

Vorlesungsskript

LinA II* SoSe 24

Inhaltsverzeichnis

1. Eigenwerte und Eigenvektoren	3
1.1. Definition und grundlegende Eigenschaften	3
1.2. Das charakteristische Polynom	7

Definitionen

1 .

- 1.1:** Eigenwert und Eigenvektor
- 1.2:** Eigenwert und Eigenvektor
- 1.7:** Eigenraum
- 1.10:** Geometrische Vielfachheit
- 1.12:** Charakteristisches Polynom

Wiederholung:

K sei ein beliebiger Körper, V ein n -dimensionaler K -Vektorraum,

$$L(V, V) = \{f : V \rightarrow V \mid f \text{ lin. Abbildung}\}$$

$f \in L(V, V)$ heißt Endomorphismus. Ist $f \in L(V, V)$, so läßt sich f bezüglich einer Basis $B = \{v_1, \dots, v_n\}$ von V eindeutig durch eine Matrix

$$A_f^{B,B} = (a_{ij})_{1 \leq i, j \leq n} \in K^{n,n}$$

Es gilt

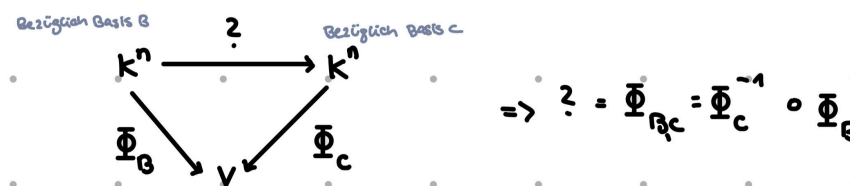
$$f(v_j) = \sum_{i=1}^n a_{ij} v_i \quad 1 \leq j \leq n$$

Abbildung

$$F : L(V, V) \rightarrow K^{n,n}$$

ist ein Isomorphismus.

Basiswechsel? Basen B, C von V



(siehe Lem. 5.27, LinA I*)

Eine zentrale Frage: Sei $f \in L(V, V)$, existiert eine Basis $B = \{v_1, \dots, v_n\}$ von V , so dass $A_f^{B,B}$ eine möglichst einfache Form besitzt?

z.B. Diagonalmatrix:

$$A_f^{B,B} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \lambda_n \end{pmatrix}$$

Wir werden:

- Endomorphismen charakterisieren, die sich durch eine Diagonalmatrix beschreiben lassen.

Wenn ja: Dann gilt $f(v_j) = \lambda_j v_j$

$\Rightarrow f$ ist eine Streckung von v_j um den Faktor λ_j .

- Die Jordan-Normalform herleiten.

1. Eigenwerte und Eigenvektoren

Eigenwerte charakterisieren zentrale Eigenschaften linearer Abbildungen. Z.B.

- Lösbarkeit von linearen Gleichungssystemen
 - Eigenschaften von physikalischen Systemen
 - gewöhnliche Differentialgleichungen
 - Eigenschwingungen / Resonanzkatastrophe
- Zerstörung einer Brücke über dem Fluß Maine / Millenium-Bridge London

1.1. Definition und grundlegende Eigenschaften

Definition 1.1: Eigenwert und Eigenvektor (Endomorphismus)

Sei V ein K -Vektorraum. Ein Vektor $v \in V, v \neq 0_V$, heißt **Eigenvektor** von $f \in L(V, V)$, falls $\lambda \in K$ mit

$$f(v) = \lambda v$$

existiert. Der Skalar $\lambda \in K$ heißt der **Eigenwert** zum Eigenvektor $v \in V$.

Definition 1.2: Eigenwert und Eigenvektor (Matrix)

Sei K ein Körper und $n \in \mathbb{N}$. Ein Vektor $v \in K^n, v \neq 0_{K^n}$, heißt Eigenvektor von $A \in K^{n,n}$, falls $\lambda \in K$ mit

$$Av = \lambda v$$

existiert. Der Skalar $\lambda \in K$ heißt der Eigenwert zum Eigenvektor $v \in V$.

Bemerkungen:

- In Def 1.1 kann $\dim(V) = \infty$ sein. Dies ist für viele Definitionen/Aussagen in denen wir Endomorphismen betrachten, der Fall.
- Für $\dim(V) < \infty$ kann man jedes $f \in L(V, V)$ eindeutig mit einer Matrix A identifizieren. Dann: Def 1.2 ist Spezialfall von Def 1.1.

