

HM1-Zusammenfassung

1 Rechnerarithmetik

1.1 Definition 2.1: Maschinenzahlen

Unter Normalisierung $m_1 \neq 0$ (falls $x \neq 0$):

$$\mathbb{M} = \{x \in \mathbb{R} \mid x = 0.m_1 m_2 \dots m_n \cdot B^{e - \text{bias}}\} \cup \{0\}$$

$$\text{Wert: } x = \sum_{i=1}^n m_i \cdot B^{-i} \cdot B^e$$

Anzahl möglicher Zahlen

$|\mathbb{M}|$: Mantissenstellen $|e|$: Stellen Exponent

$$B^{|M| \cdot |e|}$$

1.1.1 Vorgehen: Zahlensystem-Umwandlung

Schritt 1: Mantisse normalisieren ($0.m_1 m_2 \dots$ mit $m_1 \neq 0$)

Schritt 2: Exponent bestimmen (Verschiebungen zählen)

Schritt 3: Wert berechnen: $\sum m_i \cdot B^{-i} \cdot B^e$

1.1.2 Beispiel : Binärzahl

Gegeben: $x_2 = 0.111 \times 2^3$

Schritt 1: Mantisse normalisiert: 0.111_2

Schritt 2: Exponent: $e = 3$

Schritt 3: Wert berechnen:

$$\begin{aligned} x_2 &= (1 \cdot 2^{-1} + 1 \cdot 2^{-2} + 1 \cdot 2^{-3}) \cdot 2^3 \\ &= 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 \\ &= 4 + 2 + 1 = 7 \end{aligned}$$

1.1.3 Beispiel : Hexadezimalzahl

Gegeben: $x_5 = 0.AB3C9F \times 16^4$, mit $A = 10, B = 11$

Schritt 1: Mantisse normalisiert: $0.AB3C9F_{16}$

Schritt 2: Exponent: $e = 4$

Schritt 3: Wert berechnen (Auszug):

$$\begin{aligned} x_5 &= (10 \cdot 16^{-1} + 11 \cdot 16^{-2} + 3 \cdot 16^{-3} + \dots) \cdot 16^4 \\ &= 10 \cdot 16^3 + 11 \cdot 16^2 + 3 \cdot 16^1 + \dots \\ &= 40960 + 2816 + 48 + \dots = 43836.62\dots \end{aligned}$$

1.2 Definition 2.2: Fehler

Absoluter Fehler: $|\tilde{x} - x|$

Relativer Fehler: $\frac{|\tilde{x} - x|}{|x|}$ (falls $x \neq 0$)

1.2.1 Vorgehen: Fehlerberechnung

Schritt 1: Zahl auf n Stellen runden

Schritt 2: Absoluter Fehler: $|\tilde{x} - x|$

Schritt 3: Relativer Fehler: $\frac{|\tilde{x} - x|}{|x|}$

Schritt 4: Prüfen: $|\text{rd}(x) - x| \leq \frac{B}{2} \cdot B^{e-(n+1)}$

1.2.2 Beispiel 2.2: Rundungsfehler

Gegeben: $x = 180.1234567 = 0.1801234567 \times 10^3$

Auf $n = 7$ Stellen runden.

Schritt 1: Rundung auf 7 Stellen:

$$\text{rd}(x) = 0.1801235 \times 10^3$$

(8. Stelle ist $6 \geq 5 \rightarrow$ aufrunden)

Schritt 2: Absoluter Fehler:

$$\begin{aligned} |\text{rd}(x) - x| &= |0.1801235 - 0.1801234567| \times 10^3 \\ &= 0.0000000433 \times 10^3 \\ &= 0.433 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

Schritt 3: Relativer Fehler:

$$\frac{|\text{rd}(x) - x|}{|x|} = \frac{0.433 \times 10^{-4}}{180.1234567} \approx 2.4 \times 10^{-7}$$

Schritt 4: Prüfung ($B = 10, e = 3, n = 7$):

$$\frac{B}{2} \cdot B^{e-(n+1)} = \frac{10}{2} \cdot 10^{3-7} = 0.5 \times 10^{-4}$$

$$0.433 \times 10^{-4} < 0.5 \times 10^{-4}$$

1.3 Definition 2.3: Maschinengenauigkeit

$$\varepsilon_{\text{mach}} = \frac{1}{2} \cdot B^{1-n}$$

Maximaler relativer Rundungsfehler.

Merkmal	Single Precision	Double Precision
Gesamtlänge	32 Bit	64 Bit
Mantisse	23 Bit (+1)	52 Bit (+1)
Exponent	8 Bit (Bias 127)	11 Bit (Bias 1023)
Genauigkeit (ca.)	7 Dezimalstellen	16 Dezimalstellen
Speicherbedarf	klein	doppelt so groß

Hidden Bit: Das “+1” bei der Mantisse bezeichnet das sogenannte Hidden Bit da durch IEEE-754 Normierung die erste Stelle der Mantisse immer 1 ist und somit nicht gespeichert werden muss.

1.3.1 Vorgehen: Maschinengenauigkeit

Schritt 1: Mantissenlänge n bestimmen

Schritt 2: Basis B identifizieren

Schritt 3: Formel anwenden: $\varepsilon_{\text{mach}} = \frac{1}{2} \cdot B^{1-n}$

Schritt 4: Bei IEEE: hidden bit beachten!

1.3.2 Beispiel 2.3a: IEEE Double Precision

Gegeben: IEEE-754 Double Precision

Schritt 1: Mantissenlänge bestimmen:

- 52 Bit gespeichert

- 1. 1 hidden bit
- $\rightarrow n = 53$

Schritt 2: Basis: $B = 2$ (binär)

Schritt 3: Formel anwenden:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{mach}} &= \frac{1}{2} \cdot 2^{1-53} \\ &= \frac{1}{2} \cdot 2^{-52} \\ &= 2^{-53}\end{aligned}$$

Schritt 4: Dezimal umrechnen:

$$\varepsilon_{\text{mach}} \approx 1.110223 \times 10^{-16}$$

1.4 Definition 2.4: Konditionszahl

Die Konditionszahl gibt an, wie stark sich der relative Fehler des Ergebnisses ändert, wenn sich der relative Fehler der Eingabe ändert.

