

V1G3 – Lineare Algebra I

Dozent:
Prof. Dr. Jan Schröer

Mitschriften von:
Tien Nguyen Thanh

WS 2021/2022
Stand: 11. Januar 2022

Das sind meine persönlichen Mitschriften aus der Vorlesung und hängen in keiner Weise mit dem Dozenten als Person oder der Universität zusammen. Die Mitschriften basieren zwar auf der Vorlesung des Dozenten, wurden aber mehrfach von mir und mithilfe anderer Quellen (Personen, Bücher, Internet, Übungen) überarbeitet, sodass sie nur in ferner bis keiner Weise die Vorlesung widerspiegeln. Trotz großer Sorgfalt bei der Erstellung der Mitschriften sind alle Angaben ohne Gewähr und Anspruch auf Vollständigkeit.

Inhaltsverzeichnis

1 Grundlagen	2
1.1 Mengen	2
1.2 Logik	4
1.2.1 Beweis durch Induktion	4
1.2.2 Beweis durch Widerspruch	5
1.2.3 Gleichheit von Mengen	5
1.3 Abbildungen	5
1.4 Übungsaufgaben	7
2 Körper	9
2.1 Körperaxiome	9
2.2 Beispiele von Körpern	10
2.3 Rechenregeln in Körpern	10
2.4 Charakteristik eines Körpers	11
2.5 Die Ringe \mathbb{Z}_m	11
3 Vektorräume	12
3.1 Vektorraumaxiome	13
3.2 Beispiele von Vektorräumen	13
3.3 Unterräume	15
4 Lineare Abbildungen	17
4.1 Definition	17
4.2 Beispiele von linearen Abbildungen	18
4.3 Erste Eigenschaften linearer Abbildungen	19
4.4 Lineare Abbildungen und affine Geraden	20
4.5 Kern und Bild	21
5 Matrizenrechnung	23
5.1 Definition einer Matrix	23
5.2 Operationen auf Matrizen	24
5.3 Rechenregeln für Matrizen	25
5.4 Matrizen als lineare Abbildungen	27
5.5 Die Standardbasis von Standardvektorräumen	28
5.6 $K^{m,n}$ und $\text{Hom}(K^n, K^m)$	29
A Trickkiste	30

1 Grundlagen

1.1 Mengen

Wir wollen uns mit einer sehr naiven, aber für unsere Zwecke ausreichenden, Mengenbegriff beschäftigen. Was eine Menge wirklich ist, erfahren wir von den Logikern und Mengentheoretikern.

Definition 1.1 (naive Menge). Eine Menge M ist eine Zusammenfassung von verschiedenen Objekten, welche dann Elemente genannt werden, zu einem Objekt.

Beispiel 1.2.

- $\mathbb{N} := \{0, 1, 2, \dots\}$, die Menge der *natürlichen Zahlen*. In dieser Vorlesung gehört die Null dazu.
- $\mathbb{Z} := \{\dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots\}$, die Menge der *ganzen Zahlen*.
- $\mathbb{Q} := \{a/b \mid a, b \in \mathbb{Z}, b \geq 1\}$, die Menge der *rationalen Zahlen*.
- \mathbb{R} , die Menge der *reellen Zahlen*.
- \mathbb{C} , die Menge der *komplexen Zahlen*.
- \emptyset , die leere Menge, die per Definition keine Elemente enthält.

Bezeichnung 1.3 (Quantoren, Mengenschreibweise, Relationen). Einige häufig verwendete Symbole

- $(\dots) := (\dots)$ definiert das, was links steht, durch das, was rechts steht.
- \forall bedeutet „für alle“.
- \exists bedeutet „es existiert“.
- Wenn M eine Menge ist, bezeichnet $|M|$ die Anzahl der Elemente in M (*Kardinalität*). Für die leere Menge ist $|\emptyset| = 0$.
- Eine Menge M heißt *n-elementig*, falls $|M| = n$ ($n \geq 0$).
- Allgemein notieren wir Mengen bspw. durch

$$\{21, 35\} = \{x \in \mathbb{N} \mid 5 \leq x \leq 40, 7 \mid x, x \in \{7, 14, 28\}\}.$$

$\{ \}$ sind Mengenklammern.

$|$ steht oft für „mit der Eigenschaft“. In unserem Beispiel heißt das „alle $x \in \mathbb{N}$ mit der Eigenschaft, dass ...“

$,$ steht oft für „und“, eine logische Verknüpfung der Bedingungen bzw. Eigenschaften.

\in steht für „ist Element von“. Hingegen ist \notin „ist kein Element von“.

$=$ steht für „gleich“, d. h. links und rechts steht das gleiche und können gegenseitig ausgetauscht werden. Analog ist \neq „ungleich“.

- $\leq, <, \geq, >$ sind „kleiner gleich“, „(echt) kleiner“, „größer gleich“, „(echt) größer“.

Bemerkung 1.4. Die Reihenfolge und Vielfachheit der Elemente in der Aufzählung von Mengen ist egal. Deshalb ist $\{1, 2, 3\} = \{2, 1, 3\} = \{1, 1, 3, 2, 3\}$.

Definition 1.5 (Teilmenge). Seien A und B Mengen. Dann ist

- A eine *Teilmenge* von B , falls $x \in B$ für alle $x \in A$, geschrieben $A \subseteq B$, und
- A eine *echte Teilmenge* von B , falls $A \subseteq B$, aber $A \neq B$, geschrieben $A \subset B$.

Bemerkung 1.6. Für jede Menge M gilt $\emptyset \subseteq M$, aber $\emptyset \in M$ im Allgemeinen nicht.

Weiterhin definieren wir

Definition 1.7 (Mengenoperatoren). Für Mengen A und B seien

- $A \cap B := \{x \mid x \in A, x \in B\}$ der *Durchschnitt* von A und B ,
- $A \cup B := \{x \mid x \in A \text{ oder } x \in B\}$ die *Vereinigung* von A und B ,
- $A \setminus B := \{x \mid x \in A, x \notin B\}$ die *Mengendifferenz* von A und B ,
- $\mathcal{P}(A) := \{U \mid U \subseteq A\}$ die *Potenzmenge* von A .

Definition 1.8 (Indexmenge). Sei I eine *Indexmenge*, d. h. für jedes $i \in I$ ist A_i eine Menge. Dann sind

$$\bigcap_{i \in I} A_i := \{x \mid x \in A_i \text{ für alle } i \in I\} \quad \text{und} \quad \bigcup_{i \in I} A_i := \{x \mid \text{es gibt ein } i \in I \text{ mit } x \in A_i\}$$

der *Durchschnitt* bzw. *Vereinigung* der Mengen A_i über die Indexmenge I .

Beispiel 1.9.

- $\mathcal{P}(\{1, 2\}) = \{\emptyset, \{1\}, \{2\}, \{1, 2\}\}$ ist 4-elementig.
- $\{1, 2, 3\} \cup \{2, 3\} = \{1, 2, 3\}$.
- $\{1, 2\} \setminus \{1, 3\} = \{2\}$. Die Differenzmenge $A \setminus B$ nimmt B von A weg.
- $\emptyset \cup \{1, 2\} = \{1, 2\} \neq \{\emptyset, 1, 2\} = \{\emptyset\} \cup \{1, 2\}$. Die Vereinigung mit der leeren Menge macht nichts.
- $\{\emptyset, \{1, 2, 3, 4\}\}$ ist 2-elementig, wohingegen $\{\varepsilon, 1, 2, 3, 4\}$ 5-elementig ist.

Definition 1.10 (Paar). Ein *Paar* (oder *2-Tupel*) besteht aus der Angabe eines ersten Elements a und eines zweiten Elements b . Wir schreiben (a, b) .

Bemerkung 1.11. Bei Paaren ist (im Gegensatz zu Mengen) die Reihenfolge wichtig. Es gilt $(a, b) = (b, a)$ genau dann, wenn $a = b$: *Achtung:* $(a, a) \neq \{a, a\} = \{a\}$.

Definition 1.12 (KARTESISCHES Produkt, Tupel). Das *KARTESISCHE Produkt* zweier Mengen A und B ist $A \times B := \{(a, b) \mid a \in A, b \in B\}$.

Für Mengen A_1, A_2, \dots, A_n ist das *KARTESISCHE Produkt*

$$A_1 \times \cdots \times A_n := \{(a_1, \dots, a_n) \mid a_i \in A_i \text{ für } 1 \leq i \leq n\},$$

dessen Elemente *n-Tupel* genannt werden.

Sei A eine Menge und $n \geq 1$. Dann ist

$$A^n := \underbrace{A \times \cdots \times A}_{n \text{ mal}}$$

das *n-fache KARTESISCHE Produkt* von A .

Bemerkung 1.13. Zwei Tupel sind gleich, wenn sie gleich viele *Einträge* bzw. *Komponenten* haben und wenn an jeder Stelle die Komponenten gleich sind.

Bezeichnung 1.14. Die n -Tupel (a_1, a_2, \dots, a_n) schreiben wir oft auch senkrecht auf:

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix}$$

Beispiel 1.15. Sind A , B und C Mengen, dann sind die Elemente in $A \times B \times C$ 3-Tupel der Form (a, b, c) , während die Elemente in $(A \times B) \times C$ 2-Tupel der Form $((a, b), c)$.

1.2 Logik

Definition 1.16 (Implikation, Äquivalenz). Seien A , B und C Aussagen. Dann bedeuten

- $A \implies B$ „ A impliziert B “, „aus A folgt B “,
- $A \iff B$ „ A genau dann, wenn B “, „ A und B sind äquivalent“, d. h. $A \implies B$ und $B \implies A$,
- $\neg A$, „nicht A “.

Zwei Schlussregeln, die wir oft verwenden werden:

Satz 1.17 (Syllogismus, Kontraposition).

- Aus $A \implies B$ und $B \implies C$ folgt $A \implies C$ (Syllogismus).
- Es gilt $A \implies B$ genau dann, wenn $\neg B \implies \neg A$ (Kontraposition).

Beispiel 1.18.

$$\underbrace{\text{„Wenn es regnet,“}}_A \underbrace{\text{ist die Straße nass.“}}_B \quad (A \implies B)$$

ist äquivalent zu

$$\underbrace{\text{„Wenn die Straße nicht nass ist,“}}_{\neg B} \underbrace{\text{dann regnet es nicht.“}}_{\neg A} \quad (\neg B \implies \neg A)$$

1.2.1 Beweis durch Induktion

Für jedes natürliche $n \geq 1$ sei $A(n)$ eine Aussage. Wenn das Ziel ist, $A(n)$ für alle $n \geq 1$ zu zeigen, dann kann *vollständige Induktion* helfen. Die Beweisstrategie:

- *Induktionsanfang*: Wir zeigen, dass $A(1)$ richtig ist.
- *Induktionsschritt*: Wir nehmen an, dass $A(n)$ richtig ist. Damit beweisen wir, dass auch $A(n+1)$ richtig ist.

Das Beweisprinzip basiert auf dem Dominoeffekt: Mit dem Induktionsanfang ist $A(1)$ wahr. Mit dem Induktionsschritt folgt aus $A(1)$ auch $A(2)$. Wieder mit dem Induktionsschritt folgt aus $A(2)$ auch $A(3)$ usw. Damit haben wir die Aussagen $A(n)$ für alle $n \geq 1$ gezeigt.

Beispiel 1.19.

- Für alle $n \geq 1$ gilt $A(n)$: $\sum_{k=1}^n (2k-1) = n^2$.
 - *Induktionsanfang* ($n=1$): $2 \cdot 1 - 1 = 1^2$ ist wahr und deshalb auch $A(1)$.
 - *Induktionsschritt*: Es gilt

$$\sum_{k=1}^{n+1} (2k-1) = \left(\sum_{k=1}^n (2k-1) \right) + (2(n+1)-1) = n^2 + 2n + 1 = (n+1)^2.$$

Dabei verwendeten wir für die zweite Gleichheit die Induktionsvoraussetzung. Folglich gilt $A(n+1)$.

- Ein falscher Induktionsbeweis: Wir behaupten, dass $A(n)$: (7 teilt 10^n) für alle $n \geq 1$ gilt.
 - *Induktionsschritt*: Angenommen $A(n)$ ist wahr, d. h. es gilt $10^n = 7a$ für ein $a \geq 1$ in \mathbb{N} . Dann gilt auch $10^{n+1} = 10 \cdot 10^n = 10 \cdot 7a$. Also gilt $A(n+1)$.
 - *Induktionsanfang*: Aber $A(1)$ ist falsch!

1.2.2 Beweis durch Widerspruch

Das Beweisprinzip ist, das Gegenteil der Behauptung anzunehmen und das auf einen Widerspruch mit der Voraussetzung zu führen. Folglich war die Annahme falsch und die Behauptung richtig.

Beispiel 1.20. Behauptung: $\sqrt{2} \notin \mathbb{Q}$.

Beweis: Angenommen $\sqrt{2} \in \mathbb{Q}$, d. h. Es gibt $a, b \in \mathbb{Z}$, $b \geq 1$ mit $\sqrt{2} = a/b$. Wir können annehmen, dass a und b teilerfremd sind (also der Bruch vollständig gekürzt ist).

Quadrieren liefert $2 = a^2/b^2 \iff 2b^2 = a^2$. Damit sind a^2 und a durch 2 teilbar, insbesondere auch a^2 durch $2 \cdot 2 = 4$ teilbar. Somit teilt 4 auch $2b^2$, also sind b^2 und b auch durch 2 teilbar (aufgrund der Eindeutigkeit der Primfaktorzerlegung). Das bedeutet, dass a und b durch 2 teilbar sind, was im Widerspruch zur Teilerfremdheit steht.

1.2.3 Gleichheit von Mengen

Bemerkung 1.21. Zwei Mengen sind *gleich*, wenn sie dieselben Elemente besitzen.

Seien A und B zwei Mengen. Um zu beweisen, dass $A = B$ ist, muss man zum Einen $A \subseteq B$ und zum Anderen $B \subseteq A$ zeigen. Der Beweis ist im Regelfall also zweiteilig!

1.3 Abbildungen

Die Idee hinter Abbildungen ist es, Mengen in Beziehung zu setzen.¹

Definition 1.22 (Abbildung). Seien X und Y Mengen. Eine *Abbildung* f von X nach Y ist eine Vorschrift, durch die jedem $x \in X$ genau ein $f(x) \in Y$ zugeordnet wird.²

Bemerkung 1.23. Jedes x wird genau einem $f(x)$ zugeordnet. Trotzdem ist es möglich, dass verschiedene x demselben $f(x)$ zugeordnet werden.