- **Achtung:** $0 \in K$ kann ein Eigenwert sein:

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

Der Nullvektor $0 \in V$ ist **nie** ein Eigenvektor.

Für $\dim(V) = 0$ besitzt f keinen Eigenvektor für $f \in L(V, V)$.

- Ist v Eigenvektor zum Eigenwert λ , so ist auch αv für jedes $\alpha \in K \setminus \{0\}$ ein Eigenvektor

$$f(\alpha v) = \alpha f(v) = \alpha \lambda v = \lambda(\alpha v)$$

Zentrale Frage dieses Kapitels:

Existenz von Eigenwerten? Wenn sie existieren: Weitere Eigenschaften?

Beispiel 1.3: Sei $I \subset \mathbb{R}$ ein offenes Intervall und V der unendlichdimensionale Vektorraum der auf I beliebig oft differenzierbaren Funktionen. Ein Endomorphismus $f \in L(V, V)$ ist gegeben durch

$$f(\varphi) = \varphi' \quad \forall \varphi \in V$$

Die Abbildung f hat jedes $\lambda \in \mathbb{R}$ als Eigenwert, da für $c \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$ und die Funktion

$$\varphi(x) := c \cdot e^{\lambda x} \neq 0_V \quad \forall x \in I$$

gilt

$$f(\varphi(x)) = f(c \cdot e^{\lambda x}) = \lambda(c e^{\lambda x}) = \lambda \varphi(x)$$

Hier: $\varphi'(x) = f(\varphi)$ ist eine gewöhnliche Differentialgleichung.

Beispiel 1.4: Wir betrachten die lineare Abbildung $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$, welche durch

$$f\left(\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}\right) = \begin{pmatrix} x_2 \\ -x_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$$

definiert ist. Sei x ein Eigenvektor, dann gilt

$$\begin{aligned} f\left(\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}\right) &= \begin{pmatrix} x_2 \\ -x_1 \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \\ \Leftrightarrow x_2 &= \lambda x_1 \quad \text{und} \quad -x_1 = \lambda x_2 \end{aligned}$$

O.B.d.A: $x_2 \neq 0$

$$\Rightarrow x_2 = \lambda(-\lambda x_2) = -\lambda^2 x_2 \Rightarrow -\lambda^2 = 1, \quad \lambda \in \mathbb{R} \Rightarrow \lambda^2 \geq 0 \Rightarrow -\lambda^2 \leq 0 \quad \nexists$$

D.h. f besitzt keinen Eigenwert/-vektor. Für $f : \mathbb{C}^2 \rightarrow \mathbb{C}^2$ ändert sich dies! \Rightarrow Die Wahl von K entscheidet!

Beispiel 1.5: Wieder $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$, diesmal

$$f\left(\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}\right) = \begin{pmatrix} 2x_2 \\ 2x_1 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 2 \\ 2 & 0 \end{pmatrix}}_{=:A} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$$

Dann gilt für $v_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$, $v_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$, $v_3 = (-1, 1)$ dass $f(v_1) = \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \end{pmatrix}$, $f(v_2) = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix} = 2 \cdot v_2$ und $f(v_3) = \begin{pmatrix} 2 \\ -2 \end{pmatrix} = (-2) \cdot v_3$.



Beobachtung: $\dim(V) = 2$

zwei Eigenwerte: $2, -2$, es existieren keine Weiteren,

zwei Eigenvektoren: $v_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$, $v_3 = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix}$, sind linear unabhängig

Lemma 1.6: Es sei $f \in L(V, V)$ ein Endomorphismus. Eigenvektoren zu paarweise verschiedenen Eigenwerten von f sind linear unabhängig.

Beweis: Es seien v_1, \dots, v_m Eigenvektoren zu den paarweise verschiedenen Eigenwerten $\lambda_1, \dots, \lambda_m$ von f . Beweis durch Induktion:

Induktionsanfang: $m = 1$, $\lambda_1, v_1 \neq 0 \Rightarrow v_1$ lin. unabh.

