

LINEARE ALGEBRA

SARAH ZERBES

Varia. Kurs Webseite: <https://metaphor.ethz.ch/x/2023/hs/401-1151-00L/>

Lecture 1

Empfohlene Buecher und Skripte: siehe Webseite

<https://forum.math.ethz.ch/c/autumn-23/lineare-algebra-1/163>

Haupt-Assistent fuer LA1: Konstantin Andritsch (konstantin.andritsch@math.ethz.ch)

Haupt-Assistent fuer LA2: Baptiste Depouilly (baptiste.depouilly@math.ethz.ch)

Diese Skript basiert zum Teil auf dem Skript von Menny Akka Genosar

(siehe <https://metaphor.ethz.ch/x/2022/hs/401-1151-00L/>)

CONTENTS

Varia	1
1. Einfuehrung	2
1.1. Motivation: Fibonacci Folgen	2
1.2. Aussagenlogik	5
1.3. Praedikatenlogik	6
2. Matrizen und lineare Gleichungssysteme	7
2.1. Körper	7
2.2. Matrizen	8
2.3. Elementare Zeilenoperationen	11
2.4. Lineare Gleichungssysteme	13
3. Vector spaces	15
3.1. Definition und Beispiele	15
3.2. Unterräume	17
3.3. Basen von Vektorraeumen	19
3.4. Basen von Unterraemen	24
3.5. Zusammenfassung der Rechenmethoden	27
3.6. Zeilen und Spaltenraeume	28
4. Lineare Abbildungen	29
4.1. Definition und Beispiele	29
4.2. Kernel and Image	31
4.3. Lineare Abbildungen als Matrizen	35
4.4. Matrizen als Lineare Abbildungen	36
4.5. Basiswechsel	37
4.6. Zeilenrang gleich Spaltenrang	40
4.7. Zurueck zu linearen Gleichungssystemen	43
5. Intermezzo: Gruppen und Ringe	45
5.1. Gruppen	45
5.2. Ringe	46
6. Vektorraeume linearer Abbildungen	46
6.1. Definition und erste Eigenschaften	46
6.2. Der duale Vektorraum	47
6.3. Die duale Abbildung	50
6.4. Annulatoren	52
6.5. Reflexivitaet	53
7. Quotientenraeume	55
7.1. Definition und erste Eigenschaften	55
7.2. Die Isomorphismensaetze	56
7.3. Weitere Anwendungen	58

8.	Determinanten	58
8.1.	Ein erstes Beispiel	58
8.2.	Permutationen	59
8.3.	Determinantenfunktionen	60
9.	Weihnachtsvorlesung: ueber die Unendlichkeit	63
10.	Zurueck zu Determinanten	66
10.1.	Zur Erinnerung	66
10.2.	Erste Eigenschaften	66
10.3.	Determinanten und Invertierbarkeit	68
10.4.	Die Determinante eines Endomorphismus	71
11.	Polynome	72
12.	Eigenwerte und Eigenvektoren	73
12.1.	Definitionen und erste Eigenschaften	73
12.2.	Das charakteristische Polynom	75
12.3.	Diagonalisierung	77
12.4.	Eigenraeume	78
12.5.	Algebraische und geometrische Vielfachheit	80
13.	Das minimale Polynom	81
13.1.	Definition und erste Eigenschaften	81
13.2.	Der Satz von Cayley–Hamilton	84
13.3.	Ein alternativer Beweis von Cayley–Hamilton	85
14.	Die Jordansche Normalenform einer Matrix	86
14.1.	Definition und Theorem	86
14.2.	Eigenschaften der Jordanschen Normalenform	87
14.3.	Verallgemeinerte Eigenraeume	88
14.4.	Beweis der JNF for nilpotente Abbildungen	91
14.5.	Berechnung der Jordanschen Normalenform	93
	Ueber die Transformation von Jordanbasen	96
15.	Euklidische und Hermitesche Raeume	99
15.1.	Normierte Raeume	99
15.2.	Innere Produkte	100
15.3.	Konstruktion innerer Produkte	104
15.4.	Gram-Schmidt Orthogonalisierung	106
15.5.	Das orthogonale Komplement	109
15.6.	QR Zerlegung	111
15.7.	Dualraeume von Inneren Produkt Raeumen	113
15.8.	Die adjungierte Abbildung	115
15.9.	Die Abbildungsmatrix der adjungierten Abbildung	117
16.	Spektraltheorie	117
16.1.	Normale Endomorphismen	117
16.2.	Spektraltheorie ueber \mathbb{R}	120
17.	Interlude: Komplexifizierung von reellen Vektorraeumen	121
17.1.	The aessere direkte Summe zweier Vektorraeume	121
18.	Isometrien	122
18.1.	Definition und erste Eigenschaften	122
18.2.	Klassifikation der Elemente in $O(2)$ und in $SO(3)$	123
18.3.	Klassifikation der Elemente in $U(2)$	125
19.	Tensorprodukte von Vektorraeumen	126
19.1.	The aessere direkte Summe zweier Vektorraeume	126
19.2.	Komplexifizierung	127
19.3.	Vektorraeume ueber einer freien Menge	128
19.4.	Konstruktion des Tensorprodukts	129

1. EINFUEHRUNG

1.1. Motivation: Fibonacci Folgen.

Definition 1.1.1. Die Fibonacci Folge $(a_n)_{n \geq 0}$ ist definiert durch die Rekursion

$$\begin{aligned} a_0 &= 0, & a_1 &= 1, \\ a_n &= a_{n-1} + a_{n-2} & \text{for } n &\geq 2 \end{aligned}$$

Beachte 1.1.2. Die ersten Elemente der Folge sind

$$0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, \dots$$

Frage: Können wir a_n bestimmen, ohne vorher alle Elemente bis a_{n-1} zu bestimmen?

Definition 1.1.3. Seien $a, b \in \mathbb{R}$. Definiere die Folge $\mathcal{F}_{a,b}$ mittels der Rekursion

$$\begin{aligned} a_0 &= a, & a_1 &= b, \\ a_n &= a_{n-1} + a_{n-2} & \text{for } n &\geq 2 \end{aligned}$$

Eine Folge \mathcal{A} ist eine Fibonacci Folge wenn $\mathcal{A} = \mathcal{F}_{a,b}$ für $a, b \in \mathbb{R}$. Es sei V die Menge aller solcher Folgen, d.h.

$$V = \{\mathcal{F}_{a,b} : a, b \in \mathbb{R}\}$$

Beachte 1.1.4. Die Folge aus Definition 1.1.1 ist gleich der Folge $\mathcal{F}_{0,1}$.

Definition 1.1.5. Es seien $\mathcal{F} = (a_n)_{n \geq 0}$, $\mathcal{G} = (b_n)_{n \geq 0} \in V$ und $\alpha \in \mathbb{R}$.

(1) Wir definieren die Summe von \mathcal{F} und \mathcal{G} als die Folge

$$\mathcal{F} + \mathcal{G} = (a_n + b_n)_{n \geq 0}.$$

(2) Wir definieren das Skalarprodukt von \mathcal{F} und α als die Folge

$$\alpha \cdot \mathcal{F} = (\alpha \cdot a_n)_{n \geq 0}.$$

Satz 1.1.6.

(1) Es seien $\mathcal{F}, \mathcal{G} \in V$. Dann gilt $\mathcal{F} + \mathcal{G} \in V$.

(2) Es sei $\mathcal{F} \in V$ und $\alpha \in \mathbb{R}$. Dann gilt $\alpha \cdot \mathcal{F} \in V$.

Wir sagen: V hat die Struktur eines Vektorraums über \mathbb{R} .

Proof. (1) Wir schreiben $\mathcal{F} = (a_n)_{n \geq 0}$ und $\mathcal{G} = (b_n)_{n \geq 0}$, und es sei $c_n = a_n + b_n$. Wir müssen zeigen, dass

$$c_n = c_{n-1} + c_{n-2}$$

für alle $n \geq 2$. Aber

$$\begin{aligned} c_n &= a_n + b_n \\ &= a_{n-1} + a_{n-2} + b_{n-1} + b_{n-2} \\ &= (a_{n-1} + b_{n-1}) + (a_{n-2} + b_{n-2}) \\ &= c_{n-1} + c_{n-2}. \end{aligned}$$

(2) kann durch ähnliche Argumentation bewiesen werden. □

Beachte 1.1.7. Der Beweis von Satz 1.1.6 zeigt, dass folgendes gilt:

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_{a,b} + \mathcal{F}_{c,d} &= \mathcal{F}_{a+c, b+d} \\ \alpha \cdot \mathcal{F}_{a,b} &= \mathcal{F}_{\alpha a, \alpha b}. \end{aligned}$$

Übung 1.1.8. Zeigen Sie, dass die Menge $\{\mathcal{F}_{\alpha a, \alpha b} : \alpha \in \mathbb{R}\} \subset V$ unter der Annahme $(a, b) \neq (0, 0)$ unendlich viele Elemente enthält, aber trotzdem nicht gleich V ist.

Satz 1.1.9. Sei $\mathcal{F} \in V$. Dann gibt es $a, b \in \mathbb{R}$ so dass

$$(1) \quad \mathcal{F} = a \cdot \mathcal{F}_{1,0} + b \cdot \mathcal{F}_{0,1}.$$

Wir sagen: die Gleichung (12) schreibt \mathcal{F} als eine Linearkombination der Folgen $\mathcal{F}_{0,1}$ und $\mathcal{F}_{1,0}$.

Proof. Aufgrund der Definition von V gilt $\mathcal{F} = \mathcal{F}_{a,b}$ für $a, b \in \mathbb{R}$. Weiterhin gilt

$$\mathcal{F}_{a,b} = a\mathcal{F}_{1,0} + b\mathcal{F}_{0,1}.$$

□

Übung 1.1.10. Sei $\mathcal{F} \in V$. Dann gibt es Elemente $c, d \in \mathbb{R}$ so dass

$$\mathcal{F} = c \cdot \mathcal{F}_{1,1} + d \cdot \mathcal{F}_{1,-1}.$$

Wir wollen nun die Symmetrien des Raumes V betrachten. Unter einer Symmetrie verstehen wir eine Abbildung $T : V \rightarrow V$, die die Struktur von V respektiert.

Definition 1.1.11. Eine Abbildung $T : V \rightarrow V$ ist eine Symmetrie von V , wenn für alle $\mathcal{F}, \mathcal{G} \in V$ und $\alpha \in \mathbb{R}$ gilt, dass

$$T(\mathcal{F} + \mathcal{G}) = T(\mathcal{F}) + T(\mathcal{G}) \quad \text{und} \quad T(\alpha \cdot \mathcal{F}) = \alpha \cdot T(\mathcal{F}).$$

Wir sagen: T ist eine lineare Abbildung.

Beispiele 1.1.12.

(1) Die Identitäts-Abbildung

$$\begin{aligned} \text{id} : V &\rightarrow V, \\ \mathcal{F} &\mapsto \mathcal{F}. \end{aligned}$$

(2) Für $\alpha \in \mathbb{R}$, definiere

$$\begin{aligned} T_\alpha : V &\rightarrow V, \\ \mathcal{F} &\mapsto \alpha \cdot \mathcal{F}. \end{aligned}$$

Übung 1.1.13. Sei $\mathcal{G} \in V$, und definiere die Abbildung

$$\begin{aligned} M_{\mathcal{G}} : V &\rightarrow V, \\ \mathcal{F} &\mapsto \mathcal{F} + \mathcal{G}. \end{aligned}$$

Zeigen Sie, dass $M_{\mathcal{G}}$ nur dann eine Symmetrie von V ist, wenn $\mathcal{G} = \mathcal{F}_{0,0}$.

Lemma 1.1.14. Sei $\mathcal{F} = (a_0, a_1, \dots) \in V$. Dann ist die Folge (a_1, a_2, \dots) ebenfalls in V .

Proof. Für $n \geq 0$ sei $b_n = a_{n+1}$; wir müssen zeigen, dass die Folge $(b_n)_{n \geq 0}$ ein Element von V ist. Für $n \geq 2$ gilt

$$b_n = a_{n+1} = a_n + a_{n-1},$$

da $(a_n)_{n \geq 0} \in V$. Aber $a_n + a_{n-1} = b_{n-1} + b_{n-2}$, d.h.

$$b_n = b_{n-1} + b_{n-2}.$$

□

Satz 1.1.15. Definiere die Verschiebungs-Abbildung

$$\begin{aligned} S : V &\rightarrow V, \\ (a_0, a_1, \dots) &\mapsto (a_1, a_2, \dots). \end{aligned}$$

Dann ist S eine Symmetrie von V .

Definition 1.1.16. Set $T : V \rightarrow V$ eine Symmetrie. Eine Folge $\mathcal{F} \in V$, $\mathcal{F} \neq \mathcal{F}_{0,0}$ ist eine Eigenfolge wenn es ein Element $\alpha \in \mathbb{R}$ gibt so dass

$$T(\mathcal{F}) = \alpha \cdot \mathcal{F}.$$

In diesem Fall heisst α der Eigenwert der Folge \mathcal{F} .

Beispiele 1.1.17.

- (1) Alle $\mathcal{F} \in V$, $\mathcal{F} \neq \mathcal{F}_{0,0}$ sind Eigenfolgen der Identitätsabbildung mit Eigenwert 1.
- (2) Alle $\mathcal{F} \in V$, $\mathcal{F} \neq \mathcal{F}_{0,0}$ sind Eigenfolgen der Abbildung T_α mit Eigenwert α .

Theorem 1.1.18. Es seien $\varphi = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$ und $\psi = \frac{1-\sqrt{5}}{2}$. Dann sind $\mathcal{F}_{1,\varphi}$ und $\mathcal{F}_{1,\psi}$ Eigenfolgen der Abbildung S , mit jeweiligen Eigenwerten ϕ und ψ . Weiterhin gilt: wenn \mathcal{A} eine Eigenfolge von S ist, dann gibt es ein Element $\beta \in \mathbb{R}$, $\beta \neq 0$ so dass entweder $\mathcal{A} = \beta \cdot \mathcal{F}_{1,\varphi}$ oder $\mathcal{A} = \beta \cdot \mathcal{A}_{1,\psi}$.

Proof. Nimm an, dass $\mathcal{A} = (a_0, a_1, \dots)$ eine Eigenfolge von S ist, mit Eigenwert α . Dann gilt

$$(a_1, a_2, a_3, \dots) = (\alpha \cdot a_0, \alpha \cdot a_1, \alpha \cdot a_2, \dots),$$

d.h. $a_n = \alpha \cdot a_{n-1}$ für alle $n \geq 1$. Mit anderen Worten, \mathcal{A} ist eine geometrische Folge:

$$\mathcal{A} = (a_0, a_0\alpha, a_0\alpha^2, \dots).$$

Da $\mathcal{A} \neq \mathcal{F}_{0,0}$, gilt $a_0 \neq 0$.

Nun ist \mathcal{A} ein Element von V , d.h. $a_n = a_{n-1} + a_{n-2}$ für alle $n \geq 2$. Insbesondere gilt

$$\begin{aligned} a_2 = a_1 + a_0 &\Leftrightarrow a_0 \alpha^2 = a_0 \alpha + a_0 \\ \Rightarrow \alpha^2 - \alpha - 1 &= 0. \end{aligned}$$

Die Lösungen dieser quadratischen Gleichung sind φ und ψ , d.h. entweder $\mathcal{A} = a_0 \cdot (1, \varphi, \varphi^2, \dots)$ oder $\mathcal{A} = a_0 \cdot (1, \psi, \psi^2, \dots)$. \square

Übung 1.1.19. Zeigen Sie, dass

$$\frac{1}{\varphi - \psi} \cdot \mathcal{F}_{1,\varphi} + \frac{1}{\psi - \varphi} \cdot \mathcal{F}_{1,\psi} = \mathcal{F}_{0,1}.$$

Korollar 1.1.20. Sei $\mathcal{F}_{0,1} = (a_0, a_1, \dots)$. Dann gilt

$$a_n = \frac{\left(\frac{1+\sqrt{5}}{2}\right)^n - \left(\frac{1-\sqrt{5}}{2}\right)^n}{\sqrt{5}}.$$

Wir nennen dies eine geschlossene Form der Folge.

Wir sehen also, dass wir die Betrachtung des reellen Vektorraums V und seiner Symmetries einige sehr interessante (und konkrete) Sätze über Fibonacci-Folgen beweisen können. Wir werden diesem Phänomen in diesem Kurs häufig begegnen: durch sehr abstrakte Argumente erhalten wir Informationen über sehr konkrete mathematische Objekte. Andererseits sind die abstrakten Strukturen oft von sehr konkreten Objekten inspiriert: der Informationsfluss zwischen konkreten und abstrakten Strukturen geht also in beide Richtungen.

Lecture 2

1.2. Aussagenlogik.

Beachte 1.2.1. Eine mathematische Aussage ist entweder wahr (w) oder falsch (f).

Beispiele 1.2.2.

- (1) Für jede reelle Zahl x gilt $x^2 \geq 0$.
- (2) Jede Primzahl ≥ 3 ist ungerade.
- (3) Jede ungerade Zahl ist eine Primzahl.
- (4) Alle Mathematiker haben lange Haare.

Aussagen (1) und (2) sind wahr, (3) und (4) sind falsch (Gegenbeispiele).

Definition 1.2.3. Sei A eine mathematische Aussage. Die Negation von A ist die Aussage "A gilt nicht"; wir schreiben $\neg A$.

Beispiel 1.2.4. Die Negation von (3) ist: es gibt mindestens eine ungerade Zahl, die keine Primzahl ist.

Übung 1.2.5. Finden Sie die Negation von (4).

Beachte 1.2.6. Falls A wahr ist, dann ist $\neg A$ falsch, und umgekehrt. ¹ Wir fassen dies in der Wahrheitstabelle zusammen:

stabelle zusammen:	A	$\neg A$
	w	f
	f	w

Definition 1.2.7. Es seien A und B Aussagen.

- (1) $A \wedge B$ ist die Aussage "A und B" (d.h. "sowohl A als auch B gelten");
- (2) $A \vee B$ ist die Aussage "A oder B" (d.h. "mindestens eines von A oder B gilt").

Beachte 1.2.8. Die Wahrheitstabellen sind

A	B	$A \wedge B$		A	B	$A \vee B$
w	w	w		w	w	w
w	f	f		w	f	w
f	w	f		f	w	w
f	f	f		f	f	f

Beispiele 1.2.9. Sei $x \in \mathbb{R}$.

- (1) $(x > 1) \vee (x < 2)$ ist wahr;

¹Wir benutzen dies, wenn wir durch ein Gegenbeispiel zeigen, dass eine Aussage falsch ist: ein Gegenbeispiel zeigt, dass die Negation der Aussage richtig ist.

(2) $(“x < 1”) \vee (“x > 2”)$ ist das gleiche wie $\neg(“1 \leq x \leq 2”)$.

Definition 1.2.10. Seien A, B Aussagen. Dann sagen wir “ A impliziert B ” wenn gilt: wenn A wahr ist, dann ist auch B wahr. Wir schreiben $A \Rightarrow B$.

Beispiele 1.2.11.

- (1) $“x > 0” \Rightarrow “x \neq 0”$;
- (2) $“x$ ist eine Primzahl und $\geq 3” \Rightarrow “x$ ist ungerade.”

Bemerkung 1.2.12.

- (1) Jegliche Kausalitaet zwischen den beiden Aussagen wird ignoriert.
- (2) Die Implikation ist immer richtig, wenn A falsch ist. Zum Beispiel gilt

$$(“0 = 1”) \Rightarrow (“Alle Mathematiker haben lange Haare. ”)$$

Definition 1.2.13. Seiner A, B Aussagen. Dann sind A und B logisch aequivalent wenn gilt

$$(A \Rightarrow B) \wedge (B \Rightarrow A).$$

Beispiele 1.2.14.

- (1) $“x^2 > 0” \Leftrightarrow “x \neq 0”$;
- (2) $(“0 = 1”) \Leftrightarrow (“Alle Mathematiker haben lange Haare. ”)$

Definition 1.2.15. Sei A eine Aussage. Dann ist A eine Tautologie, wenn ihr Wahrshceitsgehalt immer wahr ist.

Beispiel 1.2.16. Sei B eine Aussage. Dann ist $B \vee (\neg B)$ eine Tautologie. So ist z.B. die Aussage

$eine Tautologie.$

Satz 1.2.17. Es seien A, B Aussagen. Dann gilt:

- (i) $A \Leftrightarrow \neg(\neg A)$;
- (ii) $(A \Rightarrow B) \Leftrightarrow (\neg B \Rightarrow \neg A)$;²
- (iii) $\neg(A \wedge B) \Leftrightarrow (\neg A) \vee (\neg B)$ und $\neg(A \vee B) \Leftrightarrow (\neg A) \wedge (\neg B)$

Proof. (i) Uebung.

(ii) $A \Rightarrow B$ bedeutet, dass B richtig ist, wenn A richtig ist. Mit anderen Worten, wenn B falsch ist, dann mus auch A falsch sein, d.h.

$$(2) \quad (A \Rightarrow B) \Rightarrow (\neg B \Rightarrow \neg A).$$

Um die umgekehrte Implikation zu beweisen, wenden Sie das Argument auf $\neg A$ an und benutzen (i). \square

1.3. Praedikatenlogik.

Definition 1.3.1. Ein Praedikat ist eine Aussage, die von einer (oder mehreren) Variablen x einer Menge X abhaengt; wir schreiben $P(x)$ (bzw. $P(x, y) \dots$). Abhaengig vom Wert der Variablen x kann $P(x)$ wahr oder falsch sein.

Beispiel 1.3.2. Die Aussage $P(n) : “n^2 = n”$ fuer $n \in \mathbb{Z}$ ist wahr fuer $n \in \{0, 1\}$ und falsch fuer alle anderen n .

Definition 1.3.3.

- (1) Der Allquantor \forall wird verwendet, um eine Aussage uber alle $x \in X$ zu treffen: “ $\forall x \in X : P(x)$ ” steht fuer “fuer all $x \in X$ gilt die Aussage $P(x)$ ”.
- (2) Der Existenzquantor \exists wird verwendet um auszudruecken, dass es ein $x \in X$ mit einer gewissen Eigenschaft gibt: “ $\exists x \in X : P(x)$ ” steht fuer “es gibt ein $x \in X$, fuer das die Aussage $P(x)$ gilt”.

Beispiele 1.3.4.

- (1) Die Aussage $“\forall n \in \mathbb{Z} : n = n^2”$ ist falsch.
- (2) Die Aussage $“\exists n \in \mathbb{Z} : n = n^2”$ ist richtig.
- (3) Die Aussage $“\forall n \in \mathbb{Z} : (n = n^2 \Rightarrow (n = 0) \vee (n = 1))”$ ist richtig.
- (4) Die Aussage $\forall y \in \mathbb{R} : (y \geq 0) \Rightarrow (\exists x \in \mathbb{R} : x^2 = y)$ ist richtig.

²Diese Aequivalenz ist manchmal nuetzlich, wenn wir $A \Rightarrow B$ beweisen wollen: manchmal ist es einfacher zu beweisen, dass $(\neg B) \Rightarrow (\neg A)$.

Bemerkung 1.3.5. In Beispiel (4) schreiben wir gewöhnlich: $\forall y \in \mathbb{R}, y \geq 0 \exists x \in \mathbb{R}$ so dass $x^2 = y$.

Warnung 1.3.6. Vorsicht ist geboten, wenn wir Quantoren kombinieren: die Quantoren \forall und \exists sind *nicht* vertauschbar! Seien X, Y Mengen und $A(x, y)$ eine Aussage. Dann haben die Aussagen

$$\forall x \in X \exists y \in Y : A(x, y)$$

und

$$\exists y \in Y \forall x \in X : A(x, y)$$

sehr verschiedene Bedeutungen.

Beispiel 1.3.7. Sei X die Menge aller Studenten der der ETH und Y die Menge aller Kurse. Für $x \in X, y \in Y$ sei $A(x, y)$ die Aussage: Student x belegt den Kurs y . Dann ist die Aussage

$$“\forall x \in X \exists y \in Y : A(x, y)”$$

wahr, aber die Aussage

$$“\exists y \in Y \forall x \in X : A(x, y)”$$

ist falsch.

Beispiel 1.3.8. Sie werden diesen Quantoren in der Analysis oft begegnen. So kann z.B. die Stetigkeit einer Funktion $f : (0, 1) \rightarrow \mathbb{R}$ folgendermassen geschrieben werden:

$$(3) \quad (\forall x \in (0, 1) \wedge \forall \epsilon > 0) \exists \delta > 0 : (|x - y| < \delta \Rightarrow |f(x) - f(y)| < \epsilon).$$

Wir können die Quantoren negieren:

Lemma 1.3.9.

$$\begin{aligned} (1) \quad \neg(\forall x \in X : A(x)) &\Leftrightarrow \exists x \in X : \neg A(x); \\ (2) \quad \neg(\exists x \in X : A(x)) &\Leftrightarrow \forall x \in X : \neg A(x); \end{aligned}$$

Beispiel 1.3.10. Die Negation der Aussage “Alle Hunde, die bellen, beißen nicht.” ist “Es gibt einen Hund, der bellt und beißt.”

Übung 1.3.11. Negieren Sie folgende Aussagen:

- (1) “Es gibt eine braune schweizer Kuh, die im Sommer lieber im Tal ist.”
- (2) “Alle Mathematiker sind Maenner und haben lange Haare.”

Definition 1.3.12. Der Quantor der eindeutigen Existenz $\exists!$ wird verwendet um auszudrücken, dass es genau ein $x \in X$ mit einer gewissen Eigenschaft gilt: “ $\exists! x \in X : P(x)$ ” steht für “es gibt genau ein $x \in X$, für das die Aussage $P(x)$ gilt”.

Beispiel 1.3.13. Es sei $P(n)$ die Aussage “ $(n \in \mathbb{Z}) \wedge (n \neq 0) \wedge (n = n^2)$.” Dann gibt es genau ein n für das die Aussage $P(n)$ wahr ist; wir schreiben

$$\exists! n \in \mathbb{Z} : P(n).$$

Bemerkung 1.3.14. Die Aussage “ $\exists! x \in X : P(x)$ ” ist äquivalent zu der Aussage

$$(\exists x \in X : P(x)) \wedge (\forall x, y \in X : (P(x) \wedge P(y)) \Rightarrow x = y)$$

2. MATRIZEN UND LINEARE GLEICHUNGSSYSTEME

Lecture 3

2.1. Körper. Sie haben in Analysis 1 die Axiome eines Körpers (engl. field) kennengelernt. Bekannte Körper sind der Körper der reellen Zahlen \mathbb{R} sowie der Körper der komplexen Zahlen \mathbb{C} . Wir werden nun Körper mit endlich vielen Elementen definieren.

Definition 2.1.1. Es sei p eine Primzahl. Der Körper \mathbb{F}_p ist folgendermassen definiert: die Elemente sind $\{0, \dots, p-1\}$. Für $x, y \in \mathbb{F}_p$ definieren wir $x + y \in \mathbb{F}_p$ (bzw. $xy \in \mathbb{F}_p$) als den Rest, der bei der Division durch p entsteht.

Bemerkung 2.1.2. Die einzige Schwierigkeit zu zeigen, dass \mathbb{F}_p die Körperaxiome erfüllt, ist die Existenz eines multiplikativen inversen Elements.

Lemma 2.1.3. Es sei $x \in \mathbb{F}_p, x \neq 0$. Dann gibt es ein $y \in \mathbb{F}_p$ so dass $xy = 1$; wir schreiben $y = x^{-1}$.

Proof. Wir betrachten die Menge

$$M = \{1 \cdot x, 2 \cdot x, \dots, (p-1) \cdot x\}.$$

Behauptung 1. Keines der Elemente von M ist durch p teilbar.

Beweis von Behauptung 1. Offensichtlich, da p eine Primzahl ist.

Behauptung 2. Keine zwei Elemente von M haben den gleichen Rest bei Division durch p .

Beweis von Behauptung 2. Nimm an, dass $i \cdot x$ und $j \cdot x$ (mit $i \geq j$) den gleichen Rest bei der Division durch p haben. Dann ist $(i - j)x$ durch p teilbar, und da p eine Primzahl ist, bedeutet dies, dass $p \mid (i - j) \vee p \mid x$. Nun gilt aber

$$1 \leq i, j, x < p,$$

woraus wir folgern, dass $i = j$. Das beweist Behauptung 2.

Da die Menge M $p-1$ Elemente enthält, folgt aus Behauptung 2, dass es ein $1 \leq y < p$ gibt, so dass xy den Rest 1 bei der Division durch p hat. \square

Satz 2.1.4. \mathbb{F}_p ist ein Körper.

Proof. Übung. \square

Bemerkung 2.1.5.

- (1) Der Körper \mathbb{F}_p kann mit Hilfe von modularem Rechnen / Kongruenzen wesentlich eleganter definiert werden. Aber das gehört in den Bereich der Zahlentheorie.
- (2) Es sei $n \geq 2$. Sie können dann natürlich auch die Menge der Reste betrachten, die bei der Division durch n entstehen. Addition und Multiplikation können wie in dem Fall, wenn n eine Primzahl ist, definiert werden; wenn n keine Primzahl ist, dann hat aber nicht jedes Element, das nicht null ist, ein multiplikatives inverses Element: die Menge der Reste ist in dem Fall ein Ring, aber kein Körper.
- (3) Übung fuer Ehrgeizige: es sei M die Menge der Reste, die bei der Division durch 6 entstehen. Finden Sie heraus, welche Elemente von M ein multiplikatives inverses Element besitzen. Was stellen Sie fest?

Beispiele 2.1.6.

- (1) Die Additions- und Multiplikationstabellen von \mathbb{F}_2 sind gegeben durch

$$\begin{array}{c|cc} + & 0 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{array} \quad \begin{array}{c|cc} \cdot & 0 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{array}$$

- (2) Die Additions- und Multiplikationstabellen von \mathbb{F}_3 sind gegeben durch

$$\begin{array}{c|ccc} + & 0 & 1 & 2 \\ \hline 0 & 0 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 2 & 0 \\ 2 & 2 & 0 & 1 \end{array} \quad \begin{array}{c|ccc} \cdot & 0 & 1 & 2 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 2 \\ 2 & 0 & 2 & 1 \end{array}$$

2.2. Matrizen. Es sei K ein Körper, z.B. \mathbb{R} oder \mathbb{C} .

Definition 2.2.1. Seien $m, n \geq 1$. Eine $(m \times n)$ Matrix A mit Werten in K ist eine Tabelle mit m Zeilen und n Spalten, deren Einträge Elemente von K sind. Wir schreiben

$$A = (a_{ij})_{1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n},$$

wobei a_{ij} den Eintrag in Reihe i und Spalte j bezeichnet. Die Matrix A ist quadratisch, wenn $m = n$ gilt.

Wir schreiben $M_{m \times n}(K)$ fuer die Menge aller $(m \times n)$ -Matrizen mit Werten in K .

Definition 2.2.2. Eine $(1 \times n)$ Matrix wird als Zeilenvektor, eine $(m \times 1)$ Matrix als Spaltenvektor bezeichnet.

Definition 2.2.3. Wir schreiben $0_{m \times n}$ fuer die $(m \times n)$ Matrix, deren Werte alle Null sind.

Wir schreiben $\mathbf{1}_n$ fuer die Matrix $(a_{ij}) \in M_{n \times n}(K)$, fuer die $a_{ii} = 1 \forall 1 \leq i \leq n$ und $a_{ij} = 0 \forall 0 \leq i, j \leq n, i \neq j$ gilt.

Beispiel 2.2.4. Es ist $\mathbf{1}_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ und $\mathbf{1}_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$.

Definition 2.2.5.

- (1) Seien $A = (a_{ij})$ und $B = (b_{ij})$ Elemente von $M_{m \times n}(K)$. Wir definieren die Summe $A + B$ als die $(m \times n)$ Matrix (c_{ij}) mit $c_{ij} = a_{ij} + b_{ij}$.
- (2) Sei $A = (a_{ij}) \in M_{m \times n}(K)$ und $\alpha \in K$. Dann ist das Skalarprodukt $\alpha \cdot A \in M_{m \times n}(K)$ als die Matrix mit Einträgen (αa_{ij}) definiert.

Übung 2.2.6. Es seien $A = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 3 \end{pmatrix}$, $B = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ -1 \end{pmatrix}$, $C = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -2 & 0 \end{pmatrix}$, $D = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ -2 & 1 & 0 \end{pmatrix}$ und $E = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 2 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$. Für welche Paare $X, Y \in \{A, B, C, D, E\}$ ist $2X + Y$ definiert, und was ist der Wert?

Theorem 2.2.7. Es seien $A, B, C \in M_{m \times n}(K)$ und $\alpha, \beta \in K$. Dann gilt

- (1) (Kommutativität) $A + B = B + A$
- (2) (Assoziativität) $A + (B + C) = (A + B) + C$;
- (3) $A + 0_{m \times n} = 0_{m \times n} + A = A$;
- (4) $\alpha(\beta \cdot A) = (\alpha\beta) \cdot A$;
- (5) $(\alpha + \beta)A = \alpha A + \beta A$;
- (6) $\alpha(A + B) = \alpha A + \alpha B$.

Proof. (1) Wir schreiben $A = (a_{ij})$ und $B = (b_{ij})$. Dann ist

$$(A + B)_{ij} = a_{ij} + b_{ij} = b_{ij} + a_{ij} = (B + A)_{ij}.$$

Die anderen Aussagen können ähnlich bewiesen werden. □

Die Multiplikation von zwei Matrizen ist komplizierter:

Definition 2.2.8. Let $A \in M_{m \times n}(K)$ and $B \in M_{n \times p}(K)$. Dann ist das Produkt AB die $(m \times p)$ -Matrix (c_{ik}) mit

$$c_{ik} = a_{i1}b_{1k} + a_{i2}b_{2k} + \dots + a_{in}b_{nk} = \sum_{j=1}^n a_{ij}b_{jk}.$$

Beispiele 2.2.9. Es gilt

$$\begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 2 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x - y \\ 2x + 3y \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ -1 & 1 \\ 2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 2 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 & 1 \\ 1 & 2 \\ 2 & -2 \end{pmatrix}$$

Theorem 2.2.10.

- (1) (Assoziativität) Seien $A \in M_{m \times n}(K)$, $B \in M_{n \times p}(K)$ und $C \in M_{p \times q}(K)$. Dann gilt $A(BC) = (AB)C$.
- (2) (Distributivität) Seien $A \in M_{m \times n}(K)$, $B \in M_{n \times p}(K)$ und $C \in M_{n \times p}(K)$. Dann gilt $A(B + C) = AB + AC$.
- (3) Seien $A \in M_{m \times n}(K)$, $B \in M_{n \times p}(K)$ und $\alpha \in K$. Dann gilt $\alpha(AB) = (\alpha A)B = A(\alpha B)$.

Proof. Überprüfen Sie die Aussagen direkt von der Definition. □

Beachte 2.2.11. Es seien $A \in M_{m \times n}(K)$ und $B \in M_{n \times p}(K)$. Dann sind die beiden Produkte AB und BA dann und nur dann definiert, wenn $m = p$. In diesem Fall ist $AB \in M_{m \times m}(K)$ und $BA \in M_{n \times n}(K)$.

Beispiele 2.2.12.

- (i) Es seien $A = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 \end{pmatrix}$ und $B = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$. Dann gilt

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

(ii) Es seien nun A wie in (i) und $C = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$. Dann ist

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

aber CA ist nicht definiert.

Beispiel 2.2.13. Sei $A \in M_{n \times n}(K)$. Dann gilt

$$A\mathbf{1}_n = \mathbf{1}_n A = A.$$

Definition 2.2.14. Es seien A, B quadratische Matrizen. Dann kommutieren A und B wenn $AB = BA$.

Warnung 2.2.15. Es sei $n \geq 2$. Dann gibt es viele Matrizen $A, B \in M_{n \times n}(K)$, die nicht kommutieren!

Übung 2.2.16. Sei $n \geq 2$. Finden Sie Matrizen $A, B \in M_{n \times n}(\mathbb{R})$ so dass $AB \neq BA$.

Definition 2.2.17. Es sei $A = (a_{ij}) \in M_{n \times n}(K)$.

- (1) A ist diagonal falls $a_{ij} = 0$ fuer all $i \neq j$.
- (2) A ist eine obere Dreiecksmatrix falls $a_{ij} = 0$ fuer alle $i > j$.

Beispiel 2.2.18. Fuer all n ist die Einheitsmatrix $\mathbf{1}_n$ diagonal. Die Matrix $\begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}$ ist eine obere Dreiecksmatrix.

Definition 2.2.19. Eine $(n \times n)$ -Matrix A ist invertierbar wenn es eine $(n \times n)$ -Matrix B gibt, so dass

$$(4) \quad AB = BA = \mathbf{1}_n.$$

Lemma 2.2.20. Wenn A invertierbar ist, dann gibt es genau ein B , dass Gleichung (4) erfuehlt. Wir nennen B die inverse Matrix von A , und wir schreiben A^{-1} .

Proof. Nehmen wir an, es gibt zwei $(n \times n)$ -Matrizen B und B' , die die Gleichung (4) erfuehlen. Dann gilt

$$B = B\mathbf{1}_n = B(AB') = (BA)B' = \mathbf{1}_n B' = B'.$$

□

Beispiele 2.2.21.

- (1) Die Matrix $A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$ ist invertierbar, und $A^{-1} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$.
- (2) Die Matrix $B = \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ ist nicht invertierbar.

Bemerkung 2.2.22. Wir werden uns spaeter im Kurs mit Fragen der Invertierbarkeit naeher beschaeftigen.

Theorem 2.2.23. Es seien A, B invertierbare $(n \times n)$ Matrizen. Dann gilt

$$(AB)^{-1} = B^{-1}A^{-1}.$$

Proof. Übung.

□

Bemerkung 2.2.24. Die Umkehrung der Faktoren kennen wir aus dem Alltag: wenn wir morgens erst Socken und dann Schuhe anziehen, so ziehen wir sie abends in umgekehrter Reihenfolge wieder aus.³

³Diese Beobachtung stammt von Hermann Weyl.

2.3. Elementare Zeilenoperationen.

Definition 2.3.1. Es sei A eine $(m \times n)$ -Matrix. Die elementaren Zeilenumformungen (EZU) auf A sind folgendermassen definiert:

- $P(r, s)$ fuer $1 \leq r < s \leq m$: Vertauschen der Zeilen r und s ;
- $M(r, \lambda)$ fuer $1 \leq r \leq m$ und $\lambda \in K, \lambda \neq 0$: Multiplikation der Zeile r (d.h. aller Werte der Zeile r) mit λ ;
- $S(r, s, \lambda)$: fuer $1 \leq r, s \leq m, r \neq s$ und $\lambda \in K, \lambda \neq 0$: Addition von $\lambda \times$ (Zeile r) zur Zeile s .

Definition 2.3.2. Wir sagen, dass zwei Matrizen A und A' zeilen-aequivalent sind, wenn wir A' durch die Anwendung von endlich vielen (EZU)s auf A erhalten.

Beispiel 2.3.3. Es sei $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$. Dann gilt

$$\begin{aligned} P(2,3) &\rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix} \\ M(1,-1) &\rightarrow \begin{pmatrix} -1 & -2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix} \\ S(2,1,2) &\rightarrow \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Bemerkung 2.3.4. Diese Definition ist symmetrisch in A und A' : wenn wir A' durch die Anwendung von endlich vielen (EZU)s auf A erhalten, dann erhalten wir auch A durch die Anwendung von endlich vielen (EZU)s auf A' ; mit anderen Worten, die (EZU)s sind umkehrbar. Zeigen Sie das.

Definition 2.3.5. Eine $(m \times n)$ -Matrix ist in reduzierter Zeilenform, wenn folgende Bedingung erfuellt ist:

- (1) in jeder Zeile ist das erste von null verschiedene Element (falls es eins gibt) eine 1 (wir nennen es die fuehrende 1),
- (2) ausser einer fuehrenden 1 sind in dessen Spalte nur Nullen.

Beispiele 2.3.6.

- (1) Die Matrix $A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 2 \\ 0 & 1 & -2 & 0 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ ist in reduzierter Zeilenform.
- (2) Die Matrix $B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$ ist nicht in reduzierter Zeilenform.
- (3) Die Matrix $C = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & -3 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ ist nicht in reduzierter Zeilenform.
- (4) Die Matrix $D = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & 5 \end{pmatrix}$ ist in reduzierter Zeilenform.

Theorem 2.3.7. Jede Matrix A ist zeilen-aequivalent zu einer Matrix in reduzierter Zeilenform.

Proof. Schreibe $A = (a_{ij})_{1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n}$ mit $a_{ij} \in K$.

- Falls alle Werte in der ersten Zeile null sind, dann ist Bedingung (1) fuer diese Zeile erfuellt.
- Falls es einen Wert in der ersten Zeile gibt, der nicht null ist, dann sei k der kleinste Index j , so dass $a_{1j} \neq 0$ (d.h. $a_{1k} \neq 0$, aber $a_{1j} = 0$ fuer alle $1 \leq j < k$). Wende die (EZU) $M(1, a_{1k}^{-1})$ an; dann ist Bedingung (1) erfuellt.
- Wende (EZU) $S(1, i, -a_{ik})$ an fuer alle $2 \leq i \leq m$; damit sind alle anderen Werte in Spalte k gleich null.

Wir wenden jetzt die gleiche Strategie auf die zweite Zeile an.

- Falls alle Werte in der zweiten Zeile null sind, dann ist Bedingung (1) fuer diese Zeile erfuehlt.
- Falls es einen Wert in der zweiten Zeile gibt, der nicht null ist, dann sei ℓ der kleinste Index j , so dass $a_{2j} \neq 0$ (d.h. $a_{2\ell} \neq 0$, aber $a_{2j} = 0$ fuer alle $1 \leq j < \ell$). Wende die (EZU) $M(2, a_{2\ell}^{-1})$ an; dann ist Bedingung (1) erfuehlt. (Beachte: $\ell \neq k!$)
- Wende (EZU) $S(2, i, -a_{i\ell})$ an fuer alle $1 \leq i \leq m, i \neq 2$; damit sind alle anderen Werte in Spalte ℓ gleich null.

Wiederhole das Verfahren fuer die anderen Zeilen. □

Definition 2.3.8. Eine $(m \times n)$ Matrix A ist in reduzierter Zeilenstufenform (eng: row-reduced echelon form), wenn folgende Bedingungen erfuehlt sind:

- (1) A ist in reduzierter Zeilenform;
- (2) alle Zeilen von A , deren Werte alle gleich null sind, liegen unter den Zeilen, die einen von Null verschiedenen Wert enthalten;
- (3) die fuehrende 1 einer Zeile liegt rechts von der fuehrenden 1 der Zeile darueber.

Mit anderen Worten, A hat folgende Form:

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

Theorem 2.3.9. Jede Matrix ist zeilen-aequivalent zu einer Matrix in reduzierter Zeilenstufenform.

Proof. In Satz 2.3.7 haben wir bewiesen, dass jede Matrix zeilen-aequivalent zu einer Matrix in reduzierter Zeilenform ist. Es sei nun A eine Matrix in reduzierter Zeilenform. Wir koennen sie in reduzierte Zeilenstufenform ueberfuehren, indem wir endlich oft die (EZU) $P(r, s)$ (d.h. Vertauschen von Zeilen) anwenden. □

Beispiel 2.3.10. Es sei $A = \begin{pmatrix} 0 & -9 & 3 & 4 \\ 1 & 4 & 0 & -1 \\ 2 & 6 & -1 & 5 \end{pmatrix} \in M_{3 \times 4}(\mathbb{R})$.

$$\begin{aligned} M(1, -\frac{1}{9}) &\rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 1 & -\frac{1}{3} & -\frac{4}{9} \\ 1 & 4 & 0 & -1 \\ 2 & 6 & -1 & 5 \end{pmatrix} \\ S(1, 2, -4) &\rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 1 & -\frac{1}{3} & -\frac{4}{9} \\ 1 & 0 & \frac{4}{3} & \frac{7}{9} \\ 2 & 6 & -1 & 5 \end{pmatrix} \\ S(1, 3, -6) &\rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 1 & -\frac{1}{3} & -\frac{4}{9} \\ 1 & 0 & \frac{4}{3} & \frac{7}{9} \\ 2 & 0 & 1 & \frac{23}{3} \end{pmatrix} \\ S(2, 3, -2) &\rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 1 & -\frac{1}{3} & -\frac{4}{9} \\ 1 & 0 & \frac{4}{3} & \frac{7}{9} \\ 0 & 0 & -\frac{5}{3} & \frac{55}{9} \end{pmatrix} \\ M(3, -\frac{3}{5}) &\rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 1 & -\frac{1}{3} & -\frac{4}{9} \\ 1 & 0 & \frac{4}{3} & \frac{7}{9} \\ 0 & 0 & 1 & -\frac{11}{3} \end{pmatrix} \\ S(3, 2, -\frac{4}{3}) &\rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 1 & -\frac{1}{3} & -\frac{4}{9} \\ 1 & 0 & 0 & \frac{17}{3} \\ 0 & 0 & 1 & -\frac{11}{3} \end{pmatrix} \\ S(3, 1, \frac{1}{3}) &\rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & -\frac{5}{3} \\ 1 & 0 & 0 & \frac{17}{3} \\ 0 & 0 & 1 & -\frac{11}{3} \end{pmatrix} \\ P(1, 2) &\rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \frac{17}{3} \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{5}{3} \\ 0 & 0 & 1 & -\frac{11}{3} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Im naechsten Abschnitt werden wir sehen, dass diese Rechnungen mit Matrizen sehr nuetzlich sind, um lineare Gleichungssysteme zu loesen.

2.4. Lineare Gleichungssysteme.

Beachte 2.4.1. Betrachte das lineare Gleichungssystem

$$\begin{aligned} 2x - y &= 3 \\ -x + 3y &= -1 \end{aligned}$$

Wir koennen es mit Hilfe von Matrizen schreiben als

$$\begin{pmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ -1 \end{pmatrix}.$$

Allgemein gilt: gegeben seinen $m, n \geq 1$ und $\forall 1 \leq i \leq m$ eine Gleichung

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j = b_i$$

mit Unbekannten x_j . Dann koennen wir dieses Gleichungssystem in Matrixform ausdruecken:

$$Ax = b, \quad \text{wobei} \quad A = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}, \quad x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_m \end{pmatrix}.$$

Definition 2.4.2. Es sei $(S) : Ax = b$ ein lineares Gleichungssystem, wobei A eine $(m \times n)$ -Matrix ist.

- Wir schreiben $L(S)$ fuer die Loesungen des Gleichungssystems, d.h.

$$L(S) = \left\{ x = \begin{pmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_m \end{pmatrix} : x_i \in K, Ax = b \right\}.$$

- Die erweiterte Matrix $A|b$ ist die $(m \times (n+1))$ Matrix, bei der der Spaltenvektor b als $(n+1)$ ste Spalte der Matrix A hinzugefuegt wird.

Beachte 2.4.3. Das lineare Gleichungssystem $Ax = b$ ist durch die erweiterte Matrix $A|b$ vollstaendig bestimmt.

Bemerkung 2.4.4. Wenn $b = 0$, dann schreiben wir A anstatt der erweiterten Matrix $A|0$; man nennt ein lineares Gleichungssystem der Form $Ax = 0$ homogen.

Theorem 2.4.5. Es seien

$$(S) : Ax = b \quad \text{und} \quad (S') : A'x = b'$$

lineare Gleichungssysteme von jeweils m Gleichungen in n Unbekannten. Nimm an, dass die erweiterte Matrix $A'|b'$ zeilen-aequivalent zu $A|b$ ist. Dann gilt $L(S') = L(S)$.

Proof. Wir machen zunaechst folgende Beobachtungen:

- es ist ausreichend, den Satz zu zeigen, dass wenn (S') von (S) durch eine (EZU) konstruiert ist;
- es folgt von Bemerkung 2.3.4, dass es ausreichend ist zu zeigen, dass $L(S) \subseteq L(S')$.⁴

Wir muessen also folgende Behauptung beweisen: wenn (S') von (S) durch eine (EZU) konstruiert ist, dann gilt $L(S) \subseteq L(S')$. Wir analysieren dazu jede der drei Operationen einzeln: fuer die Operationen $P(r, s)$ und $M(r, \lambda)$ ist die Behauptung offensichtlich. Fuer die Operation $S(r, s, \lambda)$ argumentieren wir wie folgt: wenn (S') von (S) durch die Operation $S(r, s, \lambda)$ konstruiert wird, dann unterscheiden sich die erweiterten Matrizen $A|b$ und $A'|b'$ nur in der Zeile s :

$$a'_{sj} = a_{sj} + \lambda a_{rj} \quad \text{und} \quad b'_s = b_s + \lambda b_r.$$

Es sei x eine Loesung von (S) , d.h. $\forall 0 \leq i \leq m$ gilt

$$a_{i1}x_1 + \dots + a_{in}x_n = b_i.$$

Dann gilt ebenfalls

$$\begin{aligned} a_{s1}x_1 + \dots + a_{sn}x_n + \lambda(a_{r1}x_1 + \dots + a_{rn}x_n) &= b_s + \lambda b_r \\ \Leftrightarrow a'_{s1}x_1 + \dots + a'_{sn}x_n &= b'_s, \end{aligned}$$

⁴Durch Symmetrie folgt dann, dass $L(S') \subseteq L(S)$, und so $L(S) = L(S')$.

d.h. x ist eine Lösung von (S') . □

Wir können also versuchen, ein lineares Gleichungssystem $(S) : Ax = b$ zu lösen, indem wir die erweiterte Matrix durch (EZU)s in reduzierte Zeilenstufenform umformen.

Beispiel 2.4.6. Betrachten wir das lineare Gleichungssystem $(S) : Ax = 0$, wobei

$$A = \begin{pmatrix} 0 & -9 & 3 & 4 \\ 1 & 4 & 0 & -1 \\ 2 & 6 & -1 & 5 \end{pmatrix} \in M_{3 \times 4}(\mathbb{R}).$$

Wir haben bereits in Beispiel 2.3.10 gesehen, dass A zeilen-äquivalent zu folgender Matrix ist:

$$A' = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \frac{17}{3} \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{5}{3} \\ 0 & 0 & 1 & -\frac{11}{3} \end{pmatrix}.$$

Wir können nun also direkt die Lösungen ablesen:

$$L(S) = \left\{ x_1 = -\frac{17}{3}x_4, x_2 = \frac{5}{3}x_4, x_3 = \frac{11}{3}x_4 : x_4 \in K \right\}.$$

Betrachten wir nun das Gleichungssystem $(S') : Ax = b$, wobei $b = \begin{pmatrix} 9 \\ 5 \\ -5 \end{pmatrix}$. Die erweiterte Matrix ist Lecture 6

$$\left(\begin{array}{cccc|c} 0 & -9 & 3 & 4 & 9 \\ 1 & 4 & 0 & -1 & 5 \\ 2 & 6 & -1 & 5 & -5 \end{array} \right).$$

Mit den gleichen Schritten wie in Beispiel 2.3.10 wandeln wir sie in reduzierte Zeilenstufenform um:

$$\left(\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & 0 & \frac{17}{3} & -\frac{22}{5} \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{5}{3} & \frac{12}{5} \\ 0 & 0 & 1 & -\frac{11}{3} & \frac{51}{5} \end{array} \right)$$

d.h.

$$x_1 + \frac{17}{3}x_4 = -\frac{22}{5}, \quad x_2 - \frac{5}{3}x_4 = \frac{12}{5}, \quad x_3 - \frac{11}{3}x_4 = \frac{51}{5},$$

und wir erhalten die Lösungsmenge⁵

$$L(S') = \left\{ x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} : x_1 = -\frac{22}{5} - \frac{17}{3}x_4, x_2 = \frac{12}{5} + \frac{5}{3}x_4, x_3 = \frac{51}{5} + \frac{11}{3}x_4 : x_4 \in K \right\}.$$

Beispiel 2.4.7. Gegeben sei

$$(S) : \begin{pmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \\ 0 & 5 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix},$$

wobei b_1, b_2, b_3 Elemente von \mathbb{R} sind. Die erweiterte Matrix ist

$$A = \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & -2 & 1 & b_1 \\ 2 & 1 & 1 & b_2 \\ 0 & 5 & -1 & b_3 \end{array} \right).$$

⁵Ich bedanke mich bei Leopoldt Karl, der mich auf einen Fehler in der Rechnung hingewiesen hat.

Wir wandeln sie in reduzierte Zeilenstufenform um:

$$\begin{aligned}
 S(1, 2, -2) &\rightarrow \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & -2 & 1 & b_1 \\ 0 & 5 & -1 & b_2 - 2b_1 \\ 0 & 5 & -1 & b_3 \end{array} \right) \\
 S(2, 3, 1) &\rightarrow \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & -2 & 1 & b_1 \\ 0 & 5 & -1 & b_2 - 2b_1 \\ 0 & 0 & 0 & b_3 - b_2 + 2b_1 \end{array} \right) \\
 M(2, \frac{1}{5}) &\rightarrow \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & -2 & 1 & b_1 \\ 0 & 1 & -\frac{1}{5} & \frac{1}{5}(b_2 - 2b_1) \\ 0 & 0 & 0 & b_3 - b_2 + 2b_1 \end{array} \right) \\
 S(2, 1, 2) &\rightarrow \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & \frac{3}{5} & \frac{1}{5}(b_1 + 2b_2) \\ 0 & 1 & -\frac{1}{5} & \frac{1}{5}(b_2 - 2b_1) \\ 0 & 0 & 0 & b_3 - b_2 + 2b_1 \end{array} \right)
 \end{aligned}$$

In other words, (S) is equivalent to

$$x_1 = -\frac{3}{5}x_3 + \frac{1}{5}(b_1 + 2b_2), \quad x_2 = \frac{1}{5}x_3 + \frac{1}{5}(b_2 - 2b_1), \quad 0 = b_3 - b_2 + 2b_1.$$

Es koennen also folgende Faelle auftreten:

- wenn $b_3 - b_2 + 2b_1 \neq 0$, dann gibt es keine Loesung: $L(S) = \emptyset$;
- wenn $b_3 - b_2 + 2b_1 = 0$, dann ist das System aequivalent zu

$$x_1 = -\frac{3}{5}x_3 + \frac{1}{5}(b_1 + 2b_2), \quad x_2 = \frac{1}{5}x_3 + \frac{1}{5}(b_2 - 2b_1),$$

$$\text{d.h. } L(S) = \left\{ x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} : x_1 = -\frac{3}{5}x_3 + \frac{1}{5}(b_1 + 2b_2), x_2 = \frac{1}{5}x_3 + \frac{1}{5}(b_2 - 2b_1) : x_3 \in \mathbb{R} \right\}.$$

3. VECTOR SPACES

3.1. Definition und Beispiele.

Definition 3.1.1. *Es sei K ein Koerper. Ein Vektorraum ueber K ist eine Menge V mit zwei Operationen*

$$(5) \quad + : V \times V \rightarrow V, \quad (v_1, v_2) \mapsto v_1 + v_2,$$

$$(6) \quad \times : K \times V \rightarrow V \quad (\lambda, v) \mapsto \lambda v$$

so dass die folgenden Bedingungen erfuehrt sind:

$$(VR1) \quad \forall v_1, v_2 \in V : v_1 + v_2 = v_2 + v_1;$$

$$(VR2) \quad \forall v_1, v_2, v_3 \in V : v_1 + (v_2 + v_3) = (v_1 + v_2) + v_3;$$

$$(VR3) \quad \exists 0_V \in V \text{ so dass } \forall v \in V \text{ gilt: } 0_V + v = v;$$

$$(VR4) \quad \forall v \in V \exists w \in V \text{ so dass } v + w = 0_V; \text{ with schreiben}^6 w = -v;$$

$$(VR5) \quad \forall v_1, v_2 \in V \text{ und } \forall \lambda \in K \text{ gilt } \lambda(v_1 + v_2) = \lambda v_1 + \lambda v_2;$$

$$(VR6) \quad \forall v \in V \text{ and } \forall \lambda, \mu \in K \text{ gilt } (\lambda + \mu)v = \lambda v + \mu v;$$

$$(VR7) \quad \forall v \in V \text{ and } \forall \lambda, \mu \in K \text{ gilt } \lambda(\mu v) = (\lambda\mu)v;$$

$$(VR8) \quad \forall v \in V \text{ gilt } 1v = v.$$

Bemerkung 3.1.2. *Die Operationen (5) und (6) heissen jeweils Vektor Addition und Skalar-Multiplikation.*

Beispiele 3.1.3.

- (1) Die Menge aller Spaltenvektoren $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ mit $x, y \in K$ ist ein K -Vektorraum. Allgemeiner ist die Menge aller Spaltenvektoren mit n Eintraegen ein K -Vektorraum unter der Addition und Skalarmultiplikation von Matrizen (Def. 2.2.5); wir schreiben ihn als K^n .
- (2) Der triviale K -Vektorraum ist $\{0\}$.
- (3) Die Menge aller Fibonacci Folgen von Definition 1.1.3 ist ein \mathbb{R} -Vektorraum.
- (4) Es sei K ein Koerper, and $K[x]^{\leq n}$ die Menge aller Polynome mit Koeffizienten in K vom Grad $\leq n$. Dann ist $K[x]^{\leq n}$ ein K -Vektorraum.

⁶Diese Schreibweise ist an dieser Stelle missverstaendlich, da (noch) nicht klar ist, dass es genau ein w gibt, so dass $v + w = 0_V$ gilt. Wir zeigen die Eindeutigkeit in Korollary 3.1.5.

(5) Es sei

$$V = \{f : (0, 1) \rightarrow \mathbb{R} : f \text{ ist stetig}\}.$$

Dann ist f ein \mathbb{R} -Vektorraum unter der punktweisen Addition von Funktionen.

(6) Es sei

$$U = \{f \in V : f(1/2) = 0\}.$$

Dann ist U ein \mathbb{R} -Vektorraum: es ist ein *Unterraum* von V .

(7) Es sei

$$U' = \{f \in V : f(1/2) = 1\}.$$

Dann ist U' **kein** \mathbb{R} -Vektorraum (warum nicht?).

Satz 3.1.4. *Es sei V ein K -Vektorraum. Dann gibt es genau ein Element mit der Eigenschaft (VR3); wir nennen es die additive Identität von V .*

Proof. Nimm an, dass 0_V und $0'_V$ die Eigenschaft (VR3) haben. Dann gilt

$$0_V = 0_V + 0'_V = 0'_V.$$

□

Korollar 3.1.5. *Let $v \in V$. Dann ist das Element in (VR4) eindeutig bestimmt; es heisst das (additive) Inverse⁷ von v .*

Proof. Nimm an, es gibt $u, u' \in V$ so dass

$$v + u = v + u' = 0_V.$$

Dann gilt

$$u = u + 0_V = u + (v + u') = (u + v) + u' = 0_V + u' = u'.$$

□

Satz 3.1.6. *Es sei V ein K Vektorraum, und es seien $\lambda \in K$ und $v \in V$. Dann gilt*

- (1) $\lambda 0_V = 0_V$;
- (2) $0v = 0_V$;
- (3) $(-\lambda)v = -(\lambda v) = \lambda(-v)$;
- (4) if $\lambda v = 0_V$, then $\lambda = 0$ or $v = 0_V$.

Proof. (1) Dank Satz 3.1.4 und (VR5) gilt

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

Addiere $-(\lambda 0_V)$ zu beiden Seiten und erhalte die Gleichung

$$0_V = \lambda 0_V.$$

(2) Wir argumentieren aehnlich:

$$0v = (0 + 0)v = 0v + 0v \Rightarrow 0v = 0v.$$

(3) Uebung.

(4) Wir zeigen folgende Aussage⁸: wenn $\lambda v = 0_V$ und $\lambda \neq 0$, dann gilt $v = 0$. Da $\lambda \neq 0$, hat λ ein multiplikatives inverses Element $\lambda^{-1} \in K$. Dann gilt

$$(7) \quad \lambda v = 0_V \quad \Leftrightarrow \quad \lambda^{-1}(\lambda v) = 0_V \quad \text{wegen (1)}$$

$$(8) \quad \Leftrightarrow \quad (\lambda^{-1}\lambda)v = 0_V \quad \text{wegen (VR7)}$$

$$(9) \quad \Leftrightarrow \quad 1.v = v = 0_V \quad \text{wegen (VR8)}$$

□

⁷Falls Sie etwas Gruppentheorie gelernt haben: $(V, +)$ ist eine *abelsche Gruppe*.

⁸Vergewissern Sie sich, dass diese Aussage äquivalent zu (4) ist.

3.2. Unterräume.

Definition 3.2.1. Es sei V ein K -Vektorraum. Eine Teilmenge $U \subseteq V$ ist ein Unterraum wenn $U \neq \emptyset$ und wenn sie bezüglich Addition und Skalar-Multiplikation abgeschlossen ist, d.h. wenn sie folgende zwei Bedingungen erfuehlt:

- (UR1) $\forall u, v \in U$ gilt $u + v \in U$;
 (UR2) $\forall u \in U$ und $\forall \lambda \in K$ gilt $\lambda u \in U$.

Wir schreiben $U \leq V$.

Der folgende Satz ist nuetzlich um festzustellen, ob eine Teilmenge eines Vektorraumes ein Unterraum ist:

Satz 3.2.2. Eine Teilmenge U von einem Vektorraum V ist dann und nur dann ein Unterraum von V , wenn folgende Bedingungen erfuehlt sind:

- (1) $0_V \in U$;
 (2) $\forall u, v \in U$ und $\lambda \in K$ gilt $\lambda u + v \in U$.

Proof. Nimm an, dass U ein Unterraum ist. Da $U \neq \emptyset$, gibt es ein $u \in U$. Da U bezüglich der Skalar-Multiplikation abgeschlossen ist, gilt

$$0u \in U \Leftrightarrow 0_V \in U,$$

da $0u = 0_V$ (Prop. 3.1.6 (2)). Es seien nun $u, v \in U$ und $\lambda \in K$. Dann ist $\lambda u \in U$ wegen (UR2) und $\lambda u + v \in U$ wegen (UR2).

Nimm nun an, dass die Bedingungen erfuehlt sind. Dann ist U nicht die leere Menge da $0_V \in U$. Es seien nun $u, v \in U$. Fuer $\lambda = 1$ erhalten wir $u + v \in U$. Weiterhin, fuer $\lambda \in K$ und $v = 0_V$ erhalten wir

$$\lambda u + 0_V = \lambda u \in U,$$

d.h. U ist ein Unterraum. □

Beispiele 3.2.3.

- (1) Es sei V ein Vektorraum. Dann sind $\{0\}$ und V die trivialen Unterräume von V .
 (2) Es sei $V = \mathbb{R}^3$, und es sei

$$U = \left\{ \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \in V : x + y + z = 0 \right\}.$$

Dann ist U ein Unterraum von V .

- (3) Wie im vorherigen Beispiel sei $V = \mathbb{R}^3$. Es sei $\lambda \in \mathbb{R}$, $\lambda \neq 0$. Dann ist

$$U' = \left\{ \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \in V : x + y + z = \lambda \right\}$$

kein Unterraum von V , da er unter den Operationen der Addition und der Skalar-Multiplikation nicht abgeschlossen ist.

- (4) Das vorherige Beispiel hat folgende Verallgemeinerung: es sei $A \in M_{m \times n}(K)$ und $b \in M_{m \times 1}(K)$, und wir betrachten das lineare Gleichungssystem

$$(S) : Ax = b.$$

Die Loesungsmenge $L(S) \subseteq K^n$ ist dann und nur dann ein Unterraum von K^n , wenn $b = 0$; in diesem Fall nennen wir (S) ein *homogenes* lineares Gleichungssystem.

- (5) Es sei $V = M_{2 \times 2}(\mathbb{C})$ (ein komplexer Vektorraum unter der normalen Matrix-Addition) und U die Teilmenge der invertierbaren Matrizen. Dann ist U kein Unterraum, da die Null-Matrix nicht invertierbar ist.
 (6) Wieder sei $V = M_{2 \times 2}(\mathbb{C})$ und U' die Teilmenge der nicht invertierbaren Matrizen. Ist U' ein Unterraum? Geben Sie einen Beweis oder ein Gegenbeispiel. Wie ist es mit der Teilmenge U'' der oberen Dreiecksmatrizen?

Das folgende Beispiel ist sehr wichtig:

Satz 3.2.4. *Es sei V ein K -Vektorraum und $v_1, \dots, v_n \in V$. Es sei*

$$U = \{\lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_n v_n : \lambda_i \in K \forall 1 \leq i \leq n\}.$$

Dann ist U ein Unterraum; wir nennen ihn den von v_1, \dots, v_n erzeugten Unterraum oder die lineare Hülle von v_1, \dots, v_n und schreiben

$$U = \langle v_1, \dots, v_n \rangle.$$

Proof. Wir beweisen den Satz mit Hilfe von Satz 3.2.2: fuer $\lambda_1 = \dots = \lambda_n = 0$ erhalten wir $0_V \in U$. Es seien nun $u, w \in U$ und $\lambda \in K$. Aufgrund der Definition von U gibt es Skalare μ_1, \dots, μ_n und ν_1, \dots, ν_n so dass

$$u = \mu_1 v_1 + \dots + \mu_n v_n \quad \text{und} \quad w = \nu_1 v_1 + \dots + \nu_n v_n.$$

Daher

$$\begin{aligned} u + \lambda w &= \mu_1 v_1 + \dots + \mu_n v_n + \lambda(\nu_1 v_1 + \dots + \nu_n v_n) \\ &= (\mu_1 + \lambda \nu_1) v_1 + \dots + (\mu_n + \lambda \nu_n) v_n \end{aligned}$$

was ebenfalls ein Element von U ist. □

Bemerkung 3.2.5. *Wir koennen diese Beispiel wie folgt verallgemeinern: es sei S eine (moeglicherweise unendliche) Teilmenge von V . Wir definieren die lineare Huelle von S als*

$$\langle S \rangle = \{v \in V : \exists n \geq 0, v_1, \dots, v_n \in S \text{ und } \lambda_1, \dots, \lambda_n \in K \text{ so dass } v = \lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_n v_n\}.$$

Insbesondere ist der Null-Vektorraum die lineare Huelle der leeren Menge.

*Beachten Sie, dass S unendlich sein kann: wir erlauben trotzdem nur endliche Summen.*⁹

Beispiel 3.2.6. Es sei $V = M_{2 \times 2}(\mathbb{R})$, und es sei U der von den Matrizen $e_{11} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$, $e_{12} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ und $e_{22} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ erzeugt Unterraum. Dann ist U der Unterraum der oberen Dreiecksmatrizen.

Es seien nun $v_1 = e_{11} + e_{12}$, $v_2 = e_{12} + e_{22}$ und $v_3 = e_{22} + e_{11}$. Was ist $\langle v_1, v_2, v_3 \rangle$?

Beispiel 3.2.7. Es sei $V = \mathbb{R}^3$, und es sei $U = \left\langle \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ -1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ -2 \\ 2 \end{pmatrix} \right\rangle$. Ist der Vektor $v = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}$ in U enthalten? Wir koennen diese Frage als lineares Gleichungssystem formulieren: hat das System

$$(S) : \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & -2 \\ -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}$$

eine Loesung? *Uebung.*

Satz 3.2.8. *Es sei V ein Vektorraum und $U \leq V$ ein Unterraum. Dann ist U ebenfalls ein Vektorraum. Ausserdem gilt: wenn $W \leq U$ und $U \leq V$, dann $W \leq V$.*

Proof. Ueberpruefen Sie die Axiome. □

Aus zwei Unterraemen lassen sich auf mehrere Arten neue Unterraeme konstruieren:

Theorem 3.2.9. *Es seien $U, W \leq V$.*

(1) *Die Schnittmenge*

$$U \cap W = \{v \in V : v \in U \wedge v \in W\}$$

ist ein Unterraum von V .

