Mat}_{\mathcal{C}, \mathcal{B}}(\text{Id}_V).$$

Beispiel 10.3.3 Sei $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3$ definiert durch

$$f \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 + x_2 \\ 2x_3 - x_1 \end{pmatrix}.$$

Seien $\mathcal{B} = (e_1, e_2, e_3)$ und $\mathcal{B}' = (e_1, e_2)$ die kanonische Basen von \mathbb{R}^3 bzw. \mathbb{R}^2 . Dann ist

$$A = \text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}(f) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 2 \end{pmatrix}.$$

Seien

$$\mathcal{C} = \left(\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right) \text{ und } \mathcal{C}' = \left(\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right)$$

Basen von \mathbb{R}^3 bzg. \mathbb{R}^2 . Dann ist

$$\text{Mat}_{\mathcal{C},\mathcal{B}}(\text{Id}_{\mathbb{R}^3}) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{C}'}(\text{Id}_{\mathbb{R}^2}) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

und $B = \text{Mat}_{\mathcal{C},\mathcal{C}'}(f) = \text{Mat}_{\mathcal{B}',\mathcal{C}'}(\text{Id}_{\mathbb{R}^2})\text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}'}(f)\text{Mat}_{\mathcal{C},\mathcal{B}}(\text{Id}_{\mathbb{R}^3})$ also

$$B = \text{Mat}_{\mathcal{C},\mathcal{C}'}(f) = \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -4 & -1 & -2 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}.$$

Es gilt

$$B \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -4 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Mit anderen Worten $f(v'_1) = -4w'_1 + w'_2$ also

$$f \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} = -4 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

11 Normalformenprobleme

11.1 Äquivalenz von Matrizen

Definition 11.1.1 1. Seien $A, B \in M_{m,n}(K)$. Dann sind A und B **äquivalent**, falls es $P \in \text{GL}_n(K)$ und $Q \in \text{GL}_m(K)$ gibt mit

$$B = QAP.$$

In diesem Fall schreiben wir $A \sim B$.

2. Sei R die Relation $R = \{(A, B) \in M_{m,n}(K) \mid A \sim B\}$.

Lemma 11.1.2 Die Relation R ist eine Äquivalenzrelation. □

Beweis. Übung. ■

Satz 11.1.3 Seien $A, B \in M_{m,n}(K)$. Die folgende Aussage sind äquivalent:

1. $A \sim B$.

2. $\text{Rg}(A) = \text{Rg}(B)$. □

Beweis. (1. \Rightarrow 2.) Angenommen $A \sim B$. Dann existieren invertierbare Matrizen P und Q mit $B = QAP$. Wir zeigen, dass $f : \text{Im}(A) \rightarrow \text{Im}(B)$, $v \mapsto Qv$ wohl definiert ist *i.e.*, dass für $v \in \text{Im}(A)$ gilt $Qv \in \text{Im}(B)$. Für $v \in \text{Im}(A)$, gibt es ein $v' \in K^n$ mit $v = Av'$. Für $v'' = P^{-1}v'$ gilt $v = Av' = APP^{-1}v''$. Also gilt $Qv = QAPP^{-1}v'' = BP^{-1}v'' \in \text{Im}(B)$.

Wir zeigen, dass $g : \text{Im}(B) \rightarrow \text{Im}(A)$, $v \mapsto Q^{-1}v$ wohl definiert ist *i.e.*, dass für $v \in \text{Im}(B)$ gilt $Q^{-1}v \in \text{Im}(A)$. Für $v \in \text{Im}(B)$, gibt es ein $v' \in K^n$ mit $v = Bv'$. Es gilt $Q^{-1}v = Q^{-1}Bv' = Q^{-1}QAPv'' = APv'' \in \text{Im}(A)$.

Die Abbildungen f und g sind linear. Es gilt $f \circ g = \text{Id}_{\text{Im}(B)}$ und $g \circ f = \text{Id}_{\text{Im}(A)}$ also f und g sind Isomorphismen. Es gilt $\text{Rg}(A) = \dim \text{Im}(A) = \dim \text{Im}(B) = \text{Rg}(B)$.

(2. \Rightarrow 1.) Angenommen $\text{Rg}(A) = \text{Rg}(B)$. Dank Gauß-Algorithmus gibt es Elementarmatrizen T_1, \dots, T_t und E_1, \dots, E_e so dass $A' = T_t \cdots T_1 A$ in reduzierte Zeilenstufenform ist und $B' = E_e \cdots E_1 B$ in reduzierte Zeilenstufenform ist. Es gilt $\text{Rg}(A') = \text{Rg}(A) = \text{Rg}(B) = \text{Rg}(B') = r$. Wir verwenden jetzt Spalten Operationen.

Es gibt Elementarmatrizen F_1, \dots, F_f und G_1, \dots, G_g so dass $A'' = A'F_1 \cdots F_f$ und $B'' = B'G_1 \cdots G_g$ von der Form

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & \star & \cdots & \star \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & \star & \cdots & \star \\ \vdots & & \ddots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & \star & \cdots & \star \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix}$$

sind wobei \star ein beliebiges Element in K darstellt. Es gibt Elementarmatrizen H_1, \dots, H_h und J_1, \dots, J_j so dass $A''' = A''H_1 \cdots H_h$ und $B''' = B''J_1 \cdots J_j$ von der Form

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix}$$

sind. Es gilt also

$$T_t \cdots T_1 A F_1 \cdots F_f H_1 \cdots H_h = A''' = B''' = E_e \cdots E_1 A G_1 \cdots G_g J_1 \cdots J_j$$

und

$$B = E_1^{-1} \cdots E_e^{-1} T_t \cdots T_1 A F_1 \cdots F_f H_1 \cdots H_h J_j^{-1} \cdots J_1^{-1} G_g^{-1} \cdots G_1^{-1}.$$

Also es gilt $A \sim B$. ■

Korollar 11.1.4 Es gilt

$$M_{m,n}(K) = \bigcup_{r=0}^{\min(n,m)} [A_r],$$

wobei

$$A_r = \begin{pmatrix} I_r & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \in M_{m,n}(K).$$

Definition 11.1.5 Sei $A \in M_{m,n}(K)$ mit $\text{Rg}(A) = r$ Dann heißt

$$\begin{pmatrix} I_r & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \in M_{m,n}(K)$$

die **Normalform** von A bzg. Äquivalenz von Matrizen.

Satz 11.1.6 Sei $f : V \rightarrow W$ mit $\text{Rg}(f) = r$. Dann gibt es Basen \mathcal{B} und \mathcal{B}' von V und W so dass

$$\text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}'}(f) = \begin{pmatrix} I_r & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Beweis. Seien $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$ und $\mathcal{B}' = (w_1, \dots, w_m)$ Basen von V und W , und sei $A = \text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}'}(f)$. Dann gibt es Matrizen $P \in \text{GL}_n(K)$ und $Q \in \text{GL}_m(K)$ mit

$$B = QAP = \begin{pmatrix} I_r & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Sei $\mathcal{C} = (v'_1, \dots, v'_n) = (c_{\mathcal{B}}^{-1}Pc_{\mathcal{B}}(v_1), \dots, c_{\mathcal{B}}^{-1}Pc_{\mathcal{B}}(v_n))$ und $\mathcal{C}' = (w'_1, \dots, w'_m) = (c_{\mathcal{B}'}^{-1}Q^{-1}c_{\mathcal{B}'}(w_1), \dots, c_{\mathcal{B}'}^{-1}Q^{-1}c_{\mathcal{B}'}(w_m))$. Dann sind \mathcal{C} und \mathcal{C}' Basen von V und W (weil P und Q invertierbar sind). Wir zeigen

$$c_{\mathcal{C}} = P^{-1}c_{\mathcal{B}} \text{ und } c_{\mathcal{C}'} = Qc_{\mathcal{B}'}.$$

Es gilt $c_{\mathcal{C}}(c_{\mathcal{B}}^{-1}Pc_{\mathcal{B}}(v_i)) = e_i$. Also $c_{\mathcal{C}}(c_{\mathcal{B}}^{-1}P(e_i)) = e_i$ für alle i . Also $c_{\mathcal{C}}c_{\mathcal{B}}^{-1}P = \text{Id}_{K^n}$. Daraus folgt $c_{\mathcal{C}} = P^{-1}c_{\mathcal{B}}$. Es gilt $c_{\mathcal{C}'}(c_{\mathcal{B}'}^{-1}Q^{-1}c_{\mathcal{B}'}(w_i)) = e_i$. Also $c_{\mathcal{C}'}(c_{\mathcal{B}'}^{-1}Q^{-1}(e_i)) = e_i$ für alle i . Also $c_{\mathcal{C}'}c_{\mathcal{B}'}^{-1}Q^{-1} = \text{Id}_{K^m}$. Daraus folgt $c_{\mathcal{C}'} = Qc_{\mathcal{B}'}$.

Wir haben $c_{\mathcal{B}'} \circ f = A \circ c_{\mathcal{B}}$. Daraus folgt

$$c_{\mathcal{C}'}f = Qc_{\mathcal{B}'}f = QAc_{\mathcal{B}} = BP^{-1}c_{\mathcal{B}} = Bc_{\mathcal{C}}.$$

Daraus folgt $\text{Mat}_{\mathcal{C},\mathcal{C}'}(f) = B$. ■

11.2 Basiswechsel für Endomorphismen

Satz 11.2.1 Sei V ein n -dimensionaler Vektorraum. Seien \mathcal{B} und \mathcal{C} Basen von V und sei $f : V \rightarrow V$ linear. Dann gilt

$$\text{Mat}_{\mathcal{C},\mathcal{C}}(f) = \text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{C}}(\text{Id}_V)\text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}}(f)\text{Mat}_{\mathcal{C},\mathcal{B}}(\text{Id}_V).$$

Also für $A = \text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{B}}(f)$, $B = \text{Mat}_{\mathcal{C},\mathcal{C}}(f)$ und $P = \text{Mat}_{\mathcal{B},\mathcal{C}}(\text{Id}_V)$, gilt

$$B = PAP^{-1}.$$

Beweis. Folgt aus Satz 10.2.1. ■

Definition 11.2.2 1. Seien $A, B \in M_n(K)$. Dann sind A und B **ähnlich**, falls es $P \in \text{GL}_n(K)$ gibt mit

$$B = PAP^{-1}.$$

In diesem Fall schreiben wir $A \approx B$.

2. Sei R' die Relation $R' = \{(A, B) \in M_n(K) \mid A \approx B\}$.

Lemma 11.2.3 Die Relation R' ist eine Äquivalenzrelation.

□

Beweis. Übung.

■

Frage 11.2.4 1. Wann sind zwei Matrizen $A, B \in M_n(K)$ ähnlich?

2. Suche eine Normalform bzg. Ähnlichkeit von Matrizen.

Dies wird erst in LA II beantwortet.

12 Bilineare Formen

12.1 Bilineare Formen, Skalarprodukte

Sei V ein K -Vektorraum.

Definition 12.1.1 Eine **Bilinearform auf V** ist eine Abbildung $\beta : V \times V \rightarrow K$, so dass für alle $x, y \in K$ und alle $v, v', v'' \in V$ gilt:

- $\beta(xv + yv', v'') = x\beta(v, v'') + y\beta(v', v'')$
- $\beta(v'', xv + yv') = x\beta(v'', v) + y\beta(v'', v')$.

Bemerkung 12.1.2 Eine Abbildung $\beta : V \times V \rightarrow K$ ist genau dann bilinear, wenn für alle $v \in V$ die Abbildungen

$${}_v\beta : V \rightarrow K, \quad v' \mapsto \beta(v, v') \text{ und}$$

$$\beta_v : V \rightarrow K, \quad v' \mapsto \beta(v', v)$$

linear sind.

Definition 12.1.3 Sei β eine Bilinearform auf V .

1. Die Bilinearform β ist **symmetrisch**, wenn für alle $v, v' \in V$ gilt $\beta(v, v') = \beta(v', v)$.
2. Die Bilinearform β ist **antisymmetrisch**, wenn für alle $v, v' \in V$ gilt $\beta(v, v') = -\beta(v', v)$.
3. Für K ein Teilkörper von \mathbb{R} , heißt die Bilinearform β **positiv definit**, falls gilt $\beta(v, v) > 0$ für alle $v \in V \setminus \{0\}$.
4. Eine positiv definit symmetrische Bilinearform β auf V heißt **Skalarprodukt auf V** . Man schreibt dann oft (v, v) oder $\langle v, v \rangle$ statt $\beta(v, v)$.
5. Ein Paar $(V, (,))$, wobei $(,)$ ein Skalarprodukt ist, heißt **Euklidischer Vektorraum**.

Bemerkung 12.1.4 In einem Euklidischen Vektorraum kann man das Skalarprodukt $(,)$ benutzen, um Länge, Abstand und Winkel zu definieren. Zu studieren sind lineare Abbildungen $f : V \rightarrow V$ welche Länge, Abstände und Winkel erhalten.

Beispiel 12.1.5 1. Die Abbildung $\beta : K \times K \rightarrow K$ definiert durch $\beta(x, y) = xy$ ist eine symmetrische Bilinearform.

2. Sei $V = \mathbb{R}^n$, dann ist die Abbildung $(\ , \) : V \times V \rightarrow \mathbb{R}$ definiert durch

$$\beta(v, v') = (v, v') = \sum_{i=1}^n x_i y_i,$$

wobei

$$v = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \text{ und } v' = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix},$$

ist ein Skalarprodukt auf V . Dieses Skalarprodukt heißt **das Standardskalarprodukt** von \mathbb{R}^n .

3. Sei $A \in M_n(K)$ eine Matrix und sei $\beta_A : K^n \times K^n \rightarrow K$ definiert durch $\beta_A(v, v') = v^T A v'$. Dann ist β_A eine Bilinearform auf K^n .

Definition 12.1.6 1. Eine Matrix A heißt **symmetrisch**, wenn $A = A^T$.

2. Eine Matrix A heißt **antisymmetrisch**, wenn $A = -A^T$.

Beispiel 12.1.7 1. Die Bilinearform β_A ist symmetrisch, genau dann wenn A symmetrisch ist.

2. Die Bilinearform β_A ist antisymmetrisch, genau dann wenn A antisymmetrisch ist.

3. Die Abbildung $\beta : M_n(K) \times M_n(K) \rightarrow K$ definiert durch $\beta(AB) = \text{Tr}(AB)$ ist eine Bilinearform auf $M_n(K)$.

