Lineare Algebra

1. Grundlagen

TODO: Modulo und $\mathbb{Z}_{\ltimes}$

1.1. Mengenlehre

1.1.1 Für alle Mengen A,B,C gilt:

1. $\emptyset \subset B$
2. $A \setminus (B \cup C) = (A \setminus B) \cap (A \setminus C)$
3. $(A \cap B) \cap C = A \cap (B \cap C)$
   $(A \cup B) \cup C = A \cup (B \cup C)$
4. $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$
   $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$
5. $A \triangle B = (A \cup B) \setminus (A \cap B)$
   symmetr. Differenz zweier Mengen: Alle Elemente, die entweder in A oder B enthalten sind.
6. $A \times B = \{(a_1, b_1), ..., (a_1, b_n), (a_2, b_1), ...\}$
   direktes Produkt zweier Mengen, ordnet jedem Element aus A jedes Element aus B zu (Tupel)

1.2. Abbildungen

$f : A \to B$

Surjektivität

$\forall y \in B \exists x \in A : f(x) = y$. Es wird auf alle Werte der Wertemenge abgebildet

Beweisstruktur:

- Sei $y \in B$, finde $x \in A$ mit $f(x) = y$
- Durch Einsetzen ergibt sich $y = f(x)$, kann man dies nach x auflösen, so ist f surjektiv.
  Ist $B = K^n$, z.B. $n = 2$, so wählt man $(a, b) \in K^2, f(x, y) = (a, b)$ und löst das lin. Gleichungssystem nach x und y auf

f surjektiv $\iff \text{Bild}\, f = B$

Injektivität

$f(x_1) = f(x_2) \Rightarrow x_1 = x_2$. Zwei verschiedene Elemente der Definitionsmenge bilden nicht auf gleiche Elemente der Wertemenge ab.

Beweisstruktur:

- $x_1, x_2 \in A$ mit $x_1 \neq x_2$
- Gibt es eine Kombination von x_1, x_2, sodass $f(x_1) = f(x_2)$, so ist f nicht injektiv
  Ist $A = K^n$, z.B. $n = 2$, so wählt man $(x_1, y_1), (x_2, y_2) \in K^2$ und vergleicht $f(x_1, y_1) = f(x_2, y_2)$. Hier erhält man zwei Gleichungen, setzt man die eine in die andere ein, so muss $x_1 = x_2$ bzw. $y_1 = y_2$ rauskommen.

f injektiv $\iff \text{Kern}\, f = \{0\}$

f injektiv $\iff f$ streng monoton steigend

1.2.1 Schnitt-/Vereinigungsbeweis von (Ur-)Bildern

- $f^{-1}(N_1 \cup N_2) = f^{-1}(N_1) \cup f^{-1}(N_2)$
  1. Sei $x \in f^{-1}(N_1 \cup N_2) \iff f(x) \in N_1 \cup N_2$
  2. Beweis weiterführen, bis man auf $x \in f^{-1}(N_1) \cup f^{-1}(N_2)$ kommt
- $f(M_1 \cup M_2) = f(M_1) \cup f(M_2)$
  1. Sei $y \in f(M_1 \cup M_2) \iff x \in M_1 \cup M_2$
  2. Beweis weiterführen, bis man auf $y \in f(M_1) \cup f(M_2)$ kommt

2. Algebraische Strukturen

2.1. Gruppen

Menge mit einer Verknüpfung $\circ$ (z.B. $+$, $\cdot$) $\Rightarrow (M, \circ)$

2.1.1 Halbgruppe

Falls für alle $a, b, c \in M$ das Assoziativgesetz gilt: $(ab)c \overset{!}{=} a(bc)$, hierbei beschreibt ab die Verknüpfung von a und b ($\circ$)

2.1.2 Monoid

Halbgruppe mit neutralem Element e: $ae = ea = a$

2.1.3 abelsche/kommutative (Halb)-Gruppe

(Halb-)Gruppe, wobei das Kommutativgesetz gilt: $ab = ba$

2.1.4 Gruppe

Eine Halbgruppe $(G, \circ)$ heißt Gruppe mit neutralem Element e, falls:

1. Die Gruppe abgeschlossen ist: $\forall a, b \in G : a \circ b \in G$
2. es zu jedem $a \in G$ ein $b \in G$ gibt mit $ab = ba = e$. b ist das Inverse von a und ist eindeutig. Man schreibt $b = a^{-1}$

symmetrische Gruppe S_n: Gruppe der Permutationen: $(\overset{1}{1}, \overset{2}{3}, \overset{3}{2})(\overset{1}{2}, \overset{2}{3}, \overset{3}{1}) = (3, 2, 1)$. Von rechts nach links gelesen:

1. Die Stelle 1 wird auf die 2 abgebildet, die Stelle 2 wird auf die 3 abgebildet. 1. Element des Ergebnisses, usw...

2.1.5 Untergruppe

Gruppe $(U, \circ)$, wobei $U \subset G$. Dann ist U Untergruppe von G

Axiome zum Beweis von Untergruppe:

1. $e \in U$
2. $v, w \in U \Rightarrow v \circ w \in U$
3. $v \in U \Rightarrow v^{-1} \in U$

2.2. Ring

Menge R mit zwei Verknüpfungen $(R, +, \cdot)$, falls gilt:

1. $(R, +)$ kommutative Gruppe mit neutralem Element e
2. $(R, \cdot)$ Halbgruppe
3. $\forall a, b, c \in R$ gilt $a(b + c) = ab + ac$ und $(b + c)a = ba + ca$ (Distributivgesetz)

2.3. Körper

1. $(R, +, \cdot)$ ist ein Ring
2. $(R \setminus \{$ e der kommutativen Gruppe des Rings$\}, \cdot)$ ist kommutative Gruppe

Wichtige Beispiele

- $\mathbb{Q}$ und $\mathbb{R}$ sind Körper
- $(\mathbb{Z}_p, \oplus_p, \odot_p)$ ist für jede Primzahl p ein Körper

2.4. Vektorraum

Eine Menge V ist K-Vektorraum (VR über Körper K) mit

1. Vektoraddition: $V \times V \to V, (v, w) \mapsto v + w$
2. Skalarmultiplikation: $K \times V \to V, (\lambda, v) \mapsto \lambda v$

wobei $\forall \lambda, \mu \in K$ und $\forall v, w \in V$ gilt:

1. $(\lambda\mu)v = \lambda(\mu v)$
2. $\lambda(v + w) = \lambda v + \lambda w$ und $(\lambda + \mu)v = \lambda v + \mu v$
3. $1v = v$

2.4.1 Untervektorraum

U ist Untervektorraum von V, wenn $U \subset V$, bzw. $\forall v, w \in U, \lambda \in K$

1. $v + w \in U$
2. $\lambda v \in U$
3. $U \neq \emptyset$ bzw. $e \in U$ (e der kommut. Gruppe des Ringes)

2.4.2 direkte Summe zweier UVRs

Zwei UVRs U_1, U_2 heißen direkte Summe $U_1 \oplus U_2$, wenn $U_1 \cap U_2 = \{0\}$. D.h. zwei UVRs treffen sich nur im Ursprung (zwei Geraden (UVR vom R^3) schneiden sich nur im Ursprung)

In der Summe $U_1 + U_2 = \{u_1 + u_2 | u_1 \in U_1, u_2 \in U_2\}$ ist die Darstellung $u = u_1 + u_2$ eindeutig. Es gibt nur eine mögliche Linearkombination! (Aus) Z.B. $\{(x, 0) | x \in \mathbb{R}\} \oplus \{(0, y) | x \in \mathbb{R}\} = \mathbb{R}^2$, da $(x, y) = (x, 0) + (0, y)$

