

# **Skript Lineare Algebra & Geometrie 2, Hertrich-Jeromin**

Studierendenmitschrift

3. Juli 2016

# Inhaltsverzeichnis

<b>4</b>	<b>Volumenmessung</b>	<b>3</b>
4.3	Polynome & Polynomfunktionen . . . . .	3
4.4	Das charakteristische Polynom . . . . .	13
4.5	Der Satz von Cayley-Hamilton . . . . .	21
<b>5</b>	<b>Längen- und Winkelmessung</b>	<b>29</b>
5.1	Bilinearformen & Sesquilinearformen . . . . .	29
5.2	Der Satz von Sylvester . . . . .	36
5.3	Euklidische & unitäre Vektorräume . . . . .	45
5.4	Euklidische Geometrie . . . . .	51
5.5	Orthogonalprojektion . . . . .	59
<b>6</b>	<b>Struktursätze für Endomorphismen</b>	<b>63</b>
6.1	Adjungierte & duale Abbildungen . . . . .	63
6.2	Normale Endomorphismen . . . . .	70
6.3	Nilpotente Endomorphismen und Jordansche Normalform . . . . .	79
6.4	Quadriken . . . . .	84

## 4 Volumenmessung

### 4.3 Polynome & Polynomfunktionen

Warum? (Vielleicht eher „Algebra“ – allgemein – als „lineare“ Algebra) Wichtig: das charakteristische Polynom eines Endomorphismus – wichtiges Hilfsmittel im Kontext der Struktursätze.

**Beispiel** Wir definieren Polynomfunktionen  $p, q : K \rightarrow K$  eines Körpers  $K$  in sich durch

$$\begin{aligned} p : K &\rightarrow K, \quad x \mapsto p(x) := 1 + x + x^2 \\ q : K &\rightarrow K, \quad x \mapsto q(x) := 1 \end{aligned}$$

Falls  $K = \mathbb{Z}_2$  so gilt dann

$$\begin{aligned} \forall x \in K : x(x+1) &= 0 \\ \Rightarrow \forall x \in K : p(x) &= q(x) \end{aligned}$$

d.h., unterschiedliche „Polynome“ liefern die gleiche Polynomfunktion: Koeffizientenvergleich funktioniert nicht.

**Wiederholung** Auf dem Folgenraum  $K^{\mathbb{N}}$  betrachten wir die Familie  $(e_k)_{k \in \mathbb{N}}$  mit

$$e_k : \mathbb{N} \rightarrow K, \quad j \mapsto e_k(j) := \delta_{jk}$$

Wir wissen:  $(e_k)_{k \in \mathbb{N}}$  ist linear unabhängig, aber kein Erzeugendensystem:

$$\forall k \in \mathbb{N} : e_k \notin [(e_j)_{j \neq k}] \text{ und } [(e_j)_{j \in \mathbb{N}}] \neq K^{\mathbb{N}}$$

Insbesondere gilt:

$$\forall x \in [(e_j)_{j \in \mathbb{N}}] \quad \exists n \in \mathbb{N} \quad \forall k > n : x_k = 0$$

### 4.3.1 Idee & Definition

Wir fassen ein Polynom als (endliche) Koeffizientenfolge auf,

$$\sum_{k=0}^n t^k a_k \cong \sum_{k \in \mathbb{N}} e_k a_k \text{ mit } a_k = 0 \text{ für } k > n$$

und führen darauf das *Cauchyprodukt* (vgl. Analysis) als Multiplikation ein:

$$(a_k)_{k \in \mathbb{N}} \odot (b_k)_{k \in \mathbb{N}} := (c_k)_{k \in \mathbb{N}}$$

wobei

$$c_k := \sum_{j=0}^k a_j b_{k-j}.$$

Insbesondere gilt damit

$$\forall j, k \in \mathbb{N} : e_j \odot e_k = e_{j+k} \Rightarrow \forall k \in \mathbb{N} : \begin{cases} e_0 \odot e_k = e_k \\ e_1^k = \underbrace{e_1 \odot \cdots \odot e_1}_{k \text{ mal}} = e_k \end{cases}$$

Mit  $1 := e_0$ ,  $t := e_1$  und  $t^0 := 1$ , wie üblich, liefert dies:

$$\sum_{k=0}^n t^k a_k = \sum_{k \in \mathbb{N}} e_k a_k \in [(e_k)_{k \in \mathbb{N}}] \subset K^{\mathbb{N}}$$

### 4.3.2 Definition

$$K[t] := [(e_k)_{k \in \mathbb{N}}], \odot,$$

mit dem Cauchyprodukt  $\odot$ , ist die *Polynomialalgebra* über dem Körper  $K$ ; die Elemente von  $K[t]$ ,

$$p(t) = \sum_{k=0}^n t^k a_k = \sum_{k \in \mathbb{N}} e_k a_k,$$

heißen *Polynome in der Variablen*  $t := e_1$ . Der *Grad* eines Polynoms ist

$$\deg \sum_{k=0}^n t^k a_k := \max\{k \in \mathbb{N} \mid a_k \neq 0\} \quad (\text{bzw. } \deg 0 := -\infty)$$

Ist (der „höchste“ Koeffizient)  $a_n = 1$  für  $\deg p(t) = n$ , so heißt das Polynom  $p(t)$  *normiert*.

**Notation** Mit  $t^k = e_k$ , also  $K[t] = [(e_k)_{k \in \mathbb{N}}]$  wird das Cauchyprodukt auf  $K[t]$  eine „normale“ Multiplikation, gefolgt von einer Sortierung nach den Potenzen der Variablen  $t$ . Wir werden das „ $\odot$ “ daher oft unterdrücken, und z.B.  $p(t)q(t)$  schreiben, anstelle von  $p(t) \odot q(t)$ .

**Bemerkung (Koeffizientenvergleich)** Mit dieser Definition von „Polynom“ gilt

$$p(t) = \sum_{k=0}^n t^k a_k = 0 \Rightarrow \forall k \in \mathbb{N} : a_k = 0,$$

da  $(t^k)_{k \in \mathbb{N}} = (e_k)_{k \in \mathbb{N}}$  linear unabhängig ist. Koeffizientenvergleich funktioniert!

**Bemerkung** Die Polynomialgebra  $K[t]$  über  $K$  ist eine assoziative und kommutative  $K$ -Algebra, weiters ist  $K[t]$  unitär mit Einselement  $1 = e_0$ .

### 4.3.3 Definition

Eine  $K$ -Algebra ist ein  $K$ -VR mit einer *bilinearen Abbildung*,

$$\odot : V \times V \rightarrow V, (v, w) \mapsto v \odot w,$$

d.h. es gilt

(i)  $\forall w \in V : V \ni v \mapsto v \odot w \in V$  ist linear;

(ii)  $\forall v \in V : V \ni w \mapsto v \odot w \in V$  ist linear.

Eine  $K$ -Algebra heißt

- unitär (mit Einselement 1), falls  $\exists 1 \in V \forall v \in V : 1 \odot v = v \odot 1 = v$ ;
- assoziativ, falls  $\forall u, v, w \in V : (u \odot v) \odot w = u \odot (v \odot w)$ ;
- kommutativ, falls  $\forall v, w \in V : v \odot w = w \odot v$ .

**Beispiel** Die additive Gruppe  $\text{End}(V)$  ist (mit Komposition) eine unitäre assoziative Algebra.

**Bemerkung** In jeder Algebra  $(V, \odot)$  gilt:

$$\forall v \in V : 0 \odot v = v \odot 0 = 0$$

da z.B. für  $v \in V$  gilt

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

Ist  $(V, \odot)$  unitär, so liefert  $[1] \subset V$  wegen  $1 \odot 1 = 1$  einen Körper:

$$([1], +|_{[1] \times [1]}, \odot|_{[1] \times [1]}) \cong K$$

vermöge  $K \ni x \mapsto 1 \cdot x \in [1]$  (siehe Aufgabe 5).

#### 4.3.4 Definition

Ein *Algebra-Homomorphismus* zwischen  $K$ -Algebren  $(V, \odot)$  und  $(W, *)$  ist eine lineare Abbildung  $\psi \in \text{Hom}(V, W)$ , für die gilt:

$$\forall v, v' \in V : \psi(v \odot v') = \psi(v) * \psi(v').$$

**Bemerkung**  $\text{Hom}(V, W)$  wird oft auch für den (Vektor-)Raum der Algebra-Homomorphismen verwendet. In dieser LVA bedeutet „ $\text{Hom}(V, W)$ “ immer VR-Homomorphismen, bei allen „anderen“ Homomorphismen wird erwähnt, was gemeint ist.

#### 4.3.5 Einsetzungssatz & Definitionen

Seien  $(V, \odot)$  eine unitäre assoziative Algebra und  $v \in V$ . Dann ist

$$\psi_v : K[t] \rightarrow V, \quad \sum_{k=0}^n t^k a_k = p(t) \mapsto \psi_v(p(t)) := \sum_{k=0}^n v^k a_k$$

– wobei  $v^0 = 1$  sinnvoll ist, da die Algebra unitär ist – ein Algebra-Homomorphismus;  $\psi_v$  heißt *Einsetzungshomomorphismus*.

$$p : V \rightarrow V, \quad v \mapsto p(v) := \psi_v(p(t))$$

heißt die zu  $p(t) \in K[t]$  gehörige *Polynomfunktion* auf  $V$ .

**Bemerkung** Wie üblich:  $v^k := \underbrace{v \odot \cdots \odot v}_{k\text{-mal}}$  und  $v^0 := 1$ .

#### Beweis

1.  $\psi_v$  ist linear:

- für  $p(t) = \sum_{k \in \mathbb{N}} t^k a_k$  und  $a \in K$  gilt:

$$\psi_v(p(t)a) = \psi_v\left(\sum_{k \in \mathbb{N}} t^k a_k a\right) = \sum_{k \in \mathbb{N}} v^k a_k a = \psi_v(p(t))a;$$

- für  $p(t) = \sum_{k \in \mathbb{N}} t^k a_k$  und  $q(t) = \sum_{k \in \mathbb{N}} t^k b_k$  gilt:

$$\psi_v(p(t) + q(t)) = \psi_v\left(\sum_{k \in \mathbb{N}} t^k (a_k + b_k)\right) = \sum_{k \in \mathbb{N}} v^k (a_k + b_k) = \psi_v(p(t)) + \psi_v(q(t))$$

2.  $\psi_v$  ist „multiplikativ“, d.h. verträglich mit der beteiligten Multiplikation:

Für die Vektoren der Basis  $(t^k)_{k \in \mathbb{N}}$  von  $K[t]$  gilt, da  $(V, \odot)$  assoziativ ist,

$$\psi_v(t^m t^n) = \psi_v(t^{m+n}) = v^{m+n} = v^m \odot v^n = \psi_v(t^m) \odot \psi_v(t^n).$$

Da aber  $\psi_v$  linear und die Multiplikation in  $K[t]$  und in  $(V, \odot)$  bilinear sind, folgt die Behauptung.

**Bemerkung (Fortsetzungssatz für bilineare Abbildungen)** Im Beweis haben wir verwendet:  
Die Abbildungen

$$K[t] \times K[t] \rightarrow V, (p(t), q(t)) \mapsto \begin{cases} \psi_v(p(t)q(t)) & \text{(Cauchyprodukt)} \\ \psi_v(p(t)) \odot \psi_v(q(t)) & \text{(Produkt in } (V, \odot)) \end{cases}$$

sind bilinear (da  $\psi_v$  linear ist), sind also gleich, sobald sie auf einer Basis übereinstimmen. Dies ist die Eindeutigkeit eines Fortsetzungssatzes für bilineare Abbildungen:

Sind  $V, W$   $K$ -VR,  $(b_i)_{i \in I}$  eine Basis von  $V$  und  $(\beta_{ij})_{i,j \in I}$  eine Familie in  $W$ , so gibt es eine eindeutige bilineare Abbildung

$$\beta : V \times V \rightarrow W$$

mit

$$\forall i, j \in I : \beta(b_i, b_j) = \beta_{ij}$$

Dieser Fortsetzungssatz folgt direkt aus dem Fortsetzungssatz für lineare Abbildungen, da

$$\{\beta : V \times V \rightarrow W \text{ bilinear}\} \cong \text{Hom}(V, \text{Hom}(V, W))$$

vermittels des Isomorphismus

$$\beta \mapsto (v \mapsto \underbrace{\beta(v, \cdot)}_{\in \text{Hom}(V, W)}),$$

d.h. durch Nacheinandereinsetzen der Argumente.

**Bemerkung** Die Abbildung eines Polynoms auf seine Polynomfunktion auf dem Körper,

$$K[t] \ni p(t) \mapsto (x \mapsto p(x)) = \psi_x(p(t)) \in K^K$$

ist für  $\text{Char } K \neq 0$  nicht injektiv<sup>1</sup>. Das heißt: Koeffizientenvergleich (für Polynomfunktionen) kann nur funktionieren, wenn  $\text{Char } K = 0$ .

---

<sup>1</sup>sonst wäre  $K^K$  unendlich dimensional.

**Beispiel & Bemerkung** Ist  $V$   $K$ -VR, so ist  $\text{End}(V)$  eine  $K$ -Algebra (mit Komposition  $\circ$ ). Man erhält also für  $f \in \text{End}(V)$  einen Einsetzungshomomorphismus

$$\psi_f : K[t] \rightarrow \text{End}(V), \quad p(t) \mapsto \psi_f(p(t)) = p(f);$$

und für jedes Polynom  $p(t) \in K[t]$  eine zugehörige Polynomfunktion

$$p : \text{End}(V) \rightarrow \text{End}(V), \quad f \mapsto \psi_f(p(t)) = p(f).$$

Dieses Beispiel ist der Schlüssel zum Satz von Cayley-Hamilton (im nächsten Abschnitt).

#### 4.3.6 Lemma

Für Polynome  $p(t), q(t) \in K[t]$  gilt:

- $\deg p(t) \odot q(t) = \deg p(t) + \deg q(t)$ ,
- $\deg p(t) + q(t) \leq \max\{\deg p(t), \deg q(t)\}$ .

**Beweis** Für  $p(t) = \sum_{k \in \mathbb{N}} t^k a_k$  und  $q(t) = \sum_{k \in \mathbb{N}} t^k b_k$  ist

$$p(t) \odot q(t) = \sum_{k \in \mathbb{N}} t^k c_k \text{ mit } c_k = \sum_{j=0}^k a_j b_{k-j}$$

Gilt nun  $\deg p(t) = n$  und  $\deg q(t) = m$ , d.h.

$$a_n, b_m \neq 0 \wedge \forall k > n, k' > m : a_k = b_{k'} = 0$$

so folgt

$$\left. \begin{array}{l} \forall k > m+n : c_k = 0 \\ c_{m+n} = a_n b_m \end{array} \right\} \Rightarrow \deg p(t) \odot q(t) = m+n$$

Gilt andererseits  $\deg p(t) = -\infty$  oder  $\deg q(t) = -\infty$ , also  $p(t) = 0 \vee q(t) = 0$ , so folgt

$$p(t) \odot q(t) = 0 \Rightarrow \deg p(t) \odot q(t) = -\infty.$$

Die zweite Behauptung ist offensichtlich wahr.

**Beispiel** Für  $p(t), q(t), d(t) \in K[t]$  mit  $d(t) \neq 0$  gilt

$$d(t)p(t) = d(t)q(t) \Rightarrow p(t) = q(t).$$



Nämlich: da  $\deg d(t) \geq 0$ ,

$$\begin{aligned} -\infty &= \deg d(t)(p(t) - q(t)) \\ &= \deg d(t) + \deg (p(t) - q(t)) \\ \Rightarrow \deg (p(t) - q(t)) &= -\infty \\ \Rightarrow p(t) &= q(t) \end{aligned}$$

#### 4.3.7 Euklidischer Divisionsalgorithmus

Seien  $p(t), d(t) \in K[t]$ ,  $d(t) \neq 0$ . Dann existieren eindeutig  $q(t), r(t) \in K[t]$ , sodass

$$p(t) = d(t)q(t) + r(t) \text{ und } \deg r(t) < \deg d(t).$$

**Bemerkung** Ist  $\deg p(t) \leq \deg d(t)$ , so ist die Aussage trivial.

**Beweis** Eindeutigkeit folgt wie im Beispiel; mit

$$\begin{aligned} p(t) &= \begin{cases} d(t)q(t) + r(t) \\ d(t)\tilde{q}(t) + \tilde{r}(t) \end{cases} \\ \Rightarrow d(t)(q(t) - \tilde{q}(t)) &= \tilde{r}(t) - r(t) \end{aligned}$$

erhält man

$$\begin{aligned} \deg d(t) + \deg (q(t) - \tilde{q}(t)) &= \deg(r(t) - \tilde{r}(t)) \\ &\leq \max\{\deg r(t), \deg \tilde{r}(t)\} < \deg d(t). \end{aligned}$$

Also folgt

$$\deg (q(t) - \tilde{q}(t)) = -\infty \Rightarrow \deg(r(t) - \tilde{r}(t)) = \deg d(t) - \infty = -\infty$$

und damit

$$\tilde{q}(t) = q(t) \text{ und } \tilde{r}(t) = r(t).$$

Existenz: Mit  $k := \deg d(t) \geq 0$  und

$$K[t]_m := \{q(t) \in K[t] \mid \deg q(t) \leq m\} \text{ für } m \in \mathbb{N}$$

betrachte man die Abbildung

$$K[t]_m \times K[t]_{k-1} \rightarrow K[t]_{k+m}, (q(t), r(t)) \mapsto d(t)q(t) + r(t).$$

Diese Abbildung ist linear (klar) und injektiv, denn: ist  $q(t) \neq 0$ , so folgt wegen

$$\deg r(t) < k = \deg d(t) \leq \deg d(t)q(t)$$

dass

$$\begin{aligned} \deg(d(t)q(t) + r(t)) &= \deg d(t)q(t) \geq k > -\infty \\ \Rightarrow d(t)q(t) + r(t) &\neq 0, \end{aligned}$$

also

$$d(t)q(t) + r(t) = 0 \Rightarrow q(t) = 0 \wedge r(t) = 0.$$

Wegen

$$\dim K[t]_m \times K[t]_{k-1} = (m+1) + k = (k+m) + 1 = \dim K[t]_{k+m}$$

liefert diese Abbildung dann für jedes  $m \in \mathbb{N}$  einen Isomorphismus

$$K[t]_m \times K[t]_{k-1} \rightarrow K[t]_{k+m}$$

#### 4.3.8 Korollar & Definition

Sei  $p(t) \in K[t]$  mit  $\deg p(t) \geq 1$ . Ist  $x \in K$  eine *Nullstelle* von  $p(t)$ , d.h.

$$p(x) = \psi_x(p(t)) = 0,$$

so folgt

$$\exists! q(t) \in K[t] : p(t) = (t - x)q(t)$$

**Beweis** Seien  $p(t) \in K[t]$  mit  $\deg p(t) \geq 1$  und  $x \in K$  eine Nullstelle von  $p(t)$ ; dann gibt es eindeutig  $q(t), r(t) \in K[t]$  mit

$$p(t) = (t - x)q(t) + r(t) \text{ und } \deg r(t) < \deg(t - x) = 1,$$

also

$$p(t) = (t - x)q(t) + r(t) = (t - x)q(t) + c_0.$$

Einsetzen von  $x \in K$  liefert dann

$$0 = p(x) = (x - x)q(x) + c_0 = c_0.$$

**Bemerkung und Beispiel** Dies liefert eine Methode, um Polynome zu *faktorisieren*: Für jede gefundene Nullstelle kann man einen *Linearfaktor* abspalten.

$$p(t) = t^4 - t^3 + t^2 - t = \begin{cases} t(t-1)(t-i)(t+i) \in \mathbb{C}[t] \\ t(t-1)(t^2+1) \in \mathbb{R}[t]. \end{cases}$$

#### 4.3.9 Mehr zu Polynomen

Dies ist der Anfang einer der Teilbarkeitstheorie der natürlichen Zahlen ähnlichen Theorie für Polynome.

Sind  $p(t), d(t) \in K[t]$ , so heißt  $d(t)$  Teiler von  $p(t)$ ,  $d(t) \mid p(t)$ , falls

$$\exists q(t) \in K[t] : p(t) = d(t)q(t).$$

**Primpolynome** Nennt man  $p(t) \in K[t]$  mit  $\deg p(t) > 0$  ein *Primpolynom* (oder *irreduzibel*), falls für  $d(t), q(t) \in K[t]$  gilt:

$$p(t) = d(t)q(t) \Rightarrow (\deg q(t) = 0 \vee \deg d(t) = 0),$$

so gilt der Satz über die *Primfaktorzerlegung*:

Jedes Polynom  $p(t) \in K[t]$  mit  $\deg p(t) > 0$  zerfällt eindeutig in Primpolynome,

$$p(t) = a_n p_1(t) \cdots p_m(t),$$

wobei  $a_n \in K$  und  $p_1(t), \dots, p_m(t) \in K[t]$  normierte Primpolynome sind.

**Beweis** Existenz ist einfach zu zeigen (Induktion über  $n$ ), die weniger leicht zu zeigende Eindeutigkeit benutzt die Existenz des *größten gemeinsamen Teilers*  $d(t) = \text{ggT}(p(t), q(t))$  zweier Polynome  $p(t)$  und  $q(t)$ :

Zu  $p(t), q(t) \in K[t] \setminus \{0\}$  gibt es genau ein normiertes Polynom  $d(t) \in K[t]$  mit

$$\begin{aligned} d(t) \mid p(t) \wedge d(t) \mid q(t) \text{ und} \\ d'(t) \mid p(t) \wedge d'(t) \mid q(t) \Rightarrow d'(t) \mid d(t). \end{aligned}$$

**Lemma von Bézout** Für den ggT gilt auch das Lemma von Bézout:

$$\exists p'(t), q'(t) \in K[t] : d(t) = p(t)p'(t) + q(t)q'(t)$$

**Bemerkung** Aus der Gradformel,

$$\deg d(t)q(t) = \deg d(t) + \deg q(t)$$

folgt direkt:

*Jedes Polynom  $p(t) \in K[t]$  mit  $\deg p(t) = 1$  ist Primpolynom.*

**Fundamentalsatz der Algebra** Falls  $K = \mathbb{C}$ , so sind die Polynome mit Grad 1 die einzigen Primpolynome:

*In  $\mathbb{C}$  zerfällt jedes Polynom (mit Grad  $\geq 1$ ) in Linearfaktoren;*

$$\forall p(t) \in \mathbb{C}[t], \deg \geq 1 : \exists x_1, \dots, x_n \in \mathbb{C}$$

*mit*

$$p(t) = a_n \prod_{j=1}^n (t - x_j).$$

Ist  $K = \mathbb{R}$ , so ist dies nicht der Fall; ein Primpolynom vom Grad  $\deg p(t) = 2$  ist z.B.

$$p(t) = t^2 + 1 \in \mathbb{R}[t],$$

denn

$$t^2 + 1 = (t - x_1)(t - x_2) \Rightarrow \begin{cases} 0 = x_1 + x_2 \\ 1 = x_1 \cdot x_2 \end{cases} \Rightarrow 1 = -x^2$$

Andererseits ist  $p(t) \in \mathbb{R}[t] \subset \mathbb{C}[t]$ , also existieren  $x_1, \dots, x_n \in \mathbb{C}$  mit

$$a_n \prod_{j=1}^n (t - x_j) = p(t) = \overline{p(t)} = \overline{a_n} \prod_{j=1}^n (t - \overline{x_j}),$$

d.h. mit der Eindeutigkeit der Primfaktorzerlegung,  $a_n \in \mathbb{R}$  und die  $x_j$  sind entweder reell oder treten in komplex-konjugierten Paaren auf:

$$p(t) = a_n \prod_{j=1}^m (t^2 - t(x_j + \overline{x_j}) + x_j \overline{x_j}) \prod_{j=2m+1}^n (t - x_j).$$

Ist also  $p(t) \in \mathbb{R}[t]$  Primpolynom, so folgt  $\deg p(t) \leq 2$  und

$$\deg p(t) = 2 \Rightarrow \exists x, y \in \mathbb{R} : p(t) = (t - x)^2 + y^2 \text{ mit } y \neq 0$$

In  $K = \mathbb{Q}$  gibt es noch „mehr“ Primpolynome, wie z.B.:

$$p(t) = t^2 - 2 \text{ oder } p(t) = t^4 + 1$$

## 4.4 Das charakteristische Polynom

### 4.4.1 Definition

Seien  $V$  ein  $K$ -VR und  $f \in \text{End}(V)$ . Dann heißen

- (i)  $x \in K$  ein Eigenwert von  $f$ , falls  $\exists v \in V^\times : f(v) = vx$ ;
- (ii)  $v \in V^\times$  ein Eigenvektor von  $f$ , falls  $\exists x \in K : f(v) = vx$ ;
- (iii)  $\ker(f - \text{id}_V x) \subset V$  ein Eigenraum, falls  $\ker(f - \text{id}_V x) \neq \{0\}$ .

**Bemerkung** Der Skalar  $x \in K$  ist genau dann ein Eigenwert von  $f \in \text{End}(V)$ , wenn  $\ker(f - \text{id}_V x) \neq \{0\}$ , d.h., wenn ein Eigenvektor  $v \in V^\times$  zu  $x$  existiert.

**Beispiel** Für  $\frac{d}{ds} \in \text{End}(C^\infty(\mathbb{R}))$  ist jedes  $x \in \mathbb{R}$  ein Eigenwert, da

$$\left(\frac{d}{ds} - \text{id}_V x\right)v = 0 \text{ für } v : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, s \mapsto v(s) := e^{xs},$$

wobei  $v \in C^\infty(\mathbb{R}) \setminus \{0\}$ , d.h.  $s \mapsto v(s) = e^{xs}$  ist ein Eigenvektor zum Eigenwert  $x \in \mathbb{R}$ .

**Beispiel** Ist  $\dim V < \infty$ , so kann die Determinante zur Bestimmung von Eigenwerten von Endomorphismen  $f \in \text{End}(V)$  benutzt werden, da

$$\ker(f - \text{id}_V x) \neq \{0\} \Leftrightarrow (f - \text{id}_V x) \text{ nicht injektiv} \Leftrightarrow \det(f - \text{id}_V x) = 0,$$

d.h. das Auffinden von Eigenwerten  $x \in K$  von  $f$  ist reduziert auf die Bestimmung der Nullstellen der Funktion

$$K \ni x \mapsto \det(f - \text{id}_V x) \in K.$$

**Beispiel** Ist z.B.  $(b_1, b_2)$  Basis von  $V$  und  $f \in \text{End}(V)$  durch  $f(B) = BX$  gegeben, so liefern die Nullstellen der Polynomfunktion

$$\begin{aligned} \det(f - \text{id}_V x) &= \det(X - E_2 x) = \det \begin{pmatrix} x_{11} - x & x_{12} \\ x_{21} & x_{22} - x \end{pmatrix} \\ &= (x_{11} - x)(x_{22} - x) - x_{12}x_{21} = x^2 - x(x_{11} + x_{22}) + (x_{11}x_{22} - x_{12}x_{21}) \end{aligned}$$

die Eigenwerte von  $f$  – beispielsweise erhalten wir für

$$X = \begin{pmatrix} 2 & 3 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} : \det(f - \text{id}_V x) = x^2 - 2x - 3 = (x + 1)(x - 3),$$

also Eigenwerte  $x_1 = -1$  und  $x_2 = 3$  mit zugehörigen Eigenvektoren als Lösungen von

$$v_i \in \ker(f - \text{id}_V x_i),$$

also durch Lösungen der linearen Gleichungssysteme

$$\begin{pmatrix} 2 - (-1) & 3 \\ 1 & -(-1) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1^1 \\ v_1^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 & 3 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1^1 \\ v_1^2 \end{pmatrix} \quad \text{und}$$

$$\begin{pmatrix} 2 - 3 & 3 \\ 1 & -3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_2^1 \\ v_2^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 3 \\ 1 & -3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_2^1 \\ v_2^2 \end{pmatrix}$$

sodass

$$v_1 = b_1 - b_2 \quad \text{und} \quad v_2 = b_1 3 + b_2$$

Eigenvektoren zu den Eigenwerten  $x_1, x_2$  liefert.

