

LINEARE ALGEBRA FÜR TPH, UE (103.064)

2. Haupttest (FR, 19.01.2018) (mit Lösung)

— Ein einfacher Taschenrechner ist erlaubt. Unterlagen: eigenes VO-Skriptum. Arbeitszeit: 90 min. —

↑ <i>FAMILIENNAME</i>	↑ <i>Vorname</i>	↑ <i>Studium / Matr.Nr.</i>

<i>1.</i>	<i>2.</i>	<i>3.</i>	<i>gesamt</i>
			<input type="text"/>
<i>Punkte</i>			<i>maximal 18</i>

Tragen Sie bitte oben Ihre persönlichen Daten ein. **Als Grundlage für die Beurteilung dienen ausschließlich die in die entsprechenden Kästchen eingetragenen Antworten. Machen Sie sich zunächst und tragen Sie dann erst Ihre Lösung samt Zusammenfassung des Lösungsweges ein! Die Größe der Kästchen ist auf die jeweilige Aufgabe abgestimmt.** ○

- **Aufgabe 1.** Betrachten Sie die folgende Matrix:

$$A = \begin{pmatrix} 3 & -6 & 2 \\ 0 & -4 & 4 \\ 0 & -9 & 8 \end{pmatrix}$$

- a) (4 Punkte) Berechnen Sie die Jordan'sche Normalform J und die zugehörige Transformationsmatrix X der gegebenen Matrix.

Zuerst gilt es die Eigenwerte der Matrix zu berechnen. Unter Zuhilfenahme des Laplace'schen Entwicklungssatzes lautet das charakteristische Polynom

$$(3 - \lambda) [-(4 + \lambda)(8 - \lambda) + 36] \stackrel{!}{=} 0$$

Wir können sofort den ersten Eigenwert $\lambda_1 = 3$ (mit $g_1 = k_1 = 1$) ablesen und erhalten aus $\lambda^2 - 4\lambda + 4 = 0$ den zweiten Eigenwert $\lambda_2 = 2$ mit algebraischer Vielfachheit $k_2 = 2$. Nun bestimmen wir die Eigenvektoren zu den jeweiligen Eigenwerten, beginnend mit $\lambda_1 = 3$

$$(A - \lambda_1 I)\mathbf{v}_1 = 0 \Leftrightarrow \begin{pmatrix} 0 & -6 & 2 \\ 0 & -7 & 4 \\ 0 & -9 & 5 \end{pmatrix} \mathbf{v} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \mathbf{v}_1 = s \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, s \neq 0.$$

Für $\lambda_2 = 2$ haben wir

$$(A - \lambda_2 I)\mathbf{v}_2 = 0 \Leftrightarrow \begin{pmatrix} 1 & -6 & 2 \\ 0 & -6 & 4 \\ 0 & -9 & 6 \end{pmatrix} \mathbf{v}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \mathbf{v}_2 = s \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ \frac{3}{2} \end{pmatrix}, s \neq 0.$$

Da wir keinen weiteren linear unabhängigen Eigenvektor mehr finden, ist die geometrische Vielfachheit des zweiten Eigenwertes $g_2 = 1$. Wir müssen also einen Hauptvektor finden, der wie folgt bestimmt wird: Sei s fest,

$$(A - \lambda_2 I)\mathbf{h}_2 = \mathbf{v}_2 \Leftrightarrow \begin{pmatrix} 1 & -6 & 2 \\ 0 & -6 & 4 \\ 0 & -9 & 6 \end{pmatrix} \mathbf{h}_2 = \begin{pmatrix} 3s \\ 1s \\ \frac{3}{2}s \end{pmatrix} \Rightarrow \mathbf{h}_2 = s \begin{pmatrix} \frac{5}{2} \\ 0 \\ \frac{1}{4} \end{pmatrix} + \sigma \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ \frac{3}{2} \end{pmatrix}, \sigma \in \mathbf{R}.$$

Mit der Wahl $s = 4$ und $\sigma = 0$ erhält man $\mathbf{v}_2 = \begin{pmatrix} 12 \\ 4 \\ 6 \end{pmatrix}$ und $\mathbf{h}_2 = \begin{pmatrix} 10 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$. Die Eigenwerte und ihre Vielfachheiten ergeben die Matrix

$$J = \begin{pmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} \tag{1}$$

und die Eigenvektoren, sowie der Hauptvektor ergeben die Matrix

$$X = \begin{pmatrix} 1 & 12 & 10 \\ 0 & 4 & 0 \\ 0 & 6 & 1 \end{pmatrix}. \tag{2}$$

Es gilt $A = XJX^{-1}$.

b) (2 Punkte) Gegeben sei die Matrix

$$A = \begin{pmatrix} -2 & 1 & -3 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -2 \\ 0 & 2 & 7 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 2 & 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

Berechnen Sie die Determinante der Matrix A !