Bemerkung 1.24. Zwei Abbildungen sind gleich, wenn sie dieselben Definitions- und Zielmengen haben sowie elementweise bzw. punktweise gleich sind (d. h. deren Vorschrift dasselbe macht).

Bezeichnung 1.25. Wir schreiben $f: X \rightarrow Y$, $x \mapsto f(x)$. Dabei verwenden wir \rightarrow zwischen Mengen und \mapsto zwischen Elementen.

Definition 1.26 (Menge aller Abbildungen). Seien X und Y Mengen. Dann ist $\text{Abb}(X, Y)$ die *Menge aller Abbildungen* von X nach Y .

Beispiel 1.27. Die Abbildung $f: \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{N}$, $x \mapsto x^2$ bildet jedes $x \in \mathbb{Z}$ auf $x^2 \in \mathbb{N}$ ab.

Definition 1.28 (Identität). Sei X eine Menge. Als *Identität* von X bezeichnen wir die Abbildung $\text{id}_X: X \rightarrow X$, $x \mapsto x$. Es gilt also $\text{id}_X(x) = x$ für alle $x \in X$.

Definition 1.29 (Komposition von Abbildungen). Seien $f: X \rightarrow Y$ und $g: Y \rightarrow Z$ Abbildungen. Dann ist

$$g \circ f: X \rightarrow Z, \quad x \mapsto g(f(x))$$

die *Komposition* (*Hintereinanderschaltung*, *Verkettung*) von f und g , gelesen „ g verknüpft mit f “, „ g komponiert mit f “, „ g nach f “ oder „ g Kringel f “.

Bezeichnung 1.30. Wir schreiben auch manchmal gf für $g \circ f$.

Es gilt also

$$X \xrightarrow{f} Y \xrightarrow{g} Z, \quad x \longmapsto f(x) \longmapsto g(f(x)).$$

Definition 1.31 (injektiv, surjektiv, bijektiv). Sei $f: X \rightarrow Y$ eine Abbildung. Dann ist

- *f* *text*, falls für alle $x_1 \neq x_2$ in X gilt: $f(x_1) \neq f(x_2)$,

¹Eigentlich sind es die *Relationen* die das erfüllen, wovon Abbildungen eine spezielle Form sind.

²Die Menge X bezeichnen wir als *Definitionsmenge* und Y als *Zielmenge*. Die Elemente aus X heißen *Urbilder* oder *Argumente*, die Elemente aus Y heißen *Zielelemente*. Die tatsächlich angenommenen Werte nennen wir *Bilder* oder schlicht *Werte*, und deren Menge auch *Bild* oder *Bildmenge*.

- f *surjektiv*, falls für jedes $y \in Y$ ein $x \in X$ existiert, sodass $f(x) = y$ ist, und
- f *bijektiv*, falls f injektiv und surjektiv ist. Dann nennen wir f eine *Bijektion*.

Definition 1.32 (Umkehrabbildung). Sei $f: X \rightarrow Y$ eine bijektive Abbildung. Dann ist die *Umkehrabbildung* $f^{-1}: Y \rightarrow X$ definiert durch $f^{-1}(f(x)) = x$ für alle $x \in X$ bzw. $f(x) \in Y$.

Es gilt dann $f^{-1} \circ f = \text{id}_X$ und $f \circ f^{-1} = \text{id}_Y$.

Umkehrabbildungen kann es nur für Bijektionen geben. Da auch f^{-1} eine Abbildung sein soll und Abbildungen jedem $y \in Y$ *genau ein* $x \in X$ zuordnet, müssen wir die Injektivität von f voraussetzen. Dann sind nämlich $f^{-1}(f(x_1))$ und $f^{-1}(f(x_2))$ für $x_1, x_2 \in X$ mit $x_1 \neq x_2$ auch unterschiedlich. Da f^{-1} von Y nach X abbilden soll, muss $f^{-1}(y)$ für alle $y \in Y$ definiert werden, weshalb wir die Surjektivität voraussetzen müssen. Dann gibt es für jedes $y \in Y$ ein $x \in X$ mit $y = f(x)$, sodass $f^{-1}(y) = x$ wohldefiniert³ ist.

Auch die Komposition der Abbildung und dessen Umkehrung ergibt Sinn: $f^{-1} \circ f$ bildet von X nach X und wieder nach X ab, und $f \circ f^{-1}$ bildet von Y nach Y und wieder nach Y ab.

Beispiel 1.33.

1. $f: \{1, 2, 3\} \rightarrow \{1, 2\}$ mit $1 \mapsto 1$, $2 \mapsto 1$ und $3 \mapsto 2$ ist surjektiv, aber nicht injektiv.
2. $f: \{1, 2\} \rightarrow \{1, 2, 3\}$ mit $1 \mapsto 3$ und $2 \mapsto 1$ ist injektiv, aber nicht surjektiv.
3. $f: \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}$, $x \mapsto x - 41$ ist injektiv und surjektiv, also bijektiv.
4. $f: \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}$, $x \mapsto 2x$ ist injektiv, aber nicht surjektiv (die ungeraden Zahlen werden nicht getroffen).
5. $f: \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}$ mit $2n \mapsto n$ und $2n + 1 \mapsto n$ (für $n \in \mathbb{Z}$) ist surjektiv, aber nicht injektiv.
6. Seien X und Y zwei endliche Mengen mit gleich vielen Elementen. Dann ist die Abbildung $f: X \rightarrow Y$ genau dann injektiv, wenn f surjektiv ist.
7. Die Abbildung $f: \{\text{Menschen in Bonn}\} \rightarrow \mathbb{N}$ definiert durch $x \mapsto \text{Alter}(x)$ ist weder surjektiv (Menschen werden nicht beliebig alt) noch injektiv (zwei Menschen können dasselbe Alter haben).
8. Für ein fixiertes $(a, b, c, d) \in \mathbb{Q}^4$ definieren wir $f: \mathbb{Q}^2 \rightarrow \mathbb{Q}^2$, $(x, y) \mapsto (ax + by, cx + dy)$. Die Abbildung f ist genau dann bijektiv, wenn $ad - bc \neq 0$ gilt. Außerdem ist f genau dann injektiv, wenn f surjektiv ist. (Der Beweis dafür erfolgt später.)⁴

Ende der Vorlesung 1 am 12. Oktober 2021

Definition 1.34. Seien M und I Mengen. Dann sei

$$M^I := \text{Abb}(I, M)$$

die Menge aller Abbildungen $I \rightarrow M$.

Achtung: Es sind die Abbildungen von I nach M , nicht von M nach I !

Beispiel 1.35. Für $I = \{1, \dots, n\}$ ist die Abbildung $M^I \rightarrow M^n$, $f \mapsto (f(1), \dots, f(n))$ bijektiv, wobei M^n bekanntlich das n -fache kartesische Produkt bezeichnet.

Offensichtlich haben alle $f \in M^I$ dieselben Definitionens- und Zielmengen. Dann sind zwei Abbildungen genau dann gleich, wenn sie für jedes Argument denselben Wert liefern, d. h. wenn die Tupel ihrer Werte gleich sind. Andersherum definiert jedes Tupel eine Abbildung, denn es gibt alle möglichen Zuordnungen $I \rightarrow M$ an.⁵

Achtung: Die hier beschriebene Abbildung bildet Abbildungen f auf n -Tupel derer Werte ab.

³Der Begriff *wohldefiniert* meint, dass ein Begriff eindeutig und widerspruchsfrei definiert ist, also weder unmöglich noch mehrdeutig ist.

⁴Das ist das Matrix-Vektor-Produkt, wobei a, b, c, d die Einträge einer Matrix $A \in \mathbb{Q}^{2,2}$ ist und x, y die Einträge eines Vektors v . Dann ist A genau dann ein Isomorphismus, wenn A invertierbar ist, also $ad - bc \neq 0$. Genauso ist eine quadratische Matrix genau dann ein Monomorphismus, wenn sie ein Epimorphismus ist.

⁵In fortgeschrittener Sprache: Die Abbildung ist ein *Mengenisomorphismus*, also ein bijektiver Homomorphismus, der die Mengenstruktur (auch wenn sehr banal) erhält.

Definition 1.36 (Bild, Urbild einer Menge). Sei $f: X \rightarrow Y$ eine Abbildung. Und seien $A \subseteq X$ und $B \subseteq Y$ Teilmengen. Wir bezeichnen

$$f(A) := \{f(x) \mid x \in A\} \quad \text{und} \quad f^{-1}(B) := \{x \mid f(x) \in B\}$$

als *Bild* von A unter f bzw. *Urbild* von B unter f . Dahingegen ist $f(X)$ das *Bild* von f . Es gilt stets $f^{-1}(Y) = X$.

Warnung: Die Schreibweise $f^{-1}(B)$ impliziert nicht, dass eine Umkehrabbildung existiert.

Bemerkung 1.37. Wir beachten, dass das nicht jedes $y \in B$ ein Urbild $\in f^{-1}(B)$ haben muss, ähnlich wie eine Abbildung nicht surjektiv sein muss. Genauso kann es mehrere Urbilder $x_1, x_2 \in f^{-1}(B)$ mit $x_1 \neq x_2$ zu einem Bild y mit $f(x_1) = f(x_2) = y$ geben, ähnlich wie eine Abbildung nicht injektiv sein muss.

Definition 1.38 (Graph). Der *Graph* einer Abbildung $f: X \rightarrow Y$ ist

$$\Gamma(f) := \{(x, f(x)) \mid x \in X\} \subseteq X \times Y.$$

Der Graph ist also eine „Zeichnung“ der Funktion, also die Menge aller Punkte der „Ebene“, die zur Funktion „gehören“.

Bemerkung 1.39. Damit können wir den Begriff der Abbildung mengentheoretisch definieren. Seien X und Y Mengen, und sei $\Gamma \subseteq X \times Y$ (eine Relation) eine Menge von Paaren mit den folgenden Eigenschaften:

1. Für jedes $x \in X$ gibt es ein $y \in Y$ mit $(x, y) \in \Gamma$ (jedem Urbild wird ein Bild zugeordnet).
2. Falls $(x, y_1), (x, y_2) \in \Gamma$, so ist $y_1 = y_2$ (das Bild eines Urbilds ist eindeutig).

Damit definieren wir eine *Abbildung* $f_\Gamma: X \rightarrow Y$ durch $f_\Gamma(x) := y$ für jedes $(x, y) \in \Gamma$. Offensichtlich gilt für den Graphen $\Gamma(f_\Gamma) = \Gamma$.

1.4 Übungsaufgaben

Aufgabe 1.A (B01.A1). Seien X und Y Mengen. Beweisen Sie die Äquivalenz folgender Aussagen:

- (i) $X \subseteq Y$,
- (ii) $X \cap Y = X$,
- (iii) $X \cup Y = Y$,
- (iv) $X \setminus Y = \emptyset$.

Lösung. Wegen dem Syllogismus in Satz 1.17 können wir die Äquivalenz mehrerer Aussagen effizient zeigen, indem wir im „Kreis“ schlussfolgern, z. B. (i) \implies (ii) \implies (iii) \implies (iv) \implies (i).

Beweis.

1. (i) \implies (ii): Wenn jedes $x \in X$ auch in Y liegt, ist die Bedingung $x \in Y$ in der Definition der Schnittmenge $X \cap Y = \{x \in X \mid x \in Y\}$ redundant. Deshalb gilt $X \cap Y = \{x \in X\} = X$.
2. (ii) \implies (iii): Nach Voraussetzung müssen wir uns die Vereinigung $(X \cap Y) \cup Y$ anschauen. Da nun nach Definition der Schnittmenge $X \cap Y \subseteq Y$ gilt, erhalten wir $(X \cap Y) \cup Y = Y$.
3. (iii) \implies (iv): Nach Voraussetzung können wir uns $X \setminus (X \cup Y)$ anschauen. Gemäß der Definition der Vereinigung gilt stets $X \subseteq X \cup Y$, d. h. in der Mengendifferenz nehmen wir von X mindestens alle Elemente von X weg, also ist $X \setminus (X \cup Y) = \emptyset$.
4. (iv) \implies (i): Wenn nach der Differenz $X \setminus Y = \{x \in X \mid x \notin Y\}$ keine Elemente übrig bleiben, so haben alle $x \in X$ die Bedingung $x \notin Y$ nicht erfüllt, d. h. es gilt $x \in Y$ für alle $x \in X$ und damit $X \subseteq Y$. \square

Eine alternative, sehr mengentheoretische, aber auch prägnante Lösung ist folgende:

Beweis.

$$\begin{aligned}
 \text{(i)} &\implies \text{(ii):} & X &= X \cap X \subseteq X \cap Y \subseteq X, \\
 \text{(ii)} &\implies \text{(iv):} & \emptyset &\subseteq X \setminus Y = (X \cap Y) \setminus Y \subseteq Y \setminus Y = \emptyset, \\
 \text{(iv)} &\implies \text{(iii):} & X \cup Y &= ((X \setminus Y) \cup (X \cap Y)) \cup Y = (X \setminus Y) \cup ((X \cap Y) \cup Y) \\
 & & &= (X \setminus Y) \cup Y = \emptyset \cup Y = Y, \\
 \text{(iii)} &\implies \text{(i):} & X &= X \cup \emptyset \subseteq X \cup Y = Y.
 \end{aligned}$$

□

Aufgabe 1.B (B01.A2). Diskutieren Sie den folgenden Induktionsbeweis:

Behauptung: Für jedes $n \geq 1$ gilt: Halten sich n Personen in einem geschlossenen Raum auf, so sind entweder alle geimpft oder alle sind ungeimpft.

Beweis mit Induktion: Der Fall $n = 1$ ist klar. Die Aussage sei nun wahr für n . Sind dann $n + 1$ Personen im Raum, so wähle eine Person aus und schicke sie hinaus. Nach Induktionsannahme haben die verbleibenden Personen denselben Impfstatus. Wir holen die ausgewählte Person wieder herein und senden eine andere Person hinaus. Die im Raum verbliebenen n haben wiederum denselben Impfstatus. Damit hat die zuerst hinaus gesandte Person denselben Impfstatus wie alle anderen im Raum befindlichen Personen. Da dies nach dem ersten Beweisschritt auch für die als zweites hinaus gesandte Person zutrifft, haben alle $n + 1$ Personen denselben Impfstatus.