**Rechenbeispiel 1** Für  $X = \begin{pmatrix} 2 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$  erhält man

$$\det(f - \text{id}_V x) = \det \begin{pmatrix} 2 - x & -1 \\ 1 & -x \end{pmatrix} = x^2 - 2x + 1$$

und Eigenvektoren zum Eigenwert  $x = 1$  durch Lösung der LGS

$$\begin{pmatrix} 2 - 1 & -1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1^1 \\ v_1^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1^1 \\ v_1^2 \end{pmatrix}$$

d.h. der Eigenraum zum Eigenwert  $x$ ,

$$\ker(f - \text{id}_V) = [\{b_1 + b_2\}] \quad \text{hat} \quad \dim \ker(f - \text{id}_V) < \dim V.$$

**Rechenbeispiel 2** Ist  $K = \mathbb{R}$  und

$$\det(f - \text{id}_V x) = x^2 + 1,$$

so hat  $f$  keine Eigenwerte: z.B., wenn  $X = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$ .

#### 4.4.2 Definition

Sei  $V$  ein  $K$ -VR, für  $f \in \text{End}(V)$  ist das *charakteristische Polynom* von  $f$ :

$$\chi_f(t) := \det(\text{id}_V t - f) \in K[t].$$

Analog definiert man für  $X \in K^{n \times n}$  das charakteristische Polynom

$$\chi_X(t) := \det(E_n t - X) \in K[t].$$

**Bemerkung** Oft wird auch das andere Vorzeichen in der Determinante verwendet, also  $\det(f - \text{id}_V t)$  bzw.  $\det(X - E_n t)$ .

**Bemerkung** Diese Definition ist erklärungsbedürftig!

Da  $t \notin K$  ist  $\text{id}_V t - f \notin \text{End}(V)$ , sondern  $\text{id}_V t - f \in \text{End}(V)[t]$ . Zwei Lösungsstrategien bieten sich an:

1. Erweiterung der Determinante auf  $\text{End}(V)[t]$ .
2. Benutzung von Darstellungsmatrizen.

Beide führen schließlich zur Leibniz-Formel:

Ist  $B$  eine Basis von  $V$  und  $\xi_B^B(f) = X = (x_{ij})_{i,j \in \{1, \dots, n\}}$ , so erhält man

$$\chi_f(t) = \sum_{\sigma \in S_n} \text{sgn}(\sigma) \prod_{j=1}^n \underbrace{(\delta_{\sigma(j)j} t - x_{\sigma(j)j})}_{\in K[t]} \in K[t].$$

Die Unabhängigkeit von der Basis  $B$  folgt aus der Transformationsformel für Darstellungsmatrizen und dem Determinanten-Multiplikationssatz (wie vorher für  $\det f = \det \xi_B^B(f)$ ).

#### 4.4.3 Bemerkung & Definition

Ist  $\dim V = n$ , so ist  $\chi_f(t)$  ein normiertes Polynom vom Grad  $\deg(\chi_f(t)) = n$ ,

$$\chi_f(t) = t^n - t^{n-1} \text{tr } f + \dots + (-1)^n \det f,$$

wobei die *Spur*  $\text{tr } f$  („tr“  $\hat{=}$  trace) von  $f$  durch diese Gleichung (wohl-)definiert ist. Ist  $(x_{ij})_{i,j \in \{1, \dots, n\}} = X = \xi_B^B(f)$  Darstellungsmatrix von  $f$ , so gilt

$$\text{tr } f = \sum_{j=1}^n x_{jj} = \sum_{j=1}^n b_j^* f(b_j).$$

Oft wird  $\det(f - \text{id}_V t) = (-1)^n \chi_f(t)$  als charakteristisches Polynom definiert – dieses Polynom ist dann nur für gerade  $n$  normiert.

#### 4.4.4 Korollar

Ein  $x \in K$  ist genau dann Eigenwert von  $f$ , wenn  $\chi_f(x) = 0$ .

Also: Die Eigenwerte von  $f$  sind genau die Nullstellen des charakteristischen Polynoms  $\chi_f(t)$ .

**Beweis** Klar – das war die Idee hinter der Definition des charakteristischen Polynoms.

#### 4.4.5 Korollar & Definition

Ist  $x \in K$  Eigenwert von  $f \in \text{End}(V)$ , so ist  $(t - x)$  Teiler des charakteristischen Polynoms. Insbesondere gilt:

$$\exists! k \in \mathbb{N}^\times : \begin{cases} (t - x)^k \mid \chi_f(t) \\ (t - x)^{k+1} \nmid \chi_f(t) \end{cases}$$

Diese Zahl  $k$  heißt die *algebraische Vielfachheit* von  $x$ ;

$$g := \text{def}(\text{id}_V x - f) \leq k$$

ist die *geometrische Vielfachheit* von  $x$ .

**Beweis** Da  $x$  Eigenwert von  $f$  ist, ist die Existenz und Eindeutigkeit von  $k$  klar. Außerdem gilt analog auch  $g \geq 1$ . Zu zeigen bleibt:  $g \leq k$ , d.h.  $(t - x)^g \mid \chi_f(t)$ :

Für eine Basis  $B = (b_1, \dots, b_n)$  von  $V$  mit  $\ker(\text{id}_V x - f) = [(b_1, \dots, b_g)]$  hat

$$\xi_B^B(f) = \begin{pmatrix} E_g x & Y \\ 0 & X \end{pmatrix} \text{ mit } Y \in K^{g \times (n-g)}, X \in K^{(n-g) \times (n-g)}$$

Blockgestalt, also ist

$$\chi_f(t) = (t - x)^g \cdot \chi_X(t),$$

d.h.  $(t - x)^g \mid \chi_f(t)$ , da  $(t - x)^{k+1} \nmid \chi_f(t)$ , gilt also  $g \leq k$ .

**Beispiel** Ist  $f \in \text{End}(V)$  wie oben durch  $f(B) = BX$  gegeben, so haben die Eigenwerte

$$x_1 = -1 \text{ und } x_2 = 3 \text{ für } X = \begin{pmatrix} 2 & 3 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

algebraische und geometrische Vielfachheiten

$$1 = g_i = k_i, \text{ da } 1 \leq g_i \leq k_i \text{ und } k_1 + k_2 \leq 2;$$

der Eigenwert

$$x = 1 \text{ für } X = \begin{pmatrix} 2 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

hat algebraische und geometrische Vielfachheiten  $k = 2$  und  $g = 1$ , da

$$f \neq \text{id}_V x = \text{id}_V$$



und  $\chi_f(t) = (t - x)^2 \in \mathbb{R}[t]$ , da ein quadratisches Polynom zwei (reelle oder komplex konjugierte) Nullstellen hat, oder aber eine doppelte reelle.

#### 4.4.6 Definition & Lemma

Das Schlüsselargument im Beweis oben kann man verallgemeinern:

Sei  $f \in \text{End}(V)$  und  $U \subset V$  ein  $f$ -invarianter Unterraum, d.h.  $f(U) \subset U$ . Ist dann  $V = U \oplus U'$  eine direkte Zerlegung und  $p, p' \in \text{End}(V)$  die zugehörigen Projektionen, so gilt

$$\chi_f(t) = \chi_{f|_U}(t) \cdot \chi_{f'}(t),$$

wobei

$$f' := p' \circ f|_{U'} \in \text{End}(U').$$

**Bemerkung** Man kann  $f|_U$  als Endomorphismus  $f|_U \in \text{End}(U)$  auffassen, da  $f(U) \subset U$ .

**Beweis** Wie oben: Sei  $B = (b_1, \dots, b_n)$  Basis von  $V$ , sodass

- $C = (b_1, \dots, b_k)$  Basis von  $U$  und
- $C' = (b_{k+1}, \dots, b_n)$  Basis von  $U'$  ist.

Die Darstellungsmatrix von  $f$  bzgl.  $B$  hat dann Blockgestalt,

$$\xi_B^B(f) = \begin{pmatrix} X & Y \\ 0 & X' \end{pmatrix} \text{ mit } X = \xi_C^C(f|_U), X' = \xi_{C'}^{C'}(f')$$

Damit folgt die Behauptung (wie oben) mit der Leibniz-Formel.

**Bemerkung** Alternativ kann man das Lemma mit der von  $f$  induzierten Quotientenabbildung  $f' \in \text{End}(V/U)$  formulieren, wobei

$$f' : V/U \rightarrow V/U, v + U \mapsto f'(v + U) := f(v) + U.$$

#### 4.4.7 Definition

Ein Endomorphismus  $f \in \text{End}(f)$  heißt *diagonalisierbar* bzw. *trigonalisierbar*, falls es eine Basis  $B$  von  $V$  gibt, sodass  $\xi_B^B(f) = (x_{ij})_{i,j \in \{1, \dots, n\}}$  eine Diagonalmatrix

$$i \neq j \Rightarrow x_{ij} = 0$$

bzw. obere Dreiecksmatrix ist,

$$i > j \Rightarrow x_{ij} = 0.$$

**Bemerkung** Falls  $\dim V < \infty$ , so ist  $f \in \text{End}(V)$  genau dann diagonalisierbar, wenn  $V$  eine Basis aus Eigenvektoren von  $f$  besitzt. Damit kann man „Diagonalisierbarkeit“ auch im Falle  $\dim V = \infty$  definieren.

**Bemerkung** Ist  $f$  trigonalisierbar (oder gar diagonalisierbar), so zerfällt  $\chi_f(t)$  in Linearfaktoren: für geeignete  $x_1, \dots, x_n \in K$  ist

$$\chi_f(t) = \prod_{j=1}^n (t - x_j).$$

#### 4.4.8 Bemerkung & Definition

Man nennt eine Matrix  $X \in K^{n \times n}$  diagonalisierbar (bzw. trigonalisierbar), falls  $f_X \in \text{End}(K^n)$  diagonalisierbar (bzw. trigonalisierbar) ist.

Dies ist genau dann der Fall, falls es  $P \in \text{Gl}(n)$  gibt, sodass  $PXP^{-1}$  Diagonalmatrix (bzw. obere Dreiecksmatrix) ist.

#### 4.4.9 Lemma

Frage: Was sind hinreichende Kriterien dafür? Notwendigkeit kennen wir:  $\chi_f(t)$  zerfällt in Linearfaktoren.

Eigenvektoren  $v_1, \dots, v_m \in V$  zu paarweise verschiedenen Eigenwerten  $x_1, \dots, x_m$  eines Endomorphismus  $f \in \text{End}(V)$  sind linear unabhängig.

**Bemerkung** Anders gesagt: Die Summe von Eigenräumen zu paarweise verschiedenen Eigenwerten ist direkt.

**Beweis** Zu zeigen: Ist  $\sum_{i=1}^m v_i y_i = 0$  für Koeffizienten  $y_1, \dots, y_m \in K$ , so folgt  $y_1 = \dots = y_m = 0$ .

Seien  $y_1, \dots, y_m \in K$  und  $w_i := v_i y_i$  und  $w := \sum_{i=1}^m w_i = \sum_{i=1}^m v_i y_i$ . Wiederholte Anwendung von  $f$  liefert, wegen  $f(w_i) = w_i x_i$

$$(f^{m-1}(w), \dots, f^2(w), f(w), w) = (w_1, \dots, w_m) \begin{pmatrix} x_1^{m-1} & \dots & x_1^2 & x_1 & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_m^{m-1} & \dots & x_m^2 & x_m & 1 \end{pmatrix}$$

mit der Vandermonde-Matrix  $X \in \text{Gl}(m)$ , da

$$\det X = \prod_{i < j} (x_i - x_j) \neq 0$$

weil die Eigenwerte  $x_1, \dots, x_m$  paarweise verschieden sind. Damit folgt aus  $w = \sum_{i=1}^m v_i y_i = 0$

$$(w_1, \dots, w_m) = (f^{m-1}(w), \dots, f(w), w)X^{-1} = (0, \dots, 0)$$

also

$$\forall i = 1, \dots, m : 0 = w_i = v_i y_i \text{ und } v_i \neq 0 \Rightarrow y_i = 0.$$

#### 4.4.10 Satz

Ein Endomorphismus  $f \in \text{End}(V)$  ist genau dann diagonalisierbar, wenn  $\chi_f(t) \in K[t]$  in Linearfaktoren zerfällt und die algebraischen und geometrischen Vielfachheiten aller Eigenwerte übereinstimmen,

$$\chi_f(t) = \prod_{i=1}^m (t - x_i)^{k_i} \text{ und } \forall i = 1, \dots, m : k_i = g_i.$$

**Beweis** Ist  $f$  diagonalisierbar, so existiert eine Basis  $B$  aus Eigenvektoren von  $f$ , also ist dann

$$\xi_B^B(f) = \begin{pmatrix} E_{g_1} x_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & E_{g_2} x_2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & E_{g_m} x_m \end{pmatrix}$$

Damit ist

$$\chi_f(t) = \prod_{i=1}^m (t - x_i)^{g_i}.$$

Hat andererseits das charakteristische Polynom diese Gestalt, so wähle man in jedem Eigenraum  $\ker(\text{id}_V x_i - f)$  eine Basis  $C_i, i = 1, \dots, m$ . Da Eigenvektoren zu verschiedenen Eigenwerten linear unabhängig sind, und wegen

$$g_1 + \cdots + g_m = k_1 + \cdots + k_m = \dim V$$

liefert  $B := \bigcup_{i=1}^m C_i$  eine Basis von  $V$ .

#### 4.4.11 Korollar

Ein Endomorphismus  $f \in \text{End}(V)$  mit  $n = \dim V$  paarweise verschiedenen Eigenwerten ist diagonalisierbar.

**Beweis** Für die geometrischen und algebraischen Vielfachheiten jedes Eigenwerts gilt

$$1 \leq g_i \leq k_i \text{ und } \sum_{i=1}^n k_i \leq n.$$

Damit folgt

$$\forall i = 1, \dots, n : k_i = 1 \text{ und } \sum_{i=1}^n k_i = n,$$

d.h. das charakteristische Polynom zerfällt in Linearfaktoren und  $\forall i = 1, \dots, n : k_i = g_i$ .

#### 4.4.12 Satz

Ein Endomorphismus  $f \in \text{End}(V)$  ist genau dann trigonalisierbar, wenn das charakteristische Polynom in Linearfaktoren zerfällt.

**Bemerkung** Da Diagonalisierbarkeit bzw. Trigonalisierbarkeit durch die Existenz einer Darstellungsmatrix in spezieller Gestalt definiert wurde, wird in den Charakterisierungen immer (implizit)  $\dim V < \infty$  angenommen.

**Beweis** Wir wissen schon: Ist  $f$  trigonalisierbar, so zerfällt  $\chi_f(t)$  in Linearfaktoren. Umkehrung: Beweis durch vollständige Induktion über  $n = \dim V$ .

Für  $n = 1$  ist nichts zu zeigen. Sei die Behauptung für  $n - 1$  bewiesen. Für  $n$  folgt dann:

Da  $\chi_f(t)$  in Linearfaktoren zerfällt

$$\chi_f(t) = \prod_{i=1}^n (t - x_i)$$

für geeignete  $x_1, \dots, x_n$ , ist  $x_1$  Eigenwert von  $f$ . Nun seien

- $b_1$  ein Eigenvektor zum Eigenwert  $x_1$  und  $U := [\{b_1\}]$ ,
- $U' \subset V$  ein zu  $U$  komplementärer Unterraum, und
- $p, p' \in \text{End}(V)$  die zur direkten Zerlegung  $V = U \oplus U'$  gehörenden Projektionen,

$$U = p(V) = \ker p' \text{ und } U' = p'(V) = \ker p,$$

- und  $f' := p' \circ f|_{U'} \in \text{End}(U')$ .

Da  $U (\neq \{0\})$   $f$ -invarianter UR von  $V$  ist, faktorisiert das charakteristische Polynom

$$\chi_f(t) = \chi_{f|_U}(t) \cdot \chi_{f'}(t) = (t - x_1) \cdot \chi_{f'}(t);$$

also zerfällt  $\chi_{f'}(t)$  in Linearfaktoren,

$$\chi_{f'}(t) = \prod_{i=2}^n (t - x_i).$$

Nach Induktionsannahme existiert also eine Basis  $B' = (b_2, \dots, b_n)$  von  $U'$ , sodass  $\xi_{B'}^{B'}(f)$  obere Dreiecksmatrix ist. Mit  $B = (b_1, \dots, b_n)$  als Basis von  $V$  gilt dann:

$$\xi_B^B(f) = \begin{pmatrix} x_1 & Y \\ 0 & \xi_{B'}^{B'}(f') \end{pmatrix}$$

ist obere Dreiecksmatrix.

## 4.5 Der Satz von Cayley-Hamilton

### 4.5.1 Satz

Für  $f \in \text{End}(V)$  gilt  $\chi_f(f) = 0$ .

**Unfug-Beweis** Durch direktes Einsetzen erhält man

$$\chi_f(f) = \det(\text{id}_V f - f) = \det 0 = 0.$$

**Zum Verständnis des Satzes** Ist  $V$  ein  $K$ -VR mit  $n = \dim V < \infty$  und  $f \in \text{End}(V)$ , so ist

$$\chi_f(t) = \sum_{k=0}^n t^k a_k \in K[t]$$

ein (abstraktes) Polynom in der Variablen  $t$  ( $= e_1 \in K^{\mathbb{N}}$ ) und der Einsetzungshomomorphismus  $\psi_f : K[t] \rightarrow \text{End}(V)$  (also ein Algebramorphismus) liefert

$$\chi_f(f) = \psi_f(\chi_f(t)) = \sum_{k=0}^n f^k a_k.$$

Der Satz sagt, dass  $0 = \chi_f(f) \in \text{End}(V)$ , d.h.

$$\forall v \in V : \chi_f(f)(v) = 0.$$

### 4.5.2 Definition & Lemma

Seien  $f \in \text{End}(V)$  und  $B$  eine  $f$ -zyklische Basis von  $V$ , d.h. eine Basis der Form

$$B = (b_1, \dots, b_n) = (b, f(b), \dots, f^{n-1}(b)).$$

Dann existieren  $a_0, \dots, a_{n-1} \in K$  mit

$$f^n(b) + \sum_{k=0}^{n-1} f^k(b) a_k = 0,$$

mit diesen Koeffizienten ist

$$\chi_f(t) = t^n + t^{n-1}a_{n-1} + \dots + ta_1 + a_0.$$

**Bemerkung** Im Allgemeinen existiert zu  $f \in \text{End}(V)$  keine  $f$ -zyklische Basis von  $V$ , z.B. für  $f = \text{id}_V$  und  $\dim V \geq 2$ .

**Beweis** Da  $B = (b, f(b), \dots, f^{n-1}(b))$  eine Basis ist, ist  $f^n(b) \in [B]$  und damit existieren die  $a_k$  mit

$$0 = f^n(b) + \sum_{k=0}^{n-1} f^k(b)a_k.$$

Damit ist die Darstellungsmatrix von  $f$

$$\xi_B^B(f) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & -a_0 \\ 1 & 0 & \vdots & \vdots & -a_1 \\ 0 & 1 & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & -a_{n-1} \end{pmatrix} =: X$$

und Entwicklung von  $\chi_f(t) = \det(E_n t - \xi_B^B(f))$  nach der ersten Zeile(nach Laplaceschem Entwicklungssatz – dieser Satz war „nur“ eine Methode, die Terme in der Leibniz-Formel zu sortieren) liefert

$$\begin{aligned} \det(E_n t - X) &= \det \begin{pmatrix} t & 0 & \cdots & 0 & a_0 \\ -1 & t & \vdots & \vdots & a_1 \\ 0 & -1 & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & t & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & -1 & t + a_{n-1} \end{pmatrix} \\ &= t \det \begin{pmatrix} t & 0 & \cdots & 0 & a_1 \\ -1 & t & \vdots & \vdots & a_2 \\ 0 & -1 & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & t & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & -1 & t + a_{n-1} \end{pmatrix} + (-1)^{n+1} a_0 \det(X_{1n}) \end{aligned}$$

$$\stackrel{\text{mit Ind.}}{=} t\{t^n n - 1 + tn - 2a_{n-1} + \cdots + a_1\} + a_0 = t^n + t^{n-1}a_{n-1} + \dots + ta_1 + a_0,$$

wie behauptet.

**Beispiel** Zur Lösung des reellen *Anfangswertproblems*

$$y'' + 2y' - 3y = 0, \quad \begin{cases} y(0) = 4 \\ y'(0) = 0 \end{cases}$$

schreiben wir dieses als System erster Ordnung mit dem Ansatz  $y_1 = y$  und  $y_2 = y'$ :

Daraus erhält man mit  $Y = (y_1, y_2)$

$$\begin{aligned} Y' &= (y'_1, y'_2) = (y', y'') = (y', -2y' + 3y) \\ &= (y, y') \begin{pmatrix} 0 & 3 \\ 1 & -2 \end{pmatrix} = YX \text{ mit } X = \begin{pmatrix} 0 & 3 \\ 1 & -2 \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

d.h. wir suchen eine  $\frac{d}{ds}$ -zyklische Basis  $(y, \frac{d}{ds}y) = (y, y')$  eines 2-dim UVR  $[(y, y')] \subset C^\infty(\mathbb{R})$  bezüglich derer  $\frac{d}{ds} \in \text{End}(C^\infty(\mathbb{R}))$  Darstellungsmatrix  $X$  hat.

Der Ansatz  $y(s) = e^{xs}(v_0, v_1)$  reduziert das AWP auf ein Eigenwertproblem.

$$0 = (Y' - YX)(s) = \left( \frac{d}{ds}Y - YX \right)(s) = \underbrace{e^{xs}(v_0, v_1)}_Y \{E_2x - X\}$$

bzw. (vgl. Abschnitt 3.1) mit dem zur transponierten Matrix  $X^t$  assoziierten Endomorphismus  $f_{X^t} \in \text{End}(\mathbb{R}^2)$

$$f_{X^t}(v) = vx \text{ für } x \in \mathbb{R} \text{ und } v \in \mathbb{R}^2.$$

Nach obigem Lemma sind die Eigenwerte Lösungen der Gleichung

$$0 = \chi_{X^t}(x) = \chi_X(x) \stackrel{\text{Lemma}}{=} x^2 + 2x - 3 = (x - 1)(x + 3).$$

Also sind  $x_1 = 1$  und  $x_2 = -3$  die Eigenwerte; zugehörige Eigenvektoren erhält man als Lösungen der linearen Gleichungssysteme

$$(0, 0) = (v_0, v_1)(E_2x_i - X) = (v_0, v_1) \begin{pmatrix} x_i & -3 \\ -1 & x_i + 2 \end{pmatrix} = \begin{cases} (v_0, v_1) \begin{pmatrix} 1 & -3 \\ -1 & 3 \end{pmatrix} & \text{für } i = 1 \\ (v_0, v_1) \begin{pmatrix} -3 & -3 \\ -1 & -1 \end{pmatrix} & \text{für } i = 2 \end{cases}$$

Damit bekommt man Eigenvektoren  $(v_0, v_1) = (1, 1)$  zum Eigenwert  $x = 1$  und  $(v_0, v_1) = (1, -3)$  zum Eigenwert  $x = -3$ .

Die allgemeine, durch *Superposition* (Linearkombination) erhaltene Lösung der Differentialgleichung ist also

$$s \mapsto Y(s) = e^s(1, 1)c_1 + e^{-3s}(1, -3)c_2$$

mit Koeffizienten  $c_1, c_2 \in \mathbb{R}$ . Abgleich der „Integrationskonstanten“  $c_1$  und  $c_2$  mit den Anfangsbedingungen liefert dann die Lösung

$$s \mapsto y(s) = 3e^s + e^{-3s}.$$

**Bemerkung** Man bemerke:  $(y, y')$  ist linear unabhängig für die Lösung, ist also tatsächlich  $\frac{d}{ds}$ -zyklische Basis eines 2-dim URs  $[(y, y')] \subset C^\infty(\mathbb{R})$  – obwohl die den gleichen Raum aufspannenden „Basislösungen“

$$s \mapsto e^s \text{ und } s \mapsto e^{-3s}$$

keine  $\frac{d}{ds}$ -zyklischen Basen erzeugen, da sie lineare Differentialgleichungen erster Ordnung (mit konstanten Koeffizienten) lösen.

### 4.5.3 Korollar

Besitzt  $V$  eine  $f$ -zyklische Basis für  $f \in \text{End}(V)$ , so gilt  $\chi_f(f) = 0$ .

**Beweis** Sei also  $B = (b_1, \dots, b_n) = (b, f(b), \dots, f^{n-1}(b))$   $f$ -zyklische Basis von  $V$  und  $a_0, \dots, a_{n-1} \in K$  so, dass

$$0 = f^n(b) + \sum_{k=0}^{n-1} f^k(b) a_k.$$

Dann gilt

$$\chi_f(f)(b_1) = \chi_f(f)(b) = \left( f^n + \sum_{k=0}^{n-1} f^k a_k \right) (b) = f^n(b) + \sum_{k=0}^{n-1} f^k(b) a_k.$$

Damit folgt für  $i = 2, \dots, n$

$$\chi_f(f)(b_i) = \chi_f(f) \left( f^{i-1}(b) \right) \stackrel{2}{=} f^{i-1}(\chi_f(f)(b)) = 0.$$

Da also  $V = [B] \subset \ker \chi_f(f)$ , folgt  $\chi_f(f) = 0$ .

**Bemerkung** Damit ist der Satz von Cayley-Hamilton bewiesen, sofern  $V$  eine  $f$ -zyklische Basis besitzt.

### 4.5.4 Lemma

Für  $f \in \text{End}(V)$  und  $v \in V^\times$  sei

$$U := \left[ \left( f^k(v) \right)_{k \in \mathbb{N}} \right].$$

---

<sup>2</sup>Aufgrund der Linearität der Endomorphismen  $\text{End}(V)$  als unitäre Algebra.



Damit ist  $U$  ein  $f$ -invarianter UVR von  $V$ . Ist  $\dim V < \infty$ , so besitzt  $U$  eine  $f$ -zyklische Basis  $(v, f(v), \dots, f^{r-1}(v))$ .

