

## Aufgabe 1

### Teilaufgabe a)

Gegeben:

$$A := \begin{pmatrix} 4 & 2 & 8 \\ 2 & 5 & 8 \\ 8 & 8 & 29 \end{pmatrix}$$

**Aufgabe:** Cholesky-Zerlegung  $A = L \cdot L^T$  berechnen

**Rechenweg:**

---

#### Algorithm 1 Cholesky-Zerlegung

---

```

function CHOLESKY( $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ )
   $L = \{ 0 \} \in \mathbb{R}^{n \times n}$  ▷ Initialisiere  $L$ 
  for ( $k = 1$ ;  $k \leq n$ ;  $k++$ ) do
     $L_{k,k} = \sqrt{A_{k,k} - \sum_{i=1}^{k-1} L_{k,i}^2}$ 
    for ( $i = k + 1$ ;  $i \leq n$ ;  $i++$ ) do
       $L_{i,k} = \frac{A_{i,k} - \sum_{j=1}^{k-1} L_{i,j} \cdot L_{k,j}}{L_{k,k}}$ 
    end for
  end for
  return  $L$ 
end function

```

---

**Lösung:**  $L = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ 4 & 2 & 3 \end{pmatrix}$

### Teilaufgabe b)

**Gesucht:**  $\det(A)$

Sei  $P \cdot A = L \cdot R$ , die gewohnte LR-Zerlegung.

Dann gilt:

$$\det(A) = \frac{\det(L) \cdot \det(R)}{\det(P)}$$

$\det(L) = 1$ , da alle Diagonalelemente 1 sind und es sich um eine strikte untere Dreiecksmatrix handelt.

$\det(R) = r_{11} \cdot \dots \cdot r_{nn}$ , da es sich um eine obere Dreiecksmatrix handelt.

$\det(P) \in \{1, -1\}$

Das Verfahren ist also:

---

**Algorithm 2** Determinante berechnen

---

**Require:**  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$

$P, L, R \leftarrow \text{LRZERL}(A)$

$x \leftarrow 1$

**for**  $i$  in  $1..n$  **do**

$x \leftarrow x \cdot r_{ii}$

$x \leftarrow x \cdot p_{ii}$

**end for**

---

Alternativ kann man auch in einer angepassten LR-Zerlegung direkt die Anzahl an Zeilenvertauschungen zählen. Dann benötigt man  $P$  nicht mehr. Ist die Anzahl der Zeilenvertauschungen ungerade, muss das Produkt der  $r_{ii}$  negiert werden.

## Aufgabe 2

### Lösungsalternative 1:

**Voraussetzung:** Gegeben sei eine Funktion  $F$ :

$$\begin{aligned} F : \mathbb{R} &\rightarrow [-1, 1] \\ F(x) &:= \cos(x) \end{aligned}$$

sowie eine Folge  $(x)_k$  mit  $x_{k+1} := F(x_k)$ .

**Behauptung:**  $\exists! x^* : \forall x \in \mathbb{R} : \lim_{k \rightarrow \infty} x_k = x^*$

**Beweis:** über den Banachschen Fixpunktsatz.

Teil 1: Es gibt genau einen Fixpunkt und dieser ist in  $(0, 1)$

*Beweis.* Sei  $x \in \mathbb{R}$ , so gilt:

$$-1 \leq \cos(x) \leq 1$$

Also genügt es  $x \in [-1, 1]$  zu betrachten.

Sei nun  $x \in [-1, 0)$ . Dann gilt:  $\cos(x) > 0$ . Da  $x < 0$  aber  $F(x) > 0$ , kann kein Fixpunkt in  $[-1, 0)$  sein. Es genügt also sogar, nur  $[0, 1]$  zu betrachten.