4. Sei $V = C^0([0, 1], \mathbb{R})$. Die Abbildung $(\ , \) : V \times V \rightarrow \mathbb{R}$ definiert durch

$$(f, g) = \int_0^1 f(t)g(t)dt$$

ist ein Skalarprodukt auf V .

12.2 Euklidische Vektorräume

Sei $(V, (\ , \))$ ein Euklidischer Vektorraum.

Länge, Abstand, orthogonale Unterräume

Definition 12.2.1 Sei $x \in \mathbb{R}$, dann ist $|x|$ der **Betrag** von x .

1. Sei $v \in V$, die **Länge** von v ist definiert als

$$||v|| = \sqrt{(v, v)}.$$

2. Seien $v, v' \in V$. Der **Abstand** von v und v' ist definiert durch

$$d(v, v') = ||v - v'|| = ||v' - v||.$$

Definition 12.2.2 Sei M eine Teilmenge von V .

1. Die Teilmenge M von V ist **orthogonal**, falls $(v, v') = 0$ für alle $v, v' \in M$ mit $v \neq v'$.

2. Die Teilmenge M von V ist **orthonormal**, falls M orthogonal ist und $(v, v) = 1$ für alle $v \in M$.

3. Für $v, v' \in V$ schreiben wir $v \perp v'$, falls $(v, v') = 0$.

Lemma 12.2.3 Sei M eine orthogonale Teilmenge von $V \setminus \{0\}$. Dann ist M linear unabhängig. \square

Beweis. Sei v_1, \dots, v_n in M mit $x_1 v_1 + \dots + x_n v_n = 0$. Für alle $i \in [1, n]$ gilt $0 = x_1(v_1, v_i) + \dots + x_n(v_n, v_i) = x_i(v_i, v_i)$. Weil $v_i \neq 0$, gilt $(v_i, v_i) \neq 0$. Daraus folgt $x_i = 0$ für alle i und M ist linear unabhängig. \blacksquare

Definition 12.2.4 Sei M eine Teilmenge von V . Der **Orthogonalraum** von M ist definiert durch

$$M^\perp = \{v \in V \mid v \perp v' \text{ für alle } v' \in M\}.$$

Wir schreiben auch v^\perp statt $\{v\}^\perp$.

Lemma 12.2.5 Sei M eine Teilmenge von V , dann ist M^\perp ein Unterraum von V . \square

Beweis. Übung. \blacksquare

Lemma 12.2.6 Sei $v \in V \setminus \{0\}$ und sei $n = \dim V$. Dann gilt $\dim(v^\perp) = n - 1$. \square

Beweis. Sei $f_v : V \rightarrow K$ definiert durch $f_v(v') = (v, v')$. Dann ist f_v eine Linearform und es gilt $v^\perp = \text{Ker}(f_v)$. Es gilt $f_v(v) = (v, v) \neq 0$ (weil $v \neq 0$) also ist f_v surjektiv. Nach dem Rangsatz gilt $\dim v^\perp = \dim \text{Ker}(f_v) = n - \dim \text{Im}(f_v) = n - 1$. \blacksquare

Definition 12.2.7 Ein Unterraum W von V mit $\dim W = \dim V - 1$ heißt **Hyperebene** von V .

Lemma 12.2.8 Sei M eine Teilmenge von V . Dann gilt

$$M^\perp = (\langle M \rangle)^\perp.$$

Beweis. Übung ■

Lemma 12.2.9 Sei W ein Unterraum von V und \mathcal{B} eine Basis von W . Dann gilt

$$W^\perp = \bigcap_{v \in \mathcal{B}} v^\perp.$$

Beweis. Die Enthaltung $W^\perp \subset \bigcap_{v \in \mathcal{B}} v^\perp$ ist trivial.

Wir schreiben $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$. Sei $v \in \bigcap_{v \in \mathcal{B}} v^\perp$ und sei $w \in W$. Es gibt Skalare $x_1, \dots, x_n \in K$ mit $v = x_1 v_1 + \dots + x_n v_n$. Es gilt $(v, w) = x_1(v, v_1) + \dots + x_n(v, v_n) = 0$. Daraus folgt $v \in W^\perp$. ■

Lemma 12.2.10 Sei W ein Unterraum von V mit $\dim W = k$. Dann gilt $\dim W^\perp \geq n - k$. □

Beweis. Übung ■

Satz 12.2.11 Sei W ein Unterraum von V mit $\dim V < \infty$. Dann gilt $V = W \oplus W^\perp$. □

Beweis. Sei $v \in W \cap W^\perp$, dann gilt $(v, v) = 0$ also $v = 0$. Es gilt $W \cap W^\perp = 0$ also $W + W^\perp = W \oplus W^\perp$. Daraus folgt $\dim(W \oplus W^\perp) = \dim W + \dim W^\perp$ und nach dem Lemma folgt $\dim(W \oplus W^\perp) = \dim W + \dim W^\perp \geq \dim V$. Also gilt Gleichheit und $W \oplus W^\perp = V$. ■

Korollar 12.2.12 Sei W ein Unterraum von V mit $\dim V < \infty$. Dann gilt $\dim W^\perp = \dim V - \dim W$.

Definition 12.2.13 Sei W ein Unterraum von V . Die Projektion p_{W, W^\perp} heißt **orthogonale Projektion von V auf W** .

Orthogonale und orthonormale Basen

Definition 12.2.14 Sei \mathcal{B} eine Basis von V .

1. Die Basis \mathcal{B} heißt **Orthogonalbasis** falls \mathcal{B} eine orthogonale Teilmenge ist.
2. Die Basis \mathcal{B} heißt **Orthonormalbasis** falls \mathcal{B} eine orthonormale Teilmenge ist.

Lemma 12.2.15 Sei $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$ eine Orthonormalbasis und sei $v \in V$. Dann gilt

$$v = \sum_{i=1}^n (v, v_i) v_i.$$

Beweis. Man schreibt $v = \sum_{i=1}^n x_i v_i$. Dann gilt

$$(v, v_k) = \sum_{i=1}^n x_i (v_i, v_k) = x_k.$$

Lemma 12.2.16 Sei W ein Unterraum von V und sei $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_k)$ eine Orthonormalbasis von W . Sei $v \in V$. Dann gilt

$$p_{W, W^\perp}(v) = \sum_{i=1}^k (v, v_i) v_i.$$

Beweis. Man setze $v = \sum_{i=1}^k (v, v_i) v_i$. Es gilt $v' \in W$. Für $j \in [1, k]$ gilt

$$(v - v', v_j) = (v, v_j) - \sum_{i=1}^k (v, v_i) (v_i, v_j) = (v, v_j) - (v, v_j) = 0.$$

Es gilt also $v - v' \in W^\perp$. Daraus folgt $p_{W, W^\perp}(v) = v'$. ■

Satz 12.2.17 (Cauchy-Schwartz) Seien $v, v' \in V$ dann gilt

$$(v, v')^2 \leq (v, v)(v', v')$$

mit Gleichheit genau dann wenn v und v' linear abhängig sind. □

Beweis. Sei $\lambda \in \mathbb{R}$, es gilt $(\lambda v + v', \lambda v + v') \geq 0$. Daraus folgt

$$(\lambda v + v', \lambda v + v') = \lambda^2 (v, v) + 2\lambda (v, v') + (v', v') \geq 0$$

für alle $\lambda \in \mathbb{R}$. Der Diskriminant

$$\Delta = 4((v, v')^2 - (v, v)(v', v'))$$

ist also nicht positiv i.e. $(v, v')^2 \leq (v, v)(v', v')$. Falls es Gleichheit gibt, dann gilt $\Delta = 0$ also gilt es genau ein $\lambda \in \mathbb{R}$ mit

$$(\lambda v + v', \lambda v + v') = \lambda^2 (v, v) + 2\lambda (v, v') + (v', v') = 0.$$

Daraus folgt $\lambda v + v' = 0$ also v und v' sind linear unabhängig.

Umgekehrt, wenn v und v' linear unabhängig sind, dann ist $v = 0$ oder gibt es ein $\lambda \in \mathbb{R}$ mit $\lambda v = v'$. In beide Fälle gilt die Gleichheit. ■

Korollar 12.2.18 Seien $v, v' \in V$, dann gilt

$$\|v + v'\| \leq \|v\| + \|v'\|.$$

Beweis. Es gilt

$$(v + v', v + v') = (v, v) + 2(v, v') + (v', v') \leq (v, v) + 2\sqrt{(v, v)(v', v')} + (v', v').$$

Es gilt also

$$\|v + v'\|^2 \leq \|v\|^2 + 2\|v\|\|v'\| + \|v'\|^2 = (\|v\| + \|v'\|)^2.$$

Lemma 12.2.19 Sei W ein Unterraum von V mit $\dim V < \infty$. Sei $v \in V$. Unter allen $w \in W$ hat $p_{W, W^\perp}(v)$ den kleinen Abstand zu v . \square

Beweis. Wegen $V = W \oplus W^\perp$, gibt es ein $v' \in W^\perp$ mit $v = p_{W, W^\perp}(v) + v'$. Für alle $u \in W$ gilt

$$\begin{aligned} \|v - u\|^2 &= \|(p_{W, W^\perp}(v) - u) + v'\|^2 \\ &= (p_{W, W^\perp}(v) - u, p_{W, W^\perp}(v) - u) + 2(p_{W, W^\perp}(v) - u, v') + (v', v') \\ &= (p_{W, W^\perp}(v) - u, p_{W, W^\perp}(v) - u) + (v', v') \\ &= \|(p_{W, W^\perp}(v) - u)\|^2 + \|v'\|^2 \geq \|v'\|^2 \\ &= \|v - p_{W, W^\perp}(v)\|^2. \end{aligned}$$

Bemerkung 12.2.20 Sei $v \in V$ mit $v \neq 0$. Dann gilt

$$\left\| \frac{1}{\|v\|} v \right\| = 1.$$

Satz 12.2.21 (Gram-Schmidtsches Orthonormalisierungsverfahren) Sei $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$ eine Basis und sei $V_i = \langle v_1, \dots, v_i \rangle$.

Dann gibt es eine Orthonormalbasis (v'_1, \dots, v'_n) von V mit $V_i = \langle v'_1, \dots, v'_i \rangle$. Die v'_i sind (bis auf Vorzeichen) eindeutig bestimmt. \square

Beweis. Sei $v'_1 = \frac{1}{\|v_1\|} v_1$. Dann gilt $\|v'_1\| = 1$ und $V_1 = \langle v_1 \rangle = \langle v'_1 \rangle$.

Induktionsannahme: Es gibt eine Orthonormalbasis (v'_1, \dots, v'_i) von V_i mit $V_j = \langle v'_1, \dots, v'_j \rangle$ für alle $j \leq i$.

Falls $i = n$, sind wir fertig.

Falls $i < n$, sei $w_{i+1} = v_{i+1} - p_{V_i, V_i^\perp}(v_{i+1})$. Dann gilt $w_{i+1} \in V_i^\perp$. Es folgt $(w_{i+1}, v'_j) = 0$ für alle $j \leq i$. Setze

$$v'_{i+1} = \frac{1}{\|w_{i+1}\|} w_{i+1}.$$

Die Menge von Vektoren (v'_1, \dots, v'_{i+1}) ist orthonormal also linear unabhängig. Diese Vektoren liegen in V_{i+1} . Also ist (v'_1, \dots, v'_{i+1}) eine Orthonormalbasis von V_{i+1} .

Die Eindeutigkeit von v'_{i+1} (bis auf Vorzeichen) folgt aus $(v'_{i+1}, v'_{i+1}) = 1$, $v'_{i+1} \in V_{i+1}$ und $\dim(V_{i+1} \cap V_i^\perp) = 1$. \blacksquare

Orthogonale Homomorphismen

Seien $(V, (\cdot, \cdot))$ und $(W, (\cdot, \cdot))$ zwei Euklidische Vektorräume.

Definition 12.2.22 Eine lineare Abbildung $f : V \rightarrow W$ heißt **orthogonal** falls

$$(f(v), f(v')) = (v, v')$$

für alle $v, v' \in V$.

Definition 12.2.23 Eine Abbildung $f : V \rightarrow W$ heißt **Bewegung** oder **distanztreu** falls

$$\|f(v) - f(v')\| = \|v - v'\|$$

für alle $v, v' \in V$.

Definition 12.2.24 Eine lineare Abbildung $f : V \rightarrow W$ ist **länggetreu** falls

$$\|f(v)\| = \|v\|$$

für alle $v \in V$.

Definition 12.2.25 Seien $v, v' \in V \setminus \{0\}$. Der Winkel $\angle(v, v')$ ist

$$\angle(v, v') = \arccos \left(\frac{(v, v')}{\|v\| \cdot \|v'\|} \right).$$

Eine lineare Abbildung $f : V \rightarrow W$ ist **winkeltreu** falls

$$\angle(f(v), f(v')) = \angle(v, v')$$

für alle $v, v' \in V$.

Definition 12.2.26 Eine lineare Abbildung $f : V \rightarrow W$ eine **Ähnlichkeitsabbildung** falls es ein $\delta_f > 0$ gibt mit

$$\|f(v)\| = \delta_f \|v\|$$

für alle $v \in V$.