**Beweis** Offenbar ist  $U$   $f$ -invarianter UR:

- $U$  ist (als lineare Hülle einer Familie) ein UVR von  $V$ ;
- da gilt

$$\forall k \in \mathbb{N} : f\left(f^k(v)\right) = f^{k+1}(v) \in U$$

$$\text{folgt, dass } f(U) = f\left(\left[\left(f^k(v)\right)_{k \in \mathbb{N}}\right]\right) = \left[\left(f^{k+1}(v)\right)_{k \in \mathbb{N}}\right] \subset U.$$

Ist  $\dim V < \infty$  und  $v \neq 0$ , so existiert  $r \in \mathbb{N}$ , sodass

$$(v, \dots, f^{r-1}(v)) \text{ linear unabhängig und } f^r(v) \in \left[(v, \dots, f^{r-1}(v))\right];$$

damit ist  $(v, f(v), \dots, f^{r-1}(v))$   $f$ -zyklische Basis von  $U$ :

1.  $(v, \dots, f^{r-1}(v))$  ist linear unabhängig.
2.  $f^r(v) \in [(v, \dots, f^{r-1}(v))]$ , damit gilt

$$\forall k \in \mathbb{N} : k \geq r \Rightarrow f^k(v) \in \left[(v, \dots, f^{r-1}(v))\right]$$

wie man z.B. mit Induktion sehen kann: ist

$$f^{k-1}(v) = \sum_{j=0}^{r-1} f^j(v)x_j \in \left[(v, \dots, f^{r-1}(v))\right],$$

so folgt

$$f^k(v) = \sum_{j=1}^r f^j(v)x_{j-1} = f^r(v)x_{r-1} + \sum_{j=1}^{r-1} f^j(v)x_{j-1} \in \left[(v, \dots, f^{r-1}(v))\right]$$

und damit

$$U = \left[\left(f^k(v)\right)_{k \in \mathbb{N}}\right] \in \left[(v, \dots, f^{r-1}(v))\right].$$

#### 4.5.5 Beweis vom Satz von Cayley-Hamilton

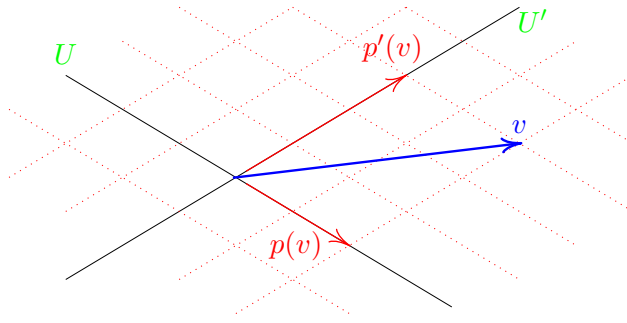
Zu zeigen: für  $f \in \text{End}(V)$  gilt  $\chi_f(f) = 0$ , d.h.

$$\forall v \in V : \chi_f(f)(v) = 0.$$

Seien also  $v \in V^\times$  und

$$U := \left[\left(f^k(v)\right)_{k \in \mathbb{N}}\right] \subset V.$$

Mit einem zu  $U$  komplementären UVR  $U' \subset V$ ,  $V = U \oplus U'$ , und den zugehörigen Projektionen



$$p : V \rightarrow V, p(V) = U, \ker p = U' \text{ bzw.}$$

$$p' : V \rightarrow V, p'(V) = U', \ker p' = U,$$

ist dann  $\chi_f(t) = \chi_{f'}(t) \cdot \chi_{f|_U}(t)$  mit  $f' := p' \circ f|_{U'} \in \text{End}(U')$ .

Damit folgt

$$\chi_f(f)(v) = \chi_{f'}(f) \left( \chi_{f|_U}(f)(v) \right) = \chi_{f'}(f)(0) = 0$$

nach Korollar oben, da  $U$  eine  $f$ -zyklische Basis besitzt und  $v \in U$ .

#### 4.5.6 Definition

Sei  $V$  ein  $K$ -VR und  $f \in \text{End}(V)$ . Dann heißt  $p \in K[t]$

- *Annulatorpolynom* von  $f$ , falls  $p(f) = 0$ ;
- *Minimalpolynom* von  $f$ , falls  $p(t)$  normiertes Annulatorpolynom minimalen Grades ist.

**Bemerkung** Jedes (polynomiale) Vielfache

$$p(t) = q(t)\mu_f(t) \in K[t]$$

eines Minimalpolynoms  $\mu_f(t)$  von  $f$  ist ein Annulatorpolynom, da

$$\forall v \in V : p(f)(v) = (q(f) \circ \mu_f(f))(v) = q(f)(\mu_f(f)(v)) = q(f)(0) = 0$$

**Bemerkung** Nach dem Satz von Cayley-Hamilton hat jeder Endomorphismus  $f \in \text{End}(f)$  ein Annulatorpolynom, also auch ein Minimalpolynom – wenn  $\dim V < \infty$ .

#### 4.5.7 Lemma

Ist  $p(t) \in K[t]$  Annulatorpolynom von  $f \in \text{End}(V)$ , so ist jedes Minimalpolynom  $\mu_f(t) \in K[t]$  Teiler von  $p(t)$ .

**Beweis** Seien  $q(t), r(t) \in K[t]$  die (nach dem euklidischen Divisionsalgorithmus) eindeutigen Polynome mit

$$p(t) = q(t)\mu_f(t) + r(t) \text{ und } \deg r(t) < \deg \mu_f(t).$$

Dies liefert

$$r(f) = p(f) - q(f) \circ \mu_f(f) = 0 - q(f)(0) = 0,$$

also  $r(t) = 0$ , denn andernfalls wäre  $\mu_f(t)$  nicht normiertes Annulatorpolynom minimalen Grades.

#### 4.5.8 Korollar

Das Minimalpolynom  $\mu_f(t) \in K[t]$  eines Endomorphismus  $f \in \text{End}(V)$  ist eindeutig.

**Beweis** Sind  $\mu_f(t), \tilde{\mu}_f(t) \in K[t]$  Minimalpolynome von  $f \in \text{End}(V)$ , so gilt

$$\exists! q(t) \in K[t] : \tilde{\mu}_f(t) = q(t)\mu_f(t)$$

wobei

- $\deg q(t) = 0$ , da  $\deg \tilde{\mu}_f(t) \leq \deg \mu_f(t)$ ,
- $q(t) = 1$ , da  $\tilde{\mu}_f(t)$  und  $\mu_f(t)$  normiert sind.

Daher ist

$$\tilde{\mu}_f(t) = 1 \cdot \mu_f(t) = \mu_f(t).$$

**Bemerkung** Wie für Endomorphismen kann man Annulatorpolynome, Minimalpolynome, usw. auch für Matrizen  $X \in K^{n \times n}$  definieren:

- mithilfe der assoziierten Endomorphismen  $f_X \in \text{End}(K^n)$ , oder
- mithilfe des Einsetzungshomomorphismus  $\psi_X : K[t] \rightarrow K^{n \times n}$ .

Beide Methoden liefern das gleiche Ergebnis durch den Algebramorphismus zwischen den Endomorphismen und den quadratischen Matrizen.

**Bemerkung & Beispiel** Zerfällt das charakteristische Polynom in Linearfaktoren, so zerfällt auch das Minimalpolynom in dieselben Linearfaktoren:

$$\chi_f(t) = \prod_{i=1}^m (t - x_i)^{k_i} \Rightarrow \mu_f(t) = \prod_{i=1}^m (t - x_i)^{m_i},$$

wobei für  $i = 1, \dots, m$  gilt  $1 \leq m_i \leq k_i$ .

Zum Beispiel:

- $X = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ :  $\chi_{f_X} = t(t-1) = \mu_{f_X}(t)$
- $X = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ :  $\chi_{f_X} = (t-1)^2 \Rightarrow \mu_{f_X}(t) = (t-1)$
- $X = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ :  $\chi_{f_X} = (t-1)^2 = \mu_{f_X}(t)$ .

**Bemerkung** Die Definition des charakteristischen Polynoms ist etwas problematisch:

$$\chi_f(t) := \det(\text{id}_V t - f)$$

ist „gut“ für Polynomfunktionen, aber „nicht korrekt“ für abstrakte Polynome; die Definition

$$\chi_f(t) := \sum_{\sigma \in S_n} \text{sgn}(\sigma) \prod_{i=1}^n (\delta_{\sigma(j)j} - x_{\sigma(j)j}) \in K[t]$$

mithilfe der Darstellungsmatrix  $X = (x_{ij})_{i,j \in \{1, \dots, n\}} = \xi_B^B(f)$  von  $f$  bzgl. einer Basis  $B$  und der Leibniz-Formel ist nicht sehr übersichtlich. Vergleiche auch [Axler, Kap. 8] zum Thema.

Im Gegensatz dazu: Definitionen von „Annulatorpolynom“ und „Minimalpolynom“ etc. sind einfach (konzeptionell).

Frage: Braucht man das charakteristische Polynom überhaupt? Man kommt auch ohne das charakteristische Polynom „recht weit“:

- Für  $\dim V < \infty$  folgt die Existenz eines Annulatorpolynoms, und damit des Minimalpolynoms recht einfach wegen  $\dim \text{End}(V) < \infty$ .
- Durch Einsetzen: Jeder Eigenwert eines Endomorphismus ist Nullstelle seines Minimalpolynoms.
- Umgekehrt ist auch jede Nullstelle des Minimalpolynoms Eigenwert – ist  $\mu_f(x) = 0$ , so existiert  $q(t) \in K[t]$  mit

$$\mu_f(t) = q(t)(t - x);$$

wäre  $x$  kein Eigenwert, also  $f - \text{id}_V x \in \text{Gl}(V)$ , so gälte

$$(f - \text{id}_V x)(V) = V \Rightarrow \{0\} = \mu_f(f)(V) = q(f)(V),$$

d.h.  $\mu_f(t)$  wäre nicht Minimal-Polynom.

- Ein Endomorphismus ist diagonalisierbar, wenn sein Minimal-Polynom in paarweise verschiedene Linearfaktoren zerfällt.

Nachteil des Minimal-Polynoms: schwierig berechenbar?

## 5 Längen- und Winkelmessung

Plan: Längen und Winkel (in „Punkträumen“  $\cong$  affinen Räumen) verstehen.  
Algebraisch: via Produkte (bilineare – oder fast bilineare – Abbildungen).

### 5.1 Bilinearformen & Sesquilinearformen

**Zur Erinnerung** Sind  $V$  und  $W$   $K$ -VR, so nennt man eine Abbildung

$$\beta : V \times V \rightarrow W$$

*bilinear* oder ein *Produkt*, wenn sie in jedem Argument linear ist:

- (i)  $\forall w \in W : V \ni v \mapsto \beta(v, w) \in W$  ist linear;
- (ii)  $\forall v \in V : V \ni w \mapsto \beta(v, w) \in W$  ist linear.

Zu vorgegebenen Werten  $\beta_{ij} \in W$  auf einer Basis  $(b_i)_{i \in I}$  von  $V$  existiert dann eine eindeutige Bilinearform  $\beta$  (Fortsetzungssatz Abschnitt 4.3):

$$\exists! \beta : V \times V \rightarrow W \text{ bilinear} : \forall i, j \in I : \beta(b_i, b_j) = \beta_{ij}.$$

**Bemerkung** Man kann auch bilineare Abbildungen  $V \times V' \rightarrow W$  betrachten und, zum Beispiel, auch einen Fortsetzungssatz beweisen.

Wir benötigen eine Verallgemeinerung in eine andere Richtung:

#### 5.1.1 Definition

Seien  $V$  ein  $K$ -VR und  $K \ni x \mapsto \bar{x} \in K$  ein (Körper-) Automorphismus, d.h. eine bijektive Abbildung mit

$$\overline{x + y} = \bar{x} + \bar{y} \text{ und } \overline{xy} = \bar{x} \cdot \bar{y}$$

für alle  $x, y \in K$ . Eine Abbildung  $\sigma : V \times V \rightarrow K$  heißt dann *Sesquilinearform* (bzgl.  $\bar{\cdot}$ ), falls

- (i)  $\forall w \in W : V \ni v \mapsto \sigma(v, w) \in K$  ist linear, d.h.  $\sigma(v, \cdot) \in V^*$ ;
- (ii)  $\forall w \in W : V \ni v \mapsto \sigma(v, w) \in K$  ist *semilinear*, d.h.
  - (a)  $\forall v, v' \in V : \sigma(v + v', w) = \sigma(v, w) + \sigma(v', w)$  und
  - (b)  $\forall v \in V \forall x \in K : \sigma(vx, w) = \bar{x}\sigma(v, w)$ .

**Beispiel** Die Identität  $K \ni x \mapsto \bar{x} := x \in K$  ist offensichtlich ein Körperautomorphismus für jeden Körper  $K$ . *Bilinearformen* sind genau die Sesquilinearformen bezüglich  $\text{id}_K$ .

**Beispiel** Für  $K = \mathbb{C}$  liefert *komplexe Konjugation* einen Körperautomorphismus (keinen VR-Automorphismus, vgl. Abschnitt 1.4):

$$\mathbb{C} \ni x + iy \mapsto \overline{x + iy} := x - iy \in \mathbb{C}.$$

Dieses Beispiel ist unser Grund für die Einführung des Begriffs der Sesquilinearform.

**Bemerkung** Ist  $\sigma$  Bilinearform und Sesquilinearform bezüglich  $\bar{\cdot}$ , so ist  $\sigma$  oder  $\bar{\cdot}$  trivial:

$$\forall x \in K \forall v, w \in V : 0 = \sigma(vx, w) - \sigma(v, w) = (x - \bar{x})\sigma(v, w)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \forall v, w \in V : \sigma(v, w) = 0 \text{ oder} \\ \exists v, w \in V : \sigma(v, w) \neq 0 \wedge \forall x \in K : \bar{x} = x. \end{cases}$$

**Bemerkung** In  $\mathbb{Z}_p, \mathbb{Q}$  und  $\mathbb{R}$  gibt es nur *einen* Körperautomorphismus:  $\text{id}_K$ . Ein Automorphismus  $\bar{\cdot}$  von  $\mathbb{C}$  mit  $\overline{\mathbb{R}} = \mathbb{R}$  ist trivial,  $\bar{\cdot} = \text{id}_{\mathbb{C}}$  oder die komplexe Konjugation.

### 5.1.2 Fortsetzungssatz für Sesquilinearformen

Sind  $V$  ein  $K$ -VR und  $K \ni x \mapsto \bar{x} \in K$  ein Körperautomorphismus,  $(b_i)_{i \in I}$  Basis von  $V$  und  $(s_{ij})_{i,j \in I}$  eine Familie in  $K$ , so existiert eine eindeutige Sesquilinearform  $\sigma$  mit

$$\forall i, j \in I : \sigma(b_i, b_j) = s_{ij}.$$

**Beweis** Wir imitieren den Beweis unseres ersten Fortsetzungssatzes für lineare Abbildungen:

Eindeutigkeit: Sei  $\sigma$  eine Sesquilinearform mit der gewünschten Eigenschaft oben; gilt

$$v = \sum_{i \in I} b_i x_i \text{ und } w = \sum_{i \in I} b_i y_i$$

so folgt

$$\sigma(v, w) = \sum_{i,j \in I} \bar{x}_i \sigma(b_i, b_j) y_j = \sum_{i,j \in I} \bar{x}_i s_{ij} y_j$$

d.h.  $\sigma$  ist durch die Familie  $(s_{ij})_{i,j \in I}$  eindeutig bestimmt.

Existenz: Da jeder Vektor  $v \in V$  eine eindeutige Basisdarstellung  $v = \sum_{i \in I} b_i x_i$  hat, wird durch

$$\sigma : V \times V \rightarrow K, (v, w) = \left( \sum_{i \in I} b_i x_i, \sum_{j \in I} b_j y_j \right)$$

$$\mapsto \sigma(v, w) := \sum_{i,j \in I} \overline{x_i} s_{ij} y_j$$

eine Abbildung wohldefiniert. Offenbar (nachrechnen) ist  $\sigma$  dann sesquilinear.

**Bemerkung** Jede Sesquilinearform  $\sigma : V \times V \rightarrow K$  liefert eine semi-lineare Abbildung

$$V \ni v \mapsto \sigma(v, \cdot) \in V^*.$$

Mit einem „Fortsetzungssatz für semi-lineare Abbildungen“ (Aufgabe 34) hätte man auch den früher skizzierten Beweis für bilineare Abbildungen imitieren können.

### 5.1.3 Buchhaltung

**Gramsche Matrix** Ist  $n = \dim V < \infty$  und  $B = (b_1, \dots, b_n)$  Basis von  $V$ , so kann man eine Sesquilinearform  $\sigma : V \times V \rightarrow K$  durch eine Matrix  $S$  beschreiben:

$$\begin{array}{c|ccc} \sigma & b_1 & \dots & b_n \\ \hline b_1 & s_{11} & & s_{1n} \\ \vdots & & \ddots & \\ b_n & s_{n1} & & s_{nn} \end{array}$$

Diese Matrix

$$\Gamma_B(\sigma) = S = (\sigma(b_i, b_j))_{i,j \in \{1, \dots, n\}}$$

heißt die Darstellungsmatrix oder *Gramsche Matrix* von  $\sigma$  bezüglich  $B$ . Für Vektoren

$$v = \sum_{i=1}^n b_i x_i = BX \text{ und } w = \sum_{j=1}^n b_j y_j = BY$$

ist dann

$$\begin{aligned} \sigma(v, w) &= \sum_{i,j=1}^n \overline{x_i} s_{ij} y_j = \overline{X}^t SY \\ &= (\overline{x_1}, \dots, \overline{x_n}) \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n s_{1j} y_j \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^n s_{nj} y_j \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^n \overline{x_i} \sum_{j=1}^n s_{ij} y_j. \end{aligned}$$

**Transformationsformel** Ein Basiswechsel  $B' = BP$  mit  $P = \xi_B^{B'} \in Gl(n)$  liefert dann

$$v = BX = (B'P^{-1})X = B' \underbrace{(P^{-1}X)}_{X'} \text{ und } w = B' \underbrace{(P^{-1}Y)}_{Y'}$$

und damit für  $X, Y \in K^{n \times 1}$

$$\overline{X}^t SY = \overline{X'}^t \underbrace{(\overline{P}^t SP)}_{S'} Y'$$

woraus die *Transformationsformel für Gramsche Matrizen* folgt

$$S' = \overline{P}^t SP,$$

wobei  $\overline{P}^t$  die Transponierte der Matrix mit Einträgen  $\overline{p_{ij}}$  ist.

**Äquivalenz von Matrizen** Dies liefert einen weiteren Äquivalenzbegriff für quadratische Matrizen  $S \in K^{n \times n}$ :

$$S' \sim S :\Leftrightarrow \exists P \in Gl(n) : S' = \overline{P}^t SP.$$

Die verschiedenen Begriffe der Äquivalenz von Matrizen (vgl. 3.1 & 4.2) spiegeln die verschiedenen Funktionen/Bedeutungen von Matrizen wider.

**Bemerkung** Die Menge der Sesquilinearformen auf einem  $K$ -VR ist selbst ein  $K$ -VR. Ist  $n = \dim V < \infty$  und  $B$  Basis von  $V$ , so erhält man (Fortsetzungssatz) einen Isomorphismus

$$K^{V \times V} \supset \{\sigma : V \times V \rightarrow K \text{ Sesquilinearform}\} \ni \sigma \mapsto \Gamma_B(\sigma) \in K^{n \times n}.$$

### 5.1.4 Beispiel & Definition

Sei  $\overline{\cdot} : K \rightarrow K$  Körperautomorphismus; jedes  $S \in K^{n \times n}$  liefert dann eine eindeutige Sesquilinearform

$$\sigma_S : K^n \times K^n \rightarrow K \text{ mit } (e_i, e_j) \mapsto \sigma_S(e_i, e_j) := s_{ij},$$

die zu  $S$  *assoziierte Sesquilinearform*.

Für  $S = E_n$  bezeichnet man  $\sigma_S$  auch als *kanonische Sesquilinearform*.

### 5.1.5 Definition

Eine Sesquilinearform  $\sigma : V \times V \rightarrow K$  auf einem  $K$ -VR bzgl. eines Automorphismus  $\overline{\cdot} : K \rightarrow K$  nennen wir

- (i) *symmetrisch*, falls  $\forall v, w \in V : \sigma(w, v) = \overline{\sigma(v, w)}$ ;
- (ii) *schiefssymmetrisch*, falls  $\forall v, w \in V : \sigma(w, v) = -\overline{\sigma(v, w)}$ ;
- (iii) *alternierend*, falls  $\forall v \in V : \sigma(v, v) = 0$ .

Falls  $K = \mathbb{C}$  und  $\overline{\cdot}$  komplexe Konjugation sind, so nennt man eine symmetrische Sesquilinearform auch *Hermiteische Sesquilinearform*.



**Bemerkung** Ist  $\sigma$  nicht-trivial und (schief-)symmetrisch, so muss  $\bar{\cdot}$  eine Involution sein.

Nämlich: Wähle  $v, w \in V$  mit  $\sigma(v, w) = 1$ ; dann gilt

$$\forall x \in K : \overline{\overline{x}} = \overline{\sigma(vx, w)} = \pm \sigma(w, vx) = \overline{\overline{x}\sigma(v, w)} = \pm \sigma(w, v)x = \overline{\sigma(v, w)}x = x.$$

Ist  $\text{Char}(K) \neq 2$  und  $\bar{\cdot}$  Involution, so kann jede Sesquilinearform in einen symmetrischen und einen schiefsymmetrischen Anteil zerlegt werden:

$$\forall v, w \in V : \sigma(v, w) = \frac{1}{2} \left( \sigma(v, w) + \overline{\sigma(w, v)} \right) + \frac{1}{2} \left( \sigma(v, w) - \overline{\sigma(w, v)} \right).$$

**Bemerkung** Ist  $\text{Char}(K) \neq 2$  und  $\bar{\cdot} = \text{id}_K$ , so sind „alternierend“ und „schiefsymmetrisch“ äquivalent für eine Sesquilinearform  $\sigma$ .

Andererseits ist jede alternierende Sesquilinearform bilinear, d.h.  $\bar{\cdot} = \text{id}_K$  oder  $\sigma = 0$ .

**Buchhaltung** Unter den folgenden Annahmen:

- $\text{Char}(K) \neq 2$  und  $\bar{\cdot}$  Involution;
- $n = \dim V < \infty$  und  $B$  ist Basis von  $V$ ;

gilt für die Gramsche Matrix  $S = \Gamma_B(\sigma)$  einer Sesquilinearform  $\sigma$  auf  $V$ :

- $0 = \overline{S}^t - S \Leftrightarrow \sigma$  symmetrisch;<sup>1</sup>
- $0 = S + \overline{S}^t \Leftrightarrow \sigma$  schiefsymmetrisch.

Nämlich:

$$\overline{S}^t = \begin{pmatrix} \overline{\sigma(b_1, b_1)} & \overline{\sigma(b_1, b_2)} & \cdots & \overline{\sigma(b_1, b_n)} \\ \overline{\sigma(b_2, b_1)} & & & \vdots \\ \vdots & & & \vdots \\ \overline{\sigma(b_n, b_1)} & \cdots & \cdots & \overline{\sigma(b_n, b_n)} \end{pmatrix}^t = \begin{pmatrix} \overline{\sigma(b_1, b_1)} & \overline{\sigma(b_2, b_1)} & \cdots & \overline{\sigma(b_n, b_1)} \\ \overline{\sigma(b_1, b_2)} & & & \vdots \\ \vdots & & & \vdots \\ \overline{\sigma(b_1, b_n)} & \cdots & \cdots & \overline{\sigma(b_n, b_n)} \end{pmatrix}$$

$$S = \begin{pmatrix} \sigma(b_1, b_1) & \sigma(b_1, b_2) & \cdots & \sigma(b_1, b_n) \\ \sigma(b_2, b_1) & & & \vdots \\ \vdots & & & \vdots \\ \sigma(b_n, b_1) & \cdots & \cdots & \sigma(b_n, b_n) \end{pmatrix}$$

---

<sup>1</sup>bis auf Faktor 2: Gramsche Matrix des schiefsymmetrischen Anteils von  $\sigma$

### 5.1.6 Definition

Sei  $\sigma$  symmetrische Sesquilinearform auf einem Vektorraum  $V$ . Zwei Vektoren  $v, w \in V$  heißen *orthogonal* (bzgl.  $\sigma$ ),

$$w \perp v, \text{ falls } \sigma(v, w) = 0.$$

Der *Orthogonalraum* einer Menge  $\emptyset \neq S \subset V$  ist der UVR

$$S^\perp := \bigcap_{s \in S} \ker \underbrace{\sigma(s, \cdot)}_{\in V^*}.$$

**Bemerkung** Wegen der Symmetrie von  $\sigma$  ist die *Orthogonalitätsrelation* symmetrisch,

$$w \perp v \Leftrightarrow v \perp w.$$

**Bemerkung** Da  $\forall v \in V : \sigma(v, \cdot) \in V^*$ , ist der Orthogonalraum wohldefiniert und (als Schnitt von UVR) ein UVR. Offenbar gilt

$$\tilde{S} \subset S \Rightarrow \tilde{S}^\perp \supset S^\perp.$$

Damit folgt direkt  $S^\perp \supset [S]^\perp$ , sind andererseits  $w \in S^\perp$  und  $v \in [S]$ , so gilt

$$v = \sum_{s \in S} s x_s \Rightarrow \sigma(v, w) = \sum_{s \in S} \overline{x_s} \sigma(s, w) = 0, \text{ da } \forall s \in S : w \perp s$$

d.h.  $w \in S^\perp \Rightarrow w \in [S]^\perp$ . Insgesamt ist also

$$\forall S \subset V : [S]^\perp = S^\perp.$$

Ähnlich zeigt man für jede Familie  $(U_i)_{i \in I}$  von UVR  $U_i \subset V$ :

$$\left( \sum_{i \in I} U_i \right)^\perp = \bigcap_{i \in I} U_i^\perp.$$

**Bemerkung & Beispiel** Für  $S \subset V$  kann man  $S^{\perp\perp} = (S^\perp)^\perp$  betrachten; im Allgemeinen gilt

$$S \subset S^{\perp\perp} \text{ aber } S \neq S^{\perp\perp}.$$

Ist etwa  $\sigma = 0$ , so ist  $S^\perp = V$  für jede Menge  $\emptyset \neq S \subsetneq V$ ; also ist

$$S^{\perp\perp} = V^\perp = V \neq S.$$

### 5.1.7 Definition

$V^\perp$  ist der *Radikal(-raum)* eines VR mit symmetrischer Sesquilinearform  $\sigma$ ; ist  $V^\perp = \{0\}$ , so heißt  $\sigma$  *radikalfrei* oder *nicht-degeneriert*, andernfalls *degeneriert*.

**Beispiel** Betrachte  $V = \mathbb{R}^2$  mit Standardbasis  $(e_1, e_2)$ .

Ist für eine symmetrische Sesquilinearform (Bilinearform)  $\sigma$  auf  $V$

$$\sigma(e_1, e_1) = 0, \sigma(e_1, e_2) = 1, \sigma(e_2, e_2) = 0$$

so ist  $\sigma$  nicht-degeneriert,  $V^\perp = \{0\}$ , da

$$\begin{aligned} v = e_1 x_1 + e_2 x_2 \perp e_1, e_2 &\Rightarrow \begin{cases} 0 = \sigma(e_1, v) = x_2 \\ 0 = \sigma(e_2, v) = x_1 \end{cases} \\ &\Rightarrow x_1 = x_2 = 0, \end{aligned}$$

also  $V^\perp = \{0\}$ , d.h.  $\sigma$  ist nicht-degeneriert.

Ist aber

$$\sigma(e_1, e_1) = 1, \sigma(e_1, e_2) = 1, \sigma(e_2, e_2) = 1,$$

so ist  $V^\perp = [e_1 - e_2]$ , d.h.  $\sigma$  ist degeneriert.