Mit dem Laplace'schen Entwicklungssatz kann die gegebene Determinante vereinfacht werden, indem z.B. nach der 2. Spalte entwickelt wird,

$$\det(A) = (-1)^3 \cdot 1 \cdot \det \begin{pmatrix} 1 & -1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -2 \\ 0 & 7 & 0 & 1 \\ -1 & 2 & 0 & -1 \end{pmatrix} + (-1)^6 \cdot 2 \cdot \det \begin{pmatrix} -2 & -3 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -2 \\ -1 & 2 & 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

Jeweils eine weitere Entwicklung (hier nach der 1. Spalte bzw. 3. Zeile) führt auf die Berechnung der Determinante von 3×3 Matrizen,

$$\det(A) = - \left[(-1)^2 \cdot 1 \cdot \det \begin{pmatrix} 0 & 1 & -2 \\ 7 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & -1 \end{pmatrix} + (-1)^5 \cdot (-1) \cdot \det \begin{pmatrix} -1 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & -2 \\ 7 & 0 & 1 \end{pmatrix} \right] +$$
$$+ 2 \cdot \left[(-1)^6 \cdot 1 \cdot \det \begin{pmatrix} -2 & -3 & -1 \\ 1 & -1 & 1 \\ -1 & 2 & -1 \end{pmatrix} + (-1)^7 \cdot (-2) \cdot \det \begin{pmatrix} -2 & -3 & 1 \\ 1 & -1 & 2 \\ -1 & 2 & 0 \end{pmatrix} \right].$$

Diese können nun mit der Regel von Sarrus berechnet werden,

$$\det(A) = -(2 + 7) - (-1 - 28 - 7) + 2 \cdot (-2 + 3 - 2 + 4 - 3 + 1) + 4 \cdot (6 + 2 + 8 - 1) = 89.$$

- **Aufgabe 2.** Betrachten Sie V , den Vektorraum der Polynome vom Grad ≤ 2 , in dem das innere Produkt und die Norm wie folgt definiert sind:

$$\langle f, g \rangle := \int_{-1}^1 f(x) \cdot g(x) dx, \quad \|f\| := \sqrt{\langle f, f \rangle}.$$

- a) (3 Punkte) Betrachten Sie den Unterraum U von V mit der Basis $B = \{b_1, b_2\} = \{x + 2, x^2 - 1\}$. Orthonormieren Sie diese Basis bezüglich des oben definierten Skalarproduktes mithilfe des Gram-Schmidt Orthonormierungsverfahrens.

Die Notation soll im Folgenden jener aus der Übung folgen - die orthogonalen Basisvektoren werden mit w_i bezeichnet, die normierten orthogonalen Basisvektoren werden zusätzlich mit einem Tilde dekoriert, lauten also \tilde{w}_i . Wir wählen $w_1 := b_1 = x + 2$ und normieren. Bei der

Berechnung der Integrale können wir uns zunutze machen, dass das Integral einer ungeraden Funktion über ein symmetrisches Intervall verschwindet. Dies spart im weiteren Verlauf einiges an Rechenarbeit.

$$\langle w_1, w_1 \rangle = \int_{-1}^1 (x^2 + 4x + 1) dx = \frac{26}{3}$$

Damit ist $\|w_1\| = \sqrt{\frac{26}{3}}$ und wir erhalten für den ersten normierten Basisvektor

$$\tilde{w}_1 = \sqrt{\frac{3}{26}}(x + 2).$$

Der Ansatz für den zweiten (noch nicht normierten) Basisvektor lautet

$$w_2 = b_2 - \frac{\langle b_2, \tilde{w}_1 \rangle}{\langle \tilde{w}_1, \tilde{w}_1 \rangle} \tilde{w}_1.$$

Das Skalarprodukt im Nenner ergibt 1, da \tilde{w}_1 bereits normiert ist. Daher bleibt das Skalarprodukt im Zähler zu berechnen.

$$\langle b_2, \tilde{w}_1 \rangle = \sqrt{\frac{3}{26}} \int_{-1}^1 (x^2 - 1)(x + 2) dx = -\frac{\sqrt{8}}{78}$$