Lösung. Der Induktionsschritt ist eine gute Beweisstrategie, funktioniert aber nur für $n \geq 3$ und versagt bei $n = 2$.

Ein Gegenbeispiel für $n = 2$: Im Raum ist ein Geimpfter und ein Ungeimpfter. Geht eine Person raus, haben die verbleibenden Personen im Raum immer denselben Impfstatus (weil nur eine Person verbleibt). Es fehlen aber Dritte, mit denen wir zu beiden Zeitpunkten den Impfstatus der Personen, die den Raum verlassen, vergleichen können.



Aufgabe 1.C. Zeigen Sie: Für alle $n \geq 1$ gilt

$$\sum_{k=1}^n k^2 = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}. \quad (1.40)$$

Lösung. Beweis. Wir führen eine vollständige Fallunterscheidung über n durch. Dabei ist $A(n)$ (1.40).

- *Induktionsanfang:* Für $n = 1$ ist $1^2 = \frac{1}{6}(1 \cdot 2 \cdot 3)$ wahr und folglich ist auch $A(1)$ wahr.
- *Induktionsschritt:* Wenn $A(n)$ gilt, gilt auch

$$\begin{aligned}
 \sum_{k=1}^{n+1} k^2 &= (n+1)^2 + \sum_{k=1}^n k^2 \stackrel{A(n)}{=} (n+1)^2 + \frac{n(n+1)(2n+1)}{6} = \frac{n+1}{6}(6(n+1) + n(2n+1)) \\
 &= \frac{n+1}{6}((4n+6) + n(2n+3)) = \frac{(n+1)(n+2)(2n+3)}{6},
 \end{aligned}$$

also ist auch $A(n+1)$ wahr. □

Alternativ können wir das auch nicht induktiv über Teleskopsummen zeigen.

Beweis. In der Summe heben sich der Minuend k^3 des Index i mit dem Subtrahenden $-(k-1)^3$ des Index $i+1$ auf. Damit gilt

$$\begin{aligned}
 n^3 &= \sum_{k=1}^n (k^3 - (k-1)^3) = 3 \sum_{k=1}^n k^2 - 3 \sum_{k=1}^n k + \sum_{k=1}^n 1 = 3 \sum_{k=1}^n k^2 - 3 \frac{n(n+1)}{2} + n \\
 &\iff \sum_{k=1}^n k^2 = \frac{n^3}{3} + \frac{n^2}{2} + \frac{n}{6} = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}.
 \end{aligned}$$

□

2 Körper

Auch *Rechenbereich* genannt. Körper verallgemeinern und abstrahieren die uns gewohnten rationalen oder reellen Zahlen und deren Rechenoperationen. Dennoch sollten wir uns ab sofort von den uns bekannten Beispielen lösen, da die in der (linearen) Algebra betrachteten Objekte sehr abstrakt werden und nicht unbedingt analog zu unserem Vorwissen funktionieren.

2.1 Körperaxiome

Axiom 2.1 (Körper). Ein Körper ist eine Menge K zusammen mit zwei Abbildungen

$$+ : K \times K \rightarrow K, \quad (a, b) \mapsto a + b \quad \text{und} \quad \cdot : K \times K \rightarrow K, \quad (a, b) \mapsto a \cdot b,$$

Addition bzw. Multiplikation genannt, sodass folgende Regeln (Axiome) gelten:

- (A1) $a + (b + c) = (a + b) + c$ für alle $a, b, c \in K$ (Assoziativität der Addition);
- (A2) $a + b = b + a$ für alle $a, b \in K$ (Kommutativität der Addition);
- (A3) Es existiert ein Element $0 = 0_K \in K$ mit $a + 0 = a$ für alle $a \in K$ (Existenz eines Nullelements);
- (A4) Zu jedem $a \in K$ gibt es ein $-a \in K$ mit $a + (-a) = 0$ (Existenz eines additiven Inversen);
- (M1) $a \cdot (b \cdot c) = (a \cdot b) \cdot c$ für alle $a, b, c \in K$ (Assoziativität der Multiplikation);
- (M2) $a \cdot b = b \cdot a$ für alle $a, b \in K$ (Kommutativität der Multiplikation);
- (M3) Es existiert ein Element $1 = 1_K \in K$ mit $1 \neq 0$ und $1 \cdot a = a$ für alle $a \in K$ (Existenz eines Einselements);
- (M4) Zu jedem $a \in K$ mit $a \neq 0$ gibt es ein $a^{-1} \in K$ mit $a \cdot a^{-1} = 1$ (Existenz des multiplikativen Inversen);
- (D) $(a + b) \cdot c = (a \cdot c) + (b \cdot c)$ für alle $a, b, c \in K$ (Distributivität).

Oftmals lassen wir den Index K wie in 0_K und 1_K weg, wenn der Kontext klar ist. Manchmal schreiben wir ihn aber hinzu, um zu verdeutlichen, dass sie zum Körper K gehören.

Bemerkung 2.2. Wir setzen $1 \neq 0$ voraus, d. h. ein Körper hat mindestens zwei Elemente.¹

Bemerkung 2.3. Dabei steht der Ausdruck $a + b$ eigentlich für $+(a, b)$ und $a \cdot b$ für $\cdot((a, b))$. Streng genommen müssten wir z. B. Axiom (A1) als

$$a + (b + c) = (a + c) + b \quad \longrightarrow \quad +\left((a, +((b, c)))\right) = +\left((+(a, b), c)\right)$$

und Axiom (A2) als

$$a + b = b + a \quad \longrightarrow \quad +((a, b)) = +((b, a))$$

schreiben.

Bezeichnung 2.4. Neben diesen Axiomen führen wir noch einige Konventionen ein.

- Um Klammern zu sparen, gilt *Punktrechnung vor Strichrechnung*. Damit können wir z. B. das Distributivgesetz (D) umschreiben als $a \cdot c + b \cdot c$, ohne dass Verwirrung entsteht.
- Wir definieren $a - b := a + (-b)$ und $ab := a \cdot b$ für $a, b \in K$. Somit können wir Plusklammern und Malpunkte weglassen, wenn der Sinn dabei nicht verfälscht wird (z. B. nicht $1 \cdot 2 \neq 12$).
- Für $a, b \in K$ mit $b \neq 0$ sei

$$\frac{a}{b} := a/b := a \cdot b^{-1}.$$

Diese Regeln und Schreibweisen sind alles Konventionen und hängen nicht mit der Struktur oder den Eigenschaften eines Körper zusammen. Wir hätten genauso jede andere Konvention einführen können.

Bezeichnung 2.5. Wir definieren kurz $K^\times := K \setminus \{0\}$.

Ab sofort meinen wir mit K immer einen Körper mit den Operationen $+$ und \cdot , falls nicht anders spezifiziert. Manchmal schreiben wir auch $(K, +, \cdot)$ für einen Körper.

¹Traditionell wird in der Algebra $1 \neq 0$ definiert. Es gibt aber „esoterische“ Konzepte eines einelementigen Körpers \mathbb{F}_1 , d. h. $1 = 0$, was aber einige Körpereigenschaften verliert.

2.2 Beispiele von Körpern

Beispiel 2.6. \mathbb{Q} und \mathbb{R} mit den üblichen Abbildungen $+$ und \cdot sind Körper.

Beispiel 2.7. \mathbb{Z} ist kein Körper, da (nur) (M4) nicht erfüllt wird.

Beispiel 2.8. \mathbb{C} , die Menge der komplexen Zahlen mit $+$ und \cdot ist ein Körper.

Beispiel 2.9. Sei $K := \{a, b\}$ mit $a \neq b$. Wir definieren die Abbildungen $+: K \times K \rightarrow K$ und $\cdot: K \times K \rightarrow K$ durch²

$$\begin{array}{llll} a + a = a, & a + b = b, & b + a = b, & b + b = a, \\ a \cdot a = a, & a \cdot b = a, & b \cdot a = a, & b \cdot b = b. \end{array}$$

K erfüllt alle Axiome eines Körpers, wobei das Nullelement $0_K = a$ und das Einselement $1_K = b$ ist, also $K = \mathbb{F}_2 := \{0, 1\}$. Der Körper ist der kleinstmögliche Körper (jeder Körper muss mindestens 0 und 1 enthalten). Tatsächlich ist der Körper sogar eindeutig, was wir aber nicht beweisen werden.

Beispiel 2.10. Sei $K := \mathbb{Q}(\sqrt{2}) := \{a + b\sqrt{2} \mid a, b \in \mathbb{Q}\} \subset \mathbb{R}$.³ Wir definieren die Abbildungen $+: K \times K \rightarrow K$ und $\cdot: K \times K \rightarrow K$ als Einschränkung von $+: \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ und $\cdot: \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ (d. h. die Abbildungen sind dieselben aus \mathbb{R} bis auf den kleineren Definitionsbereich). Insbesondere heißt das

$$(a + b\sqrt{2}) + (c + d\sqrt{2}) := (a + c) + (b + d)\sqrt{2}$$

und

$$(a + b\sqrt{2}) \cdot (c + d\sqrt{2}) := (ac + 2bd) + (ad + bc)\sqrt{2}.$$

Die meisten Körperaxiome sind offensichtlich erfüllt. Für (M4) stellt sich jedoch die Frage, ob $(a + b\sqrt{2})^{-1} \in K$ für alle $a + b\sqrt{2} \neq 0$ existiert. *Antwort:* Ja, denn

$$(a + b\sqrt{2})^{-1} := \frac{a}{a^2 - 2b^2} + \frac{-b}{a^2 - 2b^2}\sqrt{2}$$

mit

$$\frac{a}{a^2 - 2b^2} + \frac{-b}{a^2 - 2b^2}\sqrt{2} = \frac{a - b\sqrt{2}}{a^2 - 2b^2} = \frac{a - b\sqrt{2}}{(a + b\sqrt{2})(a - b\sqrt{2})} = \frac{1}{a + b\sqrt{2}}.$$

Beachte: Die Brüche sind definiert, weil $(a/b)^2 \neq 2 \iff a^2 - 2b^2 \neq 0$ wegen $\sqrt{2} \notin \mathbb{Q}$.

2.3 Rechenregeln in Körpern

Lemma 2.11 (Links distributivität). *Es gilt $a(b + c) = ab + ac$ für alle $a, b, c \in K$.*

Beweis. Es gilt $a(b + c) \stackrel{(M2)}{=} (b + c)a \stackrel{(D)}{=} ba + ca \stackrel{(M2)}{=} ab + ac$. □

Lemma 2.12 (Eindeutigkeit der Null). *Es gibt nur ein Nullelement in einem Körper.*

Beweis. Seien $0'$ und $0''$ Nullelemente im Körper K . Dann gilt $0'' \stackrel{(A3)}{=} 0'' + 0' \stackrel{(A2)}{=} 0' + 0'' \stackrel{(A3)}{=} 0'$. Dabei haben wir für die erste Gleichheit die Eigenschaft $0' = 0_K$ und für die letzte Gleichheit $0'' = 0_K$ ausgenutzt. □

Lemma 2.13. *Für alle $a \in K$ gilt $0a = 0$.*

Beweis. Sei $a \in K$. Dann gelten

$$\begin{aligned} 0a &\stackrel{(A3)}{=} (0 + 0)a \stackrel{(D)}{=} 0a + 0a, \\ 0 &\stackrel{(A4)}{=} 0a + (-(0a)) \stackrel{(2.14)}{=} (0a + 0a) + (-(0a)) \stackrel{(A1)}{=} 0a + (0a + (-(0a))) \stackrel{(A4)}{=} 0a + 0 \stackrel{(A3)}{=} 0a. \end{aligned} \quad \square$$

In den Übungsaufgaben werden wir noch eine Vielzahl weiterer Regeln beweisen.

²Die Abbildungen ähneln der Addition und Multiplikation modulo 2.

³Das ist eine sog. Körperadjunktion bzw. Körpererweiterung

2.4 Charakteristik eines Körpers

Bezeichnung 2.15. Sei K ein Körper. Für $a \in K$ und $0 \neq m \in \mathbb{N}$ definieren wir

$$m \cdot a := \underbrace{a + a + \cdots + a}_{m \text{ mal}}.$$

Definition 2.16 (Charakteristik). Wir definieren $\text{char}(K)$ als die *Charakteristik* von K als

$$\text{char}(K) := \begin{cases} 0 & \text{falls } m \cdot 1_K \neq 0_K \text{ für alle } m \in \mathbb{N} \setminus \{0\}, \\ \min\{m \in \mathbb{N} \setminus \{0\} \mid m \cdot 1_K = 0_K\} & \text{sonst.} \end{cases}$$

Lemma 2.17. Sei K ein Körper mit $\text{char}(K) = p > 0$. Dann ist p eine Primzahl.

Beweis. Angenommen p wäre keine Primzahl, sodass es $p_1, p_2 \in \mathbb{N}$ mit $p_1, p_2 \geq 2$ und $p = p_1 p_2$ gibt. Aus der Minimalität der Charakteristik folgt $p_1 \cdot 1_K \neq 0$ und $p_2 \cdot 1_K \neq 0$. Damit gilt

$$(p_1 \cdot 1_K)(p_2 \cdot 1_K) = (p_1 p_2) \cdot 1_K = p \cdot 1_K = 0_K.$$

Aufgrund der Nullteilerfreiheit in einem Körper (s. Übungsaufgabe) gilt $p_1 \cdot 1_K = 0_K$ oder $p_2 \cdot 1_K = 0_K$, ein Widerspruch.⁴ \square

Ende der Vorlesung 2 am 15. Oktober 2021

2.5 Die Ringe \mathbb{Z}_m

Axiom 2.18 (Ring). Ein *Ring* ist eine Menge R zusammen mit zwei Abbildungen

$$+ : R \times R \rightarrow R, \quad (a, b) \mapsto a + b \quad \text{und} \quad \cdot : R \times R \rightarrow R, \quad (a, b) \mapsto a \cdot b$$

Addition bzw. *Multiplikation* genannt, sodass folgende Regeln (Axiome) gelten:

- (A1) $a + (b + c) = (a + b) + c$ für alle $a, b, c \in R$ (*Assoziativität der Addition*);
- (A2) $a + b = b + a$ für alle $a, b \in R$ (*Kommutativität der Addition*);
- (A3) Es existiert ein Element $0 = 0_R \in R$ mit $a + 0 = a$ für alle $a \in R$ (Existenz eines *Nullelements*);
- (A4) Zu jedem $a \in R$ gibt es ein $-a \in R$ mit $a + (-a) = 0$ (Existenz eines *additiven Inversen*);
- (R1) $a \cdot (b \cdot c) = (a \cdot b) \cdot c$ für alle $a, b, c \in R$ (*Assoziativität der Multiplikation*);
- (R2) Es existiert ein Element $1 = 1_R \in R$ mit $1 \neq 0$ und $1 \cdot a = a$ für alle $a \in R$ (Existenz eines *Einselements*);
- (D) $(a + b) \cdot c = (a \cdot c) + (b \cdot c)$ und $a \cdot (b + c) = (a \cdot b) + (a \cdot c)$ für alle $a, b, c \in K$ (*Distributivität*).