Absolute: $\kappa = |f'(x)|$

Relative: $\kappa_{\text{rel}} = \frac{|x \cdot f'(x)|}{|f(x)|}$

1.4.1 Vorgehen: Konditionszahl berechnen

Schritt 1: Funktion $f(x)$ und Ableitung $f'(x)$ bestimmen

Schritt 2: Konditionszahl berechnen:

- Absolut: $\kappa = |f'(x)|$
- Relativ: $\kappa_{\text{rel}} = \frac{|x \cdot f'(x)|}{|f(x)|}$

Schritt 3: Interpretation:

- $\kappa_{\text{rel}} \approx 1$: gut konditioniert
- $\kappa_{\text{rel}} \gg 1$: schlecht konditioniert

Gegeben: $f(x) = \sqrt{x}$ bei $x = 4$

Schritt 1: Ableitung:

$$f'(x) = \frac{1}{2\sqrt{x}}$$

Schritt 2: Konditionszahl:

$$\begin{aligned}\kappa_{\text{rel}} &= \frac{|x \cdot f'(x)|}{|f(x)|} \\ &= \frac{|4 \cdot \left(\frac{1}{2\sqrt{4}}\right)|}{|\sqrt{4}|} \\ &= \frac{|4 \cdot \left(\frac{1}{4}\right)|}{2} \\ &= \frac{1}{2} = 0.5\end{aligned}$$

Schritt 3: Interpretation: $\kappa_{\text{rel}} = 0.5 \approx 1 \rightarrow$ gut konditioniert

-> **Konditionszahl:** 1/n

$$f(x) = x^n \text{ bei } x = 0.1, n = 10$$

Schritt 1: Ableitung:

$$f'(x) = nx^{n-1}$$

Schritt 2: Konditionszahl:

$$\begin{aligned}\kappa_{\text{rel}} &= \frac{|x \cdot f'(x)|}{|f(x)|} \\ &= \frac{|0.1 \cdot (10 \cdot 0.1^{10-1})|}{|0.1^{10}|} \\ &= \frac{|1 \cdot 0.1^9|}{0.1^{10}} \\ &= 10\end{aligned}$$

Schritt 3: Interpretation: $\kappa_{\text{rel}} = 10 \gg 1 \rightarrow$ schlecht konditioniert

-> **Konditionszahl:** n

1.5 Auslöschung

Auslöschung: Verlust signifikanter Stellen durch Subtraktion fast gleicher Zahlen. Tritt in Funktionen an Stellen auf an denen sie schlecht konditioniert sind.

2 Nullstellenprobleme

2.1 Definition: Fixpunkt

\bar{x} heißt **Fixpunkt** von F , falls:

$$F(\bar{x}) = \bar{x}$$

2.1.1 Banachscher Fixpunktsatz

Sei $F : [a, b] \rightarrow [a, b]$ (d.h. F bildet $[a, b]$ auf sich selbst ab) und existiere eine Konstante α mit $0 < \alpha < 1$ und:

$$|F(x) - F(y)| \leq \alpha |x - y| \quad \text{für alle } x, y \in [a, b]$$

(d.h. F ist **Lipschitz-stetig** und **kontraktiv**, α nennt man auch **Lipschitz-Konstante**).

Dann gilt:

Kontraktionsbedingung: $|F(x) - F(y)| \leq \alpha |x - y|$ besagt, dass F eine **Kontraktion** ist.

Lipschitz-Konstante: $\alpha < 1$ garantiert, dass Abstände verkleinert werden.

Ableitung: Für differenzierbar F gilt: $|F'(x)| \leq \alpha < 1$ für alle $x \in [a, b]$.

Existenz und Eindeutigkeit: Genau ein Fixpunkt existiert.

Globale Konvergenz: Jeder Startwert führt zur Konvergenz.

2.1.2 Interpretationen der Abschätzungen

2.1.3 Abschätzungen der Fixpunktiteration

A-priori Abschätzung (vor Iteration bekannt):

$$|x_n - \bar{x}| \leq \frac{\alpha^n}{1 - \alpha} |x_1 - x_0|$$

$$n \geq \frac{\ln(\varepsilon(1 - \alpha)/|x_1 - x_0|)}{\ln(\alpha)}$$

A-posteriori Abschätzung (während Iteration berechenbar):

$$|x_n - \bar{x}| \leq \frac{1}{1-\alpha} |x_n - x_{n-1}|$$

Schritt 1: Banachscher Fixpunktsatz: Bedingungen prüfen

- Abbildung $F : [a, b] \rightarrow [a, b]$ verifizieren

Schritt 2: Lipschitz-Konstante finden

- Lipschitz-Konstante $\alpha < 1$ finden: $\alpha = \max_{x \in [a, b]} |F'(x)|$

Schritt 2.1: Ableitung $F'(x)$ berechnen

Schritt 2.2: Maximum von $|F'(x)|$ im Intervall bestimmen

Schritt 3: Konklusion

- Eindeutiger Fixpunkt \bar{x} existiert (erfüllt $F(\bar{x}) = \bar{x}$)
- Jeder Startwert in $[a, b]$ konvergiert gegen \bar{x}

Fixpunkt genau:

$$\bar{x} = \lim_{n \rightarrow \infty} x_n \quad \text{wobei} \quad x_{n+1} = F(x_n)$$

2.1.4 Beispiel: Banachscher Fixpunktsatz für $x^3 + 0.3 = 0$

Gesucht: Intervall $[a, b]$ und Konstante $\alpha < 1$, so dass der Banachsche Fixpunktsatz auf die Fixpunktiteration $x_{n+1} = F(x_n) = x_n^3 + 0.3$ anwendbar ist.

Lösungsansatz: Die Fixpunktiteration konvergiert in der Nähe von $\bar{x} = 0.3389$. Wir suchen ein geeignetes Intervall und versuchen es mit $[a, b] = [0, 0.5]$.

Schritt 1: Überprüfen, ob $F : [0, 0.5] \rightarrow [0, 0.5]$:

- Für alle $x \in [0, 0.5]$: $F(x) = x^3 + 0.3 \geq 0.3$
- $F(0) = 0.3 \in [0, 0.5]$
- $F(0.5) = 0.125 + 0.3 = 0.425 \in [0, 0.5]$

Schritt 2: Finden einer Konstanten $\alpha < 1$:

Aus dem Satz wissen wir: $\alpha = \max_{x \in [a, b]} |F'(x)|$

Schritt 2.1: Ableitung berechnen:

$$F'(x) = 3x^2$$

Schritt 2.2: Die Ableitung ist monoton steigend, daher Maximum bei $x = 0.5$:

$$|F'(0.5)| = 3 \cdot 0.5^2 = 0.75 < 1$$

Schritt 3: Konklusion:

Mit $\alpha = 0.75 < 1$ sind alle Bedingungen des Banachschen Fixpunktsatzes erfüllt. Die Fixpunktiteration $x_{n+1} = x_n^3 + 0.3$ konvergiert gegen den eindeutigen Fixpunkt $\bar{x} \approx 0.3389$ für jeden Startwert in $[0, 0.5]$.

2.1.5 Vorgehen: Fixpunktform

Schritt 1: Nullstellenproblem $f(x) = 0$ gegeben

Schritt 2: Nach x auflösen: $F(x) = x$

Schritt 3: Mehrere Formen möglich!