(2) *Die Summe von U und W ,*

$$U + W = \{u + w : u \in U, w \in W\}$$

ist ein Unterraum von V .

Proof. Wir beweisen (1) mit Hilfe von Satz 3.2.2: da U und W Unterraeme sind, enthalten beide das Element 0_V . Daher gilt $0_V \in U \cap W$. Es seien nun $u, w \in U \cap W$ und $\lambda \in K$. Da U und W Unterraeme sind, ist das Element $u + \lambda w$ in beiden Unterraemen enthalten, und daher auch in $U \cap W$.

(2) kann mit aehnlichen Argumenten bewiesen werden (*Uebung*). □

⁹Fuer unendliche Summen bracht man den Begriff der Konvergenz – diese fuehrt zu der Theorie von Banachraemen.

3.3. Basen von Vektorraeumen. Zurueck zum Satz 3.2.4:

Definition 3.3.1. Es sei V ein Vektorraum und $v_1, \dots, v_n \in V$. Ein Element der Form

$$\lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_n v_n$$

mit $\lambda_i \in K$ ist eine Linearkombination von v_1, \dots, v_n .

Beispiel 3.3.2. Es sei $V = \mathbb{R}^3$ und $v = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3$. Dann koennen wir v als eine Linearkombination

der Vektoren $e_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$, $e_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ und $e_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ schreiben:

$$v = x e_1 + y e_2 + z e_3.$$

Definition 3.3.3. Es sei V ein Vektorraum. Dann ist V endlich-dimensional wenn es endlich viele Vektoren $v_1, \dots, v_n \in V$ gibt so dass

$$V = \langle v_1, \dots, v_n \rangle :$$

mit anderen Worten, wenn jeder Vektor als Linearkombination der Vektoren v_1, \dots, v_n geschrieben werden kann; diese Linearkombination muss nicht eindeutig sein. Wir nennen v_1, \dots, v_n ein Erzeugendensystem.

Beispiele 3.3.4.

- (1) Beispiel 3.3.2 zeigt, dass e_1, e_2, e_3 ein Erzeugendensystem von \mathbb{R}^3 ist; daher ist \mathbb{R}^3 endlich-dimensional.
- (2) Auf gleiche Weise koennen wir zeigen, dass der Vektorraum \mathbb{R}^n ist endlich-dimensional ist.
- (3) For $n \geq 1$ ist $M_{n \times n}(K)$ endlich-dimensional.
- (4) Es sei

$$U = \left\{ \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in M_{2 \times 2}(\mathbb{R}) : a = -d \right\}.$$

Dann ist U ein endlich dimensionaler Unterraum von $M_{2 \times 2}(\mathbb{R})$. (Uebung: beweisen Sie das, und finden Sie in beiden Faelle ein endliches Erzeugendensystem.)

- (5) Es sei V der Vektorraum aller unendlichen reellen Folgen

$$V = \{(a_0, a_1, a_n \dots) : a_i \in \mathbb{R} \forall i\},$$

wobei die Addition und Skalarmultiplikation wie in Kapitel 1.1 definiert sind. Wir werden in Beispiel 3.3.25 beweisen, dass V nicht endlich-dimensional ist. Allerdings haben wir schon gesehen, dass der Unterraum der Fibonacci-Folgen endlich-dimensional ist: die Folgen $\mathcal{F}_{0,1}$ und $\mathcal{F}_{1,0}$ sind ein Erzeugendensystem (Satz 1.1.9).

Beispiel 3.3.5. Sind die Vektoren

$$v_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix}, \quad v_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}, \quad v_3 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

ein Erzeugendensystem von \mathbb{R}^3 ? Mit anderen Worten, hat das lineare Gleichungssystem

$$(10) \quad \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix}$$

eine Loesung fuer alle Vektoren $\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3$? Die reduzierte Zeilenstufenform der erweiterten Matrix ist

$$\left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 1 & b_1 \\ 0 & 1 & 1 & b_1 + b_2 \\ 0 & 0 & 0 & b_3 + b_1 - 2b_2 \end{array} \right).$$

Mit anderen Worten, (10) hat genau dann eine Lösung, wenn $b_3 = 2b_2 + b_1$; ansonsten hat es keine Lösung. Das bedeutet, dass z.B. der Vektor $\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ nicht in der linearen Hülle von v_1, v_2, v_3 enthalten ist, d.h. v_1, v_2, v_3 ist kein Erzeugendensystem von \mathbb{R}^3 .

Die Definition 3.3.3 wirft folgende Fragen auf:

- Wie (wenn überhaupt) können wir die Dimension eines Vektorraums definieren?
- Wenn V ein endlich-dimensionaler Vektorraum ist, ist dann auch jeder Unterraum von V endlich-dimensional?

Zurück zum Beispiel 3.3.2: das Erzeugendensystem e_1, e_2, e_3 hat eine wichtige Eigenschaft, nämlich dass jedes Element in \mathbb{R}^3 *eindeutig* als eine Linearkombination der Vektoren dargestellt werden kann: es

sei $v = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}$. Dann gilt

$$v = ae_1 + be_2 + ce_3,$$

und es gibt keine andere Möglichkeit, v als Linearkombination der Vektoren e_1, e_2, e_3 zu schreiben.

Nun ist e_1, e_2, e_3, f mit $f = e_1 + e_2$ ebenfalls ein Erzeugendensystem: allerdings hat es den Nachteil, dass sich Vektoren in \mathbb{R}^3 nicht mehr eindeutig als Linearkombination der erzeugenden Vektoren schreiben lassen: z.B.

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = 0e_1 + 0e_2 + 0e_3 = e_1 + e_2 - f.$$

Definition 3.3.6. *Es sei V ein Vektorraum, und es seien $v_1, \dots, v_n \in V$ linear unabhängig. Dann sind v_1, \dots, v_n linear unabhängig, wenn sich 0_V eindeutig als Linearkombination dieser Vektoren darstellen lässt: nämlich*

$$0_V = 0e_1 + \dots + 0v_n.$$

Mit anderen Worten, v_1, \dots, v_n sind linear unabhängig wenn gilt

$$\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n = 0 \quad \Rightarrow \quad \alpha_1 = \dots = \alpha_n = 0.$$

Wenn sie nicht linear unabhängig sind, dann nennen wir sie linear abhängig.

Bemerkung 3.3.7. *Wir können diese Definition of unendliche Erzeugendensystem verallgemeinern: es sei $S \subseteq V$. Dann ist S linear unabhängig wenn jede endliche Teilmenge von S linear unabhängig ist.*

Wenn $v_1, \dots, v_n \in V$ linear unabhängig sind, dann lässt sich *jeder* Vektor in der linearen Hülle von v_1, \dots, v_n eindeutig als Linearkombination der Vektoren darstellen:

Satz 3.3.8. *Es seien $v_1, \dots, v_n \in V$ linear unabhängig. Dann kann jeder Vektor $v \in \langle v_1, \dots, v_n \rangle$ eindeutig als Linearkombination von v_1, \dots, v_n dargestellt werden.*

Proof. Nimm an, es gibt $v \in \langle v_1, \dots, v_n \rangle$ so dass

$$v = \alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n = \beta_1 v_1 + \dots + \beta_n v_n$$

für $\alpha_1, \dots, \alpha_n, \beta_1, \dots, \beta_n \in K$. Dann gilt

$$\begin{aligned} & (\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n) - (\beta_1 v_1 + \dots + \beta_n v_n) = 0 \\ \Leftrightarrow & (\alpha_1 - \beta_1)v_1 + \dots + (\alpha_n - \beta_n)v_n = 0_V \\ \Rightarrow & \alpha_1 - \beta_1 = \dots = \alpha_n - \beta_n = 0, \end{aligned}$$

da v_1, \dots, v_n linear unabhängig sind. Daher gilt

$$\alpha_1 = \beta_1, \quad \alpha_2 = \beta_2 \quad \dots \quad \alpha_n = \beta_n,$$

was zu beweisen war. □

Beispiele 3.3.9.

(1) Es sei $V = \mathbb{R}^2$, und wir betrachten die Vektoren

$$v_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad v_2 = \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \end{pmatrix}, \quad v_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \end{pmatrix}.$$

Dann sind v_1, v_2, v_3 linear abhaengig: $2v_1 - v_2 - v_3 = 0$. Hingegen sind die Vektoren v_1, v_2 linear unabhaengig: die einzige Loesung des linearen Gleichungssystems

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

ist $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$.

(2) Es sei $V = \mathbb{R}^3$, und wir betrachten die Spaltenvektoren

$$v_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}, \quad v_2 = \begin{pmatrix} -9 \\ 4 \\ 6 \end{pmatrix}, \quad v_3 = \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}, \quad v_4 = \begin{pmatrix} 4 \\ -1 \\ 5 \end{pmatrix}.$$

Sind diese Vektoren linear unabhaengig? Mit anderen Worten, hat die Gleichung

$$(11) \quad x_1 v_1 + x_2 v_2 + x_3 v_3 + x_4 v_4 = 0$$

eine Loesung ausser $x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = 0$? Wir haben diese Frage bereits in Beispiel 2.3.5 beantwortet: $x_4 \in \mathbb{R}$ beliebig und

$$x_1 = \frac{17}{3}x_4, \quad x_2 = \frac{5}{3}x_4, \quad x_3 = \frac{11}{3}x_4$$

ist eine Loesung von (11). Daher sind die Vektoren linear abhaengig.

(3) Generell kann man zeigen, dass je drei Vektoren in \mathbb{R}^2 (allgemeiner: je $n + 1$ Vektoren in \mathbb{R}^n) linear abhaengig sind – wir werden spaeter verstehen, warum dies so ist.

(4) Per Konvention ist die leere Menge \emptyset linear unabhaengig, und es gilt $\langle \emptyset \rangle = \{0\}$.

Lemma 3.3.10. *Es seien $v_1, \dots, v_n \in V$.*

- Wenn zwei der Vektoren v_1, \dots, v_n gleich sind, oder wenn ein Vektor ein Vielfaches von einem anderen Vektor ist, dann sind v_1, \dots, v_n linear abhaengig.
- Wenn v_1, \dots, v_n linear unabhaengig und $c_1, \dots, c_n \in K$ alle $\neq 0$ sind, dann sind auch $c_1 v_1, \dots, c_n v_n$ linear unabhaengig.
- Wenn einer der Vektoren der Nullvektor 0_V ist, dann ist v_1, \dots, v_n linear abhaengig.

Proof. Uebung. □

Lemma 3.3.11.

- (1) Es sei V ein Vektorraum und $v \in V$, $v \neq \{0\}$. Dann ist v linear unabhaengig.
- (2) Der Nullvektor 0_V ist linear abhaengig.

Proof. Klar. □

Satz 3.3.12. *Es seien $v_1, \dots, v_n \in V$ linear unabhaengig, und es sei v_{n+1} ein Vektor in V , der nicht in $\langle v_1, \dots, v_n \rangle$ enthalten ist. Dann sind v_1, \dots, v_n, v_{n+1} linear unabhaengig.*

Proof. Nimm an, dass v_1, \dots, v_n, v_{n+1} linear abhaengig sind, d.h. es gibt $\alpha_1, \dots, \alpha_{n+1} \in K$, nicht alle null, so dass

$$\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n + \alpha_{n+1} v_{n+1} = 0.$$

Dann ist $\alpha_{n+1} \neq 0$, da v_1, \dots, v_n linear unabhaengig sind. Dann aber folgt, dass

$$v_{n+1} = -\alpha_{n+1}^{-1} (\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n),$$

d.h. $v_{n+1} \in \langle v_1, \dots, v_n \rangle$, was ein Widerspruch ist. Daher ist unsere Annahme falsch. □

Definition 3.3.13. *Es sei V ein Vektorraum. Eine Basis von V ist ein linear unabhaengiges Erzeugendensystem von V .*

Beispiele 3.3.14.

- (1) e_1, e_2, e_3 ist eine Basis von \mathbb{R}^3 ; $S = \{e_1, e_2, e_3, f\}$ mit $f = e_1 - e_2$ ist hingegen keine Basis: so haben wir

$$e_1 = f + e_2,$$

d.h. die Darstellung des Vektors e_1 als Linearkombination der Vektoren in S ist nicht eindeutig.

- (2) $\mathcal{F}_{1,\varphi}$ und $\mathcal{F}_{1,\psi}$ sind eine Basis des Vektorraums von Fibonacci Folgen. Die Folgen $\mathcal{F}_{0,1}$ und $\mathcal{F}_{1,0}$ sind ebenfalls eine Basis.
- (3) Es seien e_{11} , e_{12} und e_{22} wie in Beispiel 3.2.6. Dann sind diese Vektoren eine Basis fuer den Unterraum U der oberen Dreiecksmatrizen in $M_{2 \times 2}(\mathbb{R})$.

Hat jeder Vektorraum eine Basis?

Theorem 3.3.15. *Es sei V ein endlich-dimensionaler Vektorraum. Dann enthaelt jedes endliche Erzeugendensystem eine Basis von V .*

Proof. Es sei S ein endliches Erzeugendensystem. Waehle eine Untermenge $T \subseteq S$, die linear unabhaengig ist und die groesstmoeegliche Anzahl von Elementen enthaelt. Es gibt zwei Moeglichkeiten:

- Wenn die lineare Huelle von T gleich V ist, dann ist T eine Basis.
- Wenn $\langle T \rangle \neq V = \langle S \rangle$, dann koennen wir ein $v \in S$ waehlen, dass nicht in $\langle T \rangle$ enthalten ist. Dann ist $\{v\} \cup S$ linear unabhaengig aufgrund von Satz 3.3.12, was ein Widerspruch zur Definition von T ist. Daher kann es ein solches v nicht geben, d.h. $\langle T \rangle = V$.

□

Korollar 3.3.16. *Jeder endlich-dimensionale Vektorraum besitzt eine Basis.*¹⁰

Es liegt nahe, die Dimension eines Vektorraums as die Anzahl der Element einer Basis zu definieren. Aber ist das wohldefiniert? Koennte ein endlich-dimensionaler Vektorraum nicht zwei Basen mit unterschiedlich vielen Elementen haben?

Lemma 3.3.17. (*Austauschlemma*) *Es sei V ein endlich-dimensionaler K -Vektorraum, und $S = \{v_1, \dots, v_n\}$ eine Basis. Es sei $w \in V$ nicht null, mit der Linearkombination*

$$(12) \quad w = \alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n$$

mit $\alpha_i \in K$. Wenn $\alpha_j \neq 0$, dann ist auch

$$S' = \{v_1, \dots, v_{j-1}, w, v_{j+1}, \dots, v_n\}$$

eine Basis von V .

Lecture 9

Proof. Wir muessen zeigen, dass S' ein Erzeugendensystem und linear unabhaengig ist.

- Erzeugendensystem: wir zeigen zunaechst, dass $v_j \in \langle v_1, \dots, v_{j-1}, w, v_{j+1}, \dots, v_n \rangle$. Von Gleichung (12) sehen wir, dass

$$(13) \quad \begin{aligned} \alpha_j v_j &= w - \sum_{i \neq j} \alpha_i v_i \\ \Rightarrow v_j &= \frac{1}{\alpha_j} w - \sum_{i \neq j} \frac{\alpha_i}{\alpha_j} v_i. \end{aligned}$$

Es sei $u \in V$. Da S eine Basis ist, ist es insbesondere ein Erzeugendensystem, und so gibt es $\beta_1, \dots, \beta_n \in K$ so dass

$$u = \beta_1 v_1 + \dots + \beta_n v_n.$$

Indem wir Gleichung (13) dort einsetzen, erhalten wir einen Ausdruck fuer u als Linearkombination von $v_1, \dots, v_{j-1}, w, v_{j+1}, \dots, v_n$:

$$u = \frac{\beta_j}{\alpha_j} w + \sum_{i \neq j} \left(\beta_i - \beta_j \frac{\alpha_i}{\alpha_j} \right) v_i,$$

d.h. S' ist ein Erzeugendensystem.

- Lineare Unabhaengigkeit: Nimm an, dass es Skalare $\gamma_1, \dots, \gamma_n$ gibt, nicht alle gleich 0, so dass

$$\gamma_1 v_1 + \dots + \gamma_{j-1} v_{j-1} + \gamma_j w + \gamma_{j+1} v_{j+1} + \dots + \gamma_n v_n = 0.$$

Wir setzen Gleichung (12) fuer w dort ein und erhalten

$$\alpha_j \gamma_j v_j + \sum_{i \neq j} (\gamma_i + \gamma_j \alpha_i) v_i = 0.$$

¹⁰Es sei $V = \{0\}$. Dann ist \emptyset ist eine Basis von V . Der Nullvektor ist ein Erzeugendensystem von V , aber keine Basis, da er nicht linear unabhaengig ist.

Da v_1, \dots, v_n linear unabhängig sind, gilt daher

$$\alpha_j \gamma_j = 0 \quad \text{und} \quad \gamma_i + \gamma_j \alpha_i = 0 \quad \forall i \neq j.$$

Nun ist $\alpha_j \neq 0$ und daher $\gamma_j = 0$, was impliziert, dass ebenfalls $\gamma_i = 0$ fuer alle $i \neq j$. □

Beispiele 3.3.18.

- (1) Wir wissen aus Beispiel 3.3.14 (1), dass e_1, e_2, e_3 eine Basis von \mathbb{R}^3 ist. Indem wir Lemma 3.3.17 mehrfach anwenden, sehen wir, dass $e_1 + e_2, e_2 + e_3, e_3 + e_1$ ebenfalls eine Basis ist.
- (2) Wir verstehen jetzt, warum sowohl $\mathcal{F}_{1,\varphi}, \mathcal{F}_{1,\psi}$ als auch $\mathcal{F}_{1,0}, \mathcal{F}_{0,1}$ Basen des Raumes aller Fibonacci Folgen sind: von Satz 1.1.9 wissen wir, dass

$$\mathcal{F}_{1,\varphi} = \mathcal{F}_{1,0} + \varphi \mathcal{F}_{0,1} \quad \text{und} \quad \mathcal{F}_{1,\psi} = \mathcal{F}_{1,0} + \psi \mathcal{F}_{0,1}.$$

Daher folgt aus dem Austauschlemma, dass $\mathcal{F}_{1,\varphi}, \mathcal{F}_{1,\psi}$ ebenfalls eine Basis ist.

- (3) Es sei V ein endlich-dimensionaler \mathbb{R} -Vektorraum, der nicht der Null-Vektorraum ist. Dann hat V unendlich viele verschiedene Basen.

Theorem 3.3.19. (*Austauschsatz*) *Es sei V ein endlich-dimensionaler Vektorraum, und es sei v_1, \dots, v_n eine Basis von V . Es seien w_1, \dots, w_k linear unabhängiger Vektoren in V . Dann gilt $k \leq n$, und es gibt $(n - k)$ Basisvektoren, die zusammen mit w_1, \dots, w_k eine Basis von V bilden.*

Proof. Wir beweisen den Satz ueber Induktion nach k .

$k = 1$: Das ist Lemma 3.3.17.

Wir nehmen nun an, dass der Satz fuer k gilt. Es seien w_1, \dots, w_{k+1} linear unabhängiger Vektoren in V . Dann sind auch w_1, \dots, w_k linear unabhängig, und es gilt $k < n$ und es gibt $(n - k)$ Basisvektoren, die zusammen mit w_1, \dots, w_k eine Basis von V bilden. (Beachten Sie, dass der Fall $k = n$ nicht eintreten kann: dann waeren w_1, \dots, w_k selber eine Basis, und w_1, \dots, w_{k+1} koennen nicht linear unabhängig sein.)

Dann koennen wir w_{k+1} als eine Linearkombination dieser Vektoren schreiben:

$$w_{k+1} = \alpha_1 w_1 + \dots + \alpha_k w_k + \alpha_{k+1} v_{k+1} + \dots + \alpha_n v_n$$

mit $\alpha_i \in K$ nicht alle null. Da w_1, \dots, w_{k+1} linear unabhängig sind, ist w_{k+1} nicht in dem von w_1, \dots, w_k erzeugten Unterraum enthalten. Es gibt also einen Index $j, k + 1 \leq j \leq n$, so dass $\alpha_j \neq 0$. Dann koennen wir nach Lemma 3.3.17 den Vektor v_j gegen den Vektor w_{k+1} austauschen und erhalten eine Basis

$$w_1, \dots, w_k, v_{k+1}, \dots, v_{j-1}, w_{k+1}, v_{j+1}, \dots, v_n.$$

□

Korollar 3.3.20. *Es sei V ein endlich-dimensionaler Vektorraum, und es seien v_1, \dots, v_n und w_1, \dots, w_m Basen von V . Dann gilt $m = n$. Mit anderen Worten, alle Basen von V haben die gleiche Anzahl von Elementen.*

Wir koennen nun endlich die Dimension eines Vektorraums definieren:

Definition 3.3.21. *Es sei V ein endlich-dimensionaler Vektorraum. Die Dimension von V ist die Anzahl von Elementen einer Basis von V ; wir schreiben $\dim_K V$. Wenn V nicht endlich-dimensional ist, dann schreiben wir $\dim_K V = \infty$.*

Beispiele 3.3.22.

- (1) \mathbb{R}^3 ist ein 3-dimensionaler \mathbb{R} -Vektorraum. Allgemeiner: \mathbb{R}^n ist ein n -dimensionaler \mathbb{R} -Vektorraum; die *Standardbasis* ist gegeben durch die Spaltenvektoren

$$e_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \quad e_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \dots, \quad e_n = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}.$$

- (2) Der Raum aller Fibonacci Folgen ist 2-dimensional.
- (3) Es sei K ein Koeerper und $V = K[x]^{\leq n}$. Dann ist $\dim_K V = n + 1$.
- (4) \mathbb{C} ist ein 1-dimensionaler \mathbb{C} -Vektorraum (was ist eine Basis?), aber ein 2-dimensionaler \mathbb{R} Vektorraum (mit Basis $1, i$).¹¹

¹¹Man kann zeigen, dass \mathbb{R} ein unendlich-dimensionaler \mathbb{Q} -Vektorraum ist. Diese haengt eng mit der sogenannten *Kontinuumshypothese* zisammen.

- (5) Es gilt $\dim_K \{0\} = 0$, da \emptyset eine Basis von $\{0\}$ ist und $|\emptyset| = 0$. Der Null-Vektorraum ist der einzige Vektorraum der Dimension 0.
 (6) Es sei

$$U = \left\{ \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3 : x + y + z = 0 \right\}.$$

Dann ist U ein zwei-dimensionaler Unterraum von \mathbb{R}^3 , mit Basis $\left\{ \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$.

Theorem 3.3.19 hat ein paar schoene und interessante Konsequenzen:

Satz 3.3.23. *Es sei V ein endlich-dimensionaler K -Vektorraum mit Dimension n . Es seien $v_1, \dots, v_n \in V$. Dann sind folgende Aussagen aequivalent:*

- (i) v_1, \dots, v_n sind linear unabhaengig;
- (ii) v_1, \dots, v_n sind ein Erzeugendensystem von V ;
- (iii) v_1, \dots, v_n sind eine Basis von V .

Proof. (iii) \Rightarrow (i),(ii) ist klar von der Definition.

(i) \Rightarrow (iii): Aufgrund von Theorem 3.3.19 koennen wir $\{v_1, \dots, v_n\}$ zu einer Basis von V erweitern. Aber jede Basis von V hat n Elemente, daher ist $\{v_1, \dots, v_n\}$ selber eine Basis.

(ii) \Rightarrow (iii): Aus Theorem 3.3.15 folgt, dass $\{v_1, \dots, v_n\}$ eine Basis enthaelt. Aber jede Basis von V hat n Elemente, daher ist $\{v_1, \dots, v_n\}$ selber eine Basis. \square

Satz 3.3.24. *Es sei V ein n -dimensionaler Vektorraum, und es seien $v_1, \dots, v_k \in V$.*

- (i) Wenn $k < n$, dann sind v_1, \dots, v_k kein Erzeugendensystem fuer V .
- (ii) Wenn $k > n$, dann sind v_1, \dots, v_k linear abhaengig.

Proof. (i) Nimm an, dass v_1, \dots, v_k ein Erzeugendensystem fuer V ist. Dann enthaelt es eine Basis (Theorem 3.3.15). Da aber jede Basis n Elemente enthaelt, erhalten wir einen Widerspruch.

(ii) Nimm an, dass v_1, \dots, v_k linear unabhaengig sind. Dann koennen wir $\{v_1, \dots, v_k\}$ zu einer Basis von V erweitern (Theorem 3.3.19). Aber jede Basis enthaelt n Elemente, was wiederum einen Widerspruch ergibt. \square

Beispiele 3.3.25.

- (1) Zurueck zum Beispiel 3.3.9 (3): es folgt direkt von Satz 3.3.24, dass alle $n + 1$ Vektoren in \mathbb{R}^n linear abhaengig sind.
- (2) Es sei V der Vektorraum aller reellen Folgen. Wir koennen jetzt beweisen, dass V nicht endlich-dimensional ist: fuer $n \geq 1$ sei \mathcal{F}_n die Folge, deren n ter Wert eine 1 ist und alle anderen Werte null sind. Dann ist die unendliche Menge $\{\mathcal{F}_n : n \geq 1\}$ linear unabhaengig. Es folgt aus Proposition 3.3.24 (ii), dass V nicht endlich-dimensional sein kann.

3.4. Basen von Unterraemen.

Beachte 3.4.1. *Es sei V ein Vektorraum und U ein Unterraum von V , und es seien $u_1, \dots, u_n \in U$. Wenn u_1, \dots, u_n linear unabhaengig sind als Elemente von U , dann sind sie ebenfalls linear unabhaengig als Elemente von V .*

Satz 3.4.2. *Es sei V ein endlich-dimensionaler K -Vektorraum, und es sei U ein Unterraum von V . Dann ist U endlich-dimensional, und*

$$\dim_K U \leq \dim_K V,$$

mit Gleichheit dann und nur dann, wenn $U = V$.

Proof. Es sei $n = \dim_K V$. Wenn $U = \{0\}$, dann ist $\dim_K U = 0$ (Beispiel 3.3.22 (4)), und die Aussage folgt.

Nimm also an, dass $U \neq \{0\}$. Sei $u_1 \in U$, $u_1 \neq 0_V$. Dann gibt es zwei Moeglichkeiten: entweder ist $U = \langle u_1 \rangle$: in diesem Fall ist u_1 eine Basis fuer U , d.h. $\dim_K U = 1$, und die Aussage folgt. Oder $\langle u_1 \rangle \subsetneq U$: dann waehle $u_2 \in U - \langle u_1 \rangle$. Es folgt von Satz 3.3.12, dass u_1, u_2 linear unabhaengig sind.

Dann gibt es wieder zwei Moeglichkeiten: entweder ist $U = \langle u_1, u_2 \rangle$; in diesem Fall sind u_1, u_2 einen Basis von U . Oder $\langle u_1, u_2 \rangle \subsetneq U$; in diesem Fall waehlen wir ein $u_3 \in U - \langle u_1, u_2 \rangle$ usw.

Aufgrund von Satz 3.3.24 muss dieser Prozess nach hoeschstens n Schritten enden. Wir erhalten also eine Liste u_1, \dots, u_k fuer $k \leq n$ von linear unabhaengigen Vektoren so dass $U = \langle u_1, \dots, u_k \rangle$. Es folgt von der Definition, dass u_1, \dots, u_k eine Basis von U sind. Daher gilt

$$\dim_K U = k \leq n = \dim_K V.$$

Wenn $U = V$, dann gilt natuerlich $k = n$. Nimm umgekehrt an, dass $k = n$. Die Vektoren u_1, \dots, u_k sind eine Basis fuer U und daher linear unabhaengig; sie sind ebenfalls linear unabhaengig als Elemente von V (Note 3.4.1). Dann folgt von Satz 3.3.23, dass sie eine Basis von V sind, und daher $U = V$. \square

Wir haben in Theorem 3.2.9 gesehen, dass sich aus zwei Unterraumen U, W von V die Unterraume $U \cap W$ und $U + W$ bilden lassen. Was koennen wir ueber deren Dimensionen sagen? Die naive Vermutung, dass $\dim(U + W) = \dim U + \dim W$ gilt, ist (im allgemeinen) falsch: wenn beispielsweise $U = W \subseteq V$ und $U \neq \{0\}$, dann gilt

$$\dim(U + W) = \dim U < 2 \dim U.$$

Sehen wir uns ein weiteres Beispiel an, um die Phaenomene, die auftreten koennen, besser zu verstehen:

Beispiel 3.4.3. Betrachte den Vektorraum \mathbb{R}^4 mit der Standardbasis e_1, e_2, e_3, e_4 .

- Es seien $U = \langle e_1, e_2 \rangle$ und $W = \langle e_3 \rangle$. Dann ist

$$U + W = \langle e_1, e_2, e_3 \rangle,$$

die Vektoren e_1, e_2, e_3 sind linear unabhaengig, und daher gilt

$$\dim(U + W) = 3 = 2 + 1 = \dim U + \dim W.$$

- Es seien nun

$$U' = \langle e_2, e_3 \rangle \quad \text{und} \quad W' = \langle e_2 + e_3, e_4 \rangle.$$

Insbesondere gilt $\dim U' = \dim W' = 2$. Per Definition gilt

$$U' + W' = \langle e_2, e_3, e_2 + e_3, e_4 \rangle.$$

Nun sind die Vektoren $e_1, e_2, e_3, e_2 + e_3, e_4$ offensichtlich nicht linear unabhaengig: $e_2 + e_3 \in \langle e_2, e_3, e_4 \rangle$, d.h.

$$U' + W' = \langle e_2, e_3, e_4 \rangle,$$

und wir wissen, dass die Vektoren e_2, e_3, e_4 linear unabhaengig sind. Daher ist $U' + W'$ 3-dimensional. Was ist passiert?

Der Grund, warum $\dim(U' + W') < \dim U' + \dim W'$, ist der, dass die Schnittmenge von U' und W' nicht der Null-Vektorraum ist: der Vektor $e_2 + e_3$ ist sowohl in U' als auch in W' enthalten, und er ist einen Basis fuer $U' \cap W'$ (Uebung), d.h. $\dim U' \cap W' = 1$. Haben Sie eine Vermutung, wie die allgemeine Formel fuer $\dim(U' + W')$ lautet?

Theorem 3.4.4. *Es sei V ein endlich-dimensionaler Vektorraum, und es seien U, W Unterraume von V . Dann gilt*

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

Proof. Es seien $\dim_K U = \ell$, $\dim_K W = m$ und $\dim_K(U \cap W) = k$. Waehle eine Basis v_1, \dots, v_k von $U \cap W$. Ausgrund von Theorem 3.3.19 koennen wir diese Basis zu Basen

$$v_1, \dots, v_k, u_1, \dots, u_{\ell-k}, \quad \text{bzw.} \quad v_1, \dots, v_k, w_1, \dots, w_{m-k}$$

von U , bzw. von W erweitern. Wir behaupten nun, dass

$$v_1, \dots, v_k, u_1, \dots, u_{\ell-k}, w_1, \dots, w_{m-k}$$

eine Basis ist von $U + W$.

Da $U + W = \{u + w : u \in U, w \in W\}$ ist klar, dass

$$U + W = \langle v_1, \dots, v_k, u_1, \dots, u_{\ell-k}, w_1, \dots, w_{m-k} \rangle.$$

Wir zeigen die lineare Unabhaengigkeit. Nimm an, dass

$$\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_k v_k + \beta_1 u_1 + \dots + \beta_{\ell-k} u_{\ell-k} + \gamma_1 w_1 + \dots + \gamma_{m-k} w_{m-k} = 0_V.$$

Dann folgt, dass

$$\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_k v_k + \beta_1 u_1 + \dots + \beta_{\ell-k} u_{\ell-k} = -(\gamma_1 w_1 + \dots + \gamma_{m-k} w_{m-k}).$$

Beachte nun, dass die linke Seite dieser Gleichung in U ist, die rechte aber in W . Schreibe $x = \alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_k v_k + \beta_1 u_1 + \dots + \beta_{\ell-k} u_{\ell-k}$. Dann gilt $x \in U \cap W$. Da v_1, \dots, v_k eine Basis ist fuer $U \cap W$, gibt es $\delta_1, \dots, \delta_k \in K$, so dass

$$x = \delta_1 v_1 + \dots + \delta_k v_k.$$

Aber ebenfalls gilt $x = -(\gamma_1 w_1 + \dots + \gamma_{m-k} w_{m-k})$, so dass

$$\delta_1 v_1 + \dots + \delta_k v_k + \gamma_1 w_1 + \dots + \gamma_{m-k} w_{m-k} = 0_V.$$

Da $v_1, \dots, v_k, w_1, \dots, w_{m-k}$ eine Basis von W ist, folgt daraus, dass

$$\delta_1 = \dots = \delta_k = \gamma_1 = \dots = \gamma_{m-k} = 0.$$

Daher gilt

$$\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_k v_k + \beta_1 u_1 + \dots + \beta_{\ell-k} u_{\ell-k} = 0_V.$$

Nun ist aber $v_1, \dots, v_k, u_1, \dots, u_{\ell-k}$ eine Basis von U , daher folgt

$$\alpha_1 = \dots = \alpha_k = \beta_1 = \dots = \beta_{\ell-k} = 0.$$

□

Warnung 3.4.5. Es ist *nicht wahr*, dass fuer drei Unterraume U, W, X von V folgende Formel gilt:¹²

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

Finden Sie ein Gegenbeispiel, indem Sie geeignete Unterraume von \mathbb{R}^2 betrachten. Hier ist ein Gegenbeispiel: es sei $V = \mathbb{R}^2$, und wir betrachten die drei ein-dimensionalen Unterraume

$$(14) \quad U = \langle e_1 \rangle, \quad W = \langle e_2 \rangle, \quad X = \langle e_1 + e_2 \rangle.$$

Dann ist $U + W + X = \mathbb{R}^2$, und

$$U \cap W = W \cap X = X \cap U = U \cap W \cap X = \{0\},$$

d.h. in (14) erhalten wir $2 = 3!$ ¹³

Korollar 3.4.6. Es sei V ein endlich-dimensionaler Vektorraum, und es seien U, W Unterraume von V . Dann sind folgende Aussagen aquivalent:

- (i) $\dim(U + W) = \dim U + \dim W$;
- (ii) $\dim(U \cap W) = 0$;
- (iii) $U \cap W = \{0_V\}$.
- (iv) fuer jedes $v \in U + W$ gibt es genau ein $u \in U$ und $w \in W$ so dass $v = u + w$;
- (v) die Gleichung $u + w = 0_V$ mit $u \in U$ und $w \in W$ hat $u = w = 0_V$ als einzige Loesung.

Proof. (i) \Leftrightarrow (ii): folgt direkt von Theorem 3.4.4.

(ii) \Leftrightarrow (iii): klar, da es genau einen Vektorraum der Dimension null gibt.

(iii) \Rightarrow (iv) Es sei $v \in V$, und nimm an, dass es $u, u' \in U$ und $w, w' \in W$ gibt, so dass

$$v = u + w = u' + w'.$$

Dann gilt $u - u' = w' - w$. Nun ist $u - u' \in U$ und $w' - w \in W$, d.h.

$$u - u', w' - w \in U \cap W.$$

Da $U \cap W = \{0_V\}$, folgt dass $u = u'$ und $w = w'$.

(iv) \Rightarrow (v): die Gleichung $u + w = 0_V$ hat die Loesung $u = w = 0_V$, und da U, W Unterraume sind, elthalten beide das Element 0_V . Indemn wir nun (iv) auf $v = 0_V$ anwenden, sehen wir, dass dieses die einzige Loesung ist.

(v) \Rightarrow (iii): nimm an, dass (iii) nicht wahr, ist, d.h. es gibt einen Vektor $v \in U \cap W$, der nicht der Nullvektor ist. Dann gilt

$$0_V = v + (-v),$$

und $v \in U$ und $-v \in W$, was einen Widerspruch zu (v) ist. □

Definition 3.4.7. Es sei V ein K -Vektorraum und $U \leq V$. Ein Unterraum $W \leq V$ ist ein Komplement von U wenn $V = U + W$ und $U \cap W = \{0\}$.

¹²Selbst viele professionelle Mathematiker wissen das nicht!

¹³Das Problem ist, dass im allgemeinen

$$(U + W) \cap X \neq U \cap X + W \cap X.$$

Satz 3.4.8. *Es sei $U \leq V$. Dann gibt es einen Unterraum $W \leq V$, der ein Komplement zu U ist.*

Proof. Es sei u_1, \dots, u_ℓ eine Basis von U . Aufgrund von Theorem 3.3.19 wissen wir, dass wir diese Basis von U zu einer Basis von V erweitern koennen: es gibt Vektoren $w_1, \dots, w_m \in V$, so dass $u_1, \dots, u_\ell, w_1, \dots, w_m$ eine Basis von V ist. Es sei $W = \langle w_1, \dots, w_m \rangle$. Dann ist W ein Komplement von U : da $u_1, \dots, u_\ell, w_1, \dots, w_m$ eine Basis von V ist, gilt $V = U + W$. Nimm nun an, dass $v \in U \cap W$. Dann gibt es Skalare $\alpha_1, \dots, \alpha_\ell$ und $\lambda_1, \dots, \lambda_m$ so dass

$$\begin{aligned} v &= \sum_{i=1}^{\ell} \alpha_i u_i = \sum_{j=1}^m \lambda_j w_j \\ \Rightarrow \quad &\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_\ell v_\ell - (\lambda_1 w_1 + \dots + \lambda_m w_m) = 0_V \\ \Rightarrow \quad &\alpha_1 = \dots = \alpha_\ell = \lambda_1 = \dots = \lambda_m = 0, \end{aligned}$$

da die Vektoren $u_1, \dots, u_\ell, w_1, \dots, w_m$ linear unabhängig sind. □

Beispiel 3.4.9. Es sei $V = \mathbb{R}^2$ und $U = \langle e_1 \rangle$. Es sei $w \in V$ ein Vektor, so dass u, w linear unabhängig sind (d.h. w ist kein Vielfaches von e_1). Dann ist $W = \langle w \rangle$ ein Komplement von U .

Bemerkung 3.4.10. *Das Komplement eines Unterraumes ist im allgemeinen nicht eindeutig bestimmt.*

3.5. Zusammenfassung der Rechenmethoden. Wir haben in den vorherigen Abschnitten gesehen, dass wir lineare Gleichungssysteme fuer die Analyse von Vektorraeumen benutzen koennen. Hier ist eine Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse: es sei $V = K^m$ und $v_1, \dots, v_n \in V$.

- (1) Gegeben sei $w \in V$. Ist $w \in \langle v_1, \dots, v_n \rangle$?
Antwort: $w \in \langle v_1, \dots, v_n \rangle$ ist äquivalent zu der Aussage: es gibt $\lambda_1, \dots, \lambda_n \in K$, so dass

$$(15) \quad w = \lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_n v_n.$$

Schreiben wir $w = \begin{pmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_m \end{pmatrix}$ und $v_j = \begin{pmatrix} a_{1j} \\ \vdots \\ a_{mj} \end{pmatrix}$ fuer $1 \leq j \leq n$, dann ist (15) äquivalent zu folgendem linearen Gleichungssystem:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_m \end{pmatrix},$$

das wir mit Hilfe der reduzierten Zeilenspaltenform loesen koennen.

- (2) Koennen wir bestimmen, welche Vektoren in $\langle v_1, \dots, v_n \rangle$ enthalten sind?

Antwort: es sei $b = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix}$ ein beliebiger Vektor in V . Dann betrachten wir das lineare Gleichungssystem

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix}$$

und bestimmen, fuer welche Vektoren b eine Loesung existiert.

- (3) Koennen wir bestimmen, ob v_1, \dots, v_n linear unabhängig sind?

Antwort: v_1, \dots, v_n sind genau dann linear unabhängig, wenn das lineare Gleichungssystem

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

nur die triviale Loesung $\begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$ besitzt.

3.6. Zeilen und Spaltenraeume.

Bemerkung 3.6.1. Wir koennen ein Element von K^n entweder als Zeilen- oder Spaltenvektor mit n Werten schreiben.

Definition 3.6.2. Es seien $m, n \geq 1$ und $A \in M_{m \times n}(K)$. Es seien $u_1, \dots, u_m \in K^n$ die Zeilen von A und $v_1, \dots, v_n \in K^m$ die Spalten von A . Wir definieren

$$\begin{aligned}\text{Zeilen}(A) &= \langle u_1, \dots, u_m \rangle \leq K^n, \\ \text{Spalten}(A) &= \langle v_1, \dots, v_n \rangle \leq K^m.\end{aligned}$$

Was koennen wir ueber die Dimensionen dieser Unterraume sagen?

Definition 3.6.3. Wir definieren

$$\begin{aligned}\text{Zeilenrang}(A) &= \dim_K \text{Zeilen}(A), \\ \text{Spaltenrang}(A) &= \dim_K \text{Spalten}(A).\end{aligned}$$

Beispiele 3.6.4.

(1) Fuer $A = \begin{pmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -1 & 2 & -1 \end{pmatrix}$ gilt
 $\text{Zeilenrang}(A) = 1 = \text{Spaltenrang}(A).$

(2) Fuer die Matrix $B = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$ gilt
 $\text{Zeilenrang}(B) = 2 = \text{Spaltenrang}(B).$

(3) Fuer die Matrix $C = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 2 & -2 \\ 0 & -1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 3 & 0 \end{pmatrix}$ gilt
 $\text{Zeilenrang}(C) = 3 = \text{Spaltenrang}(C).$

(4) Fuer die Matrix $D = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 0 & -1 & 2 \\ 0 & 2 & -4 \end{pmatrix}$ gilt
 $\text{Zeilenrang}(D) = 2 = \text{Spaltenrang}(D).$

Was faellt ihnen auf?

Hier ist das erste wirklich ueberraschende Resultat in diesem Kurs:¹⁴

Theorem 3.6.5. Es seien $m, n \geq 1$ und $A \in M_{m \times n}(K)$. Dann gilt

$$\text{Zeilenrang}(A) = \text{Spaltenrang}(A).$$

Fuer Matrizen in reduzierter Zeilenspaltenform ist dieses Resultat offensichtlich.

Lemma 3.6.6. Theorem 3.6.5 gilt, wenn A in reduzierter Zeilenspaltenform ist.

Proof. Aufgrund der Definition hat A folgende Form: [picture]

Es seien $j_1 < \dots < j_r$ die Nummern derjenigen Spalten, die eine fuehrende Eins enthalten.

Es seien u_1, \dots, u_r die Zeilen, die einen von Null verschiedenen Eintrag enthalten. Dann enthaelt jede dieser Zeilen eine fuehrende 1, und die Zeilen sind linear unabhängig, weil $\forall 1 \leq k \leq r$ der erste von null verschiedene Eintrag von u_k die fuehrende 1 an der Stelle j_k ist, und $j_1 < \dots < j_r$. Mit anderen Worten,

$$\text{Zeilenrang}(A) = r.$$

Was gilt fuer den Spaltenrang? Die Spaltenvektoren v_{j_1}, \dots, v_{j_r} sind ein Erzeugendensystem von $\text{Spalten}(A)$; tatsaechlich sind sie die ersten r Standardvektoren e_1, \dots, e_r der Standardbasis e_1, \dots, e_m von K^m . Sie sind linear unabhängig und daher eine Basis von $\text{Spalten}(A)$, d.h.

$$\text{Spaltenrang}(A) = r.$$

□

Der Beweis fuer eine beliebige Matrix A ist ziemlich kompliziert. Um die Aussage elegant beweisen zu koennen, brauchen wir die Theorie von linearen Abbildungen.

¹⁴Ich gebe zu, dass ich es intuitiv immer noch nicht wirklich verstehe.

4. LINEARE ABBILDUNGEN

4.1. Definition und Beispiele.

Definition 4.1.1. *Es seien V, W Vektorraeume ueber K . Eine Funktion $T : V \rightarrow W$ ist eine lineare Abbildung, wenn sie folgende Bedingungen erfuehlt:*

- (i) *es gilt $T(v_1 + v_2) = T(v_1) + T(v_2)$ fuer alle $v_1, v_2 \in V$;*
- (ii) *es gilt $T(\alpha v) = \alpha T(v)$ fuer all $v \in V, \alpha \in K$.*

Mit anderen Worten, T respektiert die Vektoraddition und Skalarmultiplikation.

Eine lineare Abbildung $T : V \rightarrow V$ ist ein Endomorphismus von V .

Bemerkung 4.1.2. *Wir schreiben manchmal Tv anstatt $T(v)$.*

Beispiele 4.1.3.

- (1) Es sei V ein Vektorraum. Die Identitaetsabbildung $\text{id}_V : V \rightarrow V, v \mapsto v$ ist linear.
- (2) Es seien V, W Vektorraeume. Die Null-Abbildung $V \rightarrow W, v \mapsto 0_W$ ist linear.
- (3) Es sei $K[x]^{\leq n}$ der Vektorraum aller Polynome vom Grad $\leq n$. The Ableitungsabbildung

$$D : K[x]^{\leq n} \rightarrow K[x]^{\leq n}, \quad a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n \mapsto a_1 + 2a_2x + \dots + na_nx^{n-1}$$

ist linear.

- (4) Es sei V der Vektorraum aller Fibonacci Folgen. Dann ist die Verschiebungsabbildung (c.f. Proposition 1.1.15) linear.
- (5) Es sei $n \geq 1$ und $V = M_{n \times n}(K)$. Definiere die Spur-Abbildung

$$\text{Tr} : V \rightarrow K, \quad A = (a_{ij})_{1 \leq i, j \leq n} \mapsto a_{11} + \dots + a_{nn}.$$

Dann ist Tr linear.

Das folgende Beispiel zeigt, dass Matrizen eine wichtige Quelle von linearen Abbildungen sind.

Definition 4.1.4. *Es seien $m, n \geq 1$ und $A \in M_{m \times n}(K)$. Definiere die Abbildung*

$$T_A : K^n \rightarrow K^m, \quad \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}.$$

Lemma 4.1.5. *Die Abbildung T_A ist linear.*

Proof. Uebung. □

Bemerkung 4.1.6. *Eine Abbildung $T : V \rightarrow W$ ist genau dann linear, wenn*

$$T(\alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2) = \alpha_1 T(v_1) + \alpha_2 T(v_2)$$

fuer alle $v_1, v_2 \in V$ und $\alpha_1, \alpha_2 \in K$.

Satz 4.1.7. *Es seien V, W Vektorraeume ueber K und $T : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung.*

- (i) *Es seien $v_1, \dots, v_n \in V$ und $\alpha_1, \dots, \alpha_n \in K$. Dann gilt*

$$T(\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n) = \alpha_1 T(v_1) + \dots + \alpha_n T(v_n).$$

- (ii) *Es gilt $T(0_V) = 0_W$.*

Proof. (i) ist klar.

- (ii) Es gilt

$$T(0_V) = T(0 \cdot 0_V) = 0 \cdot T(0_V) = 0_W,$$

wobei die letzte Gleichung von Satz 3.1.6 (2) folgt. □

Korollar 4.1.8. *Es seien V, W Vektorraeume ueber K , V endlich-dimensional, und es sei v_1, \dots, v_n eine Basis von V . Es sei $T : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung. Dann ist T durch $T(v_1), \dots, T(v_n)$ eindeutig bestimmt.¹⁵*

¹⁵Mit anderen Worten, wenn wir $T(v_1), \dots, T(v_n)$ kennen, dann kennen wir auch $T(v)$ fuer alle $v \in V$.

Proof. Es sei $v \in V$. Da v_1, \dots, v_n eine Basis ist, schreiben wir v als Linearkombination $v = \sum_{i=1}^n \alpha_i v_i$. Dann gilt aufgrund von Satz 4.1.7 (i)

$$T(v) = \sum_{i=1}^n \alpha_i T(v_i),$$

was zu beweisen war. □

Tatsächlich koennen wir auf diese Weise lineare Abbildungen konstruieren:

Theorem 4.1.9. *Es seien V, W Vektorraeume ueber K , V endlich-dimensional, mit Basis v_1, \dots, v_n . Es seien $w_1, \dots, w_n \in W$. Dann gibt es genau eine lineare Abbildung $T : V \rightarrow W$ so dass*

$$T(v_i) = w_i \quad \forall 1 \leq i \leq n.$$

Proof. Wir definieren die Abbildung T wie folgt: es sei $v \in V$. Da v_1, \dots, v_n eine Basis ist, koennen wir v eindeutig als Linearkombination $v = \sum_{i=1}^n \alpha_i v_i$ schreiben. Wir definieren

$$T(v) = \sum_{i=1}^n \alpha_i w_i.$$

Dann ist T wohl-definiert, da die Linearkombination eindeutig ist, und bei Definition gilt $T(v_i) = w_i$.

Ueberpruefen wir, dass T linear ist:

- Wenn $v, v' \in V$, schreiben wir

$$v = \sum_{i=1}^n \alpha_i v_i \quad \text{und} \quad v' = \sum_{i=1}^n \beta_i v_i.$$

Dann gilt

$$\begin{aligned} T(v + v') &= T\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i v_i + \sum_{i=1}^n \beta_i v_i\right) \\ &= T\left(\sum_{i=1}^n (\alpha_i + \beta_i) v_i\right) \\ &= \sum_{i=1}^n (\alpha_i + \beta_i) w_i \\ &= \sum_{i=1}^n \alpha_i w_i + \sum_{i=1}^n \beta_i w_i \\ &= T(v) + T(v'). \end{aligned}$$

- Wenn $v = \sum_{i=1}^n \alpha_i v_i \in V$ und $\beta \in K$, dann gilt

$$\begin{aligned} T(\beta v) &= T\left(\beta \sum_{i=1}^n \alpha_i v_i\right) \\ &= \sum_{i=1}^n \beta \alpha_i w_i \\ &= \beta \sum_{i=1}^n \alpha_i w_i \\ &= \beta T\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i v_i\right) \\ &= \beta T(v). \end{aligned}$$

Die Eindeutigkeit von T folgt von Korollar 4.1.8. □

Noch eine weitere Eigenschaft von linearen Abbildungen ist wichtig: lineare Abbildungen lassen sich verknuepfen.

Lemma 4.1.10. *Es seien $T : V \rightarrow U$ und $S : U \rightarrow W$ lineare Abbildungen. Dann ist die Abbildung*

$$S \circ T : V \rightarrow W$$

ebenfalls linear.

Proof. Es seien $v_1, v_2 \in V$ und $\alpha_1, \alpha_2 \in K$. Dann gilt

$$\begin{aligned} S \circ T(\alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2) &= S(T(\alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2)) \\ &= S(\alpha_1 T(v_1) + \alpha_2 T(v_2)) \\ &= \alpha_1 S T(v_1) + \alpha_2 S T(v_2) \\ &= \alpha_1 S \circ T(v_1) + \alpha_2 S \circ T(v_2). \end{aligned}$$

□

4.2. Kernel and Image.

Definition 4.2.1. *Es seien V, W Vektorraeume ueber K , und es sei $T : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung.*

(1) *Der Kern von T ist*

$$\ker(T) = \{v \in V : T(v) = 0_W\} \subseteq V.$$

(2) *Das Bild von T is*

$$\operatorname{im}(T) = \{T(v) : v \in V\} \subseteq W.$$

Beispiele 4.2.2.

(1) Es sei $A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 2 & 1 \end{pmatrix}$, und es sei $T_A : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ die dazugehoerige lineare Abbildung

(Definition 4.1.4). Was ist $\ker(T_A)$? Per Definition ist

$$\ker(T_A) = \left\{ x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} : Ax = 0_{\mathbb{R}^3} \right\},$$

d.h. $\ker(T_A)$ ist die Loesung eines linearen Gleichungssystems. Wir haben die Loesung dieses Gleichungssystems bereits in Beispiel 3.3.5 bestimmt: die Loesung ist

$$\ker(T_A) = \left\langle \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix} \right\rangle.$$

Was ist $\operatorname{im}(T_A)$? Laut Definition ist

$$\operatorname{im}(T_A) = \left\{ b = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} : \exists x \in \mathbb{R}^3 \text{ so dass } Ax = b \right\}.$$

Auch dieses haben wir in Beispiel 3.3.5 bereits bestimmt: $b \in \operatorname{im}(T_A)$ genau dann, wenn $b_3 = 2b_2 + b_1$, mit anderen Worten

$$\operatorname{im}(T_A) = \left\langle \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix} \right\rangle.$$

(2) Es sei nun $B = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 0 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}$, und es sei $T_B : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3$ die dazugehoerige lineare Abbildung. Eine einfache Rechnung zeigt, dass

$$\ker(T_B) = \{0_{\mathbb{R}^2}\}.$$

Lemma 4.2.3.

(1) $\ker(T)$ ist ein Unterraum von V .

(2) $\operatorname{im}(T)$ ist ein Unterraum von W .

Proof. Wir benutzen Satz 3.2.2.

(1) Es folgt von Satz 4.1.7, dass $T(0_V) = 0_W$, d.h. $0_V \in \ker(T)$. Es seien nun $u, v \in \ker(T)$ und $\lambda \in K$. Da T linear ist, gilt

$$T(u + \lambda v) = T(u) + \lambda T(v) = 0_W + \lambda 0_W = 0_W,$$

d.h. $u + \lambda v \in \ker(T)$.

(2) Da $T(0_V) = 0_W$, sehen wir, dass $0_W \in \text{im}(T)$. Es seien nun $w_1, w_2 \in \text{im}(T)$; dann gibt es $v_1, v_2 \in V$, so dass $T(v_i) = w_i$ fuer $i = 1, 2$. Es sei nun $\lambda \in K$. Dann gilt

$$w_1 + \lambda w_2 = T(v_1) + \lambda T(v_2) = T(v_1) + T(\lambda v_2) = T(v_1 + \lambda v_2),$$

d.h. $w_1 + \lambda w_2 \in \text{im}(T)$. □

Beispiel 4.2.4. Es sei $A \in M_{m \times n}(K)$, und wir betrachten das homogene lineare Gleichungssystem

$$S : Ax = 0_{K^m}.$$

Dann ist $L(S) = \ker(T_A)$ ein Unterraum von K^n .

Satz 4.2.5. *Es sei $T : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung. Wenn V endlich-dimensional ist, dann sind auch $\ker(T)$ und $\text{im}(T)$ endlich-dimensional.*¹⁶

Proof. Die Aussage fuer $\ker(T)$ folgt von Satz 3.4.2.

Um die Aussage fuer $\text{im}(T)$ zu beweisen, benutzen wir Korollar 4.1.8: es sei v_1, \dots, v_n eine Basis von V . Dann folgt aus dem Korollar, dass $T(v_1), \dots, T(v_n)$ ein Erzeugendensystem von $\text{im}(T)$ ist. Daher ist $\text{im}(T)$ endlich-dimensional. □

Der Kern von T zeigt an, ob T eine injektive Abbildung ist:

Satz 4.2.6. *Es sei $T : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung zwischen Vektorraeumen. Dann ist T genau dann injektiv, wenn $\ker(T) = \{0_V\}$.*

Proof. \Rightarrow : klar von der Definition.

\Leftarrow : nimm an, dass $T(v) = T(u)$ fuer $u, v \in V$. Dann gilt

$$T(u) - T(v) = 0_W \quad \Leftrightarrow \quad T(u - v) = 0_W,$$

d.h. $u - v \in \ker(T)$. Wenn $\ker(T) = \{0_V\}$, dann folgt daraus, dass $u = v$, mit anderen Worten T ist injektiv. □

Beispiel 4.2.7. Die Abbildung T_B aus Beispiel 4.2.2 (2) ist injektiv; die Abbildung T_A aus dem gleichen Beispiel (1) ist nicht injektiv.

Definition 4.2.8. *Es sei $T : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung mit V endlich-dimensional. Der Rang $\text{rk}(T)$ von T ist $\dim_K \text{im}(T)$.*

Der folgende Satz bringt $\text{rk}(T)$ und die Dimension von $\ker(T)$ miteinander in Verbindung:

Theorem 4.2.9. *Es seien V, W endlich-dimensionale Vektorraeume ueber K , und es sei $T : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung. Dann gilt*

$$\dim_K V = \dim_K \ker(T) + \text{rk}(T).$$

Proof. Es sei u_1, \dots, u_n eine Basis fuer $\ker(T)$. Aufgrund von Theorem 3.3.19 koennen wir es zu einer Basis $u_1, \dots, u_n, v_1, \dots, v_r$ fuer V erweitern (d.h. $\dim_K V = n + r$). Behauptung: w_1, \dots, w_r ist eine Basis von $\text{im}(T)$.

Aufgrund von Korollar 4.1.8 ist T durch $T(u_1), \dots, T(u_n), T(v_1), \dots, T(v_r)$ eindeutig bestimmt. Da $T(u_i) = 0_W \forall 1 \leq i \leq n$, folgern wir, dass $T(v_1), \dots, T(v_r)$ ein Erzeugendensystem von $\text{im}(T)$ ist.

Fuer $1 \leq i \leq r$ sei $w_i = T(v_i)$. Wie ueberpruefen lineare Unabhaengigkeit: nimm an, dass

$$\alpha_1 w_1 + \dots + \alpha_r w_r = 0_V \quad \Leftrightarrow \quad T(\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_r v_r) = 0_V.$$

Dann ist $v = \alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_r v_r \in \ker(T)$, d.h. es gibt $\beta_1, \dots, \beta_n \in K$ so dass

$$\beta_1 u_1 + \dots + \beta_n u_n = v.$$

Wir erhalten die Gleichung

$$\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_r v_r - (\beta_1 u_1 + \dots + \beta_n u_n) = 0_V.$$

¹⁶Wie nehmen hier *nicht* an, dass W endlich-dimensional ist.

Da die Vektoren linear unabhängig sind, folgt, dass

$$\alpha_1 = \dots = \alpha_r = \beta_1 = \dots = \beta_n = 0.$$

Insbesondere sind w_1, \dots, w_r linear unabhängig. □

Korollar 4.2.10. *Es sei $T : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung zwischen endlich-dimensionalen Vektorraeumen. Dann gilt:*

- (1) *Wenn $\dim W < \dim V$, dann ist T nicht injektiv.*
- (2) *Wenn $\dim W > \dim V$, dann ist T nicht surjektiv.*
- (3) *Wenn $\dim W = \dim V$, dann sind folgende Aussagen aequivalent: T bijektiv $\Leftrightarrow T$ ist injektiv $\Leftrightarrow T$ ist surjektiv.*

Proof. (1) Da $\text{im}(T) \leq W$, gilt $\text{rk}(T) \leq \dim W$. Daraus folgt, dass

$$\dim \ker(T) = \dim V - \text{rk}(T) \geq \dim V - \dim W > 0$$

und T ist nicht injektiv (Satz 4.2.6).

(2) Aus Theorem 4.2.9 folgt, dass

$$\text{rk im}(T) = \dim V - \dim \ker(T) \leq \dim V < \dim W,$$

so dass T nicht surjektiv sein kann.

(3)

$$\begin{aligned} T \text{ ist injektiv} &\Leftrightarrow \ker(T) = \{0_V\} \\ &\Leftrightarrow \text{rk}(T) = \dim V \\ &\Leftrightarrow \text{rk}(T) = \dim W \\ &\Leftrightarrow \text{im}(T) = W \\ &\Leftrightarrow T \text{ ist surjektiv} \end{aligned}$$

□

Beispiele 4.2.11.

Lecture 13

(1) Es sei $A = \begin{pmatrix} 1 & -2 & 1 & 1 \\ 2 & 0 & 0 & 3 \\ -1 & -1 & 2 & 0 \end{pmatrix}$. Dann ist die lineare Abbildung T_A nicht injektiv. Is sie surjektiv?

(2) Es sei $B = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix}$. Dann ist T_B bijektiv: wir haben in Beispiel 2.3.3 gesehen, dass

B zeilen-aequivalent ist zu der Matrix $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$. Daher ist $0_{\mathbb{R}^3}$ die einzige Loesung des homogenen linearen Gleichungssystems $B \cdot x = 0_{\mathbb{R}^3}$, d.h. $\ker(T_B) = \{0_{\mathbb{R}^3}\}$.

Folgende Beobachtung ist eine einfache Folgerung von Theorem 4.2.9:

Korollar 4.2.12. *Es sei V ein endlich-dimensionaler Vektorraum und $T : V \rightarrow W$ eine injektive lineare Abbildung. Dann gilt fuer jeden Unterraum U von V*

$$\dim_K U = \dim_K T(U).$$

Definition 4.2.13. *Eine lineare Abbildung $T : V \rightarrow W$ ist ein Isomorphismus, wenn es eine lineare Abbildung $S : W \rightarrow V$ gibt, so dass*

$$S \circ T = \text{id}_V \quad \text{und} \quad T \circ S = \text{id}_W;$$

in diesem Fall schreiben wir $S = T^{-1}$.

Wir sagen, dass V und W isomorph sind, wenn es einen Isomorphismus $T : V \rightarrow W$ gibt; in diesem Fall schreiben wir $V \cong W$.

Bemerkung 4.2.14. *Es sei X die Menge aller Vektorraeume ueber K . Dann ist " \cong " eine Aequivalenzrelation auf X .*

Beispiel 4.2.15. Es sei $V = \mathbb{R}[x]^{\leq 2}$. Es sei e_1, e_2, e_3 die Standardbasis von \mathbb{R}^3 . Dann koennen wir dank Theorem 4.1.9 folgendermassen eine lineare Abbildung $V \rightarrow \mathbb{R}^3$ konstruieren: wir wissen, dass $1, x, x^2$ eine Basis von V ist. Dann gibt es genau eine lineare Abbildung $T : V \rightarrow \mathbb{R}^3$ fuer die gilt

$$T(1) = e_1, \quad T(x) = e_2, \quad T(x^2) = e_3.$$

Um zu zeigen, dass T ein Isomorphismus ist, konstruieren wir eine inverse lineare Abbildung: Definiere $S : \mathbb{R}^3 \rightarrow V$ durch

$$S : \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} \mapsto a + bx + cx^2.$$

Dann ist klar, dass $S \circ T = \text{id}_V$ und $T \circ S = \text{id}_{\mathbb{R}^3}$.

Beispiel 4.2.16. Es sei V der reelle Vektorraum aller Fibonacci-Folgen. Dann definiert die Abbildung $\mathcal{F}_{a,b} \mapsto \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$ einen Isomorphismus $V \cong \mathbb{R}^2$.

Bemerkung 4.2.17. Ein Isomorphismus $T : V \rightarrow V$ wird auch Automorphismus genannt.

Bemerkung 4.2.18. Wir koennen den Beweis von Theorem 4.2.9 folgendermassen interpretieren: es sei X ein Komplement von $\ker(T)$ in V . Dann induziert die Abbildung $T : V \rightarrow W$ einen Isomorphismus $T : X \cong \text{im}(T)$.

Frage. Ist jede lineare Bijektion $T : V \rightarrow W$ ein Isomorphismus?

Lemma 4.2.19. Es sei $T : V \rightarrow W$ eine bijektive lineare Abbildung. Dann ist die inverse Abbildung $T^{-1} : W \rightarrow V$ ebenfalls linear, d.h. jede bijektive lineare Abbildung ist automatisch ein Isomorphismus.

Proof. Es seien $w_1, w_2 \in W$ und $\alpha_1, \alpha_2 \in K$. Dank Bemerkung 4.1.6 muessen wir zeigen, dass

$$T^{-1}(\alpha_1 w_1 + \alpha_2 w_2) = \alpha_1 T^{-1}(w_1) + \alpha_2 T^{-1}(w_2).$$

Fuer $i = 1, 2$ sei $v_i = T^{-1}(w_i)$. Da T linear ist, gilt

$$T(\alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2) = \alpha_1 T(v_1) + \alpha_2 T(v_2) = \alpha_1 w_1 + \alpha_2 w_2.$$

Wenden wir T^{-1} auf diese Gleichung an, dann folgt, dass

$$T^{-1}(\alpha_1 w_1 + \alpha_2 w_2) = \alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2 = \alpha_1 T^{-1}(w_1) + \alpha_2 T^{-1}(w_2).$$

□

Beispiel 4.2.20. Um zu zeigen, dass die Abbildung T in Beispiel 4.2.15 ein Isomorphismus ist, reicht es daher zu zeigen, dass sie bijektiv ist. Nun zeigt eine einfache Rechnung, dass $\ker(T) = \{0_V\}$, daher ist T bijektiv aufgrund von Korollar 4.2.10 (3).

Beispiel 4.2.21. Die Abbildung T_B aus Beispiel 4.2.11 ist also ein Isomorphismus. Was ist die inverse lineare Abbildung?

Folgendes Theorem ist sehr wichtig: es klassifiziert alle n -dimensionalen K -Vektorraeume.

Theorem 4.2.22. Es seien V, W n -dimensionale K -Vektorraeume. Dann gilt $V \cong W$.

Proof. Waehle jeweilige Basen v_1, \dots, v_n und w_1, \dots, w_n von V und W . Aus Theorem 4.1.9 folgt, dass es eine lineare Abbildung $T : V \rightarrow W$ gibt, so dass $T(v_i) = w_i \forall 1 \leq i \leq n$. Dann ist T surjectiv: wenn $\alpha_1 w_1 + \dots + \alpha_n w_n \in W$, dann gilt

$$T(\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n) = \alpha_1 w_1 + \dots + \alpha_n w_n.$$

Es folgt von Korollar 4.2.10, dass T bijektiv ist und daher dank Lemma 18.1.4 ein Isomorphismus. □

Bemerkung 4.2.23. Insbesondere ist jeder n -dimensionale K -Vektorraum isomorph zu K^n .

4.3. Lineare Abbildungen als Matrizen.

Definition 4.3.1. Es sei $T : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung zwischen endlich-dimensionalen K -Vektorraeumen, und es sei $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$, bzw. $\mathcal{C} = (w_1, \dots, w_m)$ eine Basis von V , bzw. von W . Die Abbildungsmatrix von T bezueglich der Basen \mathcal{B} und \mathcal{C} ist die Matrix $[T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}} = (a_{ij}) \in M_{m \times n}(K)$, deren Eintraege definiert sind durch

$$T(v_j) = \sum_{i=1}^m a_{ij} w_i.$$

Beispiele 4.3.2. Es sei V ein endlich-dimensionaler K -Vektorraum mit Basis $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$.

- (1) Die Abbildungsmatrix der Null-Abbildung bezueglich jeder Basis ist die Nullmatrix.
- (2) Die Abbildungsmatrix der Identitaetsabbildung bezueglich der Basis \mathcal{B} ist die Einheitsmatrix: $[\text{id}]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = \mathbf{1}_n$.

