

# Lineare Algebra SS2018

Dozent: Prof. Dr. Arno Fehm

5. Juni 2018

# *Inhaltsverzeichnis*

<b>I</b>	<b>Endomorphismen</b>	<b>1</b>
1	Eigenwerte . . . . .	1
2	Das charakteristische Polynom . . . . .	4
3	Diagonalisierbarkeit . . . . .	6
4	Trigonalisierbarkeit . . . . .	9
5	Das Minimalpolynom . . . . .	11
6	Nilpotente Endomorphismen . . . . .	14
7	Die JORDAN-Normalform . . . . .	18
<b>II</b>	<b>Skalarprodukte</b>	<b>21</b>
1	Das Standardskalarprodukt . . . . .	21
2	Bilinearformen und Sesquilinearformen . . . . .	24
3	Euklidische und unitäre Vektorräume . . . . .	27
4	Orthogonalität . . . . .	29
5	Orthogonale und unitäre Endomorphismen . . . . .	32
6	Selbstadjungierte Endomorphismen . . . . .	35
7	Hauptachsentransformation . . . . .	37
<b>III</b>	<b>Dualität</b>	<b>40</b>
<b>IV</b>	<b>Moduln</b>	<b>41</b>
	<b>Anhang</b>	<b>43</b>
<b>A</b>	<b>Listen</b>	<b>43</b>
A.1	Liste der Theoreme . . . . .	43
A.2	Liste der benannten Sätze . . . . .	44
	<b>Index</b>	<b>44</b>
	<b>Index</b>	<b>45</b>

## Kapitel I

# Endomorphismen

In diesem Kapitel seien  $K$  ein Körper,  $n \in \mathbb{N}$  eine natürliche Zahl,  $V$  ein  $n$ -dimensionaler  $K$ -VR und  $f \in \text{End}_K(V)$  ein Endomorphismus.

Das Ziel dieses Kapitels ist, die Geometrie von  $f$  besser zu verstehen und Basen zu finden, für die  $M_B(f)$  eine besonders einfache oder kanonische Form hat.

## 1. Eigenwerte

### ► Bemerkung 1.1

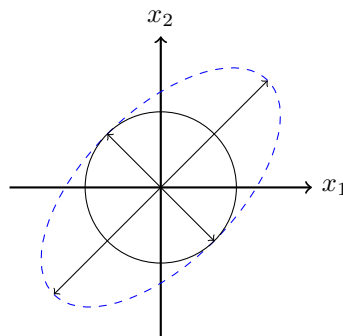
Wir erinnern uns daran, dass  $\text{End}_K(V) = \text{Hom}_K(V, V)$  sowohl einen  $K$ -VR als auch einen Ring bildet. Bei der Wahl einer Basis  $B$  von  $V$  wird  $f \in \text{End}_K(V)$  durch die Matrix  $M_B(f) = M_B^B(f)$  beschrieben.

■ **Beispiel 1.2**  $K = \mathbb{R}, A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 1 \end{pmatrix} \in \text{Mat}_2(\mathbb{R}), f = f_A \in \text{End}_K(K^2)$

$$A \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \end{pmatrix}, \quad A \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow \text{mit } B = \left( \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} \right) \text{ ist } M_B(f) = \begin{pmatrix} 3 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

Der Endomorphismus  $f = f_A$  streckt also entlang der Achse  $\mathbb{R} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$  um den Faktor 3 und spiegelt entlang der Achse  $\mathbb{R} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$



### Definition 1.3 (Eigenwert, Eigenvektor, Eigenraum)

Sind  $0 \neq x \in V$  und  $\lambda \in K$  mit  $f(x) = \lambda x$  so nennt man  $\lambda$  einen Eigenwert von  $f$  und  $x$  einen Eigenvektor von  $f$  zum Eigenwert  $\lambda$ . Der Eigenraum zu  $\lambda \in K$  ist  $\text{Eig}(f, \lambda) = \{x \in V \mid f(x) = \lambda x\}$ .

► **Bemerkung 1.4**

Für jedes  $\lambda \in K$  ist  $\text{Eig}(f, \lambda)$  ein UVR von  $V$ , da

$$\begin{aligned}\text{Eig}(f, \lambda) &= \{x \in V \mid f(x) = \lambda x\} \\ &= \{x \in V \mid f(x) - \lambda \cdot \text{id}_V(x) = 0\} \\ &= \{x \in V \mid (f - \lambda \cdot \text{id}_V)(x) = 0\} \\ &= \text{Ker}(f - \lambda \cdot \text{id}_V)\end{aligned}$$

und  $f - \lambda \cdot \text{id}_V \in \text{End}_K(V)$ .

► **Bemerkung 1.5**

Achtung! Der Nullvektor ist nach Definition kein Eigenvektor, aber  $\lambda = 0$  kann ein Eigenwert sein, nämlich genau dann, wenn  $f \notin \text{Aut}_K(V)$ , siehe Übung. Die Menge der Eigenvektoren zu  $\lambda$  ist also  $\text{Eig}(f, \lambda) \setminus \{0\}$  und  $\lambda$  ist genau dann ein Eigenwert von  $f$ , wenn  $\text{Eig}(f, \lambda) \neq \{0\}$ .

■ **Beispiel 1.6**

Ist  $A = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$  und  $f = f_A \in \text{End}_K(K^n)$ , so sind  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  EW von  $f$  und jedes  $e_i$  ist ein EV zum EW  $\lambda_i$ .

**Satz 1.7**

Sei  $B$  eine Basis von  $V$ . Genau dann ist  $M_B(f)$  eine Diagonalmatrix, wenn  $B$  aus EV von  $f$  besteht.

*Beweis.* Ist  $B = (x_1, \dots, x_n)$  eine Basis aus EV zu EW  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ , so ist  $M_B(f) = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$  und umgekehrt.  $\square$

■ **Beispiel 1.8**

Sei  $K = \mathbb{R}$ ,  $V = \mathbb{R}^2$  und  $f_\alpha \in \text{End}_K(\mathbb{R}^2)$  die Drehung um den Winkel  $\alpha \in [0, 2\pi)$

$$\Rightarrow M_{\mathcal{E}}(f_\alpha) = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix}$$

Für  $\alpha = 0$  hat  $f_\alpha = \text{id}_{\mathbb{R}^2}$  nur den EW 1.

Für  $\alpha = \pi$  hat  $f_\alpha = -\text{id}_{\mathbb{R}^2}$  nur den EW -1.

Für  $\alpha \neq 0, \pi$  hat  $f_\alpha$  keine EW.

**Lemma 1.9**

Sind  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  paarweise verschiedene EW von  $f$  und ist  $x_i$  ein EV zu  $\lambda_i$  für  $i = 1, \dots, m$ , so ist  $(x_1, \dots, x_m)$  linear unabhängig.

*Beweis.* Induktion nach  $m$

$m = 1$ : klar, denn  $x_1 \neq 0$

$m - 1 \rightarrow m$ : Sei  $\sum_{i=1}^m \mu_i x_i = 0$  mit  $\mu_1, \dots, \mu_m \in K$ .

$$\begin{aligned}0 &= (f - \lambda \cdot \text{id}_V) \left( \sum_{i=1}^m \mu_i x_i \right) \\ &= \sum_{i=1}^m \mu_i (f(x_i) - \lambda_m \cdot x_i) \\ &= \sum_{i=1}^{m-1} \mu_i (\lambda_i - \lambda_m) \cdot x_i\end{aligned}$$

Nach IB ist  $\mu_i (\lambda_i - \lambda_m) = 0$  für  $i = 1, \dots, m - 1$ , da  $\lambda_i \neq \lambda_m$  für  $i \neq m$  also  $\mu_i = 0$  für  $i = 1, \dots, m - 1$ . Damit ist auch  $\mu_m = 0$ . Folglich ist  $(x_1, \dots, x_m)$  linear unabhängig.  $\square$

**Satz 1.10**

Sind  $\lambda_1, \dots, \lambda_m \in K$  paarweise verschieden, so ist

$$\sum_{i=1}^m \text{Eig}(f, \lambda_i) = \bigoplus_{i=1}^m \text{Eig}(f, \lambda_i).$$

*Beweis.* Seien  $x_i, y_i \in \text{Eig}(f, \lambda_i)$  für  $i = 1, \dots, m$ . Ist  $\sum_{i=1}^m x_i = \sum_{i=1}^m y_i$ , so ist  $\sum_{i=1}^m \underbrace{x_i - y_i}_{z_i} = 0$ .

o. E. seien  $z_i \neq 0$  für  $i = 1, \dots, r$  und  $z_i = 0$  für  $i = r+1, \dots, m$ . Wäre  $r > 0$ , so wären  $(z_1, \dots, z_r)$  linear abhängig, aber  $z_i = x_i - y_i \in \text{Eig}(f, \lambda_i) \setminus \{0\}$ , im Widerspruch zu Lemma 1.9. Somit ist  $x_i = y_i$  für alle  $i$  und folglich ist die Summe  $\sum \text{Eig}(f, \lambda_i)$  direkt.  $\square$

**Definition 1.11 (EW und EV für Matrizen)**

Sei  $A \in \text{Mat}_n(K)$ . Man definiert Eigenwerte, Eigenvektoren, etc von  $A$  als Eigenwerte, Eigenvektoren von  $f_A \in \text{End}_K(K^n)$ .

**Satz 1.12**

Sei  $B$  eine Basis von  $V$  und  $\lambda \in K$ . Genau dann ist  $\lambda$  ein EW von  $f$ , wenn  $\lambda$  ein EW von  $A = M_B(f)$  ist. Insbesondere haben ähnliche Matrizen die selben EW.

*Beweis.* Dies folgt aus dem kommutativen Diagramm

$$\begin{array}{ccc} K^n & \xrightarrow{f_A} & K^n \\ \Phi_B \downarrow & & \downarrow \Phi_B \\ V & \xrightarrow{f} & V \end{array}$$

denn  $f_A(x) = \lambda x \iff (\Phi_B \circ f_A)(x) = \Phi_B(\lambda x) \iff f(\Phi_B(x)) = \lambda \Phi_B(x)$ .