### 5.1.8 Lemma

Ist  $U \subset V$  ein zum Radikal von  $(V, \sigma)$  komplementärer UVR,  $V = V^\perp \oplus U$ , so ist

$$\sigma|_{U \times U} : U \times U \rightarrow K$$

radikalfrei.

**Beweis** Sei  $u \in U$  im Radikal von  $(U, \sigma|_{U \times U})$ , d.h. es gelte  $\forall v \in U : \sigma(v, u) = 0$ . Weil

$$\forall v \in V^\perp \forall w \in V : v \perp w \Rightarrow \forall v \in V^\perp : v \perp u$$

erhalten wir  $u \in U \cap V^\perp = \{0\}$ .

**Beispiel** Die Einschränkung von  $\sigma$  mit (wie oben)

$$\forall i, j \in \{1, 2\} : \sigma(e_i, e_j) = 1$$

auf jeden UVR  $U = [e_1x_1 + e_2x_2]$  mit  $x_1 + x_2 \neq 0$  ist radikalfrei, denn

$$\sigma(e_1x_1 + e_2x_2, e_1x_1 + e_2x_2) = (x_1 + x_2)^2 \neq 0.$$

## 5.2 Der Satz von Sylvester

**Beispiel** Ist  $\sigma$  symmetrische Sesquilinearform auf  $V = \mathbb{Z}_2^2$  mit

$$\sigma(e_1, e_1) = 0, \sigma(e_1, e_2) = 1, \sigma(e_2, e_2) = 0,$$

so ist  $\sigma$  (wie vorher) nicht-degeneriert,  $V^\perp = \{0\}$ ; trotzdem gilt

$$\forall v \in V : \sigma(v, v) = 0.$$

Das folgende Lemma zeigt, dass dies ein degenerierter Fall ist:

### 5.2.1 Lemma & Definition (Polarisation)

Ist  $\sigma$  symmetrische Bilinearform auf einem  $K$ -VR  $V$  über einem Körper  $K$  mit  $\text{Char } K \neq 2$ , so gilt

$$\forall v, w \in V : \sigma(v, w) = \frac{1}{2} (q(v+w) - q(v) - q(w)),$$

wobei

$$q : V \rightarrow K, v \mapsto q(v) := \sigma(v, v)$$

die zu  $\sigma$  gehörige *quadratische Form* bezeichnet.

**Beweis** Ausrechnen: sind  $v, w \in V$ , so gilt

$$\begin{aligned} q(v+w) &= \sigma(v+w, v+w) \\ &= \sigma(v, v) + \sigma(v, w) + \sigma(w, v) + \sigma(w, w) \\ &= q(v) + 2\sigma(v, w) + q(w) \end{aligned}$$

diese Gleichung kann (da  $\text{Char } K \neq 2$ ) nach  $\sigma(v, w)$  aufgelöst werden.

**Bemerkung** Ist  $\text{Char } K = 2$  so kann man statt

$$q(v+w) = q(v) + 2\sigma(v, w) + q(w)$$

auch

$$q(v+w) - q(v-w) = 4\sigma(v, w)$$

für die Polarisation verwenden.

### 5.2.2 Lemma

Ist  $\sigma$  symmetrische Sesquilinearform auf einem  $K$ -VR  $V$  über einem Körper  $K$  mit  $\text{Char } K \neq 2$ , so gilt

$$\sigma = 0 \Leftrightarrow \forall v \in V : \sigma(v, v) = 0.$$

**Bemerkung** Im Falle einer Bilinearform folgt dies direkt mit Polarisation.

Im Falle eines nicht-trivialen Körperautomorphismus  $\bar{\phantom{x}}$  liefert  $v \mapsto \sigma(v, v)$  wegen

$$K \ni x \mapsto \sigma(vx, vx) - x^2\sigma(v, v) = (\bar{x}x - x^2)\sigma(v, v) \neq 0$$

im Allgemeinen *keine* quadratische Form:

$$\exists x \in K : \exists v \in V : \sigma(vx, vx) = \bar{x}\sigma(v, v)x \neq x^2\sigma(v, v).$$

**Beweis** Ist  $\sigma = 0$ , so folgt trivialerweise

$$\forall v \in V : \sigma(v, v) = 0.$$

Sei nun  $\sigma \neq 0$ , d.h.

$$\exists v, w \in V : \sigma(v, w) \neq 0.$$

Wie vorher berechnet man für  $v, w \in V$

$$\sigma(v + w, v + w) = \sigma(v, v) + \sigma(v, w) + \overline{\sigma(v, w)} + \sigma(w, w).$$

Wähle nun  $v, w \in V$  mit  $\sigma(v, w) \neq 0$ , o.B.d.A.  $\sigma(v, w) = 1$ .<sup>2</sup> Ist  $\sigma(v, v) \neq 0$  oder  $\sigma(w, w) \neq 0$ , so sind wir fertig.

Gilt jedoch  $\sigma(v, v) = \sigma(w, w) = 0$ , so liefert

$$\sigma(v + w, v + w) = 0 + 1 + 1 + 0 \neq 0$$

wieder die Behauptung, da  $\text{Char } K \neq 2$ .

**Vereinbarung** Im Folgenden schließen wir  $\text{Char } K = 2$  aus.

---

<sup>2</sup>Ggf. ersetzt man  $w$  durch  $\frac{w}{\sigma(v, w)}$ .

### 5.2.3 Lemma

Für eine symmetrische Sesquilinearform  $\sigma$  auf  $V$  und  $b \in V$  mit  $\sigma(b, b) \neq 0$  gilt

$$V = [b] \oplus \{b\}^\perp.$$

**Beweis** Es gilt  $V = [b] + \{b\}^\perp$ , da für  $v \in V$

$$v = u + b \frac{\sigma(b, v)}{\sigma(b, b)} \text{ mit } u := v - b \frac{\sigma(b, v)}{\sigma(b, b)} \perp b;^3$$

ist  $v \in [b] \cap \{b\}^\perp$ , so gilt

$$v = bx \text{ für ein } x \in K \text{ und}$$

$$0 = \sigma(b, v) = \sigma(b, bx) = \sigma(b, b)x$$

$$\Rightarrow x = 0 \wedge v = 0,$$

d.h.  $[b] \cap \{b\}^\perp = \{0\}$  und damit folgt die Behauptung.

**Bemerkung** Ist  $\sigma(b, b) = 0$  für  $b \in V$ , so gilt

$$b \in [b] \cap \{b\}^\perp,$$

d.h. ist  $b \neq 0$ , so ist  $[b] \cap \{b\}^\perp \neq \{0\}$ . Außerdem ist dann  $\sigma|_{U \times U}$  für  $U := \{b\}^\perp$  degeneriert, da

$$\exists v = b \in U^\times \forall u \in U : u \perp b.$$

### 5.2.4 Diagonalisierungslemma

Zu jeder symmetrischen Sesquilinearform  $\sigma$  auf einem endlichdimensionalen VR  $V$ , also  $n = \dim V < \infty$ , gibt es eine Basis  $B = (b_1, \dots, b_n)$  von  $V$ , die  $\sigma$  *diagonalisiert*, d.h. für die gilt

$$\sigma(b_i, b_j) = 0, \text{ falls } i \neq j.$$

**Beweis** Durch Induktion über  $n$ .

Für  $n = 1$  ist die Behauptung trivial (denn  $i \neq j$  existiert nicht).

Sei die Behauptung also für  $\dim V = n$  bewiesen. Ist  $\sigma$  symmetrische Sesquilinearform auf  $V$  mit  $\dim V = n + 1$  und o.B.d.A.  $\sigma \neq 0$ , also

$$\exists b \in V : \sigma(b, b) \neq 0$$

---

<sup>3</sup>denn  $\sigma(b, u) = \sigma(b, v - b \frac{\sigma(b, v)}{\sigma(b, b)}) = \sigma(b, v) - \sigma(b, b) \frac{\sigma(b, v)}{\sigma(b, b)} = 0$

nach obigem Lemma lässt sich also  $V$  aufspalten in

$$V = [b] \oplus U \text{ mit } U := \{b\}^\perp$$

und  $\dim U = n$ . Nach Annahme existiert eine Basis  $(b_1, \dots, b_n)$  von  $U$ , die  $\sigma|_{U \times U}$  diagonalisiert. Da  $b \perp b_1, \dots, b_n \in U$  liefert  $B := (b, b_1, \dots, b_n)$  eine  $\sigma$ -diagonalisierende Basis von  $V$ .

**Bemerkung** Ist  $B = (b_1, \dots, b_n)$  eine  $\sigma$ -diagonalisierende Basis, also

$$s_{ij} = \sigma(b_i, b_j) = 0 \text{ für } i \neq j$$

so ist

$$\sigma(v, v) = \sum_{i=1}^n \overline{x_i} s_{ii} x_i \text{ für } v = \sum_{i=1}^n b_i x_i.$$

Sind  $a_1, \dots, a_n \in K^\times$  und  $b'_i = b_i a_i$ , so zeigt

$$s'_{ij} = \sigma(b'_i, b'_j) = \overline{a_i} \sigma(b_i, b_j) a_j = \overline{a_i} s_{ij} a_j,$$

dass  $B' = (b'_1, \dots, b'_n)$  eine weitere  $\sigma$ -diagonalisierende Basis ist. Man kann also die  $s_{ii}$  „adjustieren“, sofern man die (unabhängigen) Gleichungen

$$s'_{ii} = \overline{a_i} s_{ii} a_i$$

für gegebene  $s'_{ii}$  (nach den  $a_i$ ) lösen kann. Zum Beispiel:

### 5.2.5 Korollar

Ist  $\sigma$  symmetrische Bilinearform auf einem  $\mathbb{C}$ -VR  $V$  mit  $\dim V < \infty$ , so besitzt  $V$  eine Basis  $B = (b_1, \dots, b_n)$ , sodass

$$\exists r \in \mathbb{N} : s_{ij} = \sigma(b_i, b_j) = \begin{cases} 1 & \text{für } i = j \leq r \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$$

**Bemerkung** D.h.

$$\begin{pmatrix} E_r & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

**Beweis** Sei (nach Diagonalisierungslemma)  $B' = (b'_1, \dots, b'_n)$  eine  $\sigma$ -diagonalisierende Basis von  $V$ ; durch Umsortierung der Basisvektoren kann man erreichen, dass

$$s'_{11}, \dots, s'_{rr} \neq 0 \text{ und } s'_{r+1, r+1} = \dots = s'_{nn} = 0$$

für ein  $r \in \{0, \dots, n\}$ . Mit einer Wahl der Wurzel bilden die Vektoren

$$b_i := \begin{cases} b'_i \cdot \frac{1}{\sqrt{s'_{ii}}} & \text{für } i = 1, \dots, r \\ b'_i = 0 & \text{für } i = r+1, \dots, n \end{cases}$$

dann eine Basis  $B$  mit der gewünschten Eigenschaft:

$$\sigma(b_i, b_i) = \underbrace{\sigma(b'_i, b'_i)}_{s'_{ii}} \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{s'_{ii}}} \right)^2 = 1 \text{ für } i = 1, \dots, r$$

$$\sigma(b_i, b_i) = \sigma(b'_i, b'_i) = 0 \text{ für } i = r+1, \dots, n.$$

### 5.2.6 Korollar

Ist  $V$  ein  $K$ -VR mit  $\dim V < \infty$  und  $\sigma$  entweder

- symmetrische Bilinearform, wenn  $K = \mathbb{R}$ , oder
- Hermitesche Sesquilinearform, wenn  $K = \mathbb{C}$ ,

so besitzt  $V$  eine Basis  $B = (b_1, \dots, b_n)$ , sodass

$$\exists r \in \mathbb{N} : s_{ij} = \sigma(b_i, b_j) = \begin{cases} \pm 1 & \text{für } i = j \leq r \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

**Beweis** Wie oben – aber: In diesen beiden Fällen gilt für eine diagonalisierende Basis  $B' = (b'_1, \dots, b'_n)$  und  $b_i = b'_i \cdot \frac{1}{a_i}$  mit  $a_i \in K$  für  $i = 1, \dots, n$ :

$$s'_{ii} = \sigma(b'_i, b'_i) \in \mathbb{R} \text{ und } \begin{cases} a_i^2 \geq 0 & \text{falls } K = \mathbb{R}, \\ \overline{a_i} a_i \geq 0 & \text{falls } K = \mathbb{C}. \end{cases}$$

Also kann man die  $s'_{ii}$  (nur) positiv reskalieren und so  $s_{ii} = 0$  oder  $s_{ii} = \pm 1$  erreichen.

**Notation** Im Folgenden bezeichnet  $\mathbb{K}$  entweder  $\mathbb{K} = \mathbb{R}$  oder  $\mathbb{K} = \mathbb{C}$ .

**Motivation** Für die obige Basis  $B$  von  $V$  mit den Eigenschaften des Korollars gilt offenbar:

$$v \perp b_1, \dots, b_r \Rightarrow v \in [\{b_{r+1}, \dots, b_n\}]$$

und

$$b_{r+1}, \dots, b_n \perp V,$$



also ist  $(b_{r+1}, \dots, b_n)$  Basis des Radikalraums  $V^\perp$  von  $(V, \sigma)$ ,

$$V^\perp = [\{b_{r+1}, \dots, b_n\}] \Rightarrow r = \dim V - \dim V^\perp.$$

Insbesondere ist  $\dim V^\perp$  und damit  $r$  unabhängig von der Basis  $B$ .

### 5.2.7 Satz von Sylvester

Sei  $V$  ein  $\mathbb{K}$ -VR,  $\dim V < \infty$ , und  $\sigma$

- symmetrische Bilinearform, wenn  $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ , oder
- Hermitesche Sesquilinearform, wenn  $\mathbb{K} = \mathbb{C}$ .

Dann gibt es eine direkte Zerlegung von  $V$  mit UVR  $V_\pm \subset V$ ,

$$V = V_+ \oplus_\perp V_- \oplus_\perp V^\perp,$$

wobei

$$V_+ \perp V_- \text{ und } \forall v \in V_\pm^\times : \pm \sigma(v, v) > 0.$$

Die *Signatur*  $\text{sgn}(\sigma) := (\dim V_+, \dim V_-, \dim V^\perp)$  von  $\sigma$  ist unabhängig von der direkten Zerlegung von  $V$ .

**Bemerkung & Definition** Ist  $\sigma$  nicht-degeneriert,  $V^\perp = \{0\}$ , so bezeichnet man auch<sup>4</sup>

- das Paar  $\text{sgn}(\sigma) = (\dim V_+, \dim V_-)$  als Signatur von  $\sigma$ , und
- die Differenz  $\dim V_+ - \dim V_-$  als *Trägheitsindex* von  $\sigma$ .

Die Dimension  $\dim V_\pm$  ist auch der *Positivitäts-* bzw. *Negativitätsindex* von  $\sigma$ . Der Satz von Sylvester wird auch „Trägheitssatz von Sylvester“ genannt.

**Beweis** Sei  $B = (b_1, \dots, b_n)$  eine Basis von  $V$  und  $p, r \in \mathbb{N}$ , sodass (siehe Korollar oben)

$$\sigma(b_i, b_j) = \begin{cases} +1 & \text{für } 0 < i = j \leq p \\ -1 & \text{für } p < i = j \leq r \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$$

Mit

$$V_+ := [\{b_1, \dots, b_p\}] \text{ und } V_- := [\{b_{p+1}, \dots, b_r\}]$$

---

<sup>4</sup>Die Reihenfolge kann bei verschiedenen Autoren auch jeweils  $-$  vor  $+$  sein.

erhält man die gewünschte direkte orthogonale Zerlegung von  $V$ ,

$$V = V_+ \oplus_{\perp} V_- \oplus_{\perp} V^{\perp}.$$

Zur Eindeutigkeit der Signatur  $\text{sgn}(\sigma) = (p, r - p, n - r)$ :

Seien

$$V = V_+ \oplus_{\perp} V_- \oplus_{\perp} V^{\perp} = \tilde{V}_+ \oplus_{\perp} \tilde{V}_- \oplus_{\perp} \tilde{V}^{\perp}$$

direkte orthogonale Zerlegungen von  $V$  mit

$$\pm\sigma(v, v) > 0 \text{ für } \begin{cases} v \in V_{\pm}^{\times} \\ v \in \tilde{V}_{\pm}^{\times}. \end{cases}$$

Nun gilt

$$\begin{aligned} \forall v \in V_-^{\times} : \sigma(v, v) < 0 \\ \Rightarrow \forall v \in V_- \oplus V^{\perp} : \sigma(v, v) \leq 0 \end{aligned}$$

und damit, da  $\sigma(v, v) > 0$  für  $v \in \tilde{V}_+^{\times}$ ,

$$v \in (V_- \oplus V^{\perp}) \cap \tilde{V}_+ \Rightarrow v = 0.$$

Es folgt, mit dem Dimensionssatz,  $\tilde{p} \leq p$ , da

$$\tilde{p} + (n - p) = \dim \tilde{V}_+ + \dim(V_- \oplus V^{\perp}) \leq \dim V = n.$$

Vertauscht man die Rollen der Zerlegungen, so erhält man die Ungleichung  $p \leq \tilde{p}$  und damit also

$$p = \tilde{p}.$$

**Bemerkung** Diese Zerlegung  $V = V_+ \oplus_{\perp} V_- \oplus_{\perp} V^{\perp}$  ist im Allgemeinen *nicht* eindeutig!

**Beispiel** Betrachte eine durch ihre Werte auf der Standardbasis  $E = (e_1, e_2)$  gegebene symmetrische Bilinearform  $\sigma : \mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ .

$$1. \ S = (\sigma(e_i, e_j))_{i,j \in \{1,2\}} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}. \text{ Mit } P := \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \in Gl(2) \text{ liefert ein Basiswechsel}$$

$$B = EP$$

$$(\sigma(b_i, b_j))_{i,j \in \{1,2\}} = P^t S P = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & -2 \end{pmatrix}$$

die Signatur  $\text{sgn}(\sigma) = (1, 1, 0) \cong (1, 1)$ . Jeder weitere Basiswechsel

$$\tilde{B} = BQ \text{ mit } Q = \begin{pmatrix} \cosh(s) & \sinh(s) \\ \sinh(s) & \cosh(s) \end{pmatrix}, s \in \mathbb{R},$$

liefert eine andere Zerlegung, ohne die Gramsche Matrix zu ändern.

2.  $S = (\sigma(e_i, e_j))_{i,j \in \{1,2\}} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$ . Der Basiswechsel  $B = EP$  wie oben liefert hier

$$(\sigma(b_i, b_j))_{i,j \in \{1,2\}} = P^t S P = \begin{pmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix},$$

also die Signatur  $\text{sgn}(\sigma) = (1, 0, 1)$  von  $\sigma$ . Hier ist  $V^\perp = [\{b_2\}]$  durch  $\sigma$  festgelegt, aber jeder Basiswechsel

$$\tilde{B} = BQ \text{ mit } Q = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ s & 1 \end{pmatrix}, s \in \mathbb{R}$$

ändert die der Basis zugeordnete Zerlegung – wieder ohne Änderung der Gramschen Matrix.

### 5.2.8 Bemerkung & Definition

Zur geometrischen Analyse der Lösungsmengen von quadratischen Gleichungen (Quadriken), ist es hilfreich, eine *Äquivalenz* für symmetrische Bilinearformen/Sesquilinearformen  $\sigma$  und  $\sigma'$  auf einem  $\mathbb{K}$ -VR  $V$  einzuführen:

$$\sigma' \sim \sigma \Leftrightarrow \exists f \in \text{Gl}(V) \forall v, w \in V : \sigma'(v, w) = \sigma(f(v), f(w)).$$

Ist  $\dim V < \infty$ , so liefert der Satz von Sylvester im Falle

- symmetrische Bilinearform auf  $\mathbb{R}$ -VR, oder
- Hermitesche Sesquilinearform auf  $\mathbb{C}$ -VR:

**Satz:** Zwei symmetrische Sesquilinearformen sind genau dann äquivalent, wenn ihre Signaturen übereinstimmen,

$$\sigma' \sim \sigma \Leftrightarrow \text{sgn}(\sigma') = \text{sgn}(\sigma).$$

### 5.2.9 Definition

Ein *Skalarprodukt* auf einem  $K$ -VR  $V$  ist eine nicht-degenerierte symmetrische Sesquilinearform

$$\langle \cdot, \cdot \rangle : V \times V \rightarrow K, (v, w) \mapsto \langle v, w \rangle.$$

Eine Familie  $(e_i)_{i \in I}$  in einem VR  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  mit Skalarprodukt heißt *Orthonormalsystem (ONS)*, falls

$$\forall i, j \in I : \langle e_i, e_j \rangle = \pm \delta_{ij};$$

*Orthonormalbasis (ONB)*, falls  $(e_i)_{i \in I}$  zusätzlich Basis ist.

**Bemerkung** Ein ONS ist linear unabhängig:

Für  $v = \sum_{i \in I} e_i x_i$  gilt

$$0 = v \Rightarrow \forall i \in I : 0 = \langle e_i, v \rangle = \sum_{j \in I} \langle e_i, e_j \rangle x_j = \pm x_i$$

Ist  $\dim V < \infty$ , so hat  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  jedenfalls eine ONB, wenn

- symmetrische Bilinearform auf einem  $\mathbb{K}$ -VR ist, oder
- Hermitesche Sesquilinearform auf einem  $\mathbb{C}$ -VR ist.

Ist  $K \neq \mathbb{K}$ , so kann die „Normierung“ problematisch sein.

**Beispiel** Auf dem  $\mathbb{R}$ -VR der beschränkten Zahlenfolgen:

$$V = \{(x_n)_{n \in \mathbb{N}} \in \mathbb{R}^{\mathbb{N}}, \exists c \in \mathbb{R} \forall n \in \mathbb{N} : |x_n| < c\},$$

führen wir ein Skalarprodukt, durch Angabe seiner quadratischen Form (Polarisation!) ein:

$$\langle (x_n)_{n \in \mathbb{N}}, (x_n)_{n \in \mathbb{N}} \rangle := \sum_{n \in \mathbb{N}} \left( \frac{x_n}{2^n} \right)^2.$$

Man erhält ein ONS  $(e_n)_{n \in \mathbb{N}}$  aus skalierten Standardvektoren

$$e_m : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}, n \mapsto e_m(n) := 2^n \delta_{mn}.$$

Dieses ONS kann zu einer Basis ergänzt werden (nach BES), nicht jedoch zu einer ONB (in unserem Sinne):

$$\langle e_m, v \rangle = \frac{x_m}{2^m} \text{ für } v = (x_n)_{n \in \mathbb{N}},$$

also gilt

$$\forall m \in \mathbb{N} : v \perp e_m \Rightarrow v = 0.$$

**Bemerkung** Später wird der Begriff „Basis“ modifiziert, z.B. in der Funktionalanalysis würde man  $(e_m)_{m \in \mathbb{N}}$  aus dem Beispiel als „Orthonormalbasis“ bezeichnen.

## 5.3 Euklidische & unitäre Vektorräume

**Bemerkung** Die folgende Definition ist nur für Skalarprodukte  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  sinnvoll, für die

$$v \mapsto \langle v, v \rangle \in T$$

mit einem angeordneten Teilkörper  $T \subset K$  des Körpers  $K$  (vgl. Abschnitt 1.2). Ein nicht-triviales Beispiel, mit  $T = \mathbb{R} \subset \mathbb{C} = K$ , ist ein Hermitesches Skalarprodukt:

$$\forall v \in V : \langle v, v \rangle = \overline{\langle v, v \rangle} \Rightarrow \forall v \in V : \langle v, v \rangle \in \mathbb{R} \subset \mathbb{C}.$$

**Vereinbarung** Im Folgenden beschränken wir uns bis auf Weiteres auf  $\mathbb{K}$ -VR mit  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  Hermitesche Sesquilinearform, falls  $\mathbb{K} = \mathbb{C}$  (vgl. Satz von Sylvester).

### 5.3.1 Definition

Ein Skalarprodukt  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  auf einem  $\mathbb{K}$ -VR  $V$  heißt *positiv definit*, falls

$$\forall v \in V^\times : \langle v, v \rangle > 0;$$

die *induzierte Norm* eines positiv-definiten Skalarprodukts  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  ist die Abbildung

$$\|\cdot\| : V \rightarrow \mathbb{R}, v \mapsto \|v\| := \sqrt{\langle v, v \rangle} \geq 0.$$

Ein  $\mathbb{K}$ -VR  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  mit positiv-definitem Skalarprodukt ist

- ein *Euklidischer Vektorraum*, falls  $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ , und
- ein *unitärer Vektorraum*, falls  $\mathbb{K} = \mathbb{C}$  und  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  Hermitesche Sesquilinearform ist.

### 5.3.2 Bemerkung & Definition

Ebenso definiert man ein Skalarprodukt als *negativ definit*, falls

$$\forall v \in V^\times : \langle v, v \rangle < 0;$$

$\langle \cdot, \cdot \rangle$  heißt *indefinit*, falls es weder positiv, noch negativ definit ist. Die Definition der induzierten Norm ist nur im positiv definiten Fall sinnvoll.

**Beispiel** Der *Betrag* einer komplexen Zahl  $z = x + iy \in \mathbb{C} \cong_{\mathbb{R}} \mathbb{R}^2$  ist

$$|z| = \sqrt{\bar{z}z} = \sqrt{x^2 + y^2}$$

die vom Standardskalarprodukt auf  $\mathbb{R}^2$  induzierte Norm. Insbesondere gilt

$$\forall z \in \mathbb{C} : |\operatorname{Re} z| \leq |z|$$

### 5.3.3 Bemerkung zum Zusammenhang von reellen und komplexen VR

Da  $\mathbb{R} \subset \mathbb{C}$  ein Teilkörper ist, kann jeder  $\mathbb{C}$ -VR  $V$  auch als  $\mathbb{R}$ -VR aufgefasst werden (Einschränkung der Skalarmultiplikation).

Ist nun  $S \subset V$  linear unabhängig über  $\mathbb{C}$  (in  $V$  als  $\mathbb{C}$ -VR), so ist

$$S' := S \cup Si = S \cup \{si \mid s \in S\}$$

linear unabhängig über  $\mathbb{R}$ , denn

$$0 = \sum_{s \in S} sx_s + \sum_{s \in S} siy_s = \sum_{s \in S} s(x_s + iy_s)$$

$$\Rightarrow \forall s \in S : x_s + iy_s = 0 \Rightarrow \forall s \in S : x_s = y_s = 0,$$

d.h.  $S' = S \cup Si$  ist linear unabhängig über  $\mathbb{R}$ . Insbesondere folgt

$$\dim_{\mathbb{R}} V = 2 \dim_{\mathbb{C}} V.$$

Weiters definiert für ein Hermitesches Skalarprodukt  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  auf  $V$  (als  $\mathbb{C}$ -VR)

$$\langle \cdot, \cdot \rangle : V \times V \rightarrow \mathbb{R}, (v, w) \mapsto \langle v, w \rangle_{\mathbb{R}} := \operatorname{Re} \langle v, w \rangle$$

ein reelles Skalarprodukt auf  $V$  (als  $\mathbb{R}$ -VR), das genau dann positiv definit ist, wenn  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  positiv definit ist:

$$\forall v \in V : \langle v, v \rangle_{\mathbb{R}} = \langle v, v \rangle.$$

Damit kann man jeden unitären Vektorraum als Euklidischen Vektorraum auffassen:

- mit verschiedenen Skalarprodukten  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  bzw.  $\langle \cdot, \cdot \rangle_{\mathbb{R}}$ , aber
- mit gleichen induzierten Normen.