Damit ist

$$w_2 = x^2 + \frac{4}{13}x - \frac{5}{13}.$$

Wir berechnen noch das Skalarprodukt von w_2 mit sich selbst

$$\langle w_2, w_2 \rangle = \int_{-1}^1 \left(x^2 + \frac{1}{2}x + \frac{1}{2}\right) \left(x^2 + \frac{1}{2}x + \frac{1}{2}\right) dx = \frac{16}{65},$$

um die Norm zu erhalten, $\|w_2\| = \sqrt{\frac{16}{65}}$. Damit lautet der zweite normierte Basisvektor

$$\tilde{w}_2 = \frac{\sqrt{65}}{4} \left(x^2 + \frac{4}{13}x - \frac{5}{13} \right).$$

Eine mögliche Orthonormalbasis lautet demnach

$$ONB_U = \left\{ \sqrt{\frac{3}{26}}(x+2), \frac{\sqrt{65}}{4} \left(x^2 + \frac{4}{13}x - \frac{5}{13} \right) \right\}.$$

- b) (3 Punkte) Ergänzen Sie die in a) gefundene Orthonormalbasis zu einer *Orthogonalbasis* des Raumes der Polynome vom Grad ≤ 2 . Die Normierung des neuen Vektors ist nicht notwendig.

Wir wählen den Ansatz: $w_3 := ax^2 + bx + c$ und fordern $\begin{cases} \langle w_3, \tilde{w}_1 \rangle \stackrel{!}{=} 0 \\ \langle w_3, \tilde{w}_2 \rangle \stackrel{!}{=} 0 \end{cases}$. Wir berechnen

$$\langle w_3, \tilde{w}_1 \rangle = \sqrt{\frac{3}{26}} \int_{-1}^1 (x-2)(ax^2 + bx + c) dx = \sqrt{\frac{3}{26}} \frac{2}{3} (2a + b + 6c)$$

$$\langle w_3, \tilde{w}_2 \rangle = \sqrt{\frac{65}{16}} \int_{-1}^1 \left(x^2 + \frac{4}{13}x - \frac{5}{13} \right) (ax^2 + bx + c) dx = \sqrt{\frac{65}{16}} \frac{4}{195} (7a + 10b - 5c)$$

und erhalten aus obiger Forderung, dass beide jeweils Null ergeben müssen folgendes Gleichungssystem:

$$2a + b + 6c = 0 \tag{3}$$

$$7a + 10b - 5c = 0 \tag{4}$$

Zieht man (3) zehn mal von (4) ab, so erhält man die Beziehung $-13a - 65c = 0 \Rightarrow a = -5c$. Da wir drei Unbekannte, jedoch nur zwei Gleichungen haben, steht uns die Wahl eines Parameters frei. Wir wählen etwa $c = 1$ und erhalten $a = -5$. Durch Einsetzen in (3) bestimmen wir $b = 4$. Damit lautet der gesuchte Basisvektor

$$w_3 = -5x^2 + 4x + 1.$$

Laut Angabe ist keine Normierung gefordert. Daher lautet eine Orthogonalbasis von V

$$OGB_V = \left\{ \sqrt{\frac{3}{26}}(x+2), \frac{\sqrt{65}}{4} \left(x^2 + \frac{4}{13}x - \frac{5}{13} \right), (-5x^2 + 4x + 1) \right\}.$$

Natürlich kann man die obige Überlegung mit w_1 statt \tilde{w}_1 und w_2 statt \tilde{w}_2 durchführen. Das Ergebnis für w_3 ändert sich nicht und die OGB_V lautet dann

$$OGB_V = \left\{ x+2, x^2 + \frac{4}{13}x - \frac{5}{13}, -5x^2 + 4x + 1 \right\}.$$

- **Aufgabe 3.** Gegeben seien die Basis $B = \{b_1, b_2, b_3\}$, sowie die Basis $C = \{c_1, c_2, c_3\}$ des \mathbb{R}^3 , wobei

$$b_1 = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix} \quad b_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad b_3 = \begin{pmatrix} -3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad c_1 = \begin{pmatrix} -3 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad c_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} \quad c_3 = \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

gilt. Weiter sei die Basis für \mathbb{R} durch $E_1 = \{1\}$ gegeben. Die lineare Abbildung $\phi : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$ ist mit Hilfe der Basen C und E_1 definiert durch

$$[\phi(C)]_{E_1} = (1 \ 0 \ 1).$$

- a) (2 Punkte) Bestimmen Sie die Transformationsmatrix $T_{C \leftarrow B}$ zum Basiswechsel von B zu C .