Lemma 12.2.27 Orthogonale Abbildungen sind Bewegungen, sind länggetreu, sind winkeltreu und sind Ähnlichkeitsabbildungen. \square

Beweis. Sei f eine orthogonale Abbildung. Es gilt

$$\|f(v) - f(v')\|^2 = (f(v - v'), f(v - v')) = (v - v', v - v') = \|v - v'\|^2$$

und f ist eine Bewegung. Daraus folgt, für $v' = 0$, dass $\|f(v)\| = \|v\|$ und f ist distanztreu. Aus der Definition des Winkels folgt, dass f winkeltreu ist. Mit $\delta_f = 1$ und weil f eine Bewegung ist, ist f eine Ähnlichkeitsabbildung. \blacksquare

Lemma 12.2.28 Sei f eine orthogonale Abbildung. Dann ist f injektiv. \square

Beweis. Sei $v \in \text{Ker}(f)$. Dann gilt $(v, v) = (f(v), f(v)) = 0$. Es folgt $v = 0$. \blacksquare

Definition 12.2.29 Die **orthogonale Gruppe** $O(V, (\cdot, \cdot))$ ist die Teilmenge

$$O(V, (\cdot, \cdot)) = \{f \in \text{hom}(V, V) \mid f \text{ ist orthogonal und bijektiv}\}.$$

Lemma 12.2.30 $O(V, (\cdot, \cdot))$ ist eine Gruppe für die Verknüpfung $(f, g) \mapsto f \circ g$. \square

Beweis. Übung. \blacksquare

Bemerkung 12.2.31 Für V endlich dimensional und $f : V \rightarrow V$ linear, gilt die Implikation $(f \text{ orthogonal} \Rightarrow f \text{ bijektiv})$. Also gilt die Gleichung

$$O(V, (\cdot, \cdot)) = \{f \in \text{hom}(V, V) \mid f \text{ ist orthogonal}\}.$$

Lemma 12.2.32 Sei $n = \dim V$ und sei \mathcal{B} eine Basis von V . Die folgende Aussage sind äquivalent:

- \mathcal{B} ist eine Orthonormale Basis.
- Die Abbildung $c_{\mathcal{B}} : V \rightarrow \mathbb{R}^n$ ist orthogonal, wobei wir hier \mathbb{R}^n als Euklidischen Vektorraum auffassen, indem wir das Standardskalarprodukt verwenden. \square

Beweis. Sei $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$ und sei (e_1, \dots, e_n) die kanonische Basis von \mathbb{R}^n . Die Abbildung $c_{\mathcal{B}}$ ist definiert durch $c_{\mathcal{B}}(v_i) = e_i$.

$(1 \Rightarrow 2)$. Seien $v, v' \in V$. Es gilt

$$v = \sum_{i=1}^n (v, v_i) v_i \text{ und } v' = \sum_{i=1}^n (v', v_i) v_i.$$

Daraus folgt

$$(c_{\mathcal{B}}(v), c_{\mathcal{B}}(v')) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (v, v_i) (v', v_j) (e_i, e_j) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (v, v_i) (v', v_j) (v_i, v_j) = (v, v').$$

$(1 \Rightarrow 2)$. Es gilt

$$(v_i, v_j) = (c_{\mathcal{B}}(v_i), c_{\mathcal{B}}(v_j)) = (e_i, e_j) = \delta_{i,j}$$

und \mathcal{B} ist orthonormal. \blacksquare

Satz 12.2.33 Sei $A \in M_n(\mathbb{R})$. Sei (\cdot, \cdot) das standard Skalarprodukt auf \mathbb{R}^n . Die folgende Aussage sind äquivalent:

1. $A^T A = I_n$.

2. A ist invertierbar und $A^{-1} = A^T$.
3. Die Spalten von A bilden eine Orthonormalbasis von $(\mathbb{R}^n, (\cdot, \cdot))$.
4. Die Zeilen von A bilden eine Orthonormalbasis von $(\mathbb{R}^n, (\cdot, \cdot))$.
5. Die Matrix Abbildung $A : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ ist orthogonal.
6. Seien $(V, (\cdot, \cdot))$ und $(W, (\cdot, \cdot))$ Euklidische Vektorräume mit \mathcal{B} und \mathcal{B}' Orthonormalbasen von V und W . Sei $f : V \rightarrow W$ die (eindeutig bestimmte) lineare Abbildung mit $\text{Mat}_{\mathcal{B}, \mathcal{B}'}(f) = A$. Dann ist f orthogonal. \square

Beweis. $(1 \Leftrightarrow 2)$. Folgt aus den elementaren Eigenschaften invertierbarer Matrizen.

$(1 \Leftrightarrow 3)$. Sei $B = (b_{i,j}) = A^T A$. Dann gilt

$$\begin{aligned} b_{i,j} &= (i\text{-te Zeile von } A^T) \cdot (j\text{-te Spalte von } A) \\ &= (i\text{-te Spalte von } A)^T \cdot (j\text{-te Spalte von } A). \end{aligned}$$

Aber für $v, v' \in \mathbb{R}^n$ gilt $(v, v') = v^T \cdot v'$. Also gilt $b_{i,j} = \delta_{i,j}$ genau dann wenn die Spalten von A eine Orthonormalbasis bilden. (Dass die Spalten eine Basis bilden folgt direkt aus der Invertierbarkeit von A .)

$(1 \Leftrightarrow 4)$. Wegen $A^T A = I_n$ gilt auch $AA^T = I_n$. Dann verfahren wir wie im Beweis von $(1 \Leftrightarrow 3)$.

$(3 \Leftrightarrow 5)$. Seien (v_1, \dots, v_n) die Spalten von A und sei $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$. Es gilt $c_{\mathcal{B}}^{-1} = A$. Aus Lemma 12.2.32 folgt

$$\mathcal{B} \text{ ist orthonormal} \Leftrightarrow c_{\mathcal{B}} \text{ ist orthogonal} \Leftrightarrow A = c_{\mathcal{B}}^{-1} \text{ ist orthogonal.}$$

$(5 \Leftrightarrow 6)$. Wir haben ein kommutatives Diagramm

$$\begin{array}{ccc} V & \xrightarrow{f} & W \\ c_{\mathcal{B}} \downarrow & & \downarrow c_{\mathcal{B}'} \\ \mathbb{R}^n & \xrightarrow{A} & \mathbb{R}^n. \end{array}$$

Es gilt also $f = c_{\mathcal{B}'}^{-1} A c_{\mathcal{B}}$ und $A = c_{\mathcal{B}'} f c_{\mathcal{B}}^{-1}$. Weil \mathcal{B} und \mathcal{B}' Orthonormalbasen sind, sind $c_{\mathcal{B}}$, $c_{\mathcal{B}}^{-1}$, $c_{\mathcal{B}'}$ und $c_{\mathcal{B}'}^{-1}$ orthogonal. Daraus folgt $(5 \Leftrightarrow 6)$. \blacksquare

Definition 12.2.34 1. Die orthogonale Gruppe von \mathbb{R}^n mit dem standarden Skalarprodukt wird $O_n(\mathbb{R})$ bezeichnet.

2. Eine Matrix $A \in M_n(\mathbb{R})$ heißt **orthogonal** wenn $A^T A = I_n$.

Korollar 12.2.35 Es gilt $O_n(\mathbb{R}) = \{A \in GL_n(\mathbb{R}) \mid A^T A = I_n\}$.

13 Determinanten

13.1 Determinantenfunktion

Definition 13.1.1 Eine Abbildung $\det : M_n(K) \rightarrow K$ heißt **Determinantenfunktion**, falls gilt

1. \det ist linear in jeder Zeile.
2. Falls $\text{Rg}(A) < n$, gilt $\det(A) = 0$.
3. $\det(I_n) = 1$.

Bemerkung 13.1.2 \det ist linear in jeder Zeile genau dann, wenn für jedes $i \in [1, n]$ gilt

$$\det \begin{pmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{i,1} & \cdots & a_{i,n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n,1} & \cdots & a_{n,n} \end{pmatrix} = \det \begin{pmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,n} \\ \vdots & & \vdots \\ a'_{i,1} & \cdots & a'_{i,n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n,1} & \cdots & a_{n,n} \end{pmatrix} + \det \begin{pmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,n} \\ \vdots & & \vdots \\ a''_{i,1} & \cdots & a''_{i,n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n,1} & \cdots & a_{n,n} \end{pmatrix}$$

für alle $(a_{i,j}) \in M_n(K)$ mit $a_{i,j} = a'_{i,j} + a''_{i,j}$ für alle $i, j \in [1, n]$ und

$$\det \begin{pmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,n} \\ \vdots & & \vdots \\ \lambda a_{i,1} & \cdots & \lambda a_{i,n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n,1} & \cdots & a_{n,n} \end{pmatrix} = \lambda \det \begin{pmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{i,1} & \cdots & a_{i,n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n,1} & \cdots & a_{n,n} \end{pmatrix}.$$

Lemma 13.1.3 Sei $\det : M_n(K) \rightarrow K$ eine Determinantenfunktion und sei T eine Elementarmatrix in $M_n(K)$. Sei $A \in M_n(K)$, dann gilt

1. $\det(TA) = \det(A)$, falls T vom Typ I ist.
2. $\det(TA) = \lambda \det(A)$, falls $T = D_p(\lambda)$ vom Typ II ist ($\lambda = 0$ ist erlaubt).
3. $\det(TA) = -\det(A)$, falls T vom Typ III ist. □

Beweis. Folgt aus der Linearität in den Zeilen. Seien Z_1, \dots, Z_n die Zeilen von A . Es gilt

$$A = \begin{pmatrix} Z_1 \\ \vdots \\ Z_n \end{pmatrix}.$$

Sei $i \neq j$ und $T = T_{i,j}^{(n)}(a)$ von Typ I. Es gilt

$$\det(TA) = \det \begin{pmatrix} Z_1 \\ \vdots \\ Z_i + aZ_j \\ \vdots \\ Z_j \\ \vdots \\ Z_n \end{pmatrix} = \det \begin{pmatrix} Z_1 \\ \vdots \\ Z_i \\ \vdots \\ Z_j \\ \vdots \\ Z_n \end{pmatrix} + a \det \begin{pmatrix} Z_1 \\ \vdots \\ Z_j \\ \vdots \\ Z_j \\ \vdots \\ Z_n \end{pmatrix} = \det(A) + 0.$$

Sei $T = D_i(\lambda)$ von Typ II, dann gilt

$$\det(TA) = \det \begin{pmatrix} Z_1 \\ \vdots \\ \lambda Z_i \\ \vdots \\ Z_n \end{pmatrix} = \lambda \det \begin{pmatrix} Z_1 \\ \vdots \\ Z_i \\ \vdots \\ Z_n \end{pmatrix} = \lambda \det(A).$$

Seien $i, j \in [1, n]$ und $T = E_{i,j}^{(n)}$ von Typ III. Es gilt

$$\det(TA) = \det \begin{pmatrix} Z_1 \\ \vdots \\ Z_j \\ \vdots \\ Z_i \\ \vdots \\ Z_n \end{pmatrix}.$$

Es gilt

$$0 = \det \begin{pmatrix} Z_1 \\ \vdots \\ Z_i + Z_j \\ \vdots \\ Z_j + Z_i \\ \vdots \\ Z_n \end{pmatrix} = \det \begin{pmatrix} Z_1 \\ \vdots \\ Z_i \\ \vdots \\ Z_j \\ \vdots \\ Z_n \end{pmatrix} + \det \begin{pmatrix} Z_1 \\ \vdots \\ Z_i \\ \vdots \\ Z_i \\ \vdots \\ Z_n \end{pmatrix} + \det \begin{pmatrix} Z_1 \\ \vdots \\ Z_j \\ \vdots \\ Z_j \\ \vdots \\ Z_n \end{pmatrix} + \det \begin{pmatrix} Z_1 \\ \vdots \\ Z_j \\ \vdots \\ Z_i \\ \vdots \\ Z_n \end{pmatrix}.$$

Daraus folgt $0 = \det(A) + \det(TA)$. ■

Korollar 13.1.4 Für \det eine Determinantenfunktion, T eine Elementarmatrix und $A \in M_n(K)$ gilt

$$\det(AT) = \det(A) \det(T).$$

Es gilt auch $\det(T) = 1$ für T von Typ I, $\det(T) = \lambda$ für $T = D_p(\lambda)$ von Typ II und $\det(T) = -1$ für T von Typ III.

Beweis. Aus dem Lemma für $A = I_n$ gilt $\det(T) = 1$ für T von Typ I, $\det(T) = \lambda$ für $T = D_p(\lambda)$ von Typ II und $\det(T) = -1$ für T von Typ III. Die Gleichung folgt aus dem Lemma für A beliebig. ■

Korollar 13.1.5 Für \det eine Determinantenfunktion und $A, B \in M_n(K)$ gilt

$$\det(AB) = \det(A) \det(B).$$

Beweis. Für A oder B nicht invertierbar ist AB nicht invertierbar. In diesem Fall gilt $\det(AB) = 0 = \det(A) \det(B)$. Für A und B invertierbar gibt es Elementarmatrizen T_1, \dots, T_t und U_1, \dots, U_u mit $T_t \cdots T_1 A = I_n$ und $U_u \cdots U_1 B = I_n$. Daraus folgt (weil für T eine Elementarmatrix, die Matrix T^{-1} auch eine Elementarmatrix ist):

$$\begin{aligned} \det(AB) &= \det(T_1^{-1} \cdots T_t^{-1} U_1^{-1} \cdots U_u^{-1}) \\ &= \det(T_1^{-1}) \cdots \det(T_t^{-1}) \det(U_1^{-1}) \cdots \det(U_u^{-1}) \\ &= \det(T_1^{-1} \cdots T_t^{-1}) \det(U_1^{-1} \cdots U_u^{-1}) \\ &= \det(A) \det(B). \end{aligned}$$

Satz 13.1.6 Sei $A \in M_n(K)$. Die Matrix A ist invertierbar genau dann, wenn $\det(A) \neq 0$. □

Beweis. Für A nicht invertierbar gilt $\det(A) = 0$. Für A invertierbar gibt es Elementarmatrizen T_1, \dots, T_t mit $A = T_1 \cdots T_t$. Daraus folgt $\det(A) = \det(T_1) \cdots \det(T_t)$. Für T eine Elementarmatrix gilt $\det(T) \neq 0$, daraus folgt $\det(A) \neq 0$. ■

13.2 Existenz

Satz 13.2.1 (Laplacescher Entwicklungssatz) Es gibt genau eine Determinantenfunktion $\det : M_n(K) \rightarrow K$ und es gilt für jedes $j \in [1, n]$:

$$\det(A) = \sum_{i=1}^n (-1)^{i+j} a_{i,j} \det(A_{i,j}),$$

wobei $A_{i,j}$ aus A durch Streichen der i -ten Zeile und der j -ten Spalte entsteht ($A_{i,j} \in M_{n-1}(K)$). □

Beweis. Die Existenz und die Gleichung zeigen wir per Induktion nach n . Für $n = 0$ ist $\det(A) = 1$ per Konvention.

Für $n = 1$ gilt $\det(A) = \det(a_{1,1}I_1) = a_{1,1} = (-1)^{1+1}a_{1,1}\det(A_{1,1})$.