**Komplexifizierung** Fasst man einen  $\mathbb{C}$ -VR  $V$  als  $\mathbb{R}$ -VR auf, so liefert Multiplikation mit  $i \in \mathbb{C}$  einen Endomorphismus

$$J : V \rightarrow V, v \mapsto J(v) := vi$$

mit

$$J^2 = -\operatorname{id}_V.$$

Insbesondere besitzt  $J$  keine reellen Eigenwerte; ist  $\dim V < \infty$ , so folgt damit

$$\dim V = \deg_{\chi_J}(t) = 0 \pmod{2}.$$

Umgekehrt: Ist  $V$  ein  $\mathbb{R}$ -VR und  $J \in \text{End}(V)$  mit  $J^2 = -\text{id}_V$  gegeben, so erhält man eine komplexe Skalarmultiplikation

$$\cdot : \mathbb{C} \times V \rightarrow V, (z, v) \mapsto vz := vx + J(v)y,$$

für  $z = x + iy$ . Ist weiter  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  ein (reelles) Skalarprodukt auf  $V$ , das von  $J$  erhalten wird,

$$\forall v, w \in V : \langle Jv, Jw \rangle = \langle v, w \rangle,$$

so definiert

$$\langle v, w \rangle_{\mathbb{C}} := \langle v, w \rangle - i\langle v, Jw \rangle$$

ein Hermitesches Skalarprodukt auf dem so konstruierten  $\mathbb{C}$ -VR.

**Beispiel** Ist  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  das kanonische Skalarprodukt auf  $\mathbb{R}^2$ , mit der Standardbasis  $(e_1, e_2)$  als ONB, so definiert (Fortsetzungssatz)

$$J(e_1) = e_2 \text{ und } J(e_2) = -e_1,$$

einen Endomorphismus  $J \in \text{End}(\mathbb{R}^2)$  mit

$$J^2 = -\text{id}_{\mathbb{R}^2} \text{ und } \langle Je_i, Je_j \rangle = \langle e_i, e_j \rangle.$$

Vermöge

$$e_1 i := J(e_1) = e_2 \text{ und } e_2 i := J(e_2) = J^2(e_1) = -e_1 = e_1 i^2$$

wird  $\mathbb{R}^2$  zu einem eindimensionalen  $\mathbb{C}$ -VR,  $\mathbb{R}^2 = [\{e_1\}]_{\mathbb{C}}$ , da

$$e_1 x + e_2 y = e_1 x + J(e_1)y = e_1(x + iy);$$

und

$$\langle e_1 x + e_2 y, e_1 x' + e_2 y' \rangle = \langle e_1(x + iy), e_1(x' + iy') \rangle_{\mathbb{C}} = \overline{(x - iy)}(x' + iy')$$

liefert das kanonische Skalarprodukt auf  $\mathbb{C}$ , mit dem kanonischen Euklidischen Skalarprodukt von  $\mathbb{R}^2$  als Realteil.

### 5.3.4 Komplexifizierungslemma

Ist  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  ein Euklidischer Vektorraum, so liefert

$$(v, w)(x + iy) := (vx - wy, wx + vy)$$

eine komplexe Skalarmultiplikation auf  $V_{\mathbb{C}} := V \times V$ , und

$$\langle\langle (v, w), (v', w') \rangle\rangle_{\mathbb{C}} := (\langle v, v' \rangle + \langle w, w' \rangle) + i(\langle v, w' \rangle - \langle w, v' \rangle)$$

ein Hermitesches Skalarprodukt, das  $(V_{\mathbb{C}}, \langle\langle \cdot, \cdot \rangle\rangle_{\mathbb{C}})$  zu einem unitären VR macht.

**Beweis** Auf dem Euklidischen VR  $(V^2, \langle\langle \cdot, \cdot \rangle\rangle)$ , wobei

$$\langle\langle \cdot, \cdot \rangle\rangle : V^2 \times V^2 \rightarrow \mathbb{R}, ((v, w), (v', w')) \mapsto \langle\langle (v, w), (v', w') \rangle\rangle := \langle v, v' \rangle + \langle w, w' \rangle,$$

definiere  $J \in \text{End}(V^2)$  durch

$$J : V^2 \rightarrow V^2, (v, w) \mapsto J((v, w)) := (-w, v).$$

Offenbar gilt  $J^2 = -\text{id}_{V^2}$  und

$$\langle\langle J(v, w), J(v', w') \rangle\rangle = \langle w, w' \rangle + \langle v, v' \rangle = \langle\langle (v, w), (v', w') \rangle\rangle,$$

sodass

$$(v, w)(x + iy) = (v, w)x + J(v, w)y = (vx - wy, wx + vy)$$

und

$$\begin{aligned} \langle\langle (v, w), (v', w') \rangle\rangle_{\mathbb{C}} &= \langle\langle (v, w), (v', w') \rangle\rangle - i\langle\langle (v, w), J(v', w') \rangle\rangle \\ &= (\langle v, v' \rangle + \langle w, w' \rangle) - i(-\langle v, w' \rangle + \langle w, v' \rangle) \end{aligned}$$

$(V^2, \langle\langle \cdot, \cdot \rangle\rangle)$  zu einem unitären VR machen, wie vorher.

**Bemerkung** Mit dem „Komplexifizierungslemma“ kann man jeden Euklidischen VR in einen unitären VR gleicher (komplexer) Dimension einbetten:

$$\dim_{\mathbb{C}} V_{\mathbb{C}} = \frac{1}{2} \dim_{\mathbb{R}} V^2 = \dim_{\mathbb{R}} V.$$

Wichtig für den Zusammenhang zwischen unitären und Euklidischen VR: Die induzierte Norm des Hermiteschen Skalarprodukts kann als die eines Euklidischen Skalarprodukts aufgefasst werden.



### 5.3.5 Definition

Eine Abbildung  $\|\cdot\| : V \rightarrow \mathbb{R}$  auf einem  $\mathbb{K}$ -VR  $V$  heißt *Norm*, falls

- (i)  $\forall v \in V^\times : \|v\| > 0$ , d.h.  $\|\cdot\|$  ist *positiv definit*;
- (ii)  $\forall v \in V \forall x \in \mathbb{K} : \|vx\| = \|v\| \cdot |x|$ , d.h.  $\|\cdot\|$  *positiv homogen*;
- (iii)  $\forall v, w \in V : \|v + w\| \leq \|v\| + \|w\|$ , d.h.  $\|\cdot\|$  erfüllt die *Dreiecksungleichung*.

Ein Vektorraum mit Norm,  $(V, \|\cdot\|)$  heißt *normierter Vektorraum*.

**Bemerkung** Die von einem positiv definiten Skalarprodukt  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  induzierte Norm  $\|\cdot\|$  erfüllt offenbar (i) und (ii); die Dreiecksungleichung zeigen wir unten.

**Cauchy-Schwarzsche Ungleichung** Ist  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  Euklidisch oder unitär, so gilt<sup>5</sup>

$$\forall v, w \in V : |\langle v, w \rangle|^2 \leq \langle v, v \rangle \langle w, w \rangle$$

**Beweis** Seien  $v, w \in V$ , o.B.d.A.  $v \neq 0$ . Wir bestimmen das Minimum der Funktion im Euklidischen Fall (unitärer Fall in der Übung)

$$\mathbb{R} \ni s \mapsto g(s) := \langle vs - w, vs - w \rangle.$$

Einsetzen des kritischen Punktes,

$$\begin{aligned} 0 = g'(s) &= 2\langle v, v \rangle s - (\langle v, w \rangle + \langle w, v \rangle) = 2(\langle v, v \rangle s - \operatorname{Re}\langle v, w \rangle) \\ &\Rightarrow s = \frac{\langle v, w \rangle}{\langle v, v \rangle} \end{aligned}$$

liefert

$$\begin{aligned} 0 \leq g(s) &= \langle v, v \rangle \frac{\langle v, w \rangle^2}{\langle v, v \rangle^2} - 2\langle v, w \rangle \frac{\langle v, w \rangle}{\langle v, v \rangle} + \langle w, w \rangle \\ &= \frac{1}{\langle v, v \rangle} \left( -\langle v, w \rangle^2 + \langle v, v \rangle \langle w, w \rangle \right) \Leftrightarrow 0 \leq -\langle v, w \rangle^2 + \langle v, v \rangle \langle w, w \rangle. \end{aligned}$$

### 5.3.6 Korollar

Die induzierte Norm in  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  erfüllt die Dreiecksungleichung.

---

<sup>5</sup>Im Euklidischen Fall ist der Betrag offenbar überflüssig.

**Beweis** Ist  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  Euklidischer VR, so gilt für  $v, w \in V$ :

$$\begin{aligned} \|v + w\|^2 &= \langle v + w, v + w \rangle = \|v\|^2 + 2\langle v, w \rangle + \|w\|^2 \\ &\stackrel{C.S.}{\leq} \|v\|^2 + 2\|v\| \cdot \|w\| + \|w\|^2 = (\|v\| + \|w\|)^2. \end{aligned}$$

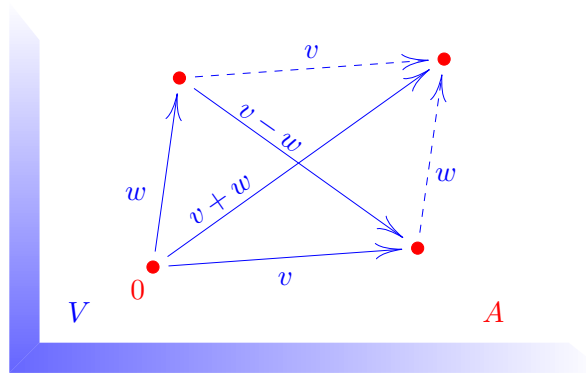
**Bemerkung** Das Skalarprodukt eines Euklidischen VR  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  kann (Polarisation) aus seiner induzierten Norm rekonstruiert werden.

Nicht jede Norm ist jedoch von einem Skalarprodukt induziert (vgl. Aufgabe 56). Hinreichende (Satz von Jordan-von Neumann) und notwendige Bedingung ist die Parallelogrammgleichung:

### 5.3.7 Parallelogrammgleichung

Für die induzierte Norm  $\|\cdot\|$  von  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  gilt:

$$\forall v, w \in V : \|v + w\|^2 + \|v - w\|^2 = 2\|v\|^2 + 2\|w\|^2$$



**Beweis** Rechnung, wie bei Polarisation.

**Beispiel** Für die induzierte Norm des kanonischen Skalarprodukts auf  $\mathbb{R}^n$  gilt die Parallelogrammgleichung:

$$\sum_{i=1}^n (x_i + y_i)^2 + \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2 = 2 \sum_{i=1}^n x_i^2 + 2 \sum_{i=1}^n y_i^2.$$

Für die durch

$$\|(x_i)_{i \in \{1, \dots, n\}}\|_1 = \sum_{i=1}^n |x_i|$$

auf  $\mathbb{R}^n$  definierte Norm  $\|\cdot\|_1$  gilt sie nicht; diese Norm ist also nicht induzierte Norm eines Euklidischen Skalarprodukts auf  $\mathbb{R}^n$ .

**Beispiel** Auf dem Raum  $C^0([0, 1])$  der stetigen Funktionen auf  $[0, 1]$  definiert

$$\|\cdot\|_\infty : C^0([0, 1]) \rightarrow \mathbb{R}, f \mapsto \|f\|_\infty := \max_{x \in [0, 1]} |f(x)|$$

die *Maximumsnorm* (vgl. gleichmäßige Konvergenz).

Für  $f, g \in C^0([0, 1])$ ,

$$f(x) := 1 - x \text{ und } g(x) = x$$

ist dann

$$\|f\|_\infty = \|g\|_\infty = \|f + g\|_\infty = \|f - g\|_\infty = 1$$

womit die Parallelogrammgleichung offenbar nicht erfüllt, und die Norm keine induzierte Norm eines Skalarprodukts ist.

## 5.4 Euklidische Geometrie

### 5.4.1 Definition

Ein *Euklidischer Raum* ist eine affiner Raum  $(A, V, \tau)$  über einem Euklidischen Vektorraum  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  mit induzierter Norm  $\|\cdot\|$ .

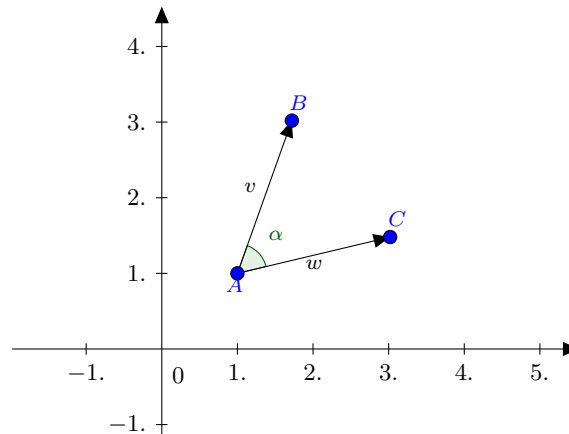
- Die *Länge* eines Vektors  $v \in V$  ist seine Norm, der *Abstand* zweier Punkte  $a, b \in A$  ist die Länge ihres Verbindungsvektors,

$$d(a, b) := \|b - a\| = \sqrt{\langle b - a, b - a \rangle}.$$

- Der *Winkel*  $\alpha \in [0, \pi]$  zweier Vektoren  $v, w \in V^\times$  ist durch die Gleichung

$$\langle v, w \rangle = \|v\| \cdot \|w\| \cdot \cos \alpha$$

definiert; der *Winkel* (am Punkt  $a$ ) in einem nicht-degenerierten Dreieck  $\{a, b, c\} \subset A$  ist der Winkel der beiden Seitenvektoren  $v = b - a$  und  $w = c - a$ .



**Bemerkung** Nach der Cauchy-Schwarzschen Ungleichung ist für  $v, w \in V^\times$

$$\frac{\langle v, w \rangle}{\|v\| \cdot \|w\|} \in [-1, 1];$$

andererseits ist

$$\cos : [0, \pi] \rightarrow [-1, 1] \text{ bijektiv}$$

Damit ist der Winkel von Vektoren bzw. im Dreieck wohldefiniert.

### 5.4.2 Definition

Eine affine Transformation eines Euklidischen Raumes heißt

- *Kongruenzabbildung* oder *Isometrie*, falls sie Abstandstreu ist,
- *Ähnlichkeitstransformation*, falls sie winkeltreu ist.

**Bemerkung** Jede Kongruenzabbildung ist Ähnlichkeitstransformation (Polarisation).

**Bemerkung** Offenbar bilden die Kongruenz- bzw. Ähnlichkeitsabbildungen eines Euklidischen Raumes  $A$  auf  $A$  operierende (Transformations-)Gruppen.

### 5.4.3 Definition (Geometrie)

Die auf einem Euklidischen Raum operierende Gruppe der Kongruenzabbildungen bestimmt eine Euklidische Geometrie.

Die Gruppe der Ähnlichkeitstransformationen eines Euklidischen Raumes  $A$  bestimmt eine Ähnlichkeitsgeometrie.

**Beispiel** Jede Translation  $\tau_v : A \rightarrow A$  ist eine Isometrie: Für  $a, b \in A$  gilt

$$\exists! w \in V : b = \tau_w(a)$$

d.h.  $w = b - a$ ; also

$$\tau_v(b) = \tau_v(\tau_w(a)) = \tau_{v+w}(a) = \tau_w(\tau_v(a))$$

d.h.  $w = \tau_v(b) - \tau_v(a)$ . Damit folgt:

$$\|\tau_v(b) - \tau_v(a)\| = \|w\| = \|b - a\|$$

d.h.  $\tau_v$  ist abstandstreu, da  $a, b \in A$  beliebig waren.

**Beispiel** Die Streckung mit Zentrum  $o \in A$  um den Faktor  $s \in \mathbb{R}^\times$ ,

$$o + v = a \xrightarrow{\delta_s} \delta_s(a) = \delta_s(o + v) := o + vs$$

ist winkeltreu, denn für  $a = o + v, b = o + w$  gilt

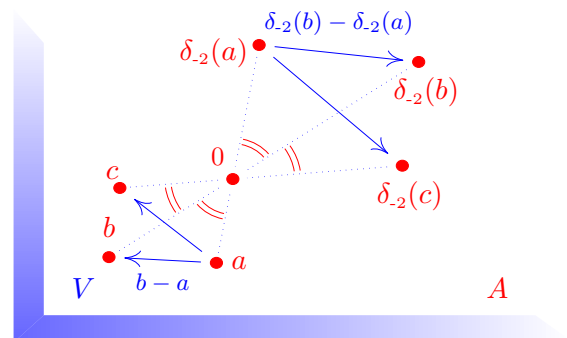
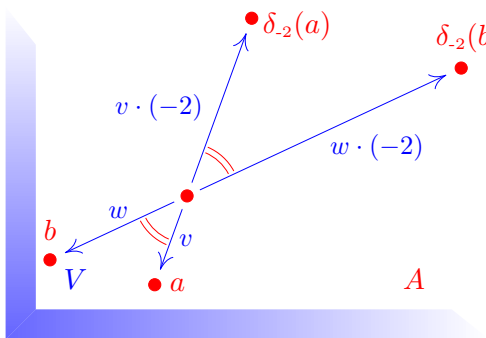
$$\delta_s(b) - \delta_s(a) = (o + ws) - (o + vs) = \dots = (w - v)s$$

und damit für drei paarweise verschiedene Punkte  $a, b, c \in A$

$$\cos \alpha = \frac{\langle \delta_s(b) - \delta_s(a), \delta_s(c) - \delta_s(a) \rangle}{\|\delta_s(b) - \delta_s(a)\| \|\delta_s(c) - \delta_s(a)\|} = \frac{\langle (b-a)s, (c-a)s \rangle}{\|(b-a)s\| \|(c-a)s\|} = \frac{s^2}{|s|^2} \cdot \frac{\langle b-a, c-a \rangle}{\|b-a\| \|c-a\|}$$

d.h.  $\delta_s$  ist winkeltreu; andererseits ist  $\delta_s$  für  $s \neq \pm 1$  nicht abstandstreu. Ist  $a \neq b$ , so gilt dann

$$\|\delta_s(b) - \delta_s(a)\| = \|b - a\| \cdot |s| \neq \|b - a\|.$$



**Zur Erinnerung** Jede affine Abbildung  $\alpha : A \rightarrow A'$  besitzt einen (eindeutigen) *linearen Anteil*  $\lambda : V \rightarrow V'$ , sodass

$$\forall a \in A \forall v \in V : \alpha(a + v) = \alpha(a) + \lambda(v);$$

ist  $\alpha$  eine affine Transformation, so ist  $\lambda \in Gl(V)$ .

**Bemerkung** Jede Ähnlichkeitstransformation ist Komposition einer Streckung und einer Kongruenzabbildung.

Nämlich: Ist  $\alpha$  Ähnlichkeitstransformation mit linearem Anteil  $\lambda \in Gl(V)$ , so erhält  $\lambda$  Winkel von Vektoren, insbesondere also Orthogonalität. Nun wähle  $w \in V^\times$  und setze

$$s := \frac{\|w\|}{\|\lambda w\|}.$$

Ist dann  $v \in V$  mit  $\|v\| = \|w\|$ , so folgt

$$v + w \perp v - w \Rightarrow \lambda(v + w) \perp \lambda(v - w) \Rightarrow \|\lambda(v)\| = \|\lambda(w)\|,$$

also

$$\forall v \in V^\times : \frac{\|\lambda(v)\|}{\|v\|} = \|\lambda(v) \frac{\|w\|}{\|v\|}\| \frac{1}{\|w\|} = \frac{\|\lambda(w)\|}{\|w\|} = \frac{1}{s}.$$

Mit einem beliebigen Streckungszentrum  $o \in A$  erhält man also eine Isometrie durch

$$\delta_s \circ \alpha : A \rightarrow A.$$

**Beispiel** Eine *nicht-triviale* Scherung ist *keine* Ähnlichkeitstransformation. Beweis in der Übung.

#### 5.4.4 Lemma & Definition

Eine affine Transformation  $\alpha : A \rightarrow A$  eines Euklidischen Raumes  $A$  ist genau dann eine Kongruenzabbildung, wenn ihr linearer Anteil  $\lambda$  *orthogonal* ist:

$$\lambda \in O(V) := \{f \in Gl(V) \mid \forall v, w \in V : \langle f(v), f(w) \rangle = \langle v, w \rangle\}.$$

$O(V)$  heißt die *orthonogale Gruppe* von  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ .

**Bemerkung**  $O(V) \subset Gl(V)$  ist eine Gruppe. Beweis in der Übung.

**Bemerkung** Ist  $f \in \text{End}(V)$ , so folgt die Injektivität von  $f$  aus

$$\forall v, w \in V : \langle f(v), f(w) \rangle = \langle v, w \rangle.$$

Aus  $f(v) = 0$  folgt nämlich

$$0 = \|f(v)\| = 0 = \|v\| \Rightarrow v = 0, \text{ da } \langle \cdot, \cdot \rangle \text{ pos. definit.}$$

Ist  $\dim V < \infty$ , so folgt mit dem Rangsatz,  $\dim V = \operatorname{rg} f + \operatorname{def} f = \operatorname{rg} f$ , dass  $f \in \operatorname{Gl}(V)$ .

Im Fall  $\dim V = \infty$  ist  $f$  nicht notwendigerweise surjektiv, wie der *Shiftoperator*

$$f \in \operatorname{End}(\mathbb{R}^{\mathbb{N}}), \forall n \in \mathbb{N} : f(e_n) = e_{n+1}$$

zeigt.

**Beweis (Lemma)** Sei  $(A, V, \tau)$  Euklidischer Raum über einem Euklidischen VR  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  und  $\alpha : A \rightarrow A$  Affinität mit linearem Anteil  $\lambda \in \operatorname{Gl}(V)$ . Dann ist  $\alpha$  genau dann Isometrie, wenn

$$\forall a, b \in A : \|\lambda(b - a)\| = \|\alpha(b) - \alpha(a)\| = \|b - a\|,$$

also (Polarisation), wenn  $\lambda \in O(V)$ .

#### 5.4.5 Definition

Ist  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  unitärer VR, so heißt  $f \in \operatorname{Gl}(V)$  mit

$$\forall v, w \in V : \langle f(v), f(w) \rangle = \langle v, w \rangle$$

*unitär*; die *unitäre Gruppe* von  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  ist die Gruppe

$$U(V) := \{f \in \operatorname{Gl}(V) \mid \forall v, w \in V : \langle f(v), f(w) \rangle = \langle v, w \rangle\}.$$

#### 5.4.6 Schulgeometrie

Betrachte eine Euklidische Ebene  $A^2$  über Euklidischem VR  $(\mathbb{R}^2, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  mit kanonischem Skalarprodukt  $\forall i, j \in \{1, 2\} : \langle e_i, e_j \rangle = \delta_{ij}$ .

Weiter (vgl. Abschnitt 5.3.3) bezeichne  $J \in \operatorname{End}(\mathbb{R}^2)$  den durch

$$J(e_1) = e_2 \text{ und } J(e_2) = -e_1$$

definierten Endomorphismus, also eine „90°-Drehung“, bzw. die  $\mathbb{R}^2$  mit  $\mathbb{C}$  identifizierende komplexe Multiplikation mit  $i$ ,

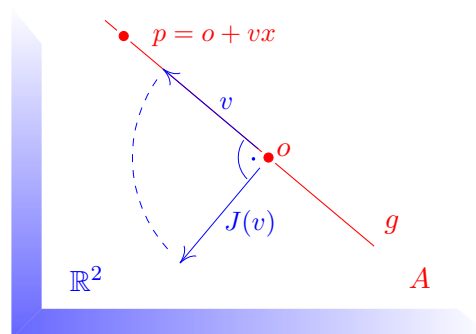
$$v(x + iy) = vx + J(v)y \text{ für } \begin{cases} v \in \mathbb{R}^2 \\ (x + iy) \in \mathbb{C}. \end{cases}$$

Man bemerke: Für  $v \in \mathbb{R}^2 \setminus \{0\}$  ist  $\{Jv\}^\perp = [v]$  und damit

$$\forall w \in \mathbb{R}^2 : w \perp Jv \Leftrightarrow w \parallel v.$$

So ermöglicht  $J$  einen einfachen Wechsel zwischen *parametrischer* und *impliziter Darstellung* (e.g. *Hessesche Normalform*) einer Geraden

$$\begin{aligned} g &= \{p = o + vx \mid x \in \mathbb{R}\} \Leftrightarrow \\ g &= \{p \in A^2 \mid \langle p - o, Jv \rangle = 0\} \end{aligned}$$



#### 5.4.7 Definition

Ein *Kreis* mit *Mittelpunkt*  $z \in A^2$  und *Radius*  $r \geq 0$  ist die Menge

$$k = \{p \in A^2 \mid \|p - z\| = r\}.$$

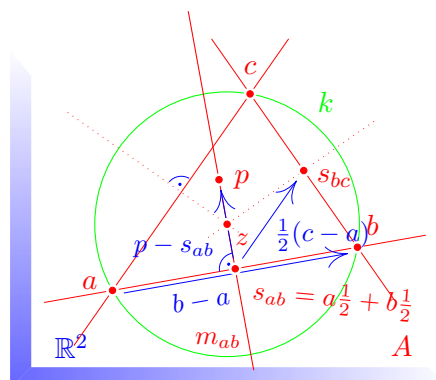
**Bemerkung** Es ist mitunter sinnvoll, Punkte als Kreise mit Radius  $r = 0$  zu betrachten.

#### 5.4.8 Umkreissatz

Sei  $\{a, b, c\} \subset A^2$  ein nicht-degeneriertes Dreieck. Dann gibt es genau einen Kreis  $k \subset A^2$ , den *Umkreis* des Dreiecks, der die Eckpunkte  $a, b$  und  $c$  des Dreiecks enthält. Sein Mittelpunkt ist der Schnittpunkt der drei *Streckensymmetralen/Mittelsenkrechten*  $m_{ab}, m_{bc}$  und  $m_{ca}$  des Dreiecks, wobei

$$m_{ab} = \{p \in A^2 \mid \langle p - s_{ab}, b - a \rangle = 0\}$$

$$\text{mit } s_{ab} = a \frac{1}{2} + b \frac{1}{2} \text{ etc.}$$





**Beweis** Definiere

$$g_{ab} : A^2 \rightarrow \mathbb{R}, p \mapsto g_{ab}(p) := 2\langle p - s_{ab}, b - a \rangle$$

und analog  $g_{bc}$  und  $g_{ca}$  (zyklische Vertauschung). Für  $p \in A^2$  gilt dann mit

$$g_{ab}(p) \stackrel{!}{=} \langle (p - a) + (p - b), (p - a) - (p - b) \rangle = \|p - a\|^2 - \|p - b\|^2 \quad (*)$$

damit folgt

$$\forall p \in A^2 : (g_{ab} + g_{bc} + g_{ca})(p) = 0,$$

also

$$p \in m_{ab} \cap m_{bc} \Rightarrow p \in m_{ca}.$$

Nun ist

$$m_{ab} = \{p(x) = s_{ab} + J(b - a)x \mid x \in \mathbb{R}\}$$

mit  $J(b - a) \not\perp b - c$ , da das Dreieck  $\{a, b, c\}$  nicht-degeneriert ist. Dies liefert einen eindeutigen Schnittpunkt  $z \in p(x) \in m_{ab} \cap m_{bc}$  als Lösung der linearen Gleichung

$$\begin{aligned} 0 &= g_{bc}(p(x)) = 2\langle s_{ab} + J(b - a)x - s_{bc}, c - b \rangle \\ &= 2\langle J(b - a), c - b \rangle x + \langle a - c, c - b \rangle. \end{aligned}$$

Wegen (\*) gilt nun für diesen Schnittpunkt  $z$

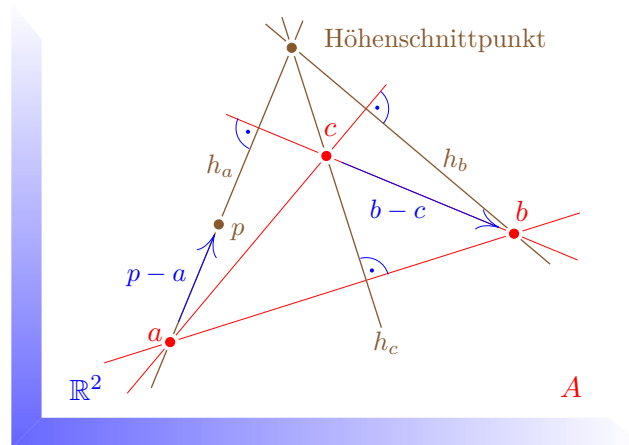
$$\|z - a\| = \|z - b\| = \|z - c\| \quad (**)$$

d.h.  $a, b$  und  $c$  liegen auf einem Kreis mit Mittelpunkt  $z$ . Andererseits: Wegen (\*) impliziert (\*\*), dass  $z \in m_{ab} \cap m_{bc}$ , womit die Eindeutigkeit von  $z$  und damit des Umkreises folgt.