Ähnliche Matrizen beschreiben den selben Endomorphismus bezüglich verschiedener Basen, vgl. IV.4.1  $\square$

## 2. Das charakteristische Polynom

### Satz 2.1

Sei  $\lambda \in K$ . Genau dann ist  $\lambda$  ein EW von  $f$ , wenn  $\det(\lambda \cdot \text{id}_V - f) = 0$ .

*Beweis.* Da  $\text{Eig}(f, \lambda) = \text{Ker}(\lambda \cdot \text{id}_V - f)$  ist  $\lambda$  genau dann ein EW von  $f$ , wenn  $\dim_K(\text{Ker}(\lambda \cdot \text{id}_V - f)) > 0$ , also wenn  $\lambda \cdot \text{id}_V - f \notin \text{Aut}_K(V)$ . Nach IV.4.6 bedeutet dies, dass  $\det(\lambda \cdot \text{id}_V - f) = 0$   $\square$

### Definition 2.2 (charakteristisches Polynom)

Das charakteristische Polynom einer Matrix  $A \in \text{Mat}_n(K)$  ist die Determinante der Matrix  $t \cdot \mathbb{1}_n - A \in \text{Mat}_n(K[t])$ .

$$\chi_A(t) = \det(t \cdot \mathbb{1}_n - A) \in K[t]$$

Das charakteristische Polynom eines Endomorphismus  $f \in \text{End}_K(V)$  ist  $\chi_f(t) = \chi_{M_B(f)}(t)$ , wobei  $B$  eine Basis von  $V$  ist.

### Satz 2.3

Sind  $A, B \in \text{Mat}_n(K)$  mit  $A \sim B$ , so ist  $\chi_A = \chi_B$ . Insbesondere ist  $\chi_f$  wohldefiniert.

*Beweis.* Ist  $B = SAS^{-1}$  mit  $S \in \text{GL}_n(K)$ , so ist  $t \cdot \mathbb{1}_n - B = S(t \cdot \mathbb{1}_n - A)S^{-1}$ , also  $t \cdot \mathbb{1}_n - B \sim t \cdot \mathbb{1}_n - A$  und ähnliche Matrizen haben die selben Determinante (IV.4.4).

Sind  $B, B'$  Basen von  $V$ , so sind  $M_B(f) \sim M_{B'}(f)$ , also  $\chi_{M_B(f)} = \chi_{M_{B'}(f)}$   $\square$

### Lemma 2.4

Für  $\lambda \in K$  ist  $\chi_f(\lambda) = \det(\lambda \cdot \text{id}_V - f)$ .

*Beweis.* Sei  $B$  eine Basis von  $V$  und  $A = M_B(f) = (a_{ij})_{i,j}$ . Dann ist  $M_B(\lambda \cdot \text{id}_V - f) = \lambda \cdot \mathbb{1}_n - A$ . Aus IV.2.8 und I.6.8 folgt  $\det(t \cdot \mathbb{1}_n - A)(\lambda) = \det(\lambda \cdot \mathbb{1}_n - A)$ . Folglich ist

$$\begin{aligned} \chi_f(\lambda) &= \chi_A(\lambda) \\ &= \det(t \cdot \mathbb{1}_n - A)(\lambda) \\ &= \det(\lambda \cdot \mathbb{1}_n - A) \\ &= \det(\lambda \cdot \text{id}_V - f) \end{aligned} \quad \square$$

### Satz 2.5

Sei  $\dim_K(V) = n$  und  $f \in \text{End}_K(V)$ . Dann ist  $\chi_f(t) = \sum_{i=0}^n \alpha_i t^i$  ein Polynom vom Grad  $n$  mit

$$\begin{aligned} \alpha_n &= 1 \\ \alpha_{n-1} &= -\text{tr}(f) \\ \alpha_0 &= (-1)^n \cdot \det(f) \end{aligned}$$

Die Nullstellen von  $\chi_f$  sind genau die EW von  $f$ .

*Beweis.* Sei  $B$  eine Basis von  $V$  und  $A = M_B(f) = (a_{ij})_{i,j}$ . Wir erinnern uns daran, dass  $\text{tr}(f) = \text{tr}(A) = \sum_{i=1}^n a_{ii}$ . Es ist  $\chi_f(t) = \det(t \cdot \mathbb{1}_n - A) = \sum_{\sigma \in S_n} \text{sgn}(\sigma) \prod_{i=1}^n (t\delta_{i,\sigma(i)} - a_{i,\sigma(i)})$ .

Der Summand für  $\sigma = \text{id}$  ist  $\prod_{i=1}^n (t - a_{ii}) = t^n + \sum_{i=1}^n (-a_{ii})t^{n-1} + \dots + \prod_{i=1}^n (-a_{ii})$

Für  $\sigma \neq \text{id}$  ist  $\sigma(i) \neq i$  für mindestens zwei  $i$ , der entsprechende Summand hat also Grad höchstens  $n-2$ . Somit haben  $\alpha_n$  und  $\alpha_{n-1}$  die oben behauptete Form, und  $\alpha_0 = \chi_A(0) = \det(-A) = (-1)^n \cdot \det(f)$ .

Die Aussage über die Nullstellen von  $\chi_f$  folgt aus Satz 2.1 und Lemma 2.4.  $\square$

**Folgerung 2.6**

Ist  $\dim_K(V) = n$ , so hat  $f$  höchstens  $n$  Eigenwerte.

*Beweis.* Satz 2.5 und I.6.10 □

**Definition 2.7 (normiertes Polynom)**

Ein Polynom  $0 \neq P \in K[t]$  mit Leitkoeffizient 1 heißt normiert.

**■ Beispiel 2.8**

1. Ist  $A = (a_{ij})_{i,j}$  eine obere Dreiecksmatrix, so ist  $\chi_A(t) = \prod_{i=1}^n (t - a_{ii})$ , vgl. IV.2.9.c  
Insbesondere ist  $\chi_{1_n}(t) = (t - 1)^n$ ,  $\chi_0(t) = t^n$
2. Für eine Blockmatrix  $A = \begin{pmatrix} A_1 & B \\ 0 & A_2 \end{pmatrix}$  mit quadratischen Matrizen  $A_1, A_2$  ist  $\chi_A = \chi_{A_1} \cdot \chi_{A_2}$   
vgl. IV.2.9.e
3. Für

$$\begin{pmatrix} 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & -c_0 \\ 1 & \ddots & & & \vdots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & & \vdots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & -c_{n-1} \end{pmatrix} \quad c_0, \dots, c_{n-1} \in K$$

ist  $\chi_A(t) = t^n + \sum_{i=0}^{n-1} c_i t^i$

Man nennt diese Matrix die Begleitmatrix zum normierten Polynom  $P = t^n + \sum_{i=0}^{n-1} c_i t^i$  und schreibt  $M_P := A$

### 3. Diagonalisierbarkeit

**Definition 3.1 (diagonalisierbar)**

Man nennt  $f$  diagonalisierbar, wenn  $V$  eine Basis  $B$  besitzt, für die  $M_B(f)$  eine Diagonalmatrix ist.

**Lemma 3.2**

Genau dann ist  $f$  diagonalisierbar, wenn

$$V = \sum_{\lambda \in K} \text{Eig}(f, \lambda)$$

*Beweis.* ( $\Rightarrow$ ): Ist  $B$  eine Basis aus EV von  $f$  (vgl. Satz 1.7), so ist  $B \leq \bigcup_{\lambda \in K} \text{Eig}(f, \lambda)$ , also  $V = \text{span}_K(\bigcup_{\lambda \in K} \text{Eig}(f, \lambda)) = \sum_{\lambda \in K} \text{Eig}(f, \lambda)$ .  
 ( $\Leftarrow$ ): Ist  $V = \sum_{\lambda \in K} \text{Eig}(f, \lambda)$ , so gibt es  $\lambda_1, \dots, \lambda_n \in K$  mit  $V = \sum_{i=1}^n \text{Eig}(f, \lambda_i)$ . Wir wählen Basen  $B_i$  von  $\text{Eig}(f, \lambda_i)$ . Dann ist  $\bigcup_{i=1}^n B_i$  ein endliches Erzeugendensystem von  $V$ , enthält also eine Basis von  $V$  (II.3.6). Diese besteht aus EV von  $f$ .  $\square$

**Satz 3.3**

Ist  $\dim_K(V) = n$ , so hat  $f$  höchstens  $n$  Eigenwerte. Hat  $f$  genau  $n$  Eigenwerte, so ist  $f$  diagonalisierbar.

*Beweis.* Ist  $\lambda$  ein EW von  $f$ , so ist  $\dim_K(\text{Eig}(f, \lambda)) \geq 1$ . Sind also  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  paarweise verschiedene EW von  $f$ , so ist

$$\begin{aligned} n = \dim_K(V) &\geq \dim_K\left(\sum_{i=1}^m \text{Eig}(f, \lambda_i)\right) \\ &\stackrel{\text{Satz 1.10}}{=} \dim_K\left(\bigoplus_{i=1}^m \text{Eig}(f, \lambda_i)\right) \\ &= \sum_{i=1}^m \dim_K(\text{Eig}(f, \lambda_i)) \\ &\geq m \end{aligned}$$

Ist zudem  $m = n$ , so muss

$$\begin{aligned} \dim_K(V) &= \dim_K\left(\sum_{i=1}^m \text{Eig}(f, \lambda_i)\right) \text{ sein, also} \\ V &= \sum_{i=1}^m \text{Eig}(f, \lambda_i) \end{aligned}$$

Nach Lemma 3.2 ist  $f$  genau dann diagonalisierbar.  $\square$

**Definition 3.4 ( $a$  teilt  $b$ )**

Sei  $R$  ein kommutativer Ring mit seien  $a, b \in R$ . Man sagt,  $a$  teilt  $b$  (in Zeichen  $a|b$ ), wenn es  $x \in R$  mit  $b = ax$  gibt.

**Definition 3.5 (Vielfachheit)**

Für  $0 \neq P \in K[t]$  und  $\lambda \in K$  nennt man  $\mu(P, \lambda) = \max\{r \in \mathbb{N}_{>0} \mid (t - \lambda)^r | P\}$  die Vielfachheit der Nullstelle  $\lambda$  von  $P$ .