Sei $n > 1$. Der Satz sei richtig für $n - 1$. Für $A \in M_n(K)$ definieren wir $\det(A)$ durch

$$\det(A) = \sum_{i=1}^n (-1)^{i+j} a_{i,j} \det(A_{i,j}).$$

Wir zeigen, dass \det eine Determinantenfunktion ist.

Wir zeigen, dass \det linear in jeder Zeile ist. Seien A , A' und A'' wie folgt:

$$A = \begin{pmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{k,1} & \cdots & a_{k,n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n,1} & \cdots & a_{n,n} \end{pmatrix}, \quad A' = \begin{pmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,n} \\ \vdots & & \vdots \\ a'_{k,1} & \cdots & a'_{k,n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n,1} & \cdots & a_{n,n} \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad A'' = \begin{pmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,n} \\ \vdots & & \vdots \\ a''_{k,1} & \cdots & a''_{k,n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n,1} & \cdots & a_{n,n} \end{pmatrix}$$

wobei $a_{k,j} = a'_{k,j} + a''_{k,j}$ für alle $j \in [1, n]$. Es gilt

$$a_{i,j} \det(A_{i,j}) = \begin{cases} (a'_{k,j} + a''_{k,j}) \det(A_{k,j}) & \text{für } i = k \\ a_{i,j} (\det((A')_{i,j}) + \det((A'')_{i,j})) & \text{für } i \neq k. \end{cases}$$

Dabei gilt $A_{k,j} = A'_{k,j} = A''_{k,j}$. Es gilt also

$$\det(A) = \sum_{i=1}^n (-1)^{i+j} a_{i,j} \det(A_{i,j})$$

$$\det(A) = a'_{k,j} \det(A'_{k,j}) + a''_{k,j} \det(A''_{k,j}) + \sum_{i \neq k} (-1)^{i+j} a_{i,j} (\det((A')_{i,j}) + \det((A'')_{i,j})).$$

$$\det(A) = \sum_{i=1}^n (-1)^{i+j} a'_{i,j} \det((A')_{i,j}) + \sum_{i=1}^n (-1)^{i+j} a''_{i,j} \det((A'')_{i,j}) = \det(A') + \det(A'').$$

Sei

$$B = \begin{pmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,n} \\ \vdots & & \vdots \\ \lambda a_{k,1} & \cdots & \lambda a_{k,n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n,1} & \cdots & a_{n,n} \end{pmatrix}.$$

Es gilt

$$b_{i,j} \det(B_{i,j}) = \begin{cases} \lambda a_{k,j} \det(A_{k,j}) & \text{für } i = k \\ a_{i,j} \lambda \det(A_{i,j}) & \text{für } i \neq k. \end{cases}$$

Daraus folgt $\det(B) = \lambda \det(A)$ und \det ist linear in jeder Zeile.

Sei jetzt A mit $\text{Rg}(A) < n$. Wir zeigen $\det(A) = 0$. $\text{Rg}(A) < n$ bedeutet, dass es eine Zeile Z_k von A gibt mit

$$Z_k = \sum_{i \neq k} x_i Z_i$$

wobei Z_i die Zeilen von A sind. Wegen der Linearität in der k -te Zeile gilt

$$\det(A) = \det \begin{pmatrix} Z_1 \\ \vdots \\ Z_k \\ \vdots \\ Z_n \end{pmatrix} = \sum_{i \neq k} x_i \det \begin{pmatrix} Z_1 \\ \vdots \\ Z_i \\ \vdots \\ Z_n \end{pmatrix}.$$

Bei allen Matrizen in der Summe ist eine Zeile doppelt. Es ist nur noch zu zeigen, dass in diesem Fall ist die Determinante gleich 0. Sei also

$$B = \begin{pmatrix} Z_1 \\ \vdots \\ Z_i \\ \vdots \\ Z_i \\ \vdots \\ Z_n \end{pmatrix}$$

eine Matrix mit Zeile Z_i auf der i -te und k -te Zeilen. Es gilt $\text{Rg}(B_{l,j}) < n - 1$ für $l \neq i$ und $l \neq k$. Daraus folgt (per Induktion) $\det(B_{l,j}) = 0$ für $l \neq i$ und $l \neq k$. Aus der Definition folgt

$$\det(B) = (-1)^{i+j} b_{i,j} \det(B_{i,j}) + (-1)^{k+j} b_{k,j} \det(B_{k,j}).$$

Es gilt $b_{i,j} = b_{k,j}$ und $B_{i,j} = E_{i,i+1}^{(n-1)} \cdots E_{k-2,k-1}^{(n-1)} B_{k,j}$. Daraus folgt

$$\det(B) = (-1)^{i+j} b_{i,j} \det(B_{i,j}) + (-1)^{k+j} (-1)^{k-i-1} b_{i,j} \det(B_{i,j}) = (-1)^{i+j} b_{i,j} \det(B_{i,j}(1-1)) = 0.$$

Wir zeigen jetzt $\det(I_n) = 1$. Es gilt $\det(I_n) = (-1)^{j,j} \det((I_n)_{j,j}) = \det(I_{n-1}) = 1$ per Induktion. Daraus folgt, dass \det eine Determinantenfunktion ist.

Wir zeigen jetzt, dass \det eindeutig ist. Seien \det und \det' zwei Determinantenfunktionen. Für A nicht invertierbar gilt $\det(A) = 0 = \det'(A)$. Aus Korollar 13.1.4 gilt auch $\det(T) = \det(T') \neq 0$ für alle Elementarmatrizen T . Für A invertierbar gibt es Elementare Matrizen T_1, \dots, T_t mit $T_t \cdots T_1 A = I_n$. Es gilt also

$$\det(A) = \det(T_1^{-1}) \cdots \det(T_t^{-1}) = \det'(T_1^{-1}) \cdots \det'(T_t^{-1}) = \det'(A).$$

Daraus folgt $\det(A) = \det'(A)$. ■

Beispiel 13.2.2 1. Sei $A \in M_2(K)$ mit

$$A = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} \\ a_{2,1} & a_{2,2} \end{pmatrix}.$$

Dann gilt für $j = 1$

$$\det(A) = (-1)^2 a_{1,1} \det(A_{1,1}) + (-1)^3 a_{2,1} \det(A_{2,1}) = a_{1,1} a_{2,2} - a_{2,1} a_{1,2}.$$

2. Sei $A \in M_3(K)$ mit

$$A = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & a_{3,3} \end{pmatrix}.$$

Dann gilt für $j = 1$

$$\det(A) = a_{1,1} \det \begin{pmatrix} a_{2,2} & a_{2,3} \\ a_{3,2} & a_{3,3} \end{pmatrix} - a_{2,1} \det \begin{pmatrix} a_{1,2} & a_{1,3} \\ a_{3,2} & a_{3,3} \end{pmatrix} + a_{3,1} \det \begin{pmatrix} a_{1,2} & a_{1,3} \\ a_{2,2} & a_{2,3} \end{pmatrix}.$$

Bemerkung 13.2.3 Für R ein Ring, kann man auch Matrizen $M_n(R)$ betrachten. Man kann auch die Matrixaddition, die Skalarmultiplikation und die Matrixmultiplikation definieren. Der Laplacesche Entwicklungssatz ist dann noch für $A \in M_n(R)$ wahr (mit dem selben Beweis, außer für die Eindeutigkeit). Es gilt also eine (eindeutige) Determinantenfunktion

$$\det : M_n(R) \rightarrow R$$

für alle Ringe R .

13.3 Rechenregeln für Determinanten

Lemma 13.3.1 Sei A eine Obere Dreiecksmatrix mit $a_{1,1}, \dots, a_{n,n}$ auf der Diagonalen. Im Symbol

$$A = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,n} \\ 0 & a_{2,2} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & a_{n-1,n} \\ 0 & \cdots & 0 & a_{n,n} \end{pmatrix}.$$

Dann gilt

$$\det(A) = a_{1,1} \cdots a_{n,n}.$$

Beweis. Übung. ■

Lemma 13.3.2 Sei $A \in M_n(K)$, dann gilt

$$\det(A^T) = \det(A).$$

Beweis. Für $\text{Rg}(A) < n$ gilt $\text{Rg}(A^T) = \text{Rg}(A) < n$ und $\det(A^T) = 0 = \det(A)$. Für A invertierbar, gibt es Elementare Matrizen T_1, \dots, T_t mit $A = T_1 \cdots T_t$. Außerdem gilt, für E eine Elementarmatrix von Typ I ist E^T auch Elementar von Typ I, für E elementar von Typ II gilt $E^T = E$ und für E elementar von Typ III ist E^T auch elementar von Typ III. Daraus folgt

$$\det(E^T) = \det(E)$$

für E eine Elementarmatrix. Daraus folgt $\det(A^T) = \det(A)$. ■

Korollar 13.3.3 (Entwicklung nach der j -ten Zeile) Es gilt für jedes $j \in [1, n]$:

$$\det(A) = \sum_{i=1}^n (-1)^{i+j} a_{j,i} \det(A_{j,i}).$$

Beweis. Anwende Laplacescher Entwicklungssatz für $\det(A^T)$. ■

Korollar 13.3.4 Die Determinantenfunktion \det ist linear in jeder Spalte.

Lemma 13.3.5 Sei $A \in M_n(K)$ eine Matrix der Form

$$A = \begin{pmatrix} B_1 & \star & \cdots & \star \\ 0 & B_2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \star \\ 0 & \cdots & 0 & B_r \end{pmatrix},$$

wobei $B_i \in M_{k_i}(K)$ mit $k_1 + \cdots + k_r = n$. Dann gilt

$$\det(A) = \det(B_1) \cdots \det(B_r).$$

Beweis. Übung. ■

Satz 13.3.6 Sei A eine Matrix.

1. Für A invertierbar gilt $\det(A^{-1}) = \det(A)^{-1}$.
2. Sei $\text{Com}(A) = (b_{i,j})$ mit $b_{i,j} = (-1)^{i+j} \det(A_{i,j})$. Dann gilt

$$A \text{Com}(A)^T = \det(A) I_n.$$

3. Für A invertierbar gilt

$$A^{-1} = \frac{1}{\det(A)} \text{Com}(A)^T.$$

Beweis. 1. Es gilt $AA^{-1} = I_n$. Daraus folgt $\det(A)\det(A^{-1}) = \det(I_n) = 1$ und $\det(A^{-1}) = \det(A)^{-1}$.

2. Wir schreiben $A\text{Com}(A)^T = (c_{i,j})$. Es gilt

$$c_{i,j} = \sum_{k=1}^n a_{i,k}(-1)^{k+j} \det(A_{j,k}) = \det(A')$$

wobei A' aus A entsteht durch Ersetzen der j -ten Zeilen durch die i -te Zeile. Daraus folgt $c_{i,j} = \delta_{i,j} \det(A)$.

3. Folgt aus 2. ■

Beispiel 13.3.7 Für $A \in M_2(K)$ mit

$$A = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} \\ a_{2,1} & a_{2,2} \end{pmatrix}.$$

Dann gilt

$$\text{Com}(A) = \begin{pmatrix} a_{2,2} & -a_{2,1} \\ -a_{1,2} & a_{1,1} \end{pmatrix} \text{ und } \text{Com}(A)^T = \begin{pmatrix} a_{2,2} & -a_{1,2} \\ -a_{2,1} & a_{1,1} \end{pmatrix}.$$

Dann gilt für $\det(A) = a_{1,1}a_{2,2} - a_{2,1}a_{1,2} \neq 0$:

$$A^{-1} = \frac{1}{a_{1,1}a_{2,2} - a_{2,1}a_{1,2}} \begin{pmatrix} a_{2,2} & -a_{1,2} \\ -a_{2,1} & a_{1,1} \end{pmatrix}.$$

13.4 Cramersche Regel für lineare Gleichungssysteme

Sei $A = (a_{i,j}) \in M_n(K)$ und sei $b = (b_i) \in M_{n,1}(K) = K^n$.

Satz 13.4.1 Für A invertierbar, gibt es genau eine Lösung $v = (x_i) \in M_{n,1}(K) = K^n$ des lineares Gleichungssystems $AX = b$ und es gilt:

$$x_i = \frac{1}{\det A} \det \begin{pmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,i-1} & b_1 & a_{1,i+1} & \cdots & a_{1,n} \\ a_{2,1} & \cdots & a_{2,i-1} & b_2 & a_{2,i+1} & \cdots & a_{2,n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n-1,1} & \cdots & a_{n-1,i-1} & b_{n-1} & a_{n-1,i+1} & \cdots & a_{n-1,n} \\ a_{n,1} & \cdots & a_{n,i-1} & b_n & a_{n,i+1} & \cdots & a_{n,n} \end{pmatrix}.$$

Beweis. Wir wissen, dass es, für A invertierbar, genau eine Lösung des Systems $AX = b$ gibt. Sei $v = (x_i)$ die Lösung. Es gilt $Av = b$. Also für S_1, \dots, S_n die Spalten von A gilt:

$$x_1 S_1 + \dots + x_n S_n = b.$$

Daraus folgt, dass das System $(S_1, \dots, S_{i-1}, x_i S_i - b, S_{i+1}, \dots, S_n)$ linear abhängig ist. Sei B die Matrix mit $S_1, \dots, S_{i-1}, x_i S_i - b, S_{i+1}, \dots, S_n$ als Spalten. Es gilt $\det(B) = 0$. Aus der Linearität von \det in den i -ten Spalte folgt

$$0 = \det(B) = x_i \det(A) - \det \begin{pmatrix} a_{1,1} & \dots & a_{1,i-1} & b_1 & a_{1,i+1} & \dots & a_{1,n} \\ a_{2,1} & \dots & a_{2,i-1} & b_2 & a_{2,i+1} & \dots & a_{2,n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n-1,1} & \dots & a_{n-1,i-1} & b_{n-1} & a_{n-1,i+1} & \dots & a_{n-1,n} \\ a_{n,1} & \dots & a_{n,i-1} & b_n & a_{n,i+1} & \dots & a_{n,n} \end{pmatrix}.$$

13.5 Determinanten von Endomorphismen

Sei V ein K -Vektorraum mit $\dim V = n$.