Offensichtlich ist  $F(0) \neq 0$  und  $F(1) \neq 1$ , also ist der Fixpunkt - falls vorhanden - in  $(0, 1)$ .  $F$  ist in  $(0, 1)$  stetig und streng monoton fallend. Da auch  $-x$  in  $(0, 1)$  streng monoton fallend ist, folgt, dass  $\cos(x) - x$  in  $(0, 1)$  streng monoton fallend ist.

$$x = 0 \Rightarrow \cos(x) - x = \cos(0) - 0 = 1$$

$$x = 45^\circ = \frac{1}{4}\pi < 1 \Rightarrow \cos(45^\circ) - \frac{\pi}{4} = \frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{\pi}{4} < 0, \text{ da}$$

$$8 < 9 < \pi^2 \tag{1}$$

$$\Rightarrow \sqrt{8} < \pi \tag{2}$$

$$\Leftrightarrow 2\sqrt{2} < \pi \tag{3}$$

$$\Leftrightarrow \frac{\sqrt{2}}{2} < \frac{\pi}{4} \tag{4}$$

Zwischenwertsatz  $\Rightarrow \exists x^* : \cos(x^*) - x^* = 0 \Leftrightarrow \exists x^* : \cos(x^*) = x^*$ .

Dieses  $x^*$  ist eindeutig, da  $\cos(x) - x$  streng monoton fallend ist.  $\square$

Teil 2: Jeder Startwert  $x \in \mathbb{R}$  konvergiert gegen  $x^*$ .

*Beweis.* Er genügt zu zeigen, dass  $F$  auf  $[0, 1]$  eine Kontraktion ist, da bereits in Teil 1 gezeigt wurde, dass man bereits  $x_2 = \cos(\cos(x)) \in (0, 1)$  ist.

Sei  $0 \leq x < y \leq 1$ . Dann folgt:

$$\stackrel{\text{Mittelwertsatz}}{\Rightarrow} \exists L \in (x, y) : \frac{\cos(y) - \cos(x)}{y - x} = f'(L) \quad (5)$$

$$\Rightarrow \exists L \in [0, 1] : \|\cos y - \cos x\| = \|-\sin(L) \cdot (y - x)\| \quad (6)$$

$$= \underbrace{\sin(L)}_{[0,1]}(y - x) \quad (7)$$

$$\Rightarrow F \text{ ist Kontraktion auf } [0, 1] \quad (8)$$

Da  $F|_{[0,1]}$  eine Selbstabbildung und eine Kontraktion ist und offensichtlich  $[0, 1]$  abgeschlossen ist, greift der Banachsche Fixpunktsatz. Es folgt direkt, dass auch für alle  $x \in [0, 1]$  die Folge  $(x)_k$  gegen den einzigen Fixpunkt  $x^*$  konvergiert.

□

## Lösungsalternative 2:

**Behauptung:** Für  $x \in \mathbb{R}$  gilt, dass  $\cos(x_k) = x_{k+1}$  gegen den einzigen Fixpunkt  $x^* = \cos(x^*)$  konvergiert.

**Beweis:** Sei  $D := [-1, 1]$ .

Trivial:  $D$  ist abgeschlossen.

Sei  $x \in D$ , so gilt:

$$0 < \cos(x) \leq 1$$

Also:  $\cos(x) \in D$ .

Wenn  $x \notin D$ , so gilt  $y := \cos(x)$  und  $\cos(y) \in D$ . D.h. bereits nach einem Iterationsschritt wäre  $\cos(x) \in D$  für  $x \in \mathbb{R}$ ! Dies ist wichtig, da damit gezeigt ist, dass  $\cos(x_k) = x_{k+1}$  für jedes  $x \in \mathbb{R}$  konvergiert! Es kommt nur dieser einzige Iterationsschritt für  $x \notin \mathbb{R}$  hinzu.

Nun gilt mit  $x, y \in D, x < y, \xi \in (x, y)$  und dem Mittelwert der Differentialrechnung:

$$\begin{aligned} \frac{\cos(x) - \cos(y)}{x - y} &= \cos'(\xi) \\ \Leftrightarrow \cos(x) - \cos(y) &= \cos'(\xi) * (x - y) \end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow |\cos(x) - \cos(y)| = |\cos'(\xi) * (x - y)| \leq |\cos'(\xi)| * |x - y|$$

Da  $\xi \in (0, 1)$  gilt:

$$0 \leq |\cos'(\xi)| = |\sin(\xi)| < 1$$

Damit ist gezeigt, dass  $\cos(x) : D \rightarrow D$  Kontraktion auf  $D$ .