Definition 2.19 (kommutativer Ring). Ein Ring R heißt *kommutativ*, falls zusätzlich $a \cdot b = b \cdot a$ für alle $a, b \in R$ gilt.

Bemerkung 2.20. Im Vergleich zu einem Körper sind die Axiome der Addition identisch. Bei der Multiplikation fehlt lediglich die Kommutativität (M2) und die Existenz des Inversen (M4). Aufgrund der fehlenden Kommutativität werden in der Distributivität beide Multiplikationsreihenfolgen angegeben, die wir auch beide nachweisen müssen.

⁴Die Charakteristik hat einige interessante Eigenschaften:

Aus einer positiven Charakteristik folgt sofort $a + a + \cdots + a = 0$. Sie hilft und zu bestimmen, wann ein Ausdruck null wird, was wichtig für das Rechnen im Körper ist (wir denken an $a + 0 = 0$, $0a = 0$ und, dass 0^{-1} nicht existiert). In diesem Kontext ist $\text{char}(K) = 2$ besonders wichtig, denn in dem Fall ist $a + a = 0$ für alle $a \in K$, d. h. jedes Element ist sein eigenes additives Inverse. $\text{char}(K) \neq 2$ garantiert uns die Existenz der $2 := 1 + 1$.

Jeder Teilkörper eines Körpers hat dieselbe Charakteristik wie der Körper, z. B. $\text{char}(\mathbb{F}_2) = \text{char}(\mathbb{F}_4) = 2$. Damit haben Körper mit gleicher Charakteristik auch eine ähnliche Struktur.

Die Charakteristik ist eigentlich für Ringe (die später folgen) definiert. All diese Eigenschaften gelten auch für Ringe.

Bemerkung 2.21. In einem Ring wird nicht verlangt, dass $1_R \neq 0_R$. Ist aber $1_R = 0_R$, so folgt daraus $a = 1_R a = 0_R a = 0_R$ für alle $a \in R$, also $R = \{0_R\}$.

Bezeichnung 2.22 (Nullring). Wir nennen $R = \{0_R\}$ den trivialen⁵ Nullring.

Wir übernehmen für Ringe alle Schreibkonventionen in bezeichnung 2.4, die wir für Körper festlegten (bis auf Brüche).

Lemma 2.23. Seien $a, m \in \mathbb{N}$ mit $m \geq 1$. Dann existieren eindeutig bestimmte Elemente $r, q \in \mathbb{N}$ mit $0 \leq r < m$, sodass $a = qm + r$ gilt. Setze $r_m(a) := r$.

Beweis. Zu jedem $a \in \mathbb{N}$ gibt es ein eindeutig bestimmtes $q \in \mathbb{N}$ mit $qm \leq a < (q+1)m$. Mit $r := a - qm$ folgt die Behauptung. \square

Definition 2.24 (\mathbb{Z} modulo m). Sei $m \in \mathbb{N}$ mit $m \geq 2$. Dann sei $\mathbb{Z}_m := \{0, 1, \dots, m-1\}$. Für $a, b \in \mathbb{Z}_m$ definieren wir noch Abbildungen $+$ und \cdot durch $a + b := r_m(a +_{\mathbb{Z}} b)$ und $a \cdot b := r_m(a \cdot_{\mathbb{Z}} b)$. (Die Operationen in den $r_m(\dots)$ kommen aus \mathbb{Z} .)

Manchmal ist es hilfreich, auch die Operatoren aus verschiedenen Mengen durch Subskripte zu unterscheiden, also $+_K, \cdot_R$, etc.

Lemma 2.25. $(\mathbb{Z}_m, +, \cdot)$ ist ein kommutativer Ring.⁶

Beweis. Übungsaufgabe. \square

Lemma 2.26. $(\mathbb{Z}_m, +, \cdot)$ ist genau dann ein Körper, wenn m eine Primzahl ist.

Beweis. Angenommen \mathbb{Z}_m ist ein Körper. Dann folgt $\text{char}(\mathbb{Z}_m) = m$ aus der Definition der Addition über die Addition in \mathbb{Z} (in \mathbb{Z} ist $m \cdot 1 = 1 + 1 + \dots + 1 = m$). Nach Lemma 2.17 ist m eine Primzahl.

Für die Umkehrung sei nun m eine Primzahl. Zuerst zeigen wir, dass \mathbb{Z}_m nullteilerfrei ist. Seien $a, b \in \mathbb{Z}_m$ mit $a \cdot b = 0 = r_m(a +_{\mathbb{Z}} b)$. Folglich wird ab von m geteilt (Rest 0). Da m eine Primzahl ist, folgt (aus dem Lemma von EUKLID): m teilt a oder m teilt b . Weil nun $0 \leq a, b < m$ ist, muss $a = 0$ oder $b = 0$ sein. Folglich haben wir gezeigt, dass \mathbb{Z}_m nullteilerfrei ist.

Nun zeigen wir, dass jedes $a \in \mathbb{Z}_m$ mit $a \neq 0$ ein multiplikatives Inverses besitzt. Für solche a definieren wir die Abbildung $\rho_a: \mathbb{Z}_m \rightarrow \mathbb{Z}_m$, $x \mapsto xa$. Dann ρ_a ist injektiv: Aus $xa = \rho_a(x) = \rho_a(y) = ya \iff (x - y)a = 0$ folgt aufgrund Nullteilerfreiheit $x - y = 0 \iff x = y$. Da \mathbb{Z}_m endlich ist, ist ρ_a auch surjektiv.

Aus der Bijektion folgt, dass $0a, 1a, \dots, (m-1)a$ paarweise verschieden sind (injektiv), und diese Elemente auch jedes Element aus \mathbb{Z}_m repräsentiert (surjektiv), insbesondere die 1. Es gibt also ein $x \in \mathbb{Z}_m$ mit $xa = 1$. Zu jedem $a \in \mathbb{Z}_m \setminus 0$ gibt es also ein multiplikatives Inverses $x \in \mathbb{Z}_m$, sprich a ist invertierbar, was Axiom (M4) erfüllt. Die restlichen Körperaxiome folgen aus dem kommutativen Ring. \square

Vom kommutativen Ring zum Körper fehlt nur noch die Existenz des multiplikativen Inversen. Hierfür haben wir alle möglichen Kandidaten für das Inverse betrachtet, also $0a, 1a, \dots, (m-1)a$. Wir beobachten, dass diese Menge genau \mathbb{Z}_m entspricht, es also eine einfache Bijektion ρ_a geben muss, die wir auch beweisen haben. Der Trick hier war zu zeigen, dass \mathbb{Z}_m nullteilerfrei ist (ein gutes Zeichen, da Nullteilerfreiheit eine Körpereigenschaft ist).

Bezeichnung 2.27 (endlicher Körper). Für Primzahlen p schreiben wir auch $\mathbb{F}_p := \mathbb{Z}_p$.

3 Vektorräume

Vektorräume sind wichtige Objekte, die in vielen Bereichen der Mathematik vorkommen. Das Ziel der linearen Algebra ist es, eine „Theorie der Vektorräume“ zu entwickeln und dabei die Eigenschaften von Vektorräumen zu erforschen.

⁵Als triviale Objekte werden oft offensichtliche oder sehr einfache Objekte sowie uninteressante Randfälle bezeichnet.

⁶Ein sog. Restklassenring modulo m .

3.1 Vektorraumaxiome

Axiom 3.1 (Vektorraum). Sei K ein Körper. Ein *Vektorraum über K* oder *K -Vektorraum* ist eine Menge V zusammen mit zwei Abbildungen

$$+ : V \times V \rightarrow V, \quad (v_1, v_2) \mapsto v_1 + v_2 \quad \text{und} \quad \cdot : K \times V \rightarrow V, \quad (a, v) \mapsto a \cdot v,$$

Addition bzw. *Skalarmultiplikation* genannt, sodass folgende Regeln (Axiome) gelten:

- (A1) $v_1 + (v_2 + v_3) = (v_1 + v_2) + v_3$ für alle $v_1, v_2, v_3 \in V$ (*Assoziativität der Addition*);
- (A2) $v_1 + v_2 = v_2 + v_1$ für alle $v_1, v_2 \in V$ (*Kommutativität der Addition*);
- (A3) Es existiert ein Element $0 = 0_V \in V$ mit $v + 0_V = v$ für alle $v \in V$ (Existenz eines *Nullelements*);
- (A4) Zu jedem $v \in V$ gibt es ein $-v \in V$ mit $v + (-v) = 0$ (Existenz eines *additiven Inversen*);
- (SM1) $(ab) \cdot v = a \cdot (b \cdot v)$ für alle $a, b \in K$ und $v \in V$;
- (SM2) $1_K \cdot v = v$ für alle $v \in V$;
- (SM3) $a \cdot (v_1 + v_2) = a \cdot v_1 + a \cdot v_2$ für alle $a \in K$ und $v_1, v_2 \in V$;
- (SM4) $(a + b) \cdot v = (a \cdot v) + (b \cdot v)$ für alle $a, b \in K$ und $v \in V$.

Wir schreiben oft auch einfach V für den K -Vektorraum $(V, +, \cdot)$.

Bezeichnung 3.2. Um die Notation zu vereinfachen, legen wir $v_1 - v_2 := v_1 + (-v_2)$, $av := a \cdot v$ für alle $v_1, v_2, v \in V$ und $a \in K$ sowie *Punkt- vor Strichrechnung* fest.

Bezeichnung 3.3 (Vektor, Skalar, Nullvektor). Die Elemente von V nennen wir *Vektoren*, die Elemente von K nennen wir *Skalare*. Das Nullelement 0_V heißt *Nullvektor* oder auch *die Null von V* .

Bemerkung 3.4. Es ist sehr wichtig, zu wissen, welchen Grundkörper K der Vektorraum hat. Dieselbe Menge V , aber über zwei verschiedene Körper K_1 und K_2 , sind zwei verschiedene Vektorräume, nämlich ein K_1 - und ein K_2 -Vektorraum. Im Allgemeinen ist ein Vektorraum über einen anderen Körper kein Vektorraum mehr, da er z. B. nicht mehr abgeschlossen ist.

Bemerkung 3.5. Die Skalarmultiplikation multipliziert ein Skalar mit einem Vektor (wie der Name schon sagt, also kein Skalarprodukt). Wir beachten auch die Reihenfolge der Skalarmultiplikation, d. h. Skalare werden von *links* multipliziert.

Wie bei Körpern gibt es eine Vielzahl an Rechenregeln für Vektorräume, die wir in den Übungen beweisen.

3.2 Beispiele von Vektorräumen

Bezeichnung 3.6 (Nullvektorraum). Sei $V := \{0\}$ über K der (triviale) *Nullvektorraum* (oft auch einfach nur $V = 0$). Addition und Skalarmultiplikation können nur auf genau eine Weise definiert werden:

$$\begin{aligned} + : V \times V &\rightarrow V, & 0 + 0 &\mapsto 0 \\ \cdot : V \times V &\rightarrow V, & 0 \cdot 0 &\mapsto 0 \end{aligned}$$

Beispiel 3.7. Sei K ein Körper. Dann ist K ein K -Vektorraum mit Addition und Skalarmultiplikation definiert als Addition und Multiplikation von K .

Definition 3.8 (Standardvektorraum). Sei K ein Körper. Für $n \geq 1$ sei $V := K^n$ das n -fache kartesische Produkt von K . Die Elemente aus K^n schreiben wir oft als Spalten

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix}$$

mit $a_1, \dots, a_n \in K$. Wir definieren komponentenweise

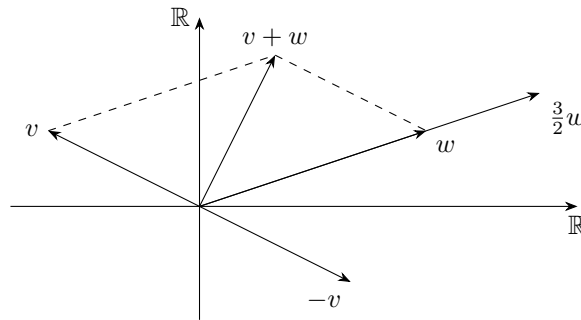
$$+: V \times V \rightarrow V \quad \text{durch} \quad \left(\begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} \right) \mapsto \begin{pmatrix} a_1 + b_1 \\ \vdots \\ a_n + b_n \end{pmatrix}$$

und

$$\cdot: K \times V \rightarrow V \quad \text{durch} \quad \left(a, \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} \right) \mapsto \begin{pmatrix} ab_1 \\ \vdots \\ ab_n \end{pmatrix}.$$

Dann ist $(V, +, \cdot)$ ein K -Vektorraum, der sog. *Standardvektorraum*. Wir legen $K^0 := 0$ aus K fest. Dabei stammt die komponentenweise Addition und Multiplikation aus K .

In $V = \mathbb{R}^2$ mit $K = \mathbb{R}$ können wir Addition und Skalarmultiplikation visualisieren, indem wir Vektoren als Pfeile darstellen. Addition heißt dann Aneinanderreihen von Pfeilen; Skalarmultiplikation heißt dann Strecken/Stauchen oder Änderung der Richtung von Pfeilen. Das sollte aus der Schule bekannt sein.



Ein sehr wichtiges Beispiel von Vektorräumen:

Definition 3.9 (Funktionsraum). Sei K ein Körper und sei $I \neq \emptyset$ eine Menge. Wir setzen $V := K^I := \text{Abb}(I, K)$ und definieren

$$+: V \times V \rightarrow V, \quad (f, g) \mapsto f + g \quad \text{und} \quad \cdot: K \times V \rightarrow V, \quad (a, f) \mapsto af,$$

punktweise durch

$$(f + g)(x) := f(x) + g(x) \quad \text{und} \quad (af)(x) := a(f(x))$$

für alle $f, g \in V$, $a \in K$, und $x \in I$.