**Lemma 3.6**

Genau dann ist  $\mu(P, \lambda) \geq 1$ , wenn  $\lambda$  eine Nullstelle von  $P$  ist.





Nach Lemma 3.2 ist  $f$  genau dann diagonalisierbar, wenn  $\dim_K(\sum_{\lambda \in K} \text{Eig}(f, \lambda)) = n$ , also wenn bei (1) und (2) Gleichheit herrscht. Gleichheit bei (1) bedeutet  $\dim_K(\text{Eig}(f, \lambda)) = \mu(\chi_f, \lambda)$  für alle  $\lambda \in K$ , und Gleichheit bei (2) bedeutet nach Lemma 3.9, dass  $\chi_f$  in Linearfaktoren zerfällt.  $\square$

**Definition 3.12 (algebraische und geometrische Vielfachheit)**

Man nennt  $\mu_a(f, \lambda) = \mu(\chi_f, \lambda)$  die algebraische Vielfachheit und  $\mu_g(f, \lambda) = \dim_K(\text{Eig}(f, \lambda))$  die geometrische Vielfachheit des Eigenwertes  $\lambda$  von  $f$ .

► **Bemerkung 3.13**

Wieder nennt man  $A \in \text{Mat}_n(K)$  diagonalisierbar, wenn  $f_A \in \text{End}_K(K^n)$  diagonalisierbar ist, also wenn  $A \sim D$  für eine Diagonalmatrix  $D$ .









► **Bemerkung 5.12**

Der naheliegende “Beweis“  $\underbrace{\chi_A}_{\in \text{Mat}_n(K)} = \det(t\mathbb{1}_n - A)(A) = \det(A\mathbb{1}_n - A) = \det(0) = \underbrace{0}_{\in K}$  ist falsch!





**Definition 6.5 (nilpotent)**

Ein  $f \in \text{End}_K(V)$  heißt nilpotent, wenn  $f^k = 0$  für ein  $k \in \mathbb{N}$ . Analog heißt  $A \in \text{Mat}_n(K)$  nilpotent, wenn  $A^k = 0$  für  $k \in \mathbb{N}$ . Das kleinste  $k$  mit  $f^k = 0$  bzw.  $A^k$  heißt die Nilpotenzklasse von  $f$  bzw.  $A$ .

**Lemma 6.6**

Ist  $f$  nilpotent, so gibt es eine Basis  $B$  von  $V$ , für die  $M_B(f)$  eine strikte obere Dreiecksmatrix ist.

*Beweis.* Induktion nach  $n = \dim_K(V)$ .

$n = 1$ :  $f^k = 0 \Rightarrow f = 0$

$n > 1$ : Sei  $k$  die Nilpotenzklasse von  $f$  und  $U = \text{Ker}(f^{k-1})$ . Dann ist  $U \subset V$ . Da  $f^k = f^{k-1} \circ f$  ist  $f(V) \subset U$ , insbesondere  $f|_U \in \text{End}_K(U)$ . Da  $f|_U$  nilpotent ist, gibt es nach I.H. eine Basis  $B_0$  von  $U$ , für die  $M_{B_0}(f|_U)$  eine strikte obere Dreiecksmatrix ist. Ergänze  $B_0$  zu einer Basis  $B$  von  $V$ . Da  $f(V) \subset U$  ist dann auch

$$M_B(f) = \begin{pmatrix} M_{B_0}(f|_U) & * \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

eine strikte obere Dreiecksmatrix. □

**Satz 6.7**

Für  $f \in \text{End}_K(V)$  sind äquivalent:

- 1)  $f$  ist nilpotent
- 2)  $f^n = 0$  für  $n \in \mathbb{N}$
- 3)  $P_f(t) = t^r$  für ein  $r \leq n$
- 4)  $\chi_f(t) = t^n$
- 5) Es gibt eine Basis  $B$  von  $V$ , mit

$$M_B(f) = \begin{pmatrix} 0 & * & \dots & * \\ & \ddots & \ddots & \vdots \\ & & \ddots & * \\ & & & 0 \end{pmatrix}$$

eine strikte obere Dreiecksmatrix ist.

*Beweis.*

- 1)  $\Rightarrow$  5): Lemma 6.6
- 5)  $\Rightarrow$  4): Beispiel 2.8
- 4)  $\Rightarrow$  3): Nach Folgerung 5.10 ist  $P_f|_{\chi_f} = t^n$ , also  $t^n = P_f(t)Q(t)$  mit  $Q \in K[t]$ . Schreibe  $P_f(t) = t^a \cdot P_1(t)$ ,  $Q(t) = t^b \cdot Q_1(t)$  mit  $a, b \in \mathbb{N}$ ,  $P_1, Q_1 \in K[t]$ ,  $P_1(0) \neq 0$ ,  $Q_1(0) \neq 0$   
 $\xRightarrow{\text{Lemma 3.8}} t^{n-(a+b)} = P_1(t)Q_1(t)$  und  $(P_1Q_1)(0) \neq 0$   
 $\Rightarrow n - (a+b) = 0 \Rightarrow P_1 = 1$ , somit  $P_f(t) = t^a$
- 3)  $\Rightarrow$  2):  $t^r = 0$ ,  $r \leq n \Rightarrow f^n = 0$
- 2)  $\Rightarrow$  1): nach Definition □

**Folgerung 6.8**

Die Nilpotenzklasse eines nilpotenten Endomorphismus  $f \in \text{End}_K(V)$  ist höchstens  $\dim_K(V)$ .

**Folgerung 6.9**

Ist  $d := \min\{i \mid \text{Ker}(f^i) = \text{Ker}(f^{i+1})\}$ , so ist  $d \leq \dim_K(\text{Ker}(f)) = \mu_a(f, 0)$ .



Sie  $r_d = \dim_K(W_d) - \dim_K(W_{d+1})$ , wobei wir  $W_{k+1} = \{0\}$ . Wähle nun eine Basis  $(x_{k,1}, \dots, x_{k,r_k})$  von  $W_k$ . Ist  $k > 1$ , so ist  $f|_{W_k}$  injektiv und wir können  $(f(x_{k,1}), \dots, f(x_{k,r_k}))$  durch Elemente  $x_{k-1,1}, \dots, x_{k-1,r_{k-1}}$  zu einer Basis von  $W_{k-1}$  ergänzen, und so weiter.

Da  $V = \bigoplus_{d=1}^k W_d$  ist

$$B = \{f^i(x_{d,j}) \mid d = 1, \dots, k, j = 1, \dots, r_d, i = 0, \dots, d-1\}$$

eine Basis von  $V$ , die bei geeigneter Anordnung das Gewünschte leistet.

Es bleibt zu zeigen, dass  $r_1, \dots, r_k$  eindeutig bestimmt sind. Ist  $B_0$  eine Basis, für die  $M_{B_0}(f)$  in der gewünschten Form ist, so ist

$$\begin{aligned} \dim_K(U_1) &= \sum_{d=1}^k r_d \\ \dim_K(U_2) &= \sum_{d=2}^k r_d + \sum_{d=1}^k r_d \\ &\vdots \\ \dim_K(U_k) &= \sum_{d=k}^k r_d + \dots + \sum_{d=1}^k r_d \end{aligned}$$

woraus man sieht, dass  $r_1, \dots, r_k$  durch  $U_1, \dots, U_k$ , also durch  $f$  eindeutig bestimmt. □

■ **Beispiel 6.14**

Sei  $f = f_A$  mit  $A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 3 \\ & 0 & 2 \\ & & 0 \end{pmatrix} \in \text{Mat}_3(\mathbb{R})$

$$A^2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 2 \\ & 0 & 0 \\ & & 0 \end{pmatrix}, A^3 = 0$$

$\Rightarrow k = 3, U_0 = \{0\}, U_1 = \mathbb{R}e_1, U_2 = \mathbb{R}e_1 + \mathbb{R}e_2, U_3 = V$ .

Wähle  $W_3$  mit  $V = U_3 = U_2 \oplus W_3$ , z.B.  $W_3 = \mathbb{R}e_3$ .

Wähle  $W_2$  mit  $U_2 = U_1 \oplus W_2$  und  $f(W_3) \subseteq W_2$ , also

$$W_2 = \mathbb{R} \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Setze  $W_1 = U_1 = \text{Ker}(f) = \mathbb{R}e_1 \Rightarrow \text{Basis } B = (f^2(e_3), f(e_3), e_3)$

$$M_B(f) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ & 0 & 1 \\ & & 0 \end{pmatrix}$$





- $d_i$ : folgt, da  $J_{k_j}$  nilpotent von Nilpotenzklasse  $k_j$  ist (Lemma 6.12). □

**Folgerung 7.8**

Genau dann ist  $f$  diagonalisierbar, wenn

$$\chi_f(t) = \prod_{i=1}^m (t - \lambda_i)^{r_i} \quad \lambda_1, \dots, \lambda_m \in K \text{ paarweise verschieden und}$$

$$P_f(t) = \prod_{i=1}^m m(t - \lambda_i)$$

*Beweis.* Genau dann ist  $f$  diagonalisierbar, wenn  $f$  trigonalisierbar ist und die JORDAN-NF die Diagonalmatrix ist (Eindeutigkeit der JNF), also  $k_j = 1$  für alle  $j$ . Nach Folgerung 7.7 ist dies äquivalent dazu, dass  $d_i = 1$  für alle  $i$ , also  $P_f = \prod_{i=1}^m (t - \lambda_i)$ . □

**► Bemerkung 7.9**

Wider definiert man die JORDAN-Invarianten, etc. von einer Matrix  $A \in \text{Mat}_n(K)$  als die JORDAN-Invarianten von  $f_A \in \text{End}_K(K^n)$ .

**Folgerung 7.10**

Seien  $A, B \in \text{Mat}_n(K)$  trigonalisierbar. Genau dann ist  $A \sim B$ , wenn  $A$  und  $B$  die gleichen JORDAN-Invarianten haben.