### 5.4.9 Höhensatz

Die Höhen  $h_a, h_b$  und  $h_c$  eines nicht-degenerierten Dreiecks  $\{a, b, c\} \subset A^2$  schneiden sich in einem Punkt, dem *Höhenschnittpunkt*, wobei

$$h_a = \{p \in A^2 \mid \langle p - a, b - c \rangle = 0\}, \text{ etc.}$$



Beweis in der Übung, analog zum Umkreissatz.

#### 5.4.10 Euler-Gerade

Seien  $s, h$  und  $z$  Schwerpunkt, Höhenschnittpunkt und Umkreismittelpunkt eines nicht-degenerierten Dreiecks  $a, b, c \in A^2$ . Dann gilt

$$s = z \frac{2}{3} + h \frac{1}{3}.$$

Ist  $s \neq z$ , so liegen die drei Punkte also auf einer eindeutig bestimmten Geraden, *Euler-Geraden*, mit einem Teilverhältnis  $(zs : hs) = -\frac{1}{2}$ . Beweis in der Übung.

#### 5.4.11 Satz von Pythagoras

In einem Dreieck  $\{a, b, c\} \subset A^2$  mit einem rechten Winkel  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  bei  $a$  gilt stets

$$\|c - a\|^2 + \|a - b\|^2 = \|c - b\|^2.$$

**Beweis** Offenbar gilt  $c - b = (c - a) + (a - b)$ , daher

$$\|c - b\|^2 = \|c - a\|^2 + 2\langle c - a, a - b \rangle + \|a - b\|^2 = \|c - a\|^2 + \|a - b\|^2.$$

**Bemerkung** Für allgemeine Dreiecke liefert die gleiche Rechnung den Cosinussatz:

$$\|b - c\|^2 = \|c - a\|^2 + \|a - b\|^2 - 2\|c - a\|\|a - b\|\cos \alpha.$$

**Bemerkung** Ist  $(o; e_1, e_2)$  ein affines Bezugssystem in  $A^2$  mit

$$e_1 \perp e_2 \text{ und } \|e_1\| = \|e_2\| = 1,$$

so ist jeder Punkt  $a \in A^2$  Eckpunkt eines *rechtwinkligen* Dreiecks

$$\{o, o + e_1x_1, o + e_1x_1 + e_2x_2\} \text{ für } a = o + e_1x_1 + e_2x_2;$$

der Abstand vom Ursprung ist also (Pythagoras)

$$\|a - o\| = \sqrt{x_1^2 + x_2^2}.$$

Wegen seiner Translationsinvarianz kann der Abstand zwischen beliebigen Punkten genau so berechnet werden.

### 5.4.12 Definition

Ein *kartesisches Bezugssystem*  $(o, E)$  eines Euklidischen Raumes  $(A, V, \tau)$  über einem Euklidischen VR  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  besteht aus einem Ursprung  $o \in A$  und einer ONB  $E$  von  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ .

**Bemerkung** In jedem endlichdimensionalen Euklidischen Raum gibt es ein kartesisches Bezugssystem, im Allgemeinen ist dies nicht so (vgl. Übung).

### 5.4.13 Lemma

Ist  $(o; E)$  mit  $E = (e_i)_{i \in I}$  kartesisches Bezugssystem eines Euklidischen Raumes  $(A, V, \tau)$  über  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ , so ist

$$\forall a \in A : a = o + \sum_{i \in I} e_i \langle e_i, a - o \rangle$$

**Beweis** Da  $E$  Basis ist, existiert zu  $a \in A$  eine Familie  $(x_i)_{i \in I}$  in  $\mathbb{R}$  mit

$$a = o + \sum_{i \in I} e_i x_i,$$

wobei

$$\forall i \in I : \langle e_i, a - o \rangle = \langle e_i, \sum_{j \in I} e_j x_j \rangle = \sum_{j \in I} \delta_{ij} x_j = x_i.$$

## 5.5 Orthogonalprojektion

### 5.5.1 Definition

Sei  $(A, V, \tau)$  ein Euklidischer Raum über einem Euklidischen VR  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ . Dann heißt

- $p \in \text{End}(V)$  *Orthogonalprojektion*, falls  $p$  Projektion ist,  $p^2 = p$ , mit

$$\ker p \perp p(V)$$

- $\pi : A \rightarrow A$  *Orthogonalprojektion*, falls  $\pi$  Parallelprojektion ist, mit einer Orthogonalprojektion  $p \in \text{End}(V)$  als linearem Anteil.

**Bemerkung** Ist  $p \in \text{End}(V)$  Orthogonalprojektion, so ist auch die komplementäre Projektion  $p' = \text{id}_V - p$  Orthogonalprojektion, denn

$$\ker p' = p(V) \perp \ker p = p'(V)$$

**Bemerkung** Ist  $(o; E)$  mit  $E = (e_i)_{i \in I}$  kartesisches Bezugssystem eines Euklidischen Raumes  $A$  und  $J \subset I$ , so liefert

$$\pi : A \rightarrow A, a = o + v \mapsto o + p(v) := o + \sum_{i \in J} e_i \langle e_i, v \rangle$$

eine Orthogonalprojektion von  $A$  auf

$$\pi(A) = o + p(V) = o + [(e_i)_{i \in J}].$$

### 5.5.2 Gram-Schmidtsches Orthogonalisierungsverfahren

Sei  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  ein Euklidischer VR und  $(v_1, \dots, v_n)$  linear unabhängig in  $V$ ; dann existiert ein ONS  $(e_1, \dots, e_n)$  mit

$$[(v_1, \dots, v_k)] = [(e_1, \dots, e_k)] \text{ und } \langle e_k, v_k \rangle > 0 \text{ für } k = 1, \dots, n \quad (*)$$

**Beweis** Induktion über  $n$ . Ist  $n = 1$ , so liefert  $e_1 := v_1 \cdot \frac{1}{\|v_1\|}$  das gewünschte Orthonormalsystem.

Ist  $(v_1, \dots, v_{n+1})$  linear unabhängig und (nach Induktions-Annahme)  $(e_1, \dots, e_n)$  ONS mit

$$V_n := [(v_1, \dots, v_k)] = [(e_1, \dots, e_k)] \text{ und } \langle e_k, v_k \rangle > 0 \text{ für } k = 1, \dots, n,$$

so setzen wir

$$p : V \rightarrow V, v \mapsto p(v) := v - \sum_{i=1}^n e_i \langle e_i, v \rangle \in \{e_1, \dots, e_n\}^\perp;$$

da  $v_{n+1} \notin V_n$  ist

$$p(v_{n+1}) \neq 0, \text{ und } e_{n+1} := p(v_{n+1}) \frac{1}{\|p(v_{n+1})\|}$$

ergänzt dann  $(e_1, \dots, e_n)$  zum gesuchten Orthonormalsystem.

**Bemerkung** Das ONS  $(e_1, \dots, e_n)$  im Gram-Schmidtschen Verfahren ist durch die Bedingungen  $(*)$  eindeutig festgelegt.

**Bemerkung** Der Beweis lässt sich wörtlich auf unitäre VR übertragen.

### 5.5.3 Korollar & Definition

Ist  $U \subset V$  UVR eines Euklidischen VR (oder unitären VR)  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  mit  $\dim V < \infty$ , so gilt

$$V = U \oplus U^\perp.$$

Der UVR  $U^\perp$  heißt dann das *orthogonale Komplement* von  $U$  (in  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ ).

**Beweis** Für  $v \in U \cap U^\perp$  ist  $\langle v, v \rangle = 0$ , also  $v = 0$ , da das Skalarprodukt positiv definit ist. Sei  $(e_1, \dots, e_k)$  ONB von  $U$  (Gram-Schmidt) und

$$p : V \rightarrow V, v \mapsto p(v) := \sum_{i=1}^k e_i \langle e_i, v \rangle \in U.$$

Wegen

$$\langle e_j, v - p(v) \rangle = \langle e_j, v \rangle - \sum_{i=1}^k \delta_{ij} \langle e_i, v \rangle = 0$$

für  $j = 1, \dots, k$  ist dann

$$\forall v \in V : v = p(v) + (v - p(v)) \in U + U^\perp,$$

also  $V = U + U^\perp$

**Bemerkung** Die Einschränkung  $\dim V < \infty$  wurde nur benutzt, um die Orthogonalprojektion  $p \in \text{End}(V)$  zu definieren/konstruieren. Insbesondere reicht es,  $\dim U < \infty$  anzunehmen.

**Bemerkung** Ist  $\dim V < \infty$ , so ist  $U^{\perp\perp} = U$ .

### 5.5.4 Beispiel & Definition

Ist  $p \in \text{End}(V)$  eine Projektion und  $p' = \text{id}_V - p$ , so erhält man eine Involution

$$s := p - p' \in \text{End}(V)$$

Im Falle einer Orthogonalprojektion  $p$  nennt man die zugehörige Transformation

$$\sigma : A \rightarrow A, o + v \mapsto \sigma(o + v) := o + s(v)$$

eines Euklidischen Raumes eine *Spiegelung*:  $\sigma$  ist eine Isometrie, da

$$\forall v \in V : \|p(v) \pm p'(v)\|^2 = \begin{cases} \|v\|^2 & \text{für } + \\ \|s(v)\|^2 & \text{für } - \end{cases} = \|p(v)\|^2 + \|p'(v)\|^2 \pm 2 \underbrace{\langle p(v), p'(v) \rangle}_{=0, \text{ da } p(V) \perp p'(V)}$$

**Bemerkung** Jede Kongruenzabbildung eines endlichdimensionalen Euklidischen Raumes ist Komposition von Spiegelungen.

### 5.5.5 Beispiel & Definition

Ist  $A^2$  Euklidische Ebene mit kartesischem Bezugssystem  $(o; e_1, e_2)$  und  $J \in \text{End}(\mathbb{R}^2)$  wie oben,  $J(e_1) = e_2$  und  $J(e_2) = -e_1$  so liefert

$$\rho_\vartheta : A^2 \rightarrow A^2, o + v \mapsto \rho_\vartheta(o + v) := o + v \cos \vartheta + J(v) \sin \vartheta$$

eine *Drehung* mit *Zentrum*  $o \in A^2$  und *Drehwinkel*  $\vartheta \in \mathbb{R}$ . Die affine Abbildung  $\rho_\vartheta$  ist dann Komposition zweier Spiegelungen,

$$\rho_\vartheta = \sigma' \circ \sigma,$$

die durch ihre Fixpunktgeraden festgelegt sind:

$$g = o + [e_1] \text{ und } g' = o + [e'_1] \text{ mit } e'_1 = e_1 \cos \frac{\vartheta}{2} + e_s \sin \frac{\vartheta}{2}.$$

### 5.5.6 Lemma

Eine Projektion  $p \in \text{End}(V)$  ist genau dann Orthogonalprojektion, wenn

$$\forall v, w \in V : \langle p(v), w \rangle = \langle v, p(w) \rangle$$

**Beweis** Sei  $p \in \text{End}(V)$  Projektion und  $p' = \text{id}_V - p$  die komplementäre Projektion mit

$$\ker p = p'(V) \text{ und } p(V) = \ker p'.$$

Ist  $p$  Orthogonalprojektion,  $p(V) \perp \ker p = p'(V)$ , so ist für  $v, w \in V$

$$\langle p(v), w \rangle - \langle v, p(w) \rangle = \langle p(v), p(w) \rangle + \underbrace{\langle p(v), p'(w) \rangle}_{\perp} - \langle p(v), p(w) \rangle - \underbrace{\langle p'(v), p(w) \rangle}_{\perp} = 0.$$

Gilt andererseits für  $v, w \in V$ , also insbesondere für  $v \in p(V), w \in \ker p$ , stets

$$0 = \langle p(v), w \rangle - \langle v, p(w) \rangle = \langle v, w \rangle,$$

so ist  $p(V) \perp \ker p$ , also  $p$  Orthogonalprojektion.

## 6 Struktursätze für Endomorphismen

### 6.1 Adjungierte & duale Abbildungen

Zunächst: Ziel dieses Kapitels ist besseres, strukturelles Verständnis der Bedingungen für orthogonale Transformationen bzw. Orthogonalprojektionen:

$$\forall v, w \in V : \langle f(v), f(w) \rangle = \langle v, w \rangle \text{ bzw. } \langle p(v), w \rangle = \langle v, p(w) \rangle.$$

**Motivation** Jede Sesquilinearform  $\sigma : V \times V \rightarrow K$  liefert eine (semi-)lineare Abbildung

$$V \ni v \mapsto \sigma(v, \cdot) \in V^*.$$

Ist die Sesquilinearform  $\sigma$  symmetrisch und nicht-degeneriert, d.h. ein Skalarprodukt auf  $V$ , so ist die Abbildung injektiv:

$$\sigma(v, \cdot) = 0 \Rightarrow v = 0 \Rightarrow v \in V^\perp = \{0\}.$$

Ist die Abbildung auch surjektiv, so kann man sie benutzen, um  $V^*$  und  $V$  zu identifizieren,

$$V^* \cong V.$$

#### 6.1.1 Rieszsches Darstellungslemma

Sei  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  ein  $K$ -VR mit Skalarprodukt. Die *kanonische Injektion*

$$\phi : V \rightarrow V^*, v \mapsto \phi(v) := \langle v, \cdot \rangle.$$

ist semi-linear und injektiv. Ist  $\dim V < \infty$ , so ist  $\phi$  auch surjektiv; wir nennen dann

- $\nabla w := \phi^{-1}(w)$  den *Gradienten* von  $w \in V^*$ , und
- $\phi : V \rightarrow V^*$  die *kanonische Identifikation* von  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  mit  $V^*$ .

**Beweis** Semi-Linearität und Injektivität folgen sofort aus den Eigenschaften des Skalarprodukts.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>Semi-Linearität in der linken Komponente; Nicht-Degeneriertheit impliziert Injektivität.

Ist  $\dim V < \infty$ , so ist  $\phi : V \rightarrow V^*$  wegen  $\dim V^* = \dim V$  und der Injektivität auch surjektiv.

**Bemerkung** Dies ist eine „kleine“ Version des Rieszschen Darstellungssatzes

$$\forall \omega \in V^* \exists ! w \in V : \omega = \langle w, \cdot \rangle.$$

Der „richtige“ Satz schränkt die Dimension nicht ein, und ist ein wichtiges Hilfsmittel in der Funktional-Analyse.

**Bemerkung** Ist  $E = (e_1, \dots, e_n)$  ONB von  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ , so gilt für die Vektoren der dualen Basis  $E^* = (e_1^*, \dots, e_n^*)$

$$\nabla e_i^* = e_i \frac{1}{\langle e_i, e_i \rangle} = \pm e_i,$$

da für  $j = 1, \dots, n$  gilt:

$$\langle e_i \frac{1}{\langle e_i, e_i \rangle}, e_j \rangle = \delta_{ij} = e_i^*(e_j),$$

also

$$\phi(e_i \frac{1}{\langle e_i, e_i \rangle}) = e_i^*.$$

Insbesondere gilt im Falle eines Euklidischen VR

$$\forall i = 1, \dots, n : \nabla e_i^* = e_i \Leftrightarrow \phi(e_i) = e_i^*,$$

d.h.  $\phi$  realisiert den früher diskutierten (vgl. Abschnitt 1.4) durch duale Basen gegebenen Isomorphismus – im Falle von ONB.

### 6.1.2 Korollar & Definition

Sind  $(W, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  und  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  Vektorräume mit Skalarprodukten,  $\dim W < \infty$  und  $f \in \text{Hom}(W, V)$ , so hat  $f$  eine eindeutige *Adjungierte*  $f^* \in \text{Hom}(V, W)$ ; dabei ist  $f^*$  *adjungiert* zu  $f$ , falls

$$\forall v \in V \forall w \in W : \langle f^*(v), w \rangle = \langle v, f(w) \rangle.$$

**Achtung:**  $V$  und  $W$  sind VR über dem gleichen Körper  $K$ ; die Skalarprodukte sind sesquilinear bzgl. des gleichen Körperautomorphismus!

**Beweis** Für jedes  $v \in V$  definiert

$$\omega_v : W \rightarrow K, w \mapsto \omega_v(w) := \langle v, f(w) \rangle$$



eine Linearform  $\omega_v \in W^*$ ; nach Riesz'schem Darstellungslemma erhält man daher eine eindeutige Abbildung

$$f^* : V \rightarrow W, v \mapsto f^*(v) := \nabla \omega_v.$$

Die Linearität von  $f^*$  folgt aus der dualen Abbildung, siehe unten.

**Bemerkung** Offenbar (Symmetrie) ist  $f^{**} = f$ , wenn  $f^{**} := (f^*)^*$  existiert.

### 6.1.3 Definition & Lemma

Ist  $f \in \text{Hom}(W, V)$ , so heißt  $f^t \in \text{Hom}(V^*, W^*)$ ,

$$f^t : V^* \rightarrow W^*, \nu \mapsto f^t(\nu) := \nu \circ f$$

zu  $f$  *transponiert* oder *dual*. Sind  $\langle\langle \cdot, \cdot \rangle\rangle$  und  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  Skalarprodukte auf  $W$  bzw.  $V$  und

$$\psi : W \rightarrow W^* \text{ und } \phi : V \rightarrow V^*$$

die zugehörigen kanonischen Injektionen, und ist  $f^* \in \text{Hom}(V, W)$  adjungiert zu  $f$ , so gilt

$$\psi \circ f^* = f^t \circ \phi.$$

**Beweis** Für  $v \in V$  und  $w \in W$  gilt:

$$((\psi \circ f^*)(v))(w) = \langle\langle f^*(v), w \rangle\rangle$$

$$((f^t \circ \phi)(v))(w) = (\phi(v) \circ f)(w) = \langle v, f(w) \rangle$$

und nach Definition der Adjungierten folgt die Gleichheit.

**Bemerkung** Ist  $\dim W < \infty$ , so ist  $\psi$  bijektiv und das Resultat des Lemmas kann als Definition dienen:

$$f^* := \psi^{-1} \circ f^t \circ \phi.$$

Wegen  $f^t \in \text{Hom}(V^*, W^*)$  folgt damit auch  $f^* \in \text{Hom}(V, W)$ .

**Bemerkung**  $f \in \text{Hom}(W, V)$  hat *immer* eine Transponierte, eine Adjungierte aber nur unter bestimmten Voraussetzungen, z.B. wenn  $\dim W < \infty$ .

**Bemerkung** Oft wird die Transponierte/Duale  $f^t$  auch mit  $f^*$  bezeichnet.

**Buchhaltung** Sind  $B = (b_1, \dots, b_n)$  und  $C = (c_1, \dots, c_m)$  Basen von  $V$  bzw.  $W$  und  $f \in \text{Hom}(W, V)$ , so gilt:

$$\xi_{B^*}^{C^*}(f^t) = \left( \xi_C^B(f) \right)^t.$$

Sind  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  und  $(W, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  unitär (oder Euklidisch) und  $B, C$  ONB, so gilt

$$\xi_B^C(f^*) = \left( \xi_C^B(f) \right)^*,$$

wobei

$$X^* := \overline{X}^t \text{ für } X \in K^{n \times m}.$$

In diesem Falle gilt nämlich  $b_j^* = \phi(b_j)$  und  $c_i^* = \psi(c_i)$  und damit

$$x_{ij}^* = c_i^*(f^*(b_j)) = \langle c_i, f^*(b_j) \rangle = \overline{\langle b_j, f(c_i) \rangle} = \overline{x_{ji}}.$$

**Bemerkung** Sind  $f, g \in \text{Hom}(W, V)$  und  $x \in K$ , so gilt

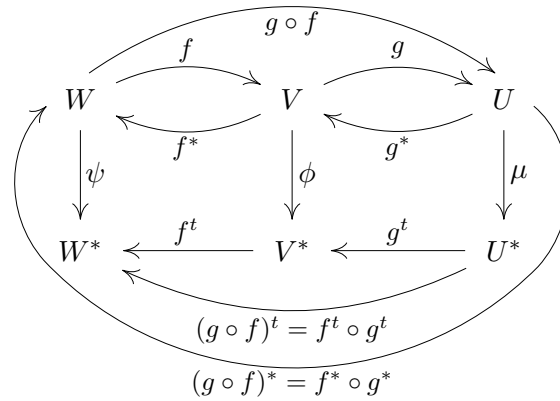
$$(f + gx)^t = f^t + g^t x \text{ und } (f + gx)^* = f^* + g^* \overline{x}.$$

#### 6.1.4 Lemma

Sind  $f \in \text{Hom}(W, V)$  und  $g \in \text{Hom}(V, U)$ , so gilt

$$(g \circ f)^t = f^t \circ g^t \text{ und } (g \circ f)^* = f^* \circ g^*.$$

**Beweis** Nachrechnen/-lesen oder über ein kommutatives Diagramm.



### 6.1.5 Lemma

Sind  $f \in \text{Hom}(W, V)$  und  $f^* \in \text{Hom}(V, W)$  adjungiert, so gilt

$$\ker f^* = f(W)^\perp$$

und  $f^*$  ist injektiv, wenn  $f$  surjektiv ist.

**Beweis** Da die Skalarprodukte  $\langle\langle \cdot, \cdot \rangle\rangle$  und  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  auf  $W$  bzw.  $V$  nicht-degeneriert sind, gilt

$$v \in \ker f^* \Leftrightarrow \forall w \in W : \langle\langle f^*(v), w \rangle\rangle = 0 \Leftrightarrow \forall w \in W : \langle v, f(w) \rangle = 0 \Leftrightarrow f(W)^\perp,$$

also die erste Behauptung; ist  $f(W) = V$ , so folgt damit  $\ker f^* = f(W)^\perp = V^\perp = \{0\}$ .

### 6.1.6 Korollar

Sind  $(W, \langle\langle \cdot, \cdot \rangle\rangle)$  und  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  Euklidisch oder unitär mit  $\dim V, \dim W < \infty$  und  $f \in \text{Hom}(W, V)$  und  $f^* \in \text{Hom}(V, W)$  adjungiert, so gilt

$$\text{rg } f^* = \text{rg } f.$$

**Beweis** In der Situation hier (endlich-dimensional, positiv definite Skalarprodukte) sind  $f(W)$  und  $f(W)^\perp$  komplementäre UR und damit

$$V = f(W) \oplus f(W)^\perp = f(W) \oplus \ker f^*,$$

also

$$\text{rg } f = \dim V - \text{def } f^* = \text{rg } f^*$$

nach Rangsatz für  $f^*$ .

**Bemerkung** Ist  $\dim V, \dim W < \infty$ , so folgt dann mit der Gleichheit der Abbildungen über die kanonischen Injektionen auch

$$\text{rg } f^t = \text{rg } f \text{ für } f \in \text{Hom}(V, W).$$

Daher gilt  $\text{rg } f^* = \text{rg } f$  dann auch für allgemeine Skalarprodukte auf  $\mathbb{R}$ - oder  $\mathbb{C}$ -VR  $V$  und  $W$ .

### 6.1.7 Buchhaltung

Mit den zu  $X \in K^{n \times m}$  und  $Y \in K^{k \times n}$  assoziierten Homomorphismen  $f_X \in \text{Hom}(K^m, K^n)$  und  $f_Y \in \text{Hom}(K^n, K^k)$  zeigt man also

$$(YX)^t = X^t Y^t \text{ und } (YX)^* = X^* Y^*.$$

Weiters folgt wegen  $\text{rg } f_X^* = \text{rg } f_X^t = \text{rg } f_X$

$$\text{rg } X^t = \text{rg } X^* = \text{rg } X;$$

anders ausgedrückt: der Zeilenrang einer Matrix  $X \in K^{n \times m}$  stimmt mit ihrem (Spalten-)Rang überein.

Insbesondere gilt:

$$X \in \text{Gl}(n) \Rightarrow X^t \in \text{Gl}(n).$$

### 6.1.8 Lemma

Sei  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  Euklidisch (unitär);  $f \in \text{Gl}(V)$  ist genau dann orthogonal (unitär), wenn  $f$  und  $f^{-1}$  adjungiert sind,  $f^{-1} = f^*$ .

**Beweis** Ist  $f^{-1} = f^*$  zu  $f$  adjungiert, so ist  $f \in O(V)$  (bzw.  $f \in U(V)$ ), da

$$\forall v, w \in V : \langle f(v), f(w) \rangle = \langle (f^* \circ f)(v), w \rangle = \langle v, w \rangle;$$

ist umgekehrt  $f \in O(V)$  (bzw.  $U(V)$ ), so ist

$$\forall v, w \in V : \langle v, f(w) \rangle = \langle f(f^{-1}(v)), f(w) \rangle = \langle f^{-1}(v), w \rangle,$$

d.h.  $f^{-1}$  ist zu  $f$  adjungiert.

**Bemerkung**  $f \in \text{Gl}(V)$  ist also genau dann orthogonal/unitär, wenn

$$f^* \circ f = f \circ f^* = \text{id}_V.$$

**Bemerkung** Das Lemma lässt sich auf Isomorphismen  $f \in \text{Iso}(W, V)$  verallgemeinern:  $f$  ist genau dann *isometrisch* (längentreu), wenn  $f^{-1} = f^*$ .

### 6.1.9 Buchhaltung

Ist  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  Euklidischer VR,  $\dim V < \infty$ , und  $X = \xi_B^B(f)$  Darstellungsmatrix von  $f \in \text{End}(V)$  bzgl. einer ONB  $B$ , so ist

$$f \in O(V) \Leftrightarrow X^* X = E_n,$$

und analog für einen unitären VR  $V$ . Daher definiert man die *orthogonale (unitäre) Gruppe in  $n$  Variablen*:

$$O(n) := \left\{ X \in \mathbb{R}^{n \times n} \mid X^* X = X^t X = E_n \right\},$$

$$U(n) := \left\{ X \in \mathbb{C}^{n \times n} \mid X^* X = \overline{X}^t X = E_n \right\}.$$

$X$  ist also orthogonal/unitär, wenn die Spalten von  $X$  eine ONB von  $\mathbb{K}^{n \times 1}$  mit dem kanonischen Skalarprodukt bilden.