2.4.3 Neue UVRs aus Alten

- $U_1 \cap U_2$ ist UVR
- $U_1 + U_2$ ist UVR
- $\Phi : V \to W$ linear mit $U \subset V, T \subset W$:
  $\Phi(U) = \{\Phi(u) | u \in U\}$ UVR von W
  $\Phi(T) = \{v \in V | \Phi(v) \in T\}$ UVR von V

2.5. Spann

Menge aller Vektoren, die aus Linearkombination der Argumente (hier v_1, v_2) hervorgehen,
z.B.: $\text{spann}(v_1, v_2) = \{av_1 + bv_2 | a, b \in \mathbb{R}\}$

- $\text{spann}\, M$ ist UVR von V, wenn $M \subset V$
- Sind U_1 und U_2 UVR von V: $\text{spann}(U_1 \cup U_2) = U_1 + U_2$
- $\text{spann}\, \emptyset = \{0\}$
- $\Phi : V \to W$ linear: $\text{spann}(\Phi(V)) = \Phi(\text{spann}\, V)$

3. Lineare Abbildungen

Seien V, W K-Vektorräume. Eine Abbildung $\Phi : V \to W$ heißt **Vektorraumhomomorphismus** oder **linear**, falls $\forall v, w \in V$ und $\forall \lambda \in K$ gilt:

- $\Phi(0) = 0$
- $\Phi(\lambda v + w) = \lambda\Phi(v) + \Phi(w)$

$L(V, W) := \{\Phi : V \to W | \Phi \text{ linear}\}$

Endomorphismen: VR-Homomorphismen von V auf sich selbst ($\Phi : V \to V$)
Isomorphismen: Bijektive VR-Homomorphismen
Automorphismen: Bijektive Endomorphismen

3.1. Kern

Sei $\Phi : V \to W$ eine lineare Abbildung, der $\text{Kern}\, \Phi$ ist die Menge aller Elemente aus V, die auf die 0 abgebildet werden.
$\text{Kern}\, \Phi := \{v \in V | \Phi(v) = 0\} = \Phi^{-1}(\{0\})$

3.2. Bild

Sei $\Phi : V \to W$ eine lineare Abbildung, das $\text{Bild}\, \Phi$ ist die Menge aller Elemente aus W, auf die abgebildet wird.
$\text{Bild}\, \Phi := \{\Phi(v) | v \in V\}$

3.3. Dimension

Menge an lin. unabh. Vektoren eines VRs ($f : V \to W$ lin.)
Rang: $\text{Rang}\, f := \dim(\text{Bild}\, f)$
Dimensionssatz: $\dim V = \dim(\text{Kern}\, f) + \dim(\text{Bild}\, f)$

- $\dim V = 0 \iff V = \{0\}$

3.4. Vektoraumisomorphismus

Zwei VRs sind isomorph $V \tilde{=} W$ genau dann, wenn

- Man eine bijektive lin. Abb. finden kann, die eine Basis von V auf eine Basis von W abbildet
- $\dim V = \dim W$

Koordinatensystem: Isomorphismus $\Phi : K^n \to V$

CONTINUE: Determinanten und Bilinearform

3.5. Basiswechsel

3.5.1 Basiswechselmatrix allg.

$[v]_{B_{neu}} = P_{B_{neu} \leftarrow B_{alt}} [v]_{B_{alt}}$

$[v]_{B_{neu}} = (a_1, ..., a_n)^T$ mit $[v]_{B_{alt}} \stackrel{!}{=} a_1[b_{1,neu}]_{B_{alt}} + ... + a_n[b_{n,neu}]_{B_{alt}}$

Basiswechselmatrix finden, die B_{alt} zu B_{neu} abbildet:

1. Nimm den j-ten (v_j) Basisvektor aus B_{alt}
2. Schreibe ihn in der neuen Basis mithilfe Linearkombination der neuen Basisvektoren $v_j = a_1 w_1 + ... + a_n w_n$
3. Die j-te Spalte von $P_{B_{neu} \leftarrow B_{alt}}$ ist der Vektor der Koeffizienten $(a_1, ..., a_n)^T$