Dann ist $(V, +, \cdot)$ ein K -Vektorraum, der sog. (*lineare*) *Funktionsraum*. Wir definieren $K^\emptyset = 0$ als Nullabbildung.

Dabei ist in den Definitionsgleichungen auf der linken Seite Addition und Skalarmultiplikation in V , sowie auf der rechten Seite Addition und Multiplikation in K .^{1,2}

Ein noch wichtigeres Beispiel ist

Definition 3.10. Sei K ein Körper und sei $I \neq \emptyset$ eine Menge. Dann ist

$$K^{(I)} := \{f \in K^I \mid f(x) \neq 0 \text{ für nur endlich viele } x \in I\}$$

ein K -Vektorraum, wobei wir Addition und Skalarmultiplikation von K^I benutzen. Wir definieren $K^{(\emptyset)} = 0$ als Nullabbildung.

Jede Abbildung $f \in K^{(I)}$ bildet also fast alle $x \in I$ (bis auf endlich viele) auf 0 ab.

¹An dieser Stelle fragt man sich vielleicht, warum der Standardvektorraum K^n und der Funktionsraum K^I identisch notiert werden. Das liegt daran, dass sie tatsächlich „identisch“ (d. h. *isomorph*) sind, weil es eine Bijektion wie in Beispiel 1.35 gibt.

²Für $I = \mathbb{N}$ lässt sich auch der „unendlichdimensionale“ *Folgenraum*

$$K^{\mathbb{N}} := \{(a_1, a_2, a_3, \dots) \mid a_i \in K \text{ für alle } i \in \mathbb{N}\}$$

(wie in der Analysis) definieren.

Definition 3.11 (Teilkörper). Sei $(L, +, \cdot)$ ein Körper und sei K eine Teilmenge von L , sodass die Eigenschaften

1. $0, 1 \in K$ (neutrale Elemente);
2. $a + b \in K$ für alle $a, b \in K$ (Abgeschlossenheit unter Addition);
3. $a \cdot b \in K$ für alle $a, b \in K$ (Abgeschlossenheit unter Multiplikation);
4. $-a \in K$ für alle $a \in K$ (additive Inverse) und
5. $a^{-1} \in K$ für alle $a \in K^\times$ (multiplikative Inverse)

erfüllt sind. Durch Einschränkung erhalten wir die Abbildungen

$$+ : K \times K \rightarrow K \quad \text{und} \quad \cdot : K \times K \rightarrow K.$$

(Das ist aufgrund der Abgeschlossenheit von $+$ und \cdot garantiert, s. Punkte 2 und 3.) Wir können leicht überprüfen, dass K einen Körper bildet, und nennen K einen *Teilkörper* von L .

Beispiel 3.12. Ist K ein Teilkörper von L , so ist L ein K -Vektorraum, wobei die Skalarmultiplikation $\cdot : K \times L \rightarrow L$ durch Einschränkung der Multiplikation $\cdot : L \times L \rightarrow L$ definiert ist.

Bspw. ist der Körper $\mathbb{Q}(\sqrt{2})$ ein \mathbb{Q} -Vektorraum und \mathbb{R} sowohl ein \mathbb{Q} - als auch ein $\mathbb{Q}(\sqrt{2})$ -Vektorraum.

Definition 3.13 (externe direkte Summe). Seien V und W zwei K -Vektorräume. Dann ist die $V \times W$ wieder ein K -Vektorraum, wobei Addition und Skalarmultiplikation komponentenweise definiert sind durch

$$(v_1, w_1) + (v_2, w_2) := (v_1 + v_2, w_1 + w_2) \quad \text{und} \quad a(v, w) := (av, aw)$$

für alle $v, v_1, v_2 \in V$, $w, w_1, w_2 \in W$ und $a \in K$. Der K -Vektorraum $V \times W$ nennen wir die (*externe*) *direkte Summe* von V und W und schreiben $V \oplus W$.

Noch ein Beispiel aus der Analysis.

Beispiel 3.14. Sei $I = [a, b]$ ein abgeschlossenes Intervall in \mathbb{R} und sei

$$C^0(I) := \{\text{stetige Funktionen } I \rightarrow \mathbb{R}\}$$

eine Teilmenge von \mathbb{R}^I . Dann ist $C^0(I)$ ein \mathbb{R} -Vektorraum mit der Einschränkung von $+: \mathbb{R}^I \times \mathbb{R}^I \rightarrow \mathbb{R}^I$ und $\cdot: \mathbb{R} \times \mathbb{R}^I \rightarrow \mathbb{R}^I$ auf die neue Definitionsmenge $I \subset \mathbb{R}$.

Ende der Vorlesung 3 am 19. Oktober 2021

3.3 Unterräume

Definition 3.15. Sei V ein K -Vektorraum. Eine Teilmenge U von V heißt *Unterraum* von V , falls gilt:

1. $U \neq \emptyset$;
2. $u_1 + u_2 \in U$ für alle $u_1, u_2 \in U$ (Abgeschlossenheit bzgl. Addition) und
3. $au \in U$ für alle $a \in K$ und $u \in U$ (Abgeschlossenheit bzgl. Skalarmultiplikation).

Lemma 3.16. Sei U ein Unterraum von V . Durch Einschränkung der Addition und Skalarmultiplikation von V erhalten wir Abbildungen $+: U \times U \rightarrow U$ und $\cdot: K \times U \rightarrow U$ (was aufgrund Punkte 2 und 3 möglich ist). Dann ist U zusammen mit beiden Einschränkungen wieder ein K -Vektorraum.

Beweis. Sei $u \in U$. Aus Punkt 3 folgen $0u = 0 \in U$ und $(-1)u = -u \in U$. Deshalb gelten die Axiome (A3) und (A4). Alle anderen Axiome folgen aus V . \square

Beispiel 3.17. Die Teilmengen V und $\{0\}$ (statt $\{0\}$ schreiben wir oft nur 0) sind Unterräume von V , die sog. *trivialen Unterräume*.

Beispiel 3.18. Sei $v \in V$. Dann ist

$$U_v := Kv := \{av \mid a \in K\}$$

der kleinste Unterraum³ von V , welcher v enthält.

Definition 3.19 (Gerade). Ist $v \neq 0$, so nennen wir

$$U_v := Kv := \{av \mid a \in K\}$$

die durch v verlaufende *Gerade*.

Beispiel 3.20. Für jede Menge I ist $K^{(I)}$ ein Unterraum von K^I , denn nach Addition und Skalarmultiplikation hat jede Abbildung immer noch nur endlich viele Stellen ungleich 0.

Beispiel 3.21. Sei $I = [a, b]$ ein Intervall in \mathbb{R} . Dann ist $C^0(I)$ ein Unterraum von \mathbb{R}^I , weil sich die Stetigkeit unter Addition und Skalarmultiplikation nicht ändert.

Beispiel 3.22. Die Elemente des \mathbb{R} -Vektorraums $\mathbb{R}^{\mathbb{N}}$ sind die in der Analysis behandelten reellen Folgen. Die Teilmenge der konvergenten reellen Folgen ist ein Unterraum von $\mathbb{R}^{\mathbb{N}}$, da aufgrund der Grenzwertsätze die Folgen nach Addition und Skalarmultiplikation immer noch konvergieren.

Beispiel 3.23. Sei $a \in K$. Wir definieren

$$U(a) := \left\{ \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \mid b \in K \right\}.$$

Dann ist $U(a)$ genau dann ein Unterraum von K^2 , wenn $a = 0$.

Definition 3.24 (Durchschnitt, Summe). Seien U_1 und U_2 Unterräume von V . Dann ist $U_1 \cap U_2$ der *Durchschnitt* von U_1 und U_2 sowie

$$U_1 + U_2 := \{u_1 + u_2 \mid u_1 \in U_1, u_2 \in U_2\}$$

die *Summe* von U_1 und U_2 .

Lemma 3.25. $U_1 \cap U_2$ und $U_1 + U_2$ sind Unterräume von V .

Definition 3.26 (interne direkte Summe). Seien U_1 und U_2 Unterräume von V . Ist $U_1 \cap U_2 = 0$, so nennen wir

$$U_1 \oplus U_2 := U_1 + U_2$$

die (*interne*) *direkte Summe* von U_1 und U_2 .

Definition 3.27 (Summe, interne direkte Summe von Familien). Sei I eine Indexmenge, und für jedes $i \in I$ sei U_i ein Unterraum von V (kurz $(U_i)_{i \in I}$ eine Familie von Unterräumen von V). Die *Summe*

$$\sum_{i \in I} U_i$$

der Unterräume U_i ist die Menge aller Vektoren $v \in V$, für die es eine endliche Teilmenge $J \subseteq I$ gibt, sodass

$$v = \sum_{j \in J} u_j \quad \text{mit } u_j \in U_j \text{ für alle } j \in J.$$

Ist

$$U_j \cap \left(\sum_{i \in I \setminus j} U_i \right) = 0 \quad \text{für alle } j \in I,$$

so nennen wir die Summe (*interne*) *direkte Summe* und schreiben

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

³An der Stelle müssten wir definieren, was „klein“ i. S. v. Unterräumen bedeuten soll. Hier meint der Dozent wahrscheinlich die *Dimension*, die später drankommt.

Jedes $v \in (U_i)_{i \in I}$ ist also eine Summe von endlich vielen Vektoren u_j , wobei jedes u_j von einem anderen Unterraum kommt.^{4,5}

Lemma 3.28. $\bigcup_{i \in I} U_i$ und $\sum_{i \in I} U_i$ sind Unterräume von V .

Betrachten wir Standardvektorräume (wie z.B. \mathbb{R}^2), dann können wir uns Untervektorräume als z.B. den Ursprung, Geraden, Ebenen, Räume, etc. vorstellen, die den Ursprung enthalten. Insbesondere sind U_v Ursprungsgeraden. Die interne Summe zweier verschiedener Geraden in \mathbb{R}^2 ist \mathbb{R}^2 selbst; die Summe ist auch direkt, da sie nur 0 teilen.

4 Lineare Abbildungen

Die „Theorie der Vektorräume“ wird interessant, wenn wir noch Abbildungen zwischen Vektorräumen betrachten. Dabei sollen sie die Vektorraumstruktur¹ erhalten, d.h. mit der Addition und Skalarmultiplikation innerhalb des Start- und Zielvektorraums kompatibel sein. Das führt zu *linearen Abbildungen* bzw. *Homomorphismen* („Gleich-Gestalter“). Das vorläufige Ziel wird es sein, lineare Abbildungen zu verstehen.

4.1 Definition

Definition 4.1 (lineare Abbildung). Seien V und W zwei K -Vektorräume. Eine Abbildung $f: V \rightarrow W$ heißt *linear* (oder *K -linear*), falls folgende Bedingungen gelten:

1. $f(v_1 + v_2) = f(v_1) + f(v_2)$ für alle $v_1, v_2 \in V$; und
2. $f(av) = af(v)$ für alle $v \in V$ und $a \in K$.

Dabei finden Addition und Skalarmultiplikation zwischen den Argumenten der Abbildung in V und zwischen den Bildern der Abbildung in W statt. Anders geschrieben:

$$\begin{aligned} f(v_1 +_V v_2) &= f(v_1) +_W f(v_2), \\ f(a \cdot_V v) &= a \cdot_W f(v) \end{aligned}$$

Definition 4.2 (Homomorphismus, Endomorphismus). Ist $f: V \rightarrow W$ linear, so nennen wir f einen *Homomorphismus*. Ist zudem $V = W$, so nennen wir f einen *Endomorphismus* (also $f: V \rightarrow V$).

Weiterhin definieren wir

$$\text{Hom}(V, W) := \{f \in \text{Abb}(V, W) \mid f \text{ ist ein Homomorphismus}\}$$

und

$$\text{End}(V) := \text{Hom}(V, V).$$

Definition 4.3 (Monomorphismus, Epimorphismus, Isomorphismus). Sei $f: V \rightarrow W$ ein Homomorphismus.

- f ist ein *Monomorphismus*, falls f injektiv ist.
- f ist ein *Epimorphismus*, falls f surjektiv ist.
- f ist ein *Isomorphismus*, falls f bijektiv ist.

Definition 4.4 (isomorph). Zwei K Vektorräume V und W heißen *isomorph*, falls ein Isomorphismus $f: V \rightarrow W$ existiert. Wir schreiben dann $V \cong W$.

⁴Anders formuliert: Jeder Vektor v der internen Summe ist die Summe $\sum_{i \in I} u_i$ mit $u_i \in U_i$, wobei $u_i \neq 0$ nur für endlich viele u_i gilt. Vgl. mit der Definition von $K^{(I)}$.

⁵Eine witzige Eigenschaft: Für zwei Untervektorräume U und W von V gilt

$$U \times \{0\} \oplus \{0\} \times W = U \oplus W,$$

also $(u, 0) + (0, w) = (u, w)$, wobei auf der linken Seite die *interne* direkte Summe und auf der rechten Seite die *externe* direkte Summe gemeint ist. Die Vektorräume auf der linken Seite teilen sich nur den Vektor $(0, 0)$.

¹Wichtig ist, dass die hier betrachteten Homomorphismen *Vektorraumstrukturen erhalten*, d.h. sie sind mit der Vektorraumstruktur *verträglich*. Es gibt noch viele andere Homomorphismen, wie z.B. Mengenhomomorphismen (das sind die Abbildungen), Gruppenthomomorphismen, Homomorphismen zwischen topologischen Räumen (sog. Homöomorphismen), etc.

Der Begriff der Isomorphie ist sehr mächtig, da er uns erlaubt, innerhalb der linearen Algebra die beiden Objekte „gleichzusetzen“, d. h. die Objekte sind zueinander äquivalent und verhalten sich auch (unter Addition und Skalarmultiplikation) gleich.²

Lemma 4.5. Seien V und W zwei K -Vektorräume. Eine Abbildung $f: V \rightarrow W$ ist genau dann linear, wenn

$$f(a_1v_1 + a_2v_2) = a_1f(v_1) + a_2f(v_2)$$

für alle $a_1, a_2 \in K$ und $v_1, v_2 \in V$ gilt.

Beweis. Übungsaufgabe. □

4.2 Beispiele von linearen Abbildungen

Definition 4.6 (Nullabbildung). Seien V und W zwei K -Vektorräume. Die *Nullabbildung*

$$f: V \rightarrow W, \quad v \mapsto 0 \quad \text{für alle } v \in V$$

ist ein Homomorphismus. Wir schreiben $f = 0$.