### 6.1.10 Definition

Sei  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  Euklidisch oder unitär;  $f \in \text{End}(V)$  heißt dann

- *selbstadjungiert* oder *symmetrisch*, falls

$$\forall v, w \in V : \langle f(v), w \rangle = \langle v, f(w) \rangle;$$

- *schiefadjungiert* oder *schiefsymmetrisch*, falls

$$\forall v, w \in V : \langle f(v), w \rangle + \langle v, f(w) \rangle = 0.$$

**Bemerkung**  $f \in \text{End}(V)$  ist also genau dann (schief-)symmetrisch, wenn  $f$  eine Adjungierte  $f^* \in \text{End}(V)$  besitzt und  $f^* = \pm f$ . Dies ist genau dann der Fall, wenn

$$(v, w) \mapsto \langle\langle v, w \rangle\rangle := \langle v, f(w) \rangle$$

eine (schief-)symmetrische Sesquilinearform definiert.

### 6.1.11 Korollar

Sei  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  Euklidischer VR; eine Projektion  $p \in \text{End}(V)$  ist genau dann Orthogonalprojektion, wenn sie selbstadjungiert ist,  $p^* = p$ .

**Beweis** Lemma Abschnitt 5.5.

## 6.2 Normale Endomorphismen

**Motivation** Für orthogonale/unitäre selbst- und schiefadjungierte Endomorphismen  $f \in \text{End}(V)$  gilt stets

$$f^* \circ f = f \circ f^*.$$

Dies ist eine „gute“ Eigenschaft: sie liefert viele/wichtige strukturelle Aussagen über Endomorphismen.

**Generalvoraussetzung** In diesem Abschnitt ist  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  Euklidisch oder unitär.

### 6.2.1 Definition

$f \in \text{End}(V)$  heißt *normal*, wenn  $f$  eine Adjungierte  $f^* \in \text{End}(V)$  besitzt und

$$f^* \circ f = f \circ f^*.$$

### 6.2.2 Buchhaltung

Ist  $\dim V < \infty$  und  $X = \xi_B^B(f)$  Darstellungsmatrix von  $f \in \text{End}(V)$  bzgl. einer ONB  $B$  von  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ , so gilt

$$f \text{ normal} \Leftrightarrow X^* X = X X^*,$$

d.h. wenn  $X \in \mathbb{K}^{n \times n}$  *normal* ist.

### 6.2.3 Lemma

Ist  $f \in \text{End}(V)$  normal, so gilt:

- (i)  $\ker f = \ker f^* = f(V)^\perp$ ;
- (ii)  $\forall v, w \in V : \langle f^*(v), f^*(w) \rangle = \langle f(v), f(w) \rangle$ ;
- (iii)  $\forall x \in \mathbb{K} \forall v \in V : f(v) = vx \Rightarrow f^*(v) = v\bar{x}$ .
- (iv) Sind  $v, w \in V$  Eigenvektoren zu EW  $x, y \in \mathbb{K}$  von  $f$ , so gilt

$$x = y \text{ oder } v \perp w.$$

**Beweis** Sei  $f \in \text{End}(V)$  normal.

- (ii) Wegen  $f^{**} = f$  gilt für  $v, w \in V$ :

$$\langle f^*(v), f^*(w) \rangle - \langle f(v), f(w) \rangle = \langle (f^{**} \circ f^*)(v), w \rangle - \langle (f^* \circ f)(v), w \rangle = \langle (f \circ f^* - f^* \circ f)(v), w \rangle = 0$$

(i) Wegen (ii) gilt für  $v \in V$

$$f^*(v) = 0 \Rightarrow 0 = \|f^*(v)\|^2 = \|f(v)\|^2 \Rightarrow f(v) = 0$$

und umgekehrt, und damit

$$\ker f^* = \ker f.$$

Nach früherem Lemma ist

$$\ker f^* = f(V)^\perp$$

(iii) Nach (i) ist für  $x \in \mathbb{K}$

$$\ker(f - \text{id}_V x) = \ker(f - \text{id}_V x)^* = \ker(f^* - \text{id}_V \bar{x}),$$

da  $f - \text{id}_V x$  mit  $f$  normal ist.

(iv) Mit (iii) folgt für  $v, w \in V$  mit  $f(v) = vx$  und  $f(w) = wy$

$$(x - y)\langle v, w \rangle = \langle v\bar{x}, w \rangle - \langle v, wy \rangle = \langle f^*(v), w \rangle - \langle v, f(w) \rangle = 0.$$

#### 6.2.4 Lemma

Ist  $f \in \text{End}(V)$  normal und  $U \subset V$  UVR, so gilt

(i) Ist  $U$   $f$ -invariant, so ist  $U^\perp$   $f^*$ -invariant;

(ii) Ist  $U$   $f$ - und  $f^*$ -invariant, so liefert Einschränkung normale Endomorphismen

$$f|_U \in \text{End}(U) \text{ und } f|_{U^\perp} \in \text{End}(U^\perp).$$

**Beweis** Für (i) wird nur die Existenz der Adjungierten benutzt.

(i) Sei  $v \in U^\perp$ , dann gilt:

$$\forall u \in U : \langle f^*(v), u \rangle = \langle v, f(u) \rangle = 0$$

(ii) Da  $U$   $f$ - und  $f^*$ -invariant ist, ist (nach(i))  $U^\perp$   $f^*$ - und  $f^{**} = f$ -invariant. Damit ist es sinnvoll

$$f|_U \in \text{End}(U), f|_{U^\perp} \in \text{End}(U^\perp)$$

$$f^*|_U \in \text{End}(U), f^*|_{U^\perp} \in \text{End}(U^\perp)$$

zu betrachten. Nun gilt:

$$\forall u, v \in U : \langle f|_U^*(u), v \rangle = \langle u, f|_U(v) \rangle = \langle u, f(v) \rangle = \langle f^*(u), v \rangle = \langle f^*|_U(u), v \rangle$$

und analog für  $v, w \in U^\perp$ . Damit folgt:  $f|_U^* = f^*|_U$  und  $f|_{U^\perp}^* = f^*|_{U^\perp}$  und also

$$f|_U^* \circ f|_U = f^* \circ f|_U = f \circ f^*|_U = f|_U \circ f|_U^*.$$

**Bemerkung & Beispiel** Eine Orthogonalprojektion ist selbstadjungiert,  $p \in \text{End}(V)$  mit  $p^2 = p, p^* = p$  und damit normal. Ist  $p \neq \text{id}_V, 0$ , so ist

$$V = U \oplus_\perp U^\perp \text{ mit } \begin{cases} U := p(V), \\ U^\perp = \ker p. \end{cases}$$

Wir definieren:

$$\pi : V \rightarrow U, v \mapsto \pi(v) := p(v) \text{ und } \iota : U \rightarrow V, u \mapsto \iota(u) := u;$$

man nennt die isometrische Abbildung  $\iota$  auch die *Inklusion* von  $U$  in  $V$ . Dann sind  $\pi$  und  $\iota$  adjungiert:

$$\forall u \in U \forall v \in V : \langle \iota(u), v \rangle = \langle u, \pi(v) \rangle|_U$$

Insbesondere ist die „Projektionsabbildung“  $\pi$  *nicht* selbstadjungiert.

**Achtung:** Die Adjungierte hängt von Definitions- und Wertebereich ab!

### 6.2.5 Spektralsatz (unitärer Fall)

Sei  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  unitär,  $\dim V < \infty$ , und sei  $f \in \text{End}(V)$  normal. Dann besitzt  $V$  eine ONB aus Eigenvektoren von  $f$ .

**Bemerkung** Es gilt auch die Umkehrung: Ist  $(e_1, \dots, e_n)$  ONB mit

$$f(e_i) = e_i x_i, \text{ also } f^*(e_i) = e_i \overline{x_i}, \quad i = 1, \dots, n,$$

so gilt

$$(f^* \circ f)(e_i) = e_i \overline{x_i} x_i = e_i x_i \overline{x_i} = (f \circ f^*)(e_i), \quad i = 1, \dots, n,$$

d.h.  $f$  ist normal.

**Beweis** Induktion über  $n = \dim V$ .

Für  $n = 1$  ist die Aussage trivial. Sei die Aussage für  $n \in \mathbb{N}$  wahr. Für  $n + 1$  gilt dann:

$f$  hat einen Eigenwert  $x \in \mathbb{C}$ , da das charakteristische Polynom  $\chi_f(t) \in \mathbb{C}[t]$  nach Fundamentalsatz der Algebra in Linearfaktoren zerfällt.



Sei  $e \in V^\times$  ein zugehöriger Eigenvektor,

$$f(e) = ex, \text{ o.B.d.A. } \|e\| = 1.$$

Wegen  $f^*(e) = e\bar{x}$  ist  $[e]$  dann  $f$ - und  $f^*$ - invariant und damit

$$V = [e] \oplus_\perp [e]^\perp,$$

wobei  $f|_{[e]} \in \text{End}([e])$  und  $f|_{[e]^\perp} \in \text{End}([e]^\perp)$  normal sind (Lemma).

Da  $\dim[e]^\perp = n$  liefert die Induktions-Annahme eine ONB  $(e_1, \dots, e_n)$  von  $[e]^\perp$  aus Eigenvektoren von  $f|_{[e]^\perp}$ . Damit ist  $(e, e_1, \dots, e_n)$  eine ONB aus Eigenvektoren von  $f$ .

### 6.2.6 Buchhaltung

Ein normaler Endomorphismus  $f \in \text{End}(V)$  eines unitären VR  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  mit  $\dim V < \infty$  ist also *orthogonal diagonalisierbar*, d.h. es existiert eine ONB aus Eigenvektoren von  $f$ .

Also, bezüglich einer solchen ONB  $B$  ist

$$\xi_B^B(f) = \text{diag}(x_1, \dots, x_n).$$

Da  $\xi_B^B(f^*) = (\xi_B^B(f))^*$  gilt:

- ist  $f$  selbstadjungiert, so sind alle Eigenwerte reell,  $x_i = \bar{x}_i$ ;
- ist  $f$  schiefadjungiert, so sind alle Eigenwerte imaginär,  $x_i = -\bar{x}_i$
- ist  $f$  unitär, so sind alle Eigenwerte *unitär*, d.h. für  $j = 1, \dots, n$  ist

$$x_j \in S^1 := \{x \in \mathbb{C} : \bar{x}x = 1\} = \{e^{iy} \mid y \in \mathbb{R}\}.$$

### 6.2.7 Korollar & Definition

Ist  $X \in \mathbb{C}^{n \times n}$  normal,  $X^*X = XX^*$ , so gilt

$$\exists P \in U(n) : P^{-1}XP = \text{diag}(x_1, \dots, x_n).$$

Dabei gilt:

- ist  $X$  selbstadjungiert,  $X^* = X$ , so sind  $x_1, \dots, x_n \in \mathbb{R}$ ;
- ist  $X$  schiefadjungiert,  $X^* = -X$ , so sind  $x_1, \dots, x_n \in i\mathbb{R}$ ;
- ist  $X$  unitär,  $X \in U(n) = \{Y \in \mathbb{C}^{n \times n} \mid Y^*Y = E_n\}$ , so gilt  $|x_1|, \dots, |x_n| = 1$ .

**Beweis** Sei  $X \in \mathbb{C}^{n \times n}$ , betrachte  $\mathbb{C}^n$  als unitären VR mit Standardbasis  $E$  als ONB.

$$\Gamma_E(\langle \cdot, \cdot \rangle) = E_n,$$

und den assoziierten Endomorphismus  $f_X \in \text{End}(\mathbb{C}^n)$ . Orthonormale Basiswechsel  $B = EP$  sind dann durch unitäre Matrizen  $P \in U(n)$  gegeben:

$$E_n = \Gamma_B(\langle \cdot, \cdot \rangle) = P^* \Gamma_E(\langle \cdot, \cdot \rangle) P = P^* P \Leftrightarrow P \in U(n).$$

Anwendung des Spektralsatzes liefert also die Behauptung.

**Beispiel** Für  $X = \begin{pmatrix} \cos s & -\sin s \\ \sin s & \cos s \end{pmatrix} \in \mathbb{C}^{2 \times 2}$  mit  $s \in \mathbb{R}$  ist  $X^* = X^t = X^{-1}$ , d.h.  $X$  ist unitär, also normal, und damit

$$\exists P \in (2) : P^{-1} \begin{pmatrix} \cos s & -\sin s \\ \sin s & \cos s \end{pmatrix} P = \begin{pmatrix} x_1 & 0 \\ 0 & x_2 \end{pmatrix}$$

wobei  $x_i$  die Eigenwerte von  $f_X$  sind, d.h. Nullstellen des charakteristischen Polynoms

$$\chi_X(t) = (t - \cos s)^2 + \sin^2 s = t^2 - 2t \cos s + 1 = (t - e^{is})(t - e^{-is}).$$

Bemerke:  $|e^{\pm is}| = 1$ , d.h.  $x_{1,2}$  sind unitär. Eigenvektoren bzw.  $P$ :

$$P = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} i & -i \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$$

### 6.2.8 Spektralzerlegung (unitärer Fall)

Sei  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  unitär,  $\dim V < \infty$ , und sei  $f \in \text{End}(V)$  normal; dann zerfällt  $V$  als orthogonale direkte Summe der Eigenräume von  $f$ ,

$$V = \bigoplus_{x \in \chi_f^{-1}(\{0\})} \ker(\text{id}_V x - f).$$

**Beweis** Folgt direkt aus dem Spektralsatz.

**Bemerkung** Mit gewissen Voraussetzungen gilt der Satz auch für  $\dim V = \infty$ .

### 6.2.9 Definition & Lemma

Seien  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  Euklidischer VR und  $f \in \text{End}(V)$  normal. Die *komplexe Erweiterung*

$$f_{\mathbb{C}} : V_{\mathbb{C}} \rightarrow V_{\mathbb{C}}, (v, w) \mapsto f_{\mathbb{C}}(v, w) := (f(v), f(w))$$

von  $f$  ist dann ein normaler Endomorphismus von  $(V_{\mathbb{C}}, \langle \cdot, \cdot \rangle_{\mathbb{C}})$ .

**Bemerkung** Die komplexe Erweiterung für  $f \in \text{Hom}(V, W)$  definiert man analog.

**Bemerkung** Auf  $V_{\mathbb{C}} = V \times V$  ist die (komplexe) Skalarmultiplikation

$$(v, w)(x + iy) = (v, w)x + J(v, w)y$$

wobei  $J(v, w) = (-w, v)$ ; damit ist  $f_{\mathbb{C}}$  komplex linear, da

$$f_{\mathbb{C}} \circ J = J \circ f_{\mathbb{C}}.$$

**Beweis** Nach Komplexifizierungslemma ist  $(V_{\mathbb{C}}, \langle \cdot, \cdot \rangle_{\mathbb{C}})$  unitär, wobei

$$\langle (v, w), (v', w') \rangle_{\mathbb{C}} = (\langle v, v' \rangle + \langle w, w' \rangle) + i(\langle v, w' \rangle - \langle w, v' \rangle);$$

offenbar gilt für  $v, w, v', w' \in V_{\mathbb{C}}$

$$\langle (f^*(v), f^*(w)), (v', w') \rangle_{\mathbb{C}} = \langle (v, w), (f(v'), f(w')) \rangle_{\mathbb{C}} = \langle (v, w), f_{\mathbb{C}}(v', w') \rangle_{\mathbb{C}}$$

also  $(f_{\mathbb{C}})^* = (f^*)_{\mathbb{C}}$  und damit

$$f_{\mathbb{C}}^* \circ f_{\mathbb{C}} = (f^* \circ f)_{\mathbb{C}} = (f_{\mathbb{C}} \circ f_{\mathbb{C}}^*),$$

d.h.  $f_{\mathbb{C}}$  ist normal.

**Bemerkung** Ist  $(v, w) \in V_{\mathbb{C}}^{\times}$  Eigenvektor zum Eigenwert  $(x - iy) \in \mathbb{C}$  von  $f_{\mathbb{C}}$ ,

$$f_{\mathbb{C}}(v, w) = (f(v), f(w)) = (v, w)(x - iy) = (vx + wy, -vy + wx) = (v, w) \begin{pmatrix} x & -y \\ y & x \end{pmatrix}$$

so können zwei Fälle eintreten:

1.  $y = 0$  und  $[\{v, w\}] \subset \ker(\text{id}_V x - f)$ , oder
2.  $y \neq 0$  und  $\dim[\{v, w\}] = 2$  und<sup>2</sup>  $f|_{[\{v, w\}]}$  ist *Drehstreckung*.

---

<sup>2</sup> $[\{v, w\}]$  ist  $f$ -invarianter UVR, also  $f|_{[\{v, w\}]}$   $\in \text{End}([\{v, w\}])$

Im zweiten Fall ( $y \neq 0$ ) ist  $(v, -w)$  ebenfalls Eigenvektor zum Eigenwert  $(x + iy)$  von  $f_{\mathbb{C}}$ , d.h. komplexe Eigenwerte/-vektoren treten in „komplex konjugierten Paaren“ auf.

### 6.2.10 Spektralzerlegung (Euklidischer Fall)

Seien  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  Euklidischer VR mit  $\dim V < \infty$  und  $f \in \text{End}(V)$  normal; dann zerfällt  $V$  als orthogonale direkte Summe  $f$ - und  $f^*$ -invarianter UVR  $V_i$

$$V = \bigoplus_{i=1}^m V_i \text{ mit } V_i \perp V_j \text{ f\"ur } i \neq j$$

und

$$\begin{cases} \dim V_i = 1 & \text{und } f|_{V_i} \text{ Streckung f\"ur } i \leq k \leq m \\ \dim V_i = 2 & \text{und } f|_{V_i} \text{ Drehstreckung f\"ur } k < i \leq m, \end{cases}$$

f\"ur geeignetes  $k \in \{0, \dots, m\}$ . Beweis nach Lemma.

### 6.2.11 Buchhaltung

Zu einem normalen  $f \in \text{End}(V)$  eines Euklidischen VR  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  mit  $\dim V < \infty$  gibt es also eine ONB  $E$  von  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ , sodass

$$\xi_E^E(f) = \begin{pmatrix} x_1 & 0 & \cdots & & \\ 0 & \ddots & \ddots & & 0 \\ \vdots & \ddots & x_k & & \\ & & & X_{n+1} & \ddots & \vdots \\ & 0 & & \ddots & \ddots & 0 \\ & & \cdots & 0 & X_m \end{pmatrix} \text{ mit } X_i = \begin{pmatrix} x_i & -y_i \\ y_i & x_i \end{pmatrix} \text{ f\"ur } i = k+1, \dots, m$$

und  $x_1, \dots, x_m, y_{k+1}, \dots, y_m \in \mathbb{R}$ . Da  $\xi_E^E(f^*) = (\xi_E^E(f))^* = (\xi_E^E(f))^*$  gilt

- ist  $f$  selbstadjungiert, so sind alle Eigenwerte reell,  $k = m$ ;
- ist  $f$  schiefadjungiert, so sind alle Eigenwerte imaginär,  $k = 0$  und  $x_1 = \dots = x_m = 0$ ;
- ist  $f$  orthogonal, so sind alle Eigenwerte unitär,  $x_i^2 + y_i^2 = 1$  (insbesondere  $x_1^2 = \dots = x_k^2 = 1$ ).

Entsprechendes gilt f\"ur normale Matrizen. Insbesondere erh\"alt man den Satz \"uber die

### 6.2.12 Hauptachsentransformation

Ist  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  Euklidischer VR mit  $\dim V < \infty$  und  $f \in \text{End}(V)$  selbstadjungiert, so ist  $f$  orthogonal diagonalisierbar.

**Bemerkung** Die Hauptachsentransformation kann zur Bestimmung der Signatur einer symmetrischen Bilinearform  $\sigma : V \times V \rightarrow \mathbb{R}$  auf einem  $\mathbb{R}$ -VR  $V$  mit  $\dim V < \infty$  dienen:

- Wähle (beliebig) ein Euklidisches (Referenz-) Skalarprodukt  $\langle \cdot, \cdot \rangle : V \times V \rightarrow \mathbb{R}$ ;
- Definiere  $b \in \text{End}(V)$  (Rieszssches Darstellungslemma) durch

$$\forall v, w \in V : \sigma(v, w) = \langle v, b(w) \rangle;$$

da  $\sigma$  symmetrisch ist, ist  $b$  selbstadjungiert.

- Bestimme Eigenwerte  $x_i \in \mathbb{R}$  von  $b$  mit Vielfachheiten<sup>3</sup>  $k_i \in \mathbb{N}$  (Hauptachsentransformation).
- Dann ist

$$\text{sgn}(\sigma) = \left( \sum_{x_i > 0} k_i, \sum_{x_i < 0} k_i, \text{def } b \right).$$

Ist  $E$  ONB aus Eigenvektoren von  $b$ , so gilt<sup>4</sup>

$$\Gamma_E(\sigma) = \xi_E^E(b).$$

### 6.2.13 Quadratwurzelsatz

Ist  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  Euklidischer VR und  $f \in \text{End}(V)$  selbstadjungiert, so heißt

(i)  $f$  *positiv semi-definit* ( $f \geq 0$ ), falls

$$\forall v \in V : \langle v, f(v) \rangle \geq 0;$$

(ii)  $f$  *positiv definit* ( $f > 0$ ), falls

$$\forall v \in V^\times : \langle v, f(v) \rangle > 0.$$

Ist  $\dim V < \infty$  und  $f$  positiv semi-definit, so gilt

$$\exists! g \in \text{End}(V) : \begin{cases} g \geq 0 \\ f = g \circ g = g^2. \end{cases}$$

**Beweis** Mit Hauptachsentransformation: Ist  $E = (e_1, \dots, e_n)$  ONB aus Eigenvektoren von  $f$ ,

$$f(e_i) = x_i e_i \text{ mit } x_i = \langle e_i, f(e_i) \rangle \geq 0$$

<sup>3</sup>Geometrische und algebraische Vielfachheiten sind gleich, da  $b$  diagonalisierbar ist.

<sup>4</sup>Gleichheit der Einträge; sonst sinnlos!

für  $i = 1, \dots, n$ , dann liefert

$$g \in \text{End}(V) \text{ mit } \forall i \in \{1, \dots, n\} : g(e_i) = e_i \sqrt{x_i}$$

eindeutig die gesuchte „Quadratwurzel“ von  $f$ .

### 6.2.14 Polarzerlegung

Ist  $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  Euklidischer VR mit  $\dim V < \infty$ , so gilt

$$\forall f \in \text{Gl}(V) \exists! h > 0 \exists! k \in O(V) : f = h \circ k.$$

#### Beweis

- *Eindeutigkeit:* Ist  $f = h \circ k$  mit  $k \in O(V)$ ,  $h > 0$ , so gilt

$$H := f \circ f^* = h \circ \underbrace{k \circ k^*}_{=\text{id}_V} \circ h^* = h^2$$

nach Quadratwurzelsatz ist also  $h$ , und damit  $k$  eindeutig bestimmt.

- *Existenz:* Wegen  $\ker f^* = f(V)^\perp = V^\perp = \{0\}$  gilt für  $H := f \circ f^*$

$$\forall v \in V^\times : \langle v, H(v) \rangle = \langle v, (f \circ f^*)(v) \rangle = \langle f^*(v), f^*(v) \rangle > 0$$

also  $H > 0$ . Definiere (Quadratwurzelsatz)

$$h := \sqrt{H} > 0 \text{ und } k := h^{-1} \circ f;$$

dann ist

$$\begin{aligned} \forall v \in V : \langle k(v), k(v) \rangle &= \langle (h^{-1} \circ f)(v), (h^{-1} \circ f)(v) \rangle = \langle (H^{-1} \circ f)(v), f(v) \rangle \\ &= \langle ((f^*)^{-1} \circ f^{-1} \circ f)(v), f(v) \rangle = \langle v, (f^{-1} \circ f)(v) \rangle = \langle v, v \rangle, \end{aligned}$$

also ist  $k \in O(V)$ .

**Bemerkung** Quadratwurzelsatz und Polarzerlegung gelten auch in unitären VR – „positiv (semi-)definit“ ist auch im unitären Fall sinnvoll:

$$\forall v \in V : \overline{\langle v, f(v) \rangle} = \langle f(v), v \rangle = \langle v, f(v) \rangle$$

für selbstadjungierte  $f$ , also  $\forall v \in V : \langle v, f(v) \rangle \in \mathbb{R}$ .

## 6.3 Nilpotente Endomorphismen und Jordansche Normalform

**Generalvoraussetzung** In diesem Abschnitt werden nur endlichdimensionale Vektorräume behandelt.

### 6.3.1 Lemma

Sei  $f \in \text{End}(V)$  und  $p_1(t), p_2(t) \in K[t]$  normiert und teilerfremd. Ist

$$p(f) = 0, \text{ wobei } p(t) = p_1(t)p_2(t),$$

so gilt für  $V_i := \ker p_i(f)$  ( $i = 1, 2$ )

$$V = V_1 \oplus V_2 \text{ und } f(V_i) \subset V_i$$

**Beweis** Für jedes Polynom  $q(t) \in K[t]$  ist  $\ker q(f) \subset V$  ein  $f$ -invarianter UVR, da

$$\begin{aligned} \forall v \in \ker q(f) : q(f)(f(v)) &= (q(f) \circ f)(v) \\ &= (f \circ q(f))(v) = f(q(f)(v)) = 0 \end{aligned}$$

Wegen  $p(f) = 0$  gilt

$$\{0\} = p(f)(V) = \begin{cases} (p_1(f) \circ p_2(f))(V) \Rightarrow p_2(f)(V) \subset \ker p_1(f) \\ (p_2(f) \circ p_1(f))(V) \Rightarrow p_1(f)(V) \subset \ker p_2(f). \end{cases}$$

Da  $p_1(t), p_2(t)$  teilerfremd sind, gilt nach Lemma von Bézout (vgl. Abschnitt 4.3.9)

$$\exists q_1(t), q_2(t) \in K[t] : 1 = q_1(t)p_1(t) + q_2(t)p_2(t),$$

und damit

$$V = (p_1(f) \circ q_1(f) + p_2(f) \circ q_2(f))(V) \subset p_1(f)(V) + p_2(f)(V) \subset V_2 + V_1;$$

andererseits gilt für  $v \in V_1 \cap V_2$

$$\begin{aligned} v &= (q_1(f) \circ p_1(f) + q_2(f) \circ p_2(f))(v) \\ &= q_1(f)\left(\underbrace{p_1(f)(v)}_0\right) + q_2(f)\left(\underbrace{p_2(f)(v)}_0\right) = 0 \end{aligned}$$

Also ist  $V = V_1 \oplus V_2$ .