Lemma 13.5.1 Sei $f : V \rightarrow V$ ein Endomorphismus und seien \mathcal{B} und \mathcal{B}' zwei Basen von V . Es gilt

$$\det(\text{Mat}_{\mathcal{B}}(f)) = \det(\text{Mat}_{\mathcal{B}'}(f)).$$

Beweis. Nach Basiswechselsatz für Endomorphismen gilt $\text{Mat}_{\mathcal{B}'}(f) = Q \text{Mat}_{\mathcal{B}}(f) Q^{-1}$. Daraus folgt

$$\det(\text{Mat}_{\mathcal{B}'}(f)) = \det(Q) \det(\text{Mat}_{\mathcal{B}}(f)) \det(Q)^{-1} = \det(Q) \det(Q^{-1}) \det(\text{Mat}_{\mathcal{B}}(f)).$$

Es folgt $\det(\text{Mat}_{\mathcal{B}'}(f)) = \det(\text{Mat}_{\mathcal{B}}(f))$. ■

Definition 13.5.2 Sei $f : V \rightarrow V$ ein Endomorphismus. Die **Determinante** $\det(f)$ von f ist

$$\det(f) = \det(\text{Mat}_{\mathcal{B}}(f)),$$

wobei \mathcal{B} eine Basis von V ist. Nach dem Lemma hängt $\det(f)$ nicht von \mathcal{B} ab.

Satz 13.5.3 Seien f und g zwei Endomorphismen von V . Dann gilt:

1. $\det(f \circ g) = \det(f) \det(g) = \det(g \circ f)$.
2. $\det(\text{Id}_V) = 1$.
3. f ist genau dann ein Isomorphismus, wenn $\det(f) \neq 0$.
4. Falls f ein Isomorphismus ist, dann gilt $\det(f^{-1}) = \det(f)^{-1}$. □

Beweis. Übung. ■

14 Polynomringe

14.1 Definition

Wir wissen, dass

$$K^{(\mathbb{N})} = \{f : \mathbb{N} \rightarrow K \mid f(n) \neq 0 \text{ nur für endlich viele } n \in \mathbb{N}\}$$

ein Vektorraum ist. Sei $e_n : \mathbb{N} \rightarrow K$ definiert durch $e_n(i) = \delta_{i,n}$. Dann gilt $e_n \in K^{(\mathbb{N})}$.

Lemma 14.1.1 Das System $\mathcal{B} = (e_n)_{n \in \mathbb{N}}$ ist eine Basis von $K^{(\mathbb{N})}$. Diese Basis heißt die **kanonische Basis von $K^{(\mathbb{N})}$** . □

Beweis. Sei $f : \mathbb{N} \rightarrow K$ in $K^{(\mathbb{N})}$. Dann gilt

$$f = \sum_{n \in \mathbb{N}} f(n)e_n.$$

Wegen $f \in K^{(\mathbb{N})}$, ist die Summe endlich. Daraus folgt, dass \mathcal{B} eine Basis ist. Für $n \in \mathbb{N}$, sei $x_n \in K$ mit

$$\sum_n x_n e_n = 0.$$

Dies ist eine Gleichung von Elementen aus $K^{\mathbb{N}}$ die Menge aller Abbildungen von \mathbb{N} nach K . Für $i \in \mathbb{N}$ gilt also

$$x_i = \sum_n x_n e_n(i) = \left(\sum_n x_n e_n \right) (i) = 0$$

und \mathcal{B} ist linear unabhängig. ■

Definition 14.1.2 Wir definieren auf $K^{(\mathbb{N})}$ eine Multiplikation:

$$K^{(\mathbb{N})} \times K^{(\mathbb{N})} \longrightarrow K^{(\mathbb{N})}$$

$$(f, g) \longmapsto f \cdot g,$$

wobei $f \cdot g$ definiert ist durch

$$f \cdot g : i \mapsto \sum_{k=0}^i f(k)g(i-k).$$

Notation 14.1.3 Wir schreiben X für e_1 .

Lemma 14.1.4 $(K^{(\mathbb{N})}, +, \cdot)$ ist ein kommutativer Ring. \square

Beweis. Übung. Wir zeigen nur, dass e_0 ein Eins für die Multiplikation ist. Es gilt $(e_0 \cdot f)(i) = \sum_{k=0}^i e_0(k)f(i-k) = f(i)$. ■

Notation 14.1.5 Als e_0 ein Eins für die Multiplikation ist schreiben wir $e_0 = 1$. Wir schreiben auch X für e_1 .

Lemma 14.1.6 Es gilt $X^n = e_n$. \square

Beweis. Wir zeigen $X^n = e_n$ per Induktion nach n . Es gilt $e_0 = 1 = X^0$ (Konvention) und $e_1 = X$ (Definition von X). Angenommen $e_n = X^n$. Wir zeigen, dass $X_{n+1} = e_{n+1}$. Es gilt

$$X^{n+1}(i) = (X \cdot X^n)(i) = (e_1 \cdot e_n)(i) = \sum_{k=0}^i e_1(k)e_n(i-k) = e_n(i-1) = \delta_{i,n+1} = e_{n+1}(i).$$

Notation 14.1.7 1. Für $f \in K^{(\mathbb{N})}$ gilt

$$f = \sum_n f(n)e_n = \sum_n f(n)X^n.$$

Wir schreiben

$$f = \sum_n a_n X^n,$$

wobei $a_n \in K$ ist nicht nul nur für endlich viele $n \in \mathbb{N}$.

2. Wir schreiben $K[X]$ für $K^{(\mathbb{N})}$ und nennen $K[X]$ **Polynomring in X** . Elemente in $K[X]$ heißen **Polynome**.

Lemma 14.1.8 Es gilt $X^n \cdot X^m = X^{n+m}$. \square

Beweis. Übung. ■

Definition 14.1.9 Sei $f = \sum_n a_n X^n \in K[X]$.

1. Der **Grad** von f ist definiert als

$$\deg(f) = \begin{cases} -\infty & \text{fall } f = 0, \\ \max\{n \mid a_n \neq 0\} & \text{sonst.} \end{cases}$$

2. Das Polynom f heißt **normiert** falls $\deg(f) = n \geq 0$ und $a_n = 1$.

Lemma 14.1.10 Es gilt

1. $\deg(f \cdot g) = \deg(f) + \deg(g)$.
2. $\deg(f + g) \leq \max(\deg(f), \deg(g))$. □

Beweis. Übung. ■

Satz 14.1.11 (Polynomdivision) Sei $p \in K[X] \setminus \{0\}$. Für jedes $f \in K[X]$ gibt es eindeutig bestimmte Polynome q, r mit

$$f = p \cdot q + r$$

und $\deg(r) < \deg(p)$. □

Beweis. Schulkenntniss (oder Übung). ■

Definition 14.1.12 1. Sei $x \in K$. Man definiert $\text{ev}_x : K[X] \rightarrow K$ die **Einsetzung** von $f = \sum_n a_n X^n$ in x als

$$\text{ev}_x(f) = \sum_n a_n x^n \in K.$$

Man schreibt oft $f(x)$ für $\text{ev}_x(f)$.

2. $x \in K$ heißt **Nullstelle** von f wenn $f(x) = 0$.

Lemma 14.1.13 Sei $x \in K$. 1. ev_x ist eine Linearform auf $K[X]$.

2. Seien $f, g \in K[X]$, es gilt $\text{ev}_x(f \cdot g) = \text{ev}_x(f) \text{ev}_x(g)$, also $(fg)(x) = f(x)g(x)$. □

Lemma 14.1.14 Sei $a \in K$ eine Nullstelle von $f \in K[X] \setminus \{0\}$. Dann gibt es ein $q \in K[X]$ mit $f = q \cdot (X - a)$. □

Beweis. Sei $p = X - a$, es gibt $q, r \in K[X]$ mit $f = p \cdot q + r$ und $\deg(r) < \deg(p) = 1$ also $\deg(r) = 0$. Es gilt also $r = a_0 e_0 = a_0 1 = a_0$. Außerdem, gilt $0 = f(a) = p(a)q(a) + r(a) = 0 + a_0$. Daraus folgt $0 = a_0 = r$ und $f = q \cdot (X - a)$. ■

Lemma 14.1.15 Seien $f, g \in K[X]$ mit $f \cdot g = 0$. Dann gilt $f = 0$ oder $g = 0$. □

Beweis. Angenommen $f \neq 0$ und $g \neq 0$. Dann haben wir $\deg(f) = n \geq 0$ und $\deg(g) = m \geq 0$ und $\deg(f \cdot g) = \deg(f) + \deg(g) \geq 0$. Es folgt $f \cdot g \neq 0$, ein Widerspruch. ■

Satz 14.1.16 Sei $f \in K[X] \setminus \{0\}$. Angenommen f hat eine Nullstelle, dann gibt es paarweise verschiedene $a_1, \dots, a_k \in K$ und $m_1, \dots, m_k \geq 1$ in \mathbb{N} und $q \in K[X]$ mit

$$f = (X - a_1)^{m_1} \cdots (X - a_k)^{m_k} \cdot q$$

wobei $q \neq 0$ keine Nullstelle in K hat und a_1, \dots, a_k und m_1, \dots, m_k eindeutig bestimmt sind. □

Beweis. Sei a_1 eine Nullstelle von f . Dann gibt es (per Induktion auf $\deg(f)$) ein $m_1 \geq 1$ und ein $q_1 \in K[X]$ mit $q_1(a_1) \neq 0$ und

$$f = (X - a_1)^{m_1} \cdot q_1.$$

Wir zeigen, dass q_1 und m_1 eindeutig bestimmt sind. Angenommen $f = (X - a_1)^{m_1} \cdot q_1 = (X - a_1)^{m'_1} \cdot q'_1$ mit $q_1(a_1) \neq 0 \neq q'_1(a_1)$. Ohne Beschränkung können wir annehmen, dass $m_1 \geq m'_1$. Es folgt

$$(X - a_1)^{m'_1} ((X - a_1)^{m_1 - m'_1} q_1 - q'_1) = 0.$$

Wegen $(X - a_1)^{m'_1} \neq 0$ gilt $(X - a_1)^{m_1 - m'_1} q_1 - q'_1 = 0$. Für $m_1 > m'_1$ gilt $0 = \text{ev}_{a_1}((X - a_1)^{m_1 - m'_1} q_1 - q'_1) = -q'_1(a_1)$, ein Widerspruch. Es gilt also $m_1 = m'_1$. Dann gilt $(X - a_1)^{m_1 - m'_1} = 1$ und es folgt $q_1 = q'_1$.

Es gilt $\deg(q_1) < \deg(f)$ und per Induktion gibt es eindeutig bestimmte a_2, \dots, a_k und $m_2, \dots, m_k \geq 1$ in \mathbb{N} und $q \in K[X]$ mit

$$q_1 = (X - a_2)^{m_2} \cdots (X - a_k)^{m_k} \cdot q.$$

Definition 14.1.17 SSei $f \in K[X] \setminus \{0\}$. Das Polynom f **zerfällt über K vollständig in Linearfaktoren**, falls es $\lambda \in K$ und paarweise verschiedene $a_1, \dots, a_k \in K$ und $m_1, \dots, m_k \geq 1$ in \mathbb{N} gibt mit

$$f = \lambda(X - a_1)^{m_1} \cdots (X - a_k)^{m_k}.$$

Dann sind a_1, \dots, a_k die Nullstellen von f .

Beispiel 14.1.18 1. Sei $K = \mathbb{R}$ und $f = X^2 + 1$. Dann zerfällt f nicht in Linearfaktoren über \mathbb{R} . Für $K = \mathbb{C}$ gilt aber

$$f = X^2 + 1 = (X + i)(X - i).$$

1. Sei $K = \mathbb{Q}$ und $f = X^2 - 2$. Dann zerfällt f nicht in Linearfaktoren über \mathbb{Q} . Für $K = \mathbb{R}$ gilt aber

$$f = X^2 - 2 = (X + \sqrt{2})(X - \sqrt{2}).$$

Definition 14.1.19 Ein Körper ist **algebraisch abgeschlossen** falls jedes $f \in K[X] \setminus \{0\}$ über K in Linearfaktoren zerfällt.

Satz 14.1.20 (Fundamentalsatz der Algebra) Der Körper \mathbb{C} ist algebraisch abgeschlossen. □

Beweis. Wird erst in der Vorlesung Algebra bewiesen. ■

14.2 Das charakteristische Polynom eines Endomorphismus

Sei V ein K -Vektorraum mit $\dim V < \infty$.

Definition 14.2.1 Sei $f : V \rightarrow V$ ein Endomorphismus. Das **charakteristische Polynom** von f ist

$$\chi_f = \det(X\mathrm{Id}_V - f).$$

Beispiel 14.2.2 1. Sei $V = \mathbb{R}^2$ und sei $f = \mathrm{Id}_V$. Dann gilt

$$\chi_f = \det(X\mathrm{Id}_V - \mathrm{Id}_V) = \det \begin{pmatrix} X-1 & 0 \\ 0 & X-1 \end{pmatrix} = (X-1)^2 = X^2 - 2X + 1.$$

2. Sei $V = \mathbb{R}^2$ und sei $f(x, y) = (y, x)$. Dann gilt

$$\chi_f = \det(X\mathrm{Id}_V - f) = \det \begin{pmatrix} X & 1 \\ 1 & X \end{pmatrix} = X^2 - 1 = (X-1)(X+1).$$

3. Sei $V = \mathbb{R}^2$ und sei $f(x, y) = (y, -x)$. Dann gilt

$$\chi_f = \det(X\mathrm{Id}_V - f) = \det \begin{pmatrix} X & -1 \\ 1 & X \end{pmatrix} = X^2 + 1.$$

15 Eigenwerte, Eigenvektoren und Diagonalisierbarkeit

15.1 Eigenwerte und Eigenvektoren

Definition 15.1.1 1. Sei $f : V \rightarrow V$ ein Endomorphismus von V . Ein Vektor $v \in V \setminus \{0\}$ heißt **Eigenvektor mit Eigenwerte** $\lambda \in K$ falls gilt

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

2. Sei $A \in M_n(K)$ eine Matrix. Ein Vektor $v \in K^n \setminus \{0\}$ heißt **Eigenvektor mit Eigenwerte** $\lambda \in K$ falls gilt

$$Av = \lambda v.$$

Lemma 15.1.2 Sei $f : V \rightarrow V$ ein Endomorphismus und sei \mathcal{B} eine Basis von V . Sei v ein Eigenvektor von f mit Eigenwerte λ , dann ist $c_{\mathcal{B}}(v)$ ein Eigenvektor von $A = \text{Mat}_{\mathcal{B}}(f)$ mit Eigenwerte λ . \square

Beweis. Als $c_{\mathcal{B}}$ ein Isomorphismus ist, gilt $c_{\mathcal{B}}(v) \neq 0$ für $v \neq 0$. Außerdem wissen wir, dass $c_{\mathcal{B}}f = Ac_{\mathcal{B}}$. Daraus folgt $Ac_{\mathcal{B}}(v) = c_{\mathcal{B}}(f(v)) = c_{\mathcal{B}}(\lambda v) = \lambda c_{\mathcal{B}}(v)$. \blacksquare

Beispiel 15.1.3 1. Sei A eine diagonale Matrix mit $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ auf der Diagonale. Dann ist e_i , der i -te Basis Vektor der kanonischen Basis ein Eigenvektor für A mit Eigenwerte λ_i :

$$Ae_i = \lambda_i e_i.$$

2. Sei A die Drehung um α in \mathbb{R}^2 . Also

$$A = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}.$$

Die Matrix A hat einen Eigenvektor genau dann wenn $\alpha = 0$ oder $\alpha = \pi$.