*Beweis.* Existenz und Eindeutigkeit der JORDAN-Normalform. □







**Satz 1.10**

Das komplexe Standardskalarprodukt erfüllt die folgenden Eigenschaften:

- Für  $x, x', y, y' \in \mathbb{C}^n$  und  $\lambda \in \mathbb{C}$  ist:

$$\langle x + x', y \rangle = \langle x, y \rangle + \langle x', y \rangle$$

$$\langle \lambda x, y \rangle = \lambda \langle x, y \rangle$$

$$\langle x, y + y' \rangle = \langle x, y \rangle + \langle x, y' \rangle$$

$$\langle x, \lambda y \rangle = \overline{\lambda} \langle x, y \rangle$$

- Für  $x, y \in \mathbb{C}^n$  ist  $\langle x, y \rangle = \overline{\langle y, x \rangle}$
- Für  $x \in \mathbb{C}^n$  ist  $\langle x, y \rangle \in \mathbb{R}_{\geq 0}$  und  $\langle x, x \rangle = 0 \iff x = 0$

*Beweis.* • klar

- klar

- $\langle x, x \rangle = \sum_{i=1}^n x_i \overline{x_i} = \sum_{i=1}^n |x_i|^2$

□

**Definition 1.11 (euklidische Norm in  $\mathbb{C}$ )**

Auf  $V = \mathbb{C}$  definiert man die euklidische Norm in  $\mathbb{C}$   $\|\cdot\| : \mathbb{C}^n \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$  durch

$$\|x\| = \sqrt{\langle x, x \rangle}$$

**► Bemerkung 1.12**

Schränkt man das komplexe Skalarprodukt auf den  $\mathbb{R}^n$  ein, so erhält man das Standardskalarprodukt auf dem  $\mathbb{R}^n$ . Wir werden ab jetzt die beiden Fälle  $K = \mathbb{R}$  und  $K = \mathbb{C}$  parallel behandeln. Wenn nicht anders angegeben, werden wir die Begriffe für den komplexen Fall benutzen, aber auch den reellen Fall einschließen.

## 2. Bilinearformen und Sesquilinearformen

Sei  $K = \mathbb{R}$  oder  $K = \mathbb{C}$ .

### Definition 2.1 (Bilinearform, Sesquilinearform)

Eine Bilinearform ( $K = \mathbb{R}$ ) bzw. Sesquilinearform ( $K = \mathbb{C}$ ) ist eine Abbildung  $s : V \times V \rightarrow K$  für die gilt:

- Für  $x, x', y \in V$  ist  $s(x + x', y) = s(x, y) + s(x', y)$
- Für  $x, y, y' \in V$  ist  $s(x, y + y') = s(x, y) + s(x, y')$
- Für  $x, y \in V, \lambda \in K$  ist  $s(\lambda x, y) = \lambda s(x, y)$
- Für  $x, y \in V, \lambda \in K$  ist  $s(x, \lambda y) = \overline{\lambda} s(x, y)$

### ► Bemerkung 2.2

Im Fall  $K = \mathbb{R}$  ist  $\lambda = \overline{\lambda}$ . Wir werden der Einfachheit halber auch in diesem Fall von Sesquilinearformen sprechen, vgl. Bemerkung 1.12

### ■ Beispiel 2.3

Für  $A = (a_{ij})_{i,j} \in \text{Mat}_n(K)$  ist  $s_A : K^n \times K^n \rightarrow K^n$  gegeben durch

$$s_A(x, y) = x^t A \bar{y} = x^t \left( \sum_{j=1}^n a_{ij} \bar{y}_j \right)_i = \sum_{i,j=1}^n a_{ij} x_i \bar{y}_j$$

eine Sesquilinearform auf  $V = K^n$ .

### Definition 2.4

Sei  $s$  eine Sesquilinearform auf  $V$  und  $B = (v_1, \dots, v_n)$  eine Basis von  $V$ . Die darstellende Matrix von  $s$  bzgl.  $B$  ist

$$M_B(s) = (s(v_i, v_j))_{i,j} \in \text{Mat}_n(K)$$

### ■ Beispiel 2.5

Die darstellende Matrix des Standardskalarprodukts  $s = s_{\mathbb{1}_n}$  auf den Standardraum  $V = K^n$  bzgl. der Standardbasis  $\mathcal{E}$  ist

$$M_{\mathcal{E}}(s) = \mathbb{1}_n$$

### Lemma 2.6

Seien  $v, w \in V$ . Mit  $x = \Phi_B^{-1}(v)$ ,  $y = \Phi_B^{-1}(w)$  und  $A = M_B(s)$  ist  $s(v, w) = x^t A \bar{y} = s_A(x, y)$ .

*Beweis.* Achtung:  $v_i$  beschreibt das  $i$ -te Element der Basis  $B$ !  
 $s(v, w) = s(\sum_{i=1}^n x_i v_i, \sum_{j=1}^n y_j v_j) = \sum_{i,j=1}^n x_i \bar{y}_j s(v_i, v_j) = x^t A \bar{y}$  □

### Satz 2.7

Sei  $B$  eine Basis von  $V$ . Die Abbildung  $s \mapsto M_B(s)$  ist eine Bijektion zwischen den Sesquilinearformen auf  $V$  und  $\text{Mat}_n(K)$ .

*Beweis.* • injektiv: Lemma 2.6

- surjektiv: Für  $A \in \text{Mat}_n(K)$  wird durch  $s(v, w) = \Phi_B^{-1}(v)^t \cdot A \cdot \overline{\Phi_B^{-1}(w)}$  eine Sesquilinearform auf  $V$  mit  $M_B(s) = (s(v_i, w_j))_{i,j} = (e_i^t A \bar{e}_j)_{i,j} = (e_i A e_j)_{i,j} = A$  definiert. □

**Satz 2.8 (Transformationsformel)**

Seien  $B$  und  $B'$  Basen von  $V$  und  $s$  eine Sesquilinearform auf  $V$ . Dann gilt:

$$M_{B'}(s) = (T_B^{B'})^t \cdot M_B(s) \cdot \overline{T_B^{B'}}$$

*Beweis.* Seien  $v, w \in V$ . Definiere  $A = M_B(s)$ ,  $A' = M_{B'}(s)$ ,  $T = T_B^{B'}$  und  $x, y, x', y' \in K^n$  mit  $v = \Phi_B(x) = \Phi_B(x')$ ,  $w = \Phi_B(y) = \Phi_B(y')$ . Dann ist  $x = Tx'$ ,  $y = Ty'$  und somit

$$\begin{aligned} (x')^t A' \overline{y'} &\stackrel{\text{Lemma 2.6}}{=} s(v, w) \\ &\stackrel{\text{Lemma 2.6}}{=} x^t A \overline{y} \\ &= (Tx')^t A \overline{Ty'} \\ &= (x')^t T^t A \overline{T y'} \end{aligned}$$

Da  $v, w \in V$  und somit  $x', y' \in K$  beliebig waren, folgt  $A = T^t A \overline{T}$ . □

**■ Beispiel 2.9**

Sei  $s$  das Standardskalarprodukt auf dem  $K^n$  und  $B = (b_1, \dots, b_n)$  eine Basis des  $K^n$ . Dann ist

$$M_B(s) = (T_{\mathcal{E}}^B)^t \cdot M_{\mathcal{E}}(s) \cdot \overline{T_{\mathcal{E}}^B} = B^t \cdot \mathbb{1}_n \cdot \overline{B} = B^t B$$

wobei  $B = (b_1, \dots, b_n) \in \text{Mat}_n(K)$ .

**Satz 2.10**

Sei  $s$  eine Sesquilinearform auf  $V$ . Dann sind äquivalent:

- Es gibt  $0 \neq v \in V$  mit  $s(v, w) = 0$  für alle  $w \in V$ .
- Es gibt  $0 \neq w \in V$  mit  $s(v, w) = 0$  für alle  $v \in V$ .
- Es gibt eine Basis  $B$  von  $V$  mit  $\det(M_B(s)) = 0$ .
- Für jede Basis  $B$  von  $V$  gilt  $\det(M_B(s)) = 0$ .

*Beweis.* Sei  $B$  eine Basis von  $V$ ,  $v = \Phi_B(x)$  und  $A = M_B(s)$ . Genau dann ist die (semilineare) Abbildung  $w \mapsto s(v, w)$  die Nullabbildung, wenn  $x^t A \overline{y} = 0$  für alle  $y \in K^n$ , also wenn  $0 = x^t A$ , d.h.  $A^t x = 0$ . Somit ist (1) genau dann erfüllt, wenn  $A^t$  nicht invertierbar ist, also wenn  $0 = \det(A^t) = \det(A)$ . Damit  $(1) \Rightarrow (4) \Rightarrow (3) \Rightarrow (1)$  gezeigt und  $(2) \iff (4)$  zeigt man analog. □

**Definition 2.11 (ausgeartet)**

Eine Sesquilinearform  $s$  auf  $V$  heißt ausgeartet, wenn eine der äquivalenten Bedingungen aus Satz 2.10 erfüllt ist, sonst nicht-ausgeartet.

**Definition 2.12 (symmetrisch, hermitesch)**

Eine Sesquilinearform  $s$  auf  $V$  heißt symmetrisch, wenn bzw. hermitesch, wenn

$$s(x, y) = \overline{s(y, x)} \quad \text{für alle } x, y \in V$$

Eine Matrix  $A \in \text{Mat}_n(K)$  heißt symmetrisch bzw. hermitesch, wenn  $A = A^* = \overline{A}^t = \overline{A^t}$ .

**Satz 2.13**

Sei  $s$  eine Sesquilinearform auf  $V$  und  $B$  eine Basis von  $V$ . Genau dann ist  $s$  hermitesch, wenn  $M_B(s)$  dies ist.

*Beweis.*  $(\Rightarrow)$ : klar aus Definition von  $M_B(s)$ .

$$(\Leftarrow): x = \Phi_B^{-1}, y = \Phi_B^{-1}(w), \overline{s(v, w)} = \overline{s(v, w)}^t = \overline{(x^t A \bar{y})}^t = y^t \overline{A^t x} = s(w, v) \quad \square$$

**Satz 2.14**

Für  $A, B \in \text{Mat}_n(K)$  und  $S \in \text{GL}_n(K)$  ist  $(A + B)^* = A^* + B^*$ ,  $(AB)^* = B^* A^*$ ,  $(A^*)^* = A$  und  $(S^{-1})^* = (S^*)^{-1}$ .