Induktionsschritt: $m - 1 \rightarrow m$

Induktionsvoraussetzung: Beh. gelte für $m - 1$

Betrachte

$$\alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2 + \dots + \alpha_m v_m = 0 \quad (*) \quad \alpha_m \in K$$

EV, f()

$$\Rightarrow \alpha_1 \lambda_1 v_1 + \alpha_2 \lambda_2 v_2 + \dots + \alpha_m \lambda_m v_m = 0$$

(*) · λ_m

$$\Rightarrow \lambda_m \alpha_1 v_1 + \lambda_m \alpha_2 v_2 + \dots + \lambda_m \alpha_m v_m = 0$$

Wir bilden die Differenz aus Zeile 1 und 2

$$\underbrace{(\lambda_1 - \lambda_m)}_{\neq 0} \alpha_1 v_1 + \underbrace{(\lambda_2 - \lambda_m)}_{\neq 0} \alpha_2 v_2 + \dots + \underbrace{(\lambda_{m-1} - \lambda_m)}_{\neq 0} \alpha_{m-1} v_{m-1} = 0$$

v_1, \dots, v_{m-1} lin. unabh. $\Rightarrow \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_{m-1} = 0$ Einsetzen in (*) liefert

$$\underbrace{\alpha_m v_m}_{\neq 0} = 0 \Rightarrow \alpha_m = 0$$

$\Rightarrow v_1, \dots, v_m$ lin unabh.

□

Folgerung: Es gibt höchstens $n = \dim(V)$ verschiedene Eigenwerte für $n = \dim(V) < \infty$.

Definition 1.7: Eigenraum

Ist $f \in L(V, V)$ und $\lambda \in K$, so heißt

$$\text{Eig}(f, \lambda) = \{v \in V \mid f(v) = \lambda v\}$$

der **Eigenraum** von f bezüglich λ .

Es gilt:

- $\text{Eig}(f, \lambda) \subseteq V$ ist ein Untervektorraum
- λ ist Eigenwert von $f \iff \text{Eig}(f, \lambda) \neq \{0\}$
- $\text{Eig}(f, \lambda) \setminus \{0\}$ ist die Menge der zu λ gehörenden Eigenvektoren von f .
- $\text{Eig}(f, \lambda) = \ker(f - \lambda \text{Id})$
- $\dim(\text{Eig}(f, \lambda)) = \dim(V) - \text{rg}(f - \lambda \text{Id})$
- Sind $\lambda_1, \lambda_2 \in K$ verschiedene Eigenwerte, so ist $\text{Eig}(f, \lambda_1) \cap \text{Eig}(f, \lambda_2) = \{0\}$

Die letzte Aussage kann verallgemeinert werden zu:

Lemma 1.8: Sei V ein K -Vektorraum mit $\dim(V) = n < \infty$ und $f \in L(V, V)$. Sind $\lambda_1, \dots, \lambda_m, m \leq n$, paarweise verschiedene Eigenwerte von f , so gilt

$$\text{Eig}(f, \lambda_i) \cap \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m \text{Eig}(f, \lambda_j) = \{0\} \quad \forall i = 1, \dots, m$$

Beweis: Summe von Vektorräumen, vgl. Def 3.32 LinA I.

Sei $i \in \{1, \dots, m\}$ fest gewählt.

$$v \in \text{Eig}(f, \lambda_i) \cap \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^m \text{Eig}(f, \lambda_j)$$

Also ist

$$v = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m v_j \quad \text{für } v_j \in \text{Eig}(f, \lambda_j) \quad \text{für } j \neq i$$

$$\Rightarrow -v + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m v_j = 0 \quad \text{Aus Lemma 1.6 folgt damit } v = 0.$$

□

Über die Identifikation von Endomorphismen und Matrizen für $\dim(V) < \infty$ erhält man:

Korollar 1.9: Für ein $n \in \mathbb{N}$ und einem Körper K sei $A \in K^{n,n}$. Dann gilt für jedes $\lambda \in K$, dass

$$\dim(\text{Eig}(A, \lambda)) = n - \text{rg}(A - \lambda I_n)$$

Insbesondere ist $\lambda \in K$ ein Eigenwert von A , wenn $\text{rg}(A - \lambda I_n) < n$ ist.

Definition 1.10: Geometrische Vielfachheit

Ist $f \in L(V, V)$ und $\lambda \in K$ ein Eigenwert von f , so heißt

$$g(f, \lambda) := \dim(\text{Eig}(f, \lambda)) \quad (> 0)$$

die geometrische Vielfachheit des Eigenwerts λ .

1.2. Das charakteristische Polynom

Wir bestimmt man Eigenwerte?

Lemma 1.11: Seien $A \in K^{n,n}$ und $\lambda \in K$. Dann ist

$$\det(A - \lambda I_n)$$

ein Polynom n -ten Grades in λ .