Beispiel 4.3.3. Es seien nun $V = \mathbb{R}[x]^{\leq 3}$ und $W = \mathbb{R}[x]^{\leq 2}$, mit jeweiligen Standardbasen $\mathcal{E} = (1, x, x^2, x^3)$ und $\mathcal{E}' = (1, x, x^2)$. Wir betrachten die Ableitungsabbildung $D : V \rightarrow W$. Dann ist

$$[D]_{\mathcal{E}'}^{\mathcal{E}} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 \end{pmatrix}.$$

Beispiel 4.3.4. Es sei V der Vektorraum aller Fibonacci-Folgen und $S : V \rightarrow V$ die Verschiebungs-Abbildung. Es sei \mathcal{B} die Basis $(\mathcal{F}_{1,0}, \mathcal{F}_{0,1})$. Dann ist

$$[S]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Es sei nun \mathcal{C} die Basis $(\mathcal{F}_{1,\varphi}, \mathcal{F}_{1,\psi})$. In dieser Basis hat S eine besonders schoene Form: sie ist diagonal.

$$[S]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{C}} = \begin{pmatrix} \varphi & 0 \\ 0 & \psi \end{pmatrix}.$$

Wie haengen die beiden Matrizen zusammen? Wir werden diese Frage in Abschnitt 4.5 untersuchen.

Lecture 14

Bemerkung 4.3.5. Mit Hilfe der Abbildungsmatrix $[T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}}$ koennen wir sehr leicht berechnen, wohin ein Vektor $v \in V$ abgebildet wird. Schreibe v als Linearkombination der basis \mathcal{B} : $v = \beta_1 v_1 + \dots + \beta_n v_n$, und es sei

$$\begin{pmatrix} \gamma_1 \\ \vdots \\ \gamma_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_n \end{pmatrix}.$$

Dann ist

$$\begin{aligned} T(v) &= T(\beta_1 v_1 + \dots + \beta_n v_n), \\ &= \sum_{j=1}^n \beta_j T(v_j) \\ &= \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m a_{ij} \beta_j \cdot w_i \\ &= \sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} \beta_j \right) \cdot w_i \\ &= \gamma_1 w_1 + \dots + \gamma_m w_m \end{aligned}$$

Beispiel 4.3.6. Zurueck zu Beispiel 4.3.3. Was ist das Bild von einem beliebigen Element $v \in \mathbb{R}[x]^{\leq 3}$ unter der Abbildung D ? Schreibe v als Linearkombination der Basis \mathcal{E} : $v = a + bx + cx^2 + dx^3$. Dann gilt

$$D(v) = aD(1) + bD(x) + cD(x^2) + dD(x^3),$$

mit anderen Worten, wir berechnen

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b \\ 2c \\ 3d \end{pmatrix},$$

und diese sind genau die Koordinaten von $D(v)$ in der Basis \mathcal{E}' : $D(v) = b + 2cx + 3dx^2$.

Dank der Abbildungsmatrix koennen wir die Verknuepfung von linearen Abbildungen mit Hilfe von Matrizen darstellen:

Satz 4.3.7. *Es seien V , W und U drei endlich-dimensionale Vektorraeume ueber K mit jeweiligen Basen $\mathcal{A} = (v_1, \dots, v_n)$, $\mathcal{B} = (w_1, \dots, w_m)$ und $\mathcal{C} = (u_1, \dots, u_p)$. Es seien $T : V \rightarrow W$ und $S : W \rightarrow U$ lineare Abbildungen. Dann gilt*

$$[S \circ T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{A}} = [S]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}} \cdot [T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{A}},$$

wobei \cdot die Matrix-Multiplikation bezeichnet.

Proof. Schreibe

$$[T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{A}} = (a_{ij}) \in M_{m \times n}(K), \quad (b_{ij}) = [S]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}} \in M_{p \times m}(K), \quad (c_{ij}) = [S \circ T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{A}} \in M_{p \times n}(K).$$

Dann gilt aufgrund der Definition der Darstellungsmatrizen durch

$$(16) \quad T(v_j) = a_{1j}w_1 + \dots + a_{mj}w_m,$$

$$(17) \quad S(w_i) = b_{1i}u_1 + \dots + b_{pi}u_p,$$

$$(18) \quad (S \circ T)(v_j) = c_{1j}u_1 + \dots + c_{pj}u_p$$

gegeben. Aber $(S \circ T)(v_j)$ ist ebenfalls gegeben durch

$$\begin{aligned} (S \circ T)(v_j) &= S(T(v_j)) \\ &= S(a_{1j}w_1 + \dots + a_{mj}w_m) \\ &= a_{1j}S(w_1) + \dots + a_{mj}S(w_m) \\ &= \sum_{i=1}^m a_{ij}S(w_i) \\ &= \sum_{i=1}^m a_{ij} \sum_{k=1}^p b_{ki}u_k \\ &= \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^p a_{ij}b_{ki}u_k, \end{aligned}$$

das heisst $c_{kj} = \sum_{i=1}^m b_{ki}a_{ij}$, was genau der Wert an der Stelle (k, j) der Matrix $[S]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}} \cdot [T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{A}}$ ist. Quod erat demonstrandum. \square

4.4. Matrizen als Lineare Abbildungen.

Bemerkung 4.4.1. *Es seien V und W endlich-dimensionale Vektorraeume mit jeweiligen Basen $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$ und $\mathcal{C} = (w_1, \dots, w_m)$. Wir haben bereits gesehen, dass jede lineare Abbildung $T : V \rightarrow W$ eine Abbildungsmatrix $[T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}}$ hat.*

Umgekehrt koennen wir aus einer Matrix $A \in M_{n \times n}(K)$ eine lineare Abbildung $L_A : V \rightarrow W$ konstruieren: wir definieren L_A als die lineare Abbildung $V \rightarrow W$, fuer die gilt

$$L_A(v_j) = \sum_{i=1}^m a_{ij}w_i \quad \forall 1 \leq j \leq n.$$

Wichtig: Die lineare Abbildung L_A haengt ebenfalls von der Wahl der Basen \mathcal{B} und \mathcal{C} ab!

Bemerkung 4.4.2. *In dem Spezialfall, dass $V = K^n$, $W = K^m$ und \mathcal{B} and \mathcal{C} die jeweiligen Standardbasen sind, ist L_A die lineare Abbildung T_A aus Beispiel 4.1.4.*

Lemma 4.4.3. *Es seien V und W endlich-dimensionale Vektorraeume mit jeweiligen Basen $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$ und $\mathcal{C} = (w_1, \dots, w_m)$.*

(1) *Es sei $T : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung. Dann gilt $L_{[T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}}} = T$.*

(2) *Es sei $A \in M_{n \times n}(K)$. Dann gilt $[L_A]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}} = A$: die Abbildungsmatrix bezueglich der Basen \mathcal{B} und \mathcal{C} ist A selber.*

Proof. Klar von den Definitionen. \square

Bemerkung 4.4.4. Wir koennen Lemma 4.4.3 folgendermassen zusammenfassen: es gibt eine 1 : 1-Korrespondenz

$$(19) \quad \{m \times n\text{-Matrizen mit Werten in } K\} \leftrightarrow \{\text{lineare Abbildungen } V \rightarrow W\}$$

$$(20) \quad A \mapsto L_A$$

$$(21) \quad [T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}} \leftrightarrow T$$

Wichtig: diese 1 : 1 Korrespondenz haengt von der Wahl der Basen von V und W ab – sie ist nicht kanonisch.

Satz 4.4.5. Es sei V ein n -dimensionaler K -Vektorraum mit Basis $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$. Es sei $T : V \rightarrow V$ eine lineare Abbildung. Dann ist T genau dann ein Isomorphismus, wenn $[T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}$ eine invertierbare Matrix ist. In diesem Fall ist die Abbildungsmatrix von T^{-1} bezueglich der Basis \mathcal{B} gegeben durch $([T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}})^{-1}$.

Proof. \Rightarrow Nimm an, dass T ein Isomorphismus ist, d.h. es gibt eine lineare Abbildung $T^{-1} : V \rightarrow V$ so dass

$$T \circ T^{-1} = T^{-1} \circ T = \text{id}_V.$$

Dann gilt aufgrund von Satz 4.3.7, dass

$$[\text{id}_V]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = \mathbf{1}_n = [T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} \cdot [T^{-1}]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = [T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} \cdot [T^{-1}]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}},$$

das heisst $[T^{-1}]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}$ ist die inverse Matrix von $[T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}$.

\Leftarrow Nimm an, dass $A = [T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}$ invertierbar ist, d.h. es gibt eine Matrix A^{-1} , so dass

$$A \cdot A^{-1} = A^{-1} \cdot A = \mathbf{1}_n.$$

Dann ist $L_{A^{-1}}$ die inverse Abbildung zu T : aufgrund von Satz 4.3.7 gilt

$$[L_{A^{-1}} \circ T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = [L_{A^{-1}}]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} \cdot [T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = A^{-1} \cdot A = \mathbf{1}_n = [\text{id}_V]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}},$$

wobei die zweite Gleichung von Lemma 4.4.3 (2) folgt. Daher gilt $L_{A^{-1}} \circ T = \text{id}_V$. Auf aehnliche Weise koennen wir zeigen, dass $T \circ L_{A^{-1}} = \text{id}_V$. Daher ist T ein Isomorphismus. \square

4.5. Basiswechsel. Wir wollen nun folgende Frage untersuchen: es sei $T : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung zwischen endlich-dimensionalen K -Vektorraeumen, und es seien $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$ und $\mathcal{B}' = (v'_1, \dots, v'_n)$, bzw. $\mathcal{C} = (w_1, \dots, w_m)$ und $\mathcal{C}' = (w'_1, \dots, w'_m)$ zwei verschiedene Basen von V , bzw. von W . Was ist die Beziehung zwischen den Matrizen $[T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}}$ und $[T]_{\mathcal{C}'}^{\mathcal{B}'}$?

Definition 4.5.1. Es sei V ein endlich-dimensionaler K -Vektorraum mit Basis $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$. Es sei $\mathcal{B}' = (v'_1, \dots, v'_n)$ eine andere Basis von V , und es sei $A = [\text{id}]_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}$, d.h. $A = (a_{ij})$ ist die Matrix, deren Eintraege definiert sind durch die Gleichungen

$$v_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} v'_i \quad \text{fuer } 1 \leq j \leq n.$$

Die Matrix A heisst Basiswechselmatrix von \mathcal{B} nach \mathcal{B}' .

Bemerkung 4.5.2. Wir koennen mit Hilfe der Basiswechselmatrix $A = [\text{id}]_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}$ eine Linearkombination bezueglich der Basis \mathcal{B} als eine Linearkombination bezueglich der Basis \mathcal{B}' ausdruecken: es sei $v = \alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n \in V$. Dann gilt

$$v = \beta_1 v'_1 + \dots + \beta_n v'_n,$$

wobei

$$\begin{pmatrix} \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{pmatrix}.$$

Satz 4.5.3. Die Basiswechselmatrix $[\text{id}]_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}$ ist invertierbar, mit Inversem

$$([\text{id}]_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}})^{-1} = [\text{id}]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}'}$$

Proof. Von Theorem 4.3.7 folgt, dass

$$\begin{aligned} [\text{id}]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} &= \mathbf{1}_n = [\text{id}]_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}} \circ [\text{id}]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}'} \\ [\text{id}]_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}'} &= \mathbf{1}_n = [\text{id}]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}'} \circ [\text{id}]_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}. \end{aligned}$$

\square

Beispiel 4.5.4. Es sei $\mathcal{B} = \left(\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix} \right)$, und es sei $\mathcal{E} = (e_1, e_2)$ die Standardbasis von \mathbb{R}^2 . Dann ist

$$[\text{id}]_{\mathcal{E}}^{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Wir koennen natuerlich auch die Basiswechselformatrix von \mathcal{B}' nach \mathcal{B} betrachten: es gilt

$$[\text{id}]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{E}} = \begin{pmatrix} 1 & -2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Wir ueberpruefen Satz 4.5.3:

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

Theorem 4.5.5. *Es sei $T : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung zwischen endlich-dimensionalen K -Vektorraeumen und es seien $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$ und $\mathcal{B}' = (v'_1, \dots, v'_n)$, bzw. $\mathcal{C} = (w_1, \dots, w_m)$ und $\mathcal{C}' = (w'_1, \dots, w'_m)$ zwei verschiedene Basen von V , bzw. von W . Dann gilt*

$$[T]_{\mathcal{C}'}^{\mathcal{B}'} = [\text{id}_W]_{\mathcal{C}'}^{\mathcal{C}} \cdot [T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}} \cdot [\text{id}_V]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}'}$$

Proof. Let $A = [T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}}$, $P = [\text{id}_V]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}'}$ and $Q = [\text{id}_W]_{\mathcal{C}'}^{\mathcal{C}}$. Diese Matrizen sind durch folgende Eigenschaften definiert (vergl. Definition 4.3.1 und Beispiel 4.3.2 (3)):

$$\begin{aligned} v'_\ell &= p_{1\ell}v_1 + \dots + p_{n\ell}v_n, \\ T(v_k) &= a_{1k}w_1 + \dots + a_{mk}w_m, \\ w_j &= q_{1j}w'_1 + \dots + q_{mj}w'_m \end{aligned}$$

fuer alle $1 \leq k, \ell \leq n$ und $1 \leq j \leq m$. Dann gilt

$$\begin{aligned} T(v'_\ell) &= \sum_{k=1}^n p_{k\ell} T(v_k) \\ &= \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m p_{k\ell} a_{jk} w_j \\ &= \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^m p_{k\ell} a_{jk} q_{ij} w'_i \end{aligned} \tag{22}$$

Aber $B = [T]_{\mathcal{C}'}^{\mathcal{B}'}$ ist die Matrix mit der Eigenschaft, dass

$$T(v'_\ell) = b_{1\ell}w'_1 + \dots + b_{m\ell}w'_m.$$

Indem wir die Formeln (22) und (23) vergleichen, erhalten wir

$$b_{i\ell} = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m p_{k\ell} a_{jk} q_{ij}. \tag{23}$$

□

Bemerkung 4.5.6. *Wir koennen Theorem 4.5.5 folgendermassen zusammenfassen: $T : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung zwischen endlich-dimensionalen K -Vektorraeumen, und es seien \mathcal{B} und \mathcal{B}' , bzw. \mathcal{C} und \mathcal{C}' zwei verschiedene Basen von V , bzw. von W . Dann gibt es invertierbare Matrizen $P \in M_{n \times n}(K)$ und $Q \in M_{m \times m}(K)$, so dass*

$$[T]_{\mathcal{C}'}^{\mathcal{B}'} = Q \cdot [T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}} \cdot P.$$

Hier ist P die Basiswechselformatrix von \mathcal{B}' nach \mathcal{B} und Q die Basiswechselformatrix von \mathcal{C} nach \mathcal{C}' .

Als Spezialfall erhalten wir einen Formel fuer die Matrix eines Endomorphismus nach Basiswechsel:

Korollar 4.5.7. *Es sei $T : V \rightarrow V$ ein Endomorphismus, und es seien $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$ und $\mathcal{B}' = (v'_1, \dots, v'_n)$ Basen von V . Es sei $P = [\text{id}]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}'}$. Dann gilt*

$$[T]_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}'} = [\text{id}]_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}} \cdot [T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} \cdot [\text{id}]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}'}$$

Beispiel 4.5.8. Es sei $A = \begin{pmatrix} 1 & -2 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}$, und wir betrachten die Abbildung $T_A : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$. Mit anderen Worten, wenn $\mathcal{E} = (e_1, e_2)$, dann gilt

$$A = [T_A]_{\mathcal{E}}^{\mathcal{E}}.$$

Es sei nun $\mathcal{B} = \left(\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix} \right)$ (vergl. Beispiel 4.5.4). Was ist die Matrix von T_A bezueglich der Basis \mathcal{B} ? Es gilt

$$[\text{id}]_{\mathcal{E}}^{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad [\text{id}]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{E}} = \begin{pmatrix} 1 & -2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Von Korollar 4.5.7 erhalten wir

$$[T_A]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = [\text{id}]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{E}} \cdot [T_A]_{\mathcal{E}}^{\mathcal{E}} \cdot [\text{id}]_{\mathcal{E}}^{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} 1 & -2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -2 \\ 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -3 & -10 \\ 2 & 5 \end{pmatrix}.$$

Diese Matrix bedeutet, dass

$$T_A : v_1 \mapsto -3v_1 + 2v_2 \quad \text{und} \quad T_A : v_2 \mapsto -10v_1 + 4v_2.$$

Beispiel 4.5.9. Wir koennen jetzt einige der Rechnungen mit Fibonacci Folgen besser verstehen: es seien $\mathcal{B} = (\mathcal{F}_{1,0}, \mathcal{F}_{0,1})$ und $\mathcal{C} = (\mathcal{F}_{1,\varphi}, \mathcal{F}_{1,\psi})$ Basen des Raumes V von Fibonacci-Folgen, und es sei $S : V \rightarrow V$ die Verschiebungsabbildung. Wir haben bereits gesehen, dass

$$[S]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Die Basiswechselmatrix von \mathcal{B} nach \mathcal{C} ist gegeben durch

$$[\text{id}]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{C}} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ \varphi & \varphi \end{pmatrix}$$

mit inverser Matrix

$$[\text{id}]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}} = \frac{1}{\sqrt{5}} \begin{pmatrix} -\psi & 1 \\ \varphi & -1 \end{pmatrix}.$$

Daher gilt

$$[S]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{C}} = [\text{id}]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}} \cdot [S]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} \cdot [\text{id}]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{C}} = \frac{1}{\sqrt{5}} \begin{pmatrix} -\psi & 1 \\ \varphi & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ \varphi & \varphi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi & 0 \\ 0 & \psi \end{pmatrix},$$

wie erwartet. (Rechnen Sie nach!)

Definition 4.5.10.

(1) Zwei Matrizen $A, B \in M_{n \times n}(K)$ sind aehnlich, wenn es eine invertierbare Matrix $P \in M_{n \times n}(K)$ gibt, so dass

$$B = P^{-1} \cdot A \cdot P.$$

(2) Zwei Matrizen $A, B \in M_{m \times n}(K)$ sind aequivalent, wenn es invertierbare Matrizen $P \in M_{m \times m}(K)$ und $Q \in M_{n \times n}(K)$ gibt, so dass

$$B = P \cdot A \cdot Q.$$

Beispiele 4.5.11.

(1) Die Matrizen $\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$ und $\begin{pmatrix} \varphi & 0 \\ 0 & \psi \end{pmatrix}$ aus Beispiel 4.5.9 sind aehnlich.

(2)

Satz 4.5.12.

(1) 'Aehnlichkeit' definiert eine Aequivalenzrelation auf $M_{n \times n}(K)$.

(2) 'Aequivalenz' definiert eine Aequivalenzrelation auf $M_{m \times n}(K)$.

Proof. Wir beweisen (1); der Beweis von (2) ist eine Uebung. Schreibe $A \sim B$ wenn A aehnlich zu B ist.

- Es gilt $A \sim A$, da $A = \mathbf{1}_n^{-1} A \mathbf{1}_n$.
- Wenn $A \sim B$, dann gilt

$$B = P^{-1} \cdot A \cdot P \quad \Rightarrow \quad A = (P^{-1})^{-1} B P^{-1},$$

und daher $B \sim A$.

- Wenn $A \sim B$ und $B \sim C$, dann gibt es invertierbare Matrizen P, Q so dass

$$B = P^{-1}AP \quad \text{und} \quad C = Q^{-1}BQ,$$

woraus folgt, dass

$$C = Q^{-1}P^{-1}APQ = (PQ)^{-1}APQ,$$

d.h. $A \sim C$.

□

4.6. Zeilenrang gleich Spaltenrang. Wir koennen jetzt den Satz aus Abschnitt 3.6 beweisen, naemlich dass fuer jede Matrix $A \in M_{m \times n}(K)$ gilt

$$(24) \quad \text{Zeilenrang}(A) = \text{Spaltenrang}(A).$$

Der Beweis erfordert etwas Vorbereitung. Wir beginninen mit folgender Bemerkung:

Bemerkung 4.6.1. *Es sei $L_A : K^n \rightarrow K^m$ die lineare Abbildung, die durch A bezueglich der Standardbasen \mathcal{E} von K^n und \mathcal{F} von K^m gegeben ist; dann gilt*

$$\text{im}(L_A) = \text{Spalten}(A)$$

und daher $\text{rk}(L_A) = \text{Spaltenrang}(A)$.

Theorem 4.6.2. *Es sei $A \in M_{m \times n}(K)$, und es sei $r = \text{Spaltenrang}(A)$. Dann gibt es invertierbare Matrizen $P \in M_{n \times n}(K)$ und $Q \in M_{m \times m}(K)$, so dass QAP die Form $\begin{pmatrix} \mathbf{1}_r & 0_{r \times s} \\ 0_{t \times r} & 0_{t \times s} \end{pmatrix}$ hat, wobei $s = n - r$ und $t = m - r$.*

Proof. Es sei (u_1, \dots, u_s) eine Basis fuer $\ker(L_A)$. Wie in dem Beweis von Theorem 4.2.9 erweitern wir die Basis zu einer Basis

$$\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_r, u_1, \dots, u_s)$$

von K^n . Dein Einfachheit halber sei $v_{r+i} = u_i$ fuer $1 \leq i \leq s$, d.h.

$$\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n).$$

Fuer $1 \leq i \leq r$ sei $w_i = L_A(v_i)$; dann ist (w_1, \dots, w_r) eine Basis von $\text{im}(L_A)$. Wir erweitern diese Basis zu einer Basis

$$\mathcal{C} = (w_1, \dots, w_r, w_{r+1}, \dots, w_m)$$

von K^m .

Was ist die Matrix von L_A bezueglich der Basen \mathcal{B} und \mathcal{C} ? Schreiben wir $[L_A]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}} = (c_{ij})$, dann gilt per Definition

$$T(v_j) = c_{1j}w_1 + \dots + c_{mj}w_m.$$

Nun wissen wir aber, dass

$$T(v_j) = \begin{cases} w_j & \text{fuer } 1 \leq j \leq r \\ 0_{K^m} & \text{fuer } r < j \leq n \end{cases}$$

Mit anderen Worten,

$$[L_A]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} \mathbf{1}_r & 0_{r \times s} \\ 0_{t \times r} & 0_{t \times s} \end{pmatrix}.$$

Nun wissen wir von Theorem 4.5.5, dass

$$[L_A]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}} = [\text{id}_{K^m}]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{F}} \cdot [L_A]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{E}} \cdot [\text{id}_{K^n}]_{\mathcal{E}}^{\mathcal{B}}.$$

Da $[L_A]_{\mathcal{F}}^{\mathcal{E}} = A$, erhalten wir das Resultat fuer $Q = [\text{id}_{K^m}]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{F}}$ und $P = [\text{id}_{K^n}]_{\mathcal{E}}^{\mathcal{B}}$. □

Dieses Theorem hat eine interessante Konsequenz: erinnern Sie sich (Def. 4.5.10 (2)), dass zwei Matrizen $A, B \in M_{m \times n}(K)$ aequivalent sind, wenn es invertierbare Matrizen $P \in M_{m \times m}(K)$ und $Q \in M_{n \times n}(K)$ gibt, so dass

$$B = P \cdot A \cdot Q;$$

wir schreiben $A \sim B$.

Korollar 4.6.3. *Es seien $A \sim B$. Dann gilt $A \sim B$ genau dann, wenn $\text{Spaltenrang}(A) = \text{Spaltenrang}(B)$. Insbesondere zerfaellt $M_{m \times n}(K)$ in $\min\{m, n\} + 1$ Äquivalenzklassen.*

Proof. \Leftarrow : Es sei r der gemeinsame Spaltenrang. By Theorem 4.6.2 gilt

$$a \sim \begin{pmatrix} \mathbf{1}_r & 0_{r \times s} \\ 0_{t \times r} & 0_{t \times s} \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad B \sim \begin{pmatrix} \mathbf{1}_r & 0_{r \times s} \\ 0_{t \times r} & 0_{t \times s} \end{pmatrix}.$$

Da ‘ \sim ’ eine Aequivalenzrelation ist (Proposition 4.5.12), folgt daraus, dass $A \sim B$.

\Rightarrow : Nimm an, dass $A \sim B$, d.h. es gibt invertierbare Matrizen $P \in M_{m \times m}(K)$, $Q \in M_{n \times n}(K)$ so dass $B = PAQ$. Dann gilt

$$T_B = T_P \circ T_A \circ T_Q,$$

wobei T_\star die von \star induzierte lineare Abbildung bezueglich der Einheitsbasen ist. Wir wollen zeigen, dass $\dim T_A = \dim T_B$. Es gilt

$$\begin{aligned} \text{im}(T_B) &= T_B(K^n) \\ &= T_P \circ T_A(T_Q(K^n)) \\ &= T_P \circ T_A(K^n) \quad \text{da } T_Q \text{ ein Isomorphismus ist} \\ &= T_P(\text{im}(T_A)) \end{aligned}$$

Daraus folgt, dass

$$\dim \text{im}(T_B) = \dim T_P(\text{im}(T_A)),$$

Doch da T_Q ein Isomorphismus ist, folgt von Korollar 4.2.12, dass

$$\dim T_P(\text{im}(T_A)) = \dim \text{im}(T_A).$$

□

Um (24) zu zeigen, muessen wir nun beweisen, dass sich der Zeilen- bzw. Spaltenrang einer Matrix nicht aendern, wenn wir die Matrix von links, bzw. von rechts mit einer invertierbaren Matrix multiplizieren.

Satz 4.6.4. *Es sei $A \in M_{m \times n}(K)$, und es sei $Q \in M_{m \times m}(K)$ invertierbar. Dann gilt*

- (1) Zeilenrang(QA) = Zeilenrang(A);
- (2) Spaltenrang(QA) = Spaltenrang(A).

Proof. (1) Wir schreiben $Q = (q_{ij})$. Es seien x_1, \dots, x_m die Zeilenvektoren von A . Dann ist die i te Zeile von QA gegeben durch

$$q_{i1}x_1 + \dots + q_{im}x_m,$$

mit anderen Worten, die Zeilen von QA sind Linearkombinationen von den Zeilen von A und daher

$$\text{Zeilenrang}(QA) \leq \text{Zeilenrang}(A).$$

Da Q invertierbar ist, koennen wir dieses Argument auch Multiplikation bei $Q^{-1}A$ anwenden und erhalten

$$\text{Zeilenrang}(Q^{-1}QA) \leq \text{Zeilenrang}(QA),$$

das heisst $\text{Zeilenrang}(A) \leq \text{Zeilenrang}(QA)$. Daraus folgt, dass

$$\text{Zeilenrang}(QA) = \text{Zeilenrang}(A).$$

(2) Es seien nun y_1, \dots, y_n die Spalten von A , und es sei $U = \langle y_1, \dots, y_n \rangle \leq K^m$. Dann sind die Spalten von QA gegeben durch Qy_1, \dots, Qy_n , das heisst durch $L_Q(y_1), \dots, L_Q(y_n)$, wobei $L_Q : K^m \rightarrow K^m$ die durch Q gegebene lineare Abbildung bezueglich der Standardbasis ist. Nun ist aber Q invertierbar, was bedeutet, dass L_Q ein Isomorphismus ist und insbesondere injektiv. Daher folgt von Korollar 4.2.12, dass

$$\dim_K U = \dim_K L_Q(U),$$

und daher

$$\text{Spaltenrang}(QA) = \text{Spaltenrang}(A).$$

□

Um das analoge Resultat fuer AP zu zeigen, benutzen wir einen Trick:

Definition 4.6.5. *Es sei $B = (b_{ij}) \in M_{m \times n}(K)$. Definiere die transponierte Matrix B^t als die $(n \times m)$ -Matrix, deren (i, j) Eintrag durch b_{ji} gegeben ist.*

Beispiel 4.6.6.

- (1) Es sei $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \\ 5 & 6 \end{pmatrix}$. Dann ist $A^t = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 2 & 4 & 6 \end{pmatrix}$.
- (2) Es sei $B = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & -1 & 2 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$. Dann ist $B^t = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 2 & -1 & 0 \\ 3 & 2 & -1 \end{pmatrix}$.

Lemma 4.6.7.

- (1) Für eine Matrix $B \in M_{m \times n}(K)$ gilt $(B^t)^t = B$.
- (2) Es sei $B \in M_{m \times n}(K)$ und $C \in M_{n \times p}(K)$. Dann gilt

$$(BC)^t = C^t B^t.$$

- (3) Eine Matrix $B \in M_{n \times n}(K)$ ist genau dann invertierbar, wenn B^t invertierbar ist, und in diesem Fall ist $(B^t)^{-1} = (B^{-1})^t$.
- (4) Es gilt

$$\text{Zeilenrang}(B) = \text{Spaltenrang}(B^t) \quad \text{und} \quad \text{Zeilenrang}(B^t) = \text{Spaltenrang}(B)$$

Proof. Übung. □

Wir können nun folgenden Satz als eine einfache Konsequenz von Satz 4.6.4 beweisen.

Satz 4.6.8. Es sei $A \in M_{m \times n}(K)$, und es sei $P \in M_{n \times n}(K)$ invertierbar. Dann gilt

- (1) $\text{Zeilenrang}(AP) = \text{Zeilenrang}(A)$;
 (2) $\text{Spaltenrang}(AP) = \text{Spaltenrang}(A)$.

Proof. Dank Lemma 4.6.7 (4) ist es ausreichend, den Satz in dem Fall zu zeigen, wenn wir AP durch $(AP)^{-1}$, bzw. A durch A^t ersetzen. Aber

$$(AP)^t = P^t A^t,$$

und P^t ist invertierbar dank Lemma 4.6.7 (2) und (3). Der Satz folgt nun von Satz 4.6.4. □

Korollar 4.6.9. Es sei $A \in M_{m \times n}(K)$, und es seien $Q \in M_{m \times m}(K)$ und $P \in M_{n \times n}(K)$ invertierbar. Dann gilt

$$\text{Zeilenrang}(QAP) = \text{Zeilenrang}(A) \quad \text{und} \quad \text{Spaltenrang}(QAP) = \text{Spaltenrang}(A).$$

Folgender Satz ist nun eine einfache Konsequenz:

Theorem 4.6.10. Es sei $A \in M_{m \times n}$. Dann gilt

$$\text{Zeilenrang}(A) = \text{Spaltenrang}(A).$$

Proof. Wir haben in Theorem 4.6.2 gesehen, dass es invertierbare Matrizen $P \in M_{n \times n}(K)$ und $Q \in M_{m \times m}(K)$ gibt, so dass QAP die Form $\begin{pmatrix} \mathbf{1}_r & 0_{r \times s} \\ 0_{t \times r} & 0_{t \times s} \end{pmatrix}$ hat, wobei $s = n - r$ und $t = m - r$. Der Zeilen- und Spaltenrang dieser Matrix ist offensichtlich r . Dank Korollar 4.6.9 wissen wir, dass die Matrix QAP den gleichen Zeilen- bzw. Spaltenrang hat wie A . □

Definition 4.6.11. Es sei $A \in M_{m \times n}(K)$. Der gemeinsame Wert von Zeilen- und Spaltenrang von A ist der Rang $\text{rk}(A)$ von A .

Bemerkung 4.6.12. Obwohl für $A \in M_{m \times n}(K)$ gilt

$$\text{Zeilenrang}(A) = \text{Spaltenrang}(A),$$

sind die Räume $\text{Spalten}(A)$ und $\text{Zeilen}(A)$ verschieden! Zunächst ist $\text{Spalten}(A) \leq K^m$ und $\text{Zeilen}(A) \leq K^n$. Aber auch wenn $m = n$ erhalten wir im allgemeinen verschiedene Unterräume von K^n .

4.7. Zurueck zu linearen Gleichungssystemen. Es sei $A \in M_{m \times n}$, und wir betrachten das homogene lineare Gleichungssystem

$$(S_A) : A \cdot x = 0_{K^m}.$$

Wir schreiben $L(S_A) \leq K^n$ fuer die Loesungen des Gleichungssystems.

Lemma 4.7.1. *Es gilt*

$$\dim L(S_A) = n - \text{Rang}(A).$$

Proof. Es sei L_A die durch A gegebene lineare Abbildung $K^n \rightarrow K^m$ bezueglich der Standardbasen. Beachte (Bemerkung 4.6.1), dass $L(S_A) = \ker(L_A)$ und $\text{Rang}(A) = \dim \text{im}(L_A)$. Aber aufgrund von Theorem 4.2.9 gilt

$$n = \dim \ker(L_A) + \dim \text{im}(L_A).$$

□

Wir wissen nun von Theorem 2.3.9, dass A zeilen-aequivalent ist zu einer Matrix $A' = (a'_{ij})$ in reduzierter Zeilenstufenform, und dank Theorem 2.4.5 gilt

$$L(S_A) = L(S_{A'}).$$

Wir wir bereits im Beweis von Lemma 3.6.6 gesehen haben, ist $r = \text{Rang}(A')$ die Anzahl der fuehrenden Einsen von A' ; nimm an, dass sie in den Spalten

$$1 \leq j_1 < j_2 < \dots < j_r \leq n.$$

auftreten. Die Loesungsmenge $L(S_{A'})$ hat dann $\ell = n - r$ freie Variablen, sagen wir $x_{i_1}, \dots, x_{i_\ell}$ fuer

$$1 \leq i_1 < \dots < i_\ell \leq n.$$

Bemerkung 4.7.2. *Fuer alle Werte der freien Variablen $x_{i_1}, \dots, x_{i_\ell} \in K$ sind die Werte der Variablen x_{j_1}, \dots, x_{j_r} eindeutig bestimmt, und zwar durch*

$$(25) \quad x_{j_k} = - \sum_{1 \leq q \leq \ell: i_q > j_k} a'_{k,q} x_{i_q}.$$

Wir erhalten daher eine Abbildung

$$\Phi : K^\ell \rightarrow L(S_A),$$

die ein ℓ -Tupel $(\lambda_1, \dots, \lambda_\ell)$ auf diejenige eindeutige Loesung

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \in L(S_A) = L(S_{A'})$$

abbildet, fuer die gilt

$$x_{i_1} = \lambda_1, \dots, x_{i_\ell} = \lambda_\ell.$$

Beispiel 4.7.3. Es sei $A' \in M_{3 \times 6}(\mathbb{R})$ gegeben durch

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

Dann ist A' in reduzierter Zeilenstufenform, und es gilt $r =$ und $\ell = 6 - 3 = 3$. Die fuehrenden Einsen sind in den Spalten $j_1 = 2, j_2 = 4, j_3 = 5$, das heisst, fuer $x = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_6 \end{pmatrix} \in L(S_{A'})$ haben wir freie Variablen x_1, x_3, x_6 , und die Werte von x_2, x_4, x_5 sind bestimmt durch

$$x_2 = x_3 - 2x_6$$

$$x_4 = x_6$$

$$x_5 = -x_6$$

Mit anderen Worten, die Abbildung $\Phi : \mathbb{R}^3 \rightarrow L(S_{A'})$ ist gegeben durch

$$(a, b, c) \mapsto x = \begin{pmatrix} a \\ b - 2c \\ b \\ c \\ -c \\ c \end{pmatrix} = a \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + b \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + c \begin{pmatrix} 0 \\ -2 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Satz 4.7.4. *The Abbildung Φ ist linear und ein Isomorphismus.*

Proof. Gleichung (25) zeigt, dass x_{j_1}, \dots, x_{j_r} linear von den freien Variablen abhängen; daher ist Φ eine lineare Abbildung.

Um zu zeigen, dass Φ ein Isomorphismus ist, reicht es zu zeigen, dass $\ker(\Phi) = \{0_{K^\ell}\}$. Aber das folgt unmittelbar von der Definition von Φ : wenn $\Phi(\lambda_1, \dots, \lambda_\ell) = 0_{K^m}$, dann folgt $\lambda_i = 0$ for all i , da jedes λ_i ein Eintrag in $\Phi(\lambda_1, \dots, \lambda_\ell)$ ist. \square

Beispiel 4.7.5. Bezogen auf Beispiel 4.7.3 heisst das, dass jedes Element $x \in L(S_{A'})$ von der Form

$$a \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + b \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + c \begin{pmatrix} 0 \\ -2 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

fuer irgendwelche $a, b, c \in \mathbb{R}$ ist.

Bemerkung 4.7.6. *Die inverse Abbildung Φ^{-1} ist folgendermassen gegeben: es sei $x = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \in L(S_A)$.*

Dann gilt

$$\Phi^{-1}(x) = \begin{pmatrix} x_{i_1} \\ \vdots \\ x_{i_\ell} \end{pmatrix}.$$

Korollar 4.7.7. *Es seien $A \in M_{m \times n}(K)$, $b \in K^m$, und schreibe $(S_{A,b})$ fuer das lineare Gleichungssystem $A \cdot x = b$.*

- (1) *Es gilt $L(S_{A,b}) \neq \emptyset$ genau dann, wenn $b \in \text{Spalten}$.*
- (2) *Wenn $L(S_{A,b}) \neq \emptyset$ und $y \in L(S_{A,b})$, dann gilt*

$$L(S_{A,b}) = y + L(S_A) = \{x + y : x \in L(S_A)\}.$$

Proof. (1) Es seien y_1, \dots, y_n die Spalten von A . Dann gilt fuer einen beliebigen Vektor $x = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$:

$$A \cdot x = x_1 y_1 + \dots + x_n y_n,$$

das heisst, $\text{im}(L_A) = \langle y_1, \dots, y_n \rangle$.

- (2) Es sei $y \in L(S_{A,b})$ und $z \in L(S_A)$. Dann gilt

$$A(y + z) = A \cdot y + A \cdot z = b + 0_{K^m} = b,$$

so dass $y + z \in L(S_{A,b})$.

Wenn umgekehrt $y' \in L(S_{A,b})$, dann gilt

$$A(y - y') = A \cdot y - A \cdot y' = b - b = 0_{K^m},$$

mit anderen Worten $y' \in y + L(S_A)$. \square

Bemerkung 4.7.8. *Wir sehen also: $L(S_{A,b})$ ist gegeben durch die Verschiebung des Unterraums $L(S_A)$ entlang y . Eine Untermenge von K^n der Form $y + L(S_A)$ ist die durch y erzeugte Nebenklasse (eng. coset) von $L(S_A)$. Sie werden solchen Nebenklassen in der Algebra noch oft begegnen, zum Beispiel als die Elemente von Quotientenraeumen.*

Satz 4.7.9. *Es sei $A \in M_{m \times n}(K)$, $b \in K^m$, und es sei $A|b$ die erweiterte Matrix. Folgende Bedingungen sind äquivalent:*

- (1) *Es gilt $\text{rk}(A|b) = \text{rk}(A)$.*
- (2) *Das lineare Gleichungssystem*

$$S_{A,b} : A.x = b$$

hat eine Lösung.

Proof. Es seien y_1, \dots, y_n die Spaltenvektoren von A . Dann gilt

$$\begin{aligned} \text{rk}(A|b) &= \text{rk}(A) \\ \Leftrightarrow \text{Spaltenrang von } A|b &= \text{Spaltenrang von } A \\ \Leftrightarrow \langle y_1, \dots, y_n, b \rangle &= \langle y_1, \dots, y_n \rangle \\ \Leftrightarrow b \in \langle y_1, \dots, y_n \rangle \\ \Leftrightarrow b \in \text{Spalten}(A) \\ \Leftrightarrow L(S_{A,b}) &\neq \emptyset, \end{aligned}$$

wobei die letzte Äquivalenz von Korollary 4.7.7 (1) folgt. □

Korollar 4.7.10. *Es sei $A \in M_{m \times n}(K)$, $b \in K^m$, und es sei $A|b$ die erweiterte Matrix. Folgende Bedingungen sind äquivalent:*

- (1) *Es gilt $\text{rk}(A|b) = \text{rk}(A) = n$.*
- (2) *Das lineare Gleichungssystem*

$$S_{A,b} : A.x = b$$

hat genau eine Lösung.

Proof. Übung. □

5. INTERMEZZO: GRUPPEN UND RINGE

5.1. Gruppen.

Definition 5.1.1. *Eine Gruppe ist eine Menge G zusammen mit einer Operation $\times : G \times G \rightarrow G$, die folgende Axiome erfüllt:*

- (1) $\forall g, h, k \in G$ gilt $(g \times h) \times k = g \times (h \times k)$;
- (2) es gibt ein Element $e \in G$, so dass $\forall g \in G$ gilt $g \times e = e \times g = g$;¹⁷
- (3) $\forall g \in G$ gibt es ein Element g^{-1} so dass $g \times g^{-1} = g^{-1} \times g = e$.¹⁸

Beispiele 5.1.2.

- (1) Es sei V ein Vektorraum. Dann ist V eine Gruppe unter der Vektoraddition. Diese Gruppe ist abelsch (= kommutativ): es gilt $v + u = u + v$ fuer all $u, v \in V$.
- (2) Die Symmetrien des Quadrats sind eine nicht-abelsche endliche Gruppe der Ordnung 8.
- (3) Es sei $n \geq 1$, und es sei $\text{GL}_n(K)$ die Menge aller invertierbaren Matrizen in $M_{n \times n}(K)$. Dann ist $\text{GL}_n(K)$ eine Gruppe unter Matrix-Multiplikation; sie heisst die *allgemeine lineare Gruppe*. Wenn $n > 1$, dann ist $\text{GL}_n(K)$ nicht abelsch. (Was ist $\text{GL}_1(K)$?) Die Gruppe $\text{GL}_n(K)$ had viele interessante Untergruppen: zum Beispiel die Untergruppe aller oberen Dreiecksmatrizen, oder die (abelsche) Untergruppe diagonalen Matrizen.

Bemerkung 5.1.3. *Gruppen finden sich in der Algebra ueberall (z.B. als Symmetrien geometrischer Koerper), und Gruppentheorie ist ein riesiges Forschungsgebiet. Ein paar Beispiele:*

- (1) *vor 200 Jahren hat der franzoesische Mathematiker Evariste Galois im Alter von 21 Jahren mit Hilfe von Gruppentheorie die Frage beantwortet, ob sich ein Polynom mit Hilfe von Radikalen (verallgemeinerte Wurzeln) loesen laesst. Diese Arbeit hat ein neues Arbeitsgebiet geschaffen: die algebraische Zahlentheorie.*
- (2) *von 1955 bis 2004 hat eine Gruppe von Forschern alle sog. einfachen endlichen Gruppen klassifiziert; der Beweis erstreckt sich ueber mehrere 10000 Seiten.*

¹⁷Man kann zeigen, dass das neutrale Element e eindeutig bestimmt ist.

¹⁸Man kann zeigen, dass g^{-1} eindeutig bestimmt ist; es heisst das Inverse von g .

- (3) 1998 hat Richards Borchers die Fieldsmedaille dafür bekommen, dass er die sogenannte Moonshine Vermutung von Conway bewiesen hat, die die Darstellungen der sogenannten Monstergruppe mit den Werten einer in der Zahlentheorie wichtigen Funktion in Verbindung gebracht hat.
- (4) eines der wichtigsten heutigen Forschungsgebiete ist die sogenannte Langlands-Korrespondenz, die Eigenschaften der allgemeinen Linearen Gruppen mit Objekten in der Galoistheorie miteinander in Beziehung bringt. Einer der einfachsten Fälle dieser Korrespondenz ist die sogenannte Taniyama–Shimura Vermutung, die Wiles' Beweis des Fermatschen Satzes zugrunde liegt.

5.2. Ringe.

Definition 5.2.1. Ein Ring ist eine Menge R mit zwei Operationen $+$ (Addition) und \times (Multiplikation), die folgende Axiome erfüllen:

- (1) $(R, +)$ ist eine abelsche Gruppe;
 (2) Multiplikation ist assoziativ: $\forall a, b, c \in R$ gilt

$$a \times (b \times c) = (a \times b) \times c.$$

- (3) Es gibt ein Element $1_R \in R$ für das gilt¹⁹

$$1_R \times a = a \times 1_R = a.$$

- (4) Multiplikation ist distributiv bezüglich der Addition, d.h.

$$a \times (b + c) = a \times b + a \times c \quad \text{und} \quad (b + c) \times a = b \times a + c \times a.$$

Eine Ringe haben Sie schon kennengelernt:

Beispiele 5.2.2.

- (1) \mathbb{Z} ist ein (kommutativer) Ring.
 (2) Ebenso ist jeder Körper ein kommutativer Ring.
 (3) Es sei $n \geq 1$. Dann ist $M_{n \times n}(K)$ ein Ring unter Matrix-Addition und Matrix-Multiplikation. Wenn $n > 1$, dann ist der Ring nicht kommutativ.

Bemerkung 5.2.3. Auch Ringe finden sich überall in der Algebra. Der französische Mathematiker Jean-Marc Fontaine wurde "Herr der Ringe" genannt, da er äussert wichtige sogenannte 'Periodenringe' in der p -adischen Hodge Theorie eingeführt hatte.

6. VEKTORRAEUME LINEARER ABBILDUNGEN

6.1. Definition und erste Eigenschaften.

Definition 6.1.1. Es seien V, W K -Vektorräume. Wir schreiben $\text{Hom}_K(V, W)$ für die Menge aller linearen Abbildungen von V nach W .

Satz 6.1.2. Es seien V, W K -Vektorräume. Dann hat $\text{Hom}_K(V, W)$ ebenfalls die Struktur eines K -Vektorraums, mit den folgenden Operationen:

- (1) Es seien $T_1, T_2 \in \text{Hom}_K(V, W)$. Dann ist $T_1 + T_2$ definiert durch

$$(T_1 + T_2)(v) = T_1(v) + T_2(v) \quad \forall v \in V.$$

- (2) Es seien $T \in \text{Hom}_K(V, W)$ und $\alpha \in K$. Dann ist

$$(\alpha T)(v) = \alpha T(v) \quad \forall v \in V.$$

Proof. Wir zeigen zunächst, dass $T_1 + T_2$ und αT ebenfalls Elemente von $\text{Hom}_K(V, W)$ sind. Dazu benutzen wir Bemerkung 4.1.6. Es seien $u, v \in V$ und $\lambda \in K$.

- (1) Es gilt

$$\begin{aligned} (T_1 + T_2)(v + \lambda u) &= T_1(v + \lambda u) + T_2(v + \lambda u) \\ &= T_1(v) + \lambda T_1(u) + T_2(v) + \lambda T_2(u) \\ &= T_1(v) + T_2(v) + \lambda (T_1(u) + T_2(u)) \\ &= (T_1 + T_2)(v) + \lambda (T_1 + T_2)(u), \end{aligned}$$

das heisst, $T_1 + T_2$ ist linear.

¹⁹Das Element ist die multiplikative Identität.

(2) Es gilt

$$\begin{aligned}(\alpha T)(v + \lambda u) &= \alpha T(v + \lambda u) \\ &= \alpha T(v) + \alpha \lambda T(u) \\ &= (\alpha T)(v) + \lambda(\alpha T)(u),\end{aligned}$$

das heisst αT ist linear.

Wir muessen nun zeigen, dass $\text{Hom}_K(V, W)$ mit diesen Operationen alle Vektorraumaxiome erfuehlt. Wir zeigen die Existenz des neutralen Elements; der Rest ist eine Uebung.

Es sei $0 : V \rightarrow W$ die Null-Abbildung, d.h. $0(v) = 0_W$ fuer alle $v \in V$. Klarerweise ist 0 linear. Wir zeigen nun, dass $T + 0 = 0 + T = T$ fuer all $T \in \text{Hom}_K(V, W)$. Tatsaechlich gilt

$$(T + 0)(v) = T(v) + 0(v) = T(v) + 0_W = T(v),$$

das heisst $T + 0 = T$. Aehnlich koennen wir zeigen, dass $0 + T = T$. □

Theorem 6.1.3. *Es seien V, W endlich-dimensionale K -Vektorraeume, und es sei $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$, bzw. $\mathcal{C} = (w_1, \dots, w_m)$ eine Basis von V , bzw. W . Dann ist die Abbildung*

$$\Psi_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}} : \text{Hom}_K(V, W) \rightarrow M_{m \times n}(K), \quad T \mapsto [T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}}$$

linear und ein Isomorphismus.

Proof. Selbstverstanedlich gilt

$$\Psi_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}}(T_1 + \alpha T_2) = \Psi_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}}(T_1) + \alpha \Psi_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}}(T_2),$$

das heisst die Abbildung ist linear.

Wir muessen daher dank Lemma 18.1.4 nur zeigen, dass $\Psi_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}}$ bijektiv ist. Aber das ist der Inhalt von Bemerkung 4.4.4. □

Korollar 6.1.4. *Wenn V, W endlich-dimensionale Vektorraeume sind, dann gilt das gleiche fuer $\text{Hom}(V, W)$, und es gilt*

$$\dim_K \text{Hom}(V, W) = \dim_K V \cdot \dim_K W.$$

Proof. Es seien $n = \dim V$ und $m = \dim W$. Dank Theorem 6.1.3 wissen wir, dass $\text{Hom}_K(V, W) \cong M_{m \times n}(K)$. Aber $M_{m \times n}(K)$ ist endlich-dimensional, mit $\dim M_{m \times n}(K) = mn$ (was ist eine Basis?). □

In dem Fall, wenn $W = V$, laesst sich Theorem 6.1.3 noch verfeinern:

Satz 6.1.5. *Es sei V ein endlich-dimensionaler Vektorraum. Dann ist $\text{Hom}(V, V)$ ein Ring unter der Addition und Komposition von Funktionen. Weiterhin ist die Abbildung $\Psi_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} : \text{Hom}_K(V, V) \rightarrow M_{n \times n}(K)$, fuer eine Basis \mathcal{B} von V , ein Ring-Isomorphismus.*

Proof. (Skizze) Die Ring-Struktur von $\text{Hom}(V, V)$ kann durch explizite Rechnungen ueberpueft werden.

Weiterhin folgt von Satz 4.3.7, dass

$$\Psi_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}(T \circ S) = [T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} \cdot [S]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}},$$

das heisst, $\Psi_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}$ ist kompatibel mit den jeweiligen Ring Multiplikationen. □

6.2. Der duale Vektorraum. Ein sehr wichtiges Beispiel von $\text{Hom}(V, W)$ ist der Fall, wenn $W = K$.

Definition 6.2.1. *Es sei V ein K -Vektorraum. Der Dualraum von V ist der Vektorraum*

$$V^* = \text{Hom}_K(V, K).$$

Die Elemente von V^ sind lineare Abbildungen $V \rightarrow K$; sie heissen Linearformen.*

Beispiele 6.2.2.

(1) Es sei $n \geq 1$. Dann ist die Spurabbildung

$$\text{Tr} : M_{n \times n}(K) \rightarrow K, \quad A = (a_{ij}) \mapsto a_{11} + \dots + a_{nn}$$

eine Linearform.

(2) Es sei V ein endlich-dimensionaler Vektorraum mit Basis $v_1 \dots v_n$. Es sei $\ell : V \rightarrow K$ die Abbildung, die einen Vektor

$$v = a_1 v_1 + \dots + a_n v_n$$

auf a_1 abbildet. Dann ist ℓ eine Linearform.

- (3) Es sei V der reelle Vektorraum aller stetigen Funktionen $[0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$, und es sei $a \in [0, 1]$. Dann ist die Abbildung

$$f \mapsto f(a)$$

eine Linearform.

- (4) Es sei V der reelle Vektorraum aller differenzierbaren Funktionen $(0, 1) \rightarrow \mathbb{R}$, und es sei $a \in (0, 1)$. Dann ist

$$f \mapsto (Df)(a),$$

mit Df die Ableitung von f , eine Linearform.

- (5) Es sei V der reelle Vektorraum aller integrierbaren Funktionen $[0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$. Dann ist

$$f \mapsto \int_0^1 f(x) dx$$

eine Linearform.

Beachte 6.2.3. Es sei V ein endlich-dimensionaler Vektorraum mit Basis $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$, und es sei $\ell \in V^*$. Dann ist ℓ durch $\ell(v_1), \dots, \ell(v_n)$ eindeutig bestimmt (Korollar 4.1.8). Insbesondere sind zwei Linearformen $\ell, \lambda \in V^*$ genau dann gleich, wenn

$$\ell(v_i) = \lambda(v_i) \quad \forall 1 \leq i \leq n$$

gilt. Wir werden diese Beobachtung wieder und wieder benutzen.

Definition 6.2.4. Es sei V ein endlich-dimensionaler K -Vektorraum und $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$ eine Basis fuer V . Fuer $1 \leq i \leq n$, definiere eine Linearform $v_i^* \in V^*$ wie folgt:

$$v_i^*(v_j) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } i = j \\ 0 & \text{wenn } i \neq j. \end{cases}$$

Explizit bildet die Linearform v_i^* einen Vektor $v = \alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n$ auf den Koeffizienten α_i ab.

Satz 6.2.5. Die Elemente v_1^*, \dots, v_n^* sind eine Basis von V^* . Insbesondere ist V^* ebenfalls n -dimensional.

Proof. Es sei $\ell : V \rightarrow K$ eine Linearform; wir muessen zeigen, dass sich ℓ eindeutig als Linearkombination von v_1^*, \dots, v_n^* schreiben laesst. Definiere die Linearform

$$(26) \quad f = \ell(v_1)v_1^* + \dots + \ell(v_n)v_n^*.$$

Dann gilt $f(v_i) = \ell(v_i) \forall 1 \leq i \leq n$, und daher gilt $\ell = f$ dank Beobachtung 6.2.3. Daher ist v_1^*, \dots, v_n^* ein Erzeugendensystem von V^* .

Nimm nun an, dass es Skalare $\alpha_1, \dots, \alpha_n \in K$ gibt, so dass

$$(27) \quad \alpha_1 v_1^* + \dots + \alpha_n v_n^* = 0_{V^*};$$

hier bezeichnet 0_{V^*} die Linearform, die jeden Vektor $v \in V$ auf $0 \in K$ abbildet. Insbesondere koennen wir (27) auf v_i auswerten: es gilt

$$(\alpha_1 v_1^* + \dots + \alpha_n v_n^*)(v_i) = 0_{V^*}(v_i)$$

Bei der Definition der dualen Basis ist die linke Seite gleich α_i , und die rechte Seite gleich 0. Daher gilt

$$\alpha_1 = \dots = \alpha_n = 0,$$

das heisst, die Vektoren v_1^*, \dots, v_n^* sind linear unabhaengig und daher eine Basis.²⁰ □

Beispiel 6.2.6. Es sei $V = \mathbb{R}[x]^{\leq 2}$ mit Standardbasis e_0, e_1, e_2 mit $e_i = x^i$. Wir berachten folgende Linearform

$$\ell : V \rightarrow \mathbb{R}. \quad \ell(f(x)) = Df(2),$$

wobei D die Ableitungsabbildung ist. Dann gilt

$$\ell = 0 \cdot e_0^* + 1 \cdot e_1^* + 4 \cdot e_2^*.$$

Mit anderen Worten, wenn wir ein beliebiges Element $y \in V$ als Linearkombination der Basisvektoren schreiben, $y = a + bx + cx^2 = ae_0 + be_1 + ce_2$, dann gilt

$$\ell(y) = 0 \cdot a + 1 \cdot b + 4c.$$

Definition 6.2.7. Die Basis $\mathcal{B}^* = (v_1^*, \dots, v_n^*)$ ist die duale Basis von \mathcal{B} .

²⁰Anstatt die lineare Unabhaengigkeit zu beweisen, haetten wir ebenfalls Korollar 6.1.4 benutzen koennen: v_1^*, \dots, v_n^* ist ein Erzeugendensystem mit n Elementen in einem n -dimensionalen Vektorraum und daher eine Basis.

Es seien nun $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$ und $\mathcal{C} = (w_1, \dots, w_n)$ Basen von V . Wir erinnern uns: die Basiswechselmatrix $A = [\text{id}]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}}$ ist die Matrix $A = (a_{ij})$, deren Einträge definiert sind durch die Gleichungen

$$(28) \quad v_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} w_i.$$

Was gilt nun fuer die Basiswechselmatrizen $[\text{id}]_{\mathcal{C}^*}^{\mathcal{B}^*}$ und $[\text{id}]_{\mathcal{B}^*}^{\mathcal{C}^*}$?

Beispiel 6.2.8. Es sei $V = \mathbb{R}^2$, und es seien $\mathcal{B} = (v_1, v_2)$ mit $v_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}$ und $v_2 = \begin{pmatrix} 3 \\ -1 \end{pmatrix}$ und \mathcal{C} die Standardbasis. Dann ist die Basiswechselmatrix gegeben durch

$$[\text{id}]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 2 & -1 \end{pmatrix},$$

das heisst

$$(29) \quad v_1 = e_1 + 2e_2 \quad \text{und} \quad v_2 = 3e_1 - e_2.$$

Betrachten wir nun die dualen Basen $\mathcal{B}^* = (v_1^*, v_2^*)$ und $\mathcal{C}^* = (e_1^*, e_2^*)$. Schreiben wir $[\text{id}]_{\mathcal{C}^*}^{\mathcal{B}^*} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$, Lecture 19
so gilt

$$(30) \quad v_1^* = ae_1^* + ce_2^* \quad \text{und} \quad v_2^* = be_1^* + de_2^*.$$

Wenden wir (30) auf (29) an, so erhalten wir

$$[\text{id}]_{\mathcal{C}^*}^{\mathcal{B}^*} = \begin{pmatrix} \frac{1}{7} & \frac{2}{7} \\ \frac{3}{7} & -\frac{1}{7} \end{pmatrix}.$$

Ok. Vielleicht haben wir mit $[\text{id}]_{\mathcal{B}^*}^{\mathcal{C}^*}$ mehr Glueck? Schreiben wir $[\text{id}]_{\mathcal{B}^*}^{\mathcal{C}^*} = \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{pmatrix}$, so gilt

$$(31) \quad e_1^* = \alpha v_1^* + \gamma v_2^* \quad \text{und} \quad e_2^* = \beta v_1^* + \delta v_2^*.$$

Wenden wir (31) auf (29) an, so erhalten wir

$$[\text{id}]_{\mathcal{B}^*}^{\mathcal{C}^*} = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & -1 \end{pmatrix}.$$

Faellt Ihnen was auf?

Satz 6.2.9. *Es sei V ein endlich-dimensionaler K -Vektorraum mit Basen $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$ und $\mathcal{C} = (w_1, \dots, w_n)$. Dann gilt*

$$[\text{id}]_{\mathcal{B}^*}^{\mathcal{C}^*} = ([\text{id}]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}})^t.$$

Proof. Wir argumentieren wie in dem Beispiel. Schreibe $[\text{id}]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}} = (a_{ij})$ und $[\text{id}]_{\mathcal{B}^*}^{\mathcal{C}^*} = (b_{ij})$, das heisst

$$(32) \quad v_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} w_i,$$

$$(33) \quad w_\ell^* = \sum_{k=1}^n b_{k\ell} v_k^*.$$

Wenden wir nun (33) auf (32) an, so erhalten wir

$$\left(\sum_{k=1}^n b_{k\ell} v_k^* \right) (v_j) = w_\ell^* \left(\sum_{i=1}^n a_{ij} w_i \right).$$

Doch nun ist $v_k^*(v_j)$ (bzw. $w_\ell^*(w_j)$) nur dann nicht null, wenn $k = j$ (bzw. wenn $i = \ell$), und daher erhalten wir

$$b_{j\ell} = a_{\ell j} \quad \forall j, \ell. \quad \square$$

Korollar 6.2.10. *Weiterhin gilt*

$$[\text{id}]_{\mathcal{C}^*}^{\mathcal{B}^*} = ([\text{id}]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{C}})^t = \left[([\text{id}]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}})^{-1} \right]^t.$$

Proof. Folgt unmittelbar von Satz 4.5.3 und Lemma 4.6.7 (3). □

Beispiel 6.2.11. Wir ueberpruefen die Rechnung in Beispiel 6.2.8: es gilt

$$\left([\text{id}]_{\mathcal{C}^*}^{\mathcal{B}^*}\right)^t = \begin{pmatrix} \frac{1}{7} & \frac{3}{7} \\ \frac{2}{7} & -\frac{1}{7} \end{pmatrix}$$

und weiterhin

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

6.3. Die duale Abbildung.

Definition 6.3.1. Es seien V, W K -Vektorraeume, und es sei $T : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung. Definiere die duale Abbildung

$$T^* : W^* \rightarrow V^*, \quad \ell \mapsto \ell \circ T.$$

Bemerkung 6.3.2. Explizit ist $T^*(\ell)$ folgendermassen definiert: fuer $v \in V$ gilt

$$T^*(\ell)(v) = \ell(T(v)).$$

Lemma 6.3.3. Die duale Abbildung ist wohldefiniert: $T^*(\ell)$ ist eine Linearform $V \rightarrow K$.

Proof. Es sei $\ell \in V^*$. Da sowohl T und ℓ lineare Abbildungen sind, folge von Lemma 4.1.10, dass $\ell \circ T$ ebenfalls linear ist, d.h. $T^*(\ell) \in V^*$. \square

Satz 6.3.4. Die duale Abbildung $T^* : W^* \rightarrow V^*$ ist eine lineare Abbildung.

Proof. Wir ueberpruefen die Axiome:

- (1) Es seien $\alpha \in K$ und $\ell \in W^*$. Dann gilt fuer all $v \in V$

$$T^*(\alpha\ell)(v) = ((\alpha\ell) \circ T)(v) = (\alpha\ell)(T(v)) = \alpha \cdot \ell(T(v)) = \alpha(\ell \circ T)(v) = \alpha T^*(\ell)(v),$$

das heisst $T^*(\alpha\ell) = \alpha T^*(\ell)$.²¹

- (2) Es seien $\ell_1, \ell_2 \in W^*$. Dann gilt fuer all $v \in V$

$$\begin{aligned} T^*(\ell_1 + \ell_2)(v) &= ((\ell_1 + \ell_2) \circ T)(v) \\ &= (\ell_1 + \ell_2)(T(v)) \\ &= \ell_1(T(v)) + \ell_2(T(v)) \\ &= (\ell_1 \circ T)(v) + (\ell_2 \circ T)(v) \\ &= T^*(\ell_1)(v) + T^*(\ell_2)(v), \end{aligned}$$

und daher $T^*(\ell_1 + \ell_2) = T^*(\ell_1) + T^*(\ell_2)$. \square

Satz 6.3.5. Es seien U, V, W Vektorraeume ueber K , und es seien $T : U \rightarrow V$ und $S : V \rightarrow W$ lineare Abbildungen. Dann gilt

$$(S \circ T)^* = T^* \circ S^*.$$

Proof. Uebung. \square

Beispiele 6.3.6.

- (1) Es gilt $(\text{id}_V)^* = \text{id}_{V^*}$.
 (2) Es gilt $(0 : V \rightarrow V)^* = (0 : V^* \rightarrow V^*)$.

Bemerkung 6.3.7. Wir koennen die Ergebnisse dieses Kapitels folgendermassen zusammenfassen: durch Dualisierung erhalten wir aus einem Vektorraum V einen neuen Vektorraum V^* , und aus einer linearen Abbildung $T : V \rightarrow W$ eine neue lineare Abbildung $T^* : W^* \rightarrow V^*$, wobei sich die Richtung der Abbildung umkehrt: Dualisierung ist ein Beispiel eines kontravarianten Funktors.

Wir haben in Definition 6.2.7 gesehen, dass eine Basis von V eine Basis von V^* hervorbringt, naemlich die duale Basis. Es sei nun $T : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung zwischen endlich-dimensionalen K -Vektorraeumen, und es seien \mathcal{B} und \mathcal{C} Basen von V und W . Wir koennen dann die Abbildungsmatrix $[T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}}$ von T bezueglich \mathcal{B} und \mathcal{C} betrachten. Was koennen wir ueber die Abbildungsmatrix $[T^*]_{\mathcal{B}^*}^{\mathcal{C}^*}$ sagen?

²¹Wir benutzen hier, dass zwei Elemente von V^* gleich sind, wenn sie fuer alle $v \in V$ den gleichen Wert annehmen.

Beispiel 6.3.8. Es sei $V = \mathbb{R}^2$, und es sei $T : V \rightarrow V$ die Abbildung, die bezueglich der Standardbasis $\mathcal{E} = (e_1, e_2)$ durch die Matrix $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & -1 \end{pmatrix}$ gegeben ist, d.h.

$$(34) \quad T(e_1) = e_1 + 3e_2 \quad \text{und} \quad T(e_2) = 2e_1 - e_2.$$

Es sei $B = [T^*]_{\mathcal{E}^*}^{\mathcal{E}^*}$, d.h. wenn $B = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$, dann gilt

$$(35) \quad T^*(e_1^*) = ae_1^* + ce_2^* \quad \text{und} \quad T^*(e_2^*) = be_1^* + de_2^*.$$

Um die Eintraege von B zu bestimmen, benutzen wir wieder die definierenden Eigenschaft der dualen Basis. Indem wir (35) auf e_1 und e_2 anwenden, erhalten wir

$$\begin{aligned} T^*(e_1^*)(e_1) &= a = (e_1^* \circ T)(e_1) = e_1^*(e_1 + 3e_2) = 1, \\ T^*(e_1^*)(e_2) &= c = (e_1^* \circ T)(e_2) = e_1^*(2e_1 - e_2) = 2, \\ T^*(e_2^*)(e_1) &= b = (e_2^* \circ T)(e_1) = e_2^*(e_1 + 3e_2) = 3, \\ T^*(e_2^*)(e_2) &= d = (e_2^* \circ T)(e_2) = e_2^*(3e_1 - e_2) = -1, \end{aligned}$$

mit anderen Worten $B = [T^*]_{\mathcal{E}^*}^{\mathcal{E}^*} = \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 2 & -1 \end{pmatrix}$. Faellt Ihnen was auf?

Theorem 6.3.9. Es seien V, W endlich-dimensionale K -Vektorraeume, und es sei $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$, bzw. $\mathcal{C} = (w_1, \dots, w_m)$, eine Basis for V , bzw. fuer W . Es sei $T : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung. Dann gilt

$$[T^*]_{\mathcal{B}^*}^{\mathcal{C}^*} = ([T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}})^t.$$

Proof. Es sei

$$A = [T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}$$

das heisst

$$T(v_j) = \sum_{i=1}^m a_{ij} w_i.$$

Was ist $T^*(w_k^*)$? Wir benutzen (26): es gilt²²

$$T^*(w_k^*) = [(T^*(w_k^*))(v_1)] \cdot v_1^* + \dots + [(T^*(w_k^*))(v_n)] \cdot v_n^*,$$

und von der Definition der dualen Abbildung T^* sehen wir, dass

$$T^*(w_k^*)(v_j) = w_k^*(T(v_j)) = w_k^*\left(\sum_{i=1}^m a_{ij} w_i\right) = a_{kj},$$

das heisst

$$T^*(w_k^*) = a_{k1}v_1^* + \dots + a_{kn}v_n^*.$$

Daher ist die Abbildungsmatrix $[T^*]_{\mathcal{B}^*}^{\mathcal{C}^*}$ gegeben durch

$$[T^*]_{\mathcal{B}^*}^{\mathcal{C}^*} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & \dots & a_{m1} \\ a_{12} & a_{22} & \dots & a_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{1n} & a_{2n} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} = A^t$$

□

Bemerkung 6.3.10. Es sei $A \in M_{m \times n}(K)$, und es sei $T_A : K^n \rightarrow K^m$ die bezueglich der Standardbasen \mathcal{E} und \mathcal{F} von K^n und K^m . Dann ist $[T_A]_{\mathcal{F}^*}^{\mathcal{E}^*} = A^t$. Vielleicht hilft uns das, um einen neuen Beweis zu finden fuer den Satz, dass

$$\text{Spaltenrang}(A) = \text{Spaltenrang}(A^t)?$$

Wir bemerken, dass $\text{Spaltenrang}(A) = \dim \text{im}(T_A)$ und $\text{Spaltenrang}(A^t) = \dim \text{im}(T_A^t)$. Was koennen wir ueber die Dimensionen dieser Raeume sagen?