*Beweis.* Folgerung [1.8](#), III.1.14, III.1.15 □

### 3. Euklidische und unitäre Vektorräume

**Lemma 3.1**

Sei  $s$  eine hermitesche Sesquilinearform auf  $V$ . Dann ist  $s(x, x) \in \mathbb{R}$  für alle  $x \in V$ .

*Beweis.* Da  $s$  hermitesch ist, ist  $s(x, x) = \overline{s(x, x)}$ , also  $s(x, x) \in \mathbb{R}$ . □

**Definition 3.2 (quadratische Form)**

Sei  $s$  eine hermitesche Sesquilinearform auf  $V$ . Die quadratische Form zu  $s$  ist die Abbildung

$$q_s : \begin{cases} V \rightarrow \mathbb{R} \\ x \mapsto s(x, x) \end{cases}$$

**► Bemerkung 3.3**

Die quadratische Form  $q_s$  erfüllt das  $q_s(\lambda x) = |\lambda|^2 \cdot q_s(x)$  für alle  $x \in V$ ,  $\lambda \in K$ . Im Fall  $K = \mathbb{R}$ ,  $V = \mathbb{R}^n$ ,  $x = (x_1, \dots, x_n)^t$ ,  $s = s_A$ ,  $A \in \text{Mat}_n(\mathbb{R})$  ist  $q_s(x) = s_A(x, x) = x^t A x = \sum_{i,j=1}^n a_{ij} x_i x_j$  ein “quadratisches Polynom in den Variablen  $x_1, \dots, x_n$ ”.

**Satz 3.4 (Polarisierung)**

Sei  $s$  eine hermitesche Sesquilinearform auf  $V$ . Dann gilt für  $x, y \in V$ :

$$\begin{aligned} s(x, y) &= \frac{1}{2}(q_s(x+y) - q_s(x) - q_s(y)) \quad K = \mathbb{R} \\ s(x, y) &= \frac{1}{4}(q_s(x+y) - q_s(x-y) + iq_s(x+iy) - iq_s(x-iy)) \quad K = \mathbb{C} \end{aligned}$$

*Beweis.* Im Fall  $K = \mathbb{R}$  ist

$$\begin{aligned} q_s(x+y) - q_s(x) - q_s(y) &= s(x+y, x+y) - s(x, x) - s(y, y) \\ &= s(x, x) + s(x, y) + s(y, x) + s(y, y) - s(x, x) - s(y, y) \\ &= s(x, y) + s(y, x) = 2s(x, y) \end{aligned}$$

Im Fall  $K = \mathbb{C}$ : ÜA □

**Definition 3.5 ((semi)definit, euklidischer VR, unitärer VR)**

Sei  $s$  eine hermitesche Sesquilinearform auf  $V$ . Ist  $s(x, x) \geq 0$  für alle  $x \in V$ , so heißt  $s$  positiv semidefinit. Ist  $s(x, x) > 0$  für alle  $0 \neq x \in V$ , so heißt  $s$  positiv definit (oder ein Skalarprodukt).

Eine hermitesche Matrix  $A \in \text{Mat}_n(K)$  heißt positiv (semi)definit, wenn  $s_A$  dies ist.

Einen endlichdimensionalen  $K$ -VR zusammen mit positiv definiten hermiteschen Sesquilinearformen nennt man einen euklidischen bzw. unitären VR (oder auch Prähilbertraum). Wenn nicht anderes angegeben, notieren wir die Sesquilinearform mit  $\langle \cdot, \cdot \rangle$ .

**■ Beispiel 3.6**

Der Standardraum  $V = K^n$  zusammen mit dem Standardskalarprodukt ist ein euklidischer bzw. unitärer VR.

**■ Beispiel 3.7**

Ist  $A = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$  mit  $\lambda_i \in \mathbb{R}$ , so ist  $s_A$  genau dann positiv definit, wenn  $\lambda_i > 0$  für alle  $i$ , und positiv semidefinit, wenn  $\lambda_i \geq 0$  für alle  $i$ .

**Satz 3.8**

Ist  $V$  ein unitärer VR und  $U \subseteq V$  ein UVR, so ist  $U$  mit der Einschränkung des Skalarprodukts wieder ein unitärer VR.

*Beweis.* klar, die Einschränkung ist wieder positiv definit.  $\square$

### Definition 3.9

Ist  $V$  ein unitärer VR, so definiert man die Norm von  $x \in V$  als

$$\|x\| = \sqrt{\langle x, x \rangle} \in \mathbb{R}_{\geq 0}$$

### Satz 3.10

Die Norm eines unitären VR erfüllt die folgenden Eigenschaften:

- Für  $x \in V$  ist  $\|x\| = 0 \iff x = 0$
- Für  $x \in V$  und  $\lambda \in K$  ist  $\|\lambda x\| = |\lambda| \cdot \|x\|$
- Für  $x, y \in V$  ist  $\|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|$

*Beweis.* • Das Skalarprodukt ist positiv definit.

- klar
- Wie im Fall im  $\mathbb{R}^n$

$\square$

### Satz 3.11

Ist  $V$  ein unitärer VR, so gilt für  $x, y \in V$ :

$$|\langle x, y \rangle| \leq \|x\| \cdot \|y\|$$

Dabei gilt Gleichheit genau dann, wenn  $x$  und  $y$  linear abhängig sind.

*Beweis.* Für  $y = 0$  ist die Aussage klar.

Sei also  $y \neq 0$ . Für  $\lambda, \mu \in K$  ist

$$\begin{aligned} 0 &\leq \langle \lambda x + \mu y, \lambda x + \mu y \rangle \\ &= \lambda \bar{\lambda} \cdot \langle x, x \rangle + \mu \bar{\mu} \cdot \langle y, y \rangle + \lambda \bar{\mu} \cdot \langle x, y \rangle + \mu \bar{\lambda} \cdot \langle y, x \rangle \end{aligned}$$

Setzt man  $\lambda = \bar{\lambda} = \langle y, y \rangle > 0$  und  $\mu = -\langle x, y \rangle$  ein, so erhält man

$$\begin{aligned} 0 &\leq \lambda \cdot \|x\|^2 \|y\|^2 + \mu \bar{\mu} \lambda - \lambda \mu \bar{\mu} - \langle x, y \rangle \bar{\lambda} \langle y, x \rangle \\ &= \lambda (\|x\|^2 \|y\|^2 - |\langle x, y \rangle|^2) \end{aligned}$$

Teilen durch  $\lambda$  und Wurzelziehen liefert die Ungleichung. Gilt dort Gleichheit, so ist  $\|\lambda x + \mu y\| = 0$  folglich (da  $\lambda \neq 0$ ) sind dann  $x, y$  linear unabhängig. Ist  $x = \alpha y$  mit  $\alpha \in K$ , so ist  $|\langle x, y \rangle| = |\alpha| \cdot \|y\|^2 = \|x\| \cdot \|y\|$   $\square$

## 4. Orthogonalität

Sei  $V$  ein euklidischer bzw. unitärer Vektorraum.

### Definition 4.1 (orthogonal, orthogonales Komplement)

Zwei Vektoren  $x, y \in V$  heißen orthogonal, in Zeichen  $x \perp y$ , wenn  $\langle x, y \rangle = 0$ . Zwei Mengen  $X, Y \subseteq V$  sind orthogonal, in Zeichen  $X \perp Y$ , wenn  $x \perp y$  für alle  $x \in X$  und  $y \in Y$ .

Für  $U \subseteq V$  bezeichnet

$$U^\perp = \{x \in V \mid x \perp u \text{ für alle } u \in U\}$$

das orthogonale Komplement zu  $U$ .

### Lemma 4.2

Für  $x, y \in V$  ist

- $x \perp y \iff y \perp x$
- $x \perp 0$
- $x \perp x \iff x = 0$

*Beweis.* klar □

### Satz 4.3

Für  $U \subseteq V$  ist  $U^\perp$  ein Untervektorraum von  $V$  mit  $U \perp U^\perp$  und  $U \cap U^\perp \subseteq \{0\}$ .

*Beweis.* Linearität des Skalarprodukts im ersten Argument liefert, dass  $U^\perp$  ein Untervektorraum ist. Die Aussage  $U^\perp \perp U$  ist trivial,  $U \perp U^\perp$  folgt dann aus Lemma 4.2. Ist  $u \in U \cap U^\perp$ , so ist insbesondere  $u \perp u$ , also  $u = 0$  nach Lemma 4.2. □

### Definition 4.4 (orthonormal)

Eine Familie  $(x_i)_{i \in I}$  von Elementen von  $V$  ist orthogonal, wenn  $x_i \perp x_j$  für alle  $i \neq j$ , und orthonormal, wenn zusätzlich  $\|x_i\| = 1$  für alle  $i$ . Eine orthogonale Basis nennt man eine Orthogonalbasis, eine orthonormale Basis nennt man eine Orthonormalbasis.

### ► Bemerkung 4.5

Eine Basis  $B$  ist genau dann eine Orthonormalbasis, wenn die darstellende Matrix des Skalarprodukts bezüglich  $B$  die Einheitsmatrix ist. (Beispiel: Standardbasis des Standardraum bezüglich des Standardskalarprodukts)

### Lemma 4.6

Ist die Familie  $(x_i)_{i \in I}$  orthogonal und  $x_i \neq 0$  für alle  $i \in I$ , so ist  $(x_i)_{i \in I}$  linear unabhängig.

*Beweis.* Ist  $\sum_{i \in I} \lambda_i x_i = 0$ ,  $\lambda_i \in K$ , fast alle gleich 0, so ist  $0 = \langle \sum_{i \in I} \lambda_i x_i, x_j \rangle = \sum_{i \in I} \lambda_i \langle x_i, x_j \rangle = \lambda_j \langle x_j, x_j \rangle$ . Aus  $x_j \neq 0$  folgt  $\langle x_j, x_j \rangle > 0$  und somit  $\lambda_j = 0$  für jedes  $j \in I$ . □

### Lemma 4.7

Ist  $(x_i)_{i \in I}$  orthogonal und  $x_i \neq 0$  für alle  $i$ , so ist  $(y_i)_{i \in I}$  mit

$$y_i = \frac{1}{\|x_i\|} x_i$$

orthonormal.

