

Lineare Algebra I - Vorlesungs-Script

Prof. Andrew Kresh

Inhaltsverzeichnis

1	Bilinearformen	1
1.1	Vektorprodukt in \mathbb{R}^3	3
1.2	Skalarprodukt über \mathbb{C}^n	4
1.3	Bilinearform	5
1.4	Bilineare und quadratische Formen	8
1.4.1	Polarisierungsformel	8
1.5	Sesquilineare Form	8
1.6	Volumen	13
1.6.1	Spat	13
1.7	Orthogonale und unitäre Endomorphismen	16
1.8	Beschreibung von $SO(3)$ und $O(3)$	20

1 Bilinearformen

Das kanonische Skalarprodukt (oder: Standardskalarprodukt) von \mathbb{R}^n ist die Abbildung

$$\begin{aligned} \langle, \rangle: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n &\rightarrow \mathbb{R} \\ (x, y) &\mapsto \langle x, y \rangle \in \mathbb{R} \end{aligned}$$

gegeben durch

$$\langle x, y \rangle := x_1 y_1 + \cdots + x_n y_n$$

falls $x = (x_1, \dots, x_n)$ und $y = (y_1, \dots, y_n)$ sind.

Definition 1 (Konvention). eine 1×1 Matrix wird mit Eintrag indentifiziert

$$(x) \in M(1 \times 1, K) \leftrightarrow x \in K$$

Dann können wir schreiben:

$$\begin{aligned} \langle x, y \rangle &= (x^t)(y) \\ x &= \begin{pmatrix} x_1, \vdots, x_n \end{pmatrix}, y = \begin{pmatrix} y_1, \vdots, y_n \end{pmatrix} \\ (x_1, \dots, x_n) \begin{pmatrix} y_1, \vdots, y_n \end{pmatrix} &= x_1 y_1 + \cdots + x_n y_n \end{aligned}$$

Bemerkung 1 (\langle, \rangle ist bilinear).

$$\begin{aligned} \langle x + x', y \rangle &= \langle x, y \rangle + \langle x', y \rangle \\ \langle \lambda x, y \rangle &= \lambda \langle x, y \rangle \\ \langle x, y + y' \rangle &= \langle x, y \rangle + \langle x, y' \rangle \\ \langle x, \lambda y \rangle &= \lambda \langle x, y \rangle \end{aligned}$$

symmetrisch:

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

positiv definit:

$$\begin{aligned} \langle x, x \rangle &\geq 0 \\ \langle x, x \rangle &= 0 \Leftrightarrow x = 0 \in \mathbb{R}^n \end{aligned}$$

$$\text{für } \forall x, y, x', y' \in \mathbb{R}^n, \lambda \in \mathbb{R}$$

Bemerkung 2 (Hintergrund: euklidische Geometrie).

$$\|x\| = \sqrt{\langle x, x \rangle} = \sqrt{x_1^2 + \cdots + x_n^2}$$

Bemerkung 3 (Eigenschaften von $\|\cdot\|$).

$$\begin{aligned} \|x\| &\geq 0, \text{ mit } \|x\| = 0 \Leftrightarrow x = 0 \\ \|\lambda x\| &= |\lambda| \|x\| \\ \|x + y\| &\leq \|x\| + \|y\| \end{aligned}$$

Dann definieren wir den Abstand von $x, y \in \mathbb{R}^n$:

$$\begin{aligned} d(x, y) &\in \mathbb{R} \\ d(x, y) &:= \|y - x\| \end{aligned}$$

Bemerkung 4. Eigenschaften

$$\begin{aligned} d(x, y) &\geq 0, \text{ mit } d(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y \\ d(y, x) &= d(x, y) \\ d(x, z) &\leq d(x, y) + d(y, z) \\ \text{für } x, y, z &\in \mathbb{R}^n \end{aligned}$$

Wir sind motiviert, Strukturen zu definieren, basierend auf diesen Eigenschaften, so z.B.

- Bilineare Formen (symmetrisch, positiv definit)
- Norme
- Metriken

Proof. $\|\cdot\|$ und d : die Dreiecksungleichung folgt aus der Cauchy-Schwarzschen Ungleichung

$$\begin{aligned}\|x+y\|^2 &= \langle x+y, x+y \rangle \\ &= \|x\|^2 + \|y\|^2 + 2\langle x, y \rangle \leq (?) (\|x\| + \|y\|)^2 \\ &\Leftrightarrow \langle x, y \rangle \leq \|x\| \|y\|\end{aligned}$$

Cauchy-Schwarz'sche Ungleichung: für $x, y \in \mathbb{R}^n$

$$\langle x, y \rangle^2 \leq \langle x, x \rangle \langle y, y \rangle$$

mit Gleichheit genau dann, wenn x und y linear abhängig sind.

\Leftrightarrow

$$A = \begin{pmatrix} \text{---} & x & \text{---} \\ \text{---} & y & \text{---} \end{pmatrix} \in M(2 \times n, \mathbb{R})$$

A hat Rang ≤ 1

□

Proof.

$$\begin{aligned}A \cdot A^t &= \begin{pmatrix} \langle x, x \rangle & \langle x, y \rangle \\ \langle x, y \rangle & \langle y, y \rangle \end{pmatrix} \in M(2 \times 2), \mathbb{R} \\ \det(A \cdot A^t) &= \langle x, x \rangle \langle y, y \rangle - \langle x, y \rangle^2\end{aligned}$$

Es gibt eine Gleichung von Determinanten:

$$\begin{aligned}A, B &\in M(k \times n, K) \\ \det(A \cdot B^t) &= \sum_{1 \leq s_1 < s_2 < \dots < s_k \leq n} \det(A^{s_1, \dots, s_k}) \det(B^{s_1, \dots, s_k}) \\ \text{wobei } A^{s_1, \dots, s_k} &:= (a_i, s_j)_{1 \leq i, j \leq k}, B^{s_1, \dots, s_k} = (b_i, s_j)_{1 \leq i, j \leq k}\end{aligned}$$

Beweis-Skizze: Reduktion zum Fall, dass die Zeilen von A und B Standardbasiselemente sind; direkte Berechnung in diesem Fall.

Es folgt:

$$\det(A \cdot A^t) = \sum_{1 \leq i < j \leq n} \det(A^{i,j})^2 \geq 0$$

und ist $= 0 \Leftrightarrow$ alle 2×2 Minoren von A sind 0 $\Leftrightarrow \text{rang}(A) \leq 1$

□

Korollar 1. Wir können definieren

$$\angle(x, y) := \cos^{-1} \underbrace{\frac{\langle x, y \rangle}{\|x\| \|y\|}}_{\in [-1, 1] \subset \mathbb{R}} \in [0, \pi] \in \mathbb{R}$$

für

$$0 \neq x \in \mathbb{R}^n$$

$$0 \neq y \in \mathbb{R}^n$$

Korollar 2. x, y Vektoren, θ Winkel zwischen den beiden

$$\langle x, y \rangle = \frac{1}{2} (\|x\|^2 + \|y\|^2 - \|y - x\|^2)$$

und deshalb:

$$\cos \theta = \frac{\|x\|^2 + \|y\|^2 - \|y - x\|^2}{2 \|x\| \|y\|}$$

\Rightarrow Winkel eines Dreiecks ist nur von den Seitenlängen abhängig.

Beispiel 1.

$$\angle(x, y) = \frac{\pi}{2} \Leftrightarrow \langle x, y \rangle = 0$$

$$\underbrace{\{y \mid \langle x, y \rangle = 0\}}_{\text{Untervektorraum}} = 0 \cup \{0 \neq y \in \mathbb{R}^n \mid \angle(x, y) = \frac{\pi}{2}\}$$

Man nennt x und y senkrecht falls $\langle x, y \rangle = 0$

Fazit 1.

$$\begin{array}{ll} \langle \cdot, \cdot \rangle : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} & \text{bilinear form} \\ \|\cdot\| : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0} & \text{Norm} \\ d(\cdot, \cdot) : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}_{>0} & \text{Metrik} \end{array}$$

$$\begin{aligned} \|x\| &= \sqrt{\langle x, x \rangle} \\ d(x, y) &= \|y - x\| \\ \langle x, y \rangle &= \frac{\|x\|^2 + \|y\|^2 - \|y - x\|^2}{2} \end{aligned}$$