²²Beachten Sie, dass $T^*(w_k^*) \in V^*$, d.h. wir koennen $T^*(w_k^*)$ an einem Element $v \in V$ auswerten und erhalten einen Skalar: $(T^*(w_k^*))(v) \in K$.

6.4. Annulatoren.

Definition 6.4.1. Es sei V ein Vektorraum und $U \leq V$ ein Unterraum. Der Annulator von U ist die Menge aller Linearformen von V , die alle Elemente von U auf Null abbilden, das heisst

$$U^\perp = \{\ell \in V^* : \ell(u) = 0_V \quad \forall u \in U\}.$$

Mit anderen Worten, ein Element $\ell \in V^*$ gehoert genau dann zu U^\perp , wenn $U \subseteq \ker(\ell)$.

Lemma 6.4.2. Es sei V ein Vektorraum und $U \leq V$. Dann ist U^\perp ein Unterraum von V^* .

Beispiel 6.4.3. Es gilt $\{0_V\}^\perp = V^*$.

Beispiel 6.4.4.

(1) Es sei $V = \mathbb{R}^3$ und $U = \left\langle \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix} \right\rangle$. Was ist U^\perp ?

Es sei $\mathcal{B} = (e_1, e_2, e_3)$ die Standardbasis von V , so dass $U = \langle e_1 - e_2 + e_3 \rangle$ und \mathcal{B}^* die Dualbasis. Dann ist

$$U^\perp = \{\ell \in V^* : \ell(e_1 - e_2 + e_3) = 0\}.$$

Mit anderen Worten, wenn $\ell = ae_1^* + be_2^* + ce_3^*$, dann gilt

$$\ell(e_1 - e_2 + e_3) = a - b + c = 0,$$

das heisst $b = a + c$, und

$$U^\perp = \{a(e_1^* + e_3^*) + c(e_2^* + e_3^*) : a, c \in \mathbb{R}\}.$$

(2) Es sei nun $W = \langle e_1 - e_2 + e_3, e_1 + e_2 \rangle \leq V$. Dann ist

$$W^\perp = \{\ell \in V^* : \ell(e_1 - e_2 + e_3) = 0 \quad \text{und} \quad \ell(e_1 + e_2) = 0\}.$$

Schreiben wir $\ell = ae_1^* + be_2^* + ce_3^*$, dann lauten die Bedingungen

$$a - b + c = 0 \quad \text{und} \quad a + b = 0,$$

das heisst $b = -a$ und $c = -2a$, und

$$W^\perp = \{a(e_1^* - e_2^* - 2e_3^*) : a \in \mathbb{R}\}.$$

Was faellt Ihnen auf, wenn Sie die Dimensionen betrachten?

Theorem 6.4.5. Es sei V ein Vektorraum und $U \leq V$. Dann gilt

$$\dim_K(U) + \dim_K(U^\perp) = \dim_K V.$$

Proof. Es sei $n = \dim_K V$ und $\dim_K U = k$. Waehle eine Basis u_1, \dots, u_k von U ; dann koennen wir sie bei Satz ... zu einer Basis $\mathcal{B} = (u_1, \dots, u_k, v_1, \dots, v_{n-k})$ von V erweitern. Es sei $\mathcal{B}^* = (u_1^*, \dots, u_k^*, v_1^*, \dots, v_{n-k}^*)$ die duale Basis. Dann gilt aufgrund der definierenden Eigenschaft von \mathcal{B}^* dass $v_j^*(u_i) = 0$ fuer all $1 \leq i \leq k$ und $1 \leq j \leq n - k$, mit anderen Worten, $v_j^* \in U^\perp \quad \forall 1 \leq j \leq n - k$ und daher $\langle v_1^*, \dots, v_{n-k}^* \rangle \subseteq U^\perp$.

Wir behaupten, dass v_1^*, \dots, v_{n-k}^* eine Basis von U^\perp ist. Natuerlich sind die Vektoren linear unabhengig, es ist daher zu zeigen, dass $\langle v_1^*, \dots, v_{n-k}^* \rangle = U^\perp$. Es sei $\lambda \in U^\perp$. Da \mathcal{B}^* eine Basis von V^* ist, gibt es Skalare $\alpha_1, \dots, \alpha_k, \beta_1, \dots, \beta_{n-k}$, so dass

$$\lambda = \alpha_1 u_1^* + \dots + \alpha_k u_k^* + \beta_1 v_1^* + \dots + \beta_{n-k} v_{n-k}^*.$$

Da $\lambda \in U^\perp$, gilt

$$\lambda(u_i) = \alpha_i = 0 \quad \forall 1 \leq i \leq k,$$

und wir erhalten

$$\lambda = \beta_1 v_1^* + \dots + \beta_{n-k} v_{n-k}^*,$$

was zu beweisen war. □

Satz 6.4.6. Es seien V, W endlich-dimensionale K -Vektorraeume und $T : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung. Dann gilt

- (1) $(\operatorname{im} T)^\perp = \ker(T^*);$
- (2) $(\ker T)^\perp = \operatorname{im}(T^*).$

Proof.

(1) Es sei $\lambda \in \ker(T^*)$. Dann ist per Definition $T^*(\lambda) = \lambda \circ T = 0_{V^*}$, das heisst

$$\lambda(T(v)) = 0 \quad \forall v \in V$$

und daher $\lambda \in (\text{im } T)^\perp$.

Umgekehrt sei $\lambda \in (\text{im } T)^\perp$, das heisst $\lambda(T(v)) = 0 \quad \forall v \in V$. Daraus folgt, dass $\lambda \circ T = 0_{V^*}$ und somit $T^*(\lambda) = 0_{V^*}$, das heisst $\lambda \in \ker(T^*)$.

(2) Es sei $\lambda \in \text{im}(T^*)$, das heisst, es gibt $\psi \in W^*$ so dass $T^*(\psi) = \lambda$. Also gilt

$$\lambda(v) = T^*(\psi)(v) = \psi(T(v)) = 0 \quad \forall v \in \ker(T),$$

das heisst $\lambda \in (\ker T)^\perp$ und daher $\text{im}(T^*) \subseteq (\ker T)^\perp$.

Anstatt die umgekehrte Inklusion zu zeigen, berechnen wir die Dimension von $\text{im}(T^*)$: es gilt

$$\begin{aligned} \dim \text{im}(T^*) &= \dim W - \dim \ker(T^*) \\ &= \dim W - \dim(\text{im } T)^\perp \\ &= \dim W - (\dim W - \dim \text{im}(T)) \\ &= \dim \text{im}(T) \\ &= \dim V - \dim \ker(T) \\ &= \dim(\ker T)^\perp \end{aligned}$$

und daher $\text{im}(T^*) = (\ker T)^\perp$. □

Korollar 6.4.7. *Es gilt*

- (1) T ist injektiv $\Leftrightarrow T^*$ ist surjektiv;
- (2) T ist surjektiv $\Leftrightarrow T^*$ ist injektiv.

Proof. Wir beweisen (1):

$$\begin{aligned} T \text{ ist injektiv} &\Leftrightarrow \ker(T) = \{0_V\} \\ &\Leftrightarrow (\ker T)^\perp = V^* \\ &\Leftrightarrow \text{im}(T^*) = V^* \\ &\Leftrightarrow T^* \text{ ist surjektiv} \end{aligned} \quad \square$$

Korollar 6.4.8. *Es sei $A \in M_{m \times n}(K)$. Dann gilt*

$$\text{Zeilenrang}(A) = \text{Spaltenrang}(A).$$

Proof. Es sei $T_A : K^n \rightarrow K^m$ wie in Definition 4.1.4. Dann gilt

$$\dim \text{im}(T_A) = \text{Spaltenrang}(A) \quad \text{und} \quad \dim \text{im}(T_A^*) = \text{Spaltenrang}(A^t) = \text{Zeilenrang}(A).$$

Nun haben wir in dem Beweis von Satz 6.4.6 gesehen, dass $\dim \text{im}(T_A) = \dim \text{im}(T_A^*)$. Das Resultat folgt. □

6.5. Reflexivitaet. Was passiert, wenn wir einen Vektorraum zweimal dualisieren?

Definition 6.5.1. *Es sei V ein Vektorraum. Dann ist der Bidualraum von V der K -Vektorraum $V^{**} = (V^*)^*$.*

Was koennen wir ueber V^{**} sagen?

Bemerkung 6.5.2.

- (1) Wenn V n -dimensional ist, dann ist V^{**} aufgrund von Satz 6.2.5 ebenfalls n -dimensional.
- (2) Per Definition sind Elemente von V^{**} lineare Abbildungen $V^* \rightarrow K$. Koennen wir solche Abbildungen konstruieren?

Beachte 6.5.3. *Es sei $v \in V$. Dann definiert die Auswertung an v eine Abbildung $V^* \rightarrow K$: explizit ist sie definiert durch*

$$\tau_V(v) : V^* \rightarrow K, \quad \ell \mapsto \ell(v).$$

*Eine einfache Rechnung zeigt, dass $\tau_V(v)$ linear ist, das heisst, sie ist ein Element von V^{**} .*

Theorem 6.5.4. *Es sei V ein endlich-dimensionaler K -Vektorraum. Dann definiert die Abbildung $\tau_V : V \rightarrow V^{**}$, $V \mapsto \tau(v)$ einen Isomorphismus zwischen V und seinem Bidualraum; wir sagen V ist reflexiv.*

Bemerkung 6.5.5. Wenn V unendlich-dimensional ist, dann definiert τ_V immer noch eine Abbildung $V \rightarrow V^{**}$, aber sie ist nicht unbedingt surjektiv.

Proof. Wir zeigen zunachst, dass τ_V eine lineare Abbildung ist.

(1) Es seien $v \in V$ und $\lambda \in K$. Dann ist $\tau(\lambda v)$ die Abbildung, die eine Linearform auf λv auswertet:

$$\tau_V(\lambda v)(\ell) = \ell(\lambda v) = \lambda \ell(v) = \lambda \tau_V(v)(\ell) \quad \forall \ell \in V^*,$$

das heisst $\tau_V(\lambda v) = \lambda \tau_V(v)$.

(2) Es seien $u, v \in V$. Dann gilt

$$\tau_V(u + v)(\ell) = \ell(u + v) = \ell(u) + \ell(v) = \tau_V(u)(\ell) + \tau_V(v)(\ell) \quad \forall \ell \in V^*,$$

und daher $\tau_V(u + v) = \tau_V(u) + \tau_V(v)$.

Wir zeigen nun, dass die Abbildung ein Isomorphismus ist. Da $\dim V^{**} = \dim V$, ist es ausreichend zu zeigen, dass τ_V injektiv ist. Nimm an, dass $\tau_V(v) = 0$, das heisst

$$\tau_V(v)(\ell) = \ell(v) = 0 \quad \forall \ell \in V^*.$$

Es sei $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$ eine Basis von V , und schreibe $v = \alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_n v_n$. Dann gilt

$$v_i^*(v) = \alpha_i = 0 \quad \forall 1 \leq i \leq n,$$

und daher $v = 0$. Daher ist τ_V injektiv und ein Isomorphismus. □

Lemma 6.5.6. Es sei V ein endlich dimensionaler K -Vektorraum, und es sei \mathcal{B} eine Basis. Es sei $\mathcal{B}^* = (v_1^*, \dots, v_n^*)$ die duale Basis, und $\mathcal{B}^{**} = ((v_1^*)^*, \dots, (v_n^*)^*)$ die duale Basis von \mathcal{B}^* . Dann gilt

$$\tau_V(v_i) = (v_i^*)^* \quad \forall i,$$

das heisst $\tau_V(\mathcal{B}) = \mathcal{B}^{**}$

Proof. Per Definition ist $\mathcal{B}^{**} = ((v_1^*)^*, \dots, (v_n^*)^*)$ diejenige Basis von V^{**} , fuer die gilt

$$(v_i^*)^*(v_j^*) = \delta_{ij}.$$

Wir muessen also zeigen, dass $\{\tau_V(v_1), \dots, \tau_V(v_n)\}$ diese Eigenschaft hat. Aber nun gilt

$$\tau_V(v_i)(v_j^*) = v_j^*(v_i) = \delta_{ij}.$$

□

Bemerkung 6.5.7. (1) Die Abbildung $\tau_V : V \rightarrow V^{**}$ definiert einen natuerlichen Isomorphismus zwischen V nach V^{**} : der Isomorphismus haengt nicht von der Wahl von Basen ab! Im Gegensatz dazu sind V und V^* nicht natuerlich isomorph: wir koennen zwar Isomorphismen zwischen den beiden Raeumen defineiren (wie zwischen allen K -Vektorraeumen, die die gleiche Dimension haben), aber diese haengen von der Wahl von Basen ab.

(2) Es seien V, W endlich dimensionale Vektorraume und $T : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung. Dann sind die Abbildungen τ_V und τ_W mit T kompatibel: wir haben ein kommutative Diagramm

$$\begin{array}{ccc} V & \xrightarrow{\tau_V} & V^{**} \\ T \downarrow & & \downarrow T^{**} \\ W & \xrightarrow{\tau_W} & W^{**} \end{array}$$

$V \mapsto V^{**}$ ist ein kovarianter Funktor. Nun seien \mathcal{B} und \mathcal{C} jeweilige Basen von V und W . Dann gilt

$$[T^{**}]_{\mathcal{C}^{**}}^{\mathcal{B}^{**}} = \left([T^*]_{\mathcal{B}^*}^{\mathcal{C}^*} \right)^t = \left(([T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}})^t \right)^t = [T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}},$$

7. QUOTIENTENRAEUME

7.1. Definition und erste Eigenschaften. Wir erinnern uns an die Definition eines Quotientenraums:

Definition 7.1.1. *Es sei V ein Vektorraum und $U \leq V$. Wir definieren den Quotientenraum V/U wie folgt: die Elemente von V/U sind die Nebenklassen von U in V , das heisst, sie sind die Untermengen von V von der Form $v + U$ fuer $v \in V$. Wir schreiben $[v]$ fuer die Klasse $v + U$. Die Addition und Skalarmultiplikation sind definiert durch*

$$[y_1] + [v_2] = [v_1 + v_2] \quad \text{und} \quad \alpha[v] = [\alpha v].$$

Bemerkung 7.1.2. *Die Nebenklassen von U in V sind die Aequivalenzklassen folgender Aequivalenzrelation auf V : " $v \sim w$ genau dann, wenn $v - w \in U$ ". Diese bedeutet, dass jedes $v \in V$ in genau einer Nebenklasse liegt, naemlich in der Nebenklasse $[v] = v + U$. Wir nennen v ein repraesentierendes Element dieser Nebenklasse; das bedeutet, zwei Element $v, v' \in V$ repraesentieren die selbe Nebenklasse genau dann, wenn $v - v' \in U$.*

Wir muessen zeigen, dass Addition und Multiplikation wohldefiniert sind:

- (1) es seien $v_1, v'_1, v_2, v'_2 \in V$, und nimm an, dass $[v_1] = [v'_1]$ und $[v_2] = [v'_2]$. Wir muessen zeigen, dass

$$[v_1] + [v_2] = [v'_1] + [v'_2] \Leftrightarrow [v_1 + v_2] = [v'_1 + v'_2] \Leftrightarrow v_1 + v_2 - v'_1 - v'_2 \in U.$$

Doch das ist klar, da $v_1 - v'_1 \in U$ und $v_2 - v'_2 \in U$.

- (2) Es seien $v, v' \in V$ so dass $[v] = [v']$, und es sei $\alpha \in K$. Wir muessen zeigen, dass

$$\alpha[v] = \alpha[v'] \Leftrightarrow [\alpha v] = [\alpha v'] \Leftrightarrow \alpha(v - v') \in U.$$

Doch da $v - v' \in U$ und U ein Unterraum ist, gilt $\alpha(v - v') \in U$.

Satz 7.1.3. *Mit dieser Definition der Addition und Skalar-Multiplikation ist U/V ein Vektorraum.*

Proof. Uebung.²³ □

Satz 7.1.4. *Es sei $q_U : V \rightarrow U$ die Abbildung*

$$q_U(v) = [v];$$

sie heisst die kanonische Quotientenabbildung. Dann ist q_U linear, und es gilt $\ker(q_U) = U$ und $\text{im}(q_U) = V/U$.

Proof. Wir zeigen zunaechst, dass die Abbildung linear ist:

$$\begin{aligned} q_U(v_1 + \alpha v_2) &= [v_1 + \alpha v_2] \\ &= [v_1] + \alpha[v_2] \quad \text{aufgrund der Definition von Addition und Skalar-Multiplikation} \\ &= q_U(v_1) + \alpha q_U(v_2). \end{aligned}$$

Es sei nun $x \in V/U$. Dann ist x eine Aequivalenzklasse der Aequivalenzrelation in Bemerkung 7.1.2, und es gibt $v \in V$ so dass $x = [v]$, das heisst $x = q_U(v)$. Daher ist q_U surjektiv.

Nimm nun an, dass $v \in \ker(q_U)$. Dann gilt

$$\begin{aligned} q_U(v) = [v] = 0_{V/U} &\Leftrightarrow v \sim 0_V \\ &\Leftrightarrow v - 0_V \in U \\ &\Leftrightarrow v \in U, \end{aligned}$$

und daher $\ker(q_U) \subseteq U$. Umgekehrt sei $u \in U$. Dann gilt $u \sim 0_V$ da $u = u - 0_V \in U$ und daher $q_U(u) = [u] = 0_{V/U}$. Daher gilt $U \subseteq \ker(q_U)$ und daher $\ker(q_U) = U$. □

Korollar 7.1.5. *Es sei V ein endlich-dimensionaler Vektorraum und $U \leq V$. Dann ist V/U endlich-dimensional, und es gilt*

$$\dim_K V/U = \dim_K V - \dim_K U.$$

Proof. Folgt unmittelbar von Satz 7.1.4 und Theorem 4.2.9. □

Alternativ koennen wir dieses Korollar ebenfalls mit Hilfe eines Komplements des Unterraums U beweisen:

²³Was ist die additive Identitaet?

Satz 7.1.6. Es sei V ein Vektorraum und $U \leq V$. Es sei $W \leq V$ ein Komplement zu U . Dann definiert die Abbildung $w \mapsto [w]$ einen natuerlichen Isomorphismus

$$\gamma : W \xrightarrow{\cong} V/U.$$

Proof. Es sei $\gamma = q_U|_W$. Dann ist γ injektiv: nimm an, dass $w \in \ker(\gamma)$, das heisst $[w] = 0_{V/U}$, mit anderen Worten $w \in U$. Aber $U \cap W = \{0_V\}$, und daher $w = 0_V$.

Weiterhin ist γ surjektiv:²⁴ es sei $x \in V/U$, und es sei $v \in V$ ein repraesentierendes Element von x . Da $v = U + W$, $\exists u \in U, w \in W$ so dass $v = u + w$. Aber dann gilt $[v] = [w]$, und daher $\gamma(w) = [v] = x$. \square

Übung 7.1.7. Beschreibe die inverse Abbildung $\gamma^{-1} : V/U \longrightarrow W$.

Bemerkung 7.1.8. Insbesondere bildet γ eine Basis von W auf einer Basis von V/U ab: wenn w_1, \dots, w_k eine Basis von W ist, dann ist $[w_1], \dots, [w_k]$ eine Basis von V/U , und daher erhalten wir einen alternativen Beweis, dass

$$\dim V/U = \dim W = \dim V - \dim U.$$

Bemerkung 7.1.9. Wir haben bereits gesehen, dass abgesehen von trivialen Faellen das Komplement eines Vektorraums nicht kanonisch ist. Wenn wir aber ein Komplement ausgewaehlt haben, dann ist der Isomorphismus in Satz 7.1.6 kanonisch.

Weiterhin gibt es eine Korrespondenz zwischen bestimmten Unterraemen von V und Unterraemen von V/U :

Satz 7.1.10. Die Abbildung

$$\begin{aligned} \{W \subseteq V : U \leq W \leq V\} &\rightarrow \{X \leq V/U\} \\ W &\mapsto W/U \end{aligned}$$

ist eine 1 : 1 Korrespondenz zwischen Unterraemen von V , die U enthalten, und Unterraemen von V/U .

Proof. Übung. \square

7.2. Die Isomorphismensatze. Quotientenraeme tauchen in the linearen Algebra (und auch sonst) ueberall auf. Zum Beispiel koennen wir Theorem 4.2.9 folgendermassen verfeinern:

Theorem 7.2.1. (Erster Isomorphiesatz) Es seien V, W K -Vektorraeme und $T : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung. Definiere eine neue Abbildung

$$\bar{T} : V/\ker(T) \rightarrow \text{im}(T)$$

wie folgt: fuer ein Element $x \in V/\ker(T)$ waehle ein representierendes Element $v \in V$ und definiere $\bar{T}(x) = T(v)$.²⁵ Dann gilt

- (1) \bar{T} eine wohldefinierte lineare Abbildung;
- (2) $\bar{T} : V/\ker(T) \rightarrow \text{im}(T)$ ist ein Isomorphismus;
- (3) folgendes Diagramm ist kommutativ:

$$\begin{array}{ccc} V & \xrightarrow{T} & W \\ \downarrow q_{\ker(T)} & & \uparrow \subseteq \\ V/\ker(T) & \xrightarrow{\bar{T}} & \text{im}(T) \end{array}$$

Proof. (1) Es seien v_1, v_2 representierende Elemente von x . Dann gilt $q_{\ker(T)}(v_1) = q_{\ker(T)}(v_2) = x$, das heisst $v_1 - v_2 \in \ker(T)$ und daher $T(v_1) = T(v_2)$. Deshalb ist \bar{T} wohldefiniert.

\bar{T} ist linear: es seien $x = [v_1], y = [v_2]$ und $\alpha \in K$. Dann gilt

$$\begin{aligned} \bar{T}([v_1] + \alpha[v_2]) &= \bar{T}([v_1 + \alpha v_2]) \\ &= T(v_1 + \alpha v_2) \\ &= T(v_1) + \alpha T(v_2) \\ &= \bar{T}([v_1]) + \alpha \bar{T}([v_2]). \end{aligned}$$

²⁴Sie koennen alternativ mit Hilfe der Dimensionen argumentieren.

²⁵Wir nennen \bar{T} die von T induzierte Abbildung.

- (2) \bar{T} ist injektiv: Es sei $x \in \ker(\bar{T})$, und es sei $v \in V$ ein representierendes Element von x . Dann gilt aufgrund der Definition

$$\bar{T}(x) = T(v) = 0_W,$$

das heisst $v \in \ker(T)$ und daher $x = [v] = 0_{V/\ker(T)}$.

\bar{T} ist surjektiv: Aufgrund der Definition von \bar{T} ist es offensichtlich, dass $\text{im}(\bar{T}) \subseteq \text{im}(T)$. Es sei $w \in \text{im}(T)$. Dann gibt es ein $v \in V$ so dass $T(v) = w$. Aber dies bedeutet, dass

$$\bar{T}([v]) = T(v) = w,$$

und daher $w \in \text{im}(\bar{T})$.

- (3) Die Kommutativitaet des Diagrams folgt unmittelbar von den Definitionen. □

Theorem 7.2.2. (Zweiter Isomorphiesatz) *Es sei V ein Vektorraum und $U, W \leq V$. Es sei*

$$i : U \hookrightarrow V \xrightarrow{q_W} V/W, \quad u \mapsto q_W(u)$$

Dann ist $\ker(i) = U \cap W$, und i induziert einen Isomorphismus

$$\bar{i} : U/(U \cap W) \xrightarrow{\cong} (U + W)/W.$$

Proof. Es folgt von Theorem 7.2.1, dass i einen Isomorphismus

$$\bar{i} : U/\ker(i) \xrightarrow{\cong} \text{im}(i)$$

induziert. Wir zeigen zunaechst, dass $\ker(i) = U \cap W$.

Es sei $u \in \ker(i)$. Dann gilt $i(u) = 0_{V/W}$, das heisst $u \in W$ und daher $u \in U \cap W$. Umgekehrt gilt $U \cap W \subseteq \ker(i)$, und daher $\ker(i) = U \cap W$.

Um den Beweis abzuschliessen muessen wir zeigen, dass $\text{im}(i) = (U + W)/W$.²⁶ Es ist klar, dass $\text{im}(i) \subseteq (U + W)/W$. Umgekehrt sei $x \in (U + W)/W$. Dann gibt es ein repraesentierendes Element $u \in U$ von x , und es gilt $i(u) = x$. □

Was passiert, wenn wir zwei Unterraume von V betrachten, von dem einer in dem anderen enthalten ist?

Satz 7.2.3. *Es sei V ein Vektorraum und $U \leq W \leq V$ zwei Unterraume. Dann gibt es eine natuerliche lineare Abbildung $\varpi_{U,W} : V/U \rightarrow V/W$, gegeben durch $v + U \mapsto v + W$, so dass folgendes Diagramm kommutiert:*

$$\begin{array}{ccc} & V & \\ & \swarrow q_U & \searrow q_W \\ V/U & \xrightarrow{\varpi_{U,W}} & V/W \end{array}$$

Proof. Eine einfache Rechnung zeigt, dass $\varpi_{U,W}$ linear ist. Die Kommutativitaet des Diagramms ist eine Uebung. □

Theorem 7.2.4. (Dritter Isomorphiesatz) *Es sei V ein Vektorraum und $U \leq W \leq V$ zwei Unterraume. Dann ist $\ker(\varpi_{U,W}) = W/U$, und die induzierte Abbildung $\overline{\varpi_{U,W}}$ definiert einen Isomorphismus*

$$\overline{\varpi_{U,W}} : (V/U)/(W/U) \xrightarrow{\cong} V/W.$$

Proof. Wir wenden Theorem 7.2.1 auf die induzierte Abbildung

$$\varpi_{U,W} : V/U \longrightarrow V/W$$

an. Die Abbildung ist surjektiv: Es sei $x \in V/W$ und v ein repraesentierendes Element von x . Dann wird die Nebenklasse $v + U$ auf x abgebildet.

Wir bestimmen nun den Kern von $\varpi_{U,W}$: es ist klar, dass $W/U \subseteq \ker(\varpi_{U,W})$. Es sei nun $x \in V/U$ im Kern von $\varpi_{U,W}$, und es sei v ein repraesentierendes Element von x , d.h. $q_U(v) = x$. Dann gilt aufgrund von Satz 7.2.3

$$\varpi_{U,w}(x) = q_W(v),$$

und wir wissen, dass $q_W(v) = 0_{V/W}$ genau dann, wenn $v \in W$. Es folgt, dass $x = q_U(v) \in W/U$, und daher $\ker(\varpi_{U,W}) \subseteq W/U$.

²⁶Beachte, dass $(U + W)/W$ ein Unterraum von V/W ist.

Es folgt daher von Theorem 7.2.1, dass $\overline{\varpi}_{U,W}$ einen Isomorphismus

$$(V/U)/(W/U) \xrightarrow{\cong} V/W$$

definiert. □

7.3. Weitere Anwendungen. Weiterhin koennen wir den Annulator eines Unterraums mit Hilfe von Quotientenraeumen beschreiben:

Satz 7.3.1. *Es sei V ein K -Vektorraum und $U \leq V$ ein Unterraum. Dann gibt es einen natuerlichen Isomorphismus*

$$\alpha : (V/U)^* \xrightarrow{\cong} U^\perp.$$

Proof. Wir definieren zunaechst die Abbildung α : Es sei $\ell \in (V/U)^*$. Dann ist

$$\ell \circ q_U : V \rightarrow K$$

eine Linearform auf V , und es gilt $U \subseteq \ker(\ell \circ q_U)$, das heisst $\ell \circ q_U \in U^\perp$. Definieren $\alpha(\ell) = \ell \circ q_U$; eine einfache Rechnung zeigt, dass α linear ist. Da $(V/U)^*$ und U^\perp die gleiche Dimension haben, ist es ausreichend zu zeigen, dass α injektiv ist. Dieses ist eine leichte Uebung.

Alternativ koennen Sie die inverse Abbildung konstruieren: es sei $\lambda \in U^\perp$, i.e. $\lambda \in V^*$ so dass $U \leq \ker(\lambda)$. Aufgrund von Theorem 7.2.1 wissen wir, dass λ eine Abbildung

$$\overline{\lambda} : V/\ker(\lambda) \rightarrow K$$

induziert. Da $U \leq \ker(\lambda)$, gibt es laut Satz 7.2.3 eine natuerliche Abbildung

$$\varpi_{U,\ker(\lambda)} : V/U \longrightarrow V/\ker(\lambda).$$

Definiere

$$\alpha^{-1}(\lambda) = \overline{\lambda} \circ \varpi_{U,\ker(\lambda)} : V/U \rightarrow K.$$

Eine einfache Rechnung zeigt, dass α^{-1} die inverse Abbildung von α ist. □

8. DETERMINANTEN

8.1. Ein erstes Beispiel.

Lemma 8.1.1. *Es sei $A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in M_{2 \times 2}(K)$. Dann ist A genau dann invertierbar, wenn $ad - bc \neq 0$, und in diesem Fall gilt*

$$A^{-1} = \frac{1}{ad - bc} \begin{pmatrix} d & -b \\ -c & a \end{pmatrix}.$$

Definition 8.1.2. *Die Groesse $(ad - bc)$ heisst die Determinante von A , und wir schreiben*

$$\det(A) = ad - bc.$$

Beachte 8.1.3. *Schreibe $A = (\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2)$, wobei $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ die Spaltenvektoren sind. Die Determinante hat folgende Eigenschaften:*

- (1) $\det(I_2) = 1$;
- (2) $\det(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2) = -\det(\mathbf{v}_2, \mathbf{v}_1)$;
- (3) $\det(\mathbf{v}_1 + \mathbf{u}, \mathbf{v}_2) = \det(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2) + \det(\mathbf{u}, \mathbf{v}_2)$ und $\det(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2 + \mathbf{u}) = \det(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2) + \det(\mathbf{v}_1, \mathbf{u})$;
- (4) $\det(\lambda A) = \lambda^2 \det(A)$ fuer all $\lambda \in K$;
- (5) $\det(\lambda \mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2) = \det(\mathbf{v}_1, \lambda \mathbf{v}_2) = \lambda \det(A)$;
- (6) $\det A = \det A^t$.

Diese Eigenschaften sind charakteristisch fuer eine Determinantenfunktion.

Um Determinanten fuer $(n \times n)$ -Matrizen zu definieren, benoetigen wir das Konzept von *Permutationen*

8.2. Permutationen.

Definition 8.2.1. Es sei $n \geq 1$. Eine Permutation der Menge $\{1, \dots, n\}$ ist eine bijektive Abbildung

$$\sigma : \{1, \dots, n\} \longrightarrow \{1, \dots, n\}.$$

Wir schreiben σ als $(\sigma(1), \sigma(2), \dots, \sigma(n))$.

Eine Transposition ist eine Permutation, die genau zwei Elemente vertauscht und alle anderen Elemente auch sich selber abbildet.

Beispiel 8.2.2. Es sei $n = 4$. Dann ist $(1, 3, 2, 4)$ eine Transposition, aber $(2, 3, 1, 4)$ ist keine Transposition.

Satz 8.2.3. Die Permutationen auf der Menge $\{1, \dots, n\}$ bilden eine Gruppe S_n unter Komposition von Funktionen; die Identitaet ist die Identitaetsfunktion, die jedes Element auf sich selber abbildet. Die Gruppe S_n heisst die symmetrische Gruppe vom Grad n ; sie hat $n!$ Elemente.

Proof. Uebung. □

Beachte 8.2.4. Es sei $\tau \in S_n$ eine Transposition. Dann gilt $\tau^2 = \text{id}$, das heisst τ ist sein eigenes Inverses.

Beispiel 8.2.5.

- (1) Es sei $n = 4$ und $\sigma = (3, 1, 2, 4)$. Dann ist $\sigma^{-1} = (2, 3, 1, 4)$.
- (2) Es sei $\tau = (4, 1, 2, 3)$. Dann gilt

$$\sigma \circ \tau = (4, 3, 1, 3)$$

$$\tau \circ \sigma = (2, 4, 1, 3).$$

Satz 8.2.6. Jede Permutation kann als die Verknuepfung von endlich vielen Transpositionen geschrieben werden.

Proof. Es sei $\sigma = (\sigma(1), \dots, \sigma(n))$. Wenn $\sigma(1) \neq 1$, dann sei τ_1 die Transposition, die 1 und $\sigma(1)$ vertauscht; ansonsten sei τ_1 die Identitaet. Beachte, dass $\tau_1\sigma(1) = 1$.

Wenn $\tau_1\sigma(2) \neq 2$, dann sei τ_2 die Transposition, die 2 und $\tau_1\sigma(2)$ vertauscht; ansonsten sei τ_2 die Identitaet. Dann gilt $\tau_2\tau_1\sigma(1) = 1$ und $\tau_2\tau_1\sigma(2) = 2$. Wiederholen Sie diesen Prozess bis τ_n . Dann gilt

$$\tau_n\tau_{n-1}\cdots\tau_1\sigma = \text{id} \quad \Rightarrow \quad \sigma = \tau_1\tau_2\cdots\tau_n,$$

da $\tau_i^2 = \text{id} \forall i$ aufgrund von Beobachtung 8.2.4. □

Beispiele 8.2.7.

- (1) Es sei $\sigma = (3, 4, 1, 2) \in S_4$. Da $\sigma(1) = 4$, nehmen wir $\tau_1 = (3, 2, 1, 4)$. Dann gilt

$$\tau_1\sigma = (1, 4, 3, 2).$$

Wir nehmen $\tau_2 = (1, 4, 3, 2)$; dann gilt $\tau_2\tau_1\sigma = \text{id}$ und daher

$$\sigma = (3, 2, 1, 4)(1, 4, 3, 2).$$

- (2) Es sei $\sigma = (3, 1, 2, 4, 5) \in S_5$. Dann gilt

$$\begin{aligned} \sigma &= (1, 3, 2, 4, 5)(3, 2, 1, 4, 5) \\ &= (1, 2, 3, 5, 4)(1, 3, 2, 4, 5)(3, 2, 1, 4, 5)(1, 2, 3, 5, 4), \end{aligned}$$

die Zerlegung einer Permutation in Transpositionen ist also nicht eindeutig!

Immerhin ist die Paritaet der Anzahl von Transposition eindeutig bestimmt:

Satz 8.2.8. Es sei $\sigma \in S_n$ und

$$\sigma = \tau_1 \cdots \tau_k = \tau'_1 \cdots \tau'_m$$

verschiedene Zerlegungen von σ in Produkte von Transpositionen. Dann gilt

$$k \cong m \pmod{2}.$$

Proof. Spaeter - siehe Korollar 8.3.15. □

Beispiele 8.2.9.

- (1) Jede Transposition in S_n ist ungerade.
- (2) Das Element $\sigma \in S_4$ aus Beispiel 8.2.7 (1) ist gerade.

Bemerkung 8.2.10. Die Menge aller geraden Permutationen in S_n ist eine Untergruppe von S_n ; sie heisst die alternierende Untergruppe A_n .

Die Gruppe A_5 ist die kleinste nicht auflösbare Gruppe: damit werden Sie sich beschäftigen, wenn Sie im nächsten Jahr Galois Theorie lernen.

Definition 8.2.11. Eine Permutation $\sigma \in S_n$ heisst gerade (bzw. ungerade), wenn es sich als Produkt einer geraden (bzw. ungeraden) Anzahl von Transpositionen schreiben lässt. Wir definieren das Vorzeichen einer Permutation σ als

$$\text{sgn}(\sigma) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } \sigma \text{ gerade ist} \\ -1 & \text{wenn } \sigma \text{ ungerade ist.} \end{cases}$$

Lecture 24

8.3. Determinantenfunktionen.

Notation 8.3.1. Es sei $A \in M_{n \times n}(K)$; wir schreiben $A = (\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n)$, wobei \mathbf{v}_i der i te Spaltenvektor ist.

Definition 8.3.2. Eine Funktion $f : M_{n \times n}(K) \rightarrow K$ ist n -linear (in den Spaltenvektoren), wenn $\forall 1 \leq i \leq n$ f eine lineare Funktion der i ten Spalte ist, wenn die die anderen Spalten fixiert werden. Mit anderen Worten, f ist n -linear, wenn

$$\begin{aligned} f(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_i + \mathbf{u}, \dots, \mathbf{v}_n) &= f(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_i, \dots, \mathbf{v}_n) + f(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{u}, \dots, \mathbf{v}_n), \\ f(\mathbf{v}_1, \dots, \lambda \mathbf{v}_i, \dots, \mathbf{v}_n) &= \lambda f(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_i, \dots, \mathbf{v}_n) \end{aligned}$$

für alle $A = (\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n) \in M_{n \times n}(K)$, $\mathbf{u} \in K^n$ und $\lambda \in K$.

Beispiele 8.3.3.

- (1) $\det : M_{2 \times 2}(K) \rightarrow K$ ist bilinear.
- (2) Es sei $A = (a_{ij}) \in M_{n \times n}(K)$. Die Funktion

$$f : A \mapsto a_{11}a_{22} \dots a_{nn}$$

ist n -linear.

Lemma 8.3.4. Es seien $f, g : M_{n \times n}(K) \rightarrow K$ n -linear, und es seien $\alpha, \beta \in K$. Dann ist auch $\alpha f + \beta g$ n -linear.

Proof. Übung. □

Definition 8.3.5. Eine Funktion $f : M_{n \times n}(K) \rightarrow K$ ist alternierend, wenn folgende Eigenschaft erfüllt ist: wenn $\mathbf{v}_i = \mathbf{v}_{i+1}$ für ein $1 \leq i < n$, dann gilt

$$f(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n) = 0.$$

Beispiel 8.3.6. $\det : M_{2 \times 2}(K) \rightarrow K$ ist alternierend.

Lemma 8.3.7. Es sei $f : M_{n \times n}(K) \rightarrow K$ n -linear und alternierend. Dann gilt

- (1) $f(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_i, \mathbf{v}_{i+1}, \dots, \mathbf{v}_n) = -f(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_{i+1}, \mathbf{v}_i, \dots, \mathbf{v}_n)$;
- (2) wenn $\mathbf{v}_i = \mathbf{v}_j$ für $i \neq j$, dann gilt $f(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_i, \dots, \mathbf{v}_j, \dots, \mathbf{v}_n) = 0$;
- (3) $f(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_i, \dots, \mathbf{v}_j, \dots, \mathbf{v}_n) = -f(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_j, \dots, \mathbf{v}_i, \dots, \mathbf{v}_n)$.

Proof. (1) Es gilt

$$\begin{aligned} f(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_i + \mathbf{v}_{i+1}, \mathbf{v}_i + \mathbf{v}_{i+1}, \dots, \mathbf{v}_n) &= f(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_i, \dots, \mathbf{v}_i, \dots, \mathbf{v}_n) + f(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_i, \mathbf{v}_{i+1}, \dots, \mathbf{v}_n) \\ &\quad + f(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_{i+1}, \mathbf{v}_i, \dots, \mathbf{v}_n) + f(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_{i+1}, \mathbf{v}_{i+1}, \dots, \mathbf{v}_n) \\ &= f(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_i, \mathbf{v}_{i+1}, \dots, \mathbf{v}_n) + f(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_{i+1}, \mathbf{v}_i, \dots, \mathbf{v}_n) \\ &= 0 \end{aligned}$$

und daher

$$f(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_i, \mathbf{v}_{i+1}, \dots, \mathbf{v}_n) = -f(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_{i+1}, \mathbf{v}_i, \dots, \mathbf{v}_n).$$

- (2) Nimm nun an, dass $A = (\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n)$ eine Matrix ist, für die Spalten \mathbf{v}_i und \mathbf{v}_j gleich sind. Wir können dann nebeneinanderliegende Spalten so lange vertauschen, bis wir eine Matrix A' erhalten, die zwei gleiche nebeneinanderliegende Spalten hat; aufgrund von (1) wissen wir, dass sich $f(A)$ und $f(A')$ höchstens durch das Vorzeichen unterscheiden. Aber da f alternierend ist, gilt $f(A') = 0$ und daher $f(A) = 0$.

(3) Der Beweis ist aehnlich wie (1). □

Definition 8.3.8. Eine Funktion $D : M_{n \times n}(K) \rightarrow K$ ist eine Determinantenfunktion, wenn sie folgende Eigenschaften hat:

- (1) sie ist n -linear;
- (2) sie ist alternierend;
- (3) $D(\mathbf{1}_n) = 1$.

Frage: Gibt es Determinantenfunktionen ueberhaupt?

Lemma 8.3.9. Die Determinante fuer (2×2) -Matrizen

$$\det : M_{2 \times 2}(K) \rightarrow K$$

ist eine Determinantenfunktion, und sie ist die einzige Determinantenfunktion auf $M_{2 \times 2}(K)$.

Proof. Die Axiome der Determinantenfunktion sind leicht zu ueberpruefen; wir zeigen die Eindeutigkeit.

Es sei $D : M_{2 \times 2}(K) \rightarrow K$ eine Determinantenfunktion, und es sei $A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$. Wir wollen zeigen, dass $D(A) = ad - bc$. Es seien $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$ die Standardbasis von K^2 , und wir schreiben $A = (a\mathbf{e}_1 + c\mathbf{e}_2, b\mathbf{e}_1 + d\mathbf{e}_2)$. Dann gilt aufgrund der Axiome

$$\begin{aligned} D(A) &= D(a\mathbf{e}_1 + c\mathbf{e}_2, b\mathbf{e}_1 + d\mathbf{e}_2) \\ &= ab \cdot D(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_1) + ac \cdot D(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2) + bc \cdot D(\mathbf{e}_2, \mathbf{e}_1) + cd \cdot D(\mathbf{e}_2, \mathbf{e}_2) \\ &= ac \cdot D(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2) + bc \cdot D(\mathbf{e}_2, \mathbf{e}_1) \\ &= (ad - bc) \cdot D(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2) \\ &= (ad - bc) \cdot D(I_2) \\ &= ad - bc. \end{aligned}$$

□

Wir wollen nun folgendes zeigen:

- (1) $\forall n \geq 1$ gibt es eine Determinantenfunktion.
- (2) $\forall n \geq 1$ ist die Determinantenfunktion eindeutig bestimmt; das heisst, es gibt *genau eine*.

Wir zeigen zunaechst die Existenz:

Theorem 8.3.10. Es sei $n \geq 1$. Dann gibt es eine Determinantenfunktion $D : M_{n \times n}(K) \rightarrow K$.

Wir brauchen fuer den Beweis folgendes Konzept:

Notation 8.3.11. Sei $A = (a_{ij})_{1 \leq i, j \leq n} \in M_{n \times n}(K)$. Fuer $1 \leq i, j \leq n$ sei $A_{i,j}$ die $(n-1, n-1)$ -Matrix, die wir von A erhalten, indem wir die i te Zeile und j te Spalte herausnehmen.

Beispiele 8.3.12.

(1) Sei $A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$. Dann ist

$$A_{1,1} = d, \quad A_{1,2} = c, \quad A_{2,1} = b, \quad A_{2,2} = a.$$

(2) Sei $B = \begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 \\ 2 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -2 \end{pmatrix}$. Was sind $B_{3,1}$ und $B_{2,3}$?

Um Theorem 8.3.10 zu beweisen, brauchen wir folgenden Satz:

Satz 8.3.13. Es sei $n \geq 2$ und f eine $(n-1)$ -lineare alternierende Funktion. Fuer $1 \leq i \leq n$ definiere die Funktion

$$E_i : M_{n \times n}(K) \rightarrow K, \quad A = (a_{ij}) \mapsto \sum_{j=1}^n (-1)^{i+j} a_{ij} f(A_{i,j}).$$

Dann ist E_i n -linear und alternierend.

Proof. Wir zeigen zunachst, dass E_i n -linear ist. Es sei $1 \leq j \leq n$, und betrachte die Funktion

$$e_{ij} : A \mapsto a_{ij} f(A_{i,j});$$

wir muessen zeigen, dass sie n -linear ist: dann folgt von Lemma 8.3.4, dass E_i ebenfalls n -linear ist. Betrachte e_{ij} als eine Funktion der k ten Spalte.

- wenn $k \neq j$, dann ist a_{ij} unabhängig von k , und $f(A_{i,j})$ ist linear in der k ten Spalte, und daher ist e_{ij} linear als eine Funktion der k ten Spalte.
- wenn $k = j$, dann ist $f(A_{i,j})$ unabhängig von k , und $a_{ij} = a_{ik}$ ist linear in der k ten Spalte, und daher ist e_{ij} linear als eine Funktion der k ten Spalte.

Es folgt daher von Lemma 8.3.4, dass E_i n -linear ist.

Nimm nun an, dass $\mathbf{v}_k = \mathbf{v}_{k+1}$ fuer $1 \leq k < n$. Dann hat fuer all $j \neq k, k+1$ die Matrix $A_{i,j}$ zwei gleiche Spalten, und daher gilt $f(A_{i,j}) = 0$, da f alternierend ist, das heisst

$$E_i(A) = (-1)^{i+k} a_{ik} f(A_{i,k}) + (-1)^{i+k+1} a_{i,k+1} f(A_{i,k+1}).$$

Aber $A_{i,k} = A_{i,k+1}$ und $a_{ik} = a_{i,k+1}$, und daher $E_i(A) = 0$. □

Wir koennen nun Theorem 8.3.10 beweisen.

Proof. Wir zeigen die Existenz durch Induktion nach n . Fuer $n = 1$ sei D die Identitaet, und fuer $n = 2$ die Determinante.

Nimm nun an, dass wir $D_{n-1} : M_{n-1,n-1}(K) \rightarrow K$ definiert haben. Es sei $A = (a_{ij})_{1 \leq i,j \leq n} \in M_{n \times n}(K)$. Waehle nun ein $1 \leq i \leq n$. Definiere

$$D_n^{(i)}(A) = (-1)^{i+1} a_{i1} D_{n-1}(A_{i,1}) + \dots + (-1)^{i+n} a_{in} D_{n-1}(A_{i,n}).$$

Wir zeigen, dass $D_n^{(i)}$ eine Determinantenfunktion ist.²⁷ Es folgt von Satz 8.3.10, dass D_n n -linear und alternierend ist.

Wir muessen nun zeigen, dass $D_n^{(i)}(\mathbf{1}_n) = 1$. Beachte, dass

$$(\mathbf{1}_n)_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{wenn } i \neq j \\ 1 & \text{wenn } i = j. \end{cases}$$

Es folgt daher, dass

$$D_n^{(i)}(\mathbf{1}_n) = (-1)^{i+i} D_{n-1}(\mathbf{1}_{n-1}) = 1. \quad \square$$

Beispiel 8.3.14. Fuer $n = 3$ erhalten wir drei Determinantenfunktionen. Es sei $A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$.

Dann sind die drei Determinantenfunktionen gegeben durch

$$\begin{aligned} D_3^{(1)} : A &\mapsto a_{11} \det \begin{pmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} - a_{12} \det \begin{pmatrix} a_{21} & a_{23} \\ a_{31} & a_{33} \end{pmatrix} + a_{13} \det \begin{pmatrix} a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{pmatrix}, \\ D_3^{(2)} : A &\mapsto -a_{21} \det \begin{pmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} + a_{22} \det \begin{pmatrix} a_{11} & a_{13} \\ a_{31} & a_{33} \end{pmatrix} - a_{23} \det \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{31} & a_{32} \end{pmatrix}, \\ D_3^{(3)} : A &\mapsto a_{31} \det \begin{pmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{22} & a_{23} \end{pmatrix} - a_{32} \det \begin{pmatrix} a_{11} & a_{13} \\ a_{21} & a_{23} \end{pmatrix} + a_{33} \det \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

As Korollar erhalten wir einen sehr eleganten Beweis von Satz 8.2.8:

Lecture 25

Korollar 8.3.15. *Es sei $\sigma \in S_n$ und*

$$\sigma = \tau_1 \cdots \tau_k = \tau'_1 \cdots \tau'_m$$

verschiedene Zerlegungen von σ in Produkte von Transpositionen. Dann gilt

$$k \cong m \pmod{2}.$$

²⁷Dieses gilt fuer jedes $1 \leq i \leq n$, d.h. wir bekommen i Determinantenfunktionen! Wir werden spaeter sehen, dass sie alle gleich sind.

Proof. Es sei $D : M_{n \times n}(K) \rightarrow K$ eine Determinantenfunktion, und es sei $\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_n$ die Standardbasis von K^n . Wenn σ durch die Verknüpfung von k Transpositionen erhalten werden kann, dann an die Einheitsmatrix $\mathbf{1}_n$ von der Matrix $(\mathbf{e}_{\sigma(1)}, \dots, \mathbf{e}_{\sigma(n)})$ durch k Vertauschungen von Spalten konstruiert werden. Da das Vertauschen von Spalten das Vorzeichen des Wertes der Determinantenfunktion ändert, erhalten wir

$$D(\mathbf{e}_{\sigma(1)}, \dots, \mathbf{e}_{\sigma(n)}) = (-1)^k D(\mathbf{1}_n) = (-1)^k.$$

Durch das gleiche Argument erhalten wir

$$D(\mathbf{e}_{\sigma(1)}, \dots, \mathbf{e}_{\sigma(n)}) = (-1)^m,$$

und daher gilt $k \equiv m \pmod{2}$. □

Um die Eindeutigkeit der Determinantenfunktion zu zeigen, benutzen wir die gleiche Strategie wie in Lemma 8.3.9 im Fall $n = 2$.

Theorem 8.3.16. *Es sei $n \geq 1$. Dann gibt es genau eine Determinantenfunktion*

$$D : M_{n \times n}(K) \rightarrow K.$$

Explizit ist D durch folgende Formel gegeben: es sei $A = (a_{ij})_{1 \leq i, j \leq n}$. Dann gilt

$$D(A) = \sum_{\sigma \in S_n} \text{sgn}(\sigma) a_{\sigma(1),1} a_{\sigma(2),2} \cdots a_{\sigma(n),n}.$$

Proof. Es sei $\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_n$ die Standardbasis von K^n ; fuer $A = (\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n)$ schreiben wir

$$\mathbf{v}_i = a_{i1}\mathbf{e}_1 + \cdots + a_{in}\mathbf{e}_n.$$

Es sei nun $D : M_{n \times n}(K) \rightarrow K$ eine Determinantenfunktion.²⁸ Da D alternierend und n -linear ist, erhalten wir durch Expansion

$$\begin{aligned} D(A) &= D(a_{11}\mathbf{e}_1 + \cdots + a_{n1}\mathbf{e}_n, \dots, a_{1n}\mathbf{e}_1 + \cdots + a_{nn}\mathbf{e}_n) \\ &= \sum_{\sigma \in S_n} a_{\sigma(1),1} \cdots a_{\sigma(n),n} \cdot D(\mathbf{e}_{\sigma(1)}, \dots, \mathbf{e}_{\sigma(n)}). \end{aligned}$$

Aber nun gilt

$$D(\mathbf{e}_{\sigma(1)}, \dots, \mathbf{e}_{\sigma(n)}) = \text{sgn}(\sigma) \cdot D(\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_n) = \text{sgn}(\sigma),$$

und das Resultat folgt. □

Mit den Anwendungen der Determinante beschaeftigen wir uns im neuen Jahr.

9. WEIHNACHTSVORLESUNG: UEBER DIE UNENDLICHKEIT

Notation 9.0.1. Fuer $n \geq 1$ schreiben wir $[n] = \{1, \dots, n\}$.

Definition 9.0.2. *Eine Menge A ist endlich, wenn es seine Bijektion $A \rightarrow [n]$ gibt fuer ein $n \geq 0$. In dem Fall ist die Kardinalitaet von A gleich n .*

Definition 9.0.3. *Eine Menge A ist abzaehlbar, wenn A endlich ist oder wenn es eine Bijektion zwischen A und \mathbb{N} gibt. Wenn A nicht abzaehlbar ist, dann ist sie ueberabzaehlbar.*

Satz 9.0.4. *Jede Untermenge von \mathbb{N} ist abzaehlbar.*

Proof. Es sei $S \subseteq \mathbb{N}$. Wenn $S \neq \emptyset$, dann gibt es ein kleinstes Element $s_1 \in S$. Wenn $S - \{s_1\} \neq \emptyset$, dann gibt es ein kleinstes element $s_2 \in S - \{s_1\}$. Wenn $S - \{s_1, s_2\} \neq \emptyset$, dann gibt es ein kleinstes Element $s_3 \in S - \{s_1, s_2\}$ usw. Wenn S endlich ist, dann endet dieser Prozess irgendwann (sagen wir nach n Schritten), und wir erhalten $S = \{s_1, \dots, s_n\}$. Wenn S nicht endlich ist, dann erhalten wir eine injektive Funktion $g : \mathbb{N} \rightarrow S$ gegeben durch

$$g(i) = s_i.$$

Dann ist g eine Surjektion: wenn $k \in S$, dann gibt es hoechstens k Elemente von S , die kleiner sind als k , d.h. $k = s_i$ fuer ein $i \leq k$. □

Folgendes Resultat ist sehr praktisch, wenn man feststellen will, ob eine Menge A abzaehlbar ist oder nicht.

Theorem 9.0.5. *Die folgenden Bedingungen sind aequivalent:*

²⁸Wir wissen dank Theorem 8.3.10, dass eine solche Funktion existiert.

- (1) A ist abzählbar;
- (2) Es gibt eine Injektion $A \hookrightarrow \mathbb{N}$;
- (3) entweder $A = \emptyset$ oder es gibt eine Surjektion $\mathbb{N} \twoheadrightarrow A$.

Inbesondere gilt: wenn A abzählbar ist und $B \hookrightarrow A$, dann ist B abzählbar.

Satz 9.0.6. Die Menge der ganzen Zahlen \mathbb{Z} ist abzählbar.

Proof. Die Funktion $f : \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{N}$,

$$f(n) = \begin{cases} 2n & n > 0 \\ 2(-n) + 1 & n < 0 \end{cases}$$

ist eine Bijektion. □

Satz 9.0.7. Die Menge $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$ ist abzählbar. Ebenso ist die Menge \mathbb{N}^k fuer $k \geq 1$ abzählbar.

Proof. Definiere die Funktion

$$f : \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}, \quad (a, b) \mapsto 2^a 3^b.$$

Diese Funktion ist injektiv (warum?), und daher ist $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$ abzählbar. □

Satz 9.0.8. \mathbb{Z}^k ist abzählbar fuer alle $g \geq 1$.

Proof. Uebung. □

Satz 9.0.9. Die Vereinigungsmenge von abzählbar vielen abzählbaren Mengen ist abzählbar.

Proof. Nimm an, dass wir fuer jedes $n \geq 1$ eine abzählbare Menge

$$X_n = \{x_1^{(n)}, x_2^{(n)}, x_3^{(n)}, \dots\}$$

haben; wir wollen zeigen, dass $Y = \bigcup_n X_n$ abzählbar ist. Aber

$$Y = \{x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, x_1^{(2)}, x_3^{(1)}, x_2^{(2)}, x_1^{(3)}, x_4^{(1)}, x_3^{(2)}, x_2^{(3)}, x_1^{(4)}, \dots\},$$

das heisst, Y ist abzählbar. □

Korollar 9.0.10. Die Menge \mathbb{Q} ist abzählbar.

Proof. Schreibe $\mathbb{Q} = \bigcup_n \frac{1}{n}\mathbb{Z}$ als Vereinigungsmenge von abzählbar vielen abzählbaren Mengen. □

Definition 9.0.11. Eine reelle Zahl α ist algebraisch, wenn es die Loesung eines Polynoms $p(x) \in \mathbb{Z}[x]$, $p \neq 0$ ist. Eine reelle Zahl, die nicht algebraisch ist, ist transzendent.

Beispiel 9.0.12. (1) Jede rationale Zahl ist algebraisch.

(2) $\sqrt{2}$ ist algebraisch.

(3) Die Zahlen π (Lindermann, 1882) und e (Hermite, 1873) sind transzendent. $\sqrt{2}^{\sqrt{2}}$ ist transzendent (Kuzmin, 1930). $\log(a)$ fuer jede algebraische Zahl $a \neq 0, 1$ ist transzendent.

(4) Es wird vermutet, dass $\pi + e$ transzendent ist, aber das ist nicht bewiesen. Es ist im allgemeinen sehr schwierig zu zeigen, dass eine Zahl nicht algebraisch ist. Ueberraschenderweise ist es hingegen relativ einfach zu zeigen, dass es sehr viele transzendente Zahlen gibt.

Korollar 9.0.13. Die Menge \mathbb{A} aller algebraischen reellen Zahlen ist abzählbar.

Proof. Es sei \mathcal{P}_k die Menge aller Polynome vom Grad k mit ganzzahligen Koeffizienten. Dann gibt die Abbildung

$$\mathcal{P}_k \rightarrow \mathbb{Z}^{k+1}, \quad a_0 + a_1x + \dots + a_kx^k \mapsto (a_0, \dots, a_k)$$

eine Injektion $\mathcal{P}_k \rightarrow \mathbb{Z}^{k+1}$. Da \mathbb{Z}^{k+1} abzählbar ist, ist \mathcal{P}_k ebenfalls abzählbar (Theorem 9.0.5).

Es sei non \mathcal{P} die Menge aller Polynome mit ganzzahligen Koeffizienten. Dann ist $\mathcal{P} = \bigcup_k \mathcal{P}_k$ ebenfalls abzählbar.

Fuer jedes Polynom $p(x) \in \mathcal{P}$ sei R_p die (endliche) Menge der Wurzeln des Polynoms. Dann ist $\bigcup_{p \in \mathcal{P}} R_p$ ebenfalls abzählbar, was zu beweisen war. □

Frage. Was koennen wir ueber die Menge der transzendenten Zahlen sagen?

Satz 9.0.14. Die Menge der reellen Zahlen ist ueberabzählbar.

Proof. Nimm an, dass \mathbb{R} abzählbar ist, und es sei r_1, r_2, r_3, \dots die Liste aller reellen Zahlen. Schreibe jedes r_n in dezimaler Expansion

$$\begin{aligned} r_1 &= n_1 . d_{11}d_{12}d_{13} \dots \\ r_2 &= n_2 . d_{21}d_{22}d_{23} \dots \\ r_3 &= n_3 . d_{31}d_{32}d_{33} \dots \\ &\dots \end{aligned}$$

Für $n \geq 1$ sei $d_n = \begin{cases} 0 & \text{if } d_{nn} \neq 0 \\ 1 & \text{if } d_{nn} = 0 \end{cases}$, und betrachte die Zahl

$$s = 0 . d_1d_2d_3 \dots$$

Dann unterscheidet sich s von r_n durch die n te Ziffer in der Dezimalen Expansion; es ist daher eine reelle Zahl, die nicht in der Liste enthalten ist. Das ist ein Widerspruch. \square

Korollar 9.0.15. Die Menge der transzendenten Zahlen ist überabzählbar.²⁹

Es gibt also abzählbare und überabzählbare Menge. Aber gibt es auch verschiedene Arten von Überabzählbarkeit?

Definition 9.0.16. Wir sagen, dass zwei Menge A, B die gleiche Kardinalität haben, wenn es eine Bijektion $f : A \rightarrow B$ gibt; wir schreiben $|A| = |B|$. Wir sagen, dass B eine grössere Kardinalität hat als A , wenn es eine Injektion $A \hookrightarrow B$, aber keine Bijektion gibt; wir schreiben $|A| < |B|$.³⁰

Beispiel 9.0.17. Jede unendliche abzählbare Menge hat die gleiche Kardinalität wie \mathbb{N} ; zum Beispiel die geraden Zahlen, die Primzahlen, alle Potenzen von 2, oder alle Zahlen, die aus genau 5 verschiedenen Primfaktoren bestehen.

Bemerkung 9.0.18. Gibt es eine Kardinalität zwischen $|\mathbb{N}|$ und $|\mathbb{R}|$? Diese Frage kann nicht beantwortet werden (Cohen, 1963); die Kontinuumshypothese sagt, dass es keine Kardinalität zwischen $|\mathbb{N}|$ und $|\mathbb{R}|$ gibt.

Wir ist es mit grösseren Kardinalitäten? Gibt es unendlich viele?

Definition 9.0.19. Für eine Menge X definieren wir die Potenzmenge von X als die Menge aller Untermengen von X :

$$\mathcal{P}(X) = \{Y \subseteq X\}.$$

Satz 9.0.20. $\mathcal{P}(\mathbb{N})$ ist überabzählbar.

Proof. Wir beweisen den Satz über *reductio ad absurdum*. Es sei S_1, S_2, S_3, \dots die Menge aller Untermengen von \mathbb{N} . Definiere die Untermenge

$$Y = \{n \in \mathbb{N} : n \notin S_n\}.$$

Kann es sein, dass $Y = S_k$ für ein $k \geq 1$? Wenn $k \in S_k$, dann ist $k \notin Y$ (aufgrund der Definition von Y). Wenn $k \notin S_k$, dann ist $k \in Y$ (wieder aufgrund der Definition von Y). Mit anderen Worten, Y enthält k genau dann, wenn S_k k nicht enthält. Daher gilt $Y \neq S_k \forall k \geq 1$, d.h. Y ist nicht in der Liste enthalten. Daher ist $\mathcal{P}(\mathbb{N})$ überabzählbar. \square

Wir können diesen Satz verallgemeinern:

Theorem 9.0.21. Es sei A eine Menge. Dann gibt es keine Surjektion $A \rightarrow \mathcal{P}(A)$.

Proof. Nimm an, dass $f : A \rightarrow \mathcal{P}(A)$ eine Surjektion ist. Wir betrachten nun folgende Untermenge $S \subset A$: es sei

$$S = \{a \in A : a \notin f(a)\}.$$

Da f surjektiv ist, gibt es ein $s \in A$ so dass $f(s) = S$. Wir zeigen nun den Widerspruch:

- Wenn $s \in S$, dann ist $s \notin S$ aufgrund der Definition von S .
- Wenn $s \notin S$, dann ist $s \in S$ aufgrund der Definition von S .

²⁹Es gibt also 'viel mehr' transzendente als algebraische Zahlen. Trotzdem ist es sehr schwierig zu zeigen, dass eine bestimmte reelle Zahl transzendent ist.

³⁰Wir müssen zeigen, dass diese Definition sinnvoll ist, nämlich wenn $|A| < |B|$ und $|B| < |A|$, dann gilt $|A| = |B|$. Dies ist das Cantor-Schroeder-Bernstein Theorem, ein sehr wichtiges Resultat aus der Mengenlehre.

Daher muss unsere Annahme falsch sein, das heisst, es existiert keine Surjektion. \square

Mit anderen Worten, die Kardinalitaet der Potenzmenge einer Menge ist grosser als die Kardinalitaet der Menge selber : wenn A eine Menge ist, dann definiert die Abbildung $a \mapsto \{a\}$ eine Injektion $A \rightarrow \mathcal{P}(A)$, aber es gibt keine Bijektion, das heisst $|A| < |\mathcal{P}(A)|$. Wir koennen daher - ausgehend von \mathbb{N} - unendlich viele Unendlichkeiten konstruieren:

$$\mathbb{N}, \mathcal{P}(\mathbb{N}), \mathcal{P}(\mathcal{P}(\mathbb{N})), \mathcal{P}(\mathcal{P}(\mathcal{P}(\mathbb{N}))), \dots$$

10. ZURUECK ZU DETERMINANTEN

10.1. Zur Erinnerung. Eine Funktion $D : M_{n \times n}(K) \rightarrow K$ ist eine Determinantenfunktion, wenn sie folgende Eigenschaften hat:

- (1) sie ist n -linear und alternierend als eine Funktion in den Spaltenvektoren;
- (2) $D(\mathbf{1}_n) = 1$.

Wir haben folgende Resultate gezeigt:

- (1) $\forall n \geq 1$ gibt es eine Determinantenfunktion \det (Theorem 8.3.10);
- (2) $\forall n \geq 1$ ist die Determinantenfunktion eindeutig bestimmt; das heisst, es gibt *genau eine* (Theorem 8.3.16).

Explizit ist die Determinante gegeben durch

$$(36) \quad \det(A) = \sum_{\sigma \in S_n} \operatorname{sgn}(\sigma) a_{\sigma(1),1} a_{\sigma(2),2} \cdots a_{\sigma(n),n}.$$

Bemerkung 10.1.1. *Es folgt von dem Beweis von Theorem 8.3.16, dass folgendes Resultat gilt: es sei $D : M_{n \times n}(K) \rightarrow K$ n -linear und alternierend in den Spaltenvektoren. Dann gilt*

$$(37) \quad D(A) = \det(A) \cdot D(I_n) \quad \forall A \in M_{n \times n}(K).$$

10.2. Erste Eigenschaften. Eine Eigenschaft der Determinante folgt unmittelbar von (36):

Satz 10.2.1. *Es sei $A \in M_{n \times n}(K)$. Dann gilt*

$$\det(A) = \det(A^t).$$

Proof. Es sei $B = (b_{ij}) = A^t$, das heisst $b_{ij} = a_{ji}$. Dann gilt

$$\begin{aligned} \det(B) &= \sum_{\sigma \in S_n} \operatorname{sgn}(\sigma) b_{\sigma(1),1} b_{\sigma(2),2} \cdots b_{\sigma(n),n} \\ &= \sum_{\sigma \in S_n} \operatorname{sgn}(\sigma) a_{1,\sigma(1)} a_{2,\sigma(2)} \cdots a_{n,\sigma(n)}. \end{aligned}$$

Doch wenn $j = \sigma(i)$, dann ist $i = \sigma^{-1}(j)$, und daher $a_{i,\sigma(i)} = a_{\sigma^{-1}(j),j}$. Es folgt, dass

$$\det(B) = \sum_{\sigma \in S_n} \operatorname{sgn}(\sigma) a_{\sigma^{-1}(1),1} a_{\sigma^{-1}(2),2} \cdots a_{\sigma^{-1}(n),n}.$$

Doch $\operatorname{sgn}(\sigma) = \operatorname{sgn}(\sigma^{-1})$ (warum?), und daher gilt

$$\det(B) = \sum_{\sigma \in S_n} \operatorname{sgn}(\sigma^{-1}) a_{\sigma^{-1}(1),1} a_{\sigma^{-1}(2),2} \cdots a_{\sigma^{-1}(n),n} = \det(A).$$

\square

Da die Transposition Spalten und Zeilen einer Matrix vertauscht, erhalten wir folgendes sehr ueber-raschendes Korollar:

Korollar 10.2.2. *Die Determinante ist ebenfalls n -linear und alternierend als eine Funktion in the Zeilenvektoren.*³¹

Wir verstehen nun, wie sich die Determinante unter den elementaren Zeilenumformungen verhaelt:

Satz 10.2.3. *Es sei $A \in M_{n \times n}(K)$, und es sei B eine Matrix, die wir von A durch die elementare Zeilenumformung X erhalten.*

- (1) wenn $X = P(r, s)$ fuer $1 \leq r < s \leq n$, dann gilt $\det(B) = -\det(A)$;

³¹Daher gilt auch das analoge Resultat von Bemerkung 10.1.1 fuer jede Funktion $M_{n \times n}(K) \rightarrow K$, die n -linear und alternierend in den Zeilenvektoren ist.

- (2) wenn $X = M(r, \lambda)$ fuer $1 \leq r \leq n$ und $\lambda \in K^\times$, dann gilt $\det(B) = \lambda \det(A)$;
 (3) wenn $X = S(r, s, \lambda)$ fuer $1 \leq r, s \leq n$, $r \neq s$ und $\lambda \in K^\times$, dann gilt $\det(B) = \det(A)$.