*Beweis.* Für alle  $i$  ist  $\langle y_i, y_i \rangle = \frac{1}{\|x_i\|^2} \langle x_i, x_i \rangle = 1$ .  
 Für alle  $i \neq j$  ist  $\langle y_i, y_j \rangle = \frac{1}{\|x_i\| \cdot \|x_j\|} \langle x_i, x_j \rangle = 0$ . □

**Satz 4.8**

Sei  $U \subseteq V$  ein Untervektorraum und  $B = (x_1, \dots, x_k)$  eine Orthonormalbasis von  $U$ . Es gibt genau einen Epimorphismus  $\text{pr}_U : V \rightarrow U$  mit  $\text{pr}_U|_U = \text{id}_U$  und  $\text{Ker}(\text{pr}_U) \perp U$ , insbesondere also  $x - \text{pr}_U x \perp U$  für alle  $x \in V$ , genannt die orthogonale Projektion auf  $U$ , und dieser ist gegeben durch

$$x \mapsto \sum_{i=1}^k \langle x, x_i \rangle x_i \quad (1)$$

*Beweis.* Sei zunächst  $\text{pr}_U$  durch (1) gegeben. Die Linearität von  $\text{pr}_U$  folgt aus (S1) und (S3). Für  $u = \sum_{i=1}^k \lambda_i x_i \in U$  ist  $\langle u, x_j \rangle = \langle \sum_{i=1}^k \lambda_i x_i, x_j \rangle = \sum_{i=1}^k \lambda_i \langle x_i, x_j \rangle = \lambda_j$ , woraus  $\text{pr}_U(u) = u$ . Somit ist  $\text{pr}_U|_U = \text{id}_U$ , und insbesondere ist  $\text{pr}_U$  surjektiv. Ist  $\text{pr}_U(x) = 0$ , so ist  $\langle x, x_i \rangle = 0$  für alle  $i$ , woraus mit (S2) und (S4) sofort  $x \perp U$  folgt. Somit ist  $\text{Ker}(\text{pr}_U) \perp U$ .

Für  $x \in V$  ist  $\text{pr}_U(x - \text{pr}_U(x)) = \text{pr}_U(x) - \text{pr}_U(\text{pr}_U(x)) = \text{pr}_U(x) - \text{pr}_U(x) = 0$ , also  $x - \text{pr}_U(x) \in \text{Ker}(\text{pr}_U) \subseteq U^\perp$ . Ist  $f : V \rightarrow U$  ein weiterer Epimorphismus mit  $f|_U = \text{id}_U$  und  $\text{Ker}(f) \perp U$ , so ist

$$\underbrace{\text{pr}_U(x)}_{\in U} - \underbrace{f(x)}_{\in U} = \underbrace{\text{pr}_U(x) - x}_{\in U^\perp} - \underbrace{f(x) - x}_{\in U^\perp} \in U \cap U^\perp = \{0\}$$

für jedes  $x \in V$ , somit  $f = \text{pr}_U$ . □

**Theorem 4.9 (GRAM-SCHMIDT-Verfahren)**

Ist  $(x_1, \dots, x_n)$  eine Basis von  $V$  und  $k \leq n$  mit  $(x_1, \dots, x_k)$  orthonormal, so gibt es eine Orthonormalbasis  $(y_1, \dots, y_n)$  von  $V$  mit  $y_i = x_i$  für  $i = 1, \dots, k$  und  $\text{span}_K(y_1, \dots, y_l) = \text{span}_K(x_1, \dots, x_l)$  für  $l = 1, \dots, n$ .

*Beweis.* Induktion nach  $d = n - k$ .

$d = 0$ : nichts zu zeigen

$d - 1 \rightarrow d$ : Für  $i \neq k + 1$  definiere  $y_i = x_i$ . Sei  $U = \text{span}_K(x_1, \dots, x_k)$ ,  $x_{k+1}^\sim = x_{k+1} - \text{pr}_U(x_{k+1})$ . Dann ist  $x_{k+1}^\sim \in \text{Ker}(\text{pr}_U) \subseteq U^\perp$  (vgl. Satz 4.8) und  $\text{span}_K(x_1, \dots, x_k, x_{k+1}^\sim) = \text{span}_K(x_1, \dots, x_{k+1})$ . Setze  $y_{k+1} = \frac{1}{\|x_{k+1}^\sim\|} x_{k+1}^\sim$ . Dann ist  $(y_1, \dots, y_n)$  eine Basis von  $V$  mit  $(y_1, \dots, y_{k+1})$  orthonormal (vgl. Lemma 4.7). Nach Induktionshypothese gibt es eine Orthonormalbasis von  $V$ , die das Gewünschte leistet. □

**Folgerung 4.10**

Jeder endlichdimensionale euklidische bzw. unitäre Vektorraum  $V$  besitzt eine Orthonormalbasis.

*Beweis.* Wähle irgendeine Basis von  $V$  und wende Theorem 4.9 mit  $k = 0$  an. □

**Folgerung 4.11**

Ist  $U$  ein Untervektorraum von  $V$ , so ist  $V = U \oplus U^\perp$  und  $(U^\perp)^\perp = U$ .

*Beweis.* Wähle eine Orthonormalbasis von  $U$  (vgl. Folgerung 4.10),  $B = (x_1, \dots, x_k)$  und ergänze diese zu einer Orthonormalbasis  $(x_1, \dots, x_n)$  von  $V$  (vgl. Theorem 4.9). Dann sind  $x_{k+1}, \dots, x_n \in U^\perp$ , da  $U \cap U^\perp = \{0\}$  ist somit  $V = U \oplus U^\perp$ . Insbesondere ist  $\dim_K(U^\perp) = n - \dim_K(U)$ , woraus  $\dim_K((U^\perp)^\perp) = \dim_K(U)$  folgt. Zusammen mit der trivialen Inklusion  $U \subseteq (U^\perp)^\perp$  folgt  $U = (U^\perp)^\perp$ . □

**Folgerung 4.12**

Ist  $s$  eine positiv definite hermitesche Sesquilinearform auf  $V$  und  $B$  eine Basis von  $V$ , so ist

$$\det(M_B(s)) \in \mathbb{R}_{>0}$$



*Beweis.* Wähle eine Orthonormalbasis  $B'$  von  $V$  bezüglich  $s$ . Dann ist  $M_{B'}(s) = \mathbb{1}_n$ , folglich

$$\begin{aligned}\det(M_B(s)) &= \det \left( (T_{B'}^B)^t \cdot \mathbb{1}_n \cdot \overline{T_{B'}^B} \right) \\ &= \det \left( (T_{B'}^B)^t \right) \cdot \det \left( \overline{T_{B'}^B} \right) \\ &= \det \left( T_{B'}^B \right) \cdot \overline{\det \left( T_{B'}^B \right)} \\ &= |\det \left( T_{B'}^B \right)|^2 \\ &> 0\end{aligned}$$

□

## 5. Orthogonale und unitäre Endomorphismen

Sei  $V$  ein euklidischer bzw. unitärer Vektorraum und  $f \in \text{End}_K(V)$ .

**Definition 5.1 (orthogonale, unitäre Endomorphismen)**

$f$  ist orthogonal bzw. unitär, wenn

$$\langle f(x), f(y) \rangle = \langle x, y \rangle \quad \forall x, y \in V$$

**Satz 5.2**

Ist  $f$  unitär, so gelten

- Für  $x \in V$  ist  $\|f(x)\| = \|x\|$ .
- Sind  $x, y \in V$  mit  $x \perp y$ , so ist  $f(x) \perp f(y)$ .
- Es ist  $f \in \text{Aut}_K(V)$  und auch  $f^{-1}$  ist unitär.
- Das Bild einer Orthonormalbasis unter  $f$  ist eine Orthonormalbasis.
- Ist  $\lambda$  ein Eigenwert von  $f$ , so ist  $|\lambda| = 1$ .

*Beweis.* • klar

- klar

- $f(x) = 0 \iff \|f(x)\| = 0 \iff \|x\| = 0 \iff x = 0$ , also ist  $f$  injektiv, somit  $f \in \text{Aut}_K(V)$  und

$$\langle f^{-1}(x), f^{-1}(y) \rangle \stackrel{f \text{ unitär}}{=} \langle f(f^{-1}(x)), f(f^{-1}(y)) \rangle = \langle x, y \rangle$$

- Folgt aus 1, 2 und 3
- Ist  $f(x) = \lambda x$ ,  $x \neq 0$ , so ist

$$\|x\| = \|f(x)\| = \|\lambda x\| = |\lambda| \cdot \|x\| \Rightarrow |\lambda| = 1$$

□

**Satz 5.3**

Ist  $\|f(x)\| = \|x\|$  für alle  $x \in V$ , so ist  $f$  unitär.

*Beweis.* Aus  $\|f(x)\| = \|x\|$  folgt  $\langle f(x), f(x) \rangle = \langle x, x \rangle$ . Die Polarisierung (Satz 3.4) für  $\langle f(x), f(y) \rangle$  und die Linearität von  $f$  liefern  $\langle f(x), f(y) \rangle = \langle x, y \rangle$ . Zum Beispiel im Fall  $K = \mathbb{R}$ :

$$\begin{aligned} \langle f(x), f(y) \rangle &= \frac{1}{2} \left( \left\langle \underbrace{f(x) + f(y)}_{f(x+y)}, \underbrace{f(x) + f(y)}_{f(x+y)} \right\rangle - \langle f(x), f(x) \rangle - \langle f(y), f(y) \rangle \right) \\ &= \frac{1}{2} (\langle x + y, x + y \rangle - \langle x, x \rangle - \langle y, y \rangle) \\ &= \langle x, y \rangle \end{aligned}$$

□

**Definition 5.4 (orthogonale, unitäre Matrizen)**

Eine Matrix  $A \in \text{Mat}_n(K)$  heißt orthogonal bzw. unitär, wenn

$$A^* A = \mathbb{1}_n$$

► **Bemerkung 5.5**

Offenbar ist  $A$  genau dann unitär, wenn  $A^*$  das Inverse zu  $A$  ist. Die folgenden Bedingungen sind

daher äquivalent dazu, dass  $A$  unitär ist:

$$AA^* = \mathbb{1}_n, \overline{A}A^t = \mathbb{1}_n, A^t\overline{A} = \mathbb{1}_n, A^t = \overline{A^{-1}}$$

**Satz 5.6**

Sei  $B$  eine Orthogonalbasis von  $V$ . Genau dann ist  $f$  unitär, wenn  $M_B(f)$  unitär ist.