Definition 4.7 (Identität). Sei V ein K -Vektorraum. Die *Identität*

$$f: V \rightarrow V, \quad v \mapsto v \quad \text{für alle } v \in V$$

ist ein Homomorphismus. Wir schreiben $f = \text{id}_V$.

Die Identität ist ein bijektiver Endomorphismus, also ein Isomorphismus und insbesondere ein Homomorphismus.

Beispiel 4.8.

1. Sei V ein K -Vektorraum und sei $a \in K$. Die Abbildung $f_a: V \rightarrow V$, $v \mapsto av$ für alle $v \in V$ ist ein Homomorphismus. Ist $a \neq 0$, d. h. $f_a \neq 0$, so ist f_a sogar ein Isomorphismus.
2. Für jeden Homomorphismus $f: K \rightarrow K$ gibt es ein $a \in K$ mit $f = f_a$. Für alle $\lambda \in K$ gilt nämlich $f(\lambda) = f(\lambda 1) = \lambda f(1)$. Dann können wir $a := f(1)$ setzen.
3. Die Graphen der Homomorphismen $f: K \rightarrow K$ sind genau die Geraden $U_v \subseteq K^2$, wobei $v = (a, b)$ mit $a \neq 0$ ist. Die Punkte des Graphen sind nämlich $(\lambda, f(\lambda)) = (\lambda, \lambda f(1)) = \lambda(1, f(1))$ für alle $\lambda \in K$. Für $a = 0$ wäre f nur auf 0 definiert.

Beispiel 4.9. Sei K ein Körper und sei $(a, b, c, d) \in K^4$ gegeben. Die Abbildung³

$$f: K^2 \rightarrow K^2, \quad \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} ax + by \\ cx + dy \end{pmatrix}$$

ist ein Homomorphismus.

(Um das nachzuweisen, setzen wir einfach in die Definition linearer Abbildungen ein. Für die Addition gilt

$$f\left(\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix}\right) = \begin{pmatrix} a(x_1 + x_2) + b(y_1 + y_2) \\ c(x_1 + x_2) + d(y_1 + y_2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ax_1 + by_1 \\ cx_1 + dy_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} ax_2 + by_2 \\ cx_2 + dy_2 \end{pmatrix} = f\left(\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix}\right) + f\left(\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix}\right).$$

Analog können wir zeigen, dass die Abbildung mit der Skalarmultiplikation kompatibel ist.)

Beispiel 4.10. Die Abbildung $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, $x \mapsto x^2$ ist kein Homomorphismus bzw. nicht \mathbb{R} -linear, denn z. B. gilt $16 = f(2 + 2) \neq f(2) + f(2) = 8$.

Warnung: In der linearen Algebra gibt es viele verschiedene Nullen. Z. B. seien V und W zwei K -Vektorräume. 0 kann nun die Null 0_K in K , die Null 0_V in V , die Null 0_W in W , die Nullabbildung $0: V \rightarrow W$ oder der triviale Unterraum $\{0\}$ sein.

²Zusätzlich definiert man einen *Automorphismus* als einen bijektiven Endomorphismus, also Isomorphismus und Endomorphismus gleichzeitig.

³Das ist das Matrix-Vektor-Produkt.

4.3 Erste Eigenschaften linearer Abbildungen

Für das restliche Kapitel seien V und W zwei K -Vektorräume.

Lemma 4.11. *Sei $f: V \rightarrow W$ ein Homomorphismus. Dann gilt $f(0) = 0$.*

Beweis. Es gibt zwei Möglichkeiten, die Aussage zu beweisen.

Erster Beweis: Es gilt

$$f(0) \stackrel{(A3)}{=} f(0+0) \stackrel{\text{Hom.}}{=} f(0) + f(0).$$

Daraus folgt

$$0 \stackrel{(A4)}{=} f(0) - f(0) = (f(0) + f(0)) - f(0) \stackrel{(A1)}{=} f(0) + (f(0) - f(0)) \stackrel{(A4)}{=} f(0) + 0 \stackrel{(A3)}{=} f(0).$$

Zweiter Beweis: Für die Nullen $0_K \in K$, $0_V \in V$ und $0_W \in W$ gilt mit der Rechenregel $0v = 0$

$$f(0_V) = f(0_K 0_V) \stackrel{\text{Hom.}}{=} 0_K f(0_V) = 0_W. \quad \square$$

Der zweite Beweis ist zwar kürzer, ist aber weniger elementar.

Lemma 4.12. *Sei $f: V \rightarrow W$ ein Isomorphismus. Dann ist die Umkehrabbildung $f^{-1}: W \rightarrow V$ wieder ein Isomorphismus.*

Beweis. Aus den Eigenschaften von Bijektionen wissen wir, dass f^{-1} existiert und auch bijektiv ist. Wir müssen noch zeigen, dass f^{-1} linear ist.

Weil f bijektiv ist, ist jedes $w \in W$ von der Form $f(v) = w$ für ein eindeutig bestimmtes $v \in V$. Dann gelten für alle $v, v_1, v_2 \in V$ und $a \in K$

$$f^{-1}(f(v_1) + f(v_2)) = f^{-1}(f(v_1 + v_2)) = v_1 + v_2 = f^{-1}(f(v_1)) + f^{-1}(f(v_2))$$

und

$$f^{-1}(a(f(v))) = f^{-1}(f(av)) = av = af^{-1}(f(v)).$$

Folglich ist f^{-1} linear. \square

Lemma 4.13. *Seien $f: U \rightarrow V$ und $g: V \rightarrow W$ Homomorphismen. Dann ist die Komposition $g \circ f: U \rightarrow W$ auch ein Homomorphismus.*

Beweis. Wir verwenden Lemma 4.5. Für alle $a_1, a_2 \in K$ und $v_1, v_2 \in V$ gilt

$$\begin{aligned} (g \circ f)(a_1 u_1 + a_2 u_2) &= g(f(a_1 u_1 + a_2 u_2)) \stackrel{\text{Hom. } f}{=} g(a_1 f(u_1) + a_2 f(u_2)) \\ &\stackrel{\text{Hom. } g}{=} a_1 g(f(u_1)) + a_2 g(f(u_2)) = a_1 (g \circ f)(u_1) + a_2 (g \circ f)(u_2). \end{aligned} \quad \square$$

Ende der Vorlesung 4 am 22. Oktober 2021

Lemma 4.14. *Für alle $f, g \in \text{Hom}(V, W)$ und $a \in K$ definieren wir Abbildungen (Addition und Skalarmultiplikation eines Funktionenraums)*

$$f + g: V \rightarrow W, \quad v \mapsto f(v) + g(v) \quad \text{und} \quad af: V \rightarrow W, \quad v \mapsto a(f(v)).$$

Dann ist $(\text{Hom}(V, W), +, \cdot)$ ein K -Vektorraum

Beweis.

- Zuerst müssen wir zeigen, dass die Addition und Skalarmultiplikation auf $\text{Hom}(V, W)$ abgeschlossen ist, d. h., dass $f + g$ und af linear sind. Dafür können wir leicht überprüfen, dass

$$(f + g)(\lambda_1 v_1 + \lambda_2 v_2) = \lambda_1 (f + g)(v_1) + \lambda_2 (f + g)(v_2)$$

für alle $v_1, v_2 \in V$ und $\lambda_1, \lambda_2 \in K$ gilt.

- Die Axiome (A1) und (A2) in $\text{Hom}(V, W)$ folgen aus den Axiomen (A1) und (A2) in W .
- Der Nullvektor in $\text{Hom}(V, W)$ (Axiom (A3)) ist die Nullabbildung $0: V \rightarrow W$, ein Homomorphismus.
- Für jedes $f \in \text{Hom}(V, W)$ definieren wir $-f: V \rightarrow W$, $v \mapsto -(f(v))$ als das additive Inverse. Wir sehen leicht, dass $-f \in \text{Hom}(V, W)$. Dann gilt

$$(f + (-f))(v) = f(v) + (-f(v)) = 0 \quad \text{für alle } v \in V.$$

Also gilt Axiom (A4) in $\text{Hom}(V, W)$.

- Für alle $f, g \in \text{Hom}(V, W)$, $a \in K$ und $v \in V$ gilt

$$\begin{aligned} (a(f + g))(v) &= a((f + g)(v)) = a(f(v) + g(v)) \stackrel{\text{(SM3)}}{=} a(f(v)) + a(g(v)) \\ &= (af)(v) + (ag)(v) = (af + ag)(v). \end{aligned}$$

Also gilt Axiom (SM3) in $\text{Hom}(V, W)$.

- Den Nachweis der Axiome (SM1), (SM2) und (SM4) können wir ähnlich führen. □

Lemma 4.15. Sei $f: V \rightarrow W$ ein Homomorphismus.

1. Existiert ein Homomorphismus $g: W \rightarrow V$ mit $g \circ f = \text{id}_V$, so ist f ein Monomorphismus.
2. Existiert ein Homomorphismus $g: W \rightarrow V$ mit $f \circ g = \text{id}_W$, so ist f ein Epimorphismus.

Beweis. Übungsaufgabe. □

Bemerkung 4.16. Die Umkehrung der beiden Aussagen in Lemma 4.15 gilt auch. Der Beweis dazu erfolgt später.⁴

4.4 Lineare Abbildungen und affine Geraden

Definition 4.17 (Restklasse modulo U). Sei V ein K -Vektorraum und sei U ein Unterraum von V sowie $v \in V$. Dann ist die *Restklasse von v modulo U* definiert als die Menge

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

Das entspricht dem Unterraum U , aber verschoben um v .⁵

Zur Erinnerung: Wir definierten $U_v := \{av \mid a \in K\}$ für $v \in V$.

Definition 4.18 (affine Gerade). Für alle $v, w \in V$ sei

$$L_{v,w} := \{u_{v,w}(a) := av + (1-a)w \mid a \in K\}.$$

Falls $v \neq w$, nennen wir $L_{v,w}$ die durch v und w verlaufende *affine Gerade*. Falls $v = w$ ist $L_{v,w} = \{v\}$.

Bemerkung 4.19. 1. Für $a = 1$ und $a = 0$ erhalten wir $v \in L_{v,w}$ bzw. $w \in L_{v,w}$.

2. Im Allgemeinen ist $L_{v,w}$ kein Unterraum von V . Bspw. fehlt der Nullvektor.

Lemma 4.20. Seien $v, w \in V$. Es gilt für alle affinen Geraden

$$L_{v,w} = w + U_{v-w}.$$

Beweis. Es gilt für alle $a \in K$

$$u_{v,w}(a) = av + (1-a)w = w + a(v-w).$$

Folglich bestehen die affine Gerade und die Restklasse aus denselben Elementen. □

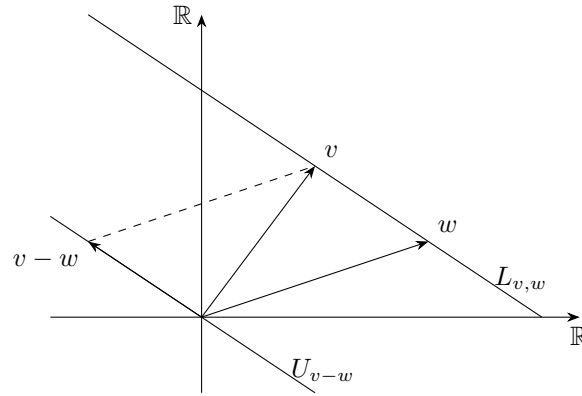


Abbildung 4.1: Affine Gerade $L_{v,w}$ in \mathbb{R}^2 . U_{v-w} geht durch 0, während $L_{v,w}$ eine Verschiebung von U_{v-w} um w ist. $L_{v,w}$ und U_{v-w} sind dementsprechend parallel.

Für einen Homomorphismus $f: V \rightarrow W$ gilt nun

$$f(u_{v,w}(a)) = f(av + (1-a)w) = a(f(v)) + (1-a)(f(w)) = u_{f(v),f(w)}(a).$$

Damit bildet f affine Geraden wieder auf affine Geraden ab (falls $f(v) \neq f(w)$). Die Bildgerade unter f kann aber rotiert oder parallel verschoben worden sein. Durch Einschränkung erhalten wir Abbildungen

$$f_{v,w}: L_{v,w} \rightarrow L_{f(v),f(w)}, \quad u_{v,w}(a) \mapsto u_{f(v),f(w)}(a)$$

und

$$f_{v-w}: U_{v-w} \rightarrow U_{f(v)-f(w)}, \quad a(v-w) \mapsto a(f(v) - f(w))$$

mit $a \in K$.

Bemerkung 4.21.

1. Für $v \neq w$ mit $f(v) \neq f(w)$ sind $f_{v,w}$ und f_{v-w} beide bijektiv. In diesem Fall werden die *parallelen* affinen Geraden U_{v-w} und $L_{v,w}$ wieder auf die *parallelen* affinen Geraden $U_{f(v)-f(w)}$ und $L_{f(v),f(w)}$ abgebildet.
2. Für $v \neq w$, aber $f(v) = f(w)$ ist $L_{f(v),f(w)} = \{f(v)\}$ und $U_{f(v)-f(w)} = 0$.

4.5 Kern und Bild

Definition 4.22 (Kern, Bild). Sei $f: V \rightarrow W$ ein Homomorphismus. Dann ist

$$\text{Kern}(f) := \{v \in V \mid f(v) = 0\} \subseteq V$$

der *Kern* von f , und

$$\text{Bild}(f) := \{f(v) \mid v \in V\} \subseteq W$$

das *Bild* von f .

Der Kern ist im Prinzip die Menge aller „Nullstellen“ von f . Es gilt nämlich per Definition⁶

$$\text{Kern}(f) = f^{-1}(0).$$

Lemma 4.23. Sei $f: V \rightarrow W$ ein Homomorphismus. Dann gelten:

⁴Wir werden sehen, dass das mit der Invertierbarkeit von Matrizen zu tun hat, wobei g ein Produkt von Elementarmatrizen ist.

⁵Die Namensgebung entstammt der Zahlentheorie. Ähnlich sind alle $w \in U$ in der Restklasse $v + U$ enthalten, und v ist ein Repräsentant dieser Äquivalenzklasse (definiert durch $v \sim w \iff (v-w) \in U$).

⁶Eine alternative Charakterisierung des Kerns: Sei $f: V \rightarrow W$ ein Homomorphismus. Für alle $v, w \in V$ ir definieren die Äquivalenzrelation $v \sim w \iff f(v) = f(w)$. Dabei folgt aus der Linearität

$$v \sim w \iff f(v) = f(w) \iff f(v) - f(w) = f(v-w) = 0$$

Damit zerfällt V in Restklassen modulo $\text{Kern}(f)$.