1.1 Vektorprodukt in \mathbb{R}^3

$$\begin{array}{ll} \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^3 \rightarrow & \mathbb{R}^3 \\ (x, y) \mapsto & x \times y \end{array}$$

für $y = (y_1, y_2, y_3)$ und $y = (y_1, y_2, y_3)$ ist

$$x \times y = (x_2 y_3 - x_3 y_2, x_3 y_1 - x_1 y_2, x_1 y_2 - x_2 y_1)$$

oder:

$$x \times y = \det \begin{pmatrix} e_1 & e_2 & e_3 \\ x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \end{pmatrix}$$

wobei (e_1, e_2, e_3) die Standardbasis ist. Es ist deshalb klar, dass

$$0 = \det \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \end{pmatrix} = \langle x, x \times y \rangle$$

$$0 = \det \begin{pmatrix} y_1 & y_2 & y_3 \\ x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \end{pmatrix} = \langle y, x \times y \rangle$$

$x \times y$ liegt auf der Gerade von Vektoren senkrecht zu x und y . weiter:

$$\begin{aligned} \det \begin{pmatrix} w_1 & w_2 & w_3 \\ x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \end{pmatrix} &= \langle x \times y, x \times y \rangle \\ &= \|x \times y\|^2 = (x_2 y_3 - x_3 y_2)^2 + (x_3 y_1 - x_1 y_2)^2 + (x_1 y_2 - x_2 y_1)^2 \\ &= \|x\|^2 \|y\|^2 - \langle x, y \rangle^2 = \|x\|^2 \|y\|^2 \left(1 - \frac{\langle x, y \rangle^2}{\|x\|^2 \|y\|^2}\right) \\ &= \|x\|^2 \|y\|^2 (1 - \cos^2 \angle(x, y)) = \|x\|^2 \|y\|^2 \sin^2 \angle(x, y) \end{aligned}$$

Fazit 2. Wenn das Ergebnis = 0, folgt daraus, dass x und y linear abhängig sind. Falls x und y linear unabhängig sind, dann folgt dass $(x \times y, x, y)$ zu derselben Orientierungsklasse gehört wie (e_1, e_2, e_3) . Insgesamt bedeutet dies, dass $x \times y$ folgende Eigenschaften hat:

- ist senkrecht zu x und y
- ist $0 \Leftrightarrow x$ und y sind linear abhängig
- hat Länge $\|x\| \|y\| \sin \angle(x, y)$
- und hat die Richtung, die mit x und y die gleiche Orientierungsklasse wie die Standardbasis hat.

1.2 Skalarprodukt über \mathbb{C}^n

Sei $z = (z_1, \dots, z_n)$ und $w = (w_1, \dots, w_n) \in \mathbb{C}^n$

Bemerkung 5. Der Ausdruck macht Sinn.

$$\begin{aligned} \langle z, w \rangle &:= z_1 w_1 + \dots + z_n w_n \\ \langle z, z \rangle &:= z_1^2 + \dots + z_n^2 \end{aligned}$$

Dann kann die Länge nicht mehr interpretiert werden, z.B. für $z = (1, i, 0, \dots, 0)$ haben wir $\langle z, z \rangle = 1^2 + i^2 = 0$. Isotropische Untervektorräume von \mathbb{C}^n werden nicht in diesem Kurs behandelt. ($V \subset \mathbb{C}^n$ s.d. $\langle v, w \rangle = 0 \forall v, w \in V$). Für die Physik, die Geometrie usw. ist eine Interpretation in Zusammenhang mit Länge wichtig, deshalb brauchen wir eine neue Definition.

Definition 2 (Das kanonische Skalarprodukt). von \mathbb{C}^n ist gegeben durch

$$\begin{aligned} \langle \cdot, \cdot \rangle_c : \mathbb{C}^n \mathbb{C}^n &\rightarrow \mathbb{C} \\ (z, w) &\mapsto z_1 \bar{w}_1 + \dots + z_n \bar{w}_n \end{aligned}$$

Eigenschaften 1 (von $\langle \cdot, \cdot \rangle_c$).

$$\begin{aligned} \langle z + z', w \rangle &= \langle z, w \rangle_c + \langle z', w \rangle_c \\ \langle \lambda z, w \rangle_c &= \lambda \langle z, w \rangle_c \\ \langle z, w + w' \rangle_c &= \langle z, w \rangle_c + \langle z, w' \rangle_c \\ \langle z, \lambda w \rangle_c &= \bar{\lambda} \langle z, w \rangle_c \end{aligned}$$

für $z, z', w, w' \in \mathbb{C}^n, \lambda \in \mathbb{C}$

$\langle \cdot, \cdot \rangle_c$ ist sesquilinear

$$\begin{aligned} \langle w, z \rangle_c &= \overline{\langle z, w \rangle_c} \text{ hermitisch} \\ \langle z, z \rangle_c &\in \mathbb{R}_{\geq 0} \text{ positiv definit} \\ \langle z, z \rangle_c = 0 &\Leftrightarrow z = 0 \end{aligned}$$

Fazit 3. $\langle \cdot, \cdot \rangle_c$ ist sesquilinear, hermitisch und positiv definit.

Proof. Bei Bedarf sonstwo nachschauen (Zu viele Zeichen und zu wenig Sinn). Es läuft auf eine Sammlung von Quadraten heraus. \square

Definition 3 (Norm von \mathbb{C}^n).

$$\|z\| = \sqrt{\langle z, z \rangle_c}$$

Bemerkung 6. Sei $w = (x'_1 + xy'_1, \dots, x'_n + iy'_n)$. Dann:

$$\begin{aligned} \langle z, w \rangle_c &= (x_1 + iy_1)(x'_1 - iy'_1) + \dots + (x_n + iy_n)(x'_n - iy'_n) \\ &= (x_1 x'_1 + y_1 y'_1 + \dots + x_n x'_n + y_n y'_n) + i(x'_1 y_1 - x_1 y'_1 + \dots + x'_n y_n - x_n y'_n) \end{aligned}$$

Auf diese Weise ist $\langle \cdot, \cdot \rangle_c$ eine Erweiterung von reellen Skalarprodukt.

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{R}^{2n} & \rightarrow & \mathbb{C}^n \mathbb{R}\text{-linear} \\ e_1 & \mapsto & (1, 0, \dots, 0) \\ e_2 & \mapsto & (i, 0, \dots, 0) \\ \dots & & \\ e_{2n} & \mapsto & (0, \dots, 0, i) \end{array}$$

$$\langle \cdot, \cdot \rangle_c = (\langle \cdot, \cdot \rangle \text{ von } \mathbb{R}^{2n}) + i(\text{neues})$$

$\operatorname{Re} \langle \cdot, \cdot \rangle_c = \langle \cdot, \cdot \rangle$ von \mathbb{R}^{2n} unter diesem Isomorphismus.

Sei $\omega := \operatorname{Im} \langle \cdot, \cdot \rangle_c$:

$$\begin{array}{ccc} \omega : \mathbb{C}^n \times \mathbb{C}^n & & \rightarrow \mathbb{R} \\ \text{oder } \mathbb{R}^{2n} \times \mathbb{R}^{2n} & \rightarrow & \mathbb{R} \end{array}$$

Eigenschaften 2 (von ω (Imaginärteil des kanonischen Skalarproduktes)). **bilinear**

schiefsymmetrisch $\omega(w, z) = -\omega(z, w)$

$$\omega(z, z) = 0 \quad \forall z \in \mathbb{C}^n \text{ (oder } \mathbb{R}^{2n})$$

1.3 Bilinearform

Sei K ein Körper und V ein K -Vektorraum.

Definition 4 (Bilinearform). Eine bilineare Form auf V ist eine Abbildung

$$s : V \times V \rightarrow K$$

so dass:

$$\begin{array}{ccc} s(v + v', w) & = & s(v, w) + s(v', w) \\ s(\lambda v, w) & = & \lambda s(v, w) \\ s(v, w + w') & = & s(v, w) + s(v, w') \\ s(v, \lambda w) & = & \lambda s(v, w) \end{array}$$

$$\forall v, v', w, w' \in V, \lambda \in K$$

Und: s heisst symmetrisch, falls $s(w, v) = s(v, w)$ und schiefsymmetrisch, falls $s(w, v) = -s(v, w)$.

Beispiel 2. • $\langle \cdot, \cdot \rangle := \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ ist eine symmetrische bilineare Form

- ω ist eine schiefsymmetrisch bilineare Form
- $\langle \cdot, \cdot \rangle_c$ nicht)
- $V = \{\text{stetige Abbildung } [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}\}$ über \mathbb{R} : $f, g \in V$

$$s(f, g) = \int_0^1 f(x)g(x)dx$$

ist eine symmetrisch bilineare Form auf V

Sei K ein Körper, V ein K -Vektorraum, mit $\dim_K V < \infty$, und $s : V \times V \rightarrow K$ eine bilineare Form.