*Beweis.* Sei  $A = M_B(f)$ ,  $v = \Phi_B(x)$ ,  $\Phi_B(y)$ . Dann ist  $\langle v, w \rangle = x^t \underbrace{M_B(\langle \cdot, \cdot \rangle)}_{=1} \cdot \overline{y} = x^t \cdot \overline{y}$ . Somit ist  $f$  genau dann unitär, wenn  $(Ax)^t \overline{Ay} = x^t \overline{y}$  für alle  $x, y \in K^n$ , also wenn  $A^t \overline{A} = \mathbb{1}$ , d.h.  $A$  unitär.  $\square$

**Satz 5.7**

Die folgenden Mengen bilden Untergruppen der  $GL_n(K)$ .

- $O_n = \{A \in GL_n(\mathbb{R}) \mid A \text{ ist orthogonal}\}$  die orthogonale Gruppe
- $SO_n = \{A \in O_n \mid \det(A) = 1\}$  die spezielle orthogonale Gruppe
- $U_n = \{A \in GL_n(\mathbb{C}) \mid A \text{ ist unitär}\}$  die unitäre Gruppe
- $SU_n = \{A \in U_n \mid \det(A) = 1\}$  die spezielle unitäre Gruppe

*Beweis.* z.B. für  $U_n$ : Sind  $A^{-1} = A^*$ ,  $B^{-1} = B^*$ , so ist  $(AB)^{-1} = B^{-1}A^{-1} = B^*A^* = (AB)^*$ ,  $(A^{-1})^{-1} = A = (A^*)^{-1} = (A^{-1})^*$   $\square$

**Satz 5.8**

Genau dann ist  $A \in \text{Mat}_n(K)$  unitär, wenn die Spalten (oder die Zeilen) von  $A$  eine Orthonormalbasis des  $K^n$  bilden.

*Beweis.* Sei  $s$  das Standardskalarprodukt und  $B = (a_1, \dots, a_n)$ . Nach Bemerkung 4.5 ist  $B$  genau dann eine Orthonormalbasis, wenn  $M_B(s) = \mathbb{1}_n$ , und  $M_B(s) = A^t \cdot \mathbb{1}_n \cdot \overline{A}$ , vgl. Beispiel 2.9  $\square$

**Theorem 5.9**

Sei  $K = \mathbb{C}$  und  $f \in \text{End}_K(V)$ . Ist  $f$  unitär, so besitzt  $V$  eine Orthonormalbasis aus Eigenvektoren von  $f$ .

*Beweis.* Induktion über  $n = \dim_K(V)$ .

$n = 0$ : klar

$n - 1 \rightarrow n$ : Da  $K$  algebraisch abgeschlossen ist, hat  $\chi_f$  eine Nullstelle  $\lambda$ , es gibt also einen Eigenvektor  $x_1$  von  $f$  zum Eigenwert  $\lambda$ . Ohne Einschränkung nehmen wir  $\|x_1\| = 1$  an. Sei  $W = K \cdot x_1$ . Nach Folgerung 4.11 ist dann  $V = W \oplus W^\perp$ . Für  $v \in W^\perp, w \in W$  ist

$$0 = \langle v, w \rangle = \langle f(v), f(w) \rangle = \overline{\lambda} \langle f(v), w \rangle$$

da  $\lambda \neq 0$  ( $f$  unitär) also  $f(W^\perp) \perp W$ . Somit ist  $f(W^\perp) \subseteq W^\perp$ , d.h.  $W^\perp$  ist  $f$ -invariant. Da auch  $f|_{W^\perp}$  unitär ist, gibt es nach Induktionshypothese eine Orthonormalbasis  $(x_1, \dots, x_n)$  aus Eigenvektoren von  $f|_{W^\perp}$ . Da  $V = W \oplus W^\perp$  und  $W \perp W^\perp$  ist  $(x_1, \dots, x_n)$  eine Orthonormalbasis von  $V$  aus Eigenvektoren von  $f$ .  $\square$

**Folgerung 5.10**

Jeder unitäre Endomorphismus eines unitären Vektorraums ist diagonalisierbar.

**Folgerung 5.11**

Zu jeder  $A \in U_n$  gibt es  $S \in U_n$  so, dass

$$S^*AS = S^{-1}AS = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$$

■ mit  $|\lambda_i| = 1$  für  $i = 1, \dots, n$ .

*Beweis.* Da  $A$  unitär ist, ist  $f_A \in \text{End}_{\mathbb{C}}(\mathbb{C}^n)$  unitär, nach Theorem 5.9 existiert also eine Orthonormalbasis  $B$  des  $\mathbb{C}^n$  aus Eigenvektoren von  $A$ . Die Transformationsmatrix  $S = T_{\mathcal{E}}^B$  hat als Spalten die Elemente von  $B$  und somit ist  $S$  nach Satz 5.8 unitär. Nach Satz 5.2 ist  $|\lambda| = 1$  für alle Eigenwerte von  $f_A$ .  $\square$

► **Bemerkung 5.12**

Dies (Theorem 5.9) gilt nicht im Fall  $K = \mathbb{R}$ . Man kann aber auch orthogonale Endomorphismen immer “fast diagonalisieren“.

## 6. Selbstadjungierte Endomorphismen

Sei  $V$  ein euklidischer bzw. unitärer Vektorraum und  $f \in \text{End}_K(V)$ .

**Definition 6.1 (selbstadjungiert)**

$f$  ist selbstadjungiert, wenn

$$\langle f(x), y \rangle = \langle x, f(y) \rangle \quad \forall x, y \in V$$

**Satz 6.2**

Sei  $B$  eine Orthonormalbasis von  $V$ . Genau dann ist  $f$  selbstadjungiert, wenn  $M_B(f)$  hermitesch ist.

*Beweis.* Seien  $A = M_B(f)$ ,  $v = \Phi_B(x)$ ,  $w = \Phi_B(y)$ . Es ist

$$\begin{aligned} \langle f(v), w \rangle &= (Ax)^t \bar{y} = x^t A^t \bar{y} \\ \langle v, f(w) \rangle &= x^t \overline{Ay} = x^t \overline{A} \bar{y} \end{aligned}$$

Somit ist  $\langle f(v), w \rangle = \langle v, f(w) \rangle$  genau dann, wenn  $A^t = \overline{A}$ , d.h.  $A = A^*$ , also  $A$  hermitesch.  $\square$

**Lemma 6.3**

Ist  $f$  selbstadjungiert und  $\lambda$  ein Eigenwert von  $f$ , so ist  $\lambda \in \mathbb{R}$ .

*Beweis.* Ist  $0 \neq x \in V$  mit  $f(x) = \lambda x$ , so ist

$$\lambda \langle x, x \rangle = \langle f(x), x \rangle = \langle x, f(x) \rangle = \overline{\lambda} \langle x, x \rangle$$

und mit  $\langle x, x \rangle \neq 0$  folgt  $\lambda = \overline{\lambda}$ , also  $\lambda \in \mathbb{R}$ .  $\square$

**Satz 6.4**

Ist  $f$  selbstadjungiert, so ist  $\chi_f \in \mathbb{R}[t]$  und  $\chi_f$  zerfällt über  $\mathbb{R}$  in Linearfaktoren.

*Beweis.* Sei  $B$  eine Orthonormalbasis von  $V$ . Nach Satz 6.2 ist  $A = M_B(f) \in \text{Mat}_n(K) \subseteq \text{Mat}_n(\mathbb{C})$  hermitesch. Da  $\mathbb{C}$  algebraisch abgeschlossen ist, ist  $\chi_f(t) = \prod_{i=1}^n (t - \lambda_i)$  mit  $\lambda_1, \dots, \lambda_n \in \mathbb{C}$ . Nach Lemma 6.3 ist aber schon  $\lambda_1, \dots, \lambda_n \in \mathbb{R}$ . Somit zerfällt  $\chi_f \in \mathbb{R}[t]$  über  $\mathbb{R}$  in Linearfaktoren.  $\square$

**Theorem 6.5**

Ist  $f$  selbstadjungiert, so besitzt  $V$  eine Orthonormalbasis aus Eigenvektoren von  $f$ .

*Beweis.* Induktion über  $n = \dim_K(V)$ .

$n = 0$ : klar

$n - 1 \rightarrow n$ : Nach Satz 6.4 hat  $f$  einen reellen Eigenwert  $\lambda \in \mathbb{R}$ . Wähle  $x_1 \in V$  mit  $f(x_1) = \lambda x_1$  und  $\|x_1\| = 1$ . Sei  $W = K \cdot x_1$ . Für  $y \in W^\perp$  ist

$$\langle x_1, f(y) \rangle = \langle f(x_1), y \rangle = \lambda \langle x_1, y \rangle = 0$$

und folglich ist  $W^\perp$   $f$ -invariant. Nach Folgerung 4.11 ist  $V = W \oplus W^\perp$  und  $f|_{W^\perp}$  ist wieder selbstadjungiert. Nach Induktionshypothese hat  $W^\perp$  eine Orthonormalbasis  $(x_2, \dots, x_n)$  aus Eigenvektoren von  $f|_{W^\perp}$ . Da  $V = W \oplus W^\perp$  und  $W \perp W^\perp$  ist  $(x_1, \dots, x_n)$  eine Orthonormalbasis von  $V$  aus Eigenvektoren von  $f$ .  $\square$

**Folgerung 6.6**

Jeder selbstadjungierte Endomorphismus eines euklidischen oder unitären Vektorraums ist diagonalisierbar.

**Folgerung 6.7**

Ist

- $f$  selbstadjungiert ( $K = \mathbb{C}$  oder  $\mathbb{R}$ )
- $f$  unitär ( $K = \mathbb{C}$ )

so ist

$$V = \bigoplus_{\lambda \in K} \text{Eig}(f, \lambda)$$

eine Zerlegung von  $V$  in paarweise orthogonale Untervektorräume.