Schritt 4: Konvergenz prüfen: $|F'(\bar{x})| < 1$

2.1.6 Beispiel 3.3: Fixpunktform

Gegeben: $p(x) = x^3 - x + 0.3 = 0$

Schritt 1: Nullstellenproblem identifiziert

Schritt 2: Umformen nach x :

Variante A: $x^3 - x + 0.3 = 0$

$$\rightarrow x = x^3 + 0.3$$

$$\rightarrow F(x) = x^3 + 0.3$$

Variante B: $x^3 = x - 0.3$

$$\rightarrow x = \sqrt[3]{x - 0.3}$$

$$\rightarrow F(x) = \sqrt[3]{x - 0.3}$$

Schritt 3: Beide Formen sind gültig

Schritt 4: Konvergenz prüfen (Variante A):

$$F'(x) = 3x^2$$

Bei $\bar{x} \approx 0.339$: $|F'(0.339)| = 3 \cdot 0.339^2 \approx 0.34 < 1$

2.1.7 Vorgehen: Fixpunktiteration

Schritt 1: Fixpunktform $x = F(x)$ aufstellen

Schritt 2: Startwert x_0 wählen

Schritt 3: Iterieren: $x_{n+1} = F(x_n)$

Schritt 4: Konvergenz prüfen: $|F'(\bar{x})| < 1$

Schritt 5: Abbruch bei $|x_{n+1} - x_n| < \varepsilon$

2.1.8 Beispiel 3.4: Fixpunktiteration

Gegeben: $F(x) = x^3 + 0.3$, Startwert $x_0 = 0$

Schritt 1: Fixpunktform bereits gegeben

Schritt 2: Startwert: $x_0 = 0$

Schritt 3: Iteration durchführen:

$$x_1 = F(x_0) = 0^3 + 0.3 = 0.3$$

$$x_2 = F(x_1) = 0.3^3 + 0.3 = 0.027 + 0.3 = 0.327$$

$$x_3 = F(x_2) = 0.327^3 + 0.3 \approx 0.335$$

$$x_4 = F(x_3) = 0.335^3 + 0.3 \approx 0.338$$

$$x_5 = F(x_4) \approx 0.339$$

Schritt 4: Konvergenz (siehe Beispiel 3.3):

Schritt 5: $|x_5 - x_4| \approx 0.001 \rightarrow$ Abbruch bei $\varepsilon = 0.01$

Fixpunkt: $\bar{x} \approx 0.339$

2.2 Newton-Verfahren

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$$

Vereinfachtes Newton-Verfahren

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{c}$$

mit konstanter Ableitung $c = f'(x_0)$

2.2.1 Vorgehen: Newton-Verfahren

Schritt 1: Funktion $f(x)$ und Ableitung $f'(x)$ bestimmen

Schritt 2: Startwert x_0 wählen (nahe Nullstelle)

Schritt 3: Iterieren: $x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$

Schritt 4: Konvergenz prüfen: $\frac{|f(x) \cdot f''(x)|}{|f'(x)|^2} < 1$

Schritt 5: Abbruch bei $|f(x_n)| < \varepsilon$ oder $|x_{n+1} - x_n| < \varepsilon$

Schritt 6: Quadratische Konvergenz bei einfachen Nullstellen

2.2.2 Beispiel 3.5: Newton für $x^2 = 2$

Gegeben: $f(x) = x^2 - 2$, Startwert $x_0 = 1$, $\varepsilon = 10^{-4}$

Schritt 1: Funktionen bestimmen:

$$f(x) = x^2 - 2$$

$$f'(x) = 2x$$

$$f''(x) = 2$$

Schritt 2: Startwert: $x_0 = 1$

Schritt 3: Iteration:

$$x_1 = x_0 - \frac{x_0^2 - 2}{2x_0} = 1 - \frac{1 - 2}{2} = 1.5$$

$$x_2 = 1.5 - \frac{1.5^2 - 2}{2 \cdot 1.5} = 1.5 - \frac{0.25}{3} \approx 1.4167$$

$$x_3 = 1.4167 - \frac{1.4167^2 - 2}{2 \cdot 1.4167} \approx 1.4142$$

Schritt 4: Konvergenzprüfung bei $x \approx 1.414$:

$$\frac{|f(x) \cdot f''(x)|}{|f'(x)|^2} = \frac{|(x^2 - 2) \cdot 2|}{|2x|^2} \approx \frac{0}{8} < 1$$

Schritt 5: Abbruchkriterium prüfen bei $\varepsilon = 10^{-4}$:

$$|f(x_3)| = |1.4142^2 - 2| \approx 0.00005 < 10^{-4}$$

Schritt 6: $\sqrt{2} \approx 1.4142$ (quadratische Konvergenz!)

2.3 Sekantenverfahren

$$x_{n+1} = x_n - f(x_n) \cdot \frac{x_n - x_{n-1}}{f(x_n) - f(x_{n-1})}$$

2.3.1 Vorgehen: Sekantenverfahren

Schritt 1: Funktion $f(x)$ bestimmen (keine Ableitung nötig!)

Schritt 2: Zwei Startwerte x_0 und x_1 wählen (nahe Nullstelle)

Schritt 3: Iterieren: $x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n) \cdot (x_n - x_{n-1})}{f(x_n) - f(x_{n-1})}$

Schritt 4: Konvergenz: Superlinear (Ordnung ≈ 1.618 , besser als linear, schlechter als quadratisch)

Schritt 5: Abbruch bei $|f(x_n)| < \varepsilon$ oder $|x_{n+1} - x_n| < \varepsilon$

$$= 1.4 - \frac{-0.04 \cdot (-0.1)}{-0.29}$$

$$= 1.4 - \frac{0.004}{-0.29} \approx 1.414$$

Schritt 4: Konvergenz: Superlinear (besser als Fixpunktiteration, weniger Ableitungen als Newton)

Schritt 5: $|f(x_3)| \approx |1.414^2 - 2| \approx 0 \rightarrow$ Konvergiert schnell

2.3.2 Beispiel 3.6: Sekantenverfahren für $x^2 = 2$

Gegeben: $f(x) = x^2 - 2$, Startwerte $x_0 = 1$, $x_1 = 1.5$, $\varepsilon = 10^{-4}$

Schritt 1: Funktion bestimmt: $f(x) = x^2 - 2$

Schritt 2: Startwerte: $x_0 = 1$, $x_1 = 1.5$

Schritt 3: Iteration:

$$f(x_0) = 1^2 - 2 = -1$$

$$f(x_1) = 1.5^2 - 2 = 0.25$$

$$x_2 = x_1 - \frac{f(x_1) \cdot (x_1 - x_0)}{f(x_1) - f(x_0)}$$

$$= 1.5 - \frac{0.25 \cdot (1.5 - 1)}{0.25 - (-1)}$$

$$= 1.5 - \frac{0.25 \cdot 0.5}{1.25}$$

$$= 1.5 - 0.1 = 1.4$$

$$f(x_2) = 1.4^2 - 2 = -0.04$$

$$x_3 = 1.4 - \frac{-0.04 \cdot (1.4 - 1.5)}{-0.04 - 0.25}$$

3 Lineare Gleichungssysteme

3.1 Definition 4.1: Dreiecksmatrizen

Untere Dreiecksmatrix: Alle Einträge oberhalb der Diagonale sind 0.

$$L = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ l_{21} & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ l_{31} & l_{32} & 1 & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ l_{n1} & l_{n2} & \cdots & l_{n,n-1} & 1 \end{pmatrix}$$

Obere Dreiecksmatrix: Alle Einträge unterhalb der Diagonale sind 0.