Proof. Uebung. □

Dieses Resultat ist sehr nuetzlich, um Determinanten in konkreten Beispielen zu berechnen.

Beispiel 10.2.4.

- (1) Es sei $A = \begin{pmatrix} 0 & -9 & 3 \\ 1 & 4 & 0 \\ 2 & 6 & -1 \end{pmatrix}$. Wir hatten bereits in Beispiel 2.3.10 gesehen, wie wir diese Matrix

durch EZUs in die Einheitsmatrix umwandeln:

$$P(1, 2) \circ S(3, 1, \frac{1}{3}) \circ S(3, 2, -\frac{4}{3}) \circ M(3, -\frac{3}{5}) \circ S(2, 3, -2) \circ S(1, 3, -6) \circ S(1, 2, -4) \circ M(1, -\frac{1}{9}).$$

Dies bedeutet, dass

$$\det(\mathbf{1}_3) = (-1) \cdot \left(-\frac{3}{5}\right) \cdot \left(-\frac{1}{9}\right) = -\frac{1}{15},$$

das heisst $\det(A) = -15$. Wir ueberpruefen diese Rechnung:

$$\begin{aligned} \det(A) &= \det \begin{pmatrix} 0 & -9 & 3 \\ 1 & 4 & 0 \\ 2 & 6 & -1 \end{pmatrix} \\ &= 0 \cdot \det \begin{pmatrix} 4 & 0 \\ 6 & -1 \end{pmatrix} - (-9) \cdot \det \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 2 & -1 \end{pmatrix} + 3 \cdot \det \begin{pmatrix} 1 & 4 \\ 2 & 6 \end{pmatrix} \\ &= -9 - 6 \\ &= -15. \end{aligned}$$

- (2) Es sei $A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 2 & 4 & -3 \\ 3 & 6 & -5 \end{pmatrix}$. Dann erhalten wir die Einheitsmatrix durch folgende EZUs:

$$S(2, 3, 7/2) \circ S(1, 3, -11/2) \circ S(1, 2, -2) \circ M(3, -2) \circ S(3, 2, -3) \circ M(2, 1/2) \circ S(2, 1, -2),$$

und daher

$$\det(\mathbf{1}_3) = (-2) \cdot \frac{1}{2} = 1,$$

was wir durch die Determinantenentwicklung ueberpruefen koennen.

Wir koennen nun folgendes Resultat beweisen:

Theorem 10.2.5. *Es sei $M \in M_{n \times n}(K)$ von der Form*

$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ 0_{s \times r} & C \end{pmatrix} \quad \text{fuer } A \in M_{r \times r}(K), B \in M_{r \times s}(K) \text{ und } C \in M_{s \times s}(K).$$

Dann gilt

$$\det(M) = \det(A) \det(C).$$

Proof. Es seien $A \in M_{r \times r}(K)$ und $B \in M_{r \times s}(K)$. Definiere die Funktion

$$D : M_{s \times s}(K) \longrightarrow K, \\ C \mapsto \det \begin{pmatrix} A & B \\ 0_{s \times r} & C \end{pmatrix}.$$

Dann ist D s -linear und alternierend (in den Zeilen von C), und daher gilt

$$D(C) = \det(C) \cdot D(\mathbf{1}_s).$$

Per Definition gilt $D(\mathbf{1}_s) = \det \begin{pmatrix} A & B \\ 0_{s \times r} & \mathbf{1}_s \end{pmatrix}$. Durch elementare Zeilenumformungen $S(i, j, \lambda)$ koennen wir die Matrix $\begin{pmatrix} A & B \\ 0_{s \times r} & \mathbf{1}_s \end{pmatrix}$ in die Matrix $\begin{pmatrix} A & 0_{r \times s} \\ 0_{s \times r} & \mathbf{1}_s \end{pmatrix}$ umformen, und es folgt von Satz 10.2.3, dass

$$\det \begin{pmatrix} A & B \\ 0_{s \times r} & \mathbf{1}_s \end{pmatrix} = \det \begin{pmatrix} A & 0_{r \times s} \\ 0_{s \times r} & \mathbf{1}_s \end{pmatrix}.$$

Betrachte nun die Funktion

$$\Delta : M_{r \times r}(K) \longrightarrow K,$$

$$A \mapsto \det \begin{pmatrix} A & 0_{r \times s} \\ 0_{s \times r} & \mathbf{1}_s \end{pmatrix}.$$

Dann ist Δ r -linear und alternierend (in den Zeilen oder Spalten von A), und daher gilt

$$\Delta(A) = \det(A) \cdot \Delta(\mathbf{1}_r) = \det(A) \cdot \det(\mathbf{1}_{r+s}) = \det(A).$$

Es folgt, dass

$$\begin{aligned} \det \begin{pmatrix} A & B \\ 0_{s \times r} & C \end{pmatrix} &= \det(C) \cdot D(\mathbf{1}_s) \\ &= \det(C) \cdot \det \begin{pmatrix} A & 0_{r \times s} \\ 0_{s \times r} & \mathbf{1}_s \end{pmatrix} \\ &= \det(C) \Delta(A) \\ &= \det(C) \det(A). \end{aligned}$$

□

Beispiele 10.2.6. (1) Es sei $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 \\ 0 & 2 & 1 \\ 0 & 3 & -2 \end{pmatrix}$. Dann gilt

$$\begin{aligned} \det(A) &= 1 \cdot \det \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 3 & -2 \end{pmatrix} \\ &= -7. \end{aligned}$$

(2) Es sei $B = \begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 & 0 \\ 2 & -1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 3 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$. Dann gilt

$$\begin{aligned} \det(B) &= \det \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & -1 \end{pmatrix} \cdot \det \begin{pmatrix} 3 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \\ &= (-5) \cdot 4 \\ &= 20. \end{aligned}$$

(3) Es sei $C = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & -1 & 5 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}$. Dann gilt

$$\begin{aligned} \det(C) &= 1 \cdot (-1) \cdot 2 \\ &= -2. \end{aligned}$$

Das letzte Beispiel laesst sich folgendermassen verallgemeinern:

Korollar 10.2.7. *Es sei $A = (a_{ij}) \in M_{n \times n}(K)$ eine obere Dreiecksmatrix. Dann gilt*

$$\det(A) = a_{11} \cdots a_{nn}.$$

10.3. Determinanten und Invertierbarkeit.

Beachte 10.3.1. *Es sei $A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in M_{2 \times 2}(K)$. Dann ist*

$$\det(A) = ad - bc,$$

und A ist genau dann invertierbar, wenn $\det(A) \neq 0$; in diesem Fall gilt

$$A^{-1} = (ad - bc)^{-1} \cdot \begin{pmatrix} d & -b \\ -c & a \end{pmatrix},$$

und eine leichte Rechnung zeigt, dass $\det(A^{-1}) = \det(A)^{-1}$.

Frage. Lassen sich diese Resultate auf $(n \times n)$ -Matrizen verallgemeinern?

Satz 10.3.2. Es sei $n \geq 1$ und $A, B \in M_{n \times n}(K)$. Dann gilt

$$\det(AB) = \det(A) \det(B);$$

mit anderen Worten, die Determinante ist multiplikativ.

Proof. Definiere die Funktion

$$\begin{aligned} D : M_{n \times n}(K) &\longrightarrow K, \\ B &\mapsto \det(AB). \end{aligned}$$

Behauptung. Die Funktion D ist n -linear und alternierend als eine Funktion in den Spalten.

Beweis der Behauptung. Schreibe $A = (\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_n)$ und $B = (\mathbf{b}_1, \dots, \mathbf{b}_n)$. Dann sind die Spalten der Matrix AB gegeben durch

$$AB = (A\mathbf{b}_1, \dots, A\mathbf{b}_n).$$

Daher gilt

$$\begin{aligned} D(\mathbf{b}_1, \dots, \mathbf{b}_i + \mathbf{u}, \dots, \mathbf{b}_n) &= \det(A\mathbf{b}_1, \dots, A(\mathbf{b}_i + \mathbf{u}), \dots, A\mathbf{b}_n) \\ &= \det(A\mathbf{b}_1, \dots, A\mathbf{b}_i + A\mathbf{u}, \dots, A\mathbf{b}_n) \\ &= \det(A\mathbf{b}_1, \dots, A\mathbf{b}_i, \dots, A\mathbf{b}_n) + \det(A\mathbf{b}_1, \dots, A\mathbf{u}, \dots, A\mathbf{b}_n) \\ &= D(\mathbf{b}_1, \dots, \mathbf{b}_i, \dots, \mathbf{b}_n) + D(\mathbf{b}_1, \dots, \mathbf{u}, \dots, \mathbf{b}_n), \end{aligned}$$

wobei die dritte Gleichheit von der n -Linearität von \det folgt. Daher ist D n -linear.

Nimm nun an, dass $\mathbf{b}_i = \mathbf{b}_{i+1}$ für ein $1 \leq i < n$. Dann ist $A\mathbf{b}_i = A\mathbf{b}_{i+1}$, und daher

$$D(\mathbf{b}_1, \dots, \mathbf{b}_n) = \det(A\mathbf{b}_1, \dots, A\mathbf{b}_n) = 0,$$

da \det alternierend ist. Das beweist die Behauptung.

Wir wissen daher von (37), dass

$$D(B) = \det(B) \cdot D(\mathbf{1}_n) \quad \forall B \in M_{n \times n}(K).$$

Doch $D(\mathbf{1}_n) = \det(A)$, und daher

$$\det(AB) = \det(A) \cdot \det(B).$$

□

Korollar 10.3.3. Wenn $A \in M_{n \times n}(K)$ invertierbar ist, dann ist $\det(A) \neq 0$, und

$$\det(A^{-1}) = \det(A)^{-1}.$$

Proof. Wenn A invertierbar ist, dann gibt es eine Matrix $A^{-1} \in M_{n \times n}(K)$, so dass $AA^{-1} = \mathbf{1}_n$. Dann gilt

$$\det(A) \det(A^{-1}) = \det(AA^{-1}) = \det(\mathbf{1}_n) = 1.$$

□

Korollar 10.3.4. Ähnliche Matrizen haben die gleiche Determinante.

Proof. Es seien $A, B, C \in M_{n \times n}(K)$ mit C invertierbar, so dass $B = C^{-1}AC$. Dann gilt

$$\det(B) = \det(C^{-1}AC) = \det(C)^{-1} \det(A) \det(C) = \det(A).$$

□

Bemerkung 10.3.5. Dieses Korollar ist aus zweierlei Gründen sehr wichtig: erstens, weil es die Berechnung von Determinanten viel leichter macht (wie wir gleich sehen werden), und zweitens, da es uns erlaubt, die Determinante einer linearen Abbildung $V \rightarrow V$ zu definieren. Wir kommen im nächsten Kapitel darauf zurück.

Beispiele 10.3.6. (1) Es sei $A = \begin{pmatrix} 1 & -2 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}$ und $B = \begin{pmatrix} -3 & -10 \\ 2 & 5 \end{pmatrix}$. Dann gilt

$$B = C^{-1}AC \quad \text{mit } C = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

und daher $\det(A) = \det(B)$, was wir durch explizite Rechnung überprüfen.

(2) Es sei $A = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 3 \\ -3 & -5 & -3 \\ 3 & 3 & 1 \end{pmatrix}$. Dann gilt

$$A = C^{-1} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix} \cdot C \quad \text{mit } C = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

und daher

$$\det(A) = \det \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix} = 4.$$

Um die Umkehrung von Korollar 10.3.3 zu beweisen, erinnern wir uns an die explizite Formel der Determinante im Beweis von Satz 8.3.13: Es sei $A = (a_{ij})_{1 \leq i, j \leq n} \in M_{n \times n}(K)$, und es sei $1 \leq i \leq n$. Dann gilt

$$(38) \quad \det(A) = (-1)^{i+1} a_{i1} \det(A_{i,1}) + \dots + (-1)^{i+n} a_{in} \det(A_{i,n}),$$

wobei $A_{i,k}$ die $(n-1) \times (n-1)$ -Matrix ist, die wir von A erhalten, indem wir die i te Zeile und die k te Spalte entfernen.

Definition 10.3.7. *Fuer $1 \leq i, j \leq n$ schreiben wir*

$$c_{i,j} = (-1)^{i+j} \det(A_{i,j}).$$

Die Kofaktormatrix von A ist die Matrix $C = (c_{i,j}) \in M_{n \times n}(K)$. Die adjunkte Matrix $\text{adj}(A)$ von A ist die Transposition der Kofaktormatrix.³²

$$\text{adj}(A) = C^t.$$

Beispiele 10.3.8. (1) Es sei $A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$. Dann ist

$$\text{adj}(A) = \begin{pmatrix} d & -b \\ -c & a \end{pmatrix}.$$

(2) Es sei $B = \begin{pmatrix} 4 & 5 & 2 \\ -1 & 0 & 3 \\ 1 & 1 & 2 \end{pmatrix}$. Dann gilt

$$\text{adj}(B) = \begin{pmatrix} -3 & -8 & 15 \\ 5 & 6 & -14 \\ -1 & 1 & 5 \end{pmatrix}.$$

Lemma 10.3.9. *Es sei $C = (c_{i,j}) \in M_{n \times n}(K)$ die Kofaktor Matrix von A und $1 \leq i \leq n$. Dann gilt*

$$\det(A) = a_{i1}c_{i,1} + \dots + a_{in}c_{i,n}.$$

Proof. Das ist Formel (38). □

Lemma 10.3.10. *Es seien $1 \leq i, k \leq n$ und $i \neq k$. Dann gilt*

$$a_{k1}c_{i,1} + \dots + a_{kn}c_{i,n} = 0.$$

Proof. Es sei B die Matrix, die wir von A erhalten, indem wir die i te Zeile durch die k te Zeile ersetzen, und es sei C' die Kofaktormatrix von B . Dann hat B zwei gleiche Zeilen, und daher gilt $\det(B) = 0$. Andererseits koennen wir Lemma 10.3.9 auf B anwenden und erhalten

$$\det(B) = 0 = b_{i1}c'_{i,1} + \dots + b_{in}c'_{i,n}.$$

Nun gilt aber $c'_{i,j} = c_{i,j}$ fuer alle $1 \leq j \leq n$. Ausserdem folgt von der Definition von B , dass $b_{ij} = a_{kj}$ fuer alle $1 \leq j \leq n$. Das Resultat folgt. □

Wir koennen Lemmata 10.3.9 und 10.3.10 folgendermassen zusammenfassen:

Satz 10.3.11. *Es gilt*

$$A \cdot \text{adj}(A) = \det(A) \mathbf{1}_n.$$

³²Die adjunkte Matrix einer (1×1) -Matrix ist (1)!

Proof. Es seien $1 \leq i, k \leq n$. Dann ist der Eintrag der Matrix $A \cdot \text{adj}(A)$ an der Stelle (i, k) gegeben durch

$$a_{k1}c_{i,1} + \dots + a_{kn}c_{i,n} = 0.$$

□

Satz 10.3.11 legt die Vermutung nahe, dass die inverse Matrix von A (wenn sie existiert) gegeben ist durch $\det(A)^{-1}\text{adj}(A)$.

Lemma 10.3.12. *Es gilt*

$$\text{adj}(A) \cdot A = \det(A)\mathbf{1}_n.$$

Proof. Wir wenden Theorem 10.3.11 auf die transponierte Matrix A^t an:

$$A^t \cdot \text{adj}(A^t) = \det(A^t)\mathbf{1}_n.$$

Aber $\det(A^t) = \det(A)$ aufgrund von Satz 10.2.1, und daher

$$A^t \cdot \text{adj}(A^t) = \det(A)\mathbf{1}_n.$$

Wir wenden nun die Transposition auf diese Gleichung an und erhalten

$$(\text{adj}(A^t))^t \cdot A = \det(A)\mathbf{1}_n.$$

Aber eine einfache Rechnung zeigt, dass $\text{adj}(A^t) = (\text{adj}(A))^t$. Das Lemma folgt. □

Theorem 10.3.13. *Eine Matrix $A \in M_{n \times n}(K)$ ist genau dann invertierbar, wenn $\det(A) \neq 0$. In diesem Fall ist die inverse Matrix gegeben durch*

$$A^{-1} = \det(A)^{-1} \cdot \text{adj}(A).$$

Proof. Folgt unmittelbar von Lemma 10.3.12. □

Bemerkung 10.3.14. *Nimm an, wir haben ein lineares Gleichungssystem*

$$S : A \cdot x = b,$$

wobei A eine invertierbare $(n \times n)$ -Matrix ist. In diesem Fall ist die eindeutige Lösung $L(S)$ gegeben durch

$$A^{-1} \cdot b = \det(A)^{-1} \cdot \text{adj}(A) \cdot b.$$

In der Praxis ist es aber sehr mühsam, die adjungierte Matrix von A zu berechnen; es ist meistens wesentlich einfacher, das lineare Gleichungssystem durch Reduktion in reduzierte Zeilenstufenform umzuwandeln.

10.4. Die Determinante eines Endomorphismus. Es sei V ein endlich-dimensionaler Vektorraum, und es sei $T : V \rightarrow V$ eine lineare Abbildung.

Definition 10.4.1. *Es sei \mathcal{B} eine Basis von V . Wir definieren*

$$\det(T) = \det[T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}.$$

Wir müssen überprüfen, dass diese Definition sinnvoll ist, d.h. dass sie unabhängig von der Wahl der Basis ist.

Lemma 10.4.2. *Es sei \mathcal{C} eine weitere Basis von V . Dann gilt*

$$\det[T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = \det[T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{C}};$$

mit anderen Worten, die Determinante eines Endomorphismus ist wohl-definiert.

Proof. Von Theorem 4.5.5 wissen wir, dass

$$[T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{C}} = [\text{id}_{\mathcal{C}}]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}} \cdot [T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} \cdot [\text{id}_{\mathcal{V}}]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{C}}.$$

Weiterhin gilt, dass $[\text{id}_{\mathcal{V}}]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{C}} = ([\text{id}_{\mathcal{V}}]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}})^{-1}$. Daher gilt

$$\begin{aligned} \det[T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{C}} &= \det \left([\text{id}_{\mathcal{C}}]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}} \cdot [T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} \cdot ([\text{id}_{\mathcal{V}}]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}})^{-1} \right) \\ &= \det[\text{id}_{\mathcal{C}}]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}} \cdot \det[T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} \cdot \det([\text{id}_{\mathcal{V}}]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}})^{-1} \\ &= \det[T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}. \end{aligned}$$

□

Bemerkung 10.4.3. *Fuer unterschiedlich Basen \mathcal{B} und \mathcal{C} von V koennten wir natuerlich auch $\det[T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{C}}$ betrachten. Dieser Werte ist nicht wohldefiniert!*

Satz 10.4.4. *Es sei V ein endlich-dimensionaler K -Vektorraum. Dann hat die Funktion*

$$\det : \text{Hom}_K(V, V) \rightarrow K, \quad T \mapsto \det(T)$$

folgende Eigenschaften:

(1) *Es gilt*

$$\det(S \circ T) = \det(S) \cdot \det(T) \quad \forall S, T \in \text{Hom}_K(V, V).$$

(2) *T ist genau dann ein Isomorphismus, wenn $\det(T) \neq 0$. In diesem Fall gilt $\det(T^{-1}) = \det(T)^{-1}$.*

(3) *es gilt $\det(\mathbf{1}_V) = 1$ und $\det(0_V) = 0$.*

Proof. (i) und (ii) folgen von Satz 6.1.5, Korollar 10.3.3 und Theorem 10.3.13. (iii) ist eine Uebung. \square

Beispiel 10.4.5. *Es sei V der Vektorraum aller Polynome ueber \mathbb{Q} vom Grad ≤ 2 und $D : V \rightarrow V$ die Ableitungsabbildung. Dann ist die Abbildungsmatrix von D bezueglich der Basis $1, x, x^2$ gegeben durch*

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

und diese Matrix hat Determinante 0. Dies war zu erwarten: da alle Konstanten unter D auf Null abgebildet werden, ist die Abbildung nicht invertierbar.

11. POLYNOME

Zur Erinnerung: es sei K ein Koerper und $K[x]$ der Ring aller Polynome mit Koeffizienten in K . Fuer ein Element

$$f(x) = a_n x^n + \cdots + a_1 x + a_0 \in K[x],$$

$f \neq 0$ definieren wir den Grad ∂f von $f(x)$ als die groesste ganze Zahl $m \geq 0$, so dass $a_m \neq 0$.

Beachte 11.0.1. *Fuer $f(x), g(x) \in K[x]$, $f, g \neq 0$ gilt*

$$\partial(fg) = \partial(f) + \partial(g).$$

Satz 11.0.2 (Division mit Rest). *Es sei K ein Koerper, und es seien $f(x), g(x) \in K[x]$, $g \neq 0$. Dann gibt es eindeutig bestimmte Polynome $q(x), r(x) \in K[x]$ with either $r = 0$ or $\partial(r) < \partial(g)$, such that*

$$f = qg + r.$$

Proof. Sollten Sie aus der Schule kennen. \square

Beispiel 11.0.3. *Es seien*

$$f(x) = x^3 - x^2 + x + 1 \quad \text{und} \quad g(x) = x^2 + 1.$$

Dann gilt

$$f(x) = (x^2 + 1) \cdot g(x) + 2.$$

Korollar 11.0.4. *Es sei $f(x) \in K[x]$, $f \neq 0$, und es sei $\lambda \in K$ so dass $f(\lambda) = 0$. Dann gibt es $q(x) \in K[x]$, so dass*

$$f(x) = (x - \lambda)q(x).$$

Proof. Es sei $g(x) = x - \lambda$. Aufgrund von Satz 11.0.2 gibt es eindeutig bestimmte Polynome $q(x), r(x) \in K[x]$ with either $r = 0$ or $\partial(r) < 1$ (d.h. $r(x) \in K - \{0\}$), so dass

$$(39) \quad f(x) = g(x)q(x) + r(x).$$

Durch Auswertung von Gleichung (39) an $x = \lambda$ sehen wir, dass $r(\lambda) = 0$ und daher $r = 0$. \square

Beispiel 11.0.5. *Sei $f(x) = x^5 + 2x^4 - x^2 + 4 \in \mathbb{R}[x]$. Dann gilt $f(-2) = 0$, und*

$$f(x) = (x^4 - x + 2)(x + 2).$$

Korollar 11.0.6. *Es sei $f(x) \in K[x]$, $\partial(f) = n > 0$. Dann hat $f(x)$ hoechstens n Nullstellen (nicht notwendigerweise verschieden) in K .*

Beispiel 11.0.7. *Es sei $f(x) = (x + 1)(x^2 + 1)$. Als ein Polynom in $\mathbb{R}[x]$ hat f genau eine Nullstelle, aber es hat drei Nullstellen als ein Element von $\mathbb{C}[x]$.*

Theorem 11.0.8 (Fundamentale Satz der Algebra). *Es sei $f(x) \in \mathbb{C}[x]$ vom Grad $n > 0$. Dann hat $f(x)$ genau n Nullstellen³³ in \mathbb{C} , das heisst, es gibt $\lambda_1, \dots, \lambda_n \in \mathbb{C}$, nicht notwendigerweise verschieden, so dass*

$$f(x) = (x - \lambda_1) \cdots (x - \lambda_n).$$

Beispiel 11.0.9. Es sei $m \geq 1$ und $f(x) = x^m - 1 \in \mathbb{C}[x]$. Es sei $\zeta_m = e^{\frac{2\pi i}{m}}$. Dann gilt

$$f(x) = \prod_{i=0}^{m-1} (x - \zeta_m^i).$$

Definition 11.0.10. *Es sei $f(x) \in K[x]$, $f \neq 0$, und es sei $\lambda \in K$ so dass $f(\lambda) = 0$. Die Ordnung (oder Vielfachheit) der Nullstelle λ in $f(x)$ ist die ganze Zahl $n \geq 0$, fuer die es ein $q(x) \in K[x]$ gibt, so dass*

$$f(x) = (x - \lambda)^n \cdot q(x) \quad \text{und} \quad q(\lambda) \neq 0.$$

Wenn die Ordnung der Nullstelle 1 ist, dann ist λ eine einfache Nullstelle von $f(x)$.

Beispiele 11.0.11. (1) Es sei $f(x) = (x - 1)^2(x + 2)$. Die Nullstell $x = 1$ hat Ordnung 2, und $x = -2$ ist eine einfache Nullstelle.

(2) Es sei $p > 2$ eine Primzahl und \mathbb{F}_p der Koeper mit p Elementen. Es sei $g(x) = x^p - 1 \in \mathbb{F}_p[x]$. Dann gilt

$$g(x) = (x - 1)^p,$$

das heisst, $x = 1$ ist eine Nullstelle von $g(x)$ der Ordnung p !

Bemerkung 11.0.12. (1) *Man kann mit Polynomdivision viel Spass haben. Ein Polynom $f(x) \in K[x]$ ist unzerlegbar, wenn es keine Polynome $g(x), h(x) \in K[x]$ gibt mit $\partial(g), \partial(h) > 0$, so dass $f(x) = g(x)h(x)$. Es folgt dann von Satz 11.0.2, dass sich jedes Polynom vom Grad > 0 eindeutig³⁴ in ein Produkt von unzerlegbaren Polynomen schreiben laesst. Unzerlegbare Polynome spielen also die Rolle der Primzahlen in dem Ring $K[x]$! Diese Beobachtung ist von sehr grosser Wichtigkeit in der algebraischen Geometrie und der algebraischen Zahlentheorie.*

(2) *Eine andere sehr interessante Frage ist, wie man die Nullstellen eines Polynoms finden kann. Fuer Polynome vom Grad ≤ 4 gibt es explizite Formeln fuer die Nullstellen, aber bei Polynomen vom hoeren Grad gilt dies nicht mehr. Dieses ist eines der Hauptresultate der Galois Theorie. Diese Theorie ordnet jedem Polynom eine endliche Gruppe zu, und die Eigenschaften der Gruppe entscheiden, ob das Polynom durch Wurzeln loesbar ist oder nicht.*

12. EIGENWERTE UND EIGENVEKTOREN

12.1. Definitionen und erste Eigenschaften.

Definition 12.1.1. *Es sei V ein endlich-dimensionaler Vektorraum ueber K und $T : V \rightarrow V$ eine lineare Abbildung.*

(1) *Ein Element $\lambda \in K$ ist ein Eigenwert³⁵ von T , wenn es einen Vektor $v \in V$ gibt, $v \neq 0_V$, so dass $Tv = \lambda \cdot v$.*

(2) *Ein Vektor $v \in V$, $v \neq 0_V$ mit der Eigenschaft $Tv = \lambda v$ ist ein Eigenvektor von T mit Eigenwert λ .*

Wenn $A \in M_{n \times n}(K)$, dann sind die Eigenwerte und -vektoren die Eigenwerte und -vektoren der Abbildung $T_A : K^n \rightarrow K^n$.

Bemerkung 12.1.2. *Wenn v ein Eigenvektor von T ist, dann ist auch αv ein Eigenvektor (mit dem gleichen Eigenwert) fuer alle $\alpha \in K$, $\alpha \neq 0$.*

Beispiele 12.1.3.

(1) In Beispiel 10.4.5 ist die konstante Funktion 1 ein Eigenvektor mit Eigenwert 0.

(2) Es sei $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}$. Durch Betrachtung der Matrix sehen wir, dass $\lambda = 3$ und $\lambda = -1$ Eigenwerte von A sind, da

$$A \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = 3 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad A \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

³³Ein Koeper mit dieser Eigenschaft heisst *algebraisch abgeschlossen*.

³⁴abgesehen von Multiplikation mit Elementen in $K - \{0\}$.

³⁵engl: eigenvalue

Sind das alle Eigenwerte von A ?

- (3) Es sei $B = \begin{pmatrix} 1 & -2 \\ 1 & 4 \end{pmatrix}$. Wenn λ ein Eigenwert von B ist, dann gibt es einen Vektor $v = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$, $v \neq 0$, so dass $B \cdot v = \lambda v$, das heisst

$$\begin{pmatrix} 1 & -2 \\ 1 & 4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \Leftrightarrow \left[\begin{pmatrix} 1 & -2 \\ 1 & 4 \end{pmatrix} - \lambda \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Wir erhalten daraus das lineare Gleichungssystem,

$$\begin{aligned} (1 - \lambda)x - 2y &= 0 \\ x + (4 - \lambda)y &= 0. \end{aligned}$$

Indem wir die zweite Gleichung mit $-(1 - \lambda)$ multiplizieren und zur ersten Gleichung addieren, erhalten wir

$$(-(1 - \lambda)(4 - \lambda) - 2)y = 0 \rightarrow y = 0 \vee \lambda^2 - 5\lambda + 6 = 0.$$

- Wenn $y = 0$, dann folgt, dass $x = 0$.
- Wenn $\lambda^2 - 5\lambda + 6 = 0$, dann gilt $\lambda = 2$ oder $\lambda = 3$. Fuer jeden dieser Werte loesen wir das lineare Gleichungssystem:

$$\begin{aligned} \lambda = 2 &\Rightarrow \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \alpha \cdot \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \end{pmatrix}, \\ \lambda = 3 &\Rightarrow \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \beta \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Mit anderen Worten: 2 und 3 sind die Eigenwerte von B , mit Eigenvektoren $\begin{pmatrix} -1 \\ 2 \end{pmatrix}$ und $\begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$.

Wir haben diese Eigenwerte durch Berechnung der Nullstellen des Polynoms $\lambda^2 - 5\lambda + 6$ bestimmt. Laesst sich diese Beobachtung verallgemeinern?

Satz 12.1.4. *Es sei $T : V \rightarrow V$ linear. Dann gilt: $\lambda \in K$ ist genau dann ein Eigenvalue von T , wenn $\ker(T - \lambda \mathbf{1}_V) \neq \{0_V\}$.*

Proof.

$$\begin{aligned} \lambda \in K \text{ ist ein Eigenvalue von } T &\Leftrightarrow \exists v \in V, v \neq 0_V \text{ so dass } T \cdot v = \lambda v \\ &\Leftrightarrow \exists v \in V, v \neq 0_V \text{ so dass } (T - \lambda \mathbf{1}_V) \cdot v = 0_V \\ &\Leftrightarrow v \in \ker(T - \lambda \mathbf{1}_V). \end{aligned}$$

□

Korollar 12.1.5. *Folgende Aussagen sind aequivalent:*

- (1) $\lambda \in K$ ist ein Eigenwert von T ;
- (2) $\ker(T - \lambda \mathbf{1}_V) \neq \{0_V\}$;
- (3) $T - \lambda \mathbf{1}_V$ ist kein Isomorphismus;
- (4) $\det(T - \lambda \mathbf{1}_V) = 0$.

Proof. (i) \Leftrightarrow (ii) ist Satz 12.1.4, und (iii) \Leftrightarrow (iv) ist Satz 10.4.4 (ii). Die Aequivalenz (ii) \Leftrightarrow (iii) ist Theorem 4.2.9. □

Bemerkung 12.1.6. *Korollar 12.1.5 (iv) gibt uns ein sehr nuetzliches Kriterium, um die Eigenwerte einer Matrix bzw. linearen Abbildung zu bestimmen!*

Beispiele 12.1.7.

- (1) Zurueck zum Beispiel 12.1.3 (iii): die Eigenwerte der Matrix B sind genau die Wurzeln des Polynoms

$$\begin{aligned} \det \begin{pmatrix} 1 - \lambda & -2 \\ 1 & 4 - \lambda \end{pmatrix} &= (1 - \lambda)(4 - \lambda) - (-2) \\ &= \lambda^2 - 5\lambda + 6. \end{aligned}$$

- (2) Wir koennen ausserdem die Frage in Beispiel 12.1.3 (ii) beantworten: $\lambda = 3$ und $\lambda = 1$ sind die einzigen Eigenwerte von A , da sie genau die Wurzeln des Polynoms

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

sind.

- (3) Es sei V der Vektorraum aller Fibonacci-Folgen und $S : V \rightarrow V$ die Verschiebungsabbildung (siehe Satz 1.1.15). Die Abbildungsmatrix von S bezueglich der Basis $\mathcal{B} = \{\mathcal{F}_{0,1}, \mathcal{F}_{1,0}\}$ ist

$$[S]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix},$$

und es gilt

$$\det \left([S]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} - \lambda \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \right) = \lambda^2 - \lambda - 1,$$

das heisst, die Eigenwerte dieser Matrix sind $\frac{1 \pm \sqrt{5}}{2}$. Vergleichen Sie das mit dem Beweis von Theorem 1.1.18.

12.2. Das charakteristische Polynom.

Definition 12.2.1. Es sei $A \in M_{n \times n}(K)$. Dann ist

$$\chi_A(x) = \det(A - x \cdot \mathbf{1}_n) \in K[x]$$

das charakteristische Polynom von A .

Beispiel 12.2.2. Es sei $A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$. Dann ist

$$\chi_A(x) = x^2 - (a + d)x + (ad - bc).$$

Definition 12.2.3. Fuer eine lineare Abbildung $T : V \rightarrow V$ definieren wir das charakteristische Polynom von T als

$$\chi_T(x) = \det([T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} - x \cdot \mathbf{1}_n),$$

wobei \mathcal{B} eine beliebige Basis von V ist.

Beachte 12.2.4. Wenn \mathcal{B} und \mathcal{C} zwei verschiedene Basen von V sind und $A = [1_V]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{C}}$ die Basiswechselmatrix, dann gilt

$$[T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = C^{-1}[T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{C}}C$$

und daher

$$\begin{aligned} \det([T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} - x \cdot \mathbf{1}_n) &= \det(A^{-1}[T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{C}}A - x \cdot \mathbf{1}_n) \\ &= \det[A^{-1}([T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{C}}A - xA\mathbf{1}_n \cdot A^{-1})A] \\ &= \det(A^{-1}) \cdot \det([T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{C}} - x\mathbf{1}_n) \cdot \det(A) \\ &= \det([T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{C}} - x\mathbf{1}_n), \end{aligned}$$

das heisst, das charakteristische Polynom von T ist wohl-definiert.

Wir koennen Korollar 12.1.5 folgendermassen zusammenfassen:

Theorem 12.2.5. Es sei $T : V \rightarrow V$ linear. Dann ist $\lambda \in K$ genau dann ein Eigenwert von T , wenn $\chi_T(\lambda) = 0$. Mit anderen Worten:

$$\{\text{Eigenwerte von } T\} = \{\lambda \in K : \chi_T(\lambda) = 0\}.$$

Was koennen wir ausserdem ueber das charakteristische Polynom sagen?

Lemma 12.2.6.

(1) Es sei $A = (a_{ij}) \in M_{n \times n}(K)$ eine obere Dreiecksmatrix. Dann gilt

$$\chi_A(x) = \prod_{i=1}^n (a_{ii} - x),$$

und die Eigenwerte sind a_{11}, \dots, a_{nn} .

(2) Es sei $M \in M_{n \times n}(K)$ von der Form

$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ 0_{s \times r} & C \end{pmatrix} \quad \text{fuer } A \in M_{r \times r}(K), B \in M_{r \times s}(K) \text{ und } C \in M_{s \times s}(K).$$

Dann gilt

$$\chi_M(x) = \chi_A(x) \cdot \chi_C(x).$$

Proof. (1) Uebung.

(2) Es gilt

$$\begin{aligned} \chi_M(x) &= \det(M - x\mathbf{1}_n) \\ &= \det \begin{pmatrix} A - x\mathbf{1}_r & B \\ 0_{s \times r} & C - x\mathbf{1}_s \end{pmatrix} \\ &= \det(A - x\mathbf{1}_r) \cdot \det(C - x\mathbf{1}_s) \\ &= \chi_A(x)\chi_C(x), \end{aligned}$$

wobei die dritte Gleichung von Theorem 10.2.5 folgt. □

Wir erinnern uns an die Spurabbildung (Beispiel 4.1.3 (v))

$$\text{Tr} : M_{n \times n}(K) \rightarrow K, \quad A = (a_{ij}) \mapsto a_{11} + \dots + a_{nn}.$$

Definition 12.2.7. Es sei $T : V \rightarrow V$ linear. Wir definiere die Spur von T als

$$\text{Tr}(T) = \text{Tr}[T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}$$

fuer eine beliebige Basis \mathcal{B} von V .

Satz 12.2.8. $\text{Tr}(T)$ ist wohl-definiert.

Proof. Es seien \mathcal{B} und \mathcal{C} verschiedene Basen von V , und es sei $C = [\text{id}_V]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{C}}$, so dass

$$[T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = C^{-1} \cdot [T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{C}} \cdot C.$$

Es ist also ausreichend zu zeigen, dass

$$\text{Tr}(AB) = \text{Tr}(BA) \quad \forall A, B \in M_{n \times n}(K).$$

Aber das ist eine leichte Uebung. □

Satz 12.2.9. Es sei $T : V \rightarrow V$ linear. Dann gilt

$$\chi_T(x) = (-1)^n x^n + (-1)^{n-1} \text{Tr}(T)x^{n-1} + \dots + \det(T).$$

Proof. Es sei \mathcal{B} eine Basis von V und $A = [T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}$; schreibe $A = (a_{ij})_{1 \leq i, j \leq n}$. Dann gilt

$$\chi_T(x) = \det \begin{pmatrix} a_{11} - x & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} - x & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} - x & \dots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nn} - x \end{pmatrix}$$

Wir benutzen nun (36), um die Determinante zu berechnen. Es sei $\sigma \in S_n$. Wenn σ nicht die Identitaet ist, dann bildet σ hoechstens $n - 2$ Elemente aus der Menge $\{1, 2, \dots, n\}$ auf sich selber ab. Daher gilt

$$\chi_T(x) = \prod_{i=1}^n (a_{ii} - x) + g(x),$$

wobei $g(x)$ aus einer Summe von Produkten besteht, die hoechstens $n - 2$ der diagonalen Eintraege $a_{ii} - x$ enthalten. Mit anderen Worten, $g(x)$ ist ein Polynom vom Grad $\leq n - 2$. Daher gilt

$$\chi_T(x) = (-1)^n x^n + (-1)^{n-1} (a_{11} + a_{22} + \dots + a_{nn}) x^{n-1} + g(x).$$

Um den konstanten Koeffizienten von $\chi_T(x)$ zu berechnen, berechnen wir $\chi_T(0) = \det(A)$. □

Korollar 12.2.10. Es sei V an n -dimensionaler Vektorraum und $T : V \rightarrow V$ linear. Dann hat T hoechstens n Eigenwerte.

Proof. Klar, da $\chi_T(x)$ ein Polynom vom Grad n ist und daher hoechstens n Nullstellen haben kann. □

Bemerkung 12.2.11. Wenn λ ein Eigenwert von T ist, dann kann es sein, dass λ eine Nullstelle hoeherer Ordnung von $\chi_T(x)$ ist; wir beschaeftigen uns mit diesem Phaenomen spaeter.

12.3. Diagonalisierung. Es sei $T : V \rightarrow V$ eine lineare Abbildung. Wir wollen nun unsere Theorie des Basiswechsels dazu benutzen, um eine Basis \mathcal{B} zu finden, so dass die Abbildungsmatrix $[T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}$ eine besonders einfache Form hat.

Beispiel 12.3.1. Wir betrachten nochmal das Beispiel der Fibonacci-Folgen. Wir hatten bereits gesehen, dass $\varphi = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$ and $\psi = \frac{1-\sqrt{5}}{2}$ die Eigenwerte der Abbildung S sind, mit dazu gehoerigen Eigenfolgen $\mathcal{F}_{1,\varphi}$ und $\mathcal{F}_{1,\psi}$. Eine einfache Rechnung zeigt, dass die beiden Eigenfolgen linear unabhaengig und daher einen Basis des Vektorraums aller Fibonacci-Folgen sind. Die Darstellungsmatrix von S bezueglich dieser Basis ist $\begin{pmatrix} \varphi & 0 \\ 0 & \psi \end{pmatrix}$: sie ist diagonal.

Satz 12.3.2. *Es sei $T : V \rightarrow V$ eine lineare Abbildung, und $\lambda_1, \dots, \lambda_m$ verschiedene Eigenwerte von T . $\forall i$ sei v_i ein Eigenvektor mit Eigenwert λ_i . Dann sind v_1, \dots, v_m linear unabhaengig.*

Proof. Nimm an, dass die Vektoren linear abhaengig sind. Es sei $1 \leq k \leq m$ der kleinste Index, so dass die Menge $\{v_1, \dots, v_k\}$ linear abhaengig ist. Dann gibt es Skalare $\alpha_1, \dots, \alpha_k \in K$, alle $\neq 0$, so dass

$$\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_k v_k = 0_V.$$

Wende die Abbildung $T - \lambda_k \mathbf{1}_V$ auf diese Gleichung an. Dann erhalten wir

$$\begin{aligned} (T - \lambda_k \mathbf{1}_V)(\alpha_1 v_1 + \dots + \alpha_k v_k) &= \alpha_1 (T - \lambda_k \mathbf{1}_V)v_1 + \dots + \alpha_k (T - \lambda_k \mathbf{1}_V)v_k \\ &= \alpha_1 (\lambda_1 - \lambda_k)v_1 + \dots + \alpha_{k-1} (\lambda_{k-1} - \lambda_k)v_{k-1} + \alpha_k (\lambda_k - \lambda_k)v_k \\ &= \alpha_1 (\lambda_1 - \lambda_k)v_1 + \dots + \alpha_{k-1} (\lambda_{k-1} - \lambda_k)v_{k-1} \\ &= 0_V. \end{aligned}$$

Da $\lambda_i \neq \lambda_j$ for all $i \neq j$, gilt $\alpha_i (\lambda_i - \lambda_k) \neq 0$ for all $1 \leq i < k$, mit anderen Worten, die Vektoren v_1, \dots, v_{k-1} sind linear abhaengig. Dies ist ein Widerspruch zu der Wahl von k . \square

Bemerkung 12.3.3. *Natuerlich gibt es lineare Abbildungen, deren charakteristisches Polynom Nullstellen hoeherer Ordnung hat, z.B. die Identitaetsabbildung, dereren Eigenwerte alle gleich 1 sind.*

Korollar 12.3.4. *Es sei V ein n -dimensionaler K -Vektorraum und $T : V \rightarrow V$ eine lineare Abbildung. Nimm an, dass T genau n verschiedene Eigenwerte hat. Dann besitzt V eine Basis, die aus Eigenvektoren von T besteht; wir sagen, T ist diagonalisierbar.*

Proof. Es seien $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ die Eigenwerte von T mit Eigenvektoren v_1, \dots, v_n . Dann sind v_1, \dots, v_n linear unabhaengig aufgrund von Satz 12.3.2 und daher eine Basis (Satz 3.3.23). \square

Definition 12.3.5. *Eine lineare Abbildung $T : V \rightarrow V$ ist diagonalisierbar, wenn V eine Basis besitzt, die aus Eigenvektoren von T besteht; in diesem Fall ist die Abbildungsmatrix von T bezueglich dieser Basis diagonal.*

Eine Matrix $A \in M_{n \times n}(K)$ ist diagonalisierbar, wenn die lineare Abbildung T_A diagonalisierbar ist.

Bemerkung 12.3.6. *Eine Matrix $A \in M_{n \times n}(K)$ ist genau dann diagonalisierbar, wenn es eine invertierbare Matrix $B \in M_{n \times n}(K)$ gibt, so dass die Matrix $B^{-1}AB$ diagonal ist.*

Lemma 12.3.7. *Wenn A diagonalisierbar ist, mit Eigenwerten $\lambda_1, \dots, \lambda_n$, dann gilt*

$$\chi_A(x) = (x - \lambda_1) \cdots (x - \lambda_n).$$

Frage: Sind alle Matrizen/linearen Abbildungen diagonalisierbar?

Beispiele 12.3.8.

- (1) Die Matrix $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}$ in Beispiel 12.1.3 (2) ist diagonalisierbar, da sie zwei Eigenwerte hat, naemlich $\lambda_1 = 3$ und $\lambda_2 = -1$. Explizit koennen wir A folgendermassen diagonalisieren: die zu $\lambda_{1,2}$ gehoerigen Eigenvektoren sind $v_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$ und $v_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$, und sie bilden eine Basis $\mathcal{B} = \{v_1, v_2\}$ von \mathbb{R}^2 . Die Basiswechselform von der Standardbasis $\mathcal{E} = \{e_1, e_2\}$ nach \mathcal{B} ist gegeben durch

$$C = [\text{id}]_{\mathcal{E}}^{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}.$$

Dann gilt

$$C^{-1}AC = \begin{pmatrix} 3 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

- (2) Die Matrix $B = \begin{pmatrix} 1 & -2 \\ 1 & 4 \end{pmatrix}$ ist ebenfalls diagonalisierbar (Uebung).
- (3) Bisweilen haengt es vom Grundkoerper ab, ob eine Matrix diagonalisierbar ist: es sei $M = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \in M_{2 \times 2}(\mathbb{R})$. Dann hat das charakteristische Polynom

$$\chi_M(x) = x^2 + 1$$

keine Nullstellen in \mathbb{R} , das heisst, M ist ueber \mathbb{R} nicht diagonalisierbar. Betrachten wir M aber als eine Matrix in $M_{2 \times 2}(\mathbb{C})$, dann gilt

$$\chi_M(c) = (x - i)(x + i),$$

und M ist diagonalisierbar.

- (4) Es sei $D = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$. Ist D diagonalisierbar? Wir berechnen das charakteristische Polynom:

$$\chi_D(x) = \det \begin{pmatrix} 1-x & 1 \\ 0 & 1-x \end{pmatrix} = (1-x)^2,$$

das heisst, $\lambda = 1$ ist der einzige Eigenwert dieser Matrix. Wir berechnen den dazugehoerigen Eigenvektor (oder sind es mehrere?):

$$\begin{aligned} D \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \\ \Rightarrow x + y &= x \quad \text{und} \quad y = y, \end{aligned}$$

das heisst, die Eigenvektoren mit Eigenvalue 1 sind von der Form $\alpha \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ mit $\alpha \neq 0$. Mit anderen Worten, D ist nicht diagonalisierbar. Was ist passiert?

Beispiel 12.3.9. Beispiel 12.3.8 (iv) laesst sich folgendermassen verallgemeinern: es sei $n \geq 1$ und $\lambda \in K$. Definiere die Jordan'sche Blockmatrix $J_n(\lambda) \in M_{n \times n}(K)$,

$$J_n(\lambda) = \begin{pmatrix} \lambda & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \lambda \end{pmatrix}.$$

Dann gilt

$$\chi_{J_n(\lambda)}(x) = (\lambda - x)^n,$$

das heisst, λ ist der einzige Eigenwert. Andererseits ist e_n der einzige Eigenvektor mit Eigenwert λ : fuer $n > 1$ ist $J_n(\lambda)$ also nicht diagonalisierbar.

Frage. Entscheidet das charakteristische Polynom, ob eine Matrix diagonalisierbar ist?

Bemerkung 12.3.10. Die Identitaetsmatrix $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ und die Matrix $\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ haben beide charakteristisches Polynom $(1-x)^2$; allerdings ist die erste diagonal (und daher natuerlich diagonalisierbar und die zweite nicht diagonalisierbar. Mit anderen Worten, das charakteristische Polynom alleine kann nicht entscheiden, ob eine Matrix diagonalisierbar ist. Wichtig ist die Dimension des zu einem Eigenwert gehoerigen Unterraums von Eigenvektoren.

12.4. Eigenraeume. Wir gehen von jetzt an davon aus, dass der Koerper K algebraisch abgeschlossen ist.

Definition 12.4.1. Es sei $T : V \rightarrow V$ eine lineare Abbildung, und es sei λ ein Eigenwert von T . Der Eigenraum von λ ist gegeben durch

$$E_\lambda = \{v \in V : T.v = \lambda v\}.$$

Mit anderen Worten, E_λ ist die lineare Huelle der zu λ gehoerigen Eigenvektoren.

Lemma 12.4.2. E_λ ist ein Unterraum von V .

Proof. Es folgt von der Definition, dass

$$E_\lambda = \ker(T - \lambda \cdot \text{id}_V),$$

und wir haben in Lemma 4.2.3 gezeigt, dass der Kern einer linearen Abbildung ein Unterraum ist.

Alternativ koennen Sie auch die Unterraum Axiome ueberpruefen. \square

Beispiele 12.4.3. (1) Es sei $A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$. Eine einfache Rechnung zeigt, dass

$$\begin{aligned} \chi_A(x) &= -x^3 + 3x + 2 \\ &= -(x-2)(x+1)^2, \end{aligned}$$

das heisst, die Eigenwerte sind $\lambda_1 = -1$ und $\lambda_2 = 2$. Um E_{λ_1} zu bestimmen, loesen wir das lineare Gleichungssystem

$$(A - \lambda_1 \mathbf{1}_3) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Wir erhalten

$$E_{\lambda_1} = \left\langle \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right\rangle,$$

das heisst, E_{λ_1} ist 2-dimensional.

(2) In Beispiel 12.3.8 (iii) hat der zu $\lambda = 1$ gehoerige Eigenraum Dimension 1.

Wir erinnern uns an die Definition der direkten Summe von Unterraumen eines Vektorraums:

Definition 12.4.4. *Es sei V ein Vektorraum, und es seien $U_1, \dots, U_k \leq V$. Es sei $W = U_1 + \dots + U_k$. Dann ist W die direkte Summe von U_1, \dots, U_k wenn jedes Element $w \in W$ in genau einer Weise als Summe*

$$w = u_1 + \dots + u_k \quad \text{mit } u_i \in U_i \forall 1 \leq i \leq k$$

geschrieben werden kann. In diesem Fall schreiben wir

$$W = U_1 \oplus \dots \oplus U_k.$$

Lemma 12.4.5. *In dem Kontext von Definition 12.4.4, W ist genau dann die direkte Summe von U_1, \dots, U_k , wenn die Gleichung*

$$0_V = u_1 + \dots + u_k \quad \text{mit } u_i \in U_i \forall i$$

nur die Loesung

$$u_1 = u_2 = \dots = u_k = 0_V$$

hat.

Proof. Uebung. \square

Beachte 12.4.6. *Wenn $W = U_1 \oplus \dots \oplus U_k$ ist, dann gilt*

$$\dim(W) = \dim(U_1) + \dots + \dim(U_k).$$

Weiterhin gilt: wenn \mathcal{B}_i eine Basis von U_i ist $\forall 1 \leq i \leq k$, dann ist

$$\mathcal{B} = \mathcal{B}_1 \cup \dots \cup \mathcal{B}_k$$

einen Basis von W .

Beispiele 12.4.7.

(1) \mathbb{R}^2 ist die direkte Summe von $U_1 = \left\langle \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} \right\rangle$ und von $U_2 = \left\langle \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \end{pmatrix} \right\rangle$.

(2) \mathbb{R}^2 ist die Summe, aber nicht die direkte Summe von $U'_1 = \left\langle \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} \right\rangle$ und von $U_2 = \left\langle \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -3 \\ 1 \end{pmatrix} \right\rangle$.

Satz 12.4.8. *Es sei $T : V \rightarrow V$ eine lineare Abbildung, und es seien $\lambda_1, \dots, \lambda_k$ die Eigenwerte von T . Dann ist der Unterraum*

$$W = E_{\lambda_1} + \dots + E_{\lambda_k}$$

die direkte Summe $E_{\lambda_1} \oplus \dots \oplus E_{\lambda_k}$.

Proof. Wir benutzen Lemma 12.4.5: es seien v_1, \dots, v_k mit $v_i \in E_{\lambda_i}$, $v_i \neq 0_V \forall i$. Da $\lambda_i \neq \lambda_j$ fuer $i \neq j$, sind v_1, \dots, v_k linear unabhängig aufgrund von Satz 12.3.2; daher sind

$$v_1 + \dots + v_k \neq 0_V.$$

□

Korollar 12.4.9. *Es sei $T : V \rightarrow V$ eine lineare Abbildung, und es seien $\lambda_1, \dots, \lambda_k$ die Eigenwerte von T . Dann ist T genau dann diagonalisierbar, wenn*

$$(40) \quad \dim(V) = \dim E_{\lambda_1} + \dots + \dim E_{\lambda_k}.$$

12.5. Algebraische und geometrische Vielfachheit. Es sei K algebraisch abgeschlossen.

Bemerkung 12.5.1. *Nimm an, dass V Dimension n hat. Dann ist $\partial(\chi_T(x)) = n$, und es gibt $a_1, \dots, a_k \geq 1$, so dass*

$$\chi_T(x) = (\lambda_1 - x)^{a_1} \dots (\lambda_k - x)^{a_k},$$

und insbesondere

$$(41) \quad n = a_1 + \dots + a_n.$$

Wir koennen also einem Eigenwert λ von T zwei weitere Groessen zuordnen: die Dimension des dazugehoerigen Eigenraums E_λ und die Vielfachheit der Nullstelle $x = \lambda$ des charakteristischen Polynoms. Wie haengen diese zusammen?

Definition 12.5.2. *Es sei $T : V \rightarrow V$ eine lineare Abbildung, und es sei λ ein Eigenwert von T .*

- (1) *Die geometrische Vielfachheit g_λ von λ ist $\dim_K E_\lambda$.*
- (2) *Die algebraische Vielfachheit a_λ von λ ist die Vielfachheit von λ als eine Nullstelle von $\chi_T(x)$.*

Beispiele 12.5.3.

- (1) In Beispiel 12.4.3 (i) gilt $g_{\lambda_1} = a_{\lambda_1} = 2$.
- (2) In Beispiel 12.3.8 (4) gilt fuer $\lambda = 1$: $g_\lambda = 1$ und $a_\lambda = 2$.
- (3) Wir betrachten den Eigenwert $\lambda = 1$ der Einheitsmatrix $\mathbf{1}_2$: fuer ihn gilt $g_\lambda = a_\lambda = 2$.
- (4) Fuer den Jordanblock $J_n(\lambda)$ gilt

$$g_\lambda = 1 \quad \text{und} \quad a_\lambda = n.$$

Faellt Ihnen was auf?

Satz 12.5.4. *Es sei $T : V \rightarrow V$ eine lineare Abbildung, und es sei λ ein Eigenwert von T . Dann gilt $g_\lambda \leq a_\lambda$.*

Proof. Es sei $k = g_\lambda$. Waehle eine Basis v_1, \dots, v_k des Eigenraums E_λ . Dann koennen wir $\{v_1, \dots, v_k\}$ zu einer Basis $\mathcal{B} = \{v_1, \dots, v_k, v_{k+1}, \dots, v_n\}$ von V erweitern (Theorem 3.3.19). Dann ist die Abbildungsmatrix $[T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}$ von der Form

$$[T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} \lambda \cdot \mathbf{1}_k & A \\ 0_{(n-k) \times k} & B \end{pmatrix} \quad \text{mit } A \in M_{k \times (n-k)}(K) \text{ und } B \in M_{(n-k) \times (n-k)}(K),$$

da T jeden Vektor in E_λ mit λ multipliziert. Daher gilt

$$[T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} - x\mathbf{1}_n = \begin{pmatrix} (\lambda - x) \cdot \mathbf{1}_k & A \\ 0_{(n-k) \times k} & B - x\mathbf{1}_{n-k} \end{pmatrix},$$

und wir folgern von Lemma 12.2.6 (ii), dass

$$\begin{aligned} \chi_T(x) &= \det([T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} - x\mathbf{1}_n) \\ &= \det((\lambda - x) \cdot \mathbf{1}_k) \cdot \det(B - x\mathbf{1}_{n-k}) \\ &= (\lambda - x)^k \cdot \chi_B(x) \end{aligned}$$

mit $\chi_B(x) \in K[x]$. Daher gilt $k \leq a_\lambda$. □

Korollar 12.5.5. *Es sei $T : V \rightarrow V$ eine lineare Abbildung, und es seien $\lambda_1, \dots, \lambda_k$ die Eigenwerte von T . Dann ist T genau dann diagonalisierbar, wenn*

$$g_{\lambda_i} = a_{\lambda_i} \quad \forall 1 \leq i \leq n.$$

Proof. Wir wissen von Korollar 12.4.9, dass T genau dann diagonalisierbar, wenn

$$(42) \quad \dim(V) = \dim E_{\lambda_1} + \cdots + \dim E_{\lambda_k}.$$

Von (41) erhalten wir, dass

$$g_{\lambda_1} + \cdots + g_{\lambda_k} \leq a_{\lambda_1} + \cdots + a_{\lambda_k} = \dim(V).$$

Da $g_{\lambda_i} \leq a_{\lambda_i} \forall i$, ist die Summe $g_{\lambda_1} + \cdots + g_{\lambda_k}$ genau dann gleich $\dim(V)$, wenn $g_{\lambda_i} = a_{\lambda_i}$ fuer alle $1 \leq i \leq k$. \square

Wir koennen unsere Resultate ueber diagonalisierbare Matrizen folgendermassen zusammenfassen:

Theorem 12.5.6. *Es sei V ein n -dimensionaler Vektorraum und $T : V \rightarrow V$ eine lineare Abbildung. Dann sind folgende Aussagen aequivalent:*

- (1) T ist diagonalisierbar;
- (2) fuer jeden Eigenwert λ von T gilt $a_\lambda = g_\lambda$;
- (3) es seien $\lambda_1, \dots, \lambda_k$ die Eigenwerte von T . Dann gilt

$$\chi_T(x) = \prod_{i=1}^k (\lambda_i - x)^{g_{\lambda_i}};$$

$$(4) \quad V = \bigoplus_{i=1}^k E_{\lambda_i}.$$

Proof. Die Aequivalenz (1) \Leftrightarrow (2) ist Korollar 12.5.5.

Aufgrund der Definition der Eigenwerte gilt

$$\chi_T(x) = \prod_{i=1}^k (\lambda_i - x)^{a_{\lambda_i}}.$$

Da diese Faktorisierung eindeutig ist, gilt (2) \Leftrightarrow (3).

Die Aequivalenz (1) \Leftrightarrow (4) ist Korollar 12.4.9. \square

Frage. Nimm an, dass T nicht diagonalisierbar ist. Kann man dann trotzdem eine Basis von V finden, so dass die Abbildungsmatrix von T eine besonders einfache Form hat? Die Antwort ist ja, wenn das charakteristische Polynom $\chi_T(c)$ in Linearfaktoren zerfaellt: in diesem Fall kann man eine Basis finden, so dass die Abbildungsmatrix von T aus Jordan'schen Block-matrizen besteht; man nennt diese die *Jordansche Normalenform von T* . Wir werden in einem spaeteren Kapitel darauf zurueckkommen zurueckkommen.

13. DAS MINIMALE POLYNOM

Lecture 28

13.1. Definition und erste Eigenschaften.

Bemerkung 13.1.1. *Fuer einen endlich-dimensionalen Vektorraum V und $T : V \rightarrow V$ eine lineare Abbildung definieren wir T^k , $k \geq 1$, als die k -fache Verknuepfung von T mit sich selbst:*

$$T^k = T \circ \cdots \circ T.$$

Weiterhin sei $T^0 = \text{id}_V$.

Dieses entspricht der folgenden Definition fuer Matrizen: es sei $A \in M_{n \times n}(K)$. Dann koennen wir fuer alle $k \geq 1$ das k -fache Produkt von A mit sich selber betrachten:

$$A^k = A \cdots A.$$

Wir definieren $A^0 = \mathbf{1}_n$.

Definition 13.1.2. *Es sei $T \in \text{End}_K(V)$ und*

$$g(x) = a_d x^d + a_{d-1} x^{d-1} + \cdots + a_1 x + a_0 \in K[x].$$

Dann definieren wir

$$g(T) = a_d T^d + a_{d-1} T^{d-1} + \cdots + a_1 T + a_0 \text{id}_V \in \text{End}_K(V).$$

Entsprechend definieren wir $g(A)$ fuer $A \in M_{n \times n}(K)$ als

$$g(A) = a_d A^d + a_{d-1} A^{d-1} + \cdots + a_1 A + a_0 \mathbf{1}_n \in M_{n \times n}(K).$$

Bemerkung 13.1.3. Die Auswertung eines Polynoms an einer Matrix oder eines Endomorphismus respektiert die Korrespondenz zwischen Matrizen und Endomorphismen: wenn $A = [T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}$ fuer eine Basis \mathcal{B} von V , dann gilt $g(A) = [g(T)]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}$ (Satz 6.1.5). Umgekehrt sei $A \in M_{n \times n}(K)$ und $T_A : K^n \rightarrow K^n$ der Endomorphismus bezueglich der Standardbasis \mathcal{E} . Dann gilt $T_{g(A)} = g(T_A)$.

Beispiele 13.1.4.

(1) Es sei $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$, und es sei $f(x) = x^2 - x + 3$. Dann gilt

$$\begin{aligned} f(A) &= \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}^2 - \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 3 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} -1 & 4 \\ -2 & -1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 3 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

(2) Es sei $g(x) = x^n$ und $N_n \in M_{n \times n}(K)$ definiert durch

$$N_n = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Dann gilt $g(N_n) = 0_{n \times n}$ ³⁶, aber $N_n^i \neq 0_{n \times n} \forall 0 \leq i < n$.

Satz 13.1.5. Fuer alle $T \in \text{End}_K(V)$ ³⁷ gibt es $g(x) \in K[x]$, $g(x) \neq 0$, so dass $g(T) = 0_V$.

Proof. $\text{End}_K(V) \cong M_{n \times n}(K)$ ist ein K -Vektorraum der Dimension n^2 ; daher sind die linearen Abbildungen T^0, T^1, \dots, T^{n^2} linear abhaengig. Mit anderen Worten, es gibt $a_0, \dots, a_{n^2} \in K$, nicht alle 0, so dass

$$a_{n^2} T^{n^2} + \dots + a_1 T + a_0 \text{id}_V = 0_V.$$

□

Bemerkung 13.1.6. Wenn $g(T) = 0_V$, dann gilt natuerlich auch $(\alpha g)(T) = 0_V$ fuer alle $\alpha \in K$.

Beispiele 13.1.7.

(1) Es sei $n \geq 1$. Dann gilt $g(\mathbf{1}_n) = 0_{n \times n}$ fuer $g(x) = x - 1$.

(2) Nimm an, dass $T : V \rightarrow V$ diagonalisierbar ist, mit Eigenwerten $\lambda_1, \dots, \lambda_k$ mit (algebraischen oder geometrischen) Vielfachheiten a_1, \dots, a_k . Dann gibt es eine Basis von V , so dass die Abbildungsmatrix von T die Form hat

$$[T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} \lambda_1 \mathbf{1}_{a_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 \mathbf{1}_{a_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_k \mathbf{1}_{a_k} \end{pmatrix}$$

Dann gilt

$$\chi_T([T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}) = \begin{pmatrix} \chi_T(\lambda_1) \mathbf{1}_{a_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \chi_T(\lambda_2) \mathbf{1}_{a_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \chi_T(\lambda_k) \mathbf{1}_{a_k} \end{pmatrix} = 0_{n \times n}.$$

Definition 13.1.8. Es sei $T : V \rightarrow V$ linear. Das minimale Polynom von T ist das monische³⁸ Polynom $m_T(x) \in K[x]$ kleinsten Grades, so dass $m_T(T) = 0_V$.

³⁶Eine Matrix $A \in M_{n \times n}(K)$, fuer die es ein $m \geq 0$ gibt, so dass $A^m = 0_{n \times n}$, heisst *nilpotent*.

³⁷und entsprechend fuer alle $A \in M_{n \times n}(K)$

³⁸d.h. Leitkoeffizient ist gleich 1

Wir muessen zunaechst zeigen, dass diese Definition sinnvoll ist:

Lemma 13.1.9. *Es seien $m(x), m'(x) \in K[x]$ beide monisch vom kleinsten Grad $d \geq 1$, so dass $m(T) = m'(T) = 0_V$. Dann gilt $m(x) = m'(x)$.*

Proof. Nimm an, dass $m(x) \neq m'(x)$. Dann ist das Polynom $g(x) = m(x) - m'(x)$ vom Grad $< d$, und es gilt $g(T) = 0$. Das ist ein Widerspruch zur Definition des minimalen Polynoms. \square

Satz 13.1.10. *Es sei $T : V \rightarrow V$ linear, und es sei $g(x) \in K[x]$, $g \neq 0$, so dass $g(T) = 0_V$. Dann gilt $m_T(x) | g(x)$.*

Proof. Mithilfe von Polynomdivision finden wir Polynom $q(x), r(x) \in K[x]$, mit $r(x) = 0$ oder $\partial(r) < \partial(m)$, so dass

$$(43) \quad g(x) = q(x) \cdot m(x) + r(x).$$

- Wenn $r(x) = 0$, dann gilt $g(x) = q(x)m(x)$ und daher $m(x) | g(x)$.
- Wenn $r(x) \neq 0$, dann werten wir (43) an T aus und erhalten $r(T) = 0_V$. Doch dies gibt einen Widerspruch zu der Minimalitaet von $m_T(x)$.

\square

Beispiele 13.1.11.

- (1) Nimm an, dass $T : V \rightarrow V$ diagonalisierbar ist, mit Eigenwerten $\lambda_1, \dots, \lambda_k$. Wir haben bereits in Beispiel 13.1.7 gesehen, dass $\chi_T(T) = 0_V$. Was ist das minimale Polynom von T ?
- (2) Es sei $A = J_n(\lambda)$ fuer $n \geq 1$ und $\lambda \in K$. Dann folgt von Beispiel 13.1.4, dass

$$m_A(x) = \chi_A(x) = (x - \lambda)^n.$$

Vergleichen wir dieses mit dem minimalen Polynom der diagonalen Matrix $B = \lambda \mathbf{1}_n$: fuer sie gilt $m_B(x) = x - \lambda$. Die beidem Matrizen haben also unterschiedlichen minimale Polynome aber das gleiche charakteristische Polynom. Mit anderen Worten, das minimale Polynom 'sieht' also in einem gewissen Sinne die 1en ueber den Diagonalen von A .