1. $\text{Kern}(f)$ ist ein Unterraum von V .
2. $\text{Bild}(f)$ ist ein Unterraum von W .
3. $\text{Kern}(f) = 0$ genau dann, wenn f ein Monomorphismus ist.
4. $\text{Bild}(f) = W$ genau dann, wenn f ein Epimorphismus ist.

Beweis.

1. Wegen $f(0) = 0$ liegt 0 in $\text{Kern}(f)$. Damit ist $\text{Kern}(f) \neq \emptyset$.

Für alle $a \in K$ und $v, v_1, v_2 \in \text{Kern}(f)$ gilt aufgrund Linearität

$$f(v_1 + v_2) = f(v_1) + f(v_2) = 0 + 0 = 0 \quad \text{und} \quad f(av) = af(v) = a0 = 0.$$

Folglich liegen alle $v_1 + v_2$ und av in $\text{Kern}(f)$, also ist $\text{Kern}(f)$ unter Addition und Skalarmultiplikation abgeschlossen. $\text{Kern}(f)$ ist ein Unterraum von V .

2. Wegen $f(0) = 0$ liegt $f(0)$ in $\text{Bild}(f)$. Damit ist $\text{Bild}(f) \neq \emptyset$.

Seien $w, w_1, w_2 \in \text{Bild}(f)$, d. h. es gibt $v, v_1, v_2 \in V$ mit $f(v) = w$, $f(v_1) = w_1$ und $f(v_2) = w_2$. Für alle $a \in K$ und $w, w_1, w_2 \in \text{Bild}(f)$ gelten aufgrund Linearität

$$w_1 + w_2 = f(v_1) + f(v_2) = f(v_1 + v_2) \quad \text{und} \quad aw = af(v) = f(av).$$

Folglich gibt es zu jedem $w_1 + w_2$ und aw Urbilder, weshalb $w_1 + w_2$ und aw in $\text{Bild}(f)$ liegen. Also ist $\text{Bild}(f)$ unter Addition und Skalarmultiplikation abgeschlossen und $\text{Bild}(f)$ ein Unterraum von W .

3. Sei f injektiv und sei $v \in \text{Kern}(f)$. Dann gilt

$$f(v) = 0 = f(0),$$

und aus der Injektivität folgt $v = 0$. Also ist $\text{Kern}(f) = 0$.

Ist f nicht injektiv, so gibt es $v_1 \neq v_2$ in V mit $f(v_1) = f(v_2)$. Dann gilt aufgrund Linearität

$$f(v_1 - v_2) = f(v_1) - f(v_2) = 0.$$

Somit ist $v_1 - v_2 \in \text{Kern}(f)$, aber $v_1 - v_2 \neq 0$ und damit $\text{Kern}(f) \neq 0$.

4. Das folgt unmittelbar aus den Definitionen. □

Lemma 4.24. Sei $f: V \rightarrow W$ ein Homomorphismus und sei $b \in \text{Bild}(f)$. Dann ist $f^{-1}(b)$ genau dann ein Unterraum von V , wenn $b = 0$.

Beweis. Zur Rückrichtung: Ist $b = 0$, dann ist $f^{-1}(b) = \text{Kern}(f)$, was nach Lemma 4.23 ein Unterraum von V ist.

Zur Hinrichtung: Ist $b \neq 0$, dann folgt $0 \notin f^{-1}(b)$ aus $f(0) = 0$ (andernfalls wäre $f(0) = b \neq 0$). Damit ist $f^{-1}(b)$ kein Vektorraum und insbesondere kein Unterraum von V , weil der Nullvektor fehlt. □

Lemma 4.25. Sei $f: V \rightarrow W$ ein Homomorphismus und seien $b \in \text{Bild}(f)$ und $v \in f^{-1}(b)$. Dann gilt

$$f^{-1}(b) = v + f^{-1}(0) = v + \text{Kern}(f).$$

Das bedeutet, dass ein Urbild $v \in f^{-1}(b)$ ausreicht, um die gesamte Urbildmenge zu beschreiben. Das wird noch wichtig, wenn wir lineare Gleichungssysteme lösen werden.

Beweis. Sei $x \in v + \text{Kern}(f)$, also $x = v + u$ mit $u \in \text{Kern}(f)$. Wir haben

$$f(x) = f(v + u) = f(v) + f(u) = b + 0 = b.$$

Also gilt $x \in f^{-1}(b)$ für alle x und daher $v + \text{Kern}(f) \subseteq f^{-1}(b)$.

Sei nun $x \in f^{-1}(b)$. Es gelten

$$x = (v - v) + x = v + (x - v)$$

und

$$f(-v) = f((-1)v) = -f(v) = -b.$$

Daraus folgt

$$f(x - v) = f(x) + f(-v) = b - b = 0$$

und daher $x - v \in \text{Kern}(f)$, d. h. $x = v + (x - v) \in v + \text{Kern}(f)$ für alle x . Somit gilt $f^{-1}(b) \subseteq v + \text{Kern}(f)$ und letztendlich $f^{-1}(b) = v + \text{Kern}(f)$. □

5 Matrizenrechnung

5.1 Definition einer Matrix

Zur Erinnerung: Sei K ein Körper und $n \geq 1$. Dann ist K^n (das n -fache kartesische Produkt) die Menge aller n -Tupel der Form

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} \quad \text{mit } a_i \in K \text{ für alle } 1 \leq i \leq n.$$

Wir werden fast immer mit der *informellen* Definition von Matrizen arbeiten, die anschaulicher und praktischer ist.

Definition 5.1 (Matrix (informell)). Seien $m, n \geq 1$ natürliche Zahlen. Eine $(m \times n)$ -Matrix (mit Einträgen in K) ist eine Anordnung von Elementen $a_{ij} \in K$ mit $1 \leq i \leq m$ und $1 \leq j \leq n$ in Form eines Rechtecks/einer Tabelle

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix}.$$

Auch sehen wir die Indizes mit Kommata getrennt, also $a_{i,j}$, um z. B. $a_{1,37}$ und $a_{13,7}$ auseinanderzuhalten.

Bezeichnung 5.2 (Menge der Matrizen, Zeile, Spalte, Eintrag). Mit $K^{m,n}$ bezeichnen wir die Menge aller $(m \times n)$ -Matrizen. Die m -Tupel

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

nennen wir die j -te Spalte von A , und die n -Tupel

$$(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in})$$

nennen wir die i -te Zeile von A . Für alle $1 \leq i \leq m$ und $1 \leq j \leq n$ nennen wir $A_{ij} := a_{ij}$ den ij -ten Eintrag von A .

Bemerkung 5.3. Es ist sehr wichtig, dass wir sowohl in der Größe $m \times n$ als auch in den Indizes von a_{ij} *zuerst die Zeile, dann die Spalte* schreiben. Genauso ist die Anordnung der Einträge wichtig; vertauschen wir zwei Einträge, erhalten wir eine andere Matrix.

Beispiel 5.4.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & \pi & \sqrt{2} \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{2,3}$$

ist eine (2×3) -Matrix mit Einträgen in \mathbb{R} .

Nun zur *formalen* Definition, die wir kaum benutzen werden. Es ist aber recht einfach, alle Beweise und Aussagen in die formale Definition zu überführen.

Definition 5.5 (Matrix (formal)). Für $s \geq 1$ sei $I_s := \{1, 2, \dots, s\}$. Wir setzen

$$K^{m,n} := K^{I_m \times I_n} = \text{Abb}(I_m \times I_n, K).$$

Die Elemente von $K^{m,n}$ nennen wir $(m \times n)$ -Matrizen (mit Einträgen in K).

Eine Matrix A ist also die Abbildung¹

$$A: I_m \times I_n \rightarrow K, \quad (i, j) \mapsto a_{ij}.$$

¹Die Definition erinnert an die Schreibweise von Familien, $A = (a_{ij})_{(i,j) \in I_m \times I_n}$.

Bezeichnung 5.6. Statt

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \in K^{m,n}$$

schreiben wir auch

$$A = (a_{ij}) \in K^{m,n}.$$

Manchmal ist es sinnvoll, die Notation (a_{ij}) statt A zu wählen.

Definition 5.7 (Nullmatrix). Sei $A = (a_{ij}) \in K^{m,n}$ eine Matrix mit $a_{ij} = 0$ für alle i, j . Wir schreiben dann $A = 0_{m,n} = 0$ und nennen sie die *Nullmatrix* in $K^{m,n}$.

Für $m = 0$ oder $n = 0$ beschreibt $K^{m,n} := K^{I_m \times I_n} = K^\emptyset$ mit $I_0 := \emptyset$ die Menge der Matrizen, die keine Zeilen oder Spalten haben. In dem Fall enthält $K^{m,n}$ genau ein Element, die *leere Matrix* oder auch *Nullmatrix*, die wir wieder mit 0 oder $0_{m,n}$ bezeichnen.

Bezeichnung 5.8. Für $m, n \geq 0$ definieren wir

$$M_{m,n}(K) := K^{m,n} \quad \text{und} \quad M_n(K) := K^{n,n}$$

für rechteckige bzw. quadratische Matrizen.

Mit der Schreibweise wollen wir die *Ringstruktur* der Menge der Matrizen betonen (was wir noch zeigen).

Ende der Vorlesung 5 am 26. Oktober 2021

5.2 Operationen auf Matrizen

Definition 5.9 (Addition). Seien $m, n \geq 1$. Seien $A = (a_{ij})$ und $B = (b_{ij})$ Matrizen in $K^{m,n}$. Die *Summe* von A und B ist

$$A + B := (a_{ij} + b_{ij}) = \begin{pmatrix} a_{11} + b_{11} & a_{12} + b_{12} & \cdots & a_{1n} + b_{1n} \\ a_{21} + b_{21} & a_{22} + b_{22} & \cdots & a_{2n} + b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} + b_{m1} & a_{m2} + b_{m2} & \cdots & a_{mn} + b_{mn} \end{pmatrix}$$

und die Abbildung

$$+ : K^{m,n} \times K^{m,n} \rightarrow K^{m,n}, \quad (A, B) \mapsto A + B$$

heißt *Addition von Matrizen*.

Definition 5.10 (Skalarmultiplikation). Seien $m, n \geq 1$. Seien $a \in K$ und $A = (a_{ij}) \in K^{m,n}$. Die *Skalarmultiplikation* von a und A ist

$$a \cdot A := aA := (aa_{ij}) = \begin{pmatrix} aa_{11} & aa_{12} & \cdots & aa_{1n} \\ aa_{21} & aa_{22} & \cdots & aa_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ aa_{m1} & aa_{m2} & \cdots & aa_{mn} \end{pmatrix}$$

und die Abbildung

$$\cdot : K \times K^{m,n} \rightarrow K^{m,n}, \quad (a, A) \mapsto aA$$

heißt *Skalarmultiplikation für Matrizen*.

Merke: Addition und Skalarmultiplikation erfolgen komponentenweise.

Lemma 5.11. $(K^{m,n}, +, \cdot)$ ist ein K -Vektorraum.

Beweis. Für den Beweis müssten wir die Vektorraumaxiome nachrechnen, die sich aber unmittelbar aus den Körperaxiomen ergeben. Der Nullvektor ist die Nullmatrix $0_{m,n} \in K^{m,n}$. Für $m = 0$ oder $n = 0$ ist $K^{m,n}$ als $\{0_{m,n}\}$ definiert, was der Nullvektorraum ist. \square

Definition 5.12 (Produkt). Seien $m, n, p \geq 1$ und seien $A = (a_{ij}) \in K^{m,n}$ und $B = (b_{jk}) \in K^{n,p}$ Matrizen. Das *Produkt* von A und B ist

$$A \cdot B := AB := (c_{ik}) \in K^{m,p} \quad \text{mit} \quad c_{ik} := \sum_{j=1}^n a_{ij} b_{jk}$$

und die Abbildung

$$\cdot : K^{m,n} \times K^{n,p} \rightarrow K^{m,p}, \quad (A, B) \mapsto AB$$

heißt *Multiplikation von Matrizen*.

Bemerkung 5.13.

1. Bei der Matrixmultiplikation müssen wir auf die richtigen Größen der Matrizen achten: A ist eine $(m \times n)$ -Matrix, B ist eine $(n \times p)$ -Matrix und AB ist eine $(m \times p)$ -Matrix. Der erste „Faktor“ muss also genauso viele Spalten haben wie der zweite „Faktor“ Zeilen hat.
2. Der ik -te Eintrag des Produkts ist das Matrixprodukt

$$c_{ik} = (a_{i1}, \dots, a_{in}) \cdot \begin{pmatrix} b_{1k} \\ \vdots \\ b_{nk} \end{pmatrix}.$$

Merke: i -te Zeile mal k -te Spalte.

Beispiel 5.14.

1. $\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$
2. $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \end{pmatrix}.$
3. Das Produkt einer $(1 \times n)$ -Matrix (*Zeilenvektor*) und einer $(n \times 1)$ -Matrix (*Spaltenvektor*) ist eine (1×1) -Matrix (Skalar):

$$\underbrace{(a_1, \dots, a_n)}_{\in K^{1,n}} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}}_{\in K^{n,1}} = \left(\sum_{j=1}^n a_j b_j \right) \in K^{1,1}.$$

4. Sei $K = \mathbb{Q}$. Dann gilt

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 1 & 3 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 3 & 7 & 1 \end{pmatrix}.$$

Bemerkung 5.15. Für beliebige Matrizen A und B kann das Produkt AB existieren, aber das Produkt BA hingegen möglicherweise nicht (das hängt von der Größe der Matrizen ab). Für quadratische Matrizen gilt aber im Allgemeinen $AB \neq BA$ (vgl. Punkte 1 und 2 sehen). Für quadratische Matrizen $A, B \neq 0$ kann $AB = 0$ sein (s. Punkt 1).