Damit sind alle Voraussetzung des Banachschen Fixpunktsatzes erfüllt.

Nach dem Banachschen Fixpunktsatz folgt die Aussage.

## Aufgabe 3

Gegeben:

$f_i$	7	1	-1	7
$x_i$	-1	0	1	2

### Teilaufgabe a)

Allgemein lauten Lagrange-Polynome:

$$L_i = \frac{\overbrace{\prod_{j=0, j \neq i}^n (x - x_j)}^{\text{Produkt der Nullstellen}}}{\underbrace{\prod_{j=0, j \neq i}^n (x_i - x_j)}_{\text{Normalisierungsfaktor}}}$$

Im speziellen:

$$L_0(x) = \frac{(x-0)(x-1)(x-2)}{(-1-0)(-1-1)(-1-2)} = -\frac{1}{6} \cdot (x^3 - 3x^2 + 2x) \quad (9)$$

$$L_1(x) = \frac{(x+1)(x-1)(x-2)}{(0+1)(0-1)(0-2)} = \frac{1}{2} \cdot (x^3 - 2x^2 - x + 2) \quad (10)$$

$$L_2(x) = \frac{(x+1)x(x-2)}{(1+1)(1-0)(1-2)} = -\frac{1}{2} \cdot (x^3 - x^2 - 2x) \quad (11)$$

$$L_3(x) = \frac{(x+1)(x-0)(x-1)}{(2+1)(2-0)(2-1)} = \frac{1}{6} \cdot (x^3 - x) \quad (12)$$

Durch die Interpolationsformel von Lagrange

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

ergibt sich

$$p(x) = x^3 + 2x^2 - 5x + 1 \quad (13)$$

Anmerkung: Es ist nicht notwendig die Monomdarstellung zu berechnen. In diesem Fall hat es jedoch das Endergebnis stark vereinfacht.

**Teilaufgabe b)**

Zunächst die dividierten Differenzen berechnen:

$$f[x_0] = 7, \quad f[x_1] = 1, \quad f[x_2] = -1, \quad f[x_3] = 7 \quad (14)$$

$$f[x_0, x_1] = -6, \quad f[x_1, x_2] = -2, \quad f[x_2, x_3] = 8 \quad (15)$$

$$f[x_0, x_1, x_2] = 2, \quad f[x_1, x_2, x_3] = 5 \quad (16)$$

$$f[x_0, x_1, x_2, x_3] = 1 \quad (17)$$

Insgesamt ergibt sich also

$$p(x) = 7 - (x + 1) \cdot 6 + (x + 1) \cdot x \cdot 2 + (x + 1) \cdot x \cdot (x - 1) \quad (18)$$

## Aufgabe 4

### Teilaufgabe a)

1. Ordnung 3 kann durch geschickte Gewichtswahl erzwungen werden.
2. Ordnung 4 ist automatisch gegeben, da die QF symmetrisch sein soll.
3. Aufgrund der Symmetrie gilt Äquivalenz zwischen Ordnung 5 und 6. Denn eine hätte die QF Ordnung 5, so wäre wegen der Symmetrie Ordnung 6 direkt gegeben. Ordnung 6 wäre aber bei der Quadraturformel mit 3 Knoten das Maximum, was nur mit der Gauß-QF erreicht werden kann. Da aber  $c_1 = 0$  gilt, kann es sich hier nicht um die Gauß-QF handeln. Wegen erwähnter Äquivalenz kann die QF auch nicht Ordnung 5 haben.