3. Sei $A \in M_n(K)$ eine **nilpotente** Matrix *i.e.* $A^N = 0$ für ein $N \in \mathbb{N}$. Sei λ eine Eigenwerte von A . Dann gilt $\lambda = 0$: sei $v \neq 0$ mit $Av = \lambda v$. Es gilt $0 = A^N v = \lambda^N v$. Daraus folgt $\lambda^N = 0$ und $\lambda = 0$.

Definition 15.1.4 Sei $\lambda \in K$ und $f : V \rightarrow V$ eine Endomorphismus. Der **Eigenraum** $E(f, \lambda)$ zu f und λ ist

$$E(f, \lambda) = \{v \in V \mid f(v) = \lambda v\}.$$

Lemma 15.1.5 Es gilt $E(f, \lambda) = \text{Ker}(\lambda \text{Id}_V - f)$. □

Beweis. Sei $v \in E(f, \lambda)$, dann gilt $f(v) = \lambda v$ also $(\lambda \text{Id}_V - f)(v) = \lambda v - \lambda v = 0$. Sei $v \in \text{Ker}(\lambda \text{Id}_V - f)$, dann gilt $(\text{Id}_V - f)(v) = 0$ also $\lambda v - f(v) = 0$. ■

Korollar 15.1.6 $E(f, \lambda)$ ist ein Unterraum von V .

Korollar 15.1.7 Ein Skalar λ ist eine Eigenwerte von f genau dann, wenn $\text{Ker}(\text{Id}_V - f) = E(f, \lambda) \neq 0$.

Korollar 15.1.8 Die Eigenwerte von f sind die Nullstellen von χ_f .

Beweis. Sei λ eine Eigenwerte von f . Dann gilt $\text{Ker}(\lambda \text{Id}_V - f) \neq 0$ also $\lambda \text{Id}_V - f$ ist nicht injektiv und $\chi_f(\lambda) = \det(\lambda \text{Id}_V - f) = 0$. Umgekehrt, für λ eine Nullstelle des charakteristische Polynom gilt $\det(\lambda \text{Id}_V - f) = 0$. Daraus folgt, dass $\lambda \text{Id}_V - f$ nicht bijektiv ist und also nicht injektiv. Es gilt $\text{Ker}(\lambda \text{Id}_V - f) \neq 0$ und λ ist eine Eigenwerte. ■

Satz 15.1.9 1. Für $\lambda \neq \mu$ gilt $E(f, \lambda) \cap E(f, \mu) = 0$.

2. Systeme von Eigenvektoren mit paarweise verschiedene Eigenwerte von f sind linear unabhängig. □

Beweis. 1. Sei $v \in E(f, \lambda) \cap E(f, \mu)$. Es gilt $f(v) = \lambda v$ und $f(v) = \mu v$. Daraus folgt $(\lambda - \mu)v = 0$. Wegen $\mu \neq \lambda$, gilt $v = 0$.

2. Sei (v_1, \dots, v_k) ein System von Eigenvektoren mit paarweise verschiedene Eigenwerte $\lambda_1, \dots, \lambda_n$. Angenommen (v_1, \dots, v_k) sei linear abhängig. Sei t minimal mit der Eigenschaft: es gibt Skalare $x_{i_1}, \dots, x_{i_t} \in K \setminus \{0\}$ mit

$$x_{i_1} v_{i_1} + \dots + x_{i_t} v_{i_t} = 0.$$

Es gilt

$$0 = f(x_{i_1} v_{i_1} + \dots + x_{i_t} v_{i_t}) = \lambda_{i_1} x_{i_1} v_{i_1} + \dots + \lambda_{i_t} x_{i_t} v_{i_t}.$$

Daraus folgt

$$\begin{aligned} 0 &= (\lambda_{i_1} - \lambda_{i_t}) x_{i_1} v_{i_1} + \dots + (\lambda_{i_{t-1}} - \lambda_{i_t}) x_{i_{t-1}} v_{i_{t-1}} + (\lambda_{i_t} - \lambda_{i_t}) x_{i_t} v_{i_t} \\ 0 &= (\lambda_{i_1} - \lambda_{i_t}) x_{i_1} v_{i_1} \dots (\lambda_{i_{t-1}} - \lambda_{i_t}) x_{i_{t-1}} v_{i_{t-1}}. \end{aligned}$$

Seien $y_{i_j} = (\lambda_{i_j} - \lambda_{i_t}) x_{i_j} \in K \setminus \{0\}$. Es gilt

$$y_{i_1} v_{i_1} + \dots + y_{i_{t-1}} v_{i_{t-1}} = 0.$$

Ein Widerspruch zur Minimalität von t . ■

Korollar 15.1.10 Sei $n = \dim V$ und $f \in \text{End}(V)$. Dann hat f höchstens n Eigenwerte.

Korollar 15.1.11 Sei $f \in \text{End}(V)$. Dann gilt

$$\sum_{\lambda \in K} E(f, \lambda) = \bigoplus_{\lambda \in K} E(f, \lambda).$$

Beweis. Für $\lambda_1, \dots, \lambda_k$ paarweise verschieden und $v_{\lambda_i} \in E(f, \lambda_i)$ mit $\sum_i v_{\lambda_i} = 0$ gilt $v_{\lambda_i} = 0$ für alle i . ■

15.2 Diagonalisierbare Matrizen

Definition 15.2.1 Eine Matrix $A = (a_{i,j}) \in M_n(K)$ heißt diagonal wenn $a_{i,j} = 0$ gilt für alle $i \neq j$.

Definition 15.2.2 Eine Matrix $A \in M_n(K)$ ist **diagonalisierbar** falls sie ähnlich zu einer Diagonalmatrix ist i.e. falls es $Q \in \text{GL}_n(K)$ gibt so dass $Q A Q^{-1}$ eine Diagonalmatrix ist.

Satz 15.2.3 Sei $A \in M_n(K)$. Dann sind folgende Aussagen äquivalent:

1. A ist diagonalisierbar.
2. Es gibt eine Basis \mathcal{B} von K^n , welche aus Eigenvektoren von A besteht.
3. $\sum_{\lambda \in K} \dim E(A, \lambda) = n$.
4. $\bigoplus_{\lambda \in K} E(A, \lambda) = K^n$. □

Beweis. Wir wissen schon, dass 4 und 3 äquivalent sind (weil die Gleichung

$$\bigoplus_{\lambda \in K} E(A, \lambda) = \sum_{\lambda \in K} \dim E(A, \lambda)$$

gilt).

(1. \Rightarrow 2.) Sei $Q \in \text{GL}_n(K)$ und D eine Diagonalmatrix mit $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ auf der diagonalen und so dass $D = Q A Q^{-1}$. Sei (e_1, \dots, e_n) die kanonische Basis von K^n und sei $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$ mit $v_i = Q^{-1} e_i$. Dann gilt

$$A v_i = (Q^{-1} D Q)(Q^{-1} e_i) = Q^{-1} D e_i = Q^{-1} \lambda_i e_i = \lambda_i v_i.$$

Die Basis \mathcal{B} besteht aus Eigenvektoren von A .

(2. \Rightarrow 1.) Sei \mathcal{B} eine Basis welche aus Eigenvektoren von A von Eigenwerte $\lambda_1, \dots, \lambda_n$) besteht. Die Matrix A und die Matrix $D = \text{Mat}_{\mathcal{B}}(A)$ sind ähnlich. Es gilt aber

$$D = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \lambda_n \end{pmatrix}.$$

(2. \Rightarrow 4.) Sei \mathcal{B} eine Basis von Eigenvektoren von A . Diese Vektoren sind in $\oplus_{\lambda \in K} E(A, \lambda)$ enthalten. Es gilt also $\dim(\oplus_{\lambda \in K} E(A, \lambda)) \geq n$.

(4. \Rightarrow 2.) Sei \mathcal{B}_λ eine Basis von $E(f, \lambda)$. Dann ist $\cup_{\lambda \in K} \mathcal{B}_\lambda$ eine Basis von K^n welche aus Eigenvektoren von A besteht. ■

Beispiel 15.2.4 Sei $A \in M_2(\mathbb{R})$ mit

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

Es gilt $\chi_A = (X - \cos \alpha)(X + \cos \alpha) - \sin^2 \alpha = X^2 - 1$. Die Nullstellen von χ_A sind 1 und -1 . Die Eigenräume von A sind

$$E(A, 1) = \left\langle \begin{pmatrix} 1 + \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{pmatrix} \right\rangle \text{ und } E(A, -1) = \left\langle \begin{pmatrix} \cos \alpha - 1 \\ \sin \alpha \end{pmatrix} \right\rangle.$$

Die Matrix A ist diagonalisierbar und ähnlich zu der Matrix

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

Definition 15.2.5 Sei $n = \dim V$. Ein Endomorphismus $f \in \text{End}(V)$ ist **diagonalisierbar** falls es eine Basis \mathcal{B} von V gibt mit $\text{Mat}_{\mathcal{B}}(f)$ eine Diagonalmatrix.

Lemma 15.2.6 Sei $f \in \text{End}(V)$ und sei \mathcal{B} eine (beliebige) Basis von V . Dann ist f diagonalisierbar genau dann, wenn $\text{Mat}_{\mathcal{B}}(f)$ diagonalisierbar ist. □

Beweis. Basiswechsel. ■

Satz 15.2.7 Sei $n = \dim V$ und $f \in \text{End}(V)$. Dann sind folgende Aussage äquivalent:

1. f ist diagonalisierbar.
2. Es gibt eine Basis \mathcal{B} von V welche aus Eigenvektoren von f besteht. □

Beweis. (2. \Rightarrow 1.) Sei \mathcal{B} eine Basis \mathcal{B} von V welche aus Eigenvektoren von f besteht. Dann ist $\text{Mat}_{\mathcal{B}}(f)$ eine Diagonalmatrix.

(1. \Rightarrow 2.) Sei \mathcal{B} eine Basis mit $\text{Mat}_{\mathcal{B}}(f)$ eine Diagonalmatrix. Dann sind die Vektoren aus \mathcal{B} Eigenvektoren. ■

Lemma 15.2.8 Sei $n = \dim V$ und $f \in \text{End}(V)$. Hat f genau n verschiedene Eigenwerte, dann ist f diagonalisierbar. □

Beweis. Seien $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ die n verschiedenen Eigenwerte von f . Es gilt $\dim E(f, \lambda_i) \geq 1$ für alle i . Daraus folgt $\sum_{i=1}^n \dim E(f, \lambda_i) \geq n$ und $V = \oplus_{i=1}^n E(f, \lambda_i)$. ■

Beispiel 15.2.9 Sei $A \in M_3(\mathbb{R})$ mit

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

Es gilt

$$\chi_A = \det \begin{pmatrix} X & -1 & -1 \\ 2 & X-3 & -2 \\ 0 & 0 & X-3 \end{pmatrix} = (X-1)(X-2)(X-3).$$

Die Matrix A hat also drei verschiedene Eigenwerte 1, 2 und 3. Die Matrix A ist also diagonalisierbar. Sei

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

Es gilt

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

15.3 Eigenwerte und das charakteristische Polynom

Zur Erinnerung haben wir:

Satz 15.3.1 Sei $A \in M_n(K)$ und sei $f \in \text{End}(V)$. Es gilt

$$\{\text{Eigenwerte von } A\} = \{\text{Nullstellen von } \chi_A\} \text{ und}$$

$$\{\text{Eigenwerte von } f\} = \{\text{Nullstellen von } \chi_f\}.$$

Beweis. Folgt aus Korollar 15.1.7. ■

Satz 15.3.2 Ähnliche Matrizen haben das gleiche charakteristische Polynom. \square

Beweis. Seien A und B ähnlich. Dann gibt es Q mit $B = QAQ^{-1}$. Es gilt auch $XI_n = QXI_nQ^{-1}$. Daraus folgt

$$\chi_B = \det(XI_n - B) = \det(QXI_nQ^{-1} - QAQ^{-1}) = \det(Q)\chi_A\det(Q)^{-1} = \chi_A.$$

Definition 15.3.3 Sei $p \in K[X]$ und $\lambda \in K$. Es gibt $m(p, \lambda) \in \mathbb{N}$ und $q \in K[X]$ mit

$$p = (X - \lambda)^{m(p, \lambda)} \cdot q.$$

q und $m(p, \lambda)$ sind eindeutig bestimmt. Die natürlische Zahl $m(p, \lambda)$ heißt die **Viel-fachheit der Nullstelle λ von p** .

Bemerkung 15.3.4 Es gilt $m(p, \lambda) \neq 0 \Leftrightarrow \lambda$ ist eine Nullstelle von p .