Definition 5. Ist $B = (v_i)_{1 \leq i \leq n}$ eine Basis von V , so setzen wir

$$M_B(s) := (s(v_i, v_j))_{1 \leq i, j \leq n} \in M(n \times n, K)$$

die darstellende Matrix

Korollar 3. für $x, y \in V$

$$\begin{aligned} x &= x_1 v_1 + \cdots + x_n v_n \\ y &= y_1 v_1 + \cdots + y_n v_n \end{aligned}$$

und

$$M_B(s) = (a_{ij})_{1 \leq i, j \leq n}, \text{ d.h. } a_{ij} = s(v_i, v_j)$$

haben wir:

$$\begin{aligned} s(x, y) &= \sum_{i, j=1}^n x_i y_j a_{ij} \\ &= (x_1 \cdots x_n) \cdot \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} \\ &= x^t M_B(s) \cdot y \end{aligned}$$

Proposition 1. Sei V ein endlich-dim. Vektorraum über K mit Basis $B = (v_i)_{1 \leq i \leq n}$. Es gibt eine Bijektion zwischen der Menge von Bilinearformen und $M(n \times n, K)$, gegeben durch

$$(s : V \times V \rightarrow K) \mapsto M_B(s)$$

Beweis 1. Wir schreiben einen Vektor $x \in V$ als (x_1, \dots, x_n) falls $x = x_1 v_1 + \cdots + x_n v_n$. Ähnlich für y . Dann ist

$$\begin{aligned} A \in M(n \times n, K) &\mapsto V \times V \rightarrow K \\ (x, y) &\mapsto x^t \cdot A \cdot y \end{aligned}$$

inverses zu der obigen Abbildung.

Bemerkung 7. Sei $(s : V \times V \rightarrow K)$ eine bilineare Form und $A = (a_{ij})_{1 \leq i, j \leq n}$ die darstellende Matrix. Wir erinnern uns an die Notation

$$\begin{aligned} \Phi_B : K^n &\rightarrow V \\ e_i &\mapsto v_i \end{aligned}$$

Dann:

$$K^n \times K^n \xrightarrow{\Phi_B \times \Phi_B} V \times V \xrightarrow{s} K$$

ist gegeben durch

$$(x, y) \mapsto t_x A \cdot y$$

Sei $A = (u_i)_{1 \leq i \leq n}$ eine andere Basis.

$$\begin{aligned} &K^n \xrightarrow{\Phi_A} V \\ \xrightarrow{T} &= \Phi_B^{-1} \circ \Phi_A \\ &K^n \xrightarrow{\Phi_B} \end{aligned}$$

Proposition 2. Transformationsformel Mit dieser Notation haben wir:

$$M_A(s) = T^t \cdot M_B(s) \cdot T$$

Beweis 2.

$$\begin{array}{ccc}
 K^n \times K^n & \xrightarrow{\Phi_B \times \Phi_B} & V \times V \xrightarrow{s} K \\
 (x, y) & \mapsto & t_x \cdot M_B(s) \cdot y
 \end{array}$$

Es folgt: (eine Bastelei...)

$$\begin{array}{ccc}
 K^n \times K^n & \xrightarrow{\Phi_A \times \Phi_A} & V \times V \xrightarrow{s} K \\
 T \times T & \xrightarrow{\quad} K^n \times K^n & \xrightarrow{\Phi_B \Phi_B} \uparrow
 \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc}
 K^n \times K^n(x, y) & \mapsto & K(x^t M_a(s) \cdot y) = t_x^t M_B(s) T_y = (T_x)^t M_B(s) (T_y) \\
 & \mapsto K^n \times K^n(T_x, T_y) & \xrightarrow{(T_x)^t M_B(s) (T_y)} \uparrow
 \end{array}$$

Es folgt aus der oberen Proposition (Vor der Transf.):

$$T^t M_B(s) T = M_a(s)$$

Beispiel 3. $V = K^n$, mit Standardskalaprodukt $\langle \cdot, \cdot \rangle$. Ist $B = (e_1, \dots, e_n)$, so ist

$$\begin{pmatrix} 1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & 1 \end{pmatrix} = M_{\text{Standardbasis}}(\langle \cdot, \cdot \rangle)$$

Sei

$$\begin{array}{lcl}
 A = & (e_1, e_2 - e_1, & e_3 - e_2, \dots, e_n - e_{n-1}) \\
 =: & (u_1, u_2, & \dots, u_n
 \end{array}$$

Direkt aus der Definition:

$$\langle u_i, u_j \rangle = \begin{cases} 1 & i = j = 1 \\ 2 & i = j > 1 \\ -1 & |i - j| = 1 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

oder mit der Transformationsformel

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ \cdots & & \\ \cdots & & 1 \\ 0 & & 1 \end{pmatrix} \text{ und } T^t E_N T''$$

Bemerkung 8. Ist A die darstellende Matrix bezüglich einer Basis, so haben wir:

- symmetrisch $\Leftrightarrow A = A^t$
- schiefsymmetrisch $\Leftrightarrow A = -A^t$

Das stimmt überein mit (vgl. Übungsblatt 3): $A \in M(n \times n)$ ist symmetrisch $\Leftrightarrow A = A^t$. A ist schiefsymmetrisch oder antisymmetrisch (oder alternierend wenn $\text{char}(K) \neq 2$) $\Leftrightarrow A = -A^t$

1.4 Bilineare und quadratische Formen

Eine quadratische Form $V \rightarrow K$ wird zu einer Bilinearform assoziiert. Falls $\dim_K V < \infty$: "quadratische Form" bedeutet $q : V \rightarrow K$ bezüglich einem Koordinatensystem gegeben als homogenes quadratisches Polynom. Ist $s : V \times V \rightarrow K$ eine bilineare Form, dann heisst

$$\begin{array}{ccc} q : V & & \rightarrow K \\ v & \mapsto & q(v) = s(v, v) \end{array}$$

die zu s gehörige quadratische Form.

Beispiel 4. $\langle v, v \rangle = v_1^2 + \dots + v_n^2$ für $v \in K^n$

Für $A = (a_{ij})_{1 \leq i, j \leq n}$ eine symmetrische Matrix mit $s : V \times V \rightarrow K$, $(x, y) \mapsto x^t A y$, haben wir

$$\begin{aligned} s(x, x) &= x^t A x \\ &= \begin{pmatrix} x_1 & \dots & x_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \\ &= \sum_{i,j=1}^n a_{ij} x_i x_j \\ &= \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + 2 \sum_{1 \leq i < j \leq n} a_{ij} x_i x_j \end{aligned}$$

Ist $\text{char}(K) \neq 2$, so haben wir:

$$\begin{array}{ccc} \{\text{symm. bilineare Formen in } K^n\} & \leftrightarrow & \{\text{quadr. Formen auf } K^n\} \\ s & \mapsto & q(v) := s(v, v) \\ & \leftrightarrow & (\text{Polarisierungsformel}) \end{array}$$

1.4.1 Polarisierungsformel

Ist s eine symmetrische Bilinearform und q die zu s gehörende quadratische Form über einem Vektorraum V über K mit $\text{char}(K) \neq 2$, dann gilt:

$$\begin{aligned} s(v, w) &= \frac{1}{2} (q(v+w) - q(v) - q(w)) \\ &= \frac{1}{2} (q(v) + q(w) - q(v-w)) \\ &= \frac{1}{4} (q(v+w) - q(v-w)) \end{aligned}$$

1.5 Sesquilineare Form

Definition 6. Sei V ein komplexer Vektorraum. Eine Abbildung

$$s : V \times V \rightarrow \mathbb{C}$$

heisst sesquilinear falls:

$$\begin{aligned} s(v + v', w) &= s(v, w) + s(v', w) \\ s(\lambda v, w) &= \lambda s(v, w) \\ s(v, w + w') &= s(v, w) + s(v, w') \\ s(v, \lambda w) &= \bar{\lambda} s(v, w) \end{aligned}$$

für $v, v', w, w' \in V$, $\lambda \in \mathbb{C}$

Beispiel 5. $\langle \cdot, \cdot \rangle$ auf \mathbb{C}^n

$$s(f, g) = \int_0^1 f(x)g(x)dx$$

$$\text{auf } V := \{\text{stetige Abb.}\}[0, 1] \rightarrow \mathbb{C}$$

Definition 7. Eine sesquilineare Form heisst hermitesch, falls

$$s(w, v) = s(v, w) \quad \forall v, w \in V$$

Beispiel 6. $\langle \cdot, \cdot \rangle_c$ auf \mathbb{C}^n ist hermitesch.