*Beweis.* Nach Theorem 5.9 bzw. Theorem 6.5 existiert eine Orthonormalbasis  $B$  aus Eigenvektoren. Insbesondere ist  $f$  diagonalisierbar, also

$$V = \bigoplus_{\lambda \in K} \text{Eig}(f, \lambda)$$

Zu jedem  $\lambda$  gibt es eine Teilfamilie von  $B$  die eine Basis von  $\text{Eig}(f, \lambda)$  bildet. Da  $B$  eine Orthonormalbasis ist, folgt, dass die Eigenräume paarweise orthogonal sind.  $\square$

**► Bemerkung 6.8**

Um eine Orthonormalbasis aus Eigenvektoren wie in Theorem 5.9 oder Theorem 6.5 zu bestimmen, kann man entweder wie im Induktionsbeweis vorgehen, oder man bestimmt zunächst Basen  $B$  von  $\text{Eig}(f, \lambda_i)$ ,  $i = 1, \dots, n$  und orthonormalisiert diese mit Theorem 4.9 zu Basen  $B'$ . Nach Folgerung 6.7 ist  $\bigcup B'$  dann eine Orthonormalbasis von  $V$  aus Eigenvektoren von  $f$ .



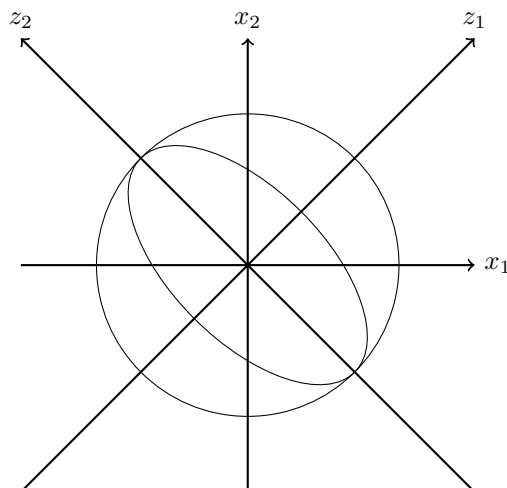
Im neuen Koordinatensystem  $z = \Phi_B^{-1}(x)$  ist dann

$$q_s(z) = 3z_1^2 + z_2^2$$

Mit  $a_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}$ ,  $a_2 = 1$  erhält man "Höhenlinien" der Form

$$\left(\frac{z_1}{a_1}\right)^2 + \left(\frac{z_2}{a_2}\right)^2 = c$$

was für  $c > 0$  eine Ellipse beschreibt.



### Folgerung 7.5

Zu jeder hermiteschen Sesquilinearform  $s$  auf  $V$  gibt es eine Basis  $B$  von  $V$ , für die

$$M_B(s) = \begin{pmatrix} \mathbb{1}_{r_+(s)} & & \\ & -\mathbb{1}_{r_-(s)} & \\ & & 0 \end{pmatrix}$$

mit  $r_+(s) - r_-(s) \leq n$ .

*Beweis.* Sei  $B_0 = (x_1, \dots, x_n)$  eine Orthonormalbasis von  $V$  mit  $A = M_{B_0}(s) = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ . Setze

$$\mu_i = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{|\lambda_i|}} & \lambda_i \neq 0 \\ 1 & \lambda_i = 0 \end{cases}$$

Sei  $x'_i = \mu_i \cdot x_i$  und  $B' = (x'_1, \dots, x'_n)$ . Dann ist  $M_B(s) = S^t A \bar{S}$  mit  $S = T_{B_0}^{B'} = \text{diag}(\mu_1, \dots, \mu_n)$  also  $M_{B'}(s) = \text{diag}(\lambda'_1, \dots, \lambda'_n)$  mit  $\lambda'_i = \mu_i \cdot \lambda_i \cdot \bar{\mu}_i = \mu_i^2 \lambda_i \in \{0, 1, -1\}$ . Durch Permutation der Elemente von  $B'$  erhält man die gewünschte Basis  $B$ .  $\square$

### Definition 7.6 (Ausartungsraum)

Der Ausartungsraum von  $s$  ist

$$V_0 = \{x \in V \mid s(x, y) = 0 \quad \forall y \in V\}$$

### Lemma 7.7

$V_0$  ist ein Untervektorraum von  $V$ .

*Beweis.* Klar aus Linearität im ersten Argument.  $\square$



**Lemma 7.8**

Seien  $V_+$  und  $V_-$  Untervektorräume von  $V$  mit  $V = V_+ \oplus V_- \oplus V_0$  und  $s$  positiv definit auf  $V_+$ ,  $-s$  positiv definit auf  $V_-$ . Dann ist

$$\begin{aligned} \dim_K(V_+) &= \max \dim_K(W) \mid \text{Untervektorraum von } V, s \text{ positiv definit auf } W \\ \dim_K(V_-) &= \max \dim_K(W) \mid \text{Untervektorraum von } V, -s \text{ positiv definit auf } W \end{aligned}$$

*Beweis.* Beweis nur für  $V_+$ , analog für  $V_-$ .

$\leq$ : klar

$\geq$ : Ist  $W \leq V$  Untervektorraum mit  $s(x, x) > 0 \quad \forall x \in W \setminus \{0\}$ , so ist  $W \cap (V_- \oplus V_0) = \{0\}$ . Ist  $x = y + z$  mit  $y \in V_-$ ,  $z \in V_0$ , so ist  $s(x, x) = s(y + z, y + z) = \underbrace{s(y, y)}_{\leq 0} + \underbrace{s(y, z) + s(z, y) + s(z, z)}_{=0} \leq 0 \Rightarrow \dim_K(W) \leq$

$$\dim_K(V) - \dim_K(V_-) - \dim_K(V_0) = \dim_K(V_+).$$

□

**Theorem 7.9 (Trägheitssatz von SYLVESTER)**

Für eine hermitesche Sesquilinearform  $s$  auf  $V$  sind die Zahlen  $r_+(s)$ ,  $r_-(s)$  aus Folgerung 7.5 eindeutig bestimmt.

*Beweis.* Sei  $B$  eine Basis von  $V$  wie in Folgerung 7.5,  $B = (x_1, \dots, x_n)$ . Definiere

$$\begin{aligned} V_+ &= \text{span}_K(x_1, \dots, x_{r_+(s)}) \\ V_- &= \text{span}_K(x_{r_+(s)+1}, \dots, x_{r_+(s)+r_-(s)}) \\ V'_0 &= \text{span}_K(x_{r_+(s)+r_-(s)+1}, \dots, x_n) \end{aligned}$$

Dann ist  $s$  positiv definit auf  $V_+$ ,  $-s$  positiv definit auf  $V_-$  und  $V = V_+ \oplus V_- \oplus V'_0$ . Es gilt  $V'_0 = V_0$ :  $\subseteq$ : klar  
 $\supseteq$ : Ist  $x = \sum_{i=1}^n \lambda_i x_i \in V_0$ , so ist  $0 = s(x, x_i) = \lambda_i \cdot s(x_i, x_i)$  für  $i = 1, \dots, n$  also  $\lambda_i = 0$  für  $i = 1, \dots, r_+(s) + r_-(s)$ , d.h.  $x \in V'_0$ . Nach Lemma 7.8 ist  $r_+(s) = \dim_K(V_+)$  nur von  $s$  abhängig, analog für  $r_-(s)$ . □

## Kapitel III

### *Dualität*

Kapitel IV  
*Moduln*

# Anhang

## Anhang A: Listen

### A.1. Liste der Theoreme

Theorem 4.8: . . . . .	10
Theorem 5.9: Satz von CAYLEY-HAMILTION . . . . .	12
Theorem 7.5: JORDAN-Normalform . . . . .	19
Theorem 4.9: GRAM-SCHMIDT-Verfahren . . . . .	30
Theorem 5.9: . . . . .	33
Theorem 6.5: . . . . .	35
Theorem 7.3: Hauptachsentransformation . . . . .	37
Theorem 7.9: Trägheitssatz von SYLVESTER . . . . .	39

## A.2. Liste der benannten Sätze

Satz 6.4: Lemma von FITTING . . . . .	14
Satz 7.3: Hauptraumzerlegung . . . . .	18
Satz 1.4: Ungleichung von CAUCHY-SCHWARZ . . . . .	22
Satz 2.8: Transformationsformel . . . . .	25
Satz 3.4: Polarisierung . . . . .	27

# Index

- JORDAN-Invarianten, 19
- JORDAN-Matrix, 16
  
- Absolutbetrag, 22
- Ausartungsraum, 38
- ausgeartet, 25
  
- Bilinearform, 24
  
- charakteristische Polynom, 4
  
- definit, 27
- diagonalisierbar, 6
  
- Eigenraum, 1
- Eigenvektor, 1
- Eigenwert, 1
- Endomorphismus
  - orthogonal, 32
  - unitär, 32
- euklidische Norm in  $\mathbb{C}$ , 23
- euklidische Norm in  $\mathbb{R}$ , 21
- euklidischen, 27
  
- Hauptraum, 18
- hermitesch, 25
  
- invariant, 9
  
- komplexe Konjugation, 22
  
- Matrix
  - orthogonal, 32
  - unitär, 32
- Minimalpolynom, 11
  
- nilpotent, 15
- Nilpotenzklasse, 15
- normiert, 5
  
- orthogonal, 29
- orthogonale Gruppe, 33
- orthogonale Komplement, 29
- orthogonale Projektion, 30
- orthonormal, 29
  
- quadratische Form, 27
  
- selbstadjungiert, 35
- semidefinit, 27
- Sesquilinearform, 24
  - darstellende Matrix, 24
- spezielle orthogonale Gruppe, 33
- spezielle unitäre Gruppe, 33
- Standardskalarprodukt in  $\mathbb{C}$ , 22
- Standardskalarprodukt in  $\mathbb{R}$ , 21
- symmetrisch, 25
  
- teilt, 6
- trigonalisierbar, 9
  
- unitäre Gruppe, 33
- unitären, 27
  
- Vielfachheit, 6
  - algebraische Vielfachheit, 8
  - geometrische Vielfachheit, 8
  
- zyklisch, 12