5.3 Rechenregeln für Matrizen

Lemma 5.16 (Assoziativität). Seien $A = (a_{ij}) \in K^{m,n}$, $B = (b_{jk}) \in K^{n,p}$ und $C = (c_{kl}) \in K^{p,q}$. Dann gilt

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

Beweis. Aus der Definition folgen

$$A(BC) = A \cdot \left(\left(\sum_{k=1}^p b_{jk} c_{kl} \right)_{jl} \right) = \left(\left(\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^p a_{ij} b_{jk} c_{kl} \right)_{il} \right)$$

und

$$(AB)C = \left(\left(\sum_{j=1}^n a_{ij} b_{jk} \right)_{ik} \right) \cdot C = \left(\left(\sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^n a_{ij} b_{jk} c_{kl} \right)_{il} \right).$$

Mit der Kommutativität der Addition (A2) in K folgt die Gleichheit. \square

Lemma 5.17 (Links distributivität). Für alle $A = (a_{ij}) \in K^{m,n}$, $B = (b_{jk})$ und $C = (c_{jk})$ in $K^{n,p}$ gilt

$$A(B + C) = AB + AC.$$

Beweis. Es gelten

$$(A(B + C))_{ik} = (a_{i1}, \dots, a_{in}) \cdot \begin{pmatrix} b_{1k} + c_{1k} \\ \vdots \\ b_{nk} + c_{nk} \end{pmatrix} = \sum_{j=1}^n a_{ij} (b_{jk} + c_{jk})$$

und

$$(AB + AC)_{ik} = (a_{i1}, \dots, a_{in}) \cdot \begin{pmatrix} b_{1k} \\ \vdots \\ b_{nk} \end{pmatrix} + (a_{i1}, \dots, a_{in}) \cdot \begin{pmatrix} c_{1k} \\ \vdots \\ c_{nk} \end{pmatrix} = \sum_{j=1}^n a_{ij} b_{jk} + \sum_{j=1}^n a_{ij} c_{jk}.$$

Wenden wir die Distributivität (Axiom (D)) in K an, erhalten wir die Gleichheit. \square

Lemma 5.18 (Rechts distributivität). Für alle $A = (a_{ij})$, $B = (b_{ij})$ in $K^{m,n}$ und $C = (c_{jk}) \in K^{n,p}$ gilt

$$(A + B)C = AC + BC.$$

Beweis. Der Beweis erfolgt analog zur Links distributivität. \square

Definition 5.19 (Einheitsmatrix). Für $n \geq 1$ sei

$$E_n := \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & & \\ & \ddots & \\ & & 1 \end{pmatrix} \in K^{n,n}$$

die *Einheitsmatrix* in $K^{n,n}$, also

$$E_n := (a_{ij}) \in K^{n,n} \quad \text{mit} \quad a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{falls } i = j, \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$$

Für $n = 0$ sei $E_0 = 0_n$.

Die Einheitsmatrix ist immer quadratisch.

Einträge, die null sind, lassen wir einfach weg, um die Matrix übersichtlicher zu gestalten.

Lemma 5.20 (Einselement). Für alle $A \in K^{m,n}$ gilt

$$E_m A = A = A E_n.$$

Beweis. Das können wir durch einfaches Nachrechnen mithilfe der Definition der Matrixmultiplikation überprüfen. Aufgrund der Nullen in einer Zeile bzw. Spalte werden alle Einträge bis auf eines mit 0 multipliziert; diese Summanden fallen dann raus. \square

Die Einsen in der Einheitsmatrix greifen jeweils genau eine Zeile bzw. Spalte „heraus“.

Lemma 5.21. Für alle $a \in K$, $A \in K^{m,n}$ und $B \in K^{n,p}$ gilt

$$a(AB) = (aA)B = A(aB).$$

Beweis. Dies können wir wieder durch einfaches Nachrechnen überprüfen, wobei wir die Definition der Skalarmultiplikation für Matrizen und der Matrixmultiplikation anwenden und die Axiome in K verwenden müssen. \square

Lemma 5.22 (Ring der quadratischen Matrizen). $(M_n(K), +, \cdot)$ ist ein Ring.

Beweis. Die Axiome (A1) bis (A4) für Ringe folgen aus Axiomen (A1) bis (A4) in K und $-(a_{ij}) = (-a_{ij})$ für Matrizen $(a_{ij}) \in M_n(K)$, da die Matrixaddition von komponentenweise definiert wurde. Axiom (R1) ist Lemma 5.16. Axiom (R2) ist Lemma 5.20. Axiom (D) sind Lemmata 5.17 und 5.18. \square

Bemerkung 5.23. Beispiel 5.14 zeigt, dass der Ring $M_2(K)$ (oder allgemein $M_n(K)$ für $n \geq 2$) nicht kommutativ und nicht nullteilerfrei ist.

Spezialfälle: $M_1(K) \cong K$ ist ein Körper. $M_0(K)$ ist der Nullring.

Axiom 5.24 (Algebra). Sei K ein Körper. Ein Ring $(R, +, \cdot)$ zusammen mit einer Abbildung (Skalarmultiplikation)

$$*: K \times R \rightarrow R, \quad (a, r) \mapsto a * r$$

heißt K -Algebra, falls folgende Axiome gelten:

(AL1) $(R, +, *)$ ist ein K -Vektorraum;

(AL2) $a * (r \cdot s) = (a * r) \cdot s = r \cdot (a * s)$ für alle $a \in K$ und $r, s \in R$.²

Bezeichnung 5.25. Wir schreiben auch $ar := a * r$ und $rs := r \cdot s$.

Achtung: Wir haben hier drei Multiplikationen: Die Körpermultiplikation \cdot_K , die Ringmultiplikation \cdot_R und die Skalarmultiplikation $*$. Welche Multiplikation gemeint ist, sehen wir anhand der Art der Elemente, die verknüpft werden. Genauso haben wir zwei Additionen: Die Körperaddition $+_K$ und die Ringaddition $+_R$.

Lemma 5.26 (Algebra der quadratischen Matrizen). $M_n(K)$ ist eine K -Algebra, wobei $+$ die Addition von Matrizen, \cdot die Multiplikation von Matrizen und $*$ die Skalarmultiplikation von Matrizen ist.

Beweis. Wir haben gerade gezeigt, dass $M_n(K)$ ein Ring ist.

Um Axiom (AL1) zeigen, müssen wir die Vektorraumaxiome zeigen: Axiome (A1) bis (A4) für Vektorräume folgen direkt aus Axiomen (A1) bis (A4) für Ringe. Axiome (SM1) bis (SM4) können wir einfaches durch Nachrechnen und Anwenden der Distributivität in K zeigen.

Axiom (AL2) ist Lemma 5.21. \square

5.4 Matrizen als lineare Abbildungen

Definition 5.27 (Matrixabbildung). Sei $A = (a_{ij}) \in K^{m,n}$ eine Matrix. Wir definieren eine Abbildung, die wir ebenfalls mit A bezeichnen, durch

$$A: K^n \rightarrow K^m, \quad v \mapsto A(v) := A \cdot v,$$

wobei $A \cdot v$ das Produkt der $(m \times n)$ -Matrix A mit der $(n \times 1)$ -Matrix v ist. (Hier haben wir $K^n = K^{n,1}$ identifiziert.) Die Abbildung $A: K^n \rightarrow K^m$ heißt *Matrixabbildung*.

Lemma 5.28. Die Matrixabbildung $A: K^n \rightarrow K^m$ ist K -linear.

Beweis. Seien $A \in K^{m,n}$ und $v_1, v_2 \in K^n$. Dann folgt aus Lemma 5.17

$$A(v_1 + v_2) = A \cdot (v_1 + v_2) = A \cdot v_1 + A \cdot v_2 = A(v_1) + A(v_2).$$

Für $a \in K$ und $v \in V$ folgt aus Lemma 5.21

$$A(av) = A \cdot (av) = a(A \cdot v) = a(A(v)). \quad \square$$

Damit liefern Matrixabbildungen viele neue Beispiele für Homomorphismen (auf Standardvektorräumen).

Beispiel 5.29.

²Eine alternative Definition: Eine K -Algebra A ist ein Vektorraum $(A, +, *)$, zusammen mit einer K -bilinearen Verknüpfung $\cdot: A \times A \rightarrow A$, d. h. für \cdot gelten Axiom (D) für Ringe und Axiom (AL2).

1. Die Einheitsmatrix E_n liefert die Identität $\text{id}_{K^n}: K^n \rightarrow K^n$.
2. Die Matrix $A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \in M_2(K)$ liefert die Abbildung

$$A: K^2 \rightarrow K^2, \quad \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} b \\ -a \end{pmatrix}.$$

Für $K = \mathbb{R}$ können wir uns das so vorstellen: A dreht jeden Vektor in \mathbb{R}^2 um einen rechten Winkel im Uhrzeigersinn.³

3. Beispiel 4.9 ist die Matrixabbildung

$$A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}: K^2 \rightarrow K^2, \quad \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} ax + by \\ cx + dy \end{pmatrix}.$$

Satz 5.30. Seien $A \in K^{m,n}$ und $B \in K^{n,p}$ sowie $A: K^n \rightarrow K^m$ bzw. $B: K^p \rightarrow K^n$ die entsprechenden Matrixabbildungen. Dann gilt

$$A \cdot B = A \circ B,$$

wobei $A \cdot B$ das Matrixprodukt und $A \circ B$ die Komposition von Abbildungen ist.

$$\begin{array}{ccccc} K^p & \xrightarrow{B} & K^n & \xrightarrow{A} & K^m \\ & \searrow & & \nearrow & \\ & & A \circ B & & \end{array}$$

Beweis. Nach Lemma 5.16 gilt für alle $v \in K^p$

$$(A \cdot B)(v) = (A \cdot B) \cdot v = A \cdot (B \cdot v) = A(B(v)) = (A \circ B)(v). \quad \square$$

5.5 Die Standardbasis von Standardvektorräumen

Definition 5.31 (Standardbasisvektor). Sei $n \geq 1$. Für alle $1 \leq i \leq n$ sei

$$e_i^{(n)} := e_i := \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} \in K^n \quad \text{mit } a_j := \begin{cases} 1 & \text{falls } i = j, \\ 0 & \text{sonst,} \end{cases}$$

der i -te Standardbasisvektor oder auch i -te Einheitsvektor von K^n .

Lemma 5.32. Für jedes $v \in K^n$ gibt es eindeutig bestimmte $a_1, \dots, a_n \in K$ mit $v = \sum_{i=1}^n a_i e_i$.

Beweis. Zur Existenz: Es gilt

$$\sum_{i=1}^n a_i e_i = \begin{pmatrix} a_1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ a_2 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} + \dots + \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ a_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} := v.$$

Zur Eindeutigkeit: Angenommen, es gibt zwei Darstellungen

$$\sum_{i=1}^n a_i e_i = v = \sum_{i=1}^n b_i e_i$$

von v . Daraus folgt

$$\sum_{i=1}^n (a_i - b_i) e_i = \begin{pmatrix} a_1 - b_1 \\ \vdots \\ a_n - b_n \end{pmatrix} = 0,$$

was genau dann möglich ist, wenn $a_i - b_i = 0 \iff a_i = b_i$ für alle i ist. \square

³Eine sog. *Rotationsmatrix* $\begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$ für $\theta = -\frac{1}{2}\pi$.

Definition 5.33 (Standardbasis). Wir nennen $\{e_1, e_2, \dots, e_n\} \subseteq K^n$ die *Standardbasis* von K^n .

Ende der Vorlesung 6 am 29. Oktober 2021

Lemma 5.34. Seien $f, g \in \text{Hom}(K^n, K^m)$. Dann gilt $f = g$ genau dann, wenn $f(e_i) = g(e_i)$ für alle $1 \leq i \leq n$.

Zwei Homomorphismen sind demnach genau dann gleich, wenn sie in den Standardbasisvektoren übereinstimmen.

Beweis. Gemäß Lemma 5.32 gibt es für jedes $v \in K^n$ Skalare $a_1, \dots, a_n \in K$ mit $v = \sum_{i=1}^n a_i e_i$.

Seien $f, g \in \text{Hom}(K^n, K^m)$. Gilt $f(e_i) = g(e_i)$ für alle $1 \leq i \leq n$, so folgt aus der Linearität

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

Gilt hingegen $f = g$, also $f(v) = g(v)$ für alle $v \in K^n$, so ist natürlich auch $f(e_i) = g(e_i)$ mit $e_i \in K^n$. \square

Die allgemeine Definition einer *Basis* eines K -Vektorraums (und wie mächtig dieser Begriff ist) erfahren wir später.

5.6 $K^{m,n}$ und $\text{Hom}(K^n, K^m)$

Satz 5.35. Für $m, n \geq 0$ gilt

$$K^{m,n} \cong \text{Hom}(K^n, K^m).$$

Beweis. Wir definieren die Abbildung

$$\eta: K^{m,n} \rightarrow \text{Hom}(K^n, K^m), \quad A \mapsto \eta(A),$$

die definiert ist durch

$$(\eta(A))(v) := A(v) = A \cdot v \quad \text{für alle } v \in K^n.$$

η ordnet also jeder Matrix A die Abbildung $\eta(A)$ zu. Wir wollen zeigen, dass η ein Isomorphismus ist.

- $\eta(A) \in \text{Hom}(K^n, K^m)$, also $\eta(A)$ ist K -linear: Nach Definition ist $\eta(A)$ die Matrixabbildung $A: K^n \rightarrow K^m$ zur Matrix A . Lemma 5.28 sagt, dass Matrixabbildungen K -linear sind.
- η ist K -linear: Für alle $A_1, A_2 \in K^{m,n}$, $a_1, a_2 \in K$ und $v \in K^n$ gilt mittels der Rechenregeln für Matrizen

$$\begin{aligned} [\eta(a_1 A_1 + a_2 A_2)](v) &= (a_1 A_1 + a_2 A_2) \cdot v = a_1 (A_1 \cdot v) + a_2 (A_2 \cdot v) \\ &= a_1 [(\eta(A_1))(v)] + a_2 [(\eta(A_2))(v)] = [a_1 (\eta(A_1)) + a_2 (\eta(A_2))](v). \end{aligned}$$

- η ist ein Monomorphismus: Betrachten wir eine Matrix $A = (a_{ij}) \in K^{m,n}$. Für $1 \leq j \leq n$ ist

$$Ae_j = A(e_j) = \begin{pmatrix} a_{1j} \\ \vdots \\ a_{mj} \end{pmatrix}$$

die j -te Spalte von A . Sind also zwei Matrizen $A \neq B$ in $K^{m,n}$ verschieden, so muss es eine Spalte j geben, in der sie nicht übereinstimmen, also $(\eta(A))(e_j) = A(e_j) \neq B(e_j) = (\eta(B))(e_j)$. Ferner folgt aus ??, dass dann auch $\eta(A) \neq \eta(B)$ gilt.

\square

Ende der Vorlesung 7 am 02. November 2021

A Trickkiste