Beweis: Mit der Leibnitz-Formel folgt,

$$\begin{aligned} \det(\underbrace{A - \lambda I_n}_{\tilde{a}_{ij}}) &= \sum_{\sigma \in S_1} \text{sgn}(\sigma) \cdot \tilde{a}_{1\sigma(1)} \cdot \dots \cdot \tilde{a}_{n\sigma(n)} \\ &= \underbrace{(a_{11} - \lambda) \cdot (a_{22} - \lambda) \cdot \dots \cdot (a_{nn} - \lambda)}_{\substack{\sigma = \text{Id} \\ \in \mathcal{P}_n \text{ in } \lambda}} + \underbrace{\sum_{\substack{\sigma \neq \text{Id} \\ \in \mathcal{P}_{n-2} \text{ in } \lambda}} S}_{S} \end{aligned}$$

Weiter gilt:

$$(a_{11} - \lambda) \cdot \dots \cdot (a_{nn} - \lambda) = (-1)^n \lambda^n + (-1)^{n-1} \lambda^{n-1} (a_{11} + \dots + a_{nn}) + \underbrace{\sum_{\in \mathcal{P}_{n-2} \text{ in } \lambda} S_1}_{S_1}$$

Insgesamt: Es existieren Koeffizienten $a_0, \dots, a_n \in K$ mit

$$\det(A - \lambda I_n) = a_n \lambda^n + a_{n-1} \lambda^{n-1} + \dots + a_1 \lambda + a_0$$

$$a_n = (-1)^n$$

$$a_{n-1} = (-1)^{n-1} (a_{11} + \dots + a_{nn})$$

man kann zeigen: $a_0 = \det(A)$

□

Man nennt $a_{11} + a_{22} + \dots + a_{nn}$ auch die **Spur** von A .

Definition 1.12: Charakteristisches Polynom

Sei $A \in K^{n,n}$ und $\lambda \in K$. Dann heißt das Polynom n -ten Grades

$$p_A(\lambda) := \det(A - \lambda I_n)$$

das charakteristische Polynom zu A .

Lemma 1.13: Sei $A \in K^{n,n}$ und $\lambda \in K$. Der Skalar λ ist genau dann Eigenwert von A , wenn

$$p_A(\lambda) = 0$$

gilt.

Beweis: Die Gleichung

$$Av = \lambda v \iff Av - \lambda v = 0 \iff (A - \lambda I_n)v = 0$$

hat genau eine Lösung $v \in V, v \neq 0$, wenn $\text{rg}(A - \lambda I_n) < n$, vgl. Satz 6.3 aus LinA I. Dies ist genau dann der Fall, wenn

$$\det(A - \lambda I_n) = 0, \text{ vgl. D10 aus LinA I}$$

□

Beispiel 1.14: Eigenwerte und -vektoren von

$$A = \begin{pmatrix} 3 & 8 & 16 \\ 0 & 7 & 8 \\ 0 & -4 & -5 \end{pmatrix}$$

Regel von Sarrus liefert

$$\begin{aligned} p_A(\lambda) &= \begin{vmatrix} 3-\lambda & 8 & 16 \\ 0 & 7-\lambda & 8 \\ 0 & -4 & -5-\lambda \end{vmatrix} \\ &= (3-\lambda)(-35-7\lambda+5\lambda+\lambda^2+32) \\ &= (3-\lambda)[(7-\lambda)(-5-\lambda)-8(-4)]-8(0-0)+16(0-0) \\ &= (3-\lambda)(\lambda^2-2\lambda-3) = (3-\lambda)(\lambda+1)(\lambda-3) \end{aligned}$$

\implies Eigenwerte sind $\lambda = 3$ und $\lambda = -1$

Zugehörige Eigenvektoren?

$\lambda = -1$:

$$Av = -v \iff (A + I_3)v = 0$$

$$\begin{pmatrix} 4 & 8 & 26 \\ 0 & 8 & 8 \\ 0 & -4 & -4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

LGS lösen: $\implies v_2 = -v_3, v_1 = -2v_3$

Damit ist z.B.: $w_1 = (2, 1, -1)^\top$ Eigenvektoren.

$\lambda = 3$:

$$(A - 3I_3)v = 0 \iff$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 8 & 16 \\ 0 & 4 & 8 \\ 0 & -4 & -8 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix} = 0 \in \mathbb{R}^3 \iff v_2 + 2v_3 = 0$$

Damit sind z.B.: $w_2 = (1, 2, -1)^\top, w_3 = (-1, 2, -1)$ Eigenvektoren.