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & \cdots & r_{1n} \\ 0 & r_{22} & r_{23} & \cdots & r_{2n} \\ 0 & 0 & r_{33} & \cdots & r_{3n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & r_{nn} \end{pmatrix}$$

Normiert: Diagonale = 1

3.2 Gauss Algorithmus

$$x_i = \frac{b_i - \sum_{j=i+1}^n a_{ij}x_j}{a_{ii}}, \quad i = n, n-1, \dots, 1$$

Schritt 1 - Vorwärtselimination:

- Zeile 2: – Vielfaches von Zeile 1
- Zeile 3: – Vielfaches von Zeile 1
- Dann weiter mit Zeile 3: – Vielfaches von Zeile 2

Schritt 2: Ergebnis ist obere Dreiecksmatrix

Schritt 3 - Rückwärtseinsetzen:

- x_n aus letzter Zeile
- x_{n-1} aus vorletzter (mit x_n)
- Weiter bis x_1

3.2.1 Beispiel 3x3 Gauss Elimination

Gegeben:

$$A = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 1 \\ 1 & -3 & -2 \\ 5 & 1 & 4 \end{pmatrix}, b = \begin{pmatrix} 0 \\ 5 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$\text{Erweiterte Matrix: } (A | b) = \left(\begin{array}{ccc|c} -1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & -3 & -2 & 5 \\ 5 & 1 & 4 & 3 \end{array} \right)$$

Schritt 1a: Eliminiere a_{21}

$$i = 1, j = 2 \Rightarrow z_2 = z_2 - \frac{1}{-1}z_1 = (A_1 | b_1)$$

$$(A_1 | b_1) = \left(\begin{array}{ccc|c} -1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & -2 & -1 & 5 \\ 5 & 1 & 4 & 3 \end{array} \right)$$

Schritt 1b: Eliminiere a_{31}

$$i = 1, j = 3 \Rightarrow z_3 = z_3 - \frac{5}{-1}z_1 = (A_2 | b_2)$$

$$(A_2 | b_2) = \left(\begin{array}{ccc|c} -1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & -2 & -1 & 5 \\ 0 & 6 & 9 & 3 \end{array} \right)$$

Schritt 1c: Eliminiere a_{32}

$$i = 2, j = 3 \Rightarrow z_3 = z_3 - \frac{6}{-2}z_2 = (A_3 | b_3)$$

$$(A_3 | b_3) = \left(\begin{array}{ccc|c} -1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & -2 & -1 & 5 \\ 0 & 0 & 6 & 18 \end{array} \right)$$

Schritt 2: Obere Dreiecksform erreicht:

$$\left(\begin{array}{ccc} -1 & 1 & 1 \\ 0 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 6 \end{array} \right) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 5 \\ 18 \end{pmatrix}$$

Schritt 3: Rückwärtseinsetzen:

$$x_3 = \frac{18}{6} = 3$$

$$x_2 = \frac{5 - (-1) \cdot 3}{-2} = \frac{8}{-2} = -4$$

$$x_1 = \frac{0 - 1 \cdot (-4) - 1 \cdot 3}{-1} = \frac{1}{-1} = -1$$

Lösung: $(x_1, x_2, x_3) = (-1, -4, 3)$

3.3 LR Zerlegung

Folgende Aussagen sind äquivalent:

$$A = LR$$

$$Ly = b \Leftrightarrow y = (L|b)$$

$$Rx = y \Leftrightarrow (R|y) = x$$

mit Permutationsmatrix P :

$$PA = LR$$

$$Ly = Pb$$

3.3.1 Vorgehen: LR-Zerlegung

Schritt 1: Gauss-Elimination durchführen

Schritt 2: Faktoren in L eintragen

Schritt 3: Resultat ist R

Schritt 4 - Lösen:

- $Ly = b$ (Vorwärts)
- $Rx = y$ (Rückwärts)

3.3.2 Beispiel 4.3: LR-Zerlegung

Gegeben: System aus Beispiel 4.2

$$A = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 1 \\ 1 & -3 & -2 \\ 5 & 1 & 4 \end{pmatrix}, b = \begin{pmatrix} 0 \\ 5 \\ 3 \end{pmatrix}$$

Schritt 1: Gauss-Elimination durchgeführt (siehe 4.2)

Schritt 2: Multiplikatoren sammeln:

- Zeile 2: Faktor war $\frac{1}{-1} = -1$
- Zeile 3: Faktor war $\frac{5}{-1} = -5$, dann $\frac{6}{-2} = -3$

$$L = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ -5 & -3 & 1 \end{pmatrix}$$

Schritt 3: Resultat nach Gauss (obere Dreiecksmatrix):

$$R = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 1 \\ 0 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 6 \end{pmatrix}$$

Schritt 4: Lösen (für $b = \begin{pmatrix} 0 \\ 5 \\ 3 \end{pmatrix}$):

Vorwärts ($Ly = b$):

$$\text{Erweiterte Matrix: } (L \mid b) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & | & 0 \\ -1 & 1 & 0 & | & 5 \\ -5 & -3 & 1 & | & 3 \end{pmatrix}$$

Schritt 1: Eliminiere L_{21} :

$$z_2 = z_2 - (-1) \cdot z_1 \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & | & 0 \\ 0 & 1 & 0 & | & 5 \\ -5 & -3 & 1 & | & 3 \end{pmatrix}$$

Schritt 2: Eliminiere L_{31} :

$$z_3 = z_3 - (-5) \cdot z_1 \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & | & 0 \\ 0 & 1 & 0 & | & 5 \\ 0 & -3 & 1 & | & 3 \end{pmatrix}$$

Schritt 3: Eliminiere L_{32} :

$$z_3 = z_3 - (-3) \cdot z_2 \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & | & 0 \\ 0 & 1 & 0 & | & 5 \\ 0 & 0 & 1 & | & 18 \end{pmatrix}$$

