

## Aufgabe 1

### Teilaufgabe a

Gegeben:

$$A = \begin{pmatrix} 3 & 15 & 13 \\ 6 & 6 & 6 \\ 2 & 8 & 19 \end{pmatrix}$$

**Aufgabe:** LR-Zerlegung von  $A$  mit Spaltenpivotwahl

**Lösung:**

$$\begin{array}{ll}
 P^{(1)} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, & A^{(0)} = \begin{pmatrix} 3 & 15 & 13 \\ 6 & 6 & 6 \\ 2 & 8 & 19 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \leftarrow \\ \leftarrow \\ \leftarrow \end{array} \\
 L^{(2)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} & 1 & 0 \\ -\frac{1}{3} & 0 & 1 \end{pmatrix}, & A^{(1)} = \begin{pmatrix} 6 & 6 & 6 \\ 3 & 15 & 13 \\ 2 & 8 & 19 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \leftarrow \cdot (-\frac{1}{2}) \\ \leftarrow + \\ \leftarrow + \end{array} \cdot (-\frac{1}{3}) \\
 L^{(3)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2} & 1 \end{pmatrix}, & A^{(2)} = \begin{pmatrix} 6 & 6 & 6 \\ 0 & 12 & 10 \\ 0 & 6 & 17 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \leftarrow \cdot (-\frac{1}{2}) \\ \leftarrow + \\ \leftarrow + \end{array} \\
 & A^{(3)} = \begin{pmatrix} 6 & 6 & 6 \\ 0 & 12 & 10 \\ 0 & 0 & 12 \end{pmatrix}
 \end{array}$$

Es gilt:

$$L^{(3)} \cdot L^{(2)} \cdot \underbrace{P^{(1)}}_{=:P} \cdot A^0 = \underbrace{A^{(3)}}_{=:R} \quad (1)$$

$$\Leftrightarrow PA = (L^{(3)} \cdot L^{(2)})^{-1} \cdot R \quad (2)$$

$$\Rightarrow L = (L^{(3)} \cdot L^{(2)})^{-1} \quad (3)$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} & 1 & 0 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Nun gilt:  $PA = LR = A^{(1)}$  (Kontrolle mit Wolfram|Alpha)

**Teilaufgabe b****Gegeben:**

$$A = \begin{pmatrix} 9 & 4 & 12 \\ 4 & 1 & 4 \\ 12 & 4 & 17 \end{pmatrix}$$

**Aufgabe:**  $A$  auf positive Definitheit untersuchen, ohne Eigenwerte zu berechnen.**Vorüberlegung:** Eine Matrix  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$  heißt positiv Definit ...

$$\begin{aligned} \dots &\Leftrightarrow \forall x \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\} : x^T A x > 0 \\ &\Leftrightarrow \text{Alle Eigenwerte sind größer als } 0 \end{aligned}$$

Falls  $A$  symmetrisch ist, gilt: $A$  ist pos. Definit  $\Leftrightarrow$  alle führenden Hauptminore von  $A$  sind positiv $\Leftrightarrow$  es gibt eine Cholesky-Zerlegung  $A = GG^T$  mit  $G$  ist reguläre untere Dreiecksmatrix**Lösung 1: Hauptminor-Kriterium**

$$\det(A_1) = 9 > 0 \tag{5}$$

$$\det(A_2) = \begin{vmatrix} 9 & 4 \\ 4 & 1 \end{vmatrix} = 9 - 16 < 0 \tag{6}$$

$$\Rightarrow A \text{ ist nicht positiv definit} \tag{7}$$

**Lösung 2: Cholesky-Zerlegung**

$$l_{11} = \sqrt{a_{11}} = 3 \tag{8}$$

$$l_{21} = \frac{a_{21}}{l_{11}} = \frac{4}{3} \tag{9}$$

$$l_{31} = \frac{a_{31}}{l_{11}} = \frac{12}{3} = 4 \tag{10}$$

$$l_{22} = \sqrt{a_{22} - l_{21}^2} = \sqrt{1 - \frac{16}{9}} = \sqrt{-\frac{7}{9}} \notin \mathbb{R} \tag{11}$$