Bemerkung 9. Man spricht von hermiteschen Form, diese sind immer sesquilinear

Definition 8. Sei $\dim_{\mathbb{C}} V < \infty$, und $B := (v_i)_{1 \leq i \leq n}$ eine Basis. Ist s eine sesquilineare Form, so definieren wir

$$M_B(s) := (s(v_i, v_j))_{1 \leq i, j \leq n}$$

die darstellende Matrix. Sind $z, w \in V$

$$z = z_1 v_1 + \dots + z_n v_n$$

$$w = w_1 v_1 + \dots + w_n v_n$$

dann haben wir

$$s(z, w) = \sum_{i, j=1}^n z_i \bar{w}_j a_{ij} \text{ wobei } a_{ij} = s(v_i, v_j)$$

$$= (z_1 \dots z_n) \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{w}_1 \\ \vdots \\ \bar{w}_n \end{pmatrix} = z^t M_B(s) \cdot \bar{w}$$

Proposition 3. Sei V ein endlich dim. \mathbb{C} Vektorraum und $B = (v_i)_{1 \leq i \leq n}$. Wir haben eine Bijektion

$$\{\text{sesquilineare Form auf } V\} \leftrightarrow M(n \times n, \mathbb{C})$$

Unter dieser Bijektion haben wir:

$$\{\text{hermitesche Formen}\} \leftrightarrow \{A \in M(n \times n, \mathbb{C}) : A^t = \bar{A}\}$$

Man sagt: eine Matrix $A \in M(n \times n, \mathbb{C})$ mit $A^t = \bar{A}$ ist hermitesch.

Satz 1. Transformationsformel Sei $A = (u_1, \dots, u_n)$ eine andere Basis mit Transformationsmatrix T :

TODO: hier einfügen

Dann gilt:

$$M_A(s) = T^t \cdot M_B(s) \cdot \bar{T}$$

Mit $g(v) := s(v, v)$ gilt die Polarisierungsformel

$$s(v, w) = \frac{1}{4} (q(v+w) - q(v-w) + iq(v+iw) - iq(v-iw))$$

Definition 9. Sei $K = \mathbb{R}$ oder \mathbb{C} , V ein K -Vektorraum und $s : V \times V \rightarrow K$ eine Bilinearform $\begin{cases} \text{symmetrisch} & K = \mathbb{R} \\ \text{hermitesch} & K = \mathbb{C} \end{cases}$ heisst positiv definit, falls $s(v, v) > 0$ $\forall 0 \neq v \in V$

Beispiel 7. $\langle \cdot, \cdot \rangle$ ist positiv definit auf \mathbb{R}^n
 $\langle \cdot, \cdot \rangle_c$ ist positiv definit auf \mathbb{C}^n

Definition 10. Ein Skalarprodukt ist $\begin{cases} \text{positiv definite symmetrische bilineare Form} & K = \mathbb{R} \\ \text{eine positiv definite hermitesche Form} & K = \mathbb{C} \end{cases}$

Definition 11. Skalarprodukt oft $\langle \cdot, \cdot \rangle$, Norm $\|v\| := \sqrt{\langle v, v \rangle}$

Definition 12. Euklidischer Vektorraum Vektorraum über \mathbb{R} mit Skalarprodukt

Definition 13. Unitärer Vektorraum Vektorraum über \mathbb{C} mit Skalarprodukt

Beispiel 8.

$$V = \{f : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R} \text{ stetig} \} \text{ mit } \langle f, g \rangle = \int_0^1 f(x)g(x)dx$$

$$V = \{f : [0, 1] \rightarrow \mathbb{C} \text{ stetig} \} \text{ mit } \langle f, g \rangle = \int_0^1 f(x)\overline{g(x)}dx$$

in beiden Fällen

$$\|f\| = \sqrt{\int_0^1 |f(x)|^2 dx}$$

“ L^2 -Norm”

Bemerkung 10. In einem beliebigen euklidischen bzw. unitären Vektorraum gilt die Cauchy-Schwarz’sche Ungleichung

$$|\langle v, w \rangle| \leq \|v\| \|w\| \quad \forall v, w \in V$$

mit = genau dann, wenn v und w linear abhängig sind.

Beweis 3. (Skizze) klar falls $v = 0$ oder $w = 0$, also nehmen wir an, dass $v \neq 0$ und $w \neq 0$. 1. Reduktion: zum Fall $\|v\| = \|w\| = 1$.

$$v_1 := \frac{v}{\|v\|} w_1 := \frac{w}{\|w\|}$$

$$\|v_1\| = 1 \quad \|w_1\| = 1$$

2. Reduktion: Es reicht aus, zu zeigen: $\operatorname{Re} \langle v, w \rangle \leq 1 =$ genau dann wenn $V = W$

$$\begin{aligned} |\langle v, w \rangle| &= \mu \langle v, w \rangle \mu \in \mathbb{C}, |\mu| = 1 \\ &= \langle \mu v, w \rangle \in \mathbb{R}_{\geq} \\ &= \operatorname{Re} \langle v', w \rangle \text{ wobei } v' := \mu v \end{aligned}$$

Cauchy-Schwarz’sche Ungleichung \leq , Gleichheit: v, w linear unabhängig $\implies v', w$ linear unabhängig $\implies v' \neq w$

Eigenschaften 3.

$$\begin{aligned} &= \text{falls} \\ \langle v - w, v - w \rangle &\geq 0 \quad v - w = 0 \\ \langle v, v \rangle - \langle v, w \rangle - \langle w, v \rangle + \langle w, w \rangle &\geq 0 \quad v = w \\ 1 - \langle v, v \rangle - \overline{\langle v, w \rangle} + 1 &\geq 0 \quad v = w \end{aligned}$$

Beispiel 9. Ist $T : V \rightarrow \mathbb{R}^n$ oder $T : V \rightarrow \mathbb{C}^n$ ein Isomorphismus, dann ist $s : V \times V \rightarrow \mathbb{R}$ (bzw. $s : V \times V \rightarrow \mathbb{C}$) gegeben durch

$$s(x, y) = \langle T_x, T_y \rangle$$

bzw.

$$s(x, y) = \langle T_x, T_y \rangle_c$$

ein Skalarprodukt.

Definition 14. Sei V ein exklusiver, bzw. unitärer Vektorraum

- $v, w \in V$ heisst orthogonal, falls $\langle v, w \rangle = 0$
- $U, W \subset V$ heissen orthogonal (geschrieben $U \perp W$) falls $U \perp W \quad \forall u \in U, w \in W$
- $U \subset W$ das orthogonale Komplement ist $U^\perp = \{v \in V : u \perp v \forall u \in U\}$
- v_1, \dots, v_n sind orthogonal, falls $v_i \perp v_j \quad \forall i \neq j$
- v_1, \dots, v_n sind orthonormal, falls $v_i \perp v_j \quad \forall i \neq j$ und $\|v_i\| = 1 \quad \forall i$
- V ist orthogonale direkte Summe von Untervektorräumen V_1, \dots, V_r falls

$$V = V_1 \oplus \dots \oplus V_r$$

$$V_i \perp V_j \quad \forall i \neq j$$

$$C([-1, 1], \mathbb{R}) := \{f : [-1, 1] \rightarrow \mathbb{R} \text{ stetig}\}$$

dann ist $C([-1, 1], \mathbb{R})$ die orthogonale direkte Summe von $C([-1, 1], \mathbb{R})_{\text{gerade}}$ und $C([-1, 1], \mathbb{R})_{\text{ungerade}}$. gerade: $f(-x) = f(x)$ und ungerade: $f(-x) = -f(x)$

$$f(x) = \underbrace{\frac{f(x) + f(-x)}{2}}_{\text{gerader Teil}} + \underbrace{\frac{f(x) - f(-x)}{2}}_{\text{ungerader Teil}}$$

$$g \text{ gerade, } h \text{ ungerade} \implies gh \text{ ungerade} \implies \langle g, h \rangle = \int_{-1}^1 g(x)h(x) = 0$$

Bemerkung 11. Ist v_1, \dots, v_n eine orthonormale Familie mit $v_i \neq 0 \forall i$, so gilt

1. $(i)(v_1, \dots, v_n)$ ist linear unabhängig ($c_1 v_1 + \dots + c_n v_n = 0 \implies c_i \langle v_i, v - i \rangle + \dots + c_i \langle v_i, v_i \rangle + \dots + c_n \langle v_n, v_i \rangle = 0 \implies c_i \|v_i\|^2 = 0 \implies c_i = 0$)
2. $\left(\frac{v_1}{\|v_1\|}, \dots, \frac{v_n}{\|v_n\|}\right)$ ist orthonormal

Satz 2. Ist (v_1, \dots, v_n) eine orthonormale Basis von V , so gilt folgendes für beliebiges $v \in V$

$$v = \sum_{i=1}^n \langle v_i, v \rangle v_i$$

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

$$\langle v, v_j \rangle = \sum_{i=1}^n c_i \langle v_i, v_j \rangle$$

$$= c_j \langle v_i, v_j \rangle = c_j$$

Proposition 4. Sei $K = \mathbb{R}$ oder \mathbb{C} und $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ ein euklidischer bzw. unitärer Vektorraum über K

1. Ist $n := \dim_K V < \infty$ und (v_1, \dots, v_d) eine orthonormale Familie von Vektoren von V , so existieren v_{d+1}, \dots, v_n , so dass (v_1, \dots, v_n) eine orthonormale Basis von V ist.
2. Ist $U \subset V$ ein endlichdimensionaler Untervektorraum, so gilt $V = U \oplus U^\perp$, orthonormal direkte Summe.