Vereinfacht

$$y_1 = 0$$

$$-1 \cdot y_1 + y_2 = 5 \rightarrow y_2 = 5$$

$$-5 \cdot y_1 - 3 \cdot y_2 + y_3 = 3 \rightarrow y_3 = 3 - 0 + 15 = 18$$

Resultat:

$$y = \begin{pmatrix} 0 \\ 5 \\ 18 \end{pmatrix}$$

Rückwärts ($Rx = y$): wie in 4.2

$$x_3 = \frac{18}{6} = 3$$

$$x_2 = \frac{5 - (-1) \cdot 3}{-2} = -4$$

$$x_1 = \frac{0 - 1 \cdot (-4) - 1 \cdot 3}{-1} = -1$$

Lösung: $(x_1, x_2, x_3) = (-1, -4, 3)$

3.4 QR Zerlegung

Eine Matrix $Q \in \mathbb{R}^{n \times n}$ heisst **orthogonal**, wenn ihre Spaltenvektoren paarweise orthogonal sind:

$$Q^T Q = I_n \Leftrightarrow Q^T = Q^{-1}$$

Die QR-Zerlegung einer Matrix $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ ist die Darstellung:

$$A = QR$$

Gram-Schmidt-Verfahren:

$$v_i = a_i - \sum_{j=1}^{i-1} (a_i^T u_j) u_j \quad (\text{orthogonal})$$

$$u_i = \frac{v_i}{\|v_i\|} \quad (\text{normalisiert})$$

Finden von R :

$$R = Q^T A$$

3.4.1 Vorgehen: QR (Gram-Schmidt)

Schritt 1: Spalten a_1, a_2, \dots von A

Schritt 2: $u_1 = \frac{a_1}{\|a_1\|}$

Schritt 3: Für $i = 2, \dots, n$:

- v_i berechnen (orthogonalisieren)

- $u_i = \frac{v_i}{\|v_i\|}$ berechnen

Schritt 4: $Q = [u_1 \mid \dots \mid u_n]$

Schritt 5: $R = Q^T A$

3.4.2 Beispiel 4.3: QR für 2×2

Gegeben:

$$A = \begin{pmatrix} 3 & 1 \\ 4 & 2 \end{pmatrix}$$

Schritt 1: Spalten:

$$a_1 = \begin{pmatrix} 3 \\ 4 \end{pmatrix}, \quad a_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}$$

Schritt 2: Ersten orthonormalen Vektor:

$$\|a_1\| = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5$$

$$u_1 = \frac{1}{5} \begin{pmatrix} 3 \\ 4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.6 \\ 0.8 \end{pmatrix}$$

Schritt 3: Zweiten Vektor orthogonalisieren:

$$a_2^T u_1 = 1 \cdot 0.6 + 2 \cdot 0.8 = 2.2$$

$$v_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} - 2.2 \begin{pmatrix} 0.6 \\ 0.8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1.32 \\ 1.76 \end{pmatrix}$$

$$v_2 = \begin{pmatrix} -0.32 \\ 0.24 \end{pmatrix}$$

$$\|v_2\| = \sqrt{(-0.32)^2 + 0.24^2} = 0.4$$

$$u_2 = \frac{1}{0.4} \begin{pmatrix} -0.32 \\ 0.24 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.8 \\ 0.6 \end{pmatrix}$$

Schritt 4: $Q = \begin{pmatrix} 0.6 & -0.8 \\ 0.8 & 0.6 \end{pmatrix}$

Schritt 5:

$$R = Q^T A = \begin{pmatrix} 0.6 & 0.8 \\ -0.8 & 0.6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3 & 1 \\ 4 & 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 & 2.2 \\ 0 & 0.4 \end{pmatrix}$$

3.4.3 Vorgehen: Jacobi-Verfahren

Schritt 1: Zerlegung: $A = L + D + R$

Schritt 2: Iterationsformel aufstellen

Schritt 3: Startvektor $x^{(0)}$ wählen

Schritt 4: Konvergenz prüfen.

Iterationsformel:

$$A = D + L + R$$

$$Dx^{(k+1)} = -(L + R)x^{(k)} + b$$

$$x^{(k+1)} = -D^{-1}(L + R)x^{(k)} + D^{-1}b$$

Konvergenz Prüfen Formel

$$B = D^{-1}(L + R)$$

Falls $\|B\| < 1 \rightarrow$ konvergiert für jeden Startvektor $x^{(0)}$. Falls $\|B\| \geq 1 \rightarrow$ keine Konvergenz garantiert.

Diagonaldominanz:

Zeilenweise

$$|a_{ii}| > \sum_{j=1, j \neq i}^n |a_{ij}|, \quad \forall i = 1, \dots, n$$

Spaltenweise :

$$|a_{ii}| > \sum_{j=1, j \neq i}^n |a_{ji}|, \quad \forall i = 1, \dots, n$$

Gegeben:

$$Ax = b \quad \text{mit} \quad A = \begin{pmatrix} 4 & -1 & 1 \\ -2 & 5 & 1 \\ 1 & -2 & 5 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad b = \begin{pmatrix} 5 \\ 11 \\ 12 \end{pmatrix}$$

Schritt 1 Zerlegung:

$$L = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -2 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 0 \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} 4 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 5 \end{pmatrix}, \quad R = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Schritt 2 Iterationsformel:

$$\begin{aligned} x^{(n+1)} &= -D^{-1}((L + R)x^{(n)} - b) \\ &= -\begin{pmatrix} 0.25 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & -1 & 1 \\ -2 & 0 & 1 \\ 1 & -2 & 0 \end{pmatrix} x^{(n)} + \begin{pmatrix} 0.25 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 5 \\ 11 \\ 12 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 0 & 0.25 & -0.25 \\ 0.4 & 0 & -0.2 \\ -0.2 & 0.4 & 0 \end{pmatrix} x^{(n)} + \begin{pmatrix} 1.25 \\ 2.2 \\ 2.4 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Schritt 3 Startwert:

$$x^{(0)} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$x^{(1)} = \begin{pmatrix} 1.25 \\ 2.2 \\ 2.4 \end{pmatrix}, \quad x^{(2)} = \begin{pmatrix} 0.5125 \\ 2.03 \\ 2.295 \end{pmatrix}, \quad x^{(3)} = \begin{pmatrix} 0.80125 \\ 2.059 \\ 2.282 \end{pmatrix}$$

3.5 Gauß-Seidel

Das Gauß-Seidel Verfahren ist eine Modifikation des Jacobi-Verfahrens. Vorteile sind schnellere Konvergenz und weniger Speicherbedarf (da kein Zwischenspeicher für den alten Vektor benötigt wird).

Schritt 1: Zerlegung: $A = L + D + R$ (wie Jacobi)

Schritt 2: Startvektor $x^{(0)}$ wählen

Schritt 3: Für jede Komponente i **sequentiell** von oben nach unten:

- Nutze **neue** $x_j^{(k+1)}$ für $j < i$ (bereits berechnet!)
- Nutze **alte** $x_j^{(k)}$ für $j > i$ (noch nicht berechnet)

Schritt 4: Alle Komponenten in dieser Iteration berechnen

Schritt 5: Konvergenz: Matrix diagonaldominant?