$$\Rightarrow \text{Es ex. keine Cholesky-Zerlegung, aber } A \text{ ist symmetrisch} \tag{12}$$

$$\Rightarrow A \text{ ist nicht positiv definit} \tag{13}$$

## Aufgabe 2

### Teilaufgabe a

**Aufgabe** Formulieren Sie einen Algorithmus in Pseudocode zum Lösen des Gleichungssystems

$$Ly = b,$$

wobei  $L$  eine invertierbare, untere Dreiecksmatrix ist.

Geben Sie die Formel zur Berechnung von  $y_i$  an.

**Lösung:**

$$y_i = \frac{b_i - \sum_{k=1}^{i-1} l_{ik} \cdot y_k}{l_{ii}}$$

---

**Algorithm 1** Calculate  $y$  in  $Ly = b$

---

**Require:** Lower, invertable, triangular Matrix  $L \in \mathbb{R}^{n \times n}$ , Vektor  $b$

```

procedure SOLVE( $L, b$ )
  for  $i \in \{1, \dots, n\}$  do
     $y_i \leftarrow b_i$ 
    for  $k \in \{1, \dots, i-1\}$  do
       $y_i \leftarrow y_i - l_{ik} \cdot y_k$ 
    end for
     $y_i \leftarrow \frac{y_i}{l_{ii}}$ 
  end for
end procedure

```

---

### Teilaufgabe b

$$Ax = b \Leftrightarrow PAx = Pb \Leftrightarrow LRx = Pb$$

---

**Algorithm 2** Löse ein LGS  $Ax = b$

---

**Require:** Matrix  $A$ , Vektor  $b$

```

procedure LOESELGS( $A, b$ )
   $P, L, R \leftarrow \text{LRZER}(A)$ 
   $b^* \leftarrow P \cdot b$ 
   $c \leftarrow \text{VORSUB}(L, b^*)$ 
   $x \leftarrow \text{RUECKSUB}(R, c)$ 
  return  $x$ 
end procedure

```

---

**Teilaufgabe c**

Der Gesamtaufwand ist:

- LR-Zerlegung,  $\frac{1}{3}n^3 - \frac{1}{3}n^2$
- Vektormultiplikation,  $2n$
- Vorwärtssubstitution,  $\frac{1}{2}n^2$
- Rückwärtssubstitution,  $\frac{1}{2}n^2$

### Aufgabe 3

Die Jacobi-Matrix von  $f$  lautet:

$$f'(x, y) = \begin{pmatrix} 3 & \cos y \\ 3x^2 & e^y \end{pmatrix}$$

Hierfür wurde in in der ersten Spalte nach  $x$  abgeleitet und in der zweiten Spalte nach  $y$ .

### Lösungsvorschlag 1 (Numerische Lösung)

Eine Iteration des Newton-Verfahren ist durch

$$x_{k+1} = x_k - \underbrace{f'(x_k)^{-1} \cdot f(x_k)}_{\Delta x} \quad (14)$$

gegeben (vgl. Skript, S. 35).

Zur praktischen Durchführung lösen wir

$$f'(x_0, y_0) \Delta x = -f(x_0, y_0) \quad (15)$$

$$L \cdot \underbrace{R \cdot \Delta x}_{=:c} = -f(x_0, y_0) \quad (16)$$

mit Hilfe der LR Zerlegung nach  $\Delta x$  auf:

$$f'(x_0, y_0) = L \cdot R \quad (17)$$

$$\Leftrightarrow f'(-1/3, 0) = L \cdot R \quad (18)$$

$$\Leftrightarrow \begin{pmatrix} 3 & 1 \\ \frac{1}{3} & 1 \end{pmatrix} = \overbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{9} & 1 \end{pmatrix}}^{=:L} \cdot \overbrace{\begin{pmatrix} 3 & 1 \\ 0 & \frac{8}{9} \end{pmatrix}}^{=:R} \quad (19)$$