Definition 13.1.12. *Es sei K algebraisch abgeschlossen, und es seien $f(x), g(x) \in K[x]$ gegeben durch*

$$\begin{aligned} f(x) &= (x - \lambda_1)^{a_1} \cdots (x - \lambda_m)^{a_m}, \\ g(x) &= (x - \lambda_1)^{b_1} \cdots (x - \lambda_n)^{b_n} \end{aligned}$$

wobei $a_i, b_i \geq 0$ fuer all 1. Das kleinste gemeinsame Vielfache von $f(x)$ und $g(x)$ ist definiert als

$$\text{lcm}(f, g) = (x - \lambda_1)^{\max\{a_1, b_1\}} \cdots (x - \lambda_n)^{\max\{a_n, b_n\}}.$$

Beispiel 13.1.13. Es seien

$$f(x) = x(x - 3)^4(x + 1)^2, \quad g(x) = (x - 3)(x + 1)^3(x - 2)^2.$$

Dann ist

$$\text{lcm}(f, g) = x(x - 3)^4(x + 1)^3(x - 2)^2.$$

Folgender Satz wird in Kapitel 14 sehr wichtig:

Satz 13.1.14. *Es sei K algebraisch abgeschlossen und $C \in M_{n \times n}(K)$. Nimm an, dass*

$$C = \begin{pmatrix} A & 0_{m \times \ell} \\ 0_{\ell \times m} & B \end{pmatrix}$$

mit $A \in M_{m \times m}(K)$ und $B \in M_{\ell \times \ell}(K)$. Dann ist $m_C(x)$ das kleinste gemeinsame Vielfache von $m_A(x)$ und $m_B(x)$:

$$m_C(x) = \text{lcm}(m_A(x), m_B(x)).$$

Proof. Wir beachten zunaechst, dass fuer all $f(x) \in K[x]$ gilt

$$f(C) = \begin{pmatrix} f(A) & 0 \\ 0 & f(B) \end{pmatrix};$$

daher gilt $f(C) = 0$ genau dann, wenn $f(A) = 0$ und $f(B) = 0$. Es sei nun $f(x) = \text{lcm}(m_A(x), m_B(x))$. Da $m_A(x)$ und $m_B(x)$ das Polynom $f(x)$ teilen, gilt $f(A) = 0$ und $f(B) = 0$ und daher $f(C) = 0$ was bedeutet, dass $m_C(x) | f(x)$. Wenn $f(x) \neq m_C(x)$, dann koennen nicht $m_A(x)$ und $m_B(x)$ das Polynom $m_C(x)$ teilen; sagen wir $m_A(x) \nmid m_C(x)$. Aber dann gilt $m_C(A) \neq 0$ und daher $m_C(C) \neq 0$, was ein Widerspruch ist. \square

Korollar 13.1.15. Es sei K algebraisch abgeschlossen und $C \in M_{n \times n}(K)$. Nimm an, dass

$$C = \begin{pmatrix} A_1 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & A_2 & 0 & 0 & \dots \\ & & \dots & & \\ & & \dots & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_k \end{pmatrix}$$

mit $A_i \in M_{n_i \times n_i}(K)$. Dann gilt

$$m_C(x) = \text{lcm} \{m_{A_1}(x), \dots, m_{A_k}(x)\}.$$

Proof. Induktion. □

Beispiele 13.1.16.

(1) Es sei

$$A = \begin{pmatrix} J_3(\lambda) & 0 & 0 \\ 0 & J_3(\lambda) & 0 \\ 0 & 0 & J_2(\lambda) \end{pmatrix}.$$

Dann gilt $m_A(x) = (x - \lambda)^3$.

(2) Es sei $\lambda \neq 0$ und

$$B = \begin{pmatrix} J_5(\lambda) & 0 & 0 \\ 0 & J_6(\lambda^{-1}) & 0 \\ 0 & 0 & J_4(\lambda^{-1}) \end{pmatrix}.$$

Dann gilt

$$m_B(x) = \begin{cases} (x - \lambda)^5(x - \lambda^{-1})^6 & \text{wenn } \lambda \notin \{\pm 1\} \\ (x - \lambda)^6 & \text{wenn } \lambda \in \{\pm 1\}. \end{cases}$$

Bemerkung 13.1.17. Satz 13.1.14 gilt auch dann, wenn K nicht algebraisch abgeschlossen ist und sich die minimalen Polynome nicht in Linearfaktoren zerlegen lassen. Dazu braucht man das Konzept der unzerlegbaren Polynome, um definieren zu koennen, was das kleinste gemeinsame Vielfache von zwei Polynomen ist.

13.2. Der Satz von Cayley–Hamilton. Wir wollen uns nun mit dem Problem beschaeftigen, wie wir das minimale Polynom einer Matrix $A \in M_{n \times n}(K)$ bestimmen koennen. Aufgrund von Satz 13.1.10 waere es ein guter Anfang, irgendein Polynom $g(x) \in K[x]$ zu finden, so dass $g(A) = 0$. In Beispiel 13.1.7 haben wir gezeigt, dass $\chi_A(A) = 0_{n \times n}$, wenn A diagonalisierbar ist. Gilt das allgemein?

Wir wollen nun folgenden Satz beweisen:

Theorem 13.2.1 (Cayley–Hamilton). Es sei $T \in \text{End}_K(V)$. Dann gilt $\chi_T(T) = 0_V$.

Korollar 13.2.2. $\forall T \in \text{End}_K(V)$ gilt $m_T(x) | \chi_T(x)$.

Proof. Folgt unmittelbar von Satz 13.1.10 und Theorem 13.2.1. □

Lemma 13.2.3. Es sei $f(x) = x^k + a_{k-1}x^{k-1} + \dots + a_1x + a_0$, und es sei $A \in M_{k \times k}(K)$ gegeben durch³⁹

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & -a_0 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & -a_1 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & -a_2 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & -a_3 \\ & \dots & \dots & & & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & -a_{k-2} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & -a_{k-1} \end{pmatrix}.$$

Dann ist $\chi_A(x) = (-1)^k f(x)$.

Proof. Uebung. □

Lemma 13.2.4. Es sei $T : V \rightarrow V$ eine lineare Abbildung. Es sei $W \subset K^n$ ein Unterraum, so dass $T(W) \subseteq W$ (ein solcher Unterraum heisst T -invariant), und es sei $T' = T|_W$. Dann gilt

$$\chi_{T'}(x) | \chi_T(x).$$

³⁹Wir nennen A die Begleitmatrix von $f(x)$.

Proof. Es sei w_1, \dots, w_k eine Basis von W , die wir zu einer Basis $\mathcal{B} = \{w_1, \dots, w_k, v_1, \dots, v_{n-k}\}$ von V erweitern. Dann ist die Abbildungsmatrix $[T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}$ von der Form

$$[T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} A & B \\ 0_{(n-k) \times k} & C \end{pmatrix},$$

wobei $A \in M_{(n-k) \times (n-k)}(K)$ die Abbildungsmatrix von T' bezueglich der gewaehlten Basis von W ist. Dann gilt

$$\begin{aligned} \chi_T(x) &= \det([T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} - x\mathbf{1}_n) \\ &= \det \begin{pmatrix} A - x\mathbf{1}_k & B \\ 0_{(n-k) \times k} & C - x\mathbf{1}_{n-1} \end{pmatrix} \\ &= \det(A - x\mathbf{1}_k) \cdot \det(C - x\mathbf{1}_{n-k}) \\ &= \chi_{T'}(x) \cdot \det(C - x\mathbf{1}_{n-k}). \end{aligned}$$

Daraus folgt, dass $\chi_{T'}(x) \mid \chi_T(x)$. □

Satz 13.2.5. *Es sei $T : V \rightarrow V$ eine lineare Abbildung, und es sei $w \in V$. Es sei $W = \langle w, Tw, T^2w, \dots \rangle$. Dann gilt $T(W) \subseteq W$, und wenn $T' = T|_W$, dann gilt*

$$\chi_{T'}(T') \cdot w = 0_V.$$

Proof. Es sei $k \geq 1$ maximal, so dass $\mathcal{B} = \{w, Tw, \dots, T^{k-1}w\}$ linear unabhängig und daher eine Basis von W ist. Dann gilt $T^k w \in W$, das heisst es gibt $a_1, \dots, a_{k-1} \in K$, so dass

$$(44) \quad T^k w + a_{k-1} \cdot T^{k-1} w + \dots + a_1 \cdot Tw + a_0 \cdot w = 0_V.$$

Dann ist $[T']_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}$ die Begleitmatrix des Polynoms

$$f(x) = x^k + a_{k-1}x^{k-1} + \dots + a_1x + a_0,$$

und es folgt von Lemma 13.2.3, dass $\chi_{T'}(x) = f(x)$. Daher ist $\chi_{T'}(T) \cdot w$ gleich (44), und der Satz folgt. □

Wir erhalten nun Theorem 13.2.1 als einfache Konsequenz:

Proof. Da $\chi_{T'}(x) \mid \chi_T(x)$ aufgrund von Lemma 13.2.4 und $w \in V$ beliebig war, gilt

$$\chi_T(T) \cdot w = 0_V \quad \forall w \in V.$$

□

13.3. Ein alternativer Beweis von Cayley–Hamilton.

Bemerkung 13.3.1. *Es sei $A \in M_{n \times n}(K)$. Indem wir Satz 10.3.11 auf die Matrix $A - x\mathbf{1}_n$ anwenden, erhalten wir*

$$(45) \quad (A - x\mathbf{1}_n) \operatorname{adj}(A - x\mathbf{1}_n) = \chi_A(x) \cdot \mathbf{1}_n.$$

Warum koennen wir A nicht direkt in diese Gleichung einsetzen und erhalten $\chi_A(A) = 0_{n \times n}$?

Bemerkung 13.3.2. *Es sei $C = (c_{ij}(x)) \in M_{n \times n}(K[x])$ eine Matrix, so dass jeder Eintrag $c_{ij}(x)$ in Polynom in x vom Grad $\leq k$ ist. Dann gibt es Matrizen $B_0, \dots, B_{k-1} \in M_{n \times n}(K)$, so dass*

$$C = B_{k-1} \cdot x^{k-1} + B_{k-2} \cdot x^{k-2} + \dots + B_1 \cdot x + B_0.$$

Beispiel 13.3.3. Es sei $A \in M_{2 \times 2}(\mathbb{R}[x])$ gegeben durch

$$A = \begin{pmatrix} 2x^2 + x & -2x - 3 \\ x^2 - 1 & -x^2 \end{pmatrix}.$$

Dann ist

$$\Psi(A) = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \cdot x^2 + \begin{pmatrix} 1 & -2 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot x + \begin{pmatrix} 0 & -3 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Beweis von Theorem 13.2.1: Wir schreiben $\operatorname{adj}(A - x\mathbf{1}_n) = (p_{ij}(x))_{1 \leq i, j \leq n}$, wobei $\forall i, j$ $p_{ij}(x) \in K[x]$ ein Polynom vom Grad $\leq n$ ist. Aufgrund von Bemerkung 13.3.2 koennen wir daher $\operatorname{adj}(A - x\mathbf{1}_n)$ schreiben als

$$\operatorname{adj}(A - x\mathbf{1}_n) = B_{n-1}x^{n-1} + \dots + B_1x + B_0$$

mit $B_0, B_1, \dots, B_{k-1} \in M_{n \times n}(K)$. Indem wir dies in (45) einsetzen, erhalten wir

$$(46) \quad (A - x\mathbf{1}_n)(B_{n-1}x^{n-1} + \dots + B_1x + B_0) = \chi_A(x) \cdot \mathbf{1}_n.$$

Wenn wir $\chi_A(x)$ schreiben als

$$\chi_A(x) = (-1)^n(x^n + \dots + a_1x + a_0),$$

dann koenne wir in (46) $\forall 0 \leq i \leq n$ die Koeffizienten von x^i vergleichen und erhalten folgendes System von Matrixgleichungen

$$\begin{aligned} AB_0 &= (-1)^n a_0 \mathbf{1}_n, \\ -B_0 + AB_1 &= (-1)^n a_1 \mathbf{1}_n, \\ &\vdots \\ -B_{n-2} + AB_{n-1} &= (-1)^n a_{n-1} \mathbf{1}_n, \\ -B_{n-1} &= (-1)^n \mathbf{1}_n. \end{aligned}$$

Indem wir diese Gleichungen von links mit $\mathbf{1}_n, A, A^2, \dots, A^n$ multiplizieren, erhalten wir

$$\begin{aligned} AB_0 &= (-1)^n a_0 \mathbf{1}_n, \\ -AB_0 + A^2 B_1 &= (-1)^n a_1 A, \\ &\vdots \\ -A^{n-1} B_{n-2} + A^n B_{n-1} &= (-1)^n a_{n-1} A^{n-1}, \\ -A^n B_{n-1} &= (-1)^n A^n \end{aligned}$$

Wenn wir alle diese Gleichungen addieren, dann ergibt die linke Seite $0_{n \times n}$, waehrend die rechte Seite den Wert $\chi_A(A)$ ergibt. Daher gilt $\chi_A(A) = 0_{n \times n}$, was zu beweisen war.

14. DIE JORDANSCHEN NORMALENFORM EINER MATRIX

Annahme: Fuer den Rest dieses Kapitels sei K algebraisch abgeschlossen.

14.1. Definition und Theorem. Wir erinnern uns an die Definition der Jordanschen Blocks: es sei $n \geq 1$ und $\lambda \in K$. Dann ist der Jordanblock der Laenge n und Eigenwert λ die Matrix $J_n(\lambda) \in M_{n \times n}(K)$,

$$J_n(\lambda) = \begin{pmatrix} \lambda & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \lambda \end{pmatrix}$$

Folgende Eigenschaften des Jordanblocks haben wir bereits bewiesen:

Lemma 14.1.1. λ ist der einzige Eigenwert von $J_n(\lambda)$ mit $g_\lambda = 1$ und $a_\lambda = n$. Weiterhin gilt $E_\lambda = \langle e_1 \rangle$. Das minimale Polynom von $J_n(\lambda)$ ist

$$m_{J_n(\lambda)}(x) = (x - \lambda)^n.$$

Theorem 14.1.2. [Jordansche Normalenform] Es sei V ein n -dimensionaler Vektorraum ueber K und $T: V \rightarrow V$ linear. Dann gibt es eine Basis \mathcal{B} von V , so dass

$$(47) \quad [T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} J_{n_1}(\alpha_1) & & & & \\ & J_{n_2}(\alpha_2) & & & \\ & & J_{n_3}(\alpha_3) & & \\ & & & \vdots & \\ & & & & J_{n_k}(\alpha_k) \end{pmatrix}$$

fuer $n_1, \dots, n_k \geq 1$ so dass $n_1 + \dots + n_k = n$ und $\alpha_1, \dots, \alpha_k \in K$ ⁴⁰. Weiterhin ist diese Darstellungsmatrix von T eindeutig, abgesehen von der moeglichen Vertauschung der Jordanblöcke.

Wir koennen natuerlich das Theorem auch in Matrixform ausdruecken:

Theorem 14.1.3. Es sei $A \in M_{n \times n}(K)$. Dann gibt es eine invertierbare Matrix $B \in M_{n \times n}(K)$, so dass $B^{-1}AB$ die Form (48) hat.

⁴⁰nicht notwendigerweise verschieden!

Bemerkung 14.1.4. *Diagonalisierbare Matrizen sind ein Spezialfall von Theorem 14.1.2: in diesem Fall haben alle Jordanblöcke Länge 1!*

14.2. Eigenschaften der Jordanschen Normalenform. Wir wollen nun verstehen, was uns die Jordanform ueber die Eigenwerte und deren algebraischen und geometrischen Vielfachheiten verraeht; dieses wird uns spaeter dabei helfen, Theorem 14.1.2 zu beweisen. Wir sehen uns zunaechst ein Beispiel an:

Beispiel 14.2.1. Es seien $\lambda_1, \lambda_2 \in K$, voneinander verschieden. Wir betrachten die Matrix $B \in M_{9 \times 9}(K)$, gegeben durch

$$B = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & \lambda_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & \lambda_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & \lambda_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & \lambda_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & \lambda_2 & 1 & 0 & 0 \\ & & & & & & \lambda_2 & 0 & 0 \\ & & & & & & & \lambda_2 & 0 \\ & & & & & & & & \lambda_2 \end{pmatrix}$$

Mit anderen Worten, B ist zusammengesetzt aus Jordanblöcken $J_3(\lambda_1)$, $J_2(\lambda_1)$, $J_2(\lambda_2)$ und zweimal $J_1(\lambda_2)$. Es folgt, dass

- $\chi_B(x) = (\lambda_1 - x)^5(\lambda_2 - x)^4$;
- die Eigenwerte von B sind λ_1 und λ_2 , mit Eigenraeumen

$$E_{\lambda_1} = \langle e_1, e_4 \rangle \quad E_{\lambda_2} = \langle e_6, e_8, e_9 \rangle;$$

- es gilt $a_{\lambda_1} = 5$ und $a_{\lambda_2} = 4$;
- es gilt $g_{\lambda_1} = 2$ und $g_{\lambda_2} = 3$;
- von Korollar 13.1.15 folgt, dass das minimale Polynom ist gegeben durch

$$m_B(x) = (x - \lambda_1)^3(x - \lambda_2)^2.$$

Um die Beobachtungen aus diesem Beispiel zu verallgemeinern, brauchen wir folgendes Lemma:

Lemma 14.2.2. *Es sei $C \in M_{n \times n}(K)$ von der Form*

$$C = \begin{pmatrix} A & 0 \\ 0 & B \end{pmatrix}$$

mit $A \in M_{\ell \times \ell}(K)$ und $B \in M_{(n-\ell) \times (n-\ell)}(K)$. Definiere die Unterraume $U = \langle e_1, \dots, e_\ell \rangle$ und $W = \langle e_{\ell+1}, \dots, e_n \rangle$. Es sei $v = u + w \in V$, $v \neq 0$, mit $u \in U$ und $w \in W$. Dann ist v genau dann ein Eigenvektor von T_C mit Eigenwert λ , wenn $T_A(u) = \lambda u$ und $T_B(w) = \lambda w$. Weiterhin gilt⁴¹

$$E_\lambda(T_C) = E_\lambda(T_A) \oplus E_\lambda(T_B)$$

und daher $g_\lambda(T_C) = g_\lambda(T_A) + g_\lambda(T_B)$.

Proof. Übung. □

Theorem 14.2.3. *Es sei $T : V \rightarrow V$ linear. Nimm an, dass es eine Basis \mathcal{B} von V gibt, so dass*

$$(48) \quad [T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} J_{n_1}(\alpha_1) & & & & \\ & J_{n_2}(\alpha_2) & & & \\ & & J_{n_3}(\alpha_3) & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & J_{n_k}(\alpha_k) \end{pmatrix}$$

Es sei λ ein Eigenwert von T . Dann ist die geometrische Vielfachheit von λ die Anzahl der Jordanblöcke mit Eigenwert λ , d.h.

$$g_\lambda = \#\{i : 1 \leq i \leq k, \alpha_i = \lambda\}.$$

⁴¹Hier schreiben wir fuer eine lineare Abbildung $T : V \rightarrow V$ und $\lambda \in K$

$$E_\lambda(T) = \ker(T - \lambda \mathbf{1}_V)$$

und $g_\lambda(T) = \dim E_\lambda(T)$.

Das minimale Polynom von T ist gegeben durch

$$m_T(x) = \prod_{\lambda \text{ Eigenwert}} (x - \lambda)^{s(\lambda)},$$

wobei $s(\lambda)$ die Länge des größten Jordanblocks mit Eigenwert λ ist, d.h.

$$s(\lambda) = \max\{n_j : 1 \leq j \leq k, \alpha_j = \lambda\}.$$

Proof. Schreibe die Basis \mathcal{B} als

$$\mathcal{B} = \left\{ b_1^{(1)}, \dots, b_{n_1}^{(1)}, b_1^{(2)}, \dots, b_{n_2}^{(2)}, \dots, b_1^{(k)}, \dots, b_{n_k}^{(k)} \right\},$$

und es sei $W_i = \langle b_1^{(i)}, \dots, b_{n_i}^{(i)} \rangle$, d.h. W_i ist der Unterraum von V mit Basis

$$\mathcal{B}^{(i)} = \{b_1^{(i)}, \dots, b_{n_i}^{(i)}\}$$

Dann gilt

$$V = W_1 \oplus \dots \oplus W_k,$$

und die Abbildungsmatrix von $T|_{W_i}$ bezüglich der Basis $\mathcal{B}^{(i)}$ ist gleich dem Jordanblock $J_{n_i}(\alpha_i)$. Dann folgt von Lemma 14.2.2, dass

$$g_\lambda(T) = g_\lambda(T|_{W_1}) + \dots + g_\lambda(T|_{W_k}).$$

Doch

$$g_\lambda(T|_{W_i}) = \begin{cases} 0 & \text{wenn } \lambda \neq \alpha_i \\ 1 & \text{wenn } \lambda = \alpha_i \end{cases}$$

Daraus folgt, dass

$$g_\lambda = \#\{i : 1 \leq i \leq k, \alpha_i = \lambda\}.$$

Laut Korollar 13.1.15 ist

$$m_T(x) = \text{lcm} \left\{ m_{J_{n_1}}(\alpha_1), \dots, m_{J_{n_k}}(\alpha_k) \right\}.$$

Nun gilt

$$m_{J_{n_i}}(\alpha_i) = (x - \alpha_i)^{n_i}.$$

Mit anderen Worten, wenn λ ein Eigenwert von T ist, dann ist der Exponent des Faktors $(x - \lambda)$ in $m_T(x)$ gegeben durch

$$s(\lambda) = \max\{n_j : 1 \leq j \leq k, \alpha_j = \lambda\},$$

und daher gilt

$$m_T(x) = \prod_{\lambda \text{ Eigenwert}} (x - \lambda)^{s(\lambda)}.$$

□

14.3. Verallgemeinerte Eigenräume.

Es sei V ein n -dimensionaler K -Vektorraum.

Definition 14.3.1. Es sei $T : V \rightarrow V$ linear, und es sei λ ein Eigenwert von T . Der verallgemeinerte Eigenraum von λ ist

$$\tilde{E}_\lambda = \bigcup_{j=1}^{\infty} \ker(T - \lambda \mathbf{1}_V)^j.$$

Lemma 14.3.2. Es sei $S : V \rightarrow V$ linear, und es sei $v \in V$, $v \neq 0$. Nimm an, dass $S^k v = 0_V$ für ein $k \geq 1$, aber dass $S^{k-1} v \neq 0_V$. Dann sind

$$v, Sv, \dots, S^{k-1}v$$

linear unabhängig.

Proof. Nimm an, dass es Skalare a_0, \dots, a_{k-1} gibt, so dass

$$(49) \quad a_0 v + a_1 Sv + \dots + a_{k-1} S^{k-1} v = 0_V.$$

Indem wir S^{k-1} auf die Gleichung (49) anwenden, erhalten wir $a_0 S^{k-1} v = 0_V$ und daher $a_0 = 0$. Dann wenden wir S^{k-2} auf (49) an und erhalten $a_1 S^{k-1} v = 0_V$ und daher $a_1 = 0$. Über Induktion erhalten wir daher $a_i = 0 \forall i$. □

Lemma 14.3.3. Es gilt $\tilde{E}_\lambda = \ker(T - \lambda \mathbf{1}_V)^n$.

Proof. Es sei $S = T - \lambda \mathbf{1}_n$. Nimm an, dass es $v \in V$ und $m \geq 1$ gibt, so dass $S^m v = 0$ und $S^{m-1} v \neq 0_V$. Dann sind laut Lemma 14.3.2 die Vektoren $m, Sv, \dots, S^{m-1}v$ linear unabhängig. Daher gilt $m \leq n$. \square

Definition 14.3.4. Es sei $v \in \tilde{E}_\lambda$, $v \neq 0_V$, und es sei $k \geq 1$ minimal, so dass $(T - \lambda \mathbf{1}_n)v = 0_V$. Dann ist die Menge

$$\{v, (T - \lambda \mathbf{1}_V)v, \dots, (T - \lambda \mathbf{1}_V)^{k-1}v\}$$

die Jordankette von v (der Länge k).

Bemerkung 14.3.5. Jeder Eigenvektor von T bildet eine Jordankette der Länge 1.

Beachte 14.3.6. $(T - \lambda \mathbf{1}_V)^{k-1}v$ ist ein Eigenvektor von T mit Eigenwert λ .

Beispiele 14.3.7.

(1) Es sei $A = J_n(\lambda)$ und $T_A : K^n \rightarrow K^n$ die dazugehörige Abbildung. Was ist \tilde{E}_λ ?

(2) Es seien $\mu, \lambda \in K$, $\mu \neq \lambda$, und $A = \begin{pmatrix} J_2(\lambda) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_3(\lambda) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_2(\mu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{pmatrix}$. Wir betrachten die

Abbildung $T_A : K^9 \rightarrow K^9$. Dann ist

$$\tilde{E}_\lambda = \langle e_1, \dots, e_6 \rangle \quad \text{und} \quad \tilde{E}_\mu = \langle e_7, e_8, e_9 \rangle.$$

Die Jordankette von e_1 ist $\{e_1, e_2\}$, von e_3 erhalten wir $\{e_3, e_4, e_5\}$.

(3) Es sei B wie in Beispiel 14.2.1. Dann hat T_B die verallgemeinerten Eigenräume

$$\tilde{E}_{\lambda_1} = \langle e_1, \dots, e_5 \rangle \quad \text{und} \quad \tilde{E}_{\lambda_2} = \langle e_6, \dots, e_9 \rangle.$$

Was fällt auf?

Lemma 14.3.8. Für jeden Eigenwert λ ist \tilde{E}_λ ein T -invarianter Unterraum von V .

Proof. Da $\tilde{E}_\lambda = \ker(T - \lambda \mathbf{1}_V)^n$, folgt unmittelbar, dass $\tilde{E}_\lambda \leq V$. Wir müssen daher nur zeigen, dass

$$T(\tilde{E}_\lambda) \subseteq \tilde{E}_\lambda.$$

Nimm an, dass $(T - \lambda \mathbf{1}_V)^n v = 0_V$. Dann gilt

$$(T - \lambda \mathbf{1}_V)^n T v = T(T - \lambda \mathbf{1}_V)^n v = 0_V,$$

und daher $T v \in \tilde{E}_\lambda$. \square

Als einfache Konsequenz erhalten wir folgenden Satz:

Satz 14.3.9. λ ist der einzige Eigenwert von $T|_{\tilde{E}_\lambda}$.

Proof. Es sei μ ein Eigenwert von $T|_{\tilde{E}_\lambda}$ mit Eigenvektor v . Es sei $k \geq 1$ minimal so dass $(T - \lambda \mathbf{id}_V)^k v = 0$, und es sei $w = (T - \lambda \mathbf{id}_V)^{k-1} v$. Dann gilt

$$(T - \lambda \mathbf{id}_V)w = (T - \lambda \mathbf{id}_V)^k v = 0_V = (\mu - \lambda)w$$

und daher $\mu = \lambda$. \square

Korollar 14.3.10. Es sei $T_\lambda = T|_{\tilde{E}_\lambda}$. Dann gibt es $m_\lambda \leq a_\lambda(T)$

$$\chi_{T_\lambda}(x) = (\lambda - x)^{m_\lambda}.$$

Proof. Da K algebraisch abgeschlossen ist und λ der einzige Eigenwert von T_λ ist, gilt $\chi_{T_\lambda}(x) = (\lambda - x)^{m_\lambda}$ für ein $m_\lambda \geq 1$. Laut Lemma 13.2.4 gilt $\chi_{T_\lambda}(x) | \chi_T(x)$, und daher $m_\lambda \leq a_\lambda(T)$. \square

Lemma 14.3.11. Es seien μ, λ verschiedene Eigenwerte von T . Dann gilt

$$\tilde{E}_\lambda \cap \tilde{E}_\mu = \{0_V\}.$$

Mit anderen Worten, der Unterraum $\tilde{E}_\lambda + \tilde{E}_\mu$ ist die direkte Summe $\tilde{E}_\lambda \oplus \tilde{E}_\mu$.

Proof. Es sei $U = \tilde{E}_\lambda \cap \tilde{E}_\mu$, und nimm an, dass $U \neq \{0_V\}$. Dann ist U ein T -invarianter Unterraum (warum?), und daher gilt $\chi_{T|U}(x) | (x - \mu)^{m_\mu}$ und $\chi_{T|U}(x) | (x - \lambda)^{m_\lambda}$. Da $\dim U = \dim U$ und $\lambda \neq \mu$, erhalten wir einen Widerspruch. \square

Wir koennen dieses Lemma verallgemeinern:

Lemma 14.3.12. *Es seien $\lambda_1, \dots, \lambda_k$ voneinander verschiedene Eigenwerte von T . Dann ist der Unterraum $W = \tilde{E}_{\lambda_1} + \dots + \tilde{E}_{\lambda_k}$ die direkte Summe*

$$W = \tilde{E}_{\lambda_1} \oplus \dots \oplus \tilde{E}_{\lambda_k}.$$

Proof. Induktion nach k . □

Bemerkung 14.3.13. *Vergleichen sie dieses Lemma mit Satz 12.4.8.*

Wie moechten nun zeigen, dass V die direkte Summe seiner verallgemeinerten Eigenraeume ist – *unabhaengig davon, ob T diagonalisierbar ist oder nicht*. Als Vorbereitung brauchen wir folgendes Lemma:

Lemma 14.3.14.

- (1) *Es sei $T : V \rightarrow V$ linear, und es sei λ ein Eigenwert von T . Es sei $g(x) = (x - \lambda)^n$. Dann ist $\text{im}(g(T))$ ein T -invarianter Unterraum von V , und es gilt*

$$V = \tilde{E}_{\lambda} \oplus \text{im}(g(T)).$$

- (2) *Es sei μ ein von λ verschiedener Eigenwert von T . Dann gilt*

$$\tilde{E}_{\mu} \subseteq \text{im}(g(T)).$$

Proof. (1) Die Invarianz von $\text{im}(g(T))$ ist eine Uebung. Von Theorem 4.2.9 wissen wir, dass

$$\dim V = \dim \ker(g(T)) + \dim \text{im}(g(T));$$

es ist daher ausreichend zu zeigen, dass $\ker(g(T)) \cap \text{im}(g(T)) = \{0\}$. Es sei $w \in \text{im}(g(T))$, d.h. es gibt $v \in V$ so dass $g(T)v = w$. Wenn $w \in \tilde{E}_{\lambda}$, dann gilt

$$(T - \lambda \mathbf{1}_V)^n w = (T - \lambda \mathbf{1}_V)^{2n} v = 0_V,$$

das heisst $v \in \tilde{E}_{\lambda}$. Nun wissen wir aber von Lemma 14.3.3, dass $\tilde{E}_{\lambda} = \ker(T - \lambda \mathbf{1}_V)^n$, und daher gilt

$$w = (T - \lambda \mathbf{1}_V)^n v = 0_V.$$

(2) Es sei $S = (T - \lambda \mathbf{1}_V)^n$. Eine einfache Rechnung zeigt, dass \tilde{E}_{μ} ein S -invarianter Unterraum von V ist. Es sei $S' = S|_{\tilde{E}_{\mu}}$. Dann ist

$$\ker(S') = \tilde{E}_{\lambda} \cap \tilde{E}_{\mu} = \{0\} \quad (\text{aufgrund von Lemma 14.3.11}),$$

das heisst, S' ist ein Isomorphismus. Insbesondere gilt $\tilde{E}_{\mu} = \text{im}(S') \subseteq \text{im}(g(T))$, quod erat demonstrandum. □

Theorem 14.3.15. *Es sei $T : V \rightarrow V$ linear. Dann gilt*

$$V = \bigoplus_{\eta \text{ Eigenwert}} \tilde{E}_{\eta} :$$

*V ist die direkte Summer seiner verallgemeinerten Eigenraeume.*⁴²

Proof. Wir benutzen Induktion ueber $n = \dim V$. Es sei λ ein Eigenwert von T . Dann wissen wir von Lemma 14.3.14, dass

$$V = \tilde{E}_{\lambda} \oplus \text{im}((T - \lambda \mathbf{1}_V)^n),$$

und dass $U = \text{im}((T - \lambda \mathbf{1}_V)^n)$ ein T -invarianter Unterraum ist, von Dimension $< n$. Daher gilt

$$U = \bigoplus_{\mu \text{ Eigenwert von } T|_U} \tilde{E}_{\mu}$$

und daher

$$\begin{aligned} V &= \tilde{E}_{\lambda} \oplus \left(\bigoplus_{\mu \text{ Eigenwert von } T|_U} \tilde{E}_{\mu} \right) \\ &= \bigoplus_{\eta \text{ Eigenwert von } T} \tilde{E}_{\eta}. \end{aligned}$$

□

⁴²Dieses gilt nicht, wenn $\chi_T(x)$ sich nicht in Linearfaktoren zerlegen laesst. Daher die Annahme, dass K algebraisch abgeschlossen ist.

Wir koennen dieses Theorem folgendermassen formulieren:

Korollar 14.3.16. *Es sei $T : V \rightarrow V$ linear, und es seien $\lambda_1, \dots, \lambda_k$ die Eigenwerte von T . Dann gibt es $m_1, \dots, m_k \geq 1$, so dass*

$$V = \ker((T - \lambda_1 \mathbf{1}_V)^{m_1}) \oplus \dots \oplus \ker((T - \lambda_k \mathbf{1}_V)^{m_k}).$$

Bemerkung 14.3.17.

- (1) *Um Theorem 14.1.2 zu beweisen, muessen wir zeigen, dass jeder verallgemeinerte Eigenraum eine Basis besitzt, die aus Jordanketten besteht.*
- (2) *Fuer jeden Eigenwert λ von T ist*

$$T - \lambda \mathbf{1}_V : \tilde{E}_\lambda \rightarrow \tilde{E}_\lambda$$

eine nilpotente lineare Abbildung. Um Theorem 14.1.2 zu beweisen ist es daher ausreichend, es fuer nilpotente lineare Abbildungen zu zeigen.

14.4. Beweis der JNF for nilpotente Abbildungen.

Theorem 14.4.1. *Es sei V ein n -dimensionaler Vektorraum ueber K und $S : V \rightarrow V$ nilpotent. Dann gibt es $k \geq 1$, $n_1, \dots, n_k \geq 1$, so dass $n_1 + \dots + n_k = n$, und eine Basis \mathcal{B} von V , die aus Jordanketten besteht, da.h. von der Form*

$$(50) \quad S^{n_1} u_1, \dots, S u_1, u_1, S^{n_2-1} u_2, \dots, u_2, \dots, S^{n_k-1} u_k, \dots, u_k,$$

wobei $S^{n_i} u_i = 0_V \forall i$. Weiterhin sind n_1, \dots, n_k eindeutig bestimmt.

Bemerkung 14.4.2. *Die Basis (50) von V heisst Jordanbasis.*

Bemerkung 14.4.3. *Die Abbildungsmatrix von S bezueglich der Basis \mathcal{B} ist in Jordanscher Normalenform.⁴³*

$$[S]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} J_{n_1}(0) & & & & \\ & J_{n_2}(0) & & & \\ & & J_{n_3}(0) & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & J_{n_k}(0) \end{pmatrix}.$$

Da die n_i eindeutig bestimmt sind, gilt das gleiche fuer die Jordansche Normalenform, abgesehen von einer Vertauschung der Bloecke.

Proof. Wir beweisen Theorem 14.4.1 ueber Induktion nach $n = \dim(V)$. Fuer $n = 1$ ist das Resultat klar. Nimm nun an, dass $n > 1$, und dass das Resultat wahr ist fuer alle Vektorraeume der Dimension $< n$. Beachte zunaechst, dass $S(V) \subseteq V$ (warum?). Wenn $S(V) = \{0_V\}$, dann ist S die Nullabbildung, und das Theorem haelt trivialerweise. Wir koennen daher annehmen, dass

$$\{0_V\} \subseteq S(V) \subseteq V.$$

Wir wenden nun die Induktionshypothese auf den S -invarianten Unterraum $S(V)$ an: es gibt also Elemente v_1, \dots, v_ℓ und $b_1, \dots, b_\ell \geq 1$, so dass $b_1 + \dots + b_\ell = \dim S(V)$ und

$$(51) \quad \mathcal{B}' = \{v_1, \dots, S^{b_1-1} v_1, \dots, v_\ell, \dots, S^{b_\ell-1} v_\ell\}$$

eine Basis von $S(V)$ ist, mit $S^{b_i} v_i = 0_V \forall i$.

Fuer $1 \leq i \leq \ell$ waehle $u_i \in V$, so dass $S(u_i) = v_i$. Dann gilt $S^{b_i} u_i = S^{b_i-1} v_i \in \ker(S) \forall 1 \leq i \leq \ell$. Beachte, dass die Vektoren $\{S^{b_1} u_1, \dots, S^{b_\ell} u_\ell\}$ Teil der Basis \mathcal{B}' und daher linear unabhaegig sind; wir koennen sie daher zu einer Basis

$$\{S^{b_1} u_1, \dots, S^{b_\ell} u_\ell, w_1, \dots, w_m\}$$

von $\ker(S)$ erweitern.

Behauptung. Die Vektoren

$$\{u_1, S u_1, \dots, S^{b_1} u_1, u_2, \dots, S^{b_2} u_2, \dots, u_\ell, \dots, S^{b_\ell} u_\ell, w_1, \dots, w_m\}$$

sind eine Basis \mathcal{B} von V .

⁴³In der Vorlesung hatte ich die Vektoren in der umgedrehten Reihenfolge geschrieben; bezueglich dieser Basis kriegen wir eine gespiegelte JNF, d.h. die Einsen auf der ersten Diagonalen unterhalb der Hauptdiagonalen.

Beweis der Behauptung. Die lineare Unabhängigkeit ist eine Uebung. Um zu zeigen, dass die Vektoren auch ein Erzeugendensystem sind, berechnen wir die Dimension von V . Wir wissen bereits, dass $\dim(\ker(S)) = \ell + m$ und dass

$$\operatorname{rk}(S) = \dim \operatorname{im}(S) = \dim S(V) = b_1 + \dots + b_\ell.$$

Daher folgt von Theorem 4.2.9, dass

$$\begin{aligned} \dim V &= \dim \ker(S) + \operatorname{rk}(S) \\ &= (\ell + m) + (b_1 + \dots + b_\ell) \\ &= m + (b_1 + 1) + \dots + (b_\ell + 1). \end{aligned}$$

Doch dies ist genau die Anzahl der Vektoren in \mathcal{B} ; es folgt daher von Satz 3.3.23, dass \mathcal{B} eine Basis ist. Aufgrund der Induktionshypothese sind b_1, \dots, b_ℓ eindeutig bestimmt. Ebenfalls ist

$$m = \dim(\ker(S)) - \ell$$

eindeutig bestimmt. Doch diese Zahlen bestimmen eindeutig die n_i in dem Theorem.⁴⁴ □

]

Das beendet den Beweis von Theorem 14.1.2, eines der wichtigsten Resultate der linearen Algebra.

Lecture 31

Korollar 14.4.4. *Es sei $U = \tilde{E}_\lambda$ ein verallgemeinerter Eigenraum eines linearen Operators T . Dann hat $U = \tilde{E}_\lambda$ eine Basis, in der die Abbildungsmatrix von der Beschränkung $T|_U$ in Jordanscher Normalenform ist.*

Proof. Es sei $S = (T - \lambda \mathbf{1})|_U$. Dann ist $S : U \rightarrow U$ nilpotent, und es gibt daher eine Basis \mathcal{B} von U , so dass $[S]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}$ in Jordanscher Normalenform ist:

$$[S]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} J_{n_1}(0) & & & \\ & J_{n_2}(0) & & \\ & & J_{n_3}(0) & \\ & & \vdots & \\ & & & J_{n_k}(0) \end{pmatrix}.$$

Da die Abbildungsmatrix der Identität in jeder Basis die Identitatmatrix ist, folgt, dass

$$[T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = [S]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} + \lambda \mathbf{1}_n = \begin{pmatrix} J_{n_1}(\lambda) & & & \\ & J_{n_2}(\lambda) & & \\ & & J_{n_3}(\lambda) & \\ & & \vdots & \\ & & & J_{n_k}(\lambda) \end{pmatrix}.$$

□

Bemerkung 14.4.5. *Theorem 14.1.2 sagt uns, dass zwei Matrizen $A, B \in M_{n \times n}(K)$ ueber einem algebraisch abgeschlossenen Koerper K genau dann ähnlich sind, wenn sie (von einer Vertauschung der Jordanbloecke abgesehen) die gleiche Jordansche Normalenform haben. Insbesondere ist die Anzahl der Äquivalenzklassen ähnlicher $(n \times n)$ -Matrizen mit einem einzigen Eigenwert λ die Anzahl aller Partitionen von n .*

Frage. Wir haben gesehen, dass die JNF einer Matrix eindeutig ist; eine Jordanbasis hingegen ist *nicht* eindeutig. (Z.B. ist fuer die Identitätsabbildung jede Basis eine Jordanbasis.) Wie haengen zwei verschiedene Jordanbasen miteinander zusammen? Mit anderen Worten, es sei $A \in M_{n \times n}(K)$ eine Matrix in Jordanscher Normalenform. Fuer welche Matrizen $C \in \operatorname{GL}_n(K)$ ist $C^{-1}AC = A$? Ich kenne die Antwort auf diese Frage nicht.

⁴⁴Sie koennten auch mit einem anderen Unterraum $U \leq V$ arbeiten, um den Induktionsschritt durchzufuehren. Dann ist es aber wahrscheinlich schwieriger, einen Basis von V zu konstruieren, die aus maximalen Jordanketten besteht.

14.5. Berechnung der Jordanschen Normalenform.

Beispiel 14.5.1. Es sei $A \in M_{4 \times 4}(\mathbb{C})$,

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 6 & -2 \\ 0 & 1 & -3 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 2 \end{pmatrix}.$$

Wir berechnen das charakteristische Polynom:

$$\chi_A(x) = (1 - \lambda)^3(2 - \lambda),$$

das heisst, die Eigenwerte sind $\lambda_1 = 1$ und $\lambda_2 = 2$ mit algebraischen Vielfachheiten $a_{\lambda_1} = 3$ und $a_{\lambda_2} = 1$. Es folgt unmittelbar, dass $g_{\lambda_2} = 1$. Um die geometrische Vielfachheit von λ_1 zu bestimmen, berechnen wir den dazugehoerigen Eigenraum:

$$E_{\lambda_1} = \langle e_1 \rangle,$$

das heisst $g_{\lambda_1} = 1$. Es folgt daher von Theorem 14.2.3 dass es fuer λ_1 und λ_2 jeweils nur einen Jordanschen Block gibt, deren Laenge n_i durch die jeweilige algebraische Vielfachheit beschaenkt ist. Daher gilt $n_1 = 3$ und $n_2 = 1$, und die Jordansche Normalenform von A ist gegeben durch

$$J(A) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}.$$

Beispiel 14.5.2. Es sei $B \in M_{4 \times 4}(\mathbb{C})$,

$$B = \begin{pmatrix} 5 & -1 & 0 & 0 \\ 9 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 7 & -2 \\ 0 & 0 & 12 & -3 \end{pmatrix}.$$

Dann gilt

$$\chi_B(x) = (x - 2)^2(x - 3)(x - 1),$$

das heisst, die Eigenwerte sind $\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = 2$, $\lambda_3 = 3$ mit algebraischen Vielfachheiten $a_{\lambda_1} = 1$, $a_{\lambda_2} = 2$, $a_{\lambda_3} = 1$. Die geometrischen Vielfachheiten von λ_1 und λ_3 sind gleich den algebraischen Vielfachheiten:

$$g_{\lambda_i} = a_{\lambda_i} \quad \text{fuer } i = 1, 3,$$

und $g_{\lambda_2} \in \{1, 2\}$. Wir bestimmen den zu λ_2 gehoerigen Eigenraum:

$$E_{\lambda_2} = \left\langle \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right\rangle,$$

das heisst $g_{\lambda_2} = 1$ und es gibt laut Theorem 14.2.3 genau einen Jordanblock mit Eigenwert λ_2 . Die Jordansche Normalenform von B ist daher

$$J(B) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 \end{pmatrix}.$$

Wir geben daher eine Matrix $C \in GL_4(\mathbb{C})$, so dass

$$J(B) = C^{-1}BC.$$

Um diese Matrix zu finden, bestimmen wir zunaechst die Eigenraeume von λ_1 und λ_3 :

$$E_{\lambda_1} = \left\langle \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ 3 \end{pmatrix} \right\rangle \quad \text{und} \quad E_{\lambda_3} = \left\langle \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ 2 \end{pmatrix} \right\rangle.$$

Jeder dieser Vektoren bildet eine Jordankette der Laenge 1. Wir muessen nun eine Jordankette $\{v, (B - 2\mathbf{1}_4)v\}$ in \tilde{E}_{λ_2} finden, so dass

$$(B - 2\mathbf{1}_4)v = \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Wir loesen dieses lineare Gleichungssystem und erhalten

$$v = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Dann ist

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ 3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ 2 \end{pmatrix}$$

eine Jordanbasis der Abbildung T_B , das heisst, fuer

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

gilt $C^{-1}BC = J(B)$.

Beispiel 14.5.3. Es sei $D \in M_{4 \times 4}(\mathbb{C})$,

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

Dann gilt

$$\chi_D(x) = (1 - x)^4,$$

das heisst, $\lambda = 1$ ist der einzige Eigenwert von D , und es gilt $a_\lambda = 4$. Wir bestimmen den Eigenraum:

$$E_\lambda = \langle e_1, e_1 + e_2 + e_3 + e_4 \rangle,$$

das heisst $g_\lambda = 2$ und es gibt zwei Jordanbloেকে, entweder der Laengen 1 und 3, oder beide der Laenge 2. Im ersten Fall gibt es einen Eigenvektor, der nicht zu einer Jordankette der Laenge 2 gehoert, und im zweiten Fall gehoert jeder Eigenvektor zu einer Jordankette der Laenge 2. Um zu entscheiden, welche der beiden Moeglichkeiten zutrifft, rechnen wir nach, ob der Vektor e_1 Teil einer Jordankette der Laenge 2 ist: in diesem Fall gibt es $v \in \mathbb{C}^4$, $v \neq 0_V$, so dass

$$(D - \mathbf{1}_4)v = e_1.$$

Eine einfache Rechnung zeigt, dass diese Gleichung keine Loesung hat. Daher gibt es zwei Jordanbloেকে der Laengen 1 und 3, und $y = e_1 + e_2 + e_3 + e_4$ gehoert zu einer Jordankette der Laenge 3. Wir rechnen nach:

$$w = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ ist eine Loesung der Gleichung } (D - \mathbf{1}_4)w = y,$$

$$u = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ ist eine Loesung der Gleichung } (D - \mathbf{1}_4)u = w,$$

das heisst $\{u, (D - \mathbf{1}_4)u, (D - \mathbf{1}_4)^2u\}$ ist eine Jordankette der Laenge 3, und eine Jordanbasis ist gegeben durch $e_1, u, (D - \mathbf{1}_4)u, (D - \mathbf{1}_4)^2u$.

Alternativ koennen wir auch einfach die Potenzen der nilpotenten Abbildung $D - \mathbf{1}_4$ berechnen: wir sehen, dass $(D - \mathbf{1}_4)^2 \neq 0_{4 \times 4}$, aber $(D - \mathbf{1}_4)^3 = 0_{4 \times 4}$. Daher hat der grosste Jordanblock die Laenge 3.

Beispiel 14.5.4. Es sei

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

Das charakteristische Polynom ist gegeben durch $\chi_A(x) = -x^5$, das heisst, $\lambda = 0$ ist der einzige Eigenwert und A ist nilpotent. Wir berechnen den Eigenraum:

$$E_\lambda = \langle e_2 - e_4, e_1 - e_3 \rangle;$$

es folgt daher von Theorem 14.2.3, dass A zwei Jordanblöcke hat. Die möglichen Längen sind 2 und 3, oder 1 und 4. Eine einfache Rechnung zeigt, dass $A^3 = 0_{5 \times 5}$, daher ist $\begin{pmatrix} J_2(0) & 0 \\ 0 & J_3(0) \end{pmatrix}$ die JNF von A .

Beispiel 14.5.5. Es seien $A, B \in M_{3 \times 3}(K)$ mit dem gleichen charakteristischen Polynom $\chi(x)$ und dem gleichen minimalen Polynom $m(x)$.

Behauptung. A und B sind ähnelich.

Beweis der Behauptung. Wir analysieren die verschiedenen Fälle, die auftreten können:

- Wenn

$$\chi(x) = (\lambda_1 - x)(\lambda_2 - x)(\lambda_3 - x)$$

für drei verschiedene Eigenwerten $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, dann haben A und B beide die Jordansche Normalform

$$J = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix}.$$

- Nimm an, dass

$$\chi(x) = (\lambda_1 - x)^2(\lambda_2 - x)$$

mit zwei verschiedenen Eigenwerten λ_1, λ_2 . Dann gilt

$$m(x) = (x - \lambda_1)^j(x - \lambda_2),$$

wobei $j \in \{1, 2\}$. Wenn $j = 1$, dann haben laut Theorem 14.2.3 alle Jordanblöcke die Länge 1, das heisst, A und B sind ähnelich zu

$$J = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_1 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_2 \end{pmatrix}.$$

Wenn $j = 2$, dann gehört λ_1 zu einem Jordanblock der Länge 2, d.h. A und B sind ähnelich zu

$$J = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 1 & 0 \\ 0 & \lambda_1 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_2 \end{pmatrix}.$$

- Wenn

$$\chi(x) = (\lambda - x)^3,$$

dann gilt

$$m(x) = (\lambda - x)^j \quad \text{für } j \in \{1, 2, 3\},$$

und es folgt von Theorem 14.2.3, dass

$$J = \begin{pmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{pmatrix} \quad \text{oder} \quad J = \begin{pmatrix} \lambda & 1 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{pmatrix} \quad \text{oder} \quad J = \begin{pmatrix} \lambda & 1 & 0 \\ 0 & \lambda & 1 \\ 0 & 0 & \lambda \end{pmatrix},$$

abhängig davon, ob $j = 1$ oder $j = 2$ oder $j = 3$.

Bemerkung 14.5.6. Für (4×4) Matrizen ist die Verallgemeinerung des vorheriges Beispiels falsch: Die Matrizen

$$A = \begin{pmatrix} \lambda & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad B = \begin{pmatrix} \lambda & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda \end{pmatrix}$$

haben das gleiche charakteristische und minimale Polynom, aber sie sind nicht ähnelich.

von Jan Hirth, Paolo Terribilini und Nestor Corder Sanchez

Frage. Wir haben gesehen, dass die JNF einer Matrix eindeutig ist; eine Jordanbasis hingegen ist *nicht* eindeutig. (Z.B. ist für die Identitätsabbildung jede Basis eine Jordanbasis.) Wie hängen zwei verschiedene Jordanbasen miteinander zusammen? Mit anderen Worten, es sei $A \in M_{n \times n}(K)$ eine Matrix in Jordanscher Normalenform. Für welche Matrizen $C \in GL_n(K)$ ist $C^{-1}AC = A$?

Im folgenden Abschnitt werden wir uns zunächst auf einzelne Jordanblöcke beschränken und danach den allgemeinen Fall betrachten.

Satz 14.5.7. Sei $J(\lambda)$ ein Jordanblock. Dann ist $C^{-1} \cdot J(\lambda) \cdot C$ genau dann wieder in Jordanscher Normalenform, wenn C folgende Form hat

$$C = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & x_2 \\ 0 & \dots & 0 & x_1 \end{pmatrix}$$

Proof. Bemerke, dass die gesuchten Basiswechselformen C genau diejenigen sind, die mit $J(\lambda)$ kommutieren.

$$C \cdot J(\lambda) = J(\lambda) \cdot C$$

Somit gilt

$$(C \cdot J(\lambda))_{i,j} = \sum_{k=1}^n c_{i,k} \cdot J(\lambda)_{k,j} = \begin{cases} \lambda \cdot c_{i,j} + c_{i,j-1} & \text{für } j \neq 1 \\ \lambda \cdot c_{i,j} & \text{für } j = 1 \end{cases}$$

$$(J(\lambda) \cdot C)_{i,j} = \sum_{k=1}^n J(\lambda)_{i,k} \cdot c_{k,j} = \begin{cases} \lambda \cdot c_{i,j} + c_{i+1,j} & \text{für } i \neq n \\ \lambda \cdot c_{i,j} & \text{für } i = n \end{cases}$$

Nun gilt $C \cdot J(\lambda) = J(\lambda) \cdot C$ genau dann, wenn

$$c_{i,j-1} = c_{i+1,j}$$

und somit haben wir konstante Werte auf den Diagonalen. Nun bleibt zu zeigen, dass C eine obere Dreiecksmatrix ist. Dafür verwenden wir

$$(C \cdot J(\lambda))_{1,1} = \lambda \cdot c_{1,1} = (J(\lambda) \cdot C)_{1,1} = \lambda \cdot c_{1,1} + c_{2,1}$$

woraus $c_{2,1} = 0$ folgt.

Durch Wiederholen dieses Arguments können wir zeigen, dass es sich um eine obere Dreiecksmatrix handelt. Da weiter die Diagonalen konstante Werte haben, folgt die Aussage. □

Ein alternativer Beweis

Proof. Sei $T : V \rightarrow V$ eine lineare Abbildung und sei $\mathcal{B} = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ eine Basis von V , sodass

$$[T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = J(\lambda)$$

ein Jordanblock ist. Bemerke, dass jede solche Basis \mathcal{B} eine Jordankette bildet. Angenommen $C^{-1}J(\lambda)C$ ist nun wieder in Jordanscher Normalenform, dann bildet C eine Jordankette auf eine andere Jordankette ab. Wir wissen also

$$\forall i \leq n : Cb_i = a_i \text{ und } \mathcal{A} = (a_1, a_2, \dots, a_n) \text{ ist wieder eine Jordankette.}$$

Betrachten wir nun die Gleichungen

$$Cb_n = a_n \text{ und } (T - \lambda Id)^{n-1}a_n = a_1$$

und kombinieren sie

$$\begin{aligned} (T - \lambda Id)^{n-1} C b_n = a_1 &\Leftrightarrow \begin{pmatrix} & & & 1 \\ & & & \\ & & & \\ & & & \end{pmatrix} \cdot C \cdot \begin{pmatrix} \\ \\ \\ 1 \end{pmatrix} = a_1 \Leftrightarrow c_{nn} b_1 = a_1 \\ (T - \lambda Id)^{n-2} C b_{n-1} = a_1 &\Leftrightarrow c_{n-1n-1} b_1 + c_{nn-1} b_2 = a_1 \\ &\vdots \\ C b_1 &= a_1 \end{aligned}$$

Daraus folgt, dass $\forall i \leq n : c_{ii} = x_1$ für ein $x_1 \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$; und es sich um eine obere Dreiecksmatrix handelt. Ebenso erhalten wir Gleichungen für a_2

$$\begin{aligned} (T - \lambda Id)^{n-2} C b_n = a_2 &\Leftrightarrow c_{n-1n} b_1 + c_{nn} b_2 = a_2 \\ &\vdots \end{aligned}$$

und die restlichen a_i , weshalb sich auch auf den Nebendiagonalen konstante Werte ergeben. \square

Erste Folgerung. Wir wissen nun, wie die alternativen Jordanbasen einer Matrix aussehen, die für jeden Eigenwert bloss einen Jordanblock besitzt. Sei $B = (v_1, \dots, v_n)$ eine Jordanbasis zu einem Jordanblock der Länge n , so ist jede weitere Jordanbasis für diesen Jordanblock von der Form

$$B' = (x_1 \cdot v_1, x_1 \cdot v_2 + x_2 \cdot v_1, \dots, x_1 \cdot v_n + \dots + x_n \cdot v_1)$$

mit $x_1 \neq 0$. Vereinigen wir diese Basen für alle Jordanblöcke, erhalten wir wieder eine Jordanbasis für die Matrix. Im nächsten Abschnitt untersuchen wir, was passiert, wenn wir mehrere Jordanblöcke zum selben Eigenwert haben.

Definition 14.5.8. Sei $T : V \rightarrow V$ linear, V endlichdimensional. Sei $J_T = \{\Lambda_{\lambda_1}^1, \dots, \Lambda_{\lambda_1}^{l_1}, \dots, \Lambda_{\lambda_k}^1, \dots, \Lambda_{\lambda_k}^{l_k}\}$ eine Jordanbasis, wobei $\Lambda_{\lambda_i}^j$ die j -te Jordankette für den Eigenwert λ_i ist. Wir definieren $n_{\lambda_i}^j = |\Lambda_{\lambda_i}^j|$ als die Länge einer solchen Kette und lassen $\tilde{e}_{\lambda_i}^j$ ihr erstes Element sein. Dann nennen wir $\tilde{e}_{\lambda_i}^j$ einen Eigenvektor der $n_{\lambda_i}^j$ -ten Generation. Außerdem ist $S^\alpha(\tilde{e}_{\lambda_i}^j) = (T - \lambda_i I)^\alpha(\tilde{e}_{\lambda_i}^j) \in \Lambda_{\lambda_i}^j$ ein Eigenvektor von Generation $n_{\lambda_i}^j - \alpha$.

Lemma 14.5.9. Sei $B_{\tilde{E}_\lambda} = \{\Lambda_\lambda^1, \dots, \Lambda_\lambda^l\}$ mit $\Lambda_\lambda^i = \{\tilde{e}_\lambda^i, S(\tilde{e}_\lambda^i), \dots, S^{n_\lambda^i-1}(\tilde{e}_\lambda^i)\}$. Betrachten wir Abbildungen von der Form

$$\tilde{e}_\lambda^i \mapsto x_1 \tilde{e}_\lambda^i + x_2 S^p(\tilde{e}_\lambda^j) = {}' \tilde{e}_\lambda^i, \quad x_1, x_2, \in K, x_1 \neq 0$$

wobei $S^p(\tilde{e}_\lambda^j)$ ein Eigenvektor geringerer oder gleicher Generation als \tilde{e}_λ^i ist. So erhalten wir $'\Lambda_\lambda^i = \{{}' \tilde{e}_\lambda^i, S({}' \tilde{e}_\lambda^i), \dots, S^{n_\lambda^i}({}' \tilde{e}_\lambda^i)\}$, wobei $'B_{\tilde{E}_\lambda} = (B_{\tilde{E}_\lambda} \setminus \Lambda_\lambda^i) \cup {}' \Lambda_\lambda^i$ eine Jordanbasis von \tilde{E}_λ ist.

Proof. Wir wollen zeigen, dass $'B_{\tilde{E}_\lambda}$ linear unabhängig und ein Erzeugendensystem von \tilde{E}_λ ist, so dass jedes Element Λ_λ^i eine Jordankette bildet.

Beachte, dass jedes Element in Λ_λ^i auf eine Linearkombination von sich selbst und einem anderen Vektor in $B_{\tilde{E}_\lambda}$ abgebildet wird. Dann müssen sie aber linear unabhängig bleiben, sprich $x_1 \neq 0$. Es gibt $\dim(\tilde{E}_\lambda)$ Vektoren in $'B_{\tilde{E}_\lambda}$, die alle linear unabhängig sind. Es handelt sich somit um ein Erzeugendensystem und damit eine Basis.

Nun bleibt noch zu zeigen, dass $'\Lambda_\lambda^i$ eine Jordankette ist. Man beachte, dass die Bedingung dafür ist, dass $S^{n_\lambda^i}$ die kleinste Potenz von S ist, die $'\tilde{e}_\lambda^i$ annihiliert. Bemerke

$$S^{n_\lambda^i-1}({}' \tilde{e}_\lambda^i) = S^{n_\lambda^i-1}(x_1 \tilde{e}_\lambda^i + x_2 S^p(\tilde{e}_\lambda^j)) = x_1 S^{n_\lambda^i-1}(\tilde{e}_\lambda^i) + x_2 S^{n_\lambda^i-1+p}(\tilde{e}_\lambda^j)$$

wobei beide Terme linear unabhängig sind und der erste ungleich Null ist, so dass $S^{n_\lambda^i-1}$ den neuen Vektor nicht annihiliert. Außerdem annihiliert $S^{n_\lambda^i}$ aufgrund der Wahl von \tilde{e}_λ^j beide, folglich ist $'\Lambda_\lambda^i$ eine Jordankette. \square

Lemma 14.5.10. *Bis auf eine Permutation ist die Komposition der vorhergehenden Transformation über $B_{\tilde{E}_\lambda}$ die einzige, die die Bildung einer anderen Jordanbasis von \tilde{E}_λ erlaubt.*

Proof. Bemerke, dass wir für jede Anwendung der vorhergehenden Transformation die Koeffizienten x_1, x_2 und $S^p(\tilde{e}_\lambda^j)$ neu wählen dürfen. Wir betrachten o.B.d.A nur eine Anwendung der Transformation. Da die Basis eine Basis bleiben muss, müssen die Vektoren linear unabhängig und in \tilde{E}_λ enthalten sein. Wenn wir also irgendeinen Vektor in der Basis ändern wollen, müssen wir diesen auf eine Linearkombination von anderen Mitgliedern von $B_{\tilde{E}_\lambda}$ und sich selbst abbilden (wie im letzten Lemma begründet).

Wir wollen nun zeigen, dass diese Transformation auf den ersten Vektor der Kette angewendet werden muss. Wählen wir die Kette Λ_λ^i und einen beliebigen Vektor innerhalb dieser Kette (sagen wir $S^p(\tilde{e}_\lambda^i)$ mit $p > 0$)

$$S^p(\tilde{e}_\lambda^i) \mapsto x_1 S^p(\tilde{e}_\lambda^i) + x_2 S^q(\tilde{e}_\lambda^j)$$

Man beachte, dass $S(S^{p-1}(\tilde{e}_\lambda^i)) \neq x_1 S^p(\tilde{e}_\lambda^i) + x_2 S^q(\tilde{e}_\lambda^j)$, also bricht unsere alte Kette unter der Abbildung auseinander. Vielleicht können wir zwei getrennte Ketten unter der Abbildung konstruieren? Bilden wir eine neue Kette mit $x_1 S^p(\tilde{e}_\lambda^i) + x_2 S^q(\tilde{e}_\lambda^j)$ als erstes Element

$${}'\Lambda_\lambda^i := (x_1 S^p(\tilde{e}_\lambda^i) + x_2 S^q(\tilde{e}_\lambda^j), S(x_1 S^p(\tilde{e}_\lambda^i) + x_2 S^q(\tilde{e}_\lambda^j)), \dots)$$

Aber dann enthält ${}'\Lambda_\lambda^i$ die Vektoren $S^p(\tilde{e}_\lambda^i), S^{p+1}(\tilde{e}_\lambda^i), \dots$ als Summanden. Bemerke $S^{p+1}(\tilde{e}_\lambda^i)$ könnte bereits Null sein. Da diese auch in allen anderen Ketten enthalten sind, die wir aus den Elementen

$$(\tilde{e}_\lambda^i, S(\tilde{e}_\lambda^i), \dots, S^{p-1}(\tilde{e}_\lambda^i))$$

konstruieren könnten, führt jeder Versuch die Kette auseinanderzubrechen zu einer linearen Abhängigkeit. Daher muss die Transformation auf den ersten Vektor der Kette wirken. \square

Definition 14.5.11. Sei $J_T = \{\Lambda_{\lambda_1}^1, \dots, \Lambda_{\lambda_1}^{l_1}, \dots, \Lambda_{\lambda_i}^j, \dots, \Lambda_{\lambda_n}^m, \dots, \Lambda_{\lambda_k}^1, \dots, \Lambda_{\lambda_k}^{l_k}\}$ sei eine Jordanbasis für $T: V \rightarrow V$

Satz 14.5.12. Die Transformation $J_T \mapsto {}'J_T = \{\Lambda_{\lambda_1}^1, \dots, \Lambda_{\lambda_1}^{l_1}, \dots, \Lambda_{\lambda_n}^m, \dots, \Lambda_{\lambda_i}^j, \dots, \Lambda_{\lambda_k}^1, \dots, \Lambda_{\lambda_k}^{l_k}\}$ lässt $[T]_{J_T}^{{}'J_T}$ in Jordanscher Normalform.

Proof. Jedes Element in der Basis bleibt Teil einer linear unabhängigen Jordankette, daher bleibt die gesamte Matrix in Jordanscher Normalform. \square

Satz 14.5.13. Die im vorangehenden Unterkapitel beschriebene Transformation lässt $[T]_{J_T}^{{}'J_T}$ in Jordanscher Normalform.

Proof. Jedes Element in der Basis bleibt Teil einer linear unabhängigen Jordankette, so dass die gesamte Matrix in Jordanscher Normalform bleibt. \square

Satz 14.5.14. Die Zusammensetzung der zuvor beschriebenen Transformationen ist die einzige, die $[T]_{J_T}^{{}'J_T}$ in Jordanscher Normalform belässt.

Proof. Beachte, dass $[T]_{J_T}^{{}'J_T}$ nur dann in Jordanscher Normalform bleibt, wenn ${}'J_T$ eine Jordan-Basis ist, d.h. $\forall \lambda, {}'B_{\tilde{E}_\lambda}$ bleibt eine Jordan-Basis für \tilde{E}_λ . Wir wissen aber, dass die einzig erlaubte Transformation diejenige in 14.5.13 bis zu einer Permutation (14.5.12) ist. \square

Beispiel 14.5.15.

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

Sei $A = C^{-1}AC$. Wie sehen C und C^{-1} zum Beispiel aus?

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -3 & 0 \\ 0 & 1 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad C^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 1 & -5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Wieso dürfen wir $c_{13} = -3$ und $c_{23} = 5$ wählen? Bemerke, dass wir hier eine Jordankette transformieren.

$$\tilde{e}_1^3 \mapsto \tilde{e}_1^3 + 5\tilde{e}_1^2 - 3\tilde{e}_1$$

Dies ist erlaubt, da die Generation von \tilde{e}_1^1 und \tilde{e}_1^2 kleiner gleich der von \tilde{e}_1^3 ist. In der Tat

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 1 & -5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -3 & 0 \\ 0 & 1 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

15. EUKLIDISCHE UND HERMITISCHE RAEUME

Lecture 32

15.1. Normierte Raeume.

Definition 15.1.1. Es sei $K = \mathbb{R}$ oder \mathbb{C} , und es sei V ein K -Vektorraum. Eine Norm auf V ist eine Funktion

$$\| \sim \| : V \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$$

mit folgenden Eigenschaften:

- $\|u + v\| \leq \|u\| + \|v\| \quad \forall u, v \in V$ (Dreiecksungleichung);
- $\|\alpha v\| = |\alpha| \cdot \|v\|$ fuer alle $\alpha \in K, v \in V$;
- wenn $\|v\| = 0$, dann gilt $v = 0_V$ (Nicht-Degeneriertheit).

Beispiele 15.1.2. Es sei $V = \mathbb{R}^2$ und $v = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \in V$.

(1) Die Funktion

$$\|v\| = \sqrt{a^2 + b^2}$$

ist eine Norm.

(2) Die Funktion

$$\|v\|' = \max\{|a|, |b|\}$$

ist eine Norm.

(3) Die Funktion

$$\|v\|'' = |a| + |b|$$

ist ebenfalls eine Norm.

(4) Andererseits ist die Funktion $v \mapsto \min\{|a|, |b|\}$ keine Norm.

Bemerkung 15.1.3. Wir werden im naechsten Kapitel sehen, dass sich die Norm $\| \sim \|$ in Beispiel 15.1.2 von den Normen $\| \sim \|'$ und $\| \sim \|''$ unterscheidet: sie entsteht aus einem inneren Produkt.

Übung 15.1.4. Es sei $p \geq 1$. Fuer $x = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n$ definiere

$$\|x\|_p = \left(\sum_{i=1}^n |x_i|^p \right)^{\frac{1}{p}}.$$

Dann ist $\| \sim \|_p$ eine Norm; sie heisst die p -Norm.

Beispiel 15.1.5. Es sei V der Vektorraum aller stetigen Funktionen $f : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$. Definiere

$$\|f\|_{\max} = \max\{|f(x)| : x \in [0, 1]\}.$$

Dann ist $\| \sim \|_{\max}$ eine Norm: sie heisst die *Maximumsnorm*.

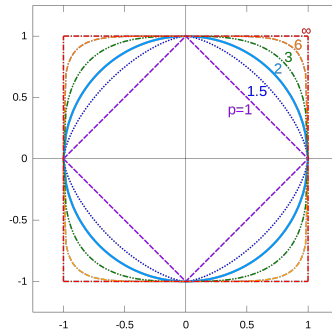
Definition 15.1.6.

- (1) Ein Vektor $v \in V$ ist ein Einheitsvektor wenn $\|u\| = 1$.
- (2) Die Distanz zwischen zwei Vektoren $v, w \in V$ ist gegeben durch

$$d(v, w) = \|v - w\|.$$

Bemerkung 15.1.7. Es sei $v \in V, v \neq 0_V$. Dann ist $\frac{1}{\|v\|}v$ ein Einheitsvektor; wir nennen ihn die Normalisierung von v .