Schritt 6: Abbruch: $\|x^{(k+1)} - x^{(k)}\| < \varepsilon$

$$(D + L)x^{(k+1)} = -Rx^{(k)} + b$$

$$x^{(k+1)} = -(D + L)^{-1}Rx^{(k)} + (D + L)^{-1}b$$

Allgemein für Komponente i :

$$x_i^{(k+1)} = \frac{1}{a_{ii}} \left(b_i - \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij}x_j^{(k+1)} - \sum_{j=i+1}^n a_{ij}x_j^{(k)} \right)$$

3.5.1 Beispiel 4.5: Gauß-Seidel

Schritt 1: Zerlegung:

$$L = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -2 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 0 \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} 4 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 5 \end{pmatrix}, \quad R = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Schritt 2: Startvektor:

$$x^{(0)} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Schritt 3+4: Iteration 1 ($k = 0$) - für jede Komponente sequentiell:

Komponente 1:

$$x_1^{(1)} = \frac{1}{4}(5 - 0 - 0) = 1.25$$

Komponente 2 (nutze neues $x_1^{(1)} = 1.25$):

$$x_2^{(1)} = \frac{1}{5}(11 - (-2) \cdot 1.25 - 0) = \frac{1}{5}(13.5) = 2.7$$

Komponente 3 (nutze neue $x_1^{(1)} = 1.25, x_2^{(1)} = 2.7$):

$$x_3^{(1)} = \frac{1}{5}(12 - 1 \cdot 1.25 - (-2) \cdot 2.7) = \frac{1}{5}(16.15) = 3.23$$

$$x^{(1)} = \begin{pmatrix} 1.25 \\ 2.7 \\ 3.23 \end{pmatrix}$$

Iteration 2 ($k = 1$):

Komponente 1:

$$x_1^{(2)} = \frac{1}{4}(5 - (-1) \cdot 2.7 - 1 \cdot 3.23) = \frac{1}{4}(3.47) = 0.87$$

Komponente 2 (nutze neues $x_1^{(2)} = 0.87$):

$$x_2^{(2)} = \frac{1}{5}(11 - (-2) \cdot 0.87 - 1 \cdot 3.23) = \frac{1}{5}(9.51) = 1.90$$

Komponente 3 (nutze neue $x_1^{(2)}, x_2^{(2)}$):

$$x_3^{(2)} = \frac{1}{5}(12 - 1 \cdot 0.87 - (-2) \cdot 1.90) = \frac{1}{5}(13.93) = 2.79$$

$$\mathbf{x}^{(2)} = \begin{pmatrix} 0.87 \\ 1.90 \\ 2.79 \end{pmatrix}$$

Schritt 5: Diagonaldominanz: $|4| > |-1| + |1| = 2 \checkmark, |5| > |-2| + |1| = 3 \checkmark, |5| > |1| + |-2| = 3 \checkmark$

Schritt 6: Konvergiert schneller als Jacobi zum gleichen Vektor!

3.6 Fehlerabschätzung

Von Jacobi: $B = D^{-1}(L + R)$

Von Gauss-Seidel: $B = -(D + L)^{-1}R$

$$\mathbf{x}^{(n+1)} = \mathbf{B}\mathbf{x}^{(n)} + \mathbf{c} =: \mathbf{F}(\mathbf{x}^{(n)})$$

A-priori Abschätzung:

$$\|\mathbf{x}^{(n)} - \bar{\mathbf{x}}\| \leq \frac{\|\mathbf{B}\|^n}{1 - \|\mathbf{B}\|} \|\mathbf{x}^{(1)} - \mathbf{x}^{(0)}\|$$

$$n \geq \frac{\log(\|\mathbf{x}^{(n)} - \bar{\mathbf{x}}\|) + \log(1 - \|\mathbf{B}\|) - \log(\|\mathbf{x}^{(1)} - \mathbf{x}^{(0)}\|)}{\log(\|\mathbf{B}\|)}$$

A-posteriori Abschätzung:

$$\|\mathbf{x}^{(n)} - \bar{\mathbf{x}}\| \leq \frac{\|\mathbf{B}\|}{1 - \|\mathbf{B}\|} \|\mathbf{x}^{(n)} - \mathbf{x}^{(n-1)}\|$$

3.7 Fehler für gestörte LGS

$$\tilde{\mathbf{A}} = \Delta\mathbf{A} + \mathbf{A}$$

Konditionszahl

$$\kappa_\infty(\mathbf{A}) = \|\mathbf{A}\|_\infty \|\mathbf{A}^{-1}\|_\infty$$

Nur \mathbf{b} gestört: absoluter Fehler:

$$\|\tilde{\mathbf{x}}\|_\infty \leq \|\mathbf{A}^{-1}\|_\infty \|\tilde{\mathbf{b}}\|_\infty$$

relativer Fehler:

$$\frac{\|\tilde{\mathbf{x}}\|_\infty}{\|\mathbf{x}\|_\infty} \leq \frac{\|\mathbf{A}^{-1}\|_\infty \|\tilde{\mathbf{b}}\|_\infty}{\|\mathbf{x}\|_\infty}$$

oder: $\kappa_\infty(\mathbf{A}) \frac{\|\tilde{\mathbf{b}}\|_\infty}{\|\mathbf{b}\|_\infty}$.

- Nur \mathbf{A} gestört:

$$\frac{\|\tilde{\mathbf{x}}\|_\infty}{\|\mathbf{x}\|_\infty} \leq \frac{\kappa_\infty(\mathbf{A}) \frac{\|\Delta\mathbf{A}\|_\infty}{\|\mathbf{A}\|_\infty}}{1 - \kappa_\infty(\mathbf{A}) \frac{\|\Delta\mathbf{A}\|_\infty}{\|\mathbf{A}\|_\infty}}.$$

- \mathbf{A} und \mathbf{b} gestört:

$$\frac{\|\mathbf{x} - \tilde{\mathbf{x}}\|_\infty}{\|\mathbf{x}\|_\infty} \leq \frac{\kappa_\infty(\mathbf{A})}{1 - \kappa_\infty(\mathbf{A}) \frac{\|\Delta\mathbf{A}\|_\infty}{\|\mathbf{A}\|_\infty}} \left(\frac{\|\Delta\mathbf{A}\|_\infty}{\|\mathbf{A}\|_\infty} + \frac{\|\tilde{\mathbf{b}}\|_\infty}{\|\mathbf{b}\|_\infty} \right).$$

- Direkter Weg:

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{b}, \quad \tilde{\mathbf{x}} = \tilde{\mathbf{A}}^{-1}\tilde{\mathbf{b}}, \quad \text{Fehler} = \frac{\|\mathbf{x} - \tilde{\mathbf{x}}\|_\infty}{\|\mathbf{x}\|_\infty}.$$

3.7.1 Definition 4.6: Eigenwert

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{v} = \lambda \cdot \mathbf{v}$$

$\lambda \in \mathbb{C}$ = Eigenwert, $\mathbf{v} \neq \mathbf{0}$ = Eigenvektor

3.7.2 Vorgehen: Eigenwerte

Schritt 1: bilde $\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I}$

Schritt 2: finde Charakteristisches Polynom (char.).