Beweis 4. Es gibt triviale Fälle: $d = n$ in 1., $U = 0$ in 2. Auch: der Fall ($d = 0$) in 1. $\Leftarrow d = 1$: $0 \neq v \in V$ beliebiger Vektor, wir nehmen $b_1 = \frac{v}{\|v\|}$
Beweis durch Induktion nach N mit Induktionsannahme 1. gilt für $n \leq N$
 $N = 1$ okay.

$$U : 1\text{-dimensional} \mid U^\perp : 2\text{-dim} \\ s(e_1, e_1) = 3 \mid = 24$$

Plan: Wir zeigen $IA \implies 2.$ für $\dim_K U \leq N$ und $IA \implies 1.$ für $n \leq N + 1$.
 $IA \xrightarrow{\dim U \leq N} \exists$ orthonormale Basis (u_1, \dots, u_d) von U $d := \dim U$. Für beliebiges $v \in V$ gilt:

$$v - \sum_{i=1}^n \langle v, u_i \rangle u_i \in U^\perp$$

denn

$$\left\langle v - \sum_{i=1}^n \langle v, u_i \rangle u_i, u_j \right\rangle = \langle v, u_j \rangle - \sum_{i=1}^n \langle v, u_i \rangle \langle u_i, u_j \rangle = 0$$

Und: 1. für $\dim V \leq N + 1$ folgt aus IA und 2. für $U \leq N$

$$1 \leq d < n = \dim V \leq N + 1 \\ \implies 1 \leq d \leq N \text{ und } 1 \leq \dim V - d \leq N$$

Sei $U := \text{span}(v_1, \dots, v_d)$ Aus 2. haben wir $V = U \oplus U^\perp$ Nach IA , \exists orthonormale Basis (v_{d+1}, \dots, v_n) von U^\perp Es folgt, dass (v_1, \dots, v_n) ist eine orthonormale Basis von V .

Eigenschaften 4. Praktisches Verfahren zu testen ob ein symmetrisch bilinear bzw. hermitesche Form ein Skalarprodukt ist (falls $\dim_K V < \infty$). Verfahren:

- wählen $U \subset V$ nicht trivialer Untervektorraum (z.B. $U = \text{span}(v), 0 \neq v \in V$)
- Berechnen U^\perp
- Testen:
 - Ist $V = U \oplus U^\perp$?
 - Ist die Einschränkung von der Form auf U ein Skalarprodukt?
 - Ist die Einschränkung von der Form auf U^\perp ein Skalarprodukt?

Beispiel 10. $\mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$

$$M := \begin{pmatrix} 3 & 1 & 2 \\ 1 & 3 & -1 \\ 2 & -1 & 2 \end{pmatrix}$$

Wir betrachten die entsprechende Bilinearform

$$(x, y) \mapsto t_x \cdot M \cdot y$$

$$\begin{aligned} U &= \text{span}(e_1) \\ U^\perp &= \{(x_1, x_2, x_3) : 3x_1 + x_2 + 2x_3 = 0\} \\ &= \text{span}((1, -3, 0), (0, 2, -1)) \end{aligned}$$

Die darstellende Matrix:

$$s|_{U^\perp} \rightsquigarrow \begin{pmatrix} 24 & -21 \\ -21 & 18 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}
U &\cong \mathbb{R}^2 \\
W &= (e_1) \in \mathbb{R}^2 \\
W^\perp &= \{(x_1, x_2) | 24x_1 - 21x_2 = 0\} \\
&= (21, 24)
\end{aligned}$$

W 1-dim, W^\perp 1-dim

$$\begin{aligned}
&(s|_{U^\perp})(e_1, e_2) = 24 \\
(21 \quad 24) \begin{pmatrix} 24 & -21 \\ -21 & 18 \end{pmatrix} (21 \quad 18) &= -216
\end{aligned}$$

\Rightarrow kein Skalarprodukt

1.6 Volumen

Definition 15. Volumen $\xleftrightarrow{\text{Skalarprodukt}} \langle \cdot, \cdot \rangle \rightsquigarrow \text{Norm} \quad \rightsquigarrow \text{Metrik}$
 $K = \mathbb{R} \rightsquigarrow \text{Volumen } (\dim V < \infty) \quad \|v\| := \sqrt{\langle v, v \rangle} \quad d(x, y) = \|y, x\|$

1.6.1 Spat

Definition 16. Spat u_1, \dots, u_n orthonormale Basis. Dann ist der von (u_1, \dots, u_n) aufgespannte Spat definiert als (wobei $c_i :=$ von (u_1, \dots, u_n) aufgespannten Spat)

$$\left\{ \sum_{i=1}^n c_i u_i \mid 0 \leq c_i \leq 1 \quad \forall i \right\}$$

$\text{Vol}(\text{Spat}) := 1$

Falls $v_1, \dots, v_n \in V$ beliebig sind, dann hat der von (v_1, \dots, v_n) aufgespannte Spat

$$\text{Vol} = \left| \det \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \right| \quad v_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} u_j$$

Sei $b_{ij} := \langle v_i, v_j \rangle$ und $B := \begin{pmatrix} b_{11} & \dots & b_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & \dots & b_{nn} \end{pmatrix}$ Wir haben $b_{ij} = \sum_{k=1}^n a_{ik} a_{jk}$,

also $B = A \cdot A^t$. Es folgt:

$$\text{Vol} = \sqrt{(\det A)^2} = \sqrt{\det B}$$

Vorteile:

- keine Wahl von orthonormaler Basis nötig
- auch sinnvoll für eine Kollektion v_1, \dots, v_m evzl. $m \neq n$

Beispiel 11. $m = 1$

$$\begin{aligned}
\det B &= \|v_1\|^2 \\
\sqrt{\det B} &= \|v_1\|
\end{aligned}$$

Definition 17. Grammsche Determinante Im m -dim Volumen $:= \sqrt{G(v_1, \dots, v_m)}$ wobei

$$G(v_1, \dots, v_m) := \det (\langle v_i, v_j \rangle)_{1 \leq i, j \leq m}$$

die sogenannte Grammsche Determinante ist.

Bemerkung 12. Es gilt $G(v_1, \dots, v_m) = 0 \Leftrightarrow v_1, \dots, v_m$ linear abhängig, weil

$$A = (a_{ij}) \in M(m \times n, \mathbb{R})$$

mit

$$G(v_1, \dots, v_m) = \det(A, A^t) = \sum (m \times m \text{ Minor})$$

Bemerkung 13.

$$\text{Vol}(v_1, \dots, v_m) := \sqrt{G(v_1, \dots, v_m)}$$

ist 0 falls $\exists i : v_i = 0$

sonst:

$$\text{Vol}(v_1, \dots, v_m) = \|v_1\| \cdots \|v_m\| \text{Vol}\left(\frac{v_1}{\|v_1\|}, \dots, \frac{v_m}{\|v_m\|}\right)$$

Satz 3. Hadamard'sche Ungleichung

$$\text{Vol}(v_1, \dots, v_m) \leq \|v_1\| \cdots \|v_m\|$$

für $0 \neq v_i \in V$, $i = 1, \dots, m$. Mit Gleichheit genau dann wenn v_1, \dots, v_m orthogonal sind.

Beweis 5. Durch fallende Induktion nach

$$\max\{|I| : I \subset \{1, \dots, m\} \mid (v_i)_{i \in I} \text{ orthogonal}\}$$

Fall $\max\{\dots\} = m$ das bedeutet, v_1, \dots, v_m sind orthogonal. Dann:

$$G(v_1, \dots, v_m) = \det \begin{pmatrix} \|v_1\|^2 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \|v_m\|^2 \end{pmatrix} = \|v_1\|^2 \cdots \|v_m\|^2$$

Die ist der Induktionsanfang.