Bemerkung 15.1.8. Die Menge der Einheitsvektoren in einem Vektorraum kann je nach Norm voellig verschieden aussehen. Folgendes Diagramm zeigt die Menge der Einheitsvektoren in \mathbb{R}^2 bezueglich der p -Norm fuer verschiedene p .



15.2. Innere Produkte. Wir konzentrieren und nun auf Vektorraeume ueber \mathbb{R} oder \mathbb{C} mit einer besonderen geometrischen Struktur: einem *inneren Produkt*. Wir erhalten

- { Euklidische Raeume ueber \mathbb{R}
- { Hermitesche Raeume ueber \mathbb{C}

Definition 15.2.1. Es sei V ein \mathbb{R} -Vektorraum. Ein inneres Produkt ist eine Funktion

$$\langle \cdot, \cdot \rangle : V \times V \rightarrow \mathbb{R}$$

mit folgenden Eigenschaften:

(1) *Linearitaet in der erste Variablen:*

$$\begin{aligned} \langle v_1 + v_2, w \rangle &= \langle v_1, w \rangle + \langle v_2, w \rangle \quad \forall v_1, v_2, w \in V, \\ \langle \alpha v, w \rangle &= \alpha \langle v, w \rangle \quad \forall \alpha \in \mathbb{R}, \forall v, w \in V. \end{aligned}$$

(2) *Linearitaet in der zweiten Variablen:*⁴⁵

$$\begin{aligned} \langle v, w_1 + w_2 \rangle &= \langle v, w_1 \rangle + \langle v, w_2 \rangle \quad \forall v, w_1, w_2 \in V, \\ \langle v, \alpha w \rangle &= \alpha \langle v, w \rangle \quad \forall \alpha \in \mathbb{R}, \forall v, w \in V. \end{aligned}$$

(3) *Symmetrie:* $\langle v, w \rangle = \langle w, v \rangle \quad \forall v, w \in V$;

(4) *Positivitaet:* $\langle v, v \rangle > 0 \quad \forall v \in V, v \neq 0_V$.

Das Paar $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ ist ein Euklidischer Raum.

Beispiel 15.2.2. Es sei $V = \mathbb{R}^n$. Fuer $u = \begin{pmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_n \end{pmatrix}$ und $v = \begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix}$ definiere

$$\langle u, v \rangle = \sum_{i=1}^n u_i v_i.$$

Dann ist $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ ein Euklidischer Raum; das innere Proukt ist das Standardprodukt auf \mathbb{R}^n .

Beispiel 15.2.3. Es sei $V = \mathbb{R}^2$. Fuer $u_1 = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix}$, $u_2 = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix}$ definiere

$$\langle u_1, u_2 \rangle' = 2x_1 x_2 - x_1 y_2 - y_1 x_2 + y_1 y_2.$$

Dann ist $\langle \cdot, \cdot \rangle'$ ein inneres Produkt: Eigenschaften (1) - (3) sind klar; fuer Eigenschaft (4), beachte, dass fuer $u = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$

$$\langle u, u \rangle' = x^2 + (x - y)^2 \geq 0,$$

mit Gleichheit genau dann, wenn $u = 0$.

⁴⁵Eine Abbildung $V \times V \rightarrow \mathbb{R}$, die linear in jeder der Variablen ist, heisst *bilinear*.

Bemerkung 15.2.4. Wir koennen das innere Produkt $\langle u, v \rangle$ aus Beispiel 15.2.2 als Matrixmultiplikation betrachten: es gilt $\langle u, v \rangle = u^t v$, d.h. es ist die Matrixmultiplikation der $(1 \times n)$ -Matrix u^t und der $(n \times 1)$ -Matrix v .

Auch das innere Produkt (15.2.3) laesst sich als Matrixmultiplikation schreiben:

$$\langle u_1, u_2 \rangle' = u_1^t A u_2 \quad \text{mit } A = \begin{pmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Es stellt sich die Frage, ob wir nicht andere innere Produkte konstruieren koennen, indem wir A durch eine andere Matrix in $M_{n \times n}(\mathbb{R})$ ersetzen. Fuer welche anderen Matrizen erhalten wir ebenfalls ein inneres Produkt? Wir kommen auf diese Frage im naechsten Kapitel zurueck.

Beispiel 15.2.5. Es seien $a, b \in \mathbb{R}$, $a < b$, und es sei $C[a, b]$ der Vektorraum der stetigen Funktionen $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$. Wir definieren

$$\langle f, g \rangle = \int_a^b f(x)g(x)dx.$$

Die erfuehlt die Axiome des inneren Produkts:

- Linearitaet in jedem der Argumente und Symmetrie sind klar.
- Es sei nun $f \in V$, $f \neq 0$. Dann gibt es $y \in (a, b)$ und $\delta > 0$, so dass $[y - \delta, y + \delta] \subset [a, b]$ und $f(x) \neq 0 \forall x \in [y - \delta, y + \delta]$. Dann gilt

$$\langle f, f \rangle = \int_a^b f(x)^2 dx \geq \int_{y-\delta}^{y+\delta} f(x)^2 dx \geq 2\delta \min_{x \in [y-\delta, y+\delta]} f(x)^2 > 0.$$

Definition 15.2.6. Es sei V ein \mathbb{C} -Vektorraum. Ein Hermetisches Produkt (oder inneres Produkt) ist eine Funktion

$$\langle \cdot, \cdot \rangle : V \times V \rightarrow \mathbb{C}$$

mit folgenden Eigenschaften:

(1) Linearitaet in der erste Variablen:

$$\begin{aligned} \langle v_1 + v_2, w \rangle &= \langle v_1, w \rangle + \langle v_2, w \rangle \quad \forall v_1, v_2, w \in V, \\ \langle \alpha v, w \rangle &= \alpha \langle v, w \rangle \quad \forall \alpha \in \mathbb{C}, \forall v, w \in V. \end{aligned}$$

(2) Sesquilinearitaet in der zweiten Variablen:

$$\begin{aligned} \langle v, w_1 + w_2 \rangle &= \langle v, w_1 \rangle + \langle v, w_2 \rangle \quad \forall v, w_1, w_2 \in V, \\ \langle v, \alpha w \rangle &= \bar{\alpha} \langle v, w \rangle \quad \forall \alpha \in \mathbb{C}, \forall v, w \in V. \end{aligned}$$

(3) Hermitesche Eigenschaft: $\langle v, w \rangle = \overline{\langle w, v \rangle} \forall v, w \in V$;

(4) Positivitaet: $\langle v, v \rangle > 0 \forall v \in V, v \neq 0_V$.

Das Paar $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ ist ein Hermitescher oder unitaerer Raum.

Beispiel 15.2.7. Es sei $V = \mathbb{C}^n$. Fuer $u = \begin{pmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_n \end{pmatrix}$ und $v = \begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix}$ definiere

$$\langle u, v \rangle = \sum_{i=1}^n u_i \bar{v}_i.$$

Dann ist $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ ein Hermitescher Raum, und das innere Produkt ist das Standard IP auf \mathbb{C}^n .

Bemerkung 15.2.8. Wir koennen auch das Standard IP auf \mathbb{C}^n als Matrixmultiplikation betrachten: es gilt $\langle u, v \rangle = u^t \bar{v}$, d.h. es ist die Matrixmultiplikation der $(1 \times n)$ -Matrix u^t und der $(n \times 1)$ -Matrix \bar{v} .

Wieder koennen wir die Frage stellen: gibt es Matrizen $A \in M_{n \times n}(\mathbb{C})$, so dass $(u, v) \mapsto u^t A \bar{v}$ ein Hermitesches Produkt ist?

Lemma 15.2.9. Es sei V ein Euklidischer oder Hermitescher Raum. Dann gilt

- (1) $\langle 0_V, v \rangle = \langle v, 0_V \rangle = 0 \forall v \in V$;
- (2) Es sei $w \in V$. Wenn $\langle v, w \rangle = 0$ fuer alle $v \in V$, dann gilt $w = 0_V$;
- (3) Es seien $w_1, w_2 \in V$. Wenn $\langle v, w_1 \rangle = \langle v, w_2 \rangle$ fuer alle $v \in V$, dann gilt $w_1 = w_2$.

Proof.

- (1) $\langle 0_V, v \rangle = 0 \cdot \langle 0_V, w \rangle = 0$.

- (2) Wenn $w \neq 0_V$, dann gilt $\langle w, w \rangle > 0$.
 (3) Folgt von (2) fuer $w = w_1 - w_2$.

□

Satz 15.2.10. *Es sei $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ ein Euklidischer oder Hermitescher Raum. Fuer alle $v \in V$, definiere*

$$\|v\| = \sqrt{\langle v, v \rangle} \in \mathbb{R}_{\geq 0}.$$

Dann ist $\|\cdot\| \sim \|\cdot\|$ eine Norm.

Um diesen Satz zu beweisen, brauchen wir folgendes Lemma:

Lemma 15.2.11 (Cauchy-Schwartz Ungleichung). *Es sei $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ ein Euklidischer oder Hermitescher Raum. Dann gilt*

$$|\langle u, v \rangle| \leq \|u\| \cdot \|v\| \quad \forall u, v \in V$$

mit Gleichheit genau dann, wenn u und v linear abhaengig sind.

Proof. Wenn $u = 0_V$, dann haelt die Ungleichung automatisch. Nimm daher an, dass $u \neq 0_V$, und definiere $\lambda = \frac{\langle v, u \rangle}{\|u\|^2}$ und

$$w = v - \lambda \cdot u.$$

Beachte, dass

$$\langle w, u \rangle = \langle v, u \rangle - \lambda \langle u, u \rangle = 0.$$

Nun gilt

(52)

$$0 \leq \|w\|^2$$

(53)

$$\begin{aligned} &= \langle v - \lambda u, v - \lambda u \rangle \\ &= \|v\|^2 - \lambda \bar{\lambda} \|u\|^2 - \bar{\lambda} \lambda \|u\|^2 + \lambda \bar{\lambda} \|u\|^2 \\ &= \|v\|^2 - |\lambda|^2 \cdot \|u\|^2 \\ &= \|v\|^2 - \frac{|\langle u, v \rangle|^2}{\|u\|^2} \\ \Rightarrow &|\langle u, v \rangle| \leq \|u\| \cdot \|v\|. \end{aligned}$$

In (53) erhalten wir Gleichheit genau dann, wenn $w = 0_V$, d.h. wenn $v = \frac{\langle v, u \rangle}{\|u\|^2} \cdot u$.

Andererseits, wenn $v = \lambda \cdot u$ fuer $\lambda \in K$ und $u \neq 0_V$, dann gilt $\lambda = \frac{\langle v, u \rangle}{\|u\|^2}$. Quod erat demonstrandum. □

von Satz 15.2.10. Wir beweisen den Satz fuer Hermitesche Raeume; der Beweis fuer Euklidische Raeume ist sehr aehnlich. Wir ueberpruefen die Axiome:

- (1) Dreiecksungleichung: es seien $u, v \in V$. Dann gilt

$$\begin{aligned} \|u + v\|^2 &= \langle u + v, u + v \rangle \\ &= \|u\|^2 + 2\Re\langle u, v \rangle + \|v\|^2. \end{aligned}$$

Beachte nun, dass $\Re(z) \leq |z|$ fuer alle $z \in \mathbb{C}$. Angewandt auf $\Re\langle u, v \rangle$ erhalten wir

$$\Re\langle u, v \rangle \leq |\Re\langle u, v \rangle| \leq |\langle u, v \rangle|$$

und daher

$$\begin{aligned} \|u + v\|^2 &= \|u\|^2 + 2\Re\langle u, v \rangle + \|v\|^2 \\ &\leq \|u\|^2 + 2|\langle u, v \rangle| + \|v\|^2 \\ &\leq \|u\|^2 + 2\|u\| \cdot \|v\| + \|v\|^2 \\ &= (\|u + v\|)^2 \end{aligned}$$

und daher $\|u + v\| \leq \|u\| + \|v\|$.

- (2) Die anderen beiden Axiome der Norm sind eine Uebung.

□

Lemma 15.2.12. *Es sei $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ ein Euklidischer Raum. Dann gilt*

$$\langle u, v \rangle = \frac{1}{2} (\|u + v\|^2 - \|u\|^2 - \|v\|^2)$$

fuer alle $u, v \in V$. Mit anderen Worten, das innere Produkt $\langle \cdot, \cdot \rangle$ ist durch die Norm $\|\cdot\|$ vollstaendig bestimmt.

Proof. Explizite Rechnung. □

Uebung. Formulieren und beweisen Sie das Analog von Lemma 15.2.12 fuer Hermetische Raeume.

Bemerkung 15.2.13. *Nicht jede Norm kann ueber ein inneres Produkt definiert werden! Beispiele dafuer sind die Norme $\|\cdot\|'$ und $\|\cdot\|''$ aus Beispiel 15.1.2, was allerdings nicht leicht zu zeigen ist.*

Joris Liebling fand folgenden eleganten Beweis, dass $\|\cdot\|''$ nicht von einem inneren Produkt induziert ist: Wir bemerken den Zusammenhang zwischen Skalaprodukt und dadurch induzierte Norm:

$$\langle v, u \rangle = \frac{1}{2} (\|u + v\|^2 - \|u\|^2 - \|v\|^2)$$

Wir betrachten fuer $v = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix}$ die Norm:

$$\|v\|' := |v_1| + |v_2|$$

Wir moechten zeigen, dass diese Norm nicht durch ein Skalarprodukt induziert wird.

Dafuer nehmen wir im Sinne eines Widerspruchs an, dass dem so sei.

Insbesondere gelte dann nach Bilinearitaet des Skalaprodukts ueber einem \mathbb{R} -Vektorraum :

$$-\langle e_1, e_2 \rangle = \langle -e_1, e_2 \rangle$$

Jedoch bemerken wir:

$$\begin{aligned} -\langle e_1, e_2 \rangle &= -\frac{1}{2} \left(\left\| \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right\|^2 - \left\| \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right\|^2 - \left\| \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right\|^2 \right) \\ &= -\frac{1}{2} ((|1| + |1|)^2 - (|1| + |0|)^2 - (|0| + |1|)^2) = -\frac{1}{2} (2^2 - 1 - 1) = -1 \end{aligned}$$

Und:

$$\begin{aligned} \langle -e_1, e_2 \rangle &= \frac{1}{2} \left(\left\| \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix} \right\|^2 - \left\| \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \end{pmatrix} \right\|^2 - \left\| \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right\|^2 \right) \\ &= \frac{1}{2} ((|-1| + |1|)^2 - (|-1| + |0|)^2 - (|0| + |1|)^2) = \frac{1}{2} (2^2 - 1 - 1) = 1 \end{aligned}$$

Also:

$$-\langle e_1, e_2 \rangle = -1 \neq 1 = \langle -e_1, e_2 \rangle$$

womit folgt, dass die Norm nicht durch ein Skalarprodukt induziert wird. □

Mit Hilfe eines inneren Produkts koennen wir definieren, wann zwei Vektoren orthogonal sind:

Definition 15.2.14.

- (1) Zwei Vektoren v, w sind orthogonal wenn $\langle v, w \rangle = 0$; wir schreiben $v \perp w$.
- (2) Eine Untermenge $S \subset V$ ist ein orthogonales System wenn $u \perp v$ fuer alle $u, v \in S$.
- (3) Ein orthogonales System $S \subset V$ ist orthonormal, wenn $\|v\| = 1$ fuer alle $v \in S$.

Beispiele 15.2.15.

- (1) Die Menge der Standardvektoren im \mathbb{R}^n ist orthonormal bezueglich des Standard IPs.
- (2) In einem Vektorraum mit innerem Produkt ist jeder Vektor orthogonal zum Nullvektor.
- (3) Betrachte $(\mathbb{R}^2, \langle \cdot, \cdot \rangle')$ wie in Beispiel 15.2.3. Dann ist $\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}$ orthogonal zu $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$.
- (4) Die Funktionen $f(x), g(x) \in C[-\pi, \pi]$, $f(x) = \sin(x)$ und $g(x) = 1$ sind orthogonal bezueglich des Skalarprodukts von Beispiel 15.2.5.

Satz 15.2.16 (Satz des Pythagoras). *Es sei $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ ein Euklidischer oder Hermitescher Raum, und es seien $u, v \in V$, $u \perp v$. Dann gilt*

$$\|u + v\|^2 = \|u\|^2 + \|v\|^2.$$

Proof. Es gilt

$$\begin{aligned} \|u + v\|^2 &= \langle u + v, u + v \rangle \\ &= \langle u, u \rangle + \langle u, v \rangle + \langle v, u \rangle + \langle v, v \rangle \\ &= \|u\|^2 + \|v\|^2. \end{aligned}$$

□

Die Definition der Orthogonalität hängt eng mit der *Projektion eines Vektors auf einen anderen Vektor* zusammen:

Definition 15.2.17. *Es sei $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ ein Vektorraum mit einem inneren Produkt, und es sei $v \in V$, $v \neq 0_V$. Definiere*

$$\text{proj}_v : V \rightarrow V, \quad u \mapsto \frac{\langle u, v \rangle}{\langle v, v \rangle} \cdot v.$$

Bemerkung 15.2.18. *Ein Vektor $u \in V$ ist genau dann orthogonal zu $v \neq 0_V$, wenn $\text{proj}_v(u) = 0_V$.*

Beispiele 15.2.19.

(1) Betrachte \mathbb{R}^n mit dem Standard IP, und es sei $v = \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix}$. Dann ist $\text{proj}_{e_i}(v) = a_i \cdot e_i$ für alle

$$1 \leq i \leq n.$$

(2) Es sei $(\mathbb{R}^2, \langle \cdot, \cdot \rangle')$ wie in Beispiel 15.2.3 und $u = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}$. Dann ist die Projektion von u auf den

Vektor $v = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ gegeben durch $\text{proj}_v(u) = 2v$.

Folgendes Lemma wird wichtig sein, wenn wir orthogonale Basen von Vektorräumen konstruieren.

Lemma 15.2.20. *Es sei $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ ein Vektorraum mit einem inneren Produkt, und es sei $v \in V$ so dass $v \neq 0_V$. Dann ist für alle $u \in V$ der Vektor*

$$w = u - \text{proj}_v(u)$$

orthogonal zu v .

Proof. Übung. □

Beispiel 15.2.21. Wir überprüfen das in Beispiel 15.2.19 (2):

$$\langle u - \text{proj}_v(u), v \rangle' = \left\langle \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right\rangle' = 0.$$

15.3. Konstruktion innerer Produkte. In diesem Kapitel wollen wir zeigen, dass sich innere Produkte mit Hilfe bestimmter Matrizen definieren lassen.

Beispiel 15.3.1. Es sei $A \in M_{n \times n}(\mathbb{R})$. Definiere

$$\langle \cdot, \cdot \rangle_A : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, \quad \langle u, v \rangle_A = v^T \cdot A \cdot v.$$

Dann ist $\langle \cdot, \cdot \rangle_A$ linear in jeder der beiden Variablen.

Allerdings ist die Funktion nicht unbedingt symmetrisch: es sei $A = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, $u = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}$ und $v = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix}$. Dann gilt

$$\langle u, v \rangle_A = u_1(v_1 + v_2) + u_2v_2 \quad \text{aber} \quad \langle v, u \rangle_A = (u_1 + u_2)v_1 + u_2v_2.$$

Definition 15.3.2. *Es sei K ein Körper. Eine Matrix $A \in M_{n \times n}(K)$ ist symmetrisch, wenn $A = A^t$, d.h. wenn $a_{ij} = a_{ji}$ für alle $1 \leq i, j \leq n$.*

Lemma 15.3.3. Es sei $A \in M_{n \times n}(\mathbb{R})$ symmetrisch. Dann gilt

$$\langle u, v \rangle_A = \langle v, u \rangle_A \quad \forall u, v \in \mathbb{R}^n.$$

Proof. Es gilt

$$\langle v, u \rangle_A = v^t A u = v^t A^t u = (u^t A v)^t = u^t A v = \langle u, v \rangle_A.$$

□

Allerdings erhalten wir immer noch nicht unbedingt ein Skalarprodukt:

Beispiel 15.3.4. Es sei $A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$. Dann gilt

$$\left\langle \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right\rangle_A = -1;$$

die Bilinearform ist nicht positiv.

Definition 15.3.5. Eine symmetrische Matrix $A \in M_{n \times n}(\mathbb{R})$ ist positiv definit, wenn $v^t A v > 0$ fuer alle $v \in \mathbb{R}^n$, $v \neq 0$.

Beispiele 15.3.6. (1) Es seien $\alpha_1, \dots, \alpha_n \in \mathbb{R}$, $\alpha_i > 0$ fuer alle i . Dann ist die diagonale Matrix

$$A = \begin{pmatrix} \alpha_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \alpha_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \alpha_n \end{pmatrix}$$

positiv definit.

(2) Die Matrix $B = \begin{pmatrix} a & b \\ b & d \end{pmatrix}$ ist genau dann positiv definit, wenn $a > 0$ und $\det(B) > 0$.

Satz 15.3.7. Es sei $A \in M_{n \times n}(\mathbb{R})$. Dann ist $\langle \cdot, \cdot \rangle_A$ ist genau dann ein inneres Produkt, wenn A positiv definit ist.

Bemerkung 15.3.8. Tatsaechlich gibt es eine 1:1-Korrespondenz zwischen positiv definiten $(n \times n)$ -Matrizen und inneren Produkten auf \mathbb{R}^n : wenn $\langle \cdot, \cdot \rangle$ ein inneres Produkt ist, definiere $a_{ij} = \langle e_i, e_j \rangle$, wobei e_1, \dots, e_n die Standardbasis ist. Dann gilt fuer $u, v \in \mathbb{R}^n$

$$\langle u, v \rangle = u^t A v.$$

Wir werden Satz 15.3.7 spaeter zusammen mit seinem Analog fuer komplexe Matrizen beweisen. Zunaechst muessen wir herausfinden, wie wir 'positiv definit' fuer komplexe Matrizen passend verallgemeinern.

Definition 15.3.9. Es sei $B \in M_{n \times n}(\mathbb{C})$. Definiere

$$\langle \cdot, \cdot \rangle_B : \mathbb{C}^n \times \mathbb{C}^n \rightarrow \mathbb{C}, \quad \langle u, v \rangle_B = u^t B \bar{v}.$$

Definition 15.3.10. Es sei $B \in M_{n \times n}(\mathbb{C})$.

(1) Schreibe $\bar{B} = (\overline{b_{ij}})_{ij}$. Die adjungierte Matrix von B ist die Matrix $B^* = (\bar{B})^t$.

(2) Die Matrix B ist Hermitesch, wenn $B = B^*$, das heisst, wenn $b_{ij} = \overline{b_{ji}} \forall 1 \leq i, j \leq n$.

Beispiel 15.3.11. (1) Die Matrix $A = \begin{pmatrix} -1 & 1+i & 2i \\ 1-i & 0 & 1-2i \\ -2i & 1+2i & 1 \end{pmatrix}$ ist Hermitesch.

(2) Die Matrix $B = \begin{pmatrix} -i & 1+i & 2i \\ 1-i & 0 & 1-2i \\ -2i & 1+2i & 1 \end{pmatrix}$ ist nicht Hermitesch.

(3) Eine Matrix $B = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in M_{2 \times 2}(\mathbb{C})$ ist genau dann Hermitesch, wenn $a, d \in \mathbb{R}$ und $b = \bar{c}$.

Beachte 15.3.12. (1) Wenn B Hermitesch ist, dann erfuehrt $\langle \cdot, \cdot \rangle_B$ Eigenschaften (1) - (3) des Hermiteschen Produktes.

(2) Es sei $B \in M_{n \times n}(\mathbb{C})$ Hermitesch, und es sei $v \in \mathbb{C}^n$. Dann gilt

$$\overline{\langle v, v \rangle_B} = \bar{v}^t \bar{B} v = (\bar{v}^t \bar{B}^t v)^t = v^t \bar{B}^t \bar{v} = \langle v, v \rangle_B,$$

das heisst $v^t B v \in \mathbb{R}$ fuer alle $v \in \mathbb{C}^n$.

Mit Hilfe dieser Beobachtung koennen wir eine positiv definite Hermitesche Matrix definieren.

Definition 15.3.13. Eine Hermitesche Matrix $B \in M_{n \times n}(\mathbb{C})$ ist positiv definit, wenn

$$v^t B \bar{v} > 0 \quad \forall v \in \mathbb{C}^n, v \neq 0.$$

Beispiel 15.3.14. Die Hermitesche Matrix $B = \begin{pmatrix} 1 & b \\ \bar{b} & a \end{pmatrix} \in M_{2 \times 2}(\mathbb{C})$ ist genau dann positiv definite, wenn $a \in \mathbb{R}_{>0}$ und $\det(B) \in \mathbb{R}_{>0}$.

Folgender Satz ist die Verallgemeinerung von Satz 15.3.7 auf den komplexen Fall:

Satz 15.3.15. Es sei $B \in M_{n \times n}(\mathbb{C})$. Dann ist $\langle \cdot, \cdot \rangle_B$ genau dann ein inneres Produkt, wenn B positiv definit ist.⁴⁶

Proof. Wir beweisen den komplexen Fall; der reelle Fall ist aehnlich. Wenn B Hermitesch positiv definit ist, dann kann man einfach ueberpruefen, dass $\langle \cdot, \cdot \rangle_B$ die Axiome eines inneren Produktes erfuehlt.

Nimm nun an, dass $\langle \cdot, \cdot \rangle_B$ ein inneres Produkt ist. Wir zeigen zunaechst, dass B Hermitesch ist. Da $\langle \cdot, \cdot \rangle_B$ ein inneres Produkt ist, besitzt es die Hermitesche Eigenschaft: $\langle u, v \rangle_B = \overline{\langle v, u \rangle_B}$. Es sei e_1, \dots, e_n die Standardbasis von \mathbb{C}^n . Dann gilt fuer $1 \leq i, j \leq n$ gilt

$$b_{ij} = e_i^t B e_j = \langle e_i, e_j \rangle_B = \overline{\langle e_j, e_i \rangle_B} = \overline{e_j^t B e_i} = e_j^t \bar{B} e_i = e_j^t \bar{B} e_i = \overline{b_{ji}},$$

das heisst, B ist Hermitesch.

Weiterhin ist die Bedingung, dass $\langle v, v \rangle_B > 0 \quad \forall v \in \mathbb{C}^n, v \neq 0$, genau die Bedingung, dass $v^t B \bar{v} > 0 \quad \forall v \in \mathbb{C}^n, v \neq 0$, das heisst, dass B positiv definit ist. \square

Wir koennen also die Vektorraeume \mathbb{R}^n und \mathbb{C}^n mit vielen verschiedenen inneren Produkten ausstatten; die Geometrie der Raeeume (z.B. die Frage, ob zwei Vektoren orthogonal sind oder nicht) haengt von der Wahl eines inneren Produktes ab.

Beispiel 15.3.16. Es sei $A = \begin{pmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$. Dann gilt

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

das heisst, die Vektoren $\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ und $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ sind orthogonal bezueglich dieses inneren Produktes. Andererseits sind sie selbstverstaendlich nicht orthogonal bezueglich des Standard IPs auf \mathbb{R}^2 .

Lecture 34

15.4. Gram-Schmidt Orthogonalisierung. Kehren wir zu der Frage von Basen von Vektorraeumen zurueck. Wenn der Vektorraum ein inneres Produkt besitzt, koennen wir besonders schoene Basen konstruieren, naemlich solche, die aus orthogonalen Systemen bestehen. Zur Erinnerung:

- (1) Zwei Vektoren v, w sind *orthogonal* wenn $\langle v, w \rangle = 0$; wir schreiben $v \perp w$.
- (2) Eine Untermenge $S \subset V$ ist ein *orthogonales System* wenn $u \perp v$ fuer alle $u, v \in S$.
- (3) Ein orthogonales System $S \subset V$ ist *orthonormal*, wenn $\|v\| = 1$ fuer alle $v \in S$.

Wir beginnen mit ein paar einfachen Beobachtungen:

Satz 15.4.1. Es sei $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ ein K -Vektorraum mit einem inneren Produkt.

- (1) Wenn $S \subseteq V$ ein orthogonales System ist, das nicht den Nullvektor enthaelt, dann ist S linear unabhhaengig.
- (2) Wenn v_1, \dots, v_n ein orthogonales System ist, $v_i \neq 0$ fuer alle $1 \leq i \leq n$, und $v = a_1 v_1 + \dots + a_n v_n$, dann gilt

$$a_i = \frac{\langle v, v_i \rangle}{\langle v_i, v_i \rangle} \quad \forall 1 \leq i \leq n.$$

Proof. (1) Nimm an, es gibt $v_1, \dots, v_n \in S$ und $a_1, \dots, a_n \in K$, so dass

$$a_1 v_1 + \dots + a_n v_n = 0_V.$$

Dann gilt

$$\langle a_1 v_1 + \dots + a_n v_n, v_i \rangle = a_i \langle v_i, v_i \rangle = 0.$$

Da $v_i \neq 0_V$ gilt $\langle v_i, v_i \rangle \neq 0$ und daher $a_i = 0$ fuer all $1 \leq i \leq n$.

⁴⁶Auch im komplexen Fall gibt es wieder eine 1:1 Aequivalenz zwischen IPs und Hermiteschen positiv definiten Matrizen: einem IP $\langle \cdot, \cdot \rangle$ ordnen wir die Matrix $B = ((e_i, e_j))$ zu. Dann gilt $\langle \cdot, \cdot \rangle = \langle \cdot, \cdot \rangle_B$.

(2) Übung.

□

Bemerkung 15.4.2. Es folgt von Satz 15.4.1 (1), dass ein orthogonales System in einem n -dimensionalen Vektorraum, das nicht den Nullvektor enthält, höchstens n Elemente haben kann.

Bemerkung 15.4.3. In Zukunft schreiben wir $\text{LH}(\sim)$ fuer die lineare Huelle von Vektoren, damit keine Verwirrung mit dem inneren Produkt entsteht.

Hat jeder Vektorraum mit innerem Produkt eine orthogonale Basis?

Theorem 15.4.4 (Gram–Schmidt Orthogonalisierungsverfahren). Es sei $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ ein Vektorraum ueber K ($K = \mathbb{R}$ oder \mathbb{C}) mit einem inneren Produkt. Es sei $n = \dim_K V$, und es sei v_1, \dots, v_n eine beliebige Basis von V . Es sei w_1, \dots, w_n gegeben durch

- es sei $w_1 = v_1$;
- fuer $2 \leq j \leq n$ sei

$$w_j = v_j - \sum_{i=1}^{j-1} \text{proj}_{w_i}(v_j).$$

Dann ist w_1, \dots, w_n eine orthogonale Basis von V .

Proof. Wir zeigen ueber Induktion nach j , dass w_1, \dots, w_j folgende Eigenschaften hat

- (1) $w_i \neq 0_V$ fuer alle $1 \leq i \leq j$;
- (2) w_1, \dots, w_j ist ein orthogonales System;
- (3) $\text{LH}(w_1, \dots, w_j) = \text{LH}(v_1, \dots, v_j)$.

Da jedes orthogonale System linear unabhängig ist, folgt daraus, dass w_1, \dots, w_n eine orthogonale Basis ist.

Der Fall $j = 1$ ist klar. Nimm an, die Behauptungen (1) - (3) sind wahr fuer $j - 1$. Wenn $w_j = 0_V$, dann gilt

$$v_j = \sum_{i=1}^{j-1} \frac{\langle v_j, w_i \rangle}{\langle w_i, w_i \rangle} \cdot w_i \in \text{LH}(w_1, \dots, w_{j-1}).$$

Doch $\text{LH}(w_1, \dots, w_{j-1}) = \text{LH}(v_1, \dots, v_{j-1})$, und daher

$$v_j \in \text{LH}(v_1, \dots, v_{j-1}),$$

was ein Widerspruch zur linearen Unabhängigkeit von v_1, \dots, v_n ergibt. Daher gilt (1).

Um (2) zu ueberpruefen, berechnen wir $\langle w_j, w_i \rangle$ fuer $1 \leq i < j$:

$$\langle w_j, w_k \rangle = \left\langle v_j - \sum_{i=1}^{j-1} \text{proj}_{w_i}(v_j), w_k \right\rangle$$

Doch $\text{proj}_{w_i}(v_j)$ ist ein Vielfaches von w_i und aufgrund der Induktionshypothese $\langle w_i, w_k \rangle = 0$ wenn $i \neq k$. Daher gilt

$$(15.4) = \langle v_j - \text{proj}_{w_k}(v_j), w_k \rangle = 0$$

aufgrund von Lemma 15.2.20.

Nun muessen wir nur noch zeigen, dass $\text{LH}(w_1, \dots, w_j) = \text{LH}(v_1, \dots, v_j)$. Aufgrund der Hypothese wissen wir, dass $\text{LH}(w_1, \dots, w_{j-1}) = \text{LH}(v_1, \dots, v_{j-1})$. Doch $w_j = v_j - u$ fuer $u \in \text{LH}(w_1, \dots, w_{j-1})$. Das beendet den Beweis. □

Korollar 15.4.5. Es sei $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ ein Vektorraum ueber K ($K = \mathbb{R}$ oder \mathbb{C}) mit einem inneren Produkt. Dann besitzt V eine orthonormale Basis. Weiterhin gilt: wenn v_1, \dots, v_n eine orthonormale Basis von V ist und $v = \sum_{i=1}^n a_i v_i$, dann gilt

$$\|v\|^2 = |a_1|^2 + \dots + |a_n|^2.$$

Proof. Es folgt von Theorem 15.4.4, dass V eine orthogonale Basis w_1, \dots, w_n besitzt. Es sei

$$v_i = \frac{1}{\|w_i\|} \cdot w_i \quad \forall 1 \leq i \leq n.$$

Dann ist $\{v_1, \dots, v_n\}$ eine orthonormale Basis.

Wenn $v = \sum_{i=1}^n a_i v_i$, dann gilt

$$\begin{aligned} \|v\|^2 &= \langle v, v \rangle \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i \bar{a}_j \langle v_i, v_j \rangle \\ &= \sum_{i=1}^n |a_i|^2. \end{aligned}$$

□

Beispiel 15.4.6. Es seien $v_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ und $v_2 = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$, und es sei $V = \text{LH}(v_1, v_2) \leq \mathbb{R}^3$ mit dem Standard IP. Es sei $w_1 = v_1$ und

$$\begin{aligned} w_2 &= v_2 - \text{proj}_{w_1}(v_2) \\ &= \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \frac{3}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 2 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Dann gilt $\langle w_1, w_2 \rangle = 0$, das heisst, w_1 und w_2 sind eine orthogonale Basis von V .

Beispiel 15.4.7. Betrachte die Basis v_1, v_2, v_3 von \mathbb{R}^3 (mit dem Standard IP) mit

$$v_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad v_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad v_3 = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}.$$

Dann ist $w_1 = v_1$,

$$\begin{aligned} w_2 &= v_2 - \frac{\langle v_2, w_1 \rangle}{\langle w_1, w_1 \rangle} w_1 \\ &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} - \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{3} \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ 2 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned} w_3 &= v_3 - \frac{\langle v_3, w_2 \rangle}{\langle w_2, w_2 \rangle} w_2 - \frac{\langle v_3, w_1 \rangle}{\langle w_1, w_1 \rangle} w_1 \\ &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Dann ist $\frac{w_1}{\|w_1\|}, \frac{w_2}{\|w_2\|}, \frac{w_3}{\|w_3\|}$ eine orthonormale Basis.

Beispiel 15.4.8. Es sei V der Vektorraum aller stetigen Funktionen $f : [-1, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ mit dem inneren Produkt aus Beispiel 15.2.5 und $U \leq V$ der Unterraum aller Polynome vom Grad ≤ 3 . Dann ist $1, x, x^2, x^3$ eine Basis von U ; schreibe $f_i = x^i$. Wir benutzen Gram-Schmidt, um eine orthonormale Basis

zu konstruieren: es ist $g_0 = f_0$,

$$\begin{aligned}
 g_1 &= f_1 - \frac{\langle f_1, g_0 \rangle}{\langle g_0, g_0 \rangle} \cdot g_0 \\
 &= x - \frac{1}{2} \int_{-1}^1 t \, dt \\
 &= x, \\
 g_2 &= f_2 - \frac{\langle f_2, g_0 \rangle}{\langle g_0, g_0 \rangle} \cdot g_0 - \frac{\langle f_2, g_1 \rangle}{\langle g_1, g_1 \rangle} \cdot g_1 \\
 &= x^2 - \frac{\langle x^2, x \rangle}{2} \cdot 1 - \frac{\langle x^2, x \rangle}{\langle x, x \rangle} \cdot x \\
 &= x^2 - \frac{1}{3}, \\
 g_3 &= f_3 - \frac{\langle f_3, g_0 \rangle}{\langle g_0, g_0 \rangle} \cdot g_0 - \frac{\langle f_3, g_1 \rangle}{\langle g_1, g_1 \rangle} \cdot g_1 - \frac{\langle f_3, g_2 \rangle}{\langle g_2, g_2 \rangle} \cdot g_2 \\
 &= x^3 - \frac{3}{5}x.
 \end{aligned}$$

Dann ist g_0, g_1, g_2, g_3 eine orthogonale Basis von U . Durch Normalisierung erhalten wir eine orthonormale Basis.

Bemerkung 15.4.9. Es sei V ein \mathbb{R} -Vektorraum und v_1, v_2 zwei linear unabhängige Vektoren in V . Dann gibt es ein IP $(\langle \cdot, \cdot \rangle)$ on V , so dass $(v_1, v_2) = 0$: erweitere v_1, v_2 zu einer Basis v_1, \dots, v_n von V , und definiere $(v_i, v_j) = \delta_{ij}$. Dieses bestimmt aufgrund von Bilinearität (bzw. Sesquilinearität) ein IP mit der geforderten Eigenschaft.

Lecture 35

15.5. Das orthogonale Komplement. Es sei $K = \mathbb{R}$ oder \mathbb{C} und $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ ein IP Raum. Wir werden nun beweisen, dass man jedem Unterraum von V einen eindeutig bestimmten Komplementarraum zuordnen kann.

Definition 15.5.1. Es sei $\emptyset \neq S \subseteq V$ eine Untermenge. Wir definieren das orthogonale Komplement von S als

$$S^\perp = \{v \in V : \langle v, s \rangle = 0 \quad \forall s \in S\}.$$

Wenn $S = \{v\}$, dann schreiben wir v^\perp fuer $\{v\}^\perp$.

Bemerkung 15.5.2. Es gilt $0_V^\perp = V$ und $V^\perp = \{0_V\}$.

Lemma 15.5.3. Es seien $\emptyset \neq S \subseteq V$. Dann gilt

- (1) S^\perp ist ein Unterraum von V ;
- (2) es gilt entweder $S \cap S^\perp = \emptyset$ oder $S \cap S^\perp = \{0_V\}$;
- (3) wenn $T \subseteq V$ so dass $S \subseteq T$, dann gilt $T^\perp \subseteq S^\perp$;
- (4) es gilt $(\text{LH}(S))^\perp = S^\perp$;
- (5) es gilt $S \subseteq (S^\perp)^\perp$.

Proof. (1) Ueberpruefe die Axiome.

(2) Nimm an, dass $S \cap S^\perp \neq \emptyset$; es sei $v \in S \cap S^\perp$. Dann gilt

$$\langle v, v \rangle = 0 \quad \Rightarrow \quad v = 0_V.$$

(3) Uebung.

(4) Da $S \subseteq \text{LH}(S)$, folgt von (3), dass $\text{LH}(S)^\perp \subseteq S^\perp$. Es sei nun $v \in S^\perp$, das heisst

$$\langle s, v \rangle = 0 \quad \forall s \in S.$$

Wenn $w \in \text{LH}(S)$, dann gibt es $s_1, \dots, s_n \in S$ und $\alpha_1, \dots, \alpha_n \in K$ so dass

$$w = \alpha_1 s_1 + \dots + \alpha_n s_n \quad \Rightarrow \quad \langle w, v \rangle = \sum_{i=1}^n \alpha_i \langle s_i, v \rangle = 0,$$

und daher $v \in \text{LH}(S)^\perp$.

(5) Es sei $s \in S$. Dann gilt (aufgrund der Definition von S^\perp), dass $\langle s, v \rangle = 0$ fuer alle $v \in S^\perp$, und daher $s \in (S^\perp)^\perp$. □

Theorem 15.5.4. *Es sei $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ ein IP Raum (möglicherweise unendlich-dimensional), und es sei U ein endlich-dimensionaler Unterraum. Dann gilt $V = U \oplus U^\perp$.*

Proof. Lemma 15.5.3 zeigt, dass $U \cap U^\perp = \{0_V\}$; es ist daher ausreichend zu zeigen, dass $U + U^\perp = V$. Es sei $r = \dim U$, und es sei u_1, \dots, u_r eine orthonormale Basis von U - diese existiert aufgrund von Theorem 15.4.4. Definiere die Projektion

$$\begin{aligned} \tilde{\text{pr}}_U : V &\rightarrow U, \\ v &\mapsto \langle v, u_1 \rangle u_1 + \dots + \langle v, u_r \rangle u_r. \end{aligned}$$

Dann gilt

$$v = \tilde{\text{pr}}_U(v) + (v - \tilde{\text{pr}}_U(v)).$$

Behauptung: $(v - \tilde{\text{pr}}_U(v)) \in U^\perp$.

Beweis der Behauptung: es ist ausreichend zu zeigen, dass

$$\langle v - \tilde{\text{pr}}_U(v), u_i \rangle = 0 \quad \forall 1 \leq i \leq r.$$

Wir rechnen:

$$\begin{aligned} \langle v - \tilde{\text{pr}}_U(v), u_i \rangle &= \langle v - (\langle v, u_1 \rangle u_1 + \dots + \langle v, u_r \rangle u_r), u_i \rangle \\ &= \langle v, u_i \rangle - \sum_{j=1}^r \langle v, u_j \rangle \langle u_j, u_i \rangle \\ &= \langle v, u_i \rangle - \langle v, u_i \rangle \\ &= 0, \end{aligned}$$

da $\langle u_j, u_i \rangle = 0$ for all $i \neq j$. □

Bemerkung 15.5.5. *Es gilt*

$$\tilde{\text{pr}}_U = \text{pr}_{u_1} + \dots + \text{pr}_{u_r}.$$

Bemerkung 15.5.6. *Wenn V endlich-dimensional ist, dann ist U^\perp ein Komplement von U . Mit anderen Worten, in inneren Produkt Raeumen hat jeder Unterraum ein kanonisches Komplement.*

Beispiel 15.5.7. Wir betrachten \mathbb{R}^3 mit dem Standard IP. Es sei $U = \{x_1 + x_2 - x_3 = 0\}$. Dann ist $u_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ und $u_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ eine Basis von U . Wir berechnen U^\perp : wenn $w = \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{pmatrix} \in U^\perp$, dann gilt $\langle w, u_i \rangle = 0$ fuer $i = 1, 2$, das heisst

$$\begin{aligned} w_1 + w_3 &= 0 \quad \text{und} \quad w_2 + w_3 = 0 \\ \Rightarrow w_1 &= w_2 = -w_3 \\ \Rightarrow U^\perp &= \text{LH} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Beispiel 15.5.8. Es sei V der \mathbb{R} -Vektorraum aller Polynome vom Grad ≤ 3 mit dem inneren Produkt aus Beispiel 15.2.5, und es sei U der Unterraum aller Polynome from Grad ≤ 1 . Dann ist $\dim U^\perp = 2$. Um U^\perp zu bestimmen, waehle eine Basis von U , z.B. $f_0(x) = 1$ und $f_1(x) = x$. Wenn $g(x) = a + bx + cx^2 + dx^3 \in U^\perp$, dann gilt

$$\langle g, f_0 \rangle = 0 \quad \text{und} \quad \langle g, f_1 \rangle = 0.$$

Explizit gibt das Relationen zwischen den Koeffizienten, aus denen wir eine Basis g_2, g_3 bestimmen koennen (Uebung). Um eine *orthonormale* Basis von U^\perp zu bestimmen, wende das Gram-Schmidt Verfahren auf g_2, g_3 an (Uebung).

Wir koennen jetzt die Projektion auf einen Unterraum definieren:

Definition 15.5.9. *Es sei $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ ein IP Raum (möglicherweise unendlich-dimensional), und es sei U ein endlich-dimensionaler Unterraum. Dank Theorem 15.5.4 kann jeder Vektor $v \in V$ eindeutig geschrieben werden als*

$$v = u + w \quad \text{mit } u \in U \text{ und } w \in U^\perp.$$

Definiere die orthogonale Projektion von v als $\text{pr}_U(v) = u$.

Bemerkung 15.5.10. *Fuer alle $u \in U$ gilt $\text{pr}_U(u) = u$.*

- Lemma 15.5.11.** (1) pr_U ist eine lineare Abbildung.
 (2) $\ker(\text{pr}_U) = U^\perp$ und $\text{im}(\text{pr}_U) = U$.
 (3) Fuer alle $v \in V$ gilt $v - \text{pr}_U(v) \in U^\perp$.
 (4) Wenn u_1, \dots, u_r eine orthonormale Basis von U ist, dann ist $\text{pr}_U = \tilde{\text{pr}}_U$.

Proof. (1) - (3) sind eine Uebung.

Es sei u_1, \dots, u_r eine orthonormale Basis von U . Dann gilt $v = x + w$ mit

$$x = \langle v, u_1 \rangle u_1 + \dots + \langle v, u_r \rangle u_r \in U \quad \text{und} \quad w \in U^\perp.$$

Dann gilt

$$\text{pr}_U(v) = x = \langle v, u_1 \rangle u_1 + \dots + \langle v, u_r \rangle u_r = \text{pr}_{u_1}(v) + \dots + \text{pr}_{u_r}(v) = \tilde{\text{pr}}(v)$$

□

Als eine einfache Konsequenz erhalten wir folgendes schoenes Resultat:

Satz 15.5.12. Es sei $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ ein IP Raum und $U \leq V$ endlich-dimensional. Dann gilt $U = (U^\perp)^\perp$.

Proof. Wir wissen bereits von Lemma 15.5.3, dass $U \subseteq (U^\perp)^\perp$; es reicht daher, die umgekehrte Inklusion zu zeigen. Es sei $v \in (U^\perp)^\perp$. Da $V = U \oplus U^\perp$, gibt es eindeutig bestimmte $u \in U, w \in U^\perp$, so dass $v = u + w$. Wir zeigen, dass $w = 0_V$. Da

$$u \in U \subseteq (U^\perp)^\perp \quad \text{und} \quad v \in (U^\perp)^\perp,$$

folgt, dass $w = v - u \in (U^\perp)^\perp$. Aber w ist ebenfalls ein Element von U^\perp , das heisst, $w \in U^\perp \cap (U^\perp)^\perp = \{0_V\}$. □

Korollar 15.5.13. Wenn $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ ein endlich-dimensionaler IP Raum ist und $U \leq V$ ist ein Unterraum, dann gilt

$$\dim V = \dim U + \dim U^\perp.$$

Lecture 36

15.6. QR Zerlegung. In diesem Kapitel werden wir das Gram-Schmidt Orthogonalisierungsverfahren dazu benutzen um zu zeigen, dass sich jede reelle oder komplexe $(n \times n)$ -Matrix sich in ein Produkt zwei besonders einfacher Matrizen zerlegen laesst.

Zunaechst definieren wir zwei neue Familien von sehr wichtigen Matrixgruppen.

Definition 15.6.1.

- (1) Eine Matrix $A \in M_{n \times n}(\mathbb{R})$ ist orthogonal, wenn die Spaltenvektoren eine orthonormale Basis von $(\mathbb{R}^n, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ bilden; hier ist $\langle \cdot, \cdot \rangle$ das Standard IP. Wir schreiben $O(n)$ fuer die Menge aller orthogonalen $(n \times n)$ -Matrizen.
 (2) Eine Matrix $B \in M_{n \times n}(\mathbb{C})$ ist unitaer, wenn die Spaltenvektoren eine orthonormale Basis von \mathbb{C}^n bilden bezueglich des Standard IP auf \mathbb{C}^n . Wir schreiben $U(n)$ fuer die Menge aller unitaeren $(n \times n)$ -Matrizen.

Beispiele 15.6.2. (1) Die Matrizen $A = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$ und $B = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2 & -2 & 1 \\ 1 & 2 & 2 \\ 2 & 1 & 2 \end{pmatrix}$ sind orthogonal.

(2) Die Matrix $C = \frac{1}{\sqrt{5}} \begin{pmatrix} i & -2i \\ -2i & -1 \end{pmatrix}$ ist unitaer.

Lemma 15.6.3.

- (1) Eine Matrix $A \in M_{n \times n}(\mathbb{R})$ ist genau dann orthogonal, wenn $A^{-1} = A^t$.
 (2) Eine Matrix $B \in M_{n \times n}(\mathbb{C})$ ist genau dann unitaer, wenn $B^{-1} = B^*$.

Proof. Wir beweisen (1); der Beweis fuer (2) ist aehnlich. Wir muessen zeigen, dass $A^t A = \mathbf{1}_n$. Schreibe $A = (\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n)$ mit $\mathbf{v}_i \in \mathbb{R}^n$. Dann gilt

$$(A^t A)_{ij} = \mathbf{v}_i^t \mathbf{v}_j = \langle \mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j \rangle \quad \forall 1 \leq i, j \leq n.$$

Doch da die \mathbf{v}_i eine orthonormale Basis bilden, gilt $\langle \mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j \rangle = \delta_{ij}$ und daher $A^t A = \mathbf{1}_n$. □

Bemerkung 15.6.4. Insbesondere folgt, dass $A \in O(n)$ genau dann, wenn $A^t \in O(n)$, das heisst genau dann, wenn die Zeilenvektoren von A eine orthonormale Basis von \mathbb{R}^n sind. Analog gilt, dass $B \in U(n)$ genau dann, wenn $B^* \in U(n)$, das heisst genau dann, wenn die Zeilenvektoren von B eine orthonormale Basis von \mathbb{C}^n sind.

Diese Charakterisierungen von Lemma 15.6.3 sind nuetzlich, um zu zeigen, dass $O(n)$ und $U(n)$ eine Gruppenstruktur unter Matrixmultiplikation haben:

Satz 15.6.5. Die Menge $O(n)$ (bzw. $U(n)$) ist eine Untergruppe von $GL_n(\mathbb{R})$ (bzw. von $GL_n(\mathbb{C})$).

Proof. Wir beweisen den Fall $O(n)$; der Beweis fuer $U(n)$ ist aehnlich. Es ist klar, dass $\mathbf{1}_n \in O(n)$. Wenn $A^{-1} = A^t$, dann gilt

$$(A^{-1})^{-1} = (A^t)^{-1} = (A^{-1})^t,$$

und daher $A^{-1} \in O(n)$. Es seien nun $A, B \in O(n)$. Dann gilt

$$(AB)^{-1} = B^{-1}A^{-1} = B^t A^t = (AB)^t,$$

und daher $AB \in O(n)$. □

Wir koennen nun folgenden Satz beweisen:

Theorem 15.6.6.

- (1) Es sei $A \in GL_n(\mathbb{R})$. Dann gibt es $Q \in O(n)$ und eine obere Dreiecksmatrix $R \in M_{n \times n}(\mathbb{R})$, so dass $A = QR$.
- (2) Es sei $A \in GL_n(\mathbb{C})$. Dann gibt es $Q \in U(n)$ und eine obere Dreiecksmatrix $R \in M_{n \times n}(\mathbb{C})$, so dass $A = QR$.

Proof. Es sei $K = \mathbb{R}$ oder \mathbb{C} und $A \in GL_n(K)$. Schreibe $A = (v_1, \dots, v_n)$ mit $v_i \in \mathbb{R}^n$. Da A invertierbar ist, ist v_1, \dots, v_n eine Basis von K^n . Wir wenden das GS Orthogonalisierungsverfahren auf diese Basis an und erhalten eine orthonormale Basis w_1, \dots, w_n mit der Eigenschaft, dass

$$\begin{aligned} v_1 &= \text{pr}_{w_1}(v_1) \\ v_2 &= \text{pr}_{w_1}(v_2) + \text{pr}_{w_2}(v_2) \\ &\vdots \\ v_n &= \text{pr}_{w_1}(v_n) + \dots + \text{pr}_{w_n}(v_n). \end{aligned}$$

Es sei nun $Q = (w_1, \dots, w_n)$ und

$$R = \begin{pmatrix} \langle v_1, w_1 \rangle & \langle v_2, w_1 \rangle & \dots & \langle v_i, w_1 \rangle & \dots & \langle v_n, w_1 \rangle \\ 0 & \langle v_2, w_2 \rangle & \dots & \langle v_i, w_2 \rangle & \dots & \langle v_n, w_2 \rangle \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \langle v_1, w_i \rangle & \dots & \langle v_n, w_i \rangle \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & \langle v_n, w_n \rangle. \end{pmatrix}.$$

Dann laesst sich obige Eigenschaft als Matrix-Multiplikation ausdruecken: $A = QR$. □

Beispiel 15.6.7. Es sei $A = \begin{pmatrix} -1 & 3 \\ 1 & 5 \end{pmatrix}$ mit Spaltenvektoren v_1, v_2 . Das GS Verfahren erzeugt die Basis

$$w_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad w_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix},$$

und daher

$$Q = \begin{pmatrix} -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad R = \sqrt{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 4 \end{pmatrix}.$$

Wir ueberpruefen die Orthogonalitaet von Q : es gilt

$$Q^t Q = Q^2 = \frac{1}{\sqrt{2}^2} \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}^2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Beispiel 15.6.8. Es sei $A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$ mit Spaltenvektoren v_1, v_2, v_3 . Durch Anwendung des GS Verfahrens erhalten wir eine orthonormale Basis

$$w_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad w_2 = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 2 \end{pmatrix}, \quad w_3 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Daher gilt

$$Q = (w_1, w_2, w_3) = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ 0 & \frac{2}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{pmatrix}$$

und

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

Tatsächlich lässt sich die QR Zerlegung auf alle $M_{n \times n}(K)$ -Matrizen verallgemeinern:

Theorem 15.6.9. *Es sei $A \in M_{n \times n}(K)$ und $r = \text{rk}(A)$. Dann gibt es Matrizen*

$$Q \in \begin{cases} O(n) & \text{wenn } k = \mathbb{R} \\ U(n) & \text{wenn } k = \mathbb{C} \end{cases}$$

und $R = \begin{pmatrix} C & \star \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \in M_{n \times n}(K)$ mit $C \in M_{r \times r}(K)$ eine obere Dreiecksmatrix, so dass $A = QR$.

Proof. Übung fuer die Enthusiasten. □

Beweis der Eindeutigkeit der Zerlegung von Philipp Steiner:

Satz 15.6.10. *Es sei $A \in \text{GL}_n(\mathbb{R})$. Dann gibt es eindeutig bestimmte $Q \in O(n)$ und eine obere Dreiecksmatrix $R \in M_{n \times n}(\mathbb{R})$ mit positive Elementen entlang der Diagonalen, so dass $A = QR$.*

Proof. Nimm an, dass es zwei solcher Zerlegungen gibt:

$$A = Q_1 R_1 = Q_2 R_2$$

Dann folgt, dass $Q_2^t Q_1 = R_2 R_1^{-1}$. Das sowohl die orthogonalen Matrizen als auch die oberen Dreiecksmatrizen eine Untergruppe von $\text{GL}_n(\mathbb{R})$ bilden, ist die Matrix $Q = Q_2^t Q_1$ eine orthogonale Dreiecksmatrix mit positiven Elementen entlang der Diagonalen. Aber die einzige Matrix mit einer solchen Eigenschaft ist $\mathbf{1}_n$. Die Eindeutigkeit der Zerlegung folgt. □

15.7. Dualraeume von Inneren Produkt Raeumen. Es sei $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ ein endlich-dimensionaler IP Raum ueber K . In diesem Kapitel werden wir zeigen, dass der Dualraum

$$V^* = \text{Hom}_K(V, K)$$

sich mit Hilfe des inneren Produkts beschreiben lässt. Insbesondere gibt es eine *kanonische* bijektive Abbildung $V \cong V^*$.

Definition 15.7.1. *Es sei $u \in V$. Definiere die Abbildung*

$$\varphi_u : V \rightarrow K, \quad v \mapsto \langle v, u \rangle.$$

Lemma 15.7.2. *Fuer alle $u \in V$ gilt $\varphi_u \in V^*$; mit anderen Worten, die Abbildung $\varphi_u : V \rightarrow K$ ist linear.*

Proof. Klar, da das innere Produkt linear in the ersten Variable ist. □

Theorem 15.7.3 (Darstellungssatz von Riesz). *Es sei $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ ein IP Raum ueber K , und es sei $\varphi \in V^*$. Dann gibt es ein eindeutig bestimmtes Element $u \in V$, so dass $\varphi = \varphi_u$; mit anderen Worten,*

$$\varphi(v) = \langle v, u \rangle \quad \forall v \in V.$$

Proof. Nimm an, dass $K = \mathbb{C}$; der Beweis fuer $K = \mathbb{R}$ ist aehnlich.

Es sei e_1, \dots, e_n eine orthonormale Basis von V . Dann gilt fuer $v \in V$, dass

$$v = \sum_{i=1}^n \langle v, e_i \rangle e_i.$$

Es sei nun $\varphi \in V^*$. Dann gilt

$$\begin{aligned}\varphi(v) &= \varphi\left(\sum_{i=1}^n \langle v, e_i \rangle e_i\right) \\ &= \sum_{i=1}^n \langle v, e_i \rangle \varphi(e_i) \\ &= \sum_{i=1}^n \langle v, \overline{\varphi(e_i)} \cdot e_i \rangle \\ &= \left\langle v, \sum_{i=1}^n \overline{\varphi(e_i)} \cdot e_i \right\rangle.\end{aligned}$$

Es sei $u = \sum_{i=1}^n \overline{\varphi(e_i)} \cdot e_i \in V$. Dann gilt $\varphi(v) = \langle v, u \rangle$ fuer alle $v \in V$, und daher $\varphi = \varphi_u$.

Nimm an, dass $\varphi_u = \varphi_w$ fuer $u, w \in V$. Dann gilt

$$\langle v, u \rangle = \langle v, w \rangle \quad \forall v \in V \quad \Rightarrow \quad u = w$$

aufgrund von Lemma 15.2.9 (3). □

Bemerkung 15.7.4. Theorem 15.7.3 zeigt, dass die Abbildung

$$\Phi: V \rightarrow V^*, \quad u \mapsto \varphi_u$$

bijektiv ist. Wenn $K = \mathbb{R}$, dann ist Φ eine lineare Abbildung, da

$$\langle \sim, \alpha u + \beta w \rangle = \alpha \cdot \langle \sim, u \rangle + \beta \cdot \langle \sim, w \rangle \quad \forall \alpha, \beta \in \mathbb{R}, u, w \in V.$$

Wenn aber $K = \mathbb{C}$, dann ist die Abbildung $\Phi: V \rightarrow V^*$ bijektiv und anti-linear:

$$\langle \sim, \alpha u + \beta w \rangle = \bar{\alpha} \cdot \langle \sim, u \rangle + \bar{\beta} \cdot \langle \sim, w \rangle \quad \forall \alpha, \beta \in \mathbb{C}, u, w \in V.$$

Beispiel 15.7.5. Es sei V der Vektorraum aller stetigen Funktionen $f: [-1, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ mit dem inneren Produkt aus Beispiel 15.2.5 und $U \leq V$ der Unterraum aller Polynome vom Grad ≤ 2 . Definiere

$$\varphi: U \rightarrow \mathbb{R}, \quad f(x) \mapsto \int_{-1}^1 f(t) \cos(\pi t) dt.$$

Dann ist $\varphi \in V^*$; laut Theorem 15.7.3 gibt es also ein Element $u(x) \in U$, so dass $\varphi(f(x)) = \langle f, u \rangle \forall f(x) \in U$. Der Beweis von dem Theorem sagt uns, wie wir dieses Element $u(x)$ konstruieren koennen. Wir bestimmen zunaechst eine orthonormals Basis von U mit Hilfe des GS Verfahrens; ein Beispiel ist $g_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}, g_1(x) = \sqrt{\frac{3}{2}}x, g_2 = \sqrt{\frac{45}{8}}\left(x^2 - \frac{1}{3}\right)$. Dann ist

$$\begin{aligned}u &= \sum_{i=0}^2 \varphi(g_i) \cdot g_i \\ &= \sum_{i=0}^2 \left(\int_{-1}^1 g_i(t) \cos(\pi t) dt \right) \cdot g_i \\ &= -\frac{45}{2\pi^2} \left(x^2 - \frac{1}{3} \right).\end{aligned}$$

Die Abbildung Φ gibt uns auch die Moeglichkeit, eine Beziehung zwischen Strukturen des Dualraums V^* und Strukturen von V Herzustellen. Ein Beispiel ist die Beziehung zwischen dem Annihilator und dem orthogonalen Komplement eines Unterraums:

Satz 15.7.6. Es sei $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ ein IP Raum ueber K , und es sei $U \leq V$. Dann ist $\Phi(U^\perp) \leq V^*$ der Annihilator von U .⁴⁷

⁴⁷Das erlaert, warum sowohl der Annihilator als auch das orthogonale Komplement mit U^\perp bezeichnet werden.

Proof. Schreibe $\text{Ann}(U)$ fuer den Annihilator von U . Laut Definition gilt

$$\begin{aligned} w \in U^\perp &\Leftrightarrow \langle u, w \rangle = 0 \quad \forall u \in U \\ &\Leftrightarrow \phi_w(u) = 0 \quad \forall u \in U \\ &\Leftrightarrow U \leq \ker(\phi_w) \\ &\Leftrightarrow \phi_w \in \text{Ann}(U). \end{aligned}$$

Da dank Theorem 15.7.3 jedes Element in V^* von der Form ϕ_w fuer ein $w \in V$ ist, folgt das Resultat. \square

Lecture 37

15.8. Die adjungierte Abbildung. Es seien $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle_V)$ und $(W, \langle \cdot, \cdot \rangle_W)$ IP Raume ueber K , und es sei $T : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung.

Definition 15.8.1. Die adjungierte Abbildung T^* von T ist die Abbildung $T^* : W \rightarrow V$, fuer die gilt

$$(54) \quad \langle Tv, w \rangle_W = \langle v, T^*w \rangle_V \quad \forall v \in V, w \in W.$$

Bemerkung 15.8.2. Es ist nicht klar, dass T^* ueberhaupt existiert!

Satz 15.8.3. Die adjungierte Abbildung T^* ist wohl-definiert und linear.⁴⁸

Proof. Es sei $w \in W$, und betrachte die Linearform $\lambda_w \in V^*$ gegeben durch

$$\lambda_w(v) = \langle Tv, w \rangle_W.$$

Dann existiert laut Theorem 15.7.3 ein eindeutig bestimmtes Element $v' \in V$, so dass

$$\begin{aligned} \lambda_w(v) &= \langle v, v' \rangle_V \quad \forall v \in V \\ \Leftrightarrow \langle Tv, w \rangle_W &= \langle v, v' \rangle_V \quad \forall v \in V. \end{aligned}$$

Definiere $T^*(w) = v'$. Mir muessen nun zeigen, dass T^* eine lineare Abbildung ist.

Es seien $w_1, w_2 \in W$; wir zeigen zunaechst, dass

$$T^*(w_1 + w_2) = T^*w_1 + T^*w_2.$$

Da die adjungierte Abbildung durch (54) vollstaendig bestimmt ist, reicht es zu zeigen, dass

$$\langle v, T^*(w_1 + w_2) \rangle_V = \langle v, T^*w_1 + T^*w_2 \rangle_V \quad \forall v \in V.$$

Doch

$$\begin{aligned} \langle v, T^*(w_1 + w_2) \rangle_V &= \langle Tv, w_1 + w_2 \rangle_W \\ &= \langle Tv, w_1 \rangle_W + \langle Tv, w_2 \rangle_W \\ &= \langle v, T^*w_1 \rangle_V + \langle v, T^*w_2 \rangle_V \\ &= \langle v, T^*w_1 + T^*w_2 \rangle_V, \end{aligned}$$

was zu beweisen war. \square

Bemerkung 15.8.4.

(1) Es gilt $(\text{id}_V)^* = \text{id}_V$.

(2) Es gilt

$$\langle w, Tv \rangle_W = \overline{\langle Tv, w \rangle_W} = \overline{\langle v, T^*w \rangle_V} = \langle T^*w, v \rangle_V$$

und daher $(T^*)^* = T$.

Beispiel 15.8.5. Wir betrachten \mathbb{C}^m als einen IP Raum mit dem Standard IP. Es sei $A = \begin{pmatrix} 2i & 1+i & 7 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}$

und $T_A : \mathbb{C}^3 \rightarrow \mathbb{C}^2$ die induzierte Abbildung. Was ist die Darstellungsmatrix von T_A^* bezueglich der Standardbasen?

Es gilt

$$\langle T_A x, y \rangle_{\mathbb{C}^2} = (Ax)^t \bar{y} = x^t A^t \bar{y} = x^t \overline{A^t y} = x^t \overline{A^* y} = \langle x, T_A^* y \rangle_{\mathbb{C}^3}.$$

Wir werden spaeter sehen, dass sich dieses Beispiel verallgemeinern laesst.

Die adjungierte Abbildung haengt eng mit der dualen Abbildung zusammen. Wir erinnern uns: die *duale Abbildung* $W^* \rightarrow V^*$ ist definiert durch $\ell \mapsto \ell \circ T$ fuer $\ell \in W^*$.

⁴⁸Die adjungierte Abbildung ist durch Gleichung (54) vollstaendig bestimmt! Mit anderen Worten, wenn wir etwas ueber die adjungierte Abbildung beweisen wollen, benutzen wir diese Gleichung.

Satz 15.8.6. Schreibe $T_{\text{dual}}^* : W^* \rightarrow V^*$ fuer die duale Abbildung. Dann gilt

$$T^* = \Phi_V^{-1} \circ T_{\text{dual}}^* \circ \Phi_W,$$

wobei $\Phi_V : V \rightarrow V^*$ und $\Phi_W : W \rightarrow W^*$ die bijektiven Abbildungen aus Theorem 15.7.3 sind.

Proof. Es reicht aus zu zeigen, dass folgendes Diagramm kommutiert:

$$\begin{array}{ccc} W & \xrightarrow{T^*} & V \\ \Phi_W \downarrow & & \downarrow \Phi_V \\ W^* & \xrightarrow{T_{\text{dual}}^*} & V^* \end{array}$$

Aber das folgt direkt von der Definition der adjungierten Abbildung. □

Bemerkung 15.8.7. Satz 15.8.6 erlaubt uns, T^* und T_{dual}^* kanonisch zu identifizieren. Das erklart, warum beide mit T^* bezeichnet werden. Zusammenfassend gilt fuer IP Raeeume: wir identifizieren

- den Dualraum V^* mit V ;
- den Annihilator eines Unterraums $U \leq V$ mit U^\perp ;
- die Duale Abbildung $T^* : W^* \rightarrow V^*$ mit der adjungierten Abbildung $T^* : W \rightarrow V$.