Satz 15.3.5 Sei $n = \dim V$ und sei $f \in \text{End}(V)$. Für jedes $\lambda \in K$ gilt dann

$$\dim E(f, \lambda) \leq m(\chi_f, \lambda).$$

Beweis. Sei $r = \dim E(f, \lambda)$ und sei (v_1, \dots, v_r) eine Basis von $E(f, \lambda)$. Wir ergänzen (v_1, \dots, v_r) in eine Basis $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_r, v_{r+1}, \dots, v_n)$. Dann gilt

$$\text{Mat}_{\mathcal{B}}(X\text{Id}_V - f) = \det \begin{pmatrix} (X - \lambda)I_r & \star \\ 0 & A' \end{pmatrix}$$

wobei $A' \in M_{n-r}(K)$. Es gilt $\chi_f = (X - \lambda)^r \chi_{A'}$. Daraus folgt $m(\chi_f, \lambda) \geq r = \dim E(f, \lambda)$. \blacksquare

Korollar 15.3.6 Sei $n = \dim V$ und sei $f \in \text{End}(V)$. Das Endomorphismus f ist diagonalisierbar genau dann, wenn, χ_f vollständig in Linearfaktoren zerfällt und für jedes $\lambda \in K$, gilt $\dim E(f, \lambda) = m(\chi_f, \lambda)$.

Beweis. Für f diagonalisierbar zerfällt χ_f vollständig in Linearfaktoren und es gilt $\sum_{\lambda} \dim E(f, \lambda) = n = \sum_{\lambda} m(\chi_f, \lambda)$. Daraus folgt $\dim E(f, \lambda) = m(\chi_f, \lambda)$ für jedes λ .

Umgekehrt, falls χ_f vollständig in Linearfaktoren zerfällt und falls für jedes $\lambda \in K$, gilt $\dim E(f, \lambda) = m(\chi_f, \lambda)$, gilt $\sum_{\lambda} \dim E(f, \lambda) = \sum_{\lambda} m(\chi_f, \lambda) = n$ und f ist diagonalisierbar. \blacksquare

15.4 Trigonalisierbarkeit

Definition 15.4.1 1. Eine Matrix $A = (a_{i,j}) \in M_n(K)$ ist eine obere Dreiecksmatrix wenn $a_{i,j} = 0$ für $i > j$.

2. Sei $n = \dim V$ und $f \in \text{End}(V)$. Das Endomorphismus f heißt **trigonalisierbar** falls es eine Basis \mathcal{B} gibt mit $\text{Mat}_{\mathcal{B}}(f)$ eine obere Dreiecksmatrix.

Satz 15.4.2 Sei $f \in \text{End}(V)$. Die folgende Aussagen sind äquivalent:

1. f ist trigonalisierbar.
2. χ_f zerfällt über K vollständig in Linearfaktoren. □

Beweis. (1. \Rightarrow 2.). Sei \mathcal{B} eine Basis mit $A = \text{Mat}_{\mathcal{B}}(f)$ eine obere Dreiecksmatrix. Es gilt

$$A = \begin{pmatrix} \lambda_1 & & \star \\ & \ddots & \\ 0 & & \lambda_n \end{pmatrix} \text{ und } \chi_f = \chi_A = \det \begin{pmatrix} X - \lambda_1 & & \star \\ & \ddots & \\ 0 & & X - \lambda_n \end{pmatrix}.$$

Daraus folgt $\chi_f = (X - \lambda_1) \cdots (X - \lambda_n)$.

(2. \Rightarrow 1.) Per Induktion nach n . Für $n = 1$ sind beide Aussage wahr.

Es gilt $\chi_f = (X - \lambda_1) \cdots (X - \lambda_n)$. Daraus folgt, dass λ_1 eine Eigenwerte von f ist. Sei v_1 ein Eigenvektor von f mit der Eigenwerte λ_1 . Wir ergänzen v_1 in einer Basis $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$. Sei $A = \text{Mat}_{\mathcal{B}}(f)$. Es gilt

$$A = \begin{pmatrix} \lambda_1 & \star \\ 0 & A' \end{pmatrix}$$

wobei $A' \in M_{n-1}(K)$. Es gilt auch

$$\chi_f = \chi_A = \det \begin{pmatrix} X - \lambda_1 & \star \\ 0 & XI_{n-1} - A' \end{pmatrix} = (X - \lambda_1) \chi_{A'}.$$

Daraus folgt, dass $\chi_{A'} = (X - \lambda_2) \cdots (X - \lambda_n)$ vollständig über K in Linearfaktoren zerfällt. Sei $W = \langle v_2, \dots, v_n \rangle$ und $\mathcal{B}' = (v_2, \dots, v_n)$. Dann ist \mathcal{B}' eine Basis von W . Sei $g \in \text{End}(W)$ mit $\text{Mat}_{\mathcal{B}'}(g) = A'$. Es gilt $\chi_g = \chi_{A'}$. Nach Induktion, gibt es eine Basis \mathcal{C}' von W mit $T = \text{Mat}_{\mathcal{C}'}(g)$ eine obere Dreiecksmatrix. Sei $Q' = \text{Mat}_{\mathcal{C}', \mathcal{B}'}(\text{Id}_W)$. Es gilt

$$QA'Q^{-1} = T.$$

Sei

$$Q = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & Q' \end{pmatrix}.$$

Es gilt $\det(Q) = \det(Q')$ also ist Q invertierbar. Sei $\mathcal{C} = (Q^{-1}v_1, \dots, Q^{-1}v_n)$. Es gilt $Q = \text{Mat}_{\mathcal{C}, \mathcal{B}}(\text{Id}_V)$. Daraus folgt

$$\text{Mat}_{\mathcal{C}}(f) = Q A Q^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & Q' A' Q^{-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & T \end{pmatrix}.$$

Die Matrix $\text{Mat}_{\mathcal{C}}(f)$ ist eine obere Dreiecksmatrix. ■

Korollar 15.4.3 Falls K algebraisch abgeschlossen ist, falls also jedes Polynom in $K[X] \setminus \{0\}$ über K in Linearfaktoren zerfällt, dann ist jedes $f \in \text{End}(V)$ mit $\dim V < \infty$ trigonalisierbar.

15.5 Minimal Polynom

Sei V mit $\dim V = n$ und sei $f \in \text{End}(V)$.

Definition 15.5.1 Sei $\Phi : K[X] \rightarrow \text{End}(V)$ definiert durch

$$\Phi(P) = \sum_{k=0}^n a_k f^k, \text{ wobei } P = \sum_{k=0}^n a_k X^k \in K[X]$$

und f^n die n -malige Komposition von f mit sich selbst ist. Man schreibt $\Phi(P) = P(f)$.

Lemma 15.5.2 1. Die Abbildung Φ ist linear.

2. Die Abbildung Φ ist ein Ringhomomorphismus (i.e. $\Phi(PQ) = \Phi(P)\Phi(Q)$). □

Beweis. Übung. ■

Lemma 15.5.3 Es gibt ein Polynom $P \in K[X] \setminus \{0\}$ mit $\Phi(P) = P(f) = 0$ i.e. $\text{Ker}\Phi \neq 0$. □

Beweis. Es gilt $\dim K[X] = \infty > \dim \text{End}(V) = n^2$. Nach dem Rangsatz ist $\text{Ker}(\Phi) \neq 0$.

Zweiter Beweis: Das System $(\text{Id}_V, f, f^2, \dots, f^{n^2})$ hat $n^2 + 1$ Vektoren aus $\text{End}(V)$ und es gilt $\dim \text{End}(V) = n^2$. Daraus folgt, dass linear abhängig ist, also es gibt Skalare a_0, \dots, a_{n^2} welche nicht alle nul sind mit

$$a_0 f^0 + \dots + a_{n^2} f^{n^2} = 0.$$

Für $P = a_0 + \dots + a_{n^2} X^{n^2} \neq 0$ gilt also $\Phi(P) = P(f) = 0$. ■

Definition 15.5.4 Sei $n = \dim V$ und $f \in \text{End}(V)$. Der **Annulator von f** ist

$$\text{Ann}(f) = \{P \in K[X] \mid \Phi(P) = P(f) = 0\} = \text{Ker}\Phi.$$

Satz 15.5.5 Sei $n = \dim V$ und $f \in \text{End}(V)$. Dann existiert genau ein normiertes Polynom $\mu_f \in K[X]$ mit

1. $\mu_f(f) = 0$
2. Ist $P \in K[X]$ mit $P(f) = 0$, so ist μ_f ein Teiler von P . □

Beweis. uerst zeigen wir die Existenz von μ_f . Sei $P \in K[X] \setminus \{0\}$ mit $P(f) = 0$ so dass $\deg(\mu_f)$ minimal ist. Sei $n = \deg(P)$ und $P = a_n X^n + \cdots + a_0$. Es gilt $a_n \neq 0$ und wir setzen $\mu_f = \frac{1}{a_n} P$. Das Polynom μ_f ist normiert und es gilt $\mu_f(f) = 0$.

Sei P mit $P(f) = 0$. Wir schreiben $P = q\mu_f + r$ mit $\deg(r) < \deg \mu_f$. Es gilt $0 = P(f) = q(f)\mu_f(f) + r(f) = r(f)$. Nach Minimalität gilt also $r = 0$ und μ_f ist ein Teiler von P .

Wir zeigen jetzt die Eindeutigkeit. Sei μ'_f mit Eigenschaften 1. und 2. Dann ist μ_f ein Teiler von μ'_f und μ'_f ist ein Teiler von μ_f . Daraus folgt, dass $\mu_f = \lambda \mu'_f$ für $\lambda \in K$. Weil beide Polynome normiert sind, gilt $\mu_f = \mu'_f$. ■

Lemma 15.5.6 Sei $n = \dim V$ und $f \in \text{End}(V)$.

1. Sei λ eine Eigenwerte von f . Es gilt $\mu_f(\lambda) = 0$.
2. Seien $\lambda_1, \dots, \lambda_r$ die Eigenwerte von f . Das Polynom $(X - \lambda_1) \cdots (X - \lambda_r)$ teilt μ_f . □

Beweis. 1. Sei v ein Eigenvektor mit Eigenwerte λ . Es gilt $f(v) = \lambda v$ und $v \neq 0$. Es gilt auch $\mu_f(f) = 0$. Daraus folgt $\mu_f(f)(v) = 0$. Wir schreiben $\mu_f = X^n + \cdots + a_0$. Es gilt

$$0 = \mu_f(f)(v) = f^n(v) + \cdots + a_0 v = \lambda^n v + \cdots + a_0 v = \mu_f(\lambda) v.$$

Weil $v \neq 0$, gilt $\mu_f(\lambda) = 0$.

2. Folgt aus 1. ■

Satz 15.5.7 Sei $n = \dim V$ und $f \in \text{End}(V)$. Dann sind folgende Aussagen äquivalent:

1. f ist diagonalisierbar.
2. μ_f zerfällt vollständig in Linearfaktoren und besitzt nur einfache Nullstellen. □

Beweis. (1. \Rightarrow 2.) Seien $\lambda_1, \dots, \lambda_r$ die Eigenwerte von f . Es gilt

$$V = \bigoplus_{i=1}^r E(f, \lambda_i).$$

Sei $v \in V$. Dann gibt es eindeutig bestimmte $v_i \in E(f, \lambda_i)$ mit

$$v = v_1 + \dots + v_r.$$

Wir zeigen, dass $(f - \lambda_1 \text{Id}_V) \circ \dots \circ (f - \lambda_r \text{Id}_V) = 0$. Sei $g = (f - \lambda_1 \text{Id}_V) \circ \dots \circ (f - \lambda_r \text{Id}_V)$. Es gilt für alle i :

$$g = (f - \lambda_1 \text{Id}_V) \circ \dots \circ (\widehat{f - \lambda_i \text{Id}_V}) \circ \dots \circ (f - \lambda_r \text{Id}_V) \circ (f - \lambda_i \text{Id}_V).$$

Es gilt auch $f(-\lambda_i \text{Id}_V)(v_i) = 0$. Daraus folgt $g(v_i) = 0$ für alle i und $g(v) = 0$. Daraus folgt, dass μ_f teilt $(X - \lambda_1) \cdots (X - \lambda_r)$. Aus dem obigen Lemma folgt, dass $(X - \lambda_1) \cdots (X - \lambda_r)$ teilt μ_f . Daraus folgt $\mu_f = (X - \lambda_1) \cdots (X - \lambda_r)$

(2. \Rightarrow 1.) Per Induktion nach n . Für $n = 1$ sind alle Endomorphismen diagonalisierbar. Sei also $n > 1$ und sei $\mu_f = (X - \lambda_1) \cdots (X - \lambda_r)$ mit λ_i paarweise verschieden.