Um die Matrix $T_{C \leftarrow B}$ zu erhalten, löst man drei lineare Gleichungssysteme. Dabei werden die Vektoren der alten Basis B mit Hilfe der Vektoren der neuen Basis C dargestellt,

$$\left(\begin{array}{ccc|ccc} -3 & 1 & 3 & 2 & 0 & -3 \\ 2 & 2 & 1 & 1 & 1 & 2 \\ 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 1 \end{array} \right).$$

Durch Zeilenumformungen kommt man zu

$$\begin{array}{l} \xrightarrow{z_1 + 2 \cdot z_2 - 5 \cdot z_3} \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & 9 & 2 & -4 \\ 2 & 2 & 1 & 1 & 1 & 2 \\ 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 1 \end{array} \right) \xrightarrow{z_2 - 2 \cdot z_1 - z_3} \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & 9 & 2 & -4 \\ 0 & 1 & 0 & -16 & -3 & 9 \\ 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 1 \end{array} \right) \\ \xrightarrow{z_3 - z_2} \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & 9 & 2 & -4 \\ 0 & 1 & 0 & -16 & -3 & 9 \\ 0 & 0 & 1 & 15 & 3 & -8 \end{array} \right). \end{array}$$

Man erhält durch Ablesen der rechten Seite

$$T_{C \leftarrow B} = \begin{pmatrix} 9 & 2 & -4 \\ -16 & -3 & 9 \\ 15 & 3 & -8 \end{pmatrix}.$$

- b) (1 Punkt) Bestimmen Sie die Abbildungsmatrix $[\phi(B)]_{E_1}$ bezüglich der Basen B und E_1 .

Nach Satz 3.9 aus dem Vorlesungsskriptum gilt

$$[\phi(B)]_{E_1} = S_{E_1 \leftarrow E_1} \cdot [\phi(C)]_{E_1} \cdot T_{C \leftarrow B}.$$

Durch Einsetzen der bisherigen Ergebnisse erhält man

$$[\phi(B)]_{E_1} = 1 \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 9 & 2 & -4 \\ -16 & -3 & 9 \\ 15 & 3 & -8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 24 & 5 & -12 \end{pmatrix}.$$

- c) (1 Punkt) Gegeben sei $[v]_B = \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix}$. Berechnen Sie das Bild von v , $\phi(v) = [\phi(v)]_{E_1}$. Verwenden Sie dazu, die soeben gefundene Darstellung von $[\phi(B)]_{E_1}$.

$$[\phi(v)]_{E_1} = [\phi(B)]_{E_1} \cdot [v]_B = \begin{pmatrix} 24 & 5 & -12 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix} = 3.$$

- d) (2 Punkte) Berechnen Sie $[v]_C$ und das Bild von v , $\phi(v) = [\phi(v)]_{E_1}$, mit Hilfe der Abbildungsmatrix $[\phi(C)]_{E_1}$.

$$[v]_C = T_{C \leftarrow B} \cdot [v]_B = \begin{pmatrix} 9 & 2 & -4 \\ -16 & -3 & 9 \\ 15 & 3 & -8 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$
$$[\phi(v)]_{E_1} = [\phi(C)]_{E_1} \cdot [v]_C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = 3$$

Das Bild des Vektors ist erwartungsgemäß in beiden Darstellungen das gleiche.

- e) (2 Zusatzpunkte) Bestimmen Sie die Transformationsmatrix $T_{B \leftarrow C}$ zum Basiswechsel von C zu B .

Um die Matrix $T_{B \leftarrow C}$ zu erhalten, löst man drei lineare Gleichungssystem wie in a), allerdings mit Matrix C und B vertauscht, was dem Invertieren von $T_{C \leftarrow B}$ gleich kommt,

$$\left(\begin{array}{ccc|ccc} 2 & 0 & -3 & -3 & 1 & 3 \\ 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{array} \right).$$

Durch Zeilenumformungen erhält man

$$\begin{array}{l} \xrightarrow{\substack{z_1+2 \cdot z_3 \\ z_2+z_3}} \left(\begin{array}{ccc|ccc} 0 & 0 & -1 & -3 & 3 & 5 \\ 0 & 1 & 3 & 2 & 3 & 2 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{array} \right) \xrightarrow{z_1 \leftrightarrow -z_3} \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & 3 & 2 & 3 & 2 \\ 0 & 0 & -1 & -3 & 3 & 5 \end{array} \right) \\ \xrightarrow{\substack{z_1-z_3 \\ z_2+3 \cdot z_3 \\ -z_3}} \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & 3 & -4 & -6 \\ 0 & 1 & 0 & -7 & 12 & 17 \\ 0 & 0 & 1 & 3 & -3 & -5 \end{array} \right) \end{array}$$

Man erhält durch Ablesen der rechten Seite

$$T_{B \leftarrow C} = \begin{pmatrix} 3 & -4 & -6 \\ -7 & 12 & 17 \\ 3 & -3 & -5 \end{pmatrix}.$$