Lemma 15.8.8. Es seien V, W, U IP Raeeume ueber $K \in \{\mathbb{R}, \mathbb{C}\}$, und es seien

$$S, T : V \longrightarrow W, \quad R : W \longrightarrow U$$

lineare Abbildungen. Dann gilt

- (1) $(S + T)^* = S^* + T^*$;
- (2) $(\lambda T)^* = \bar{\lambda} \cdot T^*$ fuer alle $\lambda \in K$;
- (3) $(T^*)^* = T$;
- (4) $(R \circ T)^* = T^* \circ R^*$.

Proof. (1) Es sei $w \in W$. Dann gilt $\forall v \in V$

$$\begin{aligned} \langle v, (S + T)^* w \rangle_V &= \langle (S + T)v, w \rangle_W \\ &= \langle Sv, w \rangle_W + \langle Tv, w \rangle_W \\ &= \langle v, S^* w \rangle_V + \langle v, T^* w \rangle_V \\ &= \langle v, (S^* + T^*) w \rangle_V \end{aligned}$$

und daher $(S + T)^* w = (S^* + T^*) w \forall w \in W$.

(2) Uebung.

(3) Es sei $w \in W$. Dann gilt fuer alle $v \in V$

$$\langle (T^*)^* v, w \rangle_W = \langle v, T^* w \rangle_V = \langle Tv, w \rangle_W$$

und daher $(T^*)^* = T$.

(4) Uebung. □

Lemma 15.8.9. Es seien $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle_V)$ und $(W, \langle \cdot, \cdot \rangle_W)$ IP Raeeume ueber K , und es sei $T : V \rightarrow W$ linear.

- $\ker(T^*) = \text{im}(T)^\perp$ und $\ker(T) = \text{im}(T^*)^\perp$;
- $\text{im}(T^*) = (\ker T)^\perp$ und $\text{im}(T) = \ker(T^*)^\perp$.

(Vergl. Satz 6.4.6)

Proof. (1) Es sei $w \in W$. Dann gilt

$$\begin{aligned} w \in \ker(T^*) &\Leftrightarrow T^* w = 0 \\ &\Leftrightarrow \langle v, T^* w \rangle_V = 0 \quad \forall v \in V \\ &\Leftrightarrow \langle Tv, w \rangle_W = 0 \quad \forall v \in V \\ &\Leftrightarrow w \in \text{im}(T)^\perp. \end{aligned}$$

Wir erhalten die zweite Aussage, indem wir die erste auf T^* anwenden.

(2) Wenden Sie die Operation $(\sim)^\perp$ auf die Gleichung in (1) an. □

15.9. Die Abbildungsmatrix der adjungierten Abbildung. Wir wollen nun Beispiel 15.8.5 verallgemeinern. Genauer wollen wir zeigen, dass die Darstellungsmatrix einer linearen Abbildung zwischen zwei IP-Räumen durch die adjunkte Matrix gegeben ist, wenn die gewählten Basen orthonormal sind.

Wir beginnen mit folgender Beobachtung:

Lemma 15.9.1. *Es seien $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle_V)$ und $(W, \langle \cdot, \cdot \rangle_W)$ IP-Räume über K , und es sei $T : V \rightarrow W$ linear. Es seien $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$, bzw. $\mathcal{C} = (w_1, \dots, w_m)$ orthonormale Basen von V , bzw. W , und es sei $A = (a_{ij})$ die Abbildungsmatrix von T . Dann gilt*

$$a_{ji} = \langle Tv_i, w_j \rangle_W.$$

Proof. Per Definition ist die i -te Spalte von A gegeben durch die Koeffizienten von Tv_i als Linearkombination der Basis \mathcal{C} , mit anderen Worten,

$$Tv_i = a_{1i}w_1 + \dots + a_{mi}w_m.$$

Doch da \mathcal{C} orthonormal ist, erhalten wir $a_{ji} = \langle Tv_i, w_j \rangle_W$. □

Satz 15.9.2. *Es seien $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle_V)$ und $(W, \langle \cdot, \cdot \rangle_W)$ IP-Räume über K , und es sei $T : V \rightarrow W$ linear. Es seien $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$, bzw. $\mathcal{C} = (w_1, \dots, w_m)$ orthonormale Basen von V , bzw. W . Dann gilt⁴⁹*

$$[T^*]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{C}} = \left(\overline{[T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}}} \right)^t = ([T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}})^*.$$

Proof. Es sei $A = (a_{ij}) = [T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}}$ und $B = (b_{ij}) = [T^*]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{C}}$. Wir wollen zeigen, dass

$$b_{ij} = \overline{a_{ji}} \quad \forall i, j.$$

Nun gilt

$$\begin{aligned} b_{ij} &= \langle T^*w_j, v_i \rangle \\ &= \overline{\langle v_i, T^*w_j \rangle} \\ &= \overline{\langle Tv_i, w_j \rangle} \\ &= \overline{a_{ji}}. \end{aligned}$$

□

Korollar 15.9.3. *Es sei $A \in M_{n \times m}(K)$ für $K = \mathbb{R}$ oder \mathbb{C} . Wir betrachten K^n und K^m als IP-Räume mit dem Standard-IP. Dann gilt*

$$(T_A)^* = T_{A^*}.$$

16. SPEKTRALTHEORIE

16.1. Normale Endomorphismen. Wir wollen uns nun mit der Frage beschäftigen, wie orthonormale Basen in der Theorie von Eigenvektoren zusammenhängen.

Definition 16.1.1. *Es sei $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ ein IP-Raum über K mit $K \in \{\mathbb{R}, \mathbb{C}\}$ und $T : V \rightarrow V$ eine lineare Abbildung. Dann ist T orthogonal diagonalisierbar, wenn V eine orthonormale Basis besitzt, die aus Eigenvektoren besteht.*

Beispiele 16.1.2. (1) Es sei $V = \mathbb{R}^2$ mit dem Standard-IP, $A = \begin{pmatrix} 3 & 1 \\ 1 & 3 \end{pmatrix}$ und $T_A : V \rightarrow V$ die dazugehörige lineare Abbildung. Dann sind die Eigenwerte die Wurzeln des Polynoms

$$\lambda^2 - 6\lambda + 8 = 0 \quad \Rightarrow \quad \lambda_{1,2} = 3 \pm 1,$$

das heißt $\lambda_1 = 2$ und $\lambda_2 = 4$. Wir berechnen die Eigenvektoren: $v_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$ und $v_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$. Die Vektoren v_1, v_2 sind orthogonal, d.h. nach der Normalisierung erhalten wir eine orthonormale Basis von Eigenvektoren von V .

⁴⁹Wenn $K = \mathbb{R}$, dann ist die komplexe Konjugation die Identität und daher die adjunkte Matrix gleich der transponierten Matrix.

(2) Wir betrachten wieder $V = \mathbb{R}^2$ mit dem Standard IP und $T_B : V \rightarrow V$ mit $B = \begin{pmatrix} 1 & -3 \\ 3 & 1 \end{pmatrix}$. Dann hat das charakteristische Polynom keine reellen Loesungen, d.h. T_B ist ueber \mathbb{R} nicht diagonalisierbar. Wie ist es ueber \mathbb{C} ? Die Eigenwerte sind gegeben durch $\lambda_{1,2} = 1 \pm 3i$ mit dazugehoerigen Eigenvektoren $w_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}$ und $w_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}$. Diese Vektoren sind orthogonal bezueglich des Standard IP auf \mathbb{C}^n , das heisst, T_B ist orthogonal diagonalisierbar.

Lemma 16.1.3. *Wenn T orthogonal diagonalisierbar ist, dann gilt $T \circ T^* = T^* \circ T$.*

Proof. Es sei \mathcal{B} eine orthonormale Basis von Eigenvektoren von V . Dann ist $[T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}$ diagonal. Aufgrund von Satz 15.9.2 gilt $[T^*]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = ([T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}})^*$, und diese Matrix ist ebenfalls diagonal. Doch alle diagonalen Matrizen kommutieren, das heisst

$$[T \circ T^*]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = [T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} \cdot [T^*]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = [T^*]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} \cdot [T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = [T^* \circ T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}$$

und daher (aufgrund von Bemerkung 4.4.4) gilt $T \circ T^* = T^* \circ T$. □

Beispiel 16.1.4. Es sei $B = \begin{pmatrix} 1 & -2 \\ 1 & 4 \end{pmatrix}$. Wir haben in Beispiel 12.1.3 (2) gesehen, dass B diagonalisierbar ist. Allerdings ist T_B nicht orthogonal diagonalisierbar, da

$$BB^* = \begin{pmatrix} 5 & -7 \\ -7 & 17 \end{pmatrix} \neq \begin{pmatrix} 2 & 2 \\ 2 & 20 \end{pmatrix} = B^*B.$$

(Wir haetten auch durch explizite Berechnung der Eigenvektoren ueberpruefen koennen, dass die Vektoren nicht orthonormal sind.)

Endomorphismen mit der Eigenschaft von Lemma 16.1.3 sind sehr wichtig; wir machen deshalb folgende Definition:

Definition 16.1.5. *Es sei $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ ein IP Raum ueber K mit $K \in \{\mathbb{R}, \mathbb{C}\}$. Eine lineare Abbildung $T : V \rightarrow V$ ist normal, wenn*

$$T \circ T^* = T^* \circ T.$$

Eine Matrix $A \in M_{n \times n}(K)$ ist normal, wenn $A \cdot A^* = A^* \cdot A$.

Bemerkung 16.1.6.

- (1) Jede orthogonale oder unitaere Matrix ist normal.
- (2) Die Matrix $A = \begin{pmatrix} i & i \\ i & 1 \end{pmatrix}$ ist nicht normal.
- (3) Wir haben in Lemma 16.1.3 gezeigt, dass jeder orthonormal diagonalisierbare Endomorphismus normal ist. Gilt die Umkehrung? Die Antwort ist nein: Wir haben in Beispiel 16.1.2 gesehen, dass T_B ueber \mathbb{R} nicht orthogonal diagonalisierbar ist, obwohl eine einfache Rechnung zeigt, dass $BB^t = B^tB$. Allerdings haben wir gesehen, dass T_B ueber \mathbb{C} orthogonal diagonalisierbar ist – ist der Grundkoerper das einzige Hindernis?

Folgendes Resultat ist ein Spezialfall der Korrespondenz zwischen Endomorphismen und Matrizen (Bemerkung 4.4.4):

Satz 16.1.7.

- (1) Wenn $T : V \rightarrow V$ normal ist, dann ist die Abbildungsmatrix $[T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}$ normal fuer jede orthonormale Basis \mathcal{B} von V .
- (2) Wenn $A \in M_{n \times n}(K)$ normal ist, dann ist die Abbildung $T_A : K^n \rightarrow K^n$ normal bez. des Standard IPs.

Proof. Einfache Konsequenz von Satz 15.9.2. (Uebung.) □

Wir untersuchen zunaechst, was wir ueber normale Endomorphismen auf IP Raeumen sagen koennen.

Beispiel 16.1.8. Es sei $A = \begin{pmatrix} 2i & i - 1i \\ i + 1 & i \end{pmatrix}$. Dann ist $A^* = \begin{pmatrix} -2i & 1 - i \\ -1 - i & -i \end{pmatrix}$, und eine einfache Rechnung zeigt, dass A (und daher T_A) normal ist. Was koennen wir ueber die Eigenwerte und Eigenvektoren sagen?

- A hat Eigenwerte $\lambda_1 = 0$ und $\lambda_2 = 3i$ mit Eigenvektoren $v_1 = \begin{pmatrix} 1 - i \\ 2i \end{pmatrix}$ und $v_2 = \begin{pmatrix} i + 1 \\ -1 \end{pmatrix}$;

- A^* hat Eigenwerte $\mu_1 = 0$ und $\mu_2 = -3i$ mit Eigenvektoren $w_1 = \begin{pmatrix} 1-i \\ 2i \end{pmatrix}$ und $w_2 = \begin{pmatrix} i+1 \\ -1 \end{pmatrix}$.

Was faellt Ihnen auf?

Lemma 16.1.9. *Es sei $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ ein IP Raum ueber K mit $K \in \{\mathbb{R}, \mathbb{C}\}$, und es sei $T : V \rightarrow V$ normal. Dann gilt*

- (1) $\|Tv\| = \|T^*v\|$ fuer alle $v \in V$;
- (2) der Operator $T - \lambda \mathbf{1}_V$ fuer $\lambda \in K$ ist ebenfalls normal;
- (3) wenn v ein Eigenvektor von T ist mit Eigenwert λ , dann ist v ein Eigenvektor von T^* mit Eigenwert $\bar{\lambda}$;
- (4) Es seien v_1, v_2 Eigenvektoren von T mit verschiedenen Eigenwerten. Dann gilt $v_1 \perp v_2$.

Proof. (1) Es gilt

$$\|Tv\|^2 = \langle Tv, Tv \rangle = \langle v, T^*Tv \rangle = \langle v, TT^*v \rangle = \overline{\langle TT^*v, v \rangle} = \overline{\langle T^*v, T^*v \rangle} = \langle T^*v, T^*v \rangle = \|T^*v\|^2.$$

(2) Explizite Rechnung.

(3) Wenn v ein Eigenvektor von T ist mit Eigenwert λ , dann gilt $(T - \lambda \mathbf{1}_V)v = 0$. Doch $T - \lambda \mathbf{1}_V$ ist normal aufgrund von (2), daher gilt

$$\|(T - \lambda \mathbf{1}_V)v\| = \|(T - \lambda \mathbf{1}_V)^*v\| = 0.$$

Doch $(T - \lambda \mathbf{1}_V)^* = T^* - \bar{\lambda} \mathbf{1}_V$, daher gilt

$$\|(T^* - \bar{\lambda} \mathbf{1}_V)v\| = 0 \quad \Rightarrow \quad (T^* - \bar{\lambda} \mathbf{1}_V)v = 0$$

und daher $T^*v = \bar{\lambda}v$.

(4) Es seien λ_1, λ_2 die Eigenwerte von v_1 und v_2 . Dann gilt

$$\lambda_1 \langle v_1, v_2 \rangle = \langle \lambda_1 v_1, v_2 \rangle = \langle Tv_1, v_2 \rangle = \langle v_1, T^*v_2 \rangle = \langle v_1, \bar{\lambda}_2 v_2 \rangle = \bar{\lambda}_2 \langle v_1, v_2 \rangle,$$

das heisst $(\lambda_1 - \bar{\lambda}_2) \langle v_1, v_2 \rangle = 0$. Da $\lambda_1 \neq \bar{\lambda}_2$, gilt $\langle v_1, v_2 \rangle = 0$. □

Wir koennen jetzt die Frage in Bemerkung 16.1.6 (2) beantworten:

Theorem 16.1.10 (Spektralsatz ueber \mathbb{C}). *Es sei $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ ein IP Raum ueber \mathbb{C} und $T : V \rightarrow V$ linear. Dann ist T genau dann orthogonal diagonalisierbar, wenn T normal ist.*

Proof. Dank Lemma 16.1.3 ist es ausreichend zu zeigen, dass ein normaler Operator ueber \mathbb{C} orthogonal diagonalisierbar ist. Es folgt von Theorem 14.1.2, dass es eine Basis $\mathcal{C} = (u_1, \dots, u_n)$ von V gibt, so dass $[T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{C}}$ in Jordanscher Normalenform ist. Indem wir das Gram-Schmidt Verfahren auf \mathcal{C} anwenden, erhalten wir eine orthonormale Basis $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$. Da

$$\text{LH}(u_1, \dots, u_i) = \text{LH}(v_1, \dots, v_i) \quad \forall 1 \leq i \leq n,$$

ist $[T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}$ ebenfalls eine obere Dreiecksmatrix. Schreibe $[T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = (a_{ij})_{1 \leq i, j \leq n}$; wir werden zeigen, dass diese Matrix diagonal ist, d.h. $a_{ij} = 0$ fuer alle $i < j$.

Da \mathcal{B} orthonormal ist, gilt

$$\|Tv_1\|^2 = |a_{11}|^2 \quad \text{und} \quad \|T^*v_1\|^2 = \sum_{k=1}^n |\overline{a_{1k}}|^2 = |a_{11}|^2 + |a_{12}|^2 + \dots + |a_{1n}|^2.$$

Doch T ist normal, und daher $\|Tv_1\| = \|T^*v_1\|$

$$\Rightarrow \quad a_{12} = \dots = a_{1n} = 0.$$

Wir wiederholen nun das Argument fuer $\|Tv_2\|^2$ usw. □

Bemerkung 16.1.11. *Die Annahme, dass wir ueber \mathbb{C} arbeiten, ist in dem Beweis von Theorem 16.1.10 nur deshalb wichtig, weil wir dadurch sicher sein koennen, dass eine Jordanbasis existiert.*

Korollar 16.1.12. *Es sei V ein endlich-dimensionaler IP Raum ueber \mathbb{R} und $T : V \rightarrow V$ ein normaler Operator. Wenn V eine Jordanbasis besitzt, dann ist T orthogonal diagonalisierbar.*

Korollar 16.1.13. *Es sei $A \in M_{n \times n}(\mathbb{C})$ normal. Dann gibt es eine unitaere Matrix $U \in \text{GL}_n(\mathbb{C})$, so dass $U^{-1}AU$ diagonal ist.*

Proof. Dank Satz 16.1.7 ist die Abbildung $T_A : \mathbb{C}^n \rightarrow \mathbb{C}^n$ orthogonal diagonalisierbar, das heisst, es gibt eine ON Basis von \mathbb{C}^n (bezuglich des Standard IPs), die aus Eigenvektoren besteht. Insbesondere ist $[T_A]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}$ diagonal. Um das Resultat zu beweisen, muessen wir daher zeigen, dass die Basiswechselform $U = [\text{id}_{\mathbb{C}^n}]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{E}}$ unitaer ist⁵⁰; hier ist \mathcal{E} die Standardbasis von \mathbb{C}^n , die ebenfalls orthonormal ist. Da $\text{id}_{\mathbb{C}^n}^* = \text{id}_{\mathbb{C}^n}$, folgt von Satz 15.9.2, dass

$$U^* = [\text{id}_V]_{\mathcal{E}}^{\mathcal{B}}.$$

Daher gilt

$$UU^* = [\text{id}_{\mathbb{C}^n}]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{E}}[\text{id}_V]_{\mathcal{E}}^{\mathcal{B}} = [\text{id}_{\mathbb{C}^n}]_{\mathcal{E}}^{\mathcal{E}} = \mathbf{1}_n,$$

und aehnlich, dass $U^*U = \mathbf{1}_n$. □

Lecture 39

16.2. Spektraltheorie ueber \mathbb{R} . Wir haben in Beispiel 16.1.2 (2) gesehen, dass nicht jeder normale Operator ueber einem reellen IP Raum orthogonal diagonalisierbar ist. Koennen wir ein Kriterium finden, fuer welche normalen Operatoren die Implikation wahr ist?

Lemma 16.2.1. *Es sei V ein IP Raum ueber \mathbb{R} und $T : V \rightarrow V$ orthogonal diagonalisierbar. Dann gilt $T^* = T$.*

Proof. Es sei \mathcal{B} eine orthonormale Basis von Eigenvektoren, d.h. $[T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}$ ist diagonal und daher $[T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = ([T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}})^t$. Doch dann gilt

$$[T^*]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = \left(\overline{[T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}} \right)^t = ([T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}})^t = [T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}$$

und daher $T^* = T$. □

Definition 16.2.2. *Es sei $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ ein IP Raum ueber K mit $K \in \{\mathbb{R}, \mathbb{C}\}$. Eine lineare Abbildung $T : V \rightarrow V$ ist selbst-adjungiert, wenn*

$$T = T^*.$$

Eine Matrix $A \in M_{n \times n}(K)$ ist selbstadjungiert, wenn $A^ = A$.⁵¹*

Folgendes Resultat ist das Analogon von Satz 16.1.7 fuer selbstadjungierte Matrizen:

Satz 16.2.3.

- (1) *Wenn $T : V \rightarrow V$ selbst-adjungiert ist, dann ist die Abbildungsmatrix $[T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}$ selbstadjungiert fuer jede orthonormale Basis \mathcal{B} von V .*
- (2) *Wenn $A \in M_{n \times n}(K)$ selbst-adjungiert ist, dann ist die Abbildung $T_A : K^n \rightarrow K^n$ selbst-adjungiert bez. des Standard IPs.*

Proof. Uebung. □

Bemerkung 16.2.4. *Jede selbstadjungierte lineare Abbildung $T : V \rightarrow V$ ist normal.*

Beispiele 16.2.5. (1) Es sei $A = \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix}$. Dann sind die Eigenwerte 3 und 1.

(2) Es sei $B = \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$. Dann sind die Eigenwerte -2 und 0 .

(3) Es sei $C = \begin{pmatrix} 3 & 2 \\ 2 & 3 \end{pmatrix}$. Dann sind die Eigenwerte 5 und 1.

Was faellt auf?

Satz 16.2.6. *Es sei $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ ein endlich-dimensionaler IP Raum ueber K , und es sei $T : V \rightarrow V$ ein selbstadjungierter Endomorphismus. Dann gilt*

- (1) *Die Eigenwerte von T sind reell.*
- (2) *Das charakteristische Polynom $\chi_T(x)$ zerfaellt ueber K in Linearfaktoren.*

Proof. (1) Es sei $\lambda \in K$ ein Eigenwert mit Eigenvektor v . Da jeder selbstadjungierte Operator normal ist, ist laut Lemma 16.1.9 v ein Eigenvektor von T^* mit Eigenwert $\bar{\lambda}$. Daher gilt

$$\lambda v = Tv = T^*v = \bar{\lambda}v$$

und daher $\lambda = \bar{\lambda}$, d.h. $\lambda \in \mathbb{R}$.

⁵⁰Dieses Resultat gilt ganz allgemein fuer die Basiswechselform zwischen zwei orthonormalen Basen.

⁵¹Wenn $K = \mathbb{C}$, dann ist selbstadjungiert das Gleiche wie hermitesch; wenn $K = \mathbb{R}$, dann ist selbstadjungiert das Gleiche wie symmetrisch.

(2) Nimm an, dass $K = \mathbb{R}$. Es sei \mathcal{B} eine orthonormale Basis von V und $A = [T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} \in M_{n \times n}(\mathbb{R})$, so dass $\chi_T(x) = \chi_A(x)$. Es folgt von Satz 16.2.3 (1), dass A selbstadjungiert ist.⁵²

Da wir Tensorprodukte noch nicht kennen, behelfen wir uns mit einem Trick. Betrachte den Vektorraum \mathbb{C}^n mit dem Standard IP und die lineare Abbildung $T_A : \mathbb{C}^n \rightarrow \mathbb{C}^n$; per Definition gilt $[T_A]_{\mathcal{E}}^{\mathcal{E}} = A$, wobei \mathcal{E} die Standard Basis von \mathbb{C}^n ist. Dann gilt $\chi_A(x) = \chi_{T_A}(x)$, und es folgt von dem fundamentalen Satz der Algebra, dass das Polynom $\chi_{T_A}(x) \in \mathbb{C}[x]$ in Linearfaktoren zerfaellt:

$$(55) \quad \chi_{T_A}(x) = \prod_{i=1}^n (\lambda_i - x),$$

wobei $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ die Eigenwerte von T_A sind.

Nun folgt von Satz 16.2.3 (2), dass T_A selbstadjungiert ist, und daher gilt $\lambda_1, \dots, \lambda_n \in \mathbb{R}$, das heisst, Gleichung (55) gilt ueber \mathbb{R} . \square

Als einfache Konsequenz erhalten wir folgendes Theorem:

Theorem 16.2.7. *Es sei $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ ein endlich-dimensionaler IP Raum ueber \mathbb{R} , und es sei $T : V \rightarrow V$ linear. Dann ist T genau dann orthogonal diagonalisierbar, wenn T selbst-adjungiert ist.*

Proof. Da das charakteristische Polynom in Linearfaktoren zerfaellt, folgt das Resultat mit dem gleichen Argument wie in dem Beweis von Theorem 16.1.10. \square

Dadurch, dass wir dieses Theorem mit Hilfe von Matrizen ausdruecken, erhalten wir (vergl. Korollar 16.1.13)

Korollar 16.2.8. *Wenn $A \in M_{n \times n}(\mathbb{R})$ selbstadjungiert (d.h. symmetrisch) ist, dann gibt es eine orthogonale Matrix $O \in GL_n(\mathbb{R})$, so dass $O^t A O$ diagonal ist.*

Proof. Uebung. \square

17. INTERLUDE: KOMPLEXIFIZIERUNG VON REELLEN VEKTORRAEUMEN

17.1. The aeussere direkte Summe zweier Vektorraeume. Es sei V ein Vektorraum ueber K , uns es seien U, W Unterraume mit $U \cap W = \{0_V\}$. Wir haben bereits gesehen, dass wir einen neuen Vektorraum $U \oplus W$ von V bilden koennen, dessen Dimension gleich $\dim U + \dim W$ ist. Die definierende Eigenschaft von $U \oplus W$ ist, dass sich jeder Vektor $v \in U \oplus W$ eindeutig als Summe $v = u + w$ mit $u \in U$ und $w \in W$ schreiben laesst. Mit anderen Worten, wir koennen v mit dem geordneten Paar (u, w) identifizieren. Diese Idee wollen wir abstrahieren.

Definition 17.1.1. *Es seien V, W Vektorraeume ueber K . Wir definieren die aeussere direkte Summe⁵³ $V \oplus W$ von V und W wie folgt: die Vektoren sind die geordneten Paare (v, w) mit $v \in V$ und $w \in W$. Mit den Operationen*

$$\begin{aligned} (v_1, w_1) + (v_2, w_2) &= (v_1 + v_2, w_1 + w_2) \\ \alpha \cdot (v, w) &= (\alpha v, \alpha w) \end{aligned}$$

erhaelt $V \oplus W$ die Struktur eines K -Vektorraums.

Beispiele 17.1.2.

- (1) Wir betrachten \mathbb{R} als einen 1-dimensionalen Vektorraum ueber sich selber. Dann ist $\mathbb{R} \oplus \mathbb{R}$ die Menge aller geordneten Paare (x, y) mit $x, y \in \mathbb{R}$. Die Abbildung $(x, y) \mapsto \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ ist ein kanonischer Isomorphismus $\mathbb{R} \oplus \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^2$.
- (2) Es sei V ein Vektorraum und $U, W \leq V$ mit $U \cap W = \{0_V\}$. Dann ist die aeussere direkte Summe von U und W isomorph zu der direkten Summe von U und W als ein Unterraum von V ; der Isomorphismus ist gegeben durch $(u, w) \mapsto u + w$.

⁵²Was wir gerne machen wuerden, ist, den reellen Vektorraum V zu einem Vektorraum V' ueber \mathbb{C} und T zu einem Endomorphismus $T' : V' \rightarrow V'$ zu 'erweitern'. Wenn wir dieses in einer Art und Weise tun koennten, ohne dass sich das charakteristische Polynom von T aendert, dann koennten wir Theorem 16.1.10 und Teil (1) dieses Satz anwenden. Eine solche 'Erweiterung' von V und T gibt es tatsaechlich: V' ist das *Tensorprodukt* von V ueber \mathbb{R} mit \mathbb{C} , geschrieben $V' = V \otimes_{\mathbb{R}} \mathbb{C}$. Koennen Sie erraten, wie V' und T' definiert sind?

⁵³Das Adjektiv *aeussere* bezieht sich darauf, dass a priori V und W keine Unterraume eines gemeinsamen Vektorraums sind.

Bemerkung 17.1.3. Wenn v_1, \dots, v_n eine Basis von V ist und w_1, \dots, w_m eine Basis von W , dann ist

$$(v_1, 0_W), \dots, (v_n, 0_W), (0_V, w_1), \dots, (0_V, w_m)$$

eine Basis von $V \oplus W$: die Dimension von $V \oplus W$ ist $n + m$.

Lemma 17.1.4. Sowohl V als auch W sind Unterräume von $V \oplus W$, durch Abbildungen auf die erste bzw. zweite Komponente.

18. ISOMETRIEN

18.1. Definition und erste Eigenschaften. Wir wollen uns nun mit einer anderen Klasse von linearen Abbildungen auf IP Räumen beschäftigen, nämlich mit solchen, unter denen sich der Abstand zwischen zwei Vektoren nicht ändert.

Definition 18.1.1. Es seien $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle_V)$, $(W, \langle \cdot, \cdot \rangle_W)$ IP Räume über K . Eine lineare Abbildung $T : V \rightarrow W$ ist eine Isometrie, wenn

$$(56) \quad \|Tv\|_W = \|v\|_V$$

für alle $v \in V$.⁵⁴

Beispiel 18.1.2. Es sei $V = \mathbb{R}^2$ mit dem Standard IP. Dann sind Rotationen um den Nullvektor und Reflektionen in einer Geraden durch 0_V lineare Isometrien. Hingegen ist die Verschiebung durch einen Vektor u (d.h. $v \mapsto u + v$) zwar eine Isometrie, aber für $u \neq 0_V$ keine lineare Isometrie. Ein schönes Beispiel für eine Funktion $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$, die die Gleichung (56) erfüllt, aber keine Isometrie ist, ist

$$f : \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \mapsto \begin{cases} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} & \text{wenn } x \geq 0 \\ \begin{pmatrix} x \\ -y \end{pmatrix} & \text{wenn } x < 0 \end{cases}$$

Bemerkung 18.1.3. Es sei T eine lineare Isometrie. Dann ist T injektiv: Wenn $Tv = 0$, dann gilt

$$\|v\| = \|Tv\| = 0 \quad \Rightarrow \quad v = 0_V.$$

Wir können eine lineare Isometrie auch mit Hilfe der IPs charakterisieren:

Lemma 18.1.4. Eine lineare Abbildung $T : V \rightarrow W$ ist genau dann eine Isometrie, wenn

$$(57) \quad \langle Tv_1, Tv_2 \rangle_W = \langle v_1, v_2 \rangle_V \quad \forall v_1, v_2 \in V.$$

Proof. Wir beweisen das Resultat in dem Fall $K = \mathbb{R}$; der komplexe Fall ist ähnlich. Wenn T eine Isometrie ist, dann gilt (Lemma 15.2.12)

$$\begin{aligned} \langle Tv_1, Tv_2 \rangle_W &= \frac{1}{2} (\|Tv_1 + Tv_2\| - \|Tv_1\| - \|Tv_2\|) \\ &= \frac{1}{2} (\|T(v_1 + v_2)\| - \|Tv_1\| - \|Tv_2\|) \\ &= \frac{1}{2} (\|v_1 + v_2\| - \|v_1\| - \|v_2\|) \\ &= \langle v_1, v_2 \rangle_V. \end{aligned}$$

□

Wir betrachten nun den Fall, dass $V = W$.

Satz 18.1.5. Es sei $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ ein IP Raum und $T : V \rightarrow V$ linear. Dann sind folgende Aussagen äquivalent:

- (1) T ist eine Isometrie;
- (2) es gibt eine ON Basis v_1, \dots, v_n von V , so dass Tv_1, \dots, Tv_n ebenfalls eine ON Basis ist;
- (3) für jede ON Basis v_1, \dots, v_n ist Tv_1, \dots, Tv_n ebenfalls eine ON Basis von V ;
- (4) $TT^* = \text{id}_V$;
- (5) $T^*T = \text{id}_V$;

⁵⁴Ganz allgemein ist eine Isometrie zwischen zwei metrischen Räumen eine Abbildung, die Distanzen bewahrt: das heißt, $f : V \rightarrow W$ ist eine Isometrie, wenn $\|f(u - v)\|_W = \|u - v\|_V$ für alle $u, v \in V$. Wenn die Abbildung linear ist, dann ist das äquivalent zu $\|f(v)\|_W = \|v\|_V$ für alle $v \in V$; in diesem Fall spricht man auch von einer *linearen Isometrie*.

(6) T^* ist eine Isometrie.

Proof. (1) \Rightarrow (2), (3): Es sei v_1, \dots, v_n eine ON Basis. Dann gilt aufgrund von Lemma 18.1.4, dass

$$\langle Tv_i, Tv_j \rangle_V = \langle v_i, v_j \rangle = \delta_{ij},$$

das heisst, die Tv_1, \dots, Tv_n sind ebenfalls orthonormal. Da sie die richtige Anzahl von Vektoren haben und linear unabhängig sind, sind sie eine Basis.

(3) \Rightarrow (4): fuer alle $1 \leq i, j \leq n$ gilt

$$\langle v_i, v_j \rangle = \langle v_i, T^*Tv_j \rangle,$$

und daher $\langle v, v_j \rangle = \langle v, T^*Tv_j \rangle$ fuer alle $v \in V$. Da das IP nicht degeneriert ist, folgt daraus, dass $v_j = T^*Tv_j$ fuer alle $1 \leq j \leq n$ und daher $T^*T = \mathbf{1}_V$.

Die restlichen Implikationen sind eine Uebung. \square

Satz 18.1.5 legt nahe, dass lineare Isometrien eng mit orthogonalen und unitaeren Matrizen zusammenhaengen:

Satz 18.1.6.

(1) Es sei $T : V \rightarrow V$ eine lineare Isometrie und \mathcal{B} eine ON Basis von V . Dann ist die Abbildungs-

$$\text{matrix } [T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} \begin{cases} \text{orthogonal} & \text{wenn } K = \mathbb{R} \\ \text{unitaer} & \text{wenn } K = \mathbb{C} \end{cases}.$$

(2) Es sei $A \in O(n)$ oder $U(n)$. Dann ist die Abbildung T_A eine lineare Isometrie bezueglich des Standard IPs auf K^n .

Proof. (1) Wenn T eine lineare Isometrie ist, dann gilt laut Satz 18.1.5 $TT^* = T^*T = \text{id}_V$, das heisst

$$[T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}[T^*]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = \mathbf{1}_n.$$

Doch da \mathcal{B} orthonormal ist, gilt $[T^*]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = ([T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}})^*$ (Satz 15.9.2), und daher ist $[T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}$ orthogonal fuer $K = \mathbb{R}$ und unitaer fuer $K = \mathbb{C}$.

(2) ist eine Uebung. \square

Beachte 18.1.7.

(1) $\forall A \in O(n)$ gilt $\det(A) = \pm 1$.

(2) $\forall B \in U(n)$ gilt $|\det(B)| = 1$.

Lemma 18.1.8. Die Untermenge

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

ist eine Untergruppe von $O(n)$; wir nennen sie die speziellen orthogonalen Matrizen. Ebenso ist die Untermenge

$$SU(n) = \{B \in U(n) \mid \det(B) = 1\}$$

eine Untergruppe von $U(n)$.

18.2. Klassifikation der Elemente in $O(2)$ und in $SO(3)$. Wir beginnen mit folgenden elementaren Beobachtungen:

Lemma 18.2.1. Es sei $A \in O(n)$. Wenn λ ein Eigenwert von A ist, dann gilt $\lambda \in \{\pm 1\}$.

Proof. Nimm an, dass $Av = \lambda v$ fuer $v \in \mathbb{R}^n$, $v \neq 0_V$. Wenn $\langle \cdot, \cdot \rangle$ das Standard IP auf \mathbb{R}^n ist, dann gilt

$$\langle v, v \rangle = \langle Av, Av \rangle = \langle \lambda v, \lambda v \rangle = \lambda^2 \langle v, v \rangle.$$

Da $v \neq_V$ folgt, dass $\lambda^2 = 1$. \square

Lemma 18.2.2. Es sei $v \in \mathbb{R}^2$ mit $\|v\| = 1$ (beueglich der Norm des Standard IPs). Dann gibt es $\theta \in [0, 2\pi)$, so dass

$$v = \begin{pmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{pmatrix}.$$

Satz 18.2.3. Es sei $A \in O(2)$.

(1) Wenn $\det(A) = 1$, dann gibt es $\theta \in [0, 2\pi)$ so dass

$$A = R_\theta = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}.$$

Die Abbildung $T_A : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ ist die Rotation gegen den Uhrzeigersinn um den Winkel θ .

(2) Wenn $\det(A) = -1$, dann gibt es eine Basis $\mathcal{B} = (v_1, v_2)$ von \mathbb{R}^2 , so dass

$$[T_A]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} :$$

T_A beschreibt die Reflektion in der Geraden $\ell = \text{LH}(v_1)$. Weiterhin gibt es $\theta \in [0, 2\pi)$, so dass

$$A = R_\theta \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

Explizit ist die Basis \mathcal{B} gegeben durch

$$v_1 = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad v_2 = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\theta+\pi}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{\theta+\pi}{2}\right) \end{pmatrix}.$$

Proof. (1) Schreibe $A = (u_1, u_2)$ mit $u_i \in \mathbb{R}^2$. Dann gilt $\|u_1\| = 1$, und es gilt $u_1 = \begin{pmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{pmatrix}$ aufgrund von Lemma 18.2.2. Weiterhin gilt $\|u_2\| = 1$ und $u_1 \perp u_2$. Aber eine einfache Rechnung zeigt, dass

$$\begin{pmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{pmatrix}^\perp = \text{LH} \left(\begin{pmatrix} \cos\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \\ \sin\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \end{pmatrix} \right) = \text{LH} \begin{pmatrix} -\sin(\theta) \\ \cos(\theta) \end{pmatrix}.$$

Aber $\text{LH} \begin{pmatrix} -\sin(\theta) \\ \cos(\theta) \end{pmatrix}$ enthält genau zwei Elemente mit Norm 1, naemlich

$$u'_2 = \begin{pmatrix} -\sin(\theta) \\ \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad u''_2 = \begin{pmatrix} \sin(\theta) \\ -\cos(\theta) \end{pmatrix}.$$

Wenn $u_2 = u'_2$, dann ist

$$A = R_\theta = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

und $\det(A) = 1$.

Wenn $u_2 = u''_2$, dann ist

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

und $\det(A) = -1$. In diesem Fall zeigt eine einfache Rechnung, dass

$$v_1 = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad v_2 = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\theta+\pi}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{\theta+\pi}{2}\right) \end{pmatrix}$$

Eigenvektoren von A sind mit jeweiligen Eigenwerten $+1$ und -1 . □

Korollar 18.2.4. *Es sei V ein 2-dimensionaler Euklidischer Raum und $T : V \rightarrow V$ eine lineare Isometrie. Wenn $\det(T) = -1$, dann existiert eine ON Basis \mathcal{B} von V , so dass*

$$[T]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} 1 & \\ & -1 \end{pmatrix}.$$

Proof. Es sei \mathcal{C} eine ON Basis von V . Dann ist $[T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{C}} \in O(2)$. Laut Satz 18.1.6 (2) hat $[T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{C}}$ (und daher T) Eigenwerte ± 1 , und die normalisierten Eigenvektoren bilden eine ON Basis von V . □

Betrachten wir nun $SO(3)$:

Satz 18.2.5. *Es sei $A \in SO(3)$. Dann ist 1 ein Eigenwert von A . Weiterhin gibt es eine orthonormale Basis $\mathcal{B} = (v_1, v_2, v_3)$ und $\theta \in [0, 2\pi)$, so dass⁵⁵*

$$[T_A]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} 1 & & \\ & 0_{1 \times 2} & \\ & & R_\theta \end{pmatrix}.$$

Weiterhin gilt:

⁵⁵Geometrisch gesehen ist T_A Rotation mit Winkel θ um die Axe $\text{LH}(v_1)$.

(1) Wenn -1 ein Eigenwert von A ist, dann ist $\theta = \pi$ und daher

$$[T_A]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

(2) Wenn -1 kein Eigenwert von A ist, dann ist $\theta \neq \pi$.

Proof. Das charakteristische Polynom $\chi_A(x) \in \mathbb{R}[x]$ hat Grad 3 und daher mindestens eine reelle Wurzel $\lambda = \pm 1$. Es sei $v_1 \in \mathbb{R}^3$ ein dazugehöriger Eigenvektor mit $\|v_1\| = 1$. Betrachte das orthogonale Komplement $U = v_1^\perp$, so dass $\mathbb{R}^3 = \text{LH}(v_1) \oplus U$. Da A orthogonal ist, gilt $T_A(U) \subseteq U$.

Nun ist $(T_A)|_U : U \rightarrow U$ eine lineare Isometrie. Es sei \mathcal{C} eine ON Basis von U ; dann ist laut Satz 18.1.6 die Abbildungsmatrix $[(T_A)|_U]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{C}}$ orthogonal, d.h ein Element von $O(2)$. Es sei $\mathcal{B} = (v_1, w_1, w_2)$. Wir unterscheiden nun zwei Fälle:

(1) Falls $\lambda = +1$, dann ist die Abbildungsmatrix von T_A bezüglich der Basis \mathcal{B} gegeben durch

$$[T_A]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} 1 & & 0_{1 \times 2} \\ & 0_{2 \times 1} & B \end{pmatrix},$$

mit $\det(B) = 1$. Es folgt daher von Satz ??, dass $\exists \theta \in [0, 2\pi)$, so dass $B = R_\theta$.

(2) Falls $\lambda = -1$, dann gilt

$$[T_A]_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} -1 & & 0_{1 \times 2} \\ & 0_{2 \times 1} & B \end{pmatrix}$$

mit $\det(B) = -1$. Laut Korollary 18.2.4 hat $(T_A)|_U$ Eigenwerte ± 1 mit Eigenvektoren v_2, v_3 . Wenn wir v_2, v_3 normieren, dann ist $\mathcal{B}' = (v_1, v_2, v_3)$ eine ON Basis mit

$$[T_A]_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}'} = \begin{pmatrix} -1 & & \\ & 1 & \\ & & -1 \end{pmatrix}.$$

□

18.3. Klassifikation der Elemente in $U(2)$. (von Chengshang Liu)

Satz 18.3.1. Jede unitäre Matrix in $U(2)$ besitzt die folgende Form:

$$\begin{pmatrix} a & b \\ \bar{b}e^{i\theta} & -\bar{a}e^{i\theta} \end{pmatrix}$$

wobei $a, b \in \mathbb{C}$ mit $a\bar{a} + b\bar{b} = 1$ gilt.

Proof. Für jeder unitären Matrix $A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in U(2)$ gilt:

$$AA^* = \mathbf{1}_2 \quad \text{und} \quad A^*A = \mathbf{1}_2$$

das heisst

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

Daraus folgt:

$$(58) \quad a\bar{a} + b\bar{b} = 1$$

$$(59) \quad c\bar{c} + d\bar{d} = 1$$

$$(60) \quad a\bar{c} + b\bar{d} = 0$$

$$(61) \quad \bar{a}c + \bar{b}d = 0$$

Analog für $A^*A = \mathbf{1}_2$ gilt

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

woraus folgt, dass

$$(62) \quad a\bar{a} + c\bar{c} = 1$$

$$(63) \quad b\bar{b} + d\bar{d} = 1$$

Aus den Gleichungen (58) und (62) zusammen folgt: $b\bar{b} = c\bar{c} \Rightarrow |b| = |c|$. Und aus den Gleichungen (58) und (63) folgt: $a\bar{a} = d\bar{d} \Rightarrow |a| = |d|$. Sei $c = x \cdot e^{i\theta}$ und $d = y \cdot e^{i\phi}$ mit $x, y \in \mathbb{C}, |x| = |b|, |y| = |c|$. Es

wird mit einer Zahl auf dem Einheitskreis multipliziert, um den Betrag nicht zu verändern. Eingesetzt in Gleichung (3) ergibt sich:

$$a \cdot \bar{x}e^{-i\theta} + b \cdot \bar{y} \cdot e^{-i\phi} = 0.$$

Da a und b beliebig (unter Voraussetzung der Bedingung $a\bar{a} + b\bar{b} = 1$) gewählt werden können, folgt: $\bar{x} = b$ und $\bar{y} = a$ sowie $e^{-i\theta} = -e^{-i\phi} \Rightarrow e^{i\phi} = -e^{i\theta}$. Daraus ergibt sich

$$c = \bar{b} \cdot e^{i\theta} \quad \text{and} \quad d = -\bar{a} \cdot e^{i\theta}.$$

Zum Schluss kommen wir auf das Ergebnis:

$$\begin{pmatrix} a & b \\ \bar{b}e^{i\theta} & -\bar{a}e^{i\theta} \end{pmatrix},$$

was zu beweisen war. □

19. TENSORPRODUKTE VON VEKTORRAEUMEN

19.1. The aeussere direkte Summe zweier Vektorraeume. Es sei V ein Vektorraum ueber K , uns es seien U, W Unterraume mit $U \cap W = \{0_V\}$. Wir haben bereits gesehen, dass wir einen neuen Vektorraum $U \oplus W$ von V bilden koennen, dessem Dimension gleich $\dim U + \dim W$ ist. Die definierende Eigenschaft von $U \oplus W$ ist, dass sich jeder Vektor $v \in U \oplus W$ eindeutig als Summe $v = u + w$ mit $u \in U$ und $w \in W$ schreiben laesst. Mit anderen Worten, wir koennen v mit dem geordneten Paar (u, w) identifizieren. Diese Idee wollen wir abstrahieren.

Definition 19.1.1. *Es seien V, W Vektorraeume ueber K . Wir definieren die aeussere direkte Summe⁵⁶ $V \oplus W$ von V und W wie folgt: die Vektoren sind die geordneten Paare (v, w) mit $v \in V$ und $w \in W$. Mit den Operationen*

$$\begin{aligned} (v_1, w_1) + (v_2, w_2) &= (v_1 + v_2, w_1 + w_2) \\ \alpha \cdot (v, w) &= (\alpha v, \alpha w) \end{aligned}$$

erhaelt $V \oplus W$ die Struktur eines K -Vektorraums.

Beispiele 19.1.2.

- (1) Wir betrachten \mathbb{R} als einen 1-dimensionalen Vektorraum ueber sich selber. Dann ist $\mathbb{R} \oplus \mathbb{R}$ die Menge aller geordneten Paare (x, y) mit $x, y \in \mathbb{R}$. Die Abbildung $(x, y) \mapsto \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ ist ein kanonischer Isomorphismus $\mathbb{R} \oplus \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^2$.
- (2) Es sei V ein Vektorraum und $U, W \leq V$ mit $U \cap W = \{0_V\}$. Dann ist die aeussere direkte Summe von U und W isomorph zu der direkten Summe von U und W als ein Unterraum von V ; der Isomorphismus ist gegeben durch $(u, w) \mapsto u + w$.

Bemerkung 19.1.3. *Wenn v_1, \dots, v_n eine Basis von V ist und w_1, \dots, w_m eine Basis von W , dann ist*

$$(v_1, 0_W), \dots, (v_n, 0_W), (0_V, w_1), \dots, ((0_V, w_m)$$

eine Basis von $V \oplus W$: die Dimension von $V \oplus W$ ist $n + m$.

Lemma 19.1.4. *Die Abbildungen*

$$\begin{aligned} \iota_V : V &\rightarrow V \oplus W & v &\mapsto v \oplus 0_W \\ \iota_W : W &\rightarrow V \oplus W & w &\mapsto 0_V \oplus w \end{aligned}$$

identifizieren V (bzw. W) mit Unterraemen von $V \oplus W$, das heisst, die Abbildungen ι_V und ι_W sind Injektionen. Weiterhin gilt

$$\text{im}(\iota_V) \cap \text{im}(\iota_W) = \{0_V \oplus 0_W\},$$

und die natuerliche Abbildung

$$\iota_V \oplus \iota_W : V \oplus W \rightarrow \iota_V(V) \oplus \iota_W(W)$$

ist ein kanonischer Isomorphismus, d.h. sie identifiziert die aeussere direkte Summe von V und W mit der direkten Summe der Unterraeme $\iota_V(V)$ und $\iota_W(W)$.

⁵⁶Das Adjektiv *aeussere* bezieht sich darauf, dass a priori V und W keine Unterraeme eines gemeinsamen Vektorraums sind.

19.2. Komplexifizierung. Es sei V ein reeller Vektorraum. Wir moechten V zu einem Vektorraum ueber \mathbb{C} 'erweitern', das heisst, wir moechten dem Skalarprodukt $(a + bi)v$ fuer $a + bi \in \mathbb{C}$, $v \in V$ einen Sinn zuordnen.

Beachte 19.2.1. Was auch immer $(a + bi)v$ sein mag, es soll die Gleichung $(a + bi)v = (a.v) + i(b.v)$ erfuehlen. Da i.w fuer $w \in V$ zunaechst keinen Sinn ergibt, interpretieren wir $(a + bi)v$ als das geordnete Paar $(a.v, b.v) \in V \oplus V$.

Definition 19.2.2. Es sei V ein Vektorraum ueber \mathbb{R} . Die Komplexifizierung $V_{\mathbb{C}}$ von V ist der \mathbb{C} -Vektorraum $V \oplus V$ mit der Skalarmultiplikation⁵⁷

$$(a + bi)(u, v) = (a.u - b.v, b.u + a.v).$$

Bemerkung 19.2.3.

- (1) Insbesondere gilt $i.(u, v) = ((-v), u)$.
- (2) Wir betrachten V als einen reellen Unterraum von $V_{\mathbb{C}}$ mit Hilfe der Abbildung $\iota : v \mapsto (v, 0_V)$.

Beispiel 19.2.4. Es sei $V = \mathbb{R}$. Dann ist $V_{\mathbb{C}}$ die Menge der paar $(x, y) \in \mathbb{R} \oplus \mathbb{R}$ mit

$$(a + bi).(x, y) = (ax - by, bx + ay).$$

Da $(a + bi)(x + iy) = (ax - by) + i(bx + ay)$, ist $V_{\mathbb{C}}$ kanonisch isomorph zu \mathbb{C} .

Beispiel 19.2.5. Aehnlich koennen wir zeigen, dass $(\mathbb{R}^n)_{\mathbb{C}} \cong \mathbb{C}^n$.

Satz 19.2.6. Wenn $V = \{0\}$, dann ist $V_{\mathbb{C}} = \{0\}$. Wenn $V \neq \{0\}$ und $\mathcal{B} = \{v_1, \dots, v_n\}$ ist einen Basis von V , dann ist

$$\mathcal{B}_{\mathbb{C}} = \{(v_1, 0_V), (v_2, 0_V), \dots, (v_n, 0_V)\}$$

eine \mathbb{C} -Basis von $V_{\mathbb{C}}$. Insbesondere ist $\dim_{\mathbb{C}} V_{\mathbb{C}} = \dim_{\mathbb{R}} V$.

Proof. Bei Definition kann jedes Element in $V_{\mathbb{C}}$ als eine \mathbb{R} -lineare Kombination der Vektoren $\{(v_j, 0_V) : 1 \leq j \leq n\}$ und $\{(0_V, v_j) : 1 \leq j \leq n\}$ geschrieben werden. Da

$$(0_V, v_j) = i.(v_j, 0_V),$$

kann jedes Element von $v_{\mathbb{C}}$ als \mathbb{C} -lineare Kombination der $\{(v_j, 0_V) : 1 \leq j \leq n\}$ geschrieben werden; sie sind daher ein Erzeugendensystem. Um zu zeigen, dass die Vektoren lienar unabhängig sind, nimm an, dass es Skalare $a_j + ib_j \in \mathbb{C}$ fuer $1 \leq j \leq n$ gibt, so dass

$$\begin{aligned} (a_1 + ib_1)(v_1, 0_V) + \dots + (a_n + ib_n)(v_n, 0_V) &= (0_V, 0_V) \\ \Leftrightarrow (a_1 v_1 + \dots + a_n v_n, b_1 v_1 + \dots + b_n v_n) &= (0_V, 0_V), \end{aligned}$$

mit anderen Worten $\sum_{j=1}^n a_j v_j = 0_V$ und $\sum_{j=1}^n b_j v_j = 0_V$. Doch da die $\{v_j\}$ linear unabhängig ueber \mathbb{R} sind, folgt, dass $a_j = b_j = 0$ fuer alle $1 \leq j \leq n$. \square

Bemerkung 19.2.7. Eine \mathbb{R} -Basis von $V_{\mathbb{C}}$ is gegeben durch

$$\{(v_1, 0_V), (v_2, 0_V), \dots, (v_n \oplus 0_V), (0_V, v_1), \dots, (0_V, v_n)\},$$

mit anderen Worten $\dim_{\mathbb{R}} V_{\mathbb{C}} = 2n$.

Ebenso, wir wir einen reellen Vektorraum komplexifizieren koennen, koennen wir ebenfalls eine lineare Abbildung zwischen zwei reellen Vektorraeumen komplexifizieren:

Theorem 19.2.8. Es seien V, W reelle Vektorraeume und $T : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung. Dann gibt es genau eine \mathbb{C} -lineare Abbildung $T_{\mathbb{C}} : V_{\mathbb{C}} \rightarrow W_{\mathbb{C}}$, so dass folgendes Diagramm kommutiert:

$$\begin{array}{ccc} V & \xrightarrow{T} & W \\ \downarrow \iota & & \downarrow \iota \\ V_{\mathbb{C}} & \longrightarrow & W_{\mathbb{C}} \end{array}$$

⁵⁷Wir koennen ueberpruefen, dass dieses die Axiome eines Vektorraums erfuehlt.

Proof. Definiere $T_{\mathbb{C}}(u, v) = (Tu, Tv)$. Per Definition ist diese Abbildung \mathbb{R} -linear; wir müssen daher nur zeigen, dass

$$i.T_{\mathbb{C}}(u, v) = T_{\mathbb{C}}(i.(u, v)).$$

Doch das ist eine einfache Übung.

Nimm nun an, dass wir eine weitere \mathbb{C} -lineare Abbildung $V_{\mathbb{C}} \rightarrow W_{\mathbb{C}}$ haben, die die Bedingungen erfüllt. Dann folgt von der Kommutativität des Diagramms, dass $S(u, 0_V) = (Tu, 0_W)$. Daher gilt

$$\begin{aligned} S(u, v) &= S(u, 0_V) + S(0_V, v) \\ &= (Tu, 0_W) + S(i.(v, 0_V)) \\ &= (Tu, 0_W) + i.S(v, 0_V) \\ &= (Tu, 0_W) + i.(Tv, 0_W) \\ &= (Tu, 0_W) + (0_W, Tv) \\ &= (Tu, Tv) \\ &= T_{\mathbb{C}}(u, v). \end{aligned}$$

□

Lemma 19.2.9. *Es seien V, W reelle Vektorräume mit Basen \mathcal{B} und \mathcal{C} und $T : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung. Dann ist*

$$[T_{\mathbb{C}}]_{\mathcal{C}_{\mathbb{C}}}^{\mathcal{B}_{\mathbb{C}}} = [T]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}}.$$

Insbesondere gilt $\chi_T(x) = \chi_{T_{\mathbb{C}}}(x)$.

Beispiel 19.2.10. Es sei $V = \mathbb{R}^n$, $A \in M_{n \times n}(\mathbb{R})$ und $T_A : V \rightarrow V$ die assoziierte lineare Abbildung, die durch linke Multiplikation von Spaltenvektoren in V mit A gegeben ist. Dann ist $(T_A)_{\mathbb{C}} : \mathbb{C}^n \rightarrow \mathbb{C}^n$ ebenfalls die Abbildung, die durch linke Multiplikation von Spaltenvektoren in $V_{\mathbb{C}}$ mit A gegeben ist. Mit anderen Worten, wir betrachten A einfach als eine Matrix in $M_{n \times n}(\mathbb{C})$.

Bemerkung 19.2.11. *Wir werden später sehen, dass die Komplexifizierung eines reellen Vektorraums ein Spezialfall vom Tensorprodukt ist.*

19.3. Vektorräume über einer freien Menge.

Definition 19.3.1. *Es sei S eine (endliche oder unendliche) Menge und K ein Körper. Der von S erzeugte K -Vektorraum $K(S)$ ist definiert wie folgt:*

- Die Elemente von $K(S)$ sind formale Summen

$$v = \sum_{s \in S} \alpha_s \cdot s,$$

wobei nur für endlich viele Element $\alpha_s \neq 0$;

- Vektoraddition ist definiert als

$$\sum_{s \in S} \alpha_s \cdot s + \sum_{s \in S} \beta_s \cdot s = \sum_{s \in S} (\alpha_s + \beta_s) \cdot s;$$

- Skalar Multiplikation ist definiert als

$$\beta \left(\sum_{s \in S} \alpha_s \cdot s \right) = \sum_{s \in S} (\beta \alpha_s) \cdot s.$$

Bemerkung 19.3.2.

- (1) Wenn S endlich ist, dann ist die Dimension von $K(S)$ gleich $|S|$, und $\{s \in S\}$ ist eine Basis von $K(S)$.
- (2) S kann hier jede beliebige Menge sein.

Beispiel 19.3.3. Es sei $S = \{1, x, x^2, \dots, x^k\}$. Dann ist $K(S) = K[x]^{\leq k}$.

19.4. Konstruktion des Tensorprodukts. Wir koennen nun das Tensorprodukt von zwei endlich-dimensionalen Vektorraeumen definieren.

Definition 19.4.1. *Es seien V und W endlich-dimensionale Vektorraeume ueber K , mit jeweiligen Basen v_1, \dots, v_n und w_1, \dots, w_m . Es sei S die Menge aller Symbole*

$$S = \{v_i \otimes w_j : 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m\}.$$

Wir definieren das Tensorprodukt $V \otimes_K W$ als den Vektorraum $K(S)$. Mit anderen Worten, die Elemente von $V \otimes_K W$ sind Linearkombinationen der Form

$$\sum_{i,j} a_{ij} \cdot v_i \otimes w_j \quad \text{mit } a_{ij} \in K.$$

Bemerkung 19.4.2. *Es ist offensichtlich von der Definition, dass $\dim_K V \otimes_K W = mn$.*

Beispiele 19.4.3. (1) Es gilt $K \otimes_K K \cong K$: eine Basis fuer K ist gegeben durch $1 \otimes 1$ (zum Beispiel), und die lineare Abbildung

$$K \rightarrow K \otimes_K K, \quad x \mapsto x \cdot (1 \otimes 1)$$

ist ein Isomorphismus von K -Vektorraeumen.

(2) Es sei V ein n -dimensionaler \mathbb{R} -Vektorraum mit Basis v_1, \dots, v_n . Betrachte \mathbb{C} als einen \mathbb{R} -Vektorraum mit Basis $1, i$. Dann ist $V \otimes_{\mathbb{R}} \mathbb{C}$ ein $2n$ -dimensionaler \mathbb{R} -Vektorraum mit Basis

$$v_1 \otimes 1, \dots, v_n \otimes 1, v_1 \otimes i, \dots, v_n \otimes i.$$

Faellt Ihnen etwas auf?⁵⁸

Beachte 19.4.4. *Wir koennen eine Abbildung*

$$\otimes : V \times W \rightarrow V \otimes_K W$$

folgendermassen definieren: fuer $v = \sum_i a_i v_i$ und $w = \sum_j b_j w_j$ definieren wir

$$v \otimes w = \sum_{i,j} a_i b_j \cdot (v_i \otimes w_j).$$

Was koennen wir ueber diese Abbildung sagen?

(1) \otimes ist surjektiv;

(2) \otimes ist bilinear:

- $\forall v_1, v_2 \in V$ und $\forall w_1, w_2 \in W$ gilt

$$(v_1 + v_2) \otimes w = v_1 \otimes w + v_2 \otimes w \quad \text{und} \quad v \otimes (w_1 + w_2) = v \otimes w_1 + v \otimes w_2;$$

- fuer alle $\alpha \in K$, $v \in V$ und $w \in W$ gilt⁵⁹

$$(\alpha v) \otimes w = v \otimes (\alpha w) = \alpha \cdot v \otimes w.$$

Die Definition 19.4.1 ist etwas unbefriedigend, weil sie von der Wahl von Basen der beiden Vektorraeume V und W abhaengt. Wir werden mit Hilfe des *universelle Eigenschaft* des Tensorproduktes zeigen, dass die Definition unabhaengig von der Wahl der Basen ist. Wir erinnern uns zunaechst an die Definition einer bilinearen Abbildung:

Definition 19.4.5. *Es seien V, W, X K -Vektorraeume. Eine Abbildung $\Phi : V \times W \rightarrow X$ ist bilinear, wenn folgende Bedingungen erfuellt sind:*

(1) $\Phi(\alpha v_1 + \beta v_2, w) = \alpha \Phi(v_1, w) + \beta \Phi(v_2, w)$;

(2) $\Phi(v, \alpha w_1 + \beta w_2) = \alpha \Phi(v, w_1) + \beta \Phi(v, w_2)$.

Satz 19.4.6. *Es seien U, V, W K -Vektorraeume, und v_1, \dots, v_n und w_1, \dots, w_m jeweilige Basen von V und W . Es sei $\Phi : V \times W \rightarrow U$ eine bilineare Abbildung. Dann gibt es genau eine lineare Abbildung*

$$\phi : V \otimes W \rightarrow U,$$

⁵⁸Vergl. Bemerkung 19.2.7.

⁵⁹Ich stelle mir das Tensorsymbol \otimes als eine Art Sperrre vor, durch die sich nur Elemente von K von der einen auf die andere Seite schieben lassen, aber keine Vektoren.

so dass das folgende Diagramm kommutiert:

$$\begin{array}{ccc} V \times W & \xrightarrow{\Phi} & U \\ \downarrow \otimes & \nearrow \varrho & \\ V \otimes W & & \end{array}$$

Proof. Wir definieren die lineare Abbildung ϕ durch

$$\phi \left(\sum_{i,j} c_{ij} \cdot (v_i \otimes w_j) \right) = \sum_{i,j} c_{ij} \Phi(v_i \otimes w_j).$$

Wir prüfen, dass das Diagramm kommutiert: da sowohl Φ und $\phi \circ \otimes$ bilinear sind, reicht es zu zeigen, dass

$$\Phi(v_i, w_j) = \Phi(v_i \otimes w_j).$$

Doch das ist offensichtlich.

Da eine lineare Abbildung durch die Bilder einer Basis eindeutig festgelegt ist, ist ϕ eindeutig definiert. \square

Wir können nun zeigen, dass Definition 19.4.1 unabhängig von der Wahl der Basen von V und W ist.

Lemma 19.4.7. *Es sei X ein K -Vektorraum mit einer linearen Abbildung $\tau : V \times W \rightarrow X$, der (statt $V \otimes W$) auch die universelle Eigenschaft in Satz 19.4.6 erfüllt. Dann ist X kanonisch isomorph zu $V \otimes W$.*

Proof. Wir benutzen zunächst die universelle Eigenschaft von $V \otimes W$ und wenden sie auf $U = X$ an: dann erhalten wir von Satz 19.4.6 das kommutative Diagramm

$$\begin{array}{ccc} V \times W & \xrightarrow{\tau} & X \\ \downarrow \otimes & \nearrow \varrho & \\ V \otimes W & & \end{array}$$

Wenn wir hingegen die universelle Eigenschaft von X betrachten und auf $U = V \otimes W$ anwenden, erhalten wir ein kommutatives Diagramm

$$\begin{array}{ccc} V \times W & \xrightarrow{\otimes} & V \otimes W \\ \downarrow \tau & \nearrow \tilde{\varrho} & \\ X & & \end{array}$$

Insbesondere erhalten wir also Abbildungen

$$\phi : V \otimes W \rightarrow X \quad \text{und} \quad \tilde{\phi} : X \rightarrow V \otimes W.$$

Ich behaupte, dass ϕ ein Isomorphismus ist, mit $\phi^{-1} = \tilde{\phi}$. Wir betrachten zunächst die Abbildung $\tilde{\phi} \circ \phi$, durch die das Diagramm

$$\begin{array}{ccc} V \times W & \xrightarrow{\otimes} & V \otimes W \\ \downarrow \tau & \nearrow \tilde{\phi} \circ \phi & \\ V \otimes W & & \end{array}$$

kommutiert. Aber die Identitätsabbildung $\mathbf{1}_{V \otimes W}$ (statt $\tilde{\phi} \circ \phi$) lässt dieses Diagramm ebenfalls kommutieren. Aufgrund der Eindeutigkeit in der universellen Eigenschaft folgt daher $\tilde{\phi} \circ \phi = \mathbf{1}_{V \otimes W}$. Ebenso zeigen wir, dass $\phi \circ \tilde{\phi} = \mathbf{1}_X$. Das Resultat folgt. \square

Als direkte Konsequenz erhalten wir folgenden Satz:

Satz 19.4.8. Die Definition 19.4.1 ist unabhängig von der Wahl der Basen.

Bemerkung 19.4.9. Alternativ kann man $V \otimes W$ auch folgendermassen definieren: betrachte den (riesigen) Vektorraum $K(V \times W)$. Es sei

$$(64) \quad R = \left\{ \begin{array}{l} \{(v_1 + v_2, w) - (v_1, w) - (v_2, w) : v_1, v_2 \in V, w \in W\} \\ \cup \{(v, w_1 + w_2) - (v, w_1) - (v, w_2) : v \in V, w_1, w_2 \in W\} \\ \cup \{(\alpha v, w) - \alpha(v, w) : \alpha \in K, v \in V, w \in W\} \\ \cup \{(v, \alpha w) - \alpha(v, w) : \alpha \in K, v \in V, w \in W\} \end{array} \right\}$$

und $X = \text{LH}(R) \leq K(V \otimes W)$. Definiere $V \otimes KW$ als den Quotientenraum

$$V \otimes KW = K(V \otimes W)/X.$$

Diese Definition hat den Vorteil, dass man zu keinem Zeitpunkt Basen wählen muss; allerdings ist sie zum Rechnen sehr unpraktisch.

Folgende Eigenschaften des Tensorprodukts sind leicht zu überprüfen:

Lemma 19.4.10. Es seien U, V, W endlich-dimensionale K -Vektorräume. Dann gibt es kanonische Isomorphismen

- (1) $U \otimes (V \otimes W) \cong (U \otimes V) \otimes W$;
- (2) $U \otimes (V \oplus W) \cong (U \otimes V) \oplus (U \otimes W)$.

Proof. Übung. □

Das Tensorprodukt ist ebenfalls mit linearen Abbildungen kompatibel:

Satz 19.4.11. Es seien V, V', W und W' endlich-dimensionale K -Vektorräume, und es seien $T : V \rightarrow V'$ und $S : W \rightarrow W'$ lineare Abbildungen. Dann existiert eine eindeutige lineare Abbildung

$$T \otimes S : V \otimes W \rightarrow V' \otimes W',$$

so dass

$$(T \otimes S)(v \otimes w) = T(v) \otimes S(w) \quad \forall v \in V, w \in W.$$

Proof. Es seien v_1, \dots, v_n und w_1, \dots, w_m jeweilige Basen von V und W . Wir definieren $T \otimes S$ durch

$$(T \otimes S)(v_i \otimes w_j) = T(v_i) \otimes S(w_j).$$

Alternativ können wir auch die universelle Eigenschaft des Tensorprodukts benutzen: definiere die Bilinearform

$$\Phi : V \times W \rightarrow V' \otimes W' \quad (v, w) \mapsto T(v) \otimes S(w).$$

Dann erhalten wir laut Satz 19.4.6 eine Abbildung $\phi : V \otimes W \rightarrow V' \otimes W'$, so dass folgendes Diagramm kommutiert:

$$\begin{array}{ccc} V \times W & \xrightarrow{\Phi} & V' \otimes W' \\ \downarrow \otimes & \nearrow \phi & \\ V \otimes W & & \end{array}$$

Wir setzen $T \otimes S = \phi$. □

Lemma 19.4.12. Es seien $T : V \rightarrow V$ und $S : W \rightarrow W$ lineare Abbildungen. Es gilt $\text{Tr}(T \otimes S) = \text{Tr}(T) \cdot \text{Tr}(S)$.

Proof. Übung. □

Frage. Können Sie $\det(T \otimes S)$ mit Hilfe von $\det(T)$ und $\det(S)$ finden?