Sei $r \in \mathbb{N}$, $1 \leq r < m$. Induktionsannahme: Ungleichung für den Fall

$$\max\{|I| : (v_i)_{i \in I} \text{ orthogonal}\} > r$$

Sei v_1, \dots, v_m , so dass $\max\{\dots\} = r$. o.B.d.A: v_1, \dots, v_r orthogonal. Wir schreiben:

$$\begin{aligned} v_m &= \underbrace{v_m - \sum_{i=1}^r \frac{\langle v_m, v_i \rangle}{\langle v_i, v_i \rangle} v_i}_{\tilde{v}_m \in \text{span}(v_1, \dots, v_r)^\perp} + \underbrace{\sum_{i=1}^r \frac{\langle v_m, v_i \rangle}{\langle v_i, v_i \rangle} v_i}_{\tilde{v}_m \in \text{span}(v_1, \dots, v_r)} \\ &< \tilde{v}_m, \tilde{v}_m = 0 \end{aligned}$$

- $v = \tilde{v} + \tilde{\tilde{v}}$
- $\langle \tilde{v}, \tilde{\tilde{v}} \rangle = 0$
- $\|v\|^2 = \|\tilde{v}\|^2 + \|\tilde{\tilde{v}}\|^2$

Das ist eine Orthogonale Projektion Wir haben

$$G(v_1, \dots, v_m) = G(v_1, \dots, v_{m-1}, \tilde{v}_m)$$

weil (Spalten- und Zeilenumformungen...). Es folgt:

$$\begin{aligned} \text{Vol}(v_1, \dots, v_m) &= \text{Vol}(v_1, \dots, v_{m-1}, \tilde{v}_m) \leq \|v_1\| \cdots \|v_{m-1}\| \|\tilde{v}_m\| \\ &< \|v_1\| \cdots \|v_{m-1}\| \|v_m\| \end{aligned}$$

Definition 18. Gram-Schmidt-Orthogonalisierungsverfahren

$$\tilde{v}_r := v_r - \sum_{i=1}^{r-1} \frac{\langle v_r, \tilde{v}_i \rangle}{\langle \tilde{v}_i, \tilde{v}_i \rangle} \tilde{v}_i, \text{ für } 1, 2, \dots$$

gegeben: eine Kollektion (v_1, \dots, v_n) oder abzählbar unendlich (v_1, v_2, \dots) . Das Verfahren produziert $(\tilde{v}_1, \tilde{v}_2, \dots)$, mit:

$$\begin{aligned} (\tilde{v}_1, \tilde{v}_2, \dots) &= (v_1, v_2, \dots) \\ (\tilde{v}_1, \dots, \tilde{v}_m) &= (v_1, \dots, v_m) \quad \forall m \\ (\tilde{v}_1, \tilde{v}_2, \dots) &\text{ sind orthogonal} \end{aligned}$$

Beispiel 12. $C([-1, 1], \mathbb{R})$ mit $\langle f, g \rangle = \int_{-1}^1 f(x)g(x) dx$

$$\begin{aligned} (1, x, x^2, \dots) \\ \xrightarrow{\text{GS}} \frac{\langle x^2, 1 \rangle}{\langle 1, 1 \rangle} = \frac{2/3}{2} \\ (1, x, x^2 - \frac{1}{3}, x^3 - \frac{3}{5} \dots) \end{aligned}$$

Bis auf Normalisierung bekommen wir die Legendre-Polynome.

Fazit 4.

Bilinearform	$\xrightarrow{+ \text{ def, symm}}$	Norm	\rightarrow	Metrik	Norm:
Sesquilinearform	$\xrightarrow{+ \text{ def, hermitesch}}$				

$$\begin{aligned} \|\cdot\| : V &\rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0} \\ \|x\| = 0 &\Leftrightarrow x = 0 \\ \|\lambda x\| &= |\lambda| \|x\| \\ \|x + y\| &\leq \|x\| + \|y\| \end{aligned}$$

Metrik:

$$\begin{aligned} d : V \times V &\rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0} \\ d(x, y) = 0 &\Leftrightarrow x = y \\ d(x, y) &= d(y, x) \\ d(x, z) &\leq d(x, y) + d(y, z) \end{aligned}$$

Aber: nicht jede Metrik, nicht einmal jede transinvariante Metrik kommt von einer Norm.

Bemerkung 14. Eine Norm kommt von einer +def, symm Bilinearform

$$\Leftrightarrow \|x + y\|^2 + \|x - y\|^2 = 2(\|x\|^2 + \|y\|^2) \quad \forall x, y \in V$$

Definition 19. ausgeartete Bilinearform Eine Bilinearform $s : V \times V \rightarrow K$ ist ausgeartet (oder: entartet), falls eine oder beide der induzierten Abbildungen $V \rightarrow V^*$ nicht injektiv ist.

$$\begin{aligned} v &\mapsto (w \mapsto s(v, w)) \\ v &\mapsto (w \mapsto s(w, v)) \end{aligned}$$

Bemerkung 15. Falls $\dim_K V < \infty$, dann:

$$\begin{aligned} v &\mapsto (w \mapsto s(v, w)) && \text{injektiv} \\ \Downarrow & & & \\ v &\mapsto (w \mapsto s(w, v)) && \text{injektiv} \\ \Downarrow & & & \\ & s \text{ ist nicht ausgeartet} & & \\ \Downarrow & & & \\ & \text{die darstellende Matrix ist invertierbar} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}s(v, w) &= v^t \cdot A \cdot w \\ &= (A^t \cdot v)^t\end{aligned}$$

i++j

Satz 4. Sei V ein K -Vektorraum, $s : V \times V \rightarrow K$ eine symmetrische oder schiefsymmetrische Bilinearform. Für $U \subset V$ Untervektorraum, schreiben wir noch

$$U^\perp := \{v \in V : s(u, v) = 0 \ \forall u \in U\}$$

($s(v, u) = 0 \Leftrightarrow s(u, v) = 0$ weil s symm. bzw. schiefsymm.)

Proposition 5. Sei V ein endlich dimensionaler K -Vektorraum und $s : V \times V \rightarrow K$ eine nicht ausgeartete symmetrische oder schiefsymmetrische Bilinearform. Sei $U \subset V$ ein Untervektorraum. Dann gilt:

$$\dim U + \dim U^\perp = \dim V$$

Beweis 6. Sei $(v_i)_{i=1, \dots, n}$ eine Basis mit $n := \dim V$, und A die darstellende Matrix von s bzw. (v_i) . Wir haben dann:

$$s(x, y) = x^t \cdot A \cdot y$$

und $A^t = \pm A$, $\det A \neq 0$

$$U^\perp = \{x \in V_i | x^t \cdot A \cdot y = 0 \ \forall y \in U\} = \{x \in V_i | (x \cdot A)^t \cdot y = 0 \ \forall y \in U\}$$

Sei $F : V \rightarrow V$ lin. Abb. $\leftrightarrow A$. Dann:

$$F(U^\perp) = \{Ax | (Ax)^t y = 0 \ \forall y \in U\} = \{Ax | \tilde{x}^t y = 0 \ \forall y \in U\}$$

Es folgt: mit

$$B := \begin{pmatrix} | & & | \\ u_1 & \cdots & u_d \\ | & & | \end{pmatrix}$$

(u_1, \dots, u_d) Basis von U , dann ist $F(U^\perp) = \text{Ker } B$. Jetzt:

$$\dim U^\perp = \dim F(U^\perp) = \dim \text{Ker } B = n - \dim U$$

Korollar 4. $\dim U < \infty$, $s : V \times V \rightarrow K$ nicht ausgeartet, (schief-) symm.

$$U \subset \implies (U^\perp)^\perp = U$$

Bemerkung 16. Es ist nicht immer der Fall, dass $V = U \oplus U'$, weil es ist möglich, dass $U \cup U^\perp \neq 0$. 2 Extremfälle:

- U ist isotropisch ($s|_U$ ist trivial) $\Leftrightarrow U \subset \underbrace{U^\perp}_{\dim V - \dim U}$
- $s|_U$ ist auch nicht ausgeartet $\Leftrightarrow U \cup U^\perp = 0 \Leftrightarrow V = U \oplus U^\perp$

Aus 1. ist klar:

$$\dim U \leq \frac{1}{2} \dim V \ \forall \text{ isotrop } U \subset V$$

1.7 Orthogonale und unitäre Endomorphismen

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

Definition 20. orthogonaler bzw. unitärer Endomorphismus Sei V, \langle, \rangle ein ortho. bzw. unitärer Vektorraum. Ein Endomorphismus $F : V \rightarrow V$ heisst orthogonal bzw. unitär falls

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

Bemerkung 17. Das ist äquivalent zu

$$\|F(v)\| = \|v\| \quad \forall v \in V$$

Eigenschaften 5. orthogonaler bzw. unitärer Endomorphismus Sei F ein ortho. bzw. unitärer Endomorphismus. Dann:

- F ist injektiv
- Falls $\dim_K V < \infty$, F ist bijektiv, und F' ist auch ortho. bzw. unitär
- Für jeden Eigenwert $\lambda \in K$ gilt $|\lambda| = 1$. Eigenvektor v :

$$\|v\| = \|F(v)\| = \|\lambda v\| = |\lambda| \|v\|$$

Falls $V = \mathbb{R}^n$ oder \mathbb{C}^n mit Standardskalarprodukt

$$\langle v, w \rangle = v^t w \text{ bzw. } \langle v, w \rangle_c = v^t \bar{w}$$

Ist F zur Matrix A entsprechend, dann

$$\begin{aligned} \langle F(v), F(w) \rangle &= \langle v, w \rangle \Leftrightarrow (Av)^t Aw = v^t w \\ &\text{bzw. } (Av)^t \bar{Aw} = v^t \bar{w} \\ \Leftrightarrow v^t A^t Aw &= v^t w \Leftrightarrow A^t A = E_n \\ \text{bzw. } \Leftrightarrow v^t A^t \bar{A} \bar{w} &= v^t \bar{w} \Leftrightarrow A^t \bar{A} = E_n \end{aligned}$$

Definition 21. ortho. bzw. unitäre Matrix $O(n) := A \in GL_n(\mathbb{R})$ heisst orthogonal falls $A^t A = E_n$

$U(n) := A \in GL_n(\mathbb{C})$ heisst unitär falls $A^t \bar{A} = E_n$

Not 1.

$$\begin{aligned} O_n &:= \{A \in GL_n(\mathbb{R}) | A \text{ orthogonal}\} \\ O_n &:= \{A \in GL_n(\mathbb{C}) | A \text{ unitär}\} \end{aligned}$$

Weil

$$A, B \in O(n) \implies (AB)^t (AB) = B^t A^t AB = B^t B = E_n \implies AB \in O(n)$$

haben wir $O(n) \subset GL_n(\mathbb{R})$ ist eine Untergruppe. Ähnlich: $U(n) \subset GL_n(\mathbb{C})$ ist eine Untergruppe.

Not 2.

$$\begin{aligned} SO(n) &= O(n) \cap SL_n(\mathbb{R}) \\ SU(n) &= U(n) \cap SL_n(\mathbb{C}) \end{aligned}$$

Not 3. ortho. bzw. unitärer Vektorraum

$$\begin{aligned} O(V) &= \{F \in GL(V) | \text{ortho.}\} \\ U(V) &= \{F \in GL(V) | \text{unitär}\} \end{aligned}$$

Bemerkung 18.

$$\begin{aligned} A \in O(n) &\implies \det A \in \{\pm 1\} \\ A \in U(n) &\implies \det A \in \{\pm z \in \mathbb{C} : |z| = 1\} \end{aligned}$$

Eigenschaften 6. Charakterisierungen von ortho. bzw. unitären Matrizen Äquivalente Charakterisierungen von orthogonalen bzw. unitären Matrizen $A \in GL_n(\mathbb{R})$:

A ist orthogonal $\Leftrightarrow A^{-1} = A^t \Leftrightarrow A^t A = E_n \Leftrightarrow A A^t = E_n \Leftrightarrow$ die Spalten von A bilden eine Orthonormalbasis von $\mathbb{R}^n \Leftrightarrow$ die Zeilen von A bilden eine Orthonormalbasis von \mathbb{R}^n .

Ähnlich:

A ist unitär $\Leftrightarrow A^{-1} = \bar{A}^t \Leftrightarrow A^t \bar{A} = E_n \Leftrightarrow \bar{A} A^t = E_n \Leftrightarrow$ die Spalten von A

bilden eine Orthonormalbasis von $\mathbb{C}^n \Leftrightarrow$ die Zeilen von A bilden eine Orthonormalbasis von \mathbb{C}^n .

Für $n = 1$

$$\begin{aligned} O(1) &= \{\pm 1\} & U(1) &= \{z \in \mathbb{C} : |z| = 1\} \cong S^1 \\ SO(1) &= \{1\} & SU(1) &= \{1\} \end{aligned}$$

Für $n = 2$: $(a, b) \in \mathbb{R}^2$, $a^2 + b^2 = 1$

$$\begin{aligned} O(2) &= \left\{ \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \mid \theta \in \mathbb{R} \right\} \cup \left\{ \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta \end{pmatrix} \mid \theta \in \mathbb{R} \right\} \\ SO(2) &= \left\{ \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \mid \theta \in \mathbb{R} \right\} \cong S^1 \end{aligned}$$

$$(z, w) \in \mathbb{C}^2, |z|^2 + |w|^2 = 1, (-\bar{w}, \bar{z}) \perp (z, w)$$

$$U(2) = \left\{ \begin{pmatrix} z & -\lambda \bar{w} \\ w & \lambda \bar{z} \end{pmatrix} \mid (z, w) \in \mathbb{C}^2, |z|^2 + |w|^2 = 1, \lambda \in \mathbb{C}, |\lambda| = 1 \right\} \cong S^3 \times S^1$$

$$SU(2) = \left\{ \begin{pmatrix} z & -\bar{w} \\ w & \bar{z} \end{pmatrix} \mid (z, w) \in \mathbb{C}^2, |z|^2 + |w|^2 = 1 \right\} \cong S^3$$

$SO(3)$ eine explizite Beschreibung ist möglich (später)

Proposition 6. Sei V ein endlich dimensionaler \mathbb{C} -Vektorraum mit Skalarprodukt \langle, \rangle , und sei $F : V \rightarrow V$ ein unitärer Endomorphismus. Dann besitzt V eine Orthonormalbasis von Eigenvektoren von F .

Beweis 7. Durch Induktion nach $\dim V$. $\dim V = 0, 1$ trivial. $\dim V \geq 2$ Weil \mathbb{C} algebraisch abgeschlossen ist, gibt es einen Eigenwert $\lambda \in \mathbb{C}$. Sei $v \in V$ ein Eigenvektor, mit $\|v\| = 1$. Weil F unitär ist, haben wir $F(v^\perp) = v^\perp$. Wir haben $\dim v^\perp = \dim V - 1$

$$\begin{aligned} w \in v^\perp \langle v, w \rangle &\implies \langle v, w \rangle = 0 \\ \lambda \langle v, F(w) \rangle &= \langle \lambda v, F(w) \rangle = \langle F(v), F(w) \rangle = 0 \\ &\implies F(v^\perp) \subset v^\perp \end{aligned}$$

Aus der Induktionsannahme folgt, dass \exists Orthonormalbasis von v^\perp von Eigenvektoren von F . Zusammen mit $v \overset{V=\text{span}}{\rightsquigarrow} \bigoplus v^\perp$ Orthonormalbasis von V

Korollar 5. Sei $A \in U(n)$. Dann $\exists S \in U(n)$, $\theta_1, \dots, \theta_n \in \mathbb{R}$ so dass

$$SAS^{-1} = \begin{pmatrix} e^{i\theta_1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & e^{i\theta_n} \end{pmatrix}$$

Proposition 7. Sei V ein endlich dimensionaler \mathbb{R} -Vektorraum mit Skalarprodukt \langle, \rangle , und sei $F : V \rightarrow V$ ein orthogonaler Endomorphismus. Dann besitzt V eine Orthonormalbasis $(v_1^+, \dots, v_r^+, v_1^-, \dots, v_s^-, w_1, w'_1, \dots, w_t, w'_t)$

- $F(v_i^+) = v_i^+$
- $F(v_i^-) = -v_i^-$
- $F(w_i) = (\cos \theta_i)w_i + (\sin \theta_i)w'_i$
- $F(w'_i) = (-\sin \theta_i)w_i + (\cos \theta_i)w'_i$

mit $\theta_i \in \mathbb{R}$, $0 < |\theta| < \phi$, $i = 1, \dots, t$

Beweis 8. *Durch Induktion nach $\dim V$: $\dim V = 0, 1, 2$ trivial. $\dim > 2$ (nächstes mal)*

$\dim_{\mathbb{R}} V$ $\langle \cdot, \cdot \rangle$ Skalarprodukt
 Fazit 5. $F : V \rightarrow V$ orthogonaler Endomorphismus
 $\implies \exists$ orthogonale Basis +1 oder -1 Eigenvektoren

$$F(\alpha w_i + \beta w'_i) = (\alpha \cos \Theta_i - \beta \sin \Theta_i) w_i + (\alpha \sin \Theta_i + \beta \cos \Theta_i) w'_i, \quad \Theta_i \in \mathbb{R}$$