### 6.3.2 Hauptraumzerlegung

Ist das Minimalpolynom  $\mu_f(t) \in K[t]$  eines Endomorphismus  $f \in \text{End}(V)$  Produkt von Linearfaktoren,

$$\mu_f(t) = (t - x_1)^{r_1} \cdots (t - x_m)^{r_m}, \quad x_i \neq x_j \text{ für } i \neq j$$

so ist  $V$  direkte Summe der *Haupträume* zu den Eigenwerten  $x_i$  von  $f$ :

$$V = \bigoplus_{i=1}^m V_i \text{ mit } V_i := \ker(\text{id}_V x_i - f)^{r_i}.$$

**Beweis** Folgt direkt mit dem Lemma (Induktion).

**Bemerkung** Der Wert  $k_i = \dim V_i$  ist die algebraische Vielfachheit des Eigenwerts  $x_i$ . Formuliert man die Hauptraumzerlegung mit dem charakteristischen Polynom,

$$\chi_f(t) = (t - x_1)^{k_1} \cdots (t - x_m)^{k_m}, \quad x_i \neq x_j \text{ für } i \neq j,$$

so folgt dies leicht, da wegen  $f(V_i) \subset V_i$  und  $x_i \neq x_j$  für  $i \neq j$

$$\chi_{f|_{V_i}}(t) = (t - x_i)^{k_i} \Rightarrow \dim V_i = \deg \chi_{f|_{V_i}} = k_i.$$

### 6.3.3 Buchhaltung

Ist also

$$\mu_f(t) = (t - x_1)^{r_1} \cdots (t - x_m)^{r_m}, \quad x_i \neq x_j \text{ für } i \neq j,$$

so hat  $f$  eine Darstellungsmatrix in *Block-Diagonalgestalt*,

$$\xi_B^B(f) = \begin{pmatrix} X_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & X_m \end{pmatrix} \text{ mit } X_i \in K^{k_i \times k_i},$$

wobei  $k_i \geq r_i$  die algebraischen Vielfachheiten der Eigenwerte  $x_i$  sind.

Dies liefert die „Makrostruktur“ eines Endomorphismus mit zerfallendem Minimal- oder charakteristischem Polynom – eine weitere Strukturanalyse der  $f|_{V_i} \in \text{End}(V_i)$  liefert dann die „Mikrostruktur“ (mögliche Form der  $X_i$ 's).

**Bemerkung** Für  $V_i = \ker(\text{id}_V x_i - f)^{r_i}$  und  $g_i := (f - \text{id}_V x_i)|_{V_i} \in \text{End}(V_i)$  gilt offenbar  $g_i^{r_i} = 0$ ; andererseits ist  $g_i^{r_i-1} \neq 0$ , denn sonst wäre

$$p(t) = (t - x_1)^{r_1} \cdots (t - x_{i-1})^{r_{i-1}} (t - x_i)^{r_i-1} (t - x_{i+1})^{r_{i+1}} \cdots (t - x_m)^{r_m}$$



normiertes Annulatorpolynom mit

$$\deg p(t) = \deg \mu_f(t) - 1 < \deg \mu_f(t).$$

Also wäre  $\mu_f(t)$  nicht Minimalpolynom.

### 6.3.4 Definition

Eine Abbildung  $f \in \text{End}(V)$  heißt *nilpotent*, falls  $f^r = 0$  für ein  $r \in \mathbb{N}$ .

**Bemerkung** Die weitere Strukturanalyse eines Endomorphismus mit in Linearfaktoren zerfallendem Minimalpolynom reduziert sich also auf die nilpotenter Endomorphismen

$$g_i = (f - \text{id}_V x_i)|_{V_i} \in \text{End}(V_i).$$

Dies liefert dann die „Mikrostruktur“.

**Zur Erinnerung** Ist  $U \subset V$  ein  $f$ -invarianter UVR  $f(U) \subset U$ , so ist  $f|_U \in \text{End}(U)$ ; eine  $f$ -zyklische Basis von  $U$  ist dann eine Basis der Form (vgl. 4.5.2)

$$(v, f(v), \dots, f^{r-1}(v)).$$

Insbesondere besitzt für jedes  $v \in V^\times$  der von  $f$  erzeugte  $f$ -zyklische Unterraum

$$\mathcal{Z}_v := \left[ \left( f^k(v) \right)_{k \in \mathbb{N}} \right]$$

eine  $f$ -zyklische Basis; ist für  $v \in V$  und  $r \in \mathbb{N}$

$$f^r(v) = 0 \text{ und } f^{r-1}(v) \neq 0,$$

so ist  $(v, \dots, f^{r-1}(v))$  eine  $f$ -zyklische Basis von  $\mathcal{Z}_v$ .

### 6.3.5 Lemma

Seien  $f \in \text{End}(V)$  nilpotent,  $f^r = 0$ , und  $v \in V$  so, dass  $f^{r-1}(v) \neq 0$ . Damit existiert ein UVR  $U \subset V$  mit

$$f(U) \subset U \text{ und } V = \mathcal{Z}_v \oplus U.$$

Die Einschränkung  $f|_U \in \text{End}(U)$  ist dann nilpotent,

$$f|_U^q = 0 \text{ mit } q \leq r.$$

**Beweis** Sei  $U \subset V$  ein UVR mit

$$f(U) \subset U \quad \text{und} \quad \{0\} = \mathcal{Z}_v \cap U$$

Es gibt solche Unterräume, e.g.  $U = \{0\}$ . Zu zeigen: Es gibt solch einen Unterraum  $U$  mit

$$V = \mathcal{Z}_v + U$$

Strategie: Wir zeigen, dass  $U$  vergrößert werden kann, wenn  $V \neq \mathcal{Z}_v + U$ , sei das also der Fall. Da  $f^r(V) = \{0\} \subset \mathcal{Z}_v + U$  existiert  $s \in \{1, \dots, r\}$  mit

$$f^s(V) \subset \mathcal{Z}_v + U \quad \text{und} \quad W := f^{s-1}(V) \not\subset \mathcal{Z}_v + U.$$

Wegen  $\mathcal{Z}_v \cap U = \{0\}$  hat  $f(w)$  für  $w \in W$  eine eindeutige Zerlegung

$$f(w) = \sum_{k=0}^{r-1} f^k(v)x_k + u \in \mathcal{Z}_v \oplus U$$

wobei

$$0 = f^r(w) = f^{r-1}(v)x_0 + f^{r-1}(u) \Rightarrow x_0 = 0$$

und damit

$$f(u') = u \in U \quad \text{für} \quad u' := w - \sum_{k=1}^{r-1} f^{k-1}(v)x_k.$$

Folglich ist  $U' := [u'] + U$  ein  $f$ -invarianter Unterraum,  $f(U') \subset U \subset U'$ . Weiters ist  $u' - w \in \mathcal{Z}_v$ . Wählt man also  $w \in W \setminus (\mathcal{Z}_v + U)$ , so erhält man  $u' \notin \mathcal{Z}_v + U$  und damit

$$U' \neq U \quad \text{und} \quad \mathcal{Z}_v \cap U' = \{0\}.$$

Da  $f^r = 0$  gilt dies offenbar auch für jede Einschränkung von  $f$ .

### 6.3.6 Struktursatz für nilpotente Endomorphismen

Ist  $f \in \text{End}(V)$  nilpotent, so ist  $V$  direkte Summe  $f$ -zyklischer UVR  $\mathcal{Z}_{v_j}$ ,

$$V = \bigoplus_{j=1}^d \mathcal{Z}_{v_j} = \bigoplus_{j=1}^d \left[ \left( f^k(v_j) \right)_{k \in \mathbb{N}} \right].$$

Die Familie der Dimensionen  $(r_1, \dots, r_d)$  der Dimensionen  $r_j = \dim \mathcal{Z}_{v_j}$  ist bis auf Permutationen eindeutig<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup>Beispielsweise folgt die Eindeutigkeit, wenn man aufsteigende Dimensionen fordert.

**Bemerkung** Die Zerlegung in  $f$ -zyklische UVR ist *nicht* eindeutig!

**Bemerkung** Da  $\ker f \cap \mathcal{Z}_{v_j} = [f^{r_j-1}(v_j)]$  für  $j = 1, \dots, d$ , ist  $d = \text{def } f$ .

### 6.3.7 Buchhaltung

Ist also  $f$  nilpotent, so hat  $f$  eine Darstellungsmatrix in Block-Diagonalgestalt,

$$\xi_B^B(f) = \begin{pmatrix} J_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & J_d \end{pmatrix} \text{ mit } J_j = \begin{pmatrix} 0 & & 0 \\ 1 & \ddots & \\ & \ddots & \ddots \\ 0 & & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

**Beweis** Die Existenz der Zerlegung folgt induktiv aus dem Lemma.

Zur Eindeutigkeit der Dimensionsfamilie: Es bezeichne

$$n_k := \#\{r_j = k \mid j = 1, \dots, d\}$$

die Anzahl der  $f$ -zyklischen UR  $\mathcal{Z}_{v_j}$  mit  $\dim \mathcal{Z}_{v_j} = k$  für  $k = 1, \dots, n = \dim V$ . Dann gilt

$$\begin{aligned} \text{rg } f^0 &= \sum_{k=1}^n k n_k \\ \text{rg } f^1 &= \sum_{k=2}^n (k-1) n_k \\ &\vdots \\ \text{rg } f^s &= \sum_{k=s+1}^n (k-s) n_k \end{aligned}$$

für  $s = 0, \dots, n-1$ . Also erfüllen die  $n_k$ 's ein eindeutig lösbares lineares Gleichungssystem

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & \cdots & n \\ & 1 & \cdots & n-1 \\ & & \ddots & \\ 0 & & & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ n_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{rg } f^0 \\ \vdots \\ \vdots \\ \text{rg } f^{n-1} \end{pmatrix}$$

### 6.3.8 Jordansche Normalform

Ist das Minimalpolynom  $\mu_f(t) \in K[t]$  eines Endomorphismus  $f \in \text{End}(V)$  Produkt von Linearfaktoren,

$$\mu_f(t) = (t - x_1)^{r_1} \cdots (t - x_m)^{r_m}, \quad x_i \neq x_j \text{ für } i \neq j$$

so besitzt  $f$  eine Darstellungsmatrix in *Jordanscher Normalform*, d.h.

- *Makrostruktur*:  $\xi_B^B = \text{diag}(X_1, \dots, X_m)$ , wobei  $X_i \in K^{k_i \times k_i}$  mit  $k_i \geq r_i$  die algebraischen Vielfachheiten der Eigenwerte  $x_i$  sind, und
- *Mikrostruktur*: jedes  $X_i = \text{diag}(J_{i1}(x_i), \dots, J_{id}(x_i))$ , mit *Jordanblöcken*

$$J_{ij}(x) = \begin{pmatrix} x & & & \\ & 1 & x & \\ & & \ddots & \ddots \\ & & & 1 & x \end{pmatrix}.$$

Dabei ist  $\xi_B^B(f)$  eindeutig, bis auf Anordnung der Blöcke.

**Bemerkung** Die Basis  $B$  ist *nicht* eindeutig!

**Beweis** Folgt direkt aus den vorigen beiden Sätzen.

## 6.4 Quadriken

**Generalvoraussetzung** In diesem Abschnitt ist  $(A, V, \tau)$  ein *reeller* affiner Raum über einem  $\mathbb{R}$ -VR  $V$ ;  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  ist ein Euklidisches Skalarprodukt.

### 6.4.1 Definition

Eine *Quadrik*  $Q \subset A$  ist die Lösungsmenge einer quadratischen Gleichung

$$Q = \{q = o + v \mid \beta(v, v) + 2\lambda(v) + \rho = 0\}$$

wobei  $o \in A$  ein Ursprung ist und

- $\beta : V \times V \rightarrow \mathbb{R}$  eine symmetrische Bilinearform,  $\beta \neq 0$ ;
- $\lambda : V \rightarrow \mathbb{R}$  eine Linearform; und
- $\rho \in \mathbb{R}$  sind.

Diese Definition hängt nicht vom Ursprung  $o \in A$  ab:

### 6.4.2 Lemma

Ist  $Q = \{o + v \in A \mid \beta(v, v) + 2\lambda(v) + \rho = 0\}$  eine Quadrik und  $o' = o + w \in A$  ein anderer Ursprung, so ist

$$Q = \{o' + v \in A \mid \beta'(v, v) + 2\lambda'(v) + \rho' = 0\}$$

mit  $\beta' = \beta$ ,  $\lambda' = \lambda + \beta(w, \cdot)$ ,  $\rho' = \rho + 2\lambda(w) + \beta(w, w)$ .

**Beweis** Mit  $q = o' + v = o + (w, v)$  nachrechnen, vgl. Aufgabe 91.

**Bemerkung** Insbesondere ist  $\beta' = \beta$  unabhängig vom gewählten Ursprung, der lineare Term ändert sich mit  $\beta(w, \cdot)$  – unter „guten Umständen“ kann man also  $\lambda$  durch geeignete Wahl von  $o'$  verschwinden lassen (quadratische Ergänzung).

**Beispiel** Für  $\lambda \in V^* \setminus \{0\}$  liefert

$$\beta : V \times V \rightarrow \mathbb{R}, (v, w) \mapsto \beta(v, w) := \lambda(v)\lambda(w)$$

eine symmetrische Bilinearform  $\beta \neq 0$  und daher

$$Q = \{o + v \in A \mid \lambda^2(v) = \beta(v, v) = 0\}$$

eine Quadrik; andererseits ist

$$Q = o + \ker \lambda$$

eine Hyperebene (AUR mit  $\dim = \dim A - 1$ ).

### 6.4.3 Bemerkung & Definition

Im Folgenden betrachten wir nur *echte Quadriken*, d.h. Quadriken  $Q \subset A$ , die nicht in einer affinen Hyperebene enthalten sind. Insbesondere schließen wir  $Q = \emptyset$  aus.

Nach Wahl des Ursprungs  $o \in A$  bestimmt eine echte Quadrik die zugehörige Gleichung bis auf Vielfache:  $(\beta, \lambda, \rho)$  ist bis auf (gemeinsame) Skalarmultiplikation mit  $x \in \mathbb{R}^\times$  eindeutig bestimmt.

### 6.4.4 Definition

Ein Punkt  $z \in A$  heißt *Mittelpunkt* einer Quadrik  $Q \subset A$ , falls

$$\forall q = z + v \in A : q \in Q \Rightarrow z - v \in Q,$$

ein Mittelpunkt  $z$  einer Quadrik  $Q$  heißt *Spitze*, falls  $z \in Q$ .

Eine Quadrik  $Q$  heißt

- *Mittelpunktsquadrik*, falls sie einen Mittelpunkt  $z \in A$  hat,
- *Kegel*, falls sie eine Spitze hat;
- *Paraboloid* (oder Parabel für  $\dim A = 2$ ), falls sie keinen Mittelpunkt hat.

**Bemerkung & Beispiel** Eine Quadrik  $Q$  kann mehr als einen Mittelpunkt oder eine Spitze haben. Beispielsweise liefert für  $\lambda \in V^* \setminus \{0\}$

$$Q = \{q = o + v \in A \mid \beta(v, v) = \lambda^2(v) = 1\}$$

ein Paar paralleler Hyperebenen, eine Quadrik, für die jeder Punkt  $z = o + w \in o + \ker \lambda$  ein Mittelpunkt ist, da für  $o + v = (o + w) + (v - w) = z + (v - w) \in Q$  gilt

$$\lambda((z - (v - w)) - o) = \lambda(2w - v) = -\lambda(v) \implies o + v \in Q \Rightarrow z - (v - w) \in Q.$$

#### 6.4.5 Lemma

Seien  $Q \subset A$  eine echte Quadrik und  $z \in A$ . Dann ist

- $z \in A$  Mittelpunkt von  $Q$ , falls

$$\exists c \in \mathbb{R} : Q = \{q \in A \mid \beta(q - z, q - z) = c\};$$

- $z \in A$  Spitze von  $Q$ , falls

$$Q = \{q \in A \mid \beta(q - z, q - z) = 0\}.$$

**Beweis** Da eine Spitze ein Mittelpunkt auf  $Q$  ist, folgt die zweite Aussage direkt aus der ersten. Sei  $z \in A$  Mittelpunkt von  $Q$ ; mit  $z$  als Ursprung und geeigneten  $(\beta, \lambda, \rho)$  ist dann

$$Q = \{q = z + v \mid \beta(v, v) + 2\lambda(v) + \rho = 0\}.$$

Da  $z$  Mittelpunkt von  $Q$  ist, gilt

$$\forall q = z + v \in Q : \begin{cases} 0 = \beta(v, v) + 2\lambda(v) + \rho \\ 0 = \beta(v, v) - 2\lambda(v) + \rho \end{cases}$$

mithin

$$\forall q = z + v \in Q : \lambda(v) = 0,$$

also

$$Q \subset z + \ker \lambda.$$

Da  $Q$  echte Quadrik ist, folgt also  $\ker \lambda = V$  bzw.  $\lambda = 0$ . Die Behauptung folgt dann mit  $c = -\rho$ . Umgekehrt: Ist für ein  $c \in \mathbb{R}$

$$Q = \{q = z + v \in A \mid \beta(v, v) = c\},$$

so ist  $z$  offenbar Mittelpunkt von  $Q$ .

#### 6.4.6 Bemerkung & Definition

Ist  $Q \subset A$  ein Kegel mit Spitze  $z \in Q$ , so ist für  $q \in Q \setminus \{z\}$  und  $v := q - z$

$$\forall x \in \mathbb{R} : \beta(vx, vx) = \beta(v, v)x^2 = 0,$$

also ist mit  $q$  auch die gesamte Gerade  $[\{z, q\}] = \{z + vx \mid x \in \mathbb{R}\} \subset Q$ . Diese in  $Q$  enthaltenen Geraden heißen auch *Erzeugende* des Kegels.

#### 6.4.7 Affine Klassifikation der Mittelpunktsquadriken

Ist  $Q \subset A$  echte Mittelpunktsquadratik eines affinen Raumes  $A$ , so existieren

- affines Bezugssystem  $(o, e_1, \dots, e_n)$  von  $A$  und
- $c \in \{0, 1\}$  und  $p, r \in \mathbb{N}$  mit  $1 \leq p \leq r \leq n$ ,

sodass

$$Q = \left\{ q = o + \sum_{i=1}^n e_i x_i \mid \sum_{i=1}^p x_i^2 - \sum_{i=p+1}^r x_i^2 = c \right\}$$

und  $p$  ist der Positivitätsindex von  $\beta$ ,  $r - p$  der Negativitätsindex ( $n - r$  Radikaldimension).

**Beweis** Folgt direkt aus dem Satz von Sylvester.

#### 6.4.8 Bemerkung & Definition

Zwei echte Mittelpunktsquadriken  $Q, Q'$  sind also genau dann *affin äquivalent*, d.h.  $Q' = \alpha(Q)$  für eine Affinität  $\alpha : A \rightarrow A$ , wenn  $\text{sgn}(\beta') = \text{sgn}(\beta)$ , bzw.  $\text{sgn}(\beta') = \text{sgn}(\pm\beta)$  im Fall eines Kegels.

#### 6.4.9 Euklidische Klassifikation der Mittelpunktsquadriken

Ist  $Q \subset A$  eine echte Mittelpunktsquadratik eines Euklidischen Raumes,  $\dim A < \infty$ , so existierten

- ein kartesisches Bezugssystem  $(o; e_1, \dots, e_n)$  von  $A$ ,
- $c \in \{0, 1\}$  und  $p, r \in \mathbb{N}$  mit  $1 \leq p \leq r \leq n$  und
- $a_i \in (0, \infty)$  für  $i = 1, \dots, r$

sodass

$$Q = \left\{ o + \sum_{i=1}^n e_i x_i \in A \mid \sum_{i=1}^p \left( \frac{x_i}{a_i} \right)^2 - \sum_{i=p+1}^r \left( \frac{x_i}{a_i} \right)^2 = c \right\}.$$

**Beweis** Folgt mit der Hauptachsentransformation (daher ihr Name). Sei  $b \in \text{End}(V)$  so, dass

$$\forall v, w \in V : \beta(v, w) = \langle v, b(w) \rangle,$$

nach Riesz existiert ein eindeutiges solches  $b$ .

Da  $\beta$  symmetrisch ist, gilt  $b^* = b$ . Da  $Q$  Mittelpunktsquadrik ist, kann sie mithilfe des Mittelpunkts  $z \in A$  geschrieben werden als

$$Q = \{z + v \in A \mid \langle v, b(v) \rangle = c\}$$

mit o.B.d.A. (Multiplikation der Gleichung mit  $c^{-1}$  im Fall  $c \neq 0$ )  $c \in \{0, 1\}$ . Nach Hauptachsentransformation existiert eine ONB  $(e_1, \dots, e_n)$  aus Eigenvektoren von  $b$ , wobei o.B.d.A. die Eigenwerte zu  $e_1, \dots, e_p$  positiv,  $e_{p+1}, \dots, e_r$  negativ und zu  $e_{r+1}, \dots, e_n$  gleich 0 sind, für  $0 \leq p \leq r \leq n$ .

Also existieren  $a_1, \dots, a_r \in (0, \infty)$ , sodass

$$b(e_i) = \begin{cases} e_i \frac{1}{a_i^2} & \text{für } i = 1, \dots, p \\ -e_i \frac{1}{a_i^2} & \text{für } i = p+1, \dots, r \\ 0 & \text{für } i = r+1, \dots, n. \end{cases}$$

Damit gilt mit dem kartesischen Bezugssystem  $(z; e_1, \dots, e_n)$

$$\begin{aligned} Q &= \left\{ z + \sum_{i=1}^n e_i x_i \in A \mid c = \left\langle \sum_{i=1}^n e_i x_i, b \left( \sum_{j=1}^n e_j x_j \right) \right\rangle \right\} \\ &= \sum_{i,j=1}^n x_i \langle e_i, b(e_j) \rangle x_j = \sum_{i=1}^p \left( \frac{x_i}{a_i} \right)^2 - \sum_{i=p+1}^r \left( \frac{x_i}{a_i} \right)^2 \left\} \right\}. \end{aligned}$$

Da  $\#Q \leq 1$  für  $p = 0$ , muss  $p \geq 1$  sein, denn  $Q$  war als echt vorausgesetzt.

**Bemerkung** Diese beiden Sätze liefern „Klassifikationen“ in den jeweiligen Geometrien, d.h. eine Einteilung der Menge der Quadriken in Äquivalenzklassen, wobei zwei Quadriken  $Q, Q' \subset A$  äquivalent sind, wenn  $Q$  durch eine Transformation der jeweiligen Geometrie auf  $Q'$  abgebildet werden kann, d.h.  $\alpha$  ist affine Transformation oder Kongruenzabbildung:

$$Q \sim Q' :\Leftrightarrow \exists \alpha : A \rightarrow A \mid Q' = \alpha(Q).$$

Also: Haben (nach Klassifikationssätzen) zwei Quadriken  $Q, Q'$  die gleiche Gleichung (bzgl. affiner/kartesischer Bezugssysteme  $(z; e_1, \dots, e_n)$  bzw.  $(z', e'_1, \dots, e'_n)$ ), so existiert eine affine



Transformation  $\alpha : A \rightarrow A$ , definiert durch

$$\alpha(z) = z' \text{ und } \alpha(z + e_i) = z + e'_i \text{ f\"ur } i = 1, \dots, n$$

mit  $\alpha(Q) = Q'$ . Die Umkehrung folgt \"ahnlich (Vorsicht bei Kegeln!).

### 6.4.10 Beispiel & Definition

In einer Euklidischen Ebene  $E^2$  ergeben sich als echte Mittelpunktsquadriken

- $p = r = 2 : c = 1$  ( $c = 0$  liefert nur einen Punkt) und

$$Q = \left\{ z + e_1 x_1 + e_2 x_2 \in E^2 \mid \left( \frac{x_1}{a_1} \right)^2 + \left( \frac{x_2}{a_2} \right)^2 = 1 \right\}$$

liefert eine *Ellipse* mit *Halbachsenl\"angen*  $a_1, a_2 > 0$ .

- $p = 1$  und  $r = 2$ 
  - mit  $c = 1$  liefert

$$Q = \left\{ z + e_1 x_1 + e_2 x_2 \in E^2 \mid \left( \frac{x_1}{a_1} \right)^2 - \left( \frac{x_2}{a_2} \right)^2 = 1 \right\}$$

eine *Hyperbel* durch die Scheitel  $z = \pm e_1 a_1$  und sich in  $z$  schneidenden Asymptoten.

- mit  $c = 0$  liefert

$$Q = \left\{ z + e_1 x_1 + e_2 x_2 \in E^2 \mid \left( \frac{x_1}{a_1} \right)^2 = \left( \frac{x_2}{a_2} \right)^2 \right\}$$

den *Asymptotenkegel* der obigen Hyperbel.

- $p = r = 1 : c = 1$  ( $c = 0$  liefert eine Gerade, also keine echte Mittelpunktsquadrik) liefert

$$Q = \left\{ z + e_1 x_1 + e_2 x_2 \in E^2 \mid \left( \frac{x_1}{a_1} \right)^2 = 1 \right\}$$

zwei parallele Geraden im Abstand  $2a_1 > 0$ .

# Index

- $f$ -invarianter Unterraum, 17
- $f$ -zyklische Basis, 21
- Ähnlichkeitsgeometrie, 52
- Ähnlichkeitstransformation, 52
- Äquivalenz von Sesquilinearformen, 43
  
- Abstand, 51
- Adjungierte, 64
- Algebra, 5
  - Homomorphismus, 6
- Algebraische/geometrische Vielfachheit, 16
- Annulatorpolynom, 26
- Asymptotenkegel, 89
  
- Cauchyprodukt, 4
- Charakteristisches Polynom, 14
  
- Diagonalisierbarkeit, 17
- Drehung, 62
  
- Eigenwert,-vektor,-raum, 13
- Einsetzungshomomorphismus, 6, 7
- Ellipse, 89
- Erzeugende, 87
- Euklidische Geometrie, 52
- Euklidischer Raum, 51
- Euler-Gerade, 58
  
- Fortsetzungssatz für bilineare Abbildungen,  
7
  
- Gram-Schmidtsches Orthogonalisierungsver-  
fahren, 60
  
- Gramsche Matrix, 31
  
- Höhen, 57
  - schnittpunkt, 57
- Hauptachsentransformation, 76
- Hyperbel, 89
  
- induzierte Norm, 45
- Isometrie, 52
  
- Kartesisches Bezugssystem, 59
- Komplexifizierung, 46
- Kongruenzabbildung, 52
- Kreis, 56
  
- Länge, 51
- Linearfaktorisierung, 10
  
- Minimalpolynom, 26
- Mittelpunkt, 85
  
- Negativitätsindex, 41
- Norm, 49
- normal (Endomorphismen), 70
- Nullstelle, 10
  
- Orthogonal, 34
  - raum, 34
- Orthogonale Gruppe, 69
- orthogonales Komplement, 61
- Orthogonalprojektion, 59
- Orthonormal
  - basis, 43
  - system, 43

Polynom, 4  
     -algebra, 4  
     -division, 9  
     -funktion, 6  
     Grad, 4  
     normiertes, 4  
 positiv definit, 45  
 Positivitätsindex, 41  
 Primpolynome, 11  
  
 quadratische Form, 36  
 Quadrik, 84  
  
 Radikal  
     -frei, 35  
     -raum, 35  
  
 schiefadjungiert, 69  
 selbstadjungiert, 69  
 Semilinearität, 29  
 Sesquilinearform, 29  
     (schief-)symmetrische, 32  
     assoziierte, 32  
     Hermitesche, 32  
     kanonische, 32  
     Signatur, 41  
 Skalarprodukt, 43  
 Spektralsatz, 72  
 Spektralzerlegung, 76  
 Spiegelung, 61  
 Spur, 15  
 Streckensymmetrale, 56  
  
 Trägheitsindex, 41  
 Triagonalisierbarkeit, 17  
  
 Umkreis, 56  
 Unitäre Gruppe, 69  
  
 Vektorraum  
     Euklidischer, 45  
     unitärer, 45  
 Winkel, 51