Schritt 3: löse char = 0 (finde λ)

Schritt 4: Für jeden λ : $(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I})\mathbf{v} = \mathbf{0}$

3.7.3 Beispiel 4.7: Eigenwerte 2×2

$$\text{Gegeben: } \mathbf{A} = \begin{pmatrix} 4 & 1 \\ 2 & 3 \end{pmatrix}$$

Schritt 1: Bilde $\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I}$:

$$\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I} = \begin{pmatrix} 4 - \lambda & 1 \\ 2 & 3 - \lambda \end{pmatrix}$$

Schritt 2: Charakteristisches Polynom (Determinante):

$$\det(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I}) = (4 - \lambda)(3 - \lambda) - 1 \cdot 2$$

$$= \lambda^2 - 7\lambda + 12 - 2$$

$$p(\lambda) = \lambda^2 - 7\lambda + 10$$

Schritt 3: Löse $p(\lambda) = 0$ (pq-Formel):

$$\lambda_{1,2} = \frac{7}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{7}{2}\right)^2 - 10}$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{7}{2} \pm \sqrt{\frac{49}{4} - 10} = \frac{7}{2} \pm \sqrt{\frac{9}{4}} = \frac{7}{2} \pm \frac{3}{2}$$

$$\lambda_1 = 5, \quad \lambda_2 = 2$$

Schritt 4: Eigenvektor zu $\lambda_1 = 5$:

$$(\mathbf{A} - 5\mathbf{I})\mathbf{v} = (0)$$

$$\begin{pmatrix} 4 - 5 & 1 \\ 2 & 3 - 5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 2 & -2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Beobachtung: Zeile 2 ist -2 mal Zeile 1:

$$\begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 2 & -2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ -2 \cdot (-1) & -2 \cdot 1 \end{pmatrix}$$

Dies führt zur Zeilenreduktion:

$$\begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Aus der (einzigsten unabhängigen) Gleichung: $-v_1 + v_2 = 0 \Rightarrow v_2 = v_1$

$$v_1 = v_2 = u \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad u \in \mathbb{R} \quad (\text{Eigenvektor zu } \lambda_1 = 5)$$

Eigenvektor zu $\lambda_2 = 2$:

$$(\mathbf{A} - 2\mathbf{I})\mathbf{v} = (0)$$

$$\begin{pmatrix} 4-2 & 1 \\ 2 & 3-2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Erste Gleichung: $2v_1 + v_2 = 0 \Rightarrow v_2 = -2v_1$

$$v_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \end{pmatrix} \quad (\text{Eigenvektor zu } \lambda_2 = 2)$$

3.7.4 Vorgehen: Potenzmethode

Schritt 1: Startvektor $v^{(0)}$ wählen (zufällig)

Schritt 2: Iteration:

$$w^{(k)} = \mathbf{A}v^{(k-1)}$$

Schritt 3: Normieren:

$$v^{(k)} = \frac{w^{(k)}}{\|w^{(k)}\|}$$

Schritt 4: Eigenwert approximieren:

$$\lambda \approx (v^{(k)})^T \mathbf{A} v^{(k)}$$

Konvergiert zum betragsmäßig größten EW.

3.7.5 Beispiel 4.8: Potenzmethode

Gegeben: $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 4 & 1 \\ 2 & 3 \end{pmatrix}$, Start: $v^{(0)} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$

Iteration 1:

$$\text{Schritt 2: } w^{(1)} = \begin{pmatrix} 4 & 1 \\ 2 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 \\ 2 \end{pmatrix}$$

$$\text{Schritt 3: } \|w^{(1)}\| = \sqrt{16+4} = \sqrt{20} \approx 4.47$$

$$v^{(1)} = \frac{\begin{pmatrix} 4 \\ 2 \end{pmatrix}}{4.47} \approx \begin{pmatrix} 0.89 \\ 0.45 \end{pmatrix}$$

Iteration 2:

$$\text{Schritt 2: } w^{(2)} = \begin{pmatrix} 4 & 1 \\ 2 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.89 \\ 0.45 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4.01 \\ 3.13 \end{pmatrix}$$

$$\text{Schritt 3: } \|w^{(2)}\| \approx 5.08$$

$$v^{(2)} \approx \begin{pmatrix} 0.79 \\ 0.62 \end{pmatrix}$$

$$\text{Iteration 3: } v^{(3)} \approx \begin{pmatrix} 0.71 \\ 0.71 \end{pmatrix}$$

Schritt 4: Eigenwert (nach Konvergenz):

$$\begin{aligned} \lambda &= v^T \mathbf{A} v \\ &= \begin{pmatrix} 0.71 \\ 0.71 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} 4 & 1 \\ 2 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.71 \\ 0.71 \end{pmatrix} \\ &\approx 5 \end{aligned}$$

Ergebnis: Größter EW $\lambda_1 = 5$ (vgl. 4.7)

3.8 komplexe Zahlen

3.8.1 Darstellungen

Normalform (kartesisch):

$$z = x + iy$$

Trigonometrische Form (polar):

$$z = r(\cos(\varphi) + i \sin(\varphi))$$

Exponentialform:

$$z = re^{i\varphi}$$

Dabei gilt: $r \geq 0$ und φ ist der Winkel.

3.8.2 Umrechnen: Normalform \rightarrow Polar/Expo

Gegeben $z = x + iy$:

Betrag:

$$r = |z| = \sqrt{x^2 + y^2}$$

Winkel:

$$\varphi = \arg(z)$$

Praktisch rechnet man zuerst

$$\varphi_0 = \arctan\left(\frac{y}{x}\right)$$

und korrigiert dann den Quadranten:

- falls $x > 0$: $\varphi = \varphi_0$
- falls $x < 0$ und $y \geq 0$: $\varphi = \varphi_0 + \pi$
- falls $x < 0$ und $y < 0$: $\varphi = \varphi_0 - \pi$
- falls $x = 0$ und $y > 0$: $\varphi = \frac{\pi}{2}$
- falls $x = 0$ und $y < 0$: $\varphi = -\frac{\pi}{2}$

Hinweis: Viele Taschenrechner/Programmiersprachen haben `atan2(y, x)`, das liefert direkt den richtigen Winkel:

$$\varphi = \text{atan2}(y, x)$$

Dann:

$$z = r(\cos(\varphi) + i \sin(\varphi)) = re^{i\varphi}$$

3.8.3 Umrechnen: Polar/Expo -> Normalform

Gegeben $z = r(\cos(\varphi) + i \sin(\varphi))$ oder $z = re^{i\varphi}$:

Realteil und Imaginärteil:

$$x = r \cos(\varphi)$$

$$y = r \sin(\varphi)$$

Also:

$$z = x + iy = r \cos(\varphi) + ir \sin(\varphi)$$

.