$$L \cdot c = -f(x_0, y_0) \quad (20)$$

$$\Leftrightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{9} & 1 \end{pmatrix} \cdot c = - \begin{pmatrix} 2 \\ \frac{26}{27} \end{pmatrix} \quad (21)$$

$$\Rightarrow c = \begin{pmatrix} -2 \\ -\frac{20}{27} \end{pmatrix}^T \quad (22)$$

$$R \cdot \Delta x = c \quad (23)$$

$$\Leftrightarrow \begin{pmatrix} 3 & 1 \\ 0 & \frac{8}{9} \end{pmatrix} \cdot \Delta x = \begin{pmatrix} -2 \\ -\frac{20}{27} \end{pmatrix} \quad (24)$$

$$\Rightarrow \Delta x = \frac{1}{18} \begin{pmatrix} -7 \\ -15 \end{pmatrix} \quad (25)$$

Anschließend berechnen wir

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} + \Delta x \quad (26)$$

$$\Leftrightarrow \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{3} \\ 0 \end{pmatrix} + \frac{1}{18} \begin{pmatrix} -7 \\ -15 \end{pmatrix} \quad (27)$$

$$\Leftrightarrow \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -13/18 \\ -15/18 \end{pmatrix} \quad (28)$$

## Lösungsvorschlag 2 (Analytische Lösung)

Und jetzt die Berechnung

$$f'(x, y) \cdot (x_0, y_0) = f(x, y)$$

LR-Zerlegung für  $f'(x, y)$  kann durch scharfes hinsehen durchgeführt werden, da es in  $L$  nur eine unbekannte (links unten) gibt. Es gilt also ausführlich:

$$\begin{pmatrix} 3 & \cos y \\ 3x^2 & e^y \end{pmatrix} = \overbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ l_{12} & 1 \end{pmatrix}}^L \cdot \overbrace{\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} \\ 0 & r_{22} \end{pmatrix}}^R \quad (29)$$

$$\Rightarrow r_{11} = 3 \quad (30)$$

$$\Rightarrow r_{12} = \cos y \quad (31)$$

$$\Rightarrow \begin{pmatrix} 3 & \cos y \\ 3x^2 & e^y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ l_{12} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 3 & \cos y \\ 0 & r_{22} \end{pmatrix} \quad (32)$$

$$\Rightarrow 3x^2 \stackrel{!}{=} l_{12} \cdot 3 + 1 \cdot 0 \quad (33)$$

$$\Leftrightarrow l_{12} = x^2 \quad (34)$$

$$\Rightarrow e^y \stackrel{!}{=} x^2 \cdot \cos y + 1 \cdot r_{22} \quad (35)$$

$$\Leftrightarrow r_{22} = -x^2 \cdot \cos y + e^y \quad (36)$$

$$\Rightarrow \begin{pmatrix} 3 & \cos y \\ 3x^2 & e^y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ x^2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 3 & \cos y \\ 0 & -x^2 \cdot \cos y + e^y \end{pmatrix} \quad (37)$$

$$P = I_2 \quad (38)$$

---

<sup>1</sup>Dieser Schritt wird durch Vorwärtssubstitution berechnet.

## Aufgabe 4

**Aufgabe:**

$$I(f) = \int_a^b f(x) dx$$

1. Integrand am linken und am rechten Rand interpolieren
2. Interpolationspolynom mit Quadraturformel integrieren

**Lösung:**

Nutze Interpolationsformel von Lagrange:

$$p(x) = \sum_{i=0}^1 f_i \cdot L_i(x)$$

Berechne Lagrangepolynome:

$$L_0(x) = \frac{x-b}{a-b} \quad (39)$$

$$L_1(x) = \frac{x-a}{b-a} \quad (40)$$

So erhalten wir:

$$p(x) = f(a) \frac{x-b}{a-b} + f(b) \frac{x-a}{b-a}$$

Nun integrieren wir das Interpolationspolynom:

$$\begin{aligned} \int_a^b p(x) dx &= \int_a^b f(a) \frac{x-b}{a-b} dx + \int_a^b f(b) \frac{x-a}{b-a} dx \\ &= \int_a^b \frac{f(a) \cdot x}{a-b} dx - \int_a^b \frac{f(a) \cdot b}{a-b} dx + \int_a^b \frac{f(b) \cdot x}{b-a} dx - \int_a^b \frac{f(b) \cdot a}{b-a} dx \\ &= \frac{1}{2} \cdot \frac{f(a) \cdot b^2}{a-b} - \frac{1}{2} \cdot \frac{f(a) \cdot a^2}{a-b} - \frac{f(a) \cdot b^2}{a-b} + \frac{f(a) \cdot b \cdot a}{a-b} + \frac{1}{2} \cdot \frac{f(b) \cdot b^2}{b-a} \\ &\quad - \frac{1}{2} \cdot \frac{f(b) \cdot a^2}{b-a} - \frac{f(b) \cdot a \cdot b}{b-a} + \frac{f(b) \cdot a^2}{b-a} \\ &= (b-a) \cdot \left( \frac{f(a)}{2} + \frac{f(b)}{2} \right) \end{aligned}$$

Betrachtet man nun die allgemeine Quadraturformel,

$$\int_a^b f(x)dx \approx (b-a) \sum_{i=1}^s b_i f(a + c_i(b-a))$$

so gilt für die hergeleitete Quadraturformel also  $s = 2$ ,  $c_1 = 0$ ,  $c_2 = 1$  und  $b_1 = b_2 = \frac{1}{2}$ . Sie entspricht damit der Trapezregel.

### Teilaufgabe b)

Sei nun  $f(x) = x^2$  und  $a = 0$  sowie  $b = 4$ . Man soll die ermittelte Formel zwei mal auf äquidistanten Intervallen anwenden.

**Lösung:**

$$\int_0^4 p(x)dx = \int_0^2 p(x)dx + \int_2^4 p(x)dx = 24 \quad (41)$$



## Aufgabe 5

### Teilaufgabe a

Eine Quadraturformel  $(b_i, c_i)_{i=1, \dots, s}$  hat die Ordnung  $p$ , falls sie exakte Lösungen für alle Polynome vom Grad  $\leq p - 1$  liefert.

### Teilaufgabe b

$$\sum_{i=1}^s b_i c_i^{q-1} = \frac{1}{q} \text{ für } q = 1, \dots, p$$

### Teilaufgabe c

**Aufgabe** Bestimmen Sie zu den Knoten  $c_1 = 0$  und  $c_2 = \frac{2}{3}$  Gewichte, um eine Quadraturformel maximaler Ordnung zu erhalten. Wie hoch ist die Ordnung?

**Lösung** Als erstes stellen wir fest, dass die Knoten nicht symmetrisch (d.h. gespiegelt bei  $\frac{1}{2}$ ) sind. TODO: Warum ist das wichtig?

$\xRightarrow{\text{Satz 28}}$  Wenn wir Ordnung  $s = 2$  fordern, sind die Gewichte eindeutig bestimmt.

Da  $c_1 = 0$  kann es sich nicht um die Gauß-QF handeln. Somit können wir nicht Ordnung 4 erreichen.

Nach VL kann bei Vorgabe von  $s$  Knoten auch die Ordnung  $s$  durch geschickte Wahl der Gewichte erreicht werden. Also berechnen wir die Gewichte, um die Ordnung 2 zu sichern:

$$b_i = \int_0^1 L_i(x) dx \quad (42)$$

$$b_1 = \frac{1}{4} \quad (43)$$

$$b_2 = \frac{3}{4} \quad (44)$$

Diese Gewichte  $b_1, b_2$  erfüllen die 1. und 2. Ordnungsbedingung.

$$\frac{1}{3} = \sum_{i=1}^2 b_i \cdot c_i^2 \quad (45)$$

$$= \frac{3}{4} \cdot \frac{4}{9} \quad (46)$$

$$= \frac{1}{3} \quad (47)$$

Damit ist auch die 3. Ordnungsbedingung und mit den Knoten maximale Ordnung erfüllt.