Beweis 9. *Fortsetzung Durch Induktion nach $\dim V$, Induktionsanfang: $\dim V \leq 2$ $\dim V = 2$ bezüglich beliebiger Basis (w_1, w'_1) .*

$$V : \begin{pmatrix} \cos \Theta & -\sin \Theta \\ \sin \Theta & \cos \Theta \end{pmatrix} \text{ oder } \begin{pmatrix} \cos \Theta & \sin \Theta \\ -\sin \Theta & \cos \Theta \end{pmatrix}$$

Matrix 1: w_1, w_2 ist wie oben, Matrix 2: charakteristisches Polynom $t^2 - 1 = (t-1)(t+1) \rightarrow (+1\text{-Eigenvektor}, -1\text{-Eigenvektor})$

1. Fall: \exists reeller Eigenwert

$$\lambda \in \mathbb{R}, |\lambda| = 1 \quad v \in V \quad F(v) = \lambda v$$

wir zeigen, dass $F(v^\perp) = v^\perp$ genau wie im Fall eines unitären Endomorphismus

$$\dim(v^\perp) = \dim V - 1 \xrightarrow{IA} v^\perp : \text{orthonormale Basis}$$

$$V = (v) \bigoplus v^\perp$$

2. Fall: \nexists reeller Eigenwert

$$\implies P_F(t) = \prod_{i=1}^{(\dim V)/2} Q_i(t)$$

$Q_i(t)$ irreduzibles quadratisches Polynom. Aus dem Satz von Cayley-Hamilton folgt:

$$\implies \exists \overbrace{v}^{\neq 0} \in V, \text{ mit } Q_i(F)v = 0$$

Sei $0 \neq v_0 \in V$ beliebigen Vektor $P_F(F)v_0 = 0$

$$Q_1(F)Q_2(F) \cdots + \frac{\dim V}{2}(F)v_0 = 0$$

$$\implies \exists j : Q_j(F)Q_{j+1}(F) \cdots + \frac{\dim V}{2}(F)v_0 = 0$$

$$\text{aber } Q_{j+1}(F) \cdots Q_{\dim V/2}(F)v_0 \neq 0$$

$$\implies \text{wir nehmen } i := j \text{ und } v := Q_{j+1}(F) \cdots Q_{\frac{\dim V}{2}}(F)v_0.$$

Beh: $U := \text{span}(v, F(v))$ ist ein F -invarianter Vektorraum. $Q_i(F)v = 0$

$\implies \exists a, b \in \mathbb{R}$ mit $F(F(v)) = av + bF(v)$. Es folgt: U^\perp ist auch F -invariant. $V = U \bigoplus U^\perp \xrightarrow{IA}$ Basen von U und von U^\perp wie oben. Die Vereinigung dieser Basen ist wie erwünscht.

Korollar 6. Sei $A \in O(n)$. Dann gibt es ein $S \in O(n)$ und $r, s, t \in \mathbb{N}$, $\Theta_1, \dots, \Theta_t \in \mathbb{R}$ mit

$$SAS^{-1} = \begin{pmatrix} E_r & & & 0 \\ & -E_s & & \\ & & D_{\Theta_1} & \\ & & & \ddots \\ 0 & & & & D_{\Theta_t} \end{pmatrix}$$

wobei

$$D_\Theta := \begin{pmatrix} \cos \Theta & -\sin \Theta \\ \sin \Theta & \cos \Theta \end{pmatrix}$$

Beispiel 13.

$$A := \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ & 0 & 1 & \\ & & \ddots & \ddots \\ & & & 0 & 1 \\ 1 & & & & 0 \end{pmatrix} \in U(n)$$

$$\begin{aligned} A(z_1, \dots, z_n) &= (z_2, \dots, z_n, z_1) \\ A(1, S, S^2, \dots, S^{n-1}) &= (S, S^2, \dots, S^{n-1}, 1) \\ S &:= e^{2\pi i/n} \quad S^n = 1 \end{aligned}$$

$\Rightarrow (1, S, S^2, \dots, S^{n-1})$ ist Eigenvektor zum Eigenwert S . Ähnlich: für $0 \leq j \leq n-1$ haben wir $(1, S^j, S^{2j}, \dots, S^{(n-1)j})$ ist Eigenvektor zum Eigenwert S^j . $1, S, S^2, \dots, S^{n-1}$ sind paarweise verschieden $\Rightarrow (1, S^j, S^{2j}, \dots, S^{(n-1)j})$ ist eine Basis von Eigenvektoren. Normalisierung:

$$\left(\frac{1}{\sqrt{n}} (1, S^j, S^{2j}, \dots, S^{(n-1)j}) \right)_{j=0,1,\dots,n-1}$$

ist eine orthonormale Basis von Eigenvektoren

$(K = \mathbb{C})$ unitärer Endomorphismus von V
Fazit 6. $(K = \mathbb{R})$ orthogonaler Endomorphismus von V
 $\Rightarrow V = \bigoplus_{\text{Eigenwerte } \lambda} \text{eig}(F; \lambda)$ orthogonale direkte Summe

Beispiel 14.

$$A = \begin{pmatrix} \frac{3}{13} & \frac{4}{5} & \frac{36}{65} \\ \frac{4}{13} & -\frac{3}{5} & \frac{48}{65} \\ \frac{12}{13} & 0 & -\frac{5}{13} \end{pmatrix} \in O(3)$$

$\det A = 1$ 2 komplex konjugierte + 1 reeller oder 3 reelle Eigenwerte $\Rightarrow +1$ ist ein Eigenwert. $\dots \rightsquigarrow$ Eigenvektor $(6, 3, 4)$ zum Eigenwert 1. $\rightarrow v$ mit $\|v\| = 1$
 $v = \frac{1}{\sqrt{61}}(6, 3, 4) - v^\perp = \text{span}((1, -2, 0), (2, 0, -3)) \xrightarrow{\text{Gram-Schmidt}}$

$$(1, -2, 0), \left(\frac{8}{5}, \frac{4}{5}, -3\right)$$

Normalisieren:

$$\frac{1}{\sqrt{5}}(1, -2, 0), \sqrt{1/305}(8, 4, -15)$$

Und wir berechnen

$$S := \begin{pmatrix} \frac{6}{\sqrt{61}} & \frac{1}{\sqrt{5}} & \frac{8}{\sqrt{305}} \\ \frac{3}{\sqrt{61}} & -\frac{2}{\sqrt{5}} & \frac{4}{\sqrt{305}} \\ \frac{4}{\sqrt{61}} & 0 & -\frac{15}{\sqrt{305}} \end{pmatrix}$$

bekommen wir

$$\underbrace{S^{-1}}_{=S^t} AS = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{57}{65} & \frac{4\sqrt{61}}{65} \\ 0 & -\frac{4\sqrt{61}}{65} & -\frac{57}{65} \end{pmatrix}$$

1.8 Beschreibung von $SO(3)$ und $O(3)$

Eigenschaften 7. Sei $A \in SO(3)$. Dann: entweder es gibt 1 reelle und 2 komplex konjugierte Eigenwerte oder 3 reelle Eigenwerte. $\lambda \in \mathbb{C} \Rightarrow \lambda \cdot \bar{\lambda} = 1$. Eigenwerte $+1(\times 3) \Leftrightarrow A = E_3$ oder $-1(\times 2) / +1$. Wenn $\nrightarrow A = E^3$, dann ist $\dim \text{eig}(A, 1) = 1$.

$$A : \text{eig}(A, 1)^\perp \rightarrow \text{eig}(A, 1)^\perp$$

ist eine Drehung durch einen Winkel $\Theta \in (0, 2\pi)$. Bezüglich Basis (v_1, v_2, v_3) , $v_1 \in \text{eig}(A, 1)$, $\|v_1\| = 1$ sieht A aus wie

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Theta & -\sin \Theta \\ 0 & \sin \Theta & \cos \Theta \end{pmatrix}$$

Eigenschaften 8. Sei $A \in O(3)$ Falls $\det A = 1$, haben wir $A \in SO(3)$

Falls $\det A = -1$, haben wir $-A \in SO(3)$

Dann bekommen wir die folgende Beschreibung von $A \in O(3)$ mit $\det A = -1$:

- $A = -E_3$
- oder $\dim \text{eig}(A, -1) = 1$
 $v_1 \in \text{eig}(A, -1)$, $\|v_1\| = 1$
 $A : \text{eig}(A, -1)^\perp \rightarrow \text{eig}(A, -1)^\perp$ ist eine Drehung um den Winkel $\Theta - \pi \in (-\pi, \pi)$ (Spiegelung oder Spiegelung mit Drehung)