3.8.4 algebraische Operationen

Konjugation: $z^* = x - iy$

Betrag: $|z| = \sqrt{x^2 + y^2}$

3.8.5 Grundrechenarten komplexer Zahlen

Gegeben seien zwei komplexe Zahlen in der Normalform:

$$z_1 = x_1 + iy_1, \quad z_2 = x_2 + iy_2.$$

Summe

$$z_1 + z_2 = (x_1 + x_2) + i(y_1 + y_2)$$

Differenz

$$z_1 - z_2 = (x_1 - x_2) + i(y_1 - y_2)$$

Produkt

$$z_1 z_2 = (x_1 + iy_1)(x_2 + iy_2)$$

Ausmultiplizieren und $i^2 = -1$ benutzen:

$$z_1 z_2 = (x_1 x_2 - y_1 y_2) + i(x_1 y_2 + x_2 y_1)$$

$$z_1 z_2 = (r_1 e^{i\varphi_1})(r_2 e^{i\varphi_2}) = (r_1 r_2) e^{i(\varphi_1 + \varphi_2)}.$$

Division

Für $z_2 \neq 0$ gilt:

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{x_1 + iy_1}{x_2 + iy_2}.$$

Mit dem konjugiert Komplexen $z_2^* = x_2 - iy_2$:

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{z_1 z_2^*}{z_2 z_2^*} = \frac{(x_1 + iy_1)(x_2 - iy_2)}{(x_2 + iy_2)(x_2 - iy_2)}$$

Nenner:

$$(x_2 + iy_2)(x_2 - iy_2) = x_2^2 + y_2^2$$

Zähler:

$$(x_1 + iy_1)(x_2 - iy_2) = (x_1 x_2 + y_1 y_2) + i(y_1 x_2 - x_1 y_2)$$

Damit:

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{x_1 x_2 + y_1 y_2}{x_2^2 + y_2^2} + i \frac{y_1 x_2 - x_1 y_2}{x_2^2 + y_2^2}$$

In Exponentialform:

Für $z_2 \neq 0$ (also $r_2 > 0$):

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{r_1 e^{i\varphi_1}}{r_2 e^{i\varphi_2}} = \left(\frac{r_1}{r_2} \right) e^{i(\varphi_1 - \varphi_2)}.$$

Wurzel

Die n -ten Wurzeln von $z = re^{i\varphi}$ sind:

$$z_k = r^{\frac{1}{n}} e^{i(\varphi + 2k\pi)/n} \quad \text{für } k = 0, 1, \dots, n-1$$

Gegeben: $z = 4$ (reelle Zahl), gesucht: kubische Wurzeln ($n = 3$)

Schritt 1: In Exponentialform umwandeln:

$$r = |4| = 4, \quad \varphi = 0$$

$$z = 4e^{i \cdot 0}$$

Schritt 2: Wurzeln berechnen mit Formel:

$$z_k = 4^{\frac{1}{3}} e^{i(0+2k\pi)/3} \quad \text{für } k = 0, 1, 2$$

Schritt 3: Die drei Wurzeln:

$$z_0 = 4^{\frac{1}{3}} e^{i \cdot 0} = 4^{\frac{1}{3}} \approx 1.587$$

$$z_1 = 4^{\frac{1}{3}}(-0.5 + i0.866)$$

$$z_2 = 4^{\frac{1}{3}}(-0.5 - i0.866)$$

Geometrisch: Die drei Wurzeln liegen gleichmäßig auf einem Kreis mit Radius $4^{\frac{1}{3}} \approx 1.587$, verteilt um 120° auseinander.

4 Ergänzung & Formeln

4.1 Ableitungen & Integrale

$$(x^n)' = nx^{n-1}, \quad n \in \mathbb{R}, n \neq 0$$

$$(af(x) + bg(x))' = af'(x) + bg'(x)$$

$$(\sin x)' = \cos x, \quad (\cos x)' = -\sin x$$

$$(e^x)' = e^x, \quad (\ln x)' = \frac{1}{x}, \quad x > 0$$

$$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} + C, \quad n \neq -1$$

$$\int \frac{1}{x} dx = \ln(|x|) + C$$

$$\int e^x dx = e^x + C$$

$$\int \sin x dx = -\cos x + C, \quad \int \cos x dx = \sin x + C$$

4.2 Logarithmus Gesetze

$$\ln(a \cdot b) = \ln(a) + \ln(b), \quad a, b > 0$$

$$\ln\left(\frac{a}{b}\right) = \ln(a) - \ln(b), \quad a, b > 0$$

$$\ln(a^n) = n \cdot \ln(a), \quad a > 0, n \in \mathbb{R}$$

$$\ln(1) = 0, \quad \ln(e) = 1$$

$$e^{\ln(x)} = x, \quad \ln(e^x) = x, \quad x > 0$$

$$\log_{b(x)} = \frac{\ln(x)}{\ln(b)} \quad \text{Basiswechsel}$$

4.3 Polynome

$$p(x) = a_n x^n + \dots + a_1 x + a_0$$

$$p'(x) = na_n x^{n-1} + \dots + 2a_2 x + a_1$$

$$P(x) = \int p(x) dx = a_n \frac{x^{n+1}}{n+1} + \dots + a_1 \frac{x^2}{2} + a_0 x + C$$

4.4 Fakultät & Binomialkoeffizient

$$n! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot n, \quad 0! = 1$$

$${n \choose k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$$

4.5 Sekantenverfahren

$$x_{k+1} = x_k - f(x_k) \cdot \frac{x_k - x_{k-1}}{f(x_k) - f(x_{k-1})}$$

4.6 Geometrie

$$V_{\text{kugel}} = \frac{4}{3} \pi r^3, \quad A_{\text{kreis}} = \pi r^2$$

$$V_{\text{zyl}} = \pi r^2 l$$

$$V_{\text{kugelsegment}} = \pi h^2 \left(r - \frac{h}{3} \right)$$

4.7 Lineare Algebra Basics

$$\text{tr}(A) = \sum_i a_{ii}$$

$$\det ! \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = ad - bc$$

$$p(\lambda) = \det(A - \lambda I)$$

$$p(\lambda) = \lambda^2 - (a+d)\lambda + (ad - bc) \quad \text{für } 2 \times 2$$