Lemma 15.5.8 $V = \text{Ker}(f - \lambda_1 \text{Id}_V) \oplus \text{Im}(f - \lambda_1 \text{Id}_V)$. □

Beweis. Wir schreiben $(X - \lambda_2) \cdots (X - \lambda_r) = (X - \lambda_1)q + r$ mit $\deg(r) < 1$ also $r \in K$ ist ein Skalar. Es gilt $r \neq 0$ weil $X - \lambda_1$ nicht $(X - \lambda_2) \cdots (X - \lambda_r)$ teilt. Sei $v \in V$, es gilt

$$v = \frac{1}{r}(f - \lambda_2 \text{Id}_V) \circ \dots \circ (f - \lambda_r \text{Id}_V)(v) - \frac{1}{r}(f - \lambda_1 \text{Id}_V) \circ q(f)(v) = v' + v''$$

. Es gilt $(f - \lambda_r \text{Id}_V)(v') = (f - \lambda_1 \text{Id}_V) \circ \dots \circ (f - \lambda_r \text{Id}_V)(v) = \mu_f(f)(v) = 0$ also $v' \in \text{Ker}(f - \lambda_1 \text{Id}_V)$. Es gilt $v'' = (f - \lambda_1 \text{Id}_V)(\frac{1}{r}q(f)(v)) \in \text{Im}(f - \lambda_1 \text{Id}_V)$. Es gilt also

$$V = \text{Ker}(f - \lambda_1 \text{Id}_V) + \text{Im}(f - \lambda_1 \text{Id}_V).$$

Nach dem Rangsatz gilt $\dim V = \dim \text{Ker}(f - \lambda_1 \text{Id}_V) + \dim \text{Im}(f - \lambda_1 \text{Id}_V)$. Daraus folgt $\dim(\text{Ker}(f - \lambda_1 \text{Id}_V) \cap \text{Im}(f - \lambda_1 \text{Id}_V)) = 0$ und die Summe ist eine direkte Summe. ■

Sei $W = \text{Im}(f - \lambda_1 \text{Id}_V)$. Wir zeigen $f(W) \subset W$. Sei $w = f(v) - \lambda_1 v$. Dann gilt $f(w) = f(f(v) - \lambda_1 v) = f(f(v)) - \lambda_1 f(v) = (f - \lambda_1 \text{Id}_V)(f(v))$. Sei $g = f|_W$. Es gilt $\mu_f(g) = 0$. Daraus folgt, dass μ_g teilt μ_f und dass μ_g zerfällt vollständig und besitzt nur einfache Nullstellen. Nach Induktion gilt g ist diagonalisierbar. Sei \mathcal{B}_2 eine Basis von Eigenvektoren von g . Diese Vektoren sind auch Eigenvektoren von f . Sei \mathcal{B}_1 eine Basis von $\text{Ker}(f - \lambda_1 \text{Id}_V)$. Diese Vektoren sind Eigenvektoren von f . Daraus folgt, dass $\mathcal{B} = \mathcal{B}_1 \cup \mathcal{B}_2$ eine Basis von Eigenvektoren von f ist. Also ist f diagonalisierbar. ■

15.6 Satz von Cayley-Hamilton

Satz 15.6.1 (Satz von Cayley-Hamilton) Es gilt $\Phi(\chi_f) = \chi_f(f) = 0$. □

Beweis. Wir zeigen, dass $\Phi(\chi_f)(v) = \chi_f(f)(v) = 0$ für alle $v \in V$. Für $v = 0$ ist diese Gleichung trivial. Sei $v \neq 0$. Das System $(v, f(v), \dots, f^n(v))$ hat $n+1$ Vektoren und ist also linear abhängig. Sei r minimal mit $(v, f(v), \dots, f^r(v))$ linear abhängig. Das System $(v, f(v), \dots, f^{r-1}(v))$ ist linear unabhängig und es gibt Skalare a_0, \dots, a_{r-1} mit

$$f^r(v) = a_0v + \dots + a_{r-1}f^{r-1}(v).$$

Sei $W = \langle v, f(v), \dots, f^{r-1}(v) \rangle$. Das System $\mathcal{B}_W = (v, f(v), \dots, f^{r-1}(v)) = (v_0, \dots, v_{r-1})$ ist eine Basis von W und es gilt $f(v_k) = f(f^k(v)) = f^{k+1}(v) = v_{k+1} \in W$ für $k < r-1$ und $f(v_{r-1}) = f^r(v) = a_0v + \dots + a_{r-1}f^{r-1}(v) \in W$. Es gilt also $f(W) \subset W$. Sei $f|_W : W \rightarrow W$ die Einschränkung von f auf W . Es gilt

$$A' = \text{Mat}_{\mathcal{B}_W}(f|_W) = \begin{pmatrix} 0 & \cdots & \cdots & 0 & a_0 \\ 1 & \ddots & & \vdots & a_1 \\ 0 & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & a_{r-1} \end{pmatrix}.$$

Nach Übungsblatt 13 gilt $\chi_{A'} = X^r - a_0 - \dots - a_{r-1}X^{r-1}$. Es gilt also

$$\chi_{A'}(f)(v) = (f^r - a_0 + \dots - a_{r-1}f^{r-1})(v) = f^r(v) - a_0v - \dots - a_{r-1}f^{r-1}(v) = 0.$$

Wir ergänzen \mathcal{B}_W in eine Basis \mathcal{B} von V . Es gilt

$$A = \text{Mat}_{\mathcal{B}}(f) = \begin{pmatrix} A' & \star \\ 0 & A'' \end{pmatrix}$$

wobei $A'' \in M_{n-r}(K)$. Es gilt $\chi_f = \chi_A = \chi_{A'}\chi_{A''} = \chi_{A''}\chi_{A'}$. Es gilt (weil Φ ein Ringhomomorphismus ist)

$$\chi_f(f) = \Phi(\chi_f) = \chi_{A''}(f)\chi_{A'}(f).$$

Daraus folgt $\chi_f(f)(v) = \chi_{A''}(f)(\chi_{A'}(f)(v)) = \chi_{A''}(f)(0) = 0$. ■

Korollar 15.6.2 Es gilt μ_f ist ein Teiler von χ_f .

Korollar 15.6.3 μ_f und χ_f haben die gleiche Nullstelle. Seien λ eine solche Nullstelle, es gilt

$$m(\mu_f, \lambda) \leq m(\chi_f, \lambda).$$

16 Symmetrische reelle Matrizen

16.1 Komplexe Konjugation

Sei \mathbb{R} die Menge aller reellen Zahlen und \mathbb{C} die Menge aller komplexen Zahlen. Jede komplexe Zahl $z \in \mathbb{C}$ kann als Summe

$$z = x + iy$$

geschrieben werden, wobei $x, y \in \mathbb{R}$ und $i = \sqrt{-1}$ ist eine Nullstelle des Polynoms $X^2 + 1$. Die reellen Zahlen x, y sind eindeutig bestimmt.

Die komplexe Konjugation ist die Abbildung $\mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ definiert durch $z \mapsto \bar{z}$ wobei, für $z = x + iy$, gilt $\bar{z} = x - iy$.

Lemma 16.1.1 Für $z, z' \in \mathbb{C}$ gilt:

1. $\overline{z + z'} = \bar{z} + \bar{z}'$.
2. $\overline{zz'} = \bar{z}\bar{z}'$.
3. $z\bar{z} \in \mathbb{R}_{\geq 0}$.
4. $z\bar{z} = 0 \Leftrightarrow z = 0$.
5. $z = \bar{z} \Leftrightarrow z \in \mathbb{R}$.

□

Beweis. Übung. ■

Definition 16.1.2 1. Wir betrachten Elemente $v \in \mathbb{C}^n$ als $n \times 1$ -Matrizen und definieren eine Abbildung $\mathbb{C}^n \rightarrow \mathbb{C}^n$, $v \mapsto \bar{v}$ durch

$$v = \begin{pmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_n \end{pmatrix} \mapsto \bar{v} = \begin{pmatrix} \bar{z}_1 \\ \vdots \\ \bar{z}_n \end{pmatrix}.$$

2. Wir definieren eine Abbildung $M_{m,n}(\mathbb{C}) \rightarrow M_{m,n}(\mathbb{C})$, $A \mapsto \bar{A}$ durch $\bar{A} = (\bar{a}_{i,j})$, wobei $A = (a_{i,j})$.

Lemma 16.1.3 Für $A \in M_{m,n}(\mathbb{C})$ und $B \in M_{n,p}(\mathbb{C})$ gilt $\overline{AB} = \bar{A}\bar{B}$.

□

Beweis. Übung. ■

16.2 Skalar produkt und mehr

Definition 16.2.1 1. Wir definieren auf \mathbb{C}^n eine **Sesquilinearform** $(\cdot, \cdot) : \mathbb{C}^n \times \mathbb{C}^n \rightarrow \mathbb{C}$ durch

$$(v, v') = \sum_{i=1}^n z_i \bar{z}'_i$$

wobei $v = (z_1, \dots, z_n)^T$ und $v' = (z'_1, \dots, z'_n)^T$.

2. Wir betrachten \mathbb{R}^n als Teilmenge von \mathbb{C}^n : für $x_1, \dots, x_n \in \mathbb{R}$ ist $v = (x_1, \dots, x_n)^T \in \mathbb{R}^n$ ein Vektor in \mathbb{C}^n .

Lemma 16.2.2 Die Einschränkung der Sesquilinearform (\cdot, \cdot) auf \mathbb{R}^n ist das Standardskalarprodukt auf \mathbb{R}^n i.e., es gilt

$$(v, v') = \sum_{i=1}^n x_i y_i$$

wobei $v = (x_1, \dots, x_n)^T \in \mathbb{R}^n$ und $v' = (y_1, \dots, y_n)^T \in \mathbb{R}^n$. □

Beweis. Übung. ■

Lemma 16.2.3 Seien $v, v' \in \mathbb{C}^n$.

$$(v, v') = v^T \bar{v}'.$$

Beweis. Übung. ■

Lemma 16.2.4 Sei $v \in \mathbb{C}^n$. Es gilt $(v, v) = 0 \rightarrow v = 0$. □

Beweis. Sei $v = (z_1, \dots, z_n)^T$. Dann gilt $(v, v) = \sum_{i=1}^n z_i \bar{z}_i = 0$. Für alle i ist $z_i \bar{z}_i \in \mathbb{R}_{\geq 0}$. Daraus folgt $z_i \bar{z}_i = 0$ für alle i und $z_i = 0$ für alle i . ■

16.3 Symmetrische Matrizen

Definition 16.3.1 1. Wir betrachten reelle Matrizen $A \in M_n(\mathbb{R})$ als komplexe Matrizen dank der Enthaltung $M_n(\mathbb{R}) \subset M_n(\mathbb{C})$.

2. Eine Matrix $A \in M_n(\mathbb{R})$ heißt **reelle symmetrische Matrix** falls $A^T = A$.

Lemma 16.3.2 Sei A eine reelle symmetrische Matrix. Dann gilt für alle $v, v' \in \mathbb{R}^n$:

$$(Av, v') = (v, Av').$$

Beweis. Wir schreiben Elemente aus \mathbb{R}^n als $n \times 1$ -Matrizen. Man bemerkt, dass die folgende Gleichung gilt: $(v, v') = v^T v'$. Daraus folgt

$$(Av, v') = (Av)^T v' = v^T A^T v' = v^T A v' = v^T (Av') = (v, Av').$$

16.4 Diagonalisierbarkeit

Wir nehmen jetzt an, dass \mathbb{C} algebraisch abgeschlossen ist: alle Polynome in $\mathbb{C}[X]$ haben mindestens eine Nullstelle $\lambda \in \mathbb{C}$. Dies wird erst in der Vorlesung Algebra (Semester 4) bewiesen.

Lemma 16.4.1 Sei $A \in M_n(\mathbb{C})$. Dann hat A eine Eigenwerte $\lambda \in \mathbb{C}$. □

Beweis. Sei χ_A das charakteristische Polynom von A . Es gilt $\chi_A \in \mathbb{C}[X]$. Daraus folgt (weil \mathbb{C} algebraisch abgeschlossen ist), dass χ_A eine Nullstelle $\lambda \in \mathbb{C}$ hat. Diese Nullstelle ist eine Eigenwerte von A . ■

Lemma 16.4.2 Sei A eine reelle symmetrische Matrix. Dann hat A eine Eigenwerte $\lambda \in \mathbb{R}$. □

Beweis. Die Matrix $A \in M_n(\mathbb{R})$ ist auch eine komplexe Matrix. Also $A \in M_n(\mathbb{C})$. Aus dem obigen Lemma folgt, dass A eine (komplexe) Eigenwerte $\lambda \in \mathbb{C}$. Wir zeigen, dass $\lambda \in \mathbb{R}$. Sei $v \in \mathbb{C}^n$ ein Eigenvektor mit Eigenwerte λ . Es gilt $Av = \lambda v$. Daraus folgt

$$\lambda(v, v) = (Av, v) = v^T A^T \bar{v} = v^T A \bar{v} = v^T \bar{A} \bar{v} = v^T \overline{(Av)} = v^T \overline{\lambda v} = \bar{\lambda} v^T \bar{v} = \bar{\lambda}(v, v).$$

Es gilt also $(\lambda - \bar{\lambda})(v, v) = 0$. Aber $v \neq 0$, aus Lemma 16.2.4 folgt $(v, v) \neq 0$ und $\lambda = \bar{\lambda}$, also $\lambda \in \mathbb{R}$. ■

Satz 16.4.3 Sei $A \in M_n(\mathbb{R})$ eine reelle symmetrische Matrix. Dann ist A diagonalisierbar über \mathbb{R} . Ausserdem gibt es eine Basis welche aus orthonormalen (für das Standardskalarprodukt) Eigenvektoren besteht. □

Beweis. Wir zeigen per Induktion nach n , dass A diagonalisierbar ist. Für $n = 1$ ist A eine Diagonalmatrix in jeder Basis (also auch eine orthonormale Basis).

Wir nehmen an, dass alle $B \in M_k(\mathbb{R})$ reelle symmetrische Matrizen mit $k < n$ diagonalisierbar in einer orthonormalen Basis, welche aus Eigenvektoren besteht, ist.

Sei $A \in M_n(\mathbb{R})$ eine reelle symmetrische Matrix. Aus Lemma 16.4.2 folgt, dass A eine reelle Eigenwerte λ_1 hat. Der Unterraum $E(A, \lambda_1) \subset \mathbb{R}^n$ ist nicht null. Es gilt $\mathbb{R}^n = E(A, \lambda_1) \oplus E(A, \lambda_1)^\perp$.

Lemma 16.4.4 Es gilt $f(E(A, \lambda_1)^\perp) \subset E(A, \lambda_1)^\perp$. □

Beweis. Sei $v \in E(A, \lambda_1)^\perp$. Wir zeigen $f(v) \in E(A, \lambda_1)^\perp$ i.e. für alle $v' \in E(A, \lambda_1)$ gilt $(A(v), v') = 0$. Es gilt $(v, v') = 0$. Daraus folgt

$$(A(v), v') = (v, A(v')) = (v, \lambda_1 v') = \lambda_1 (v, v') = 0.$$

Wir betrachten die Einschränkung $A|_{E(A, \lambda_1)^\perp} : E(A, \lambda_1)^\perp \rightarrow E(A, \lambda_1)^\perp$ definiert durch $A|_{E(A, \lambda_1)^\perp}(v) = A(v)$. Die Matrix A' von $A|_{E(A, \lambda_1)^\perp}$ in der kanonischen Basis ist eine reelle symmetrische Matrix: es gilt

$$A = \begin{pmatrix} \lambda_1 I_{E(A, \lambda_1)} & 0 \\ 0 & A' \end{pmatrix}.$$

Daraus folgt, nach Induktion, dass $A|_{E(A, \lambda_1)^\perp}$ diagonalisierbar ist und ausserdem, dass es eine Basis \mathcal{B}_2 von $E(A, \lambda_1)^\perp$ gibt, welche aus orthonormale Eigenvektoren von $A|_{E(A, \lambda_1)^\perp}$ besteht. Sei \mathcal{B}_1 eine orthonormale Basis von $E(A, \lambda_1)$. Dann ist $\mathcal{B} = \mathcal{B}_1 \cup \mathcal{B}_2$ eine orthonormale Basis von \mathbb{R}^n welche aus Eigenvektoren von A besteht. ■