Da  $c_1 = 0$  gilt, muss  $c_3 = 1$  sein (Symmetrie). Und dann muss  $c_2 = \frac{1}{2}$  sein. Es müssen nun die Gewichte bestimmt werden um Ordnung 3 zu garantieren mit:

$$b_i = \int_0^1 L_i(x) dx \quad (19)$$

$$b_1 = \frac{1}{6}, \quad (20)$$

$$b_2 = \frac{4}{6}, \quad (21)$$

$$b_3 = \frac{1}{6} \quad (22)$$

### Teilaufgabe b)

Als erstes ist festzustellen, dass es sich hier um die Simpsonregel handelt und die QF

$$\int_a^b f(x) dx = (b-a) \cdot \frac{1}{6} \cdot \left( f(a) + 4 \cdot f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(b) \right) \quad (23)$$

ist. Wenn diese nun auf  $N$  Intervalle aufgefliet wird gilt folgendes:

$$h = \frac{(b-a)}{N} \quad (24)$$

$$\int_a^b f(x) dx = h \cdot \frac{1}{6} \cdot \left[ f(a) + f(b) + 2 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} f(a + i \cdot h) + 4 \cdot \sum_{l=0}^{N-1} f\left(a + \frac{1}{2} \cdot h + l \cdot h\right) \right] \quad (25)$$



$\sum_{i=1}^{N-1} f(a + i \cdot h)$  steht für die Grenzknoten (deshalb werden sie doppelt gezählt). Von den Grenzknoten gibt es insgesamt  $N - 2$  Stück, da die tatsächlichen Integralgrenzen  $a$  und  $b$  nur einmal in die Berechnung mit einfließen.

$\sum_{l=0}^{N-1} f(a + \frac{1}{2} \cdot h + l \cdot h)$  sind die jeweiligen mittleren Knoten der Intervalle. Davon gibt es  $N$  Stück.

### Teilaufgabe c)

TODO

## Aufgabe 5

Zunächst ist nach der Familie von Quadraturformeln gefragt, für die gilt: ( $p :=$  Ordnung der QF)

$$s = 3 \quad (26)$$

$$0 = c_1 < c_2 < c_3 \quad (27)$$

$$p \geq 4 \quad (28)$$

Nach Satz 29 sind in der Familie genau die QFs, für die gilt:

Für alle Polynome  $g(x)$  mit  $\text{Grad} \leq 0$  gilt:

$$\int_0^1 M(x) \cdot g(x) dx = 0 \quad (29)$$

Es gilt  $g(x) = c$  für eine Konstante  $c$ , da der Grad von  $g(x)$  0 ist. Also ist 29 gleichbedeutend mit:

$$\int_0^1 M(x) \cdot c dx = 0 \quad (30)$$

$$\Leftrightarrow c \cdot \int_0^1 M(x) dx = 0 \quad (31)$$

$$\Leftrightarrow \int_0^1 M(x) dx = 0 \quad (32)$$

$$\Leftrightarrow \int_0^1 (x - c_1)(x - c_2)(x - c_3) dx = 0 \quad (33)$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{4} - \frac{1}{3} \cdot (c_2 + c_3) + \frac{1}{2} \cdot c_2 \cdot c_3 = 0 \quad (34)$$

$$\Leftrightarrow \frac{\frac{1}{4} - \frac{1}{3} \cdot c_3}{\frac{1}{3} - \frac{1}{2} \cdot c_3} = c_2 \quad (35)$$

Natürlich müssen auch die Gewichte optimal gewählt werden. Dafür wird Satz 28 genutzt:

Sei  $b^T = (b_1, b_2, b_3)$  der Gewichtsvektor. Sei zudem  $C := \begin{pmatrix} c_1^0 & c_2^0 & c_3^0 \\ c_1^1 & c_2^1 & c_3^1 \\ c_1^2 & c_2^2 & c_3^2 \end{pmatrix}$ .

Dann gilt:  $C$  ist invertierbar und  $b = C^{-1} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{1}{2} \\ \frac{1}{3} \end{pmatrix}$ .

Es gibt genau eine symmetrische QF in der Familie. Begründung:

Aus  $c_1 = 0$  folgt, dass  $c_3 = 1$  ist. Außerdem muss  $c_2 = \frac{1}{2}$  sein. Also sind die Knoten festgelegt. Da wir die Ordnung  $\geq s = 3$  fordern, sind auch die Gewichte eindeutig.

Es handelt sich um die aus der Vorlesung bekannte Simpsonregel.