3.5.2 Basiswechselmatrix R^n

Basiswechselmatrix von B_{alt} zu B_{neu}:

1. Basisvektoren von B_{alt} und B_{neu} als Matrix nebeneinander schreiben
2. $P_{B_{neu} \leftarrow B_{alt}} = B_{neu}^{-1} B_{alt}$
   $P_{B_{alt} \leftarrow B_{neu}} = B_{alt}^{-1} B_{neu}$

3.6. Darstellungsmatrix D

$D_{\text{Basis im Definitionsraum, Basis im Bildraum}}$
Beschreibt die Bilder der Basisvektoren einer lin. Abb.

3.6.1 Basiswechsel mit Basiswechselmatrix

Basiswechsel im Definitionsraum mit neuer Basis B_{neu}:
$D_{B_{neu},B} = D_{B_{alt},B} \times P_{B_{alt} \leftarrow B_{neu}}$
$D_{B_{neu},B} = \left[[f(b_{1,neu})]_B, ..., [f(b_{n,neu})]_B \right]$

Basiswechsel im Bildraum mit neuer Basis B_{neu}:
$D_{B,B_{neu}} = P_{B_{neu} \leftarrow B_{alt}} \times D_{B,B_{alt}}$
$D_{B,B_{neu}} = \left[[f(b_1)]_{B_{neu}}, ..., [f(b_n)]_{B_{neu}} \right]$

Basiswechsel im Definitionsraum mit B_{neu} und Bildraum mit C_{neu}:
$D_{B_{neu},C_{neu}} = P_{C_{neu} \leftarrow C_{alt}} \times D_{B_{alt},C_{alt}} \times P_{B_{alt} \leftarrow B_{neu}}$
$D_{B_{neu},C_{neu}} = \left[[f(b_{1,neu})]_{C_{neu}}, ..., [f(b_{n,neu})]_{C_{neu}} \right]$

3.6.2 Spezialfälle

Basiswechsel im Definitionsraum mit Standard-Basis im Bildraum:
Bilder der neuen Basisvektoren sind die Spalten der Darstellungsmatrix

Basiswechsel im Bildraum mit Standard-Basis im Definitionsraum:
Drücke die Bilder der Standard-Basisvektoren in der neuen Basis $\{b_1, ..., b_n\}$ aus: $f(e_j) \stackrel{!}{=} a_1 b_1 + ... + a_n b_n$. Die Koeffizienten $a_1, ..., a_n$ bilden die Spalten der Darstellungsmatrix.

3.7. Determinanten

$f : V \to V, \quad \omega$ Determinantenform:
$(\det f)\omega(v_1, ..., v_n) = \omega(f(v_1), ..., f(v_n))$

3.7.1 Eigenschaften

- Vertauscht man zwei Spalten/Zeilen von $A \to A' \Longrightarrow \det A = -\det A'$
- Skaliert man n Spalten mit λ, $A \to A' \Longleftrightarrow \det A = \lambda^n \det A'$
- Addiert man zwei Spalten aufeinander: $\det A$ bleibt gleich
- $\det(f \circ g) = \det(AB) = \det f \det g = \det A \det B$
- $\det A^{-1} = \frac{1}{\det A}$
- $\det A = \det A^T$

3.7.2 Laplace-Formel

Vorzeichenwechsel beispielhaft erklärt für $K^{3 \times 3}$

Term	Spalte	sign	# Vertauschungen
aei	$(1,2,3)$	$+$	0
afg	$(1,3,2)$	$-$	1
bfg	$(2,3,1)$	$+$	2

3.8. euklidische Vektorräume

Cauchy-Schwarz-Ungl.: $|\langle v, w \rangle| \leq ||v|| \, ||w||$

Sei $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ euklid. VR. Dann gilt $\forall v, w \in V$:

1. **Polarisation:** $\langle v, w \rangle = \frac{1}{4}(||v+w||^2 - ||v-w||^2)$
2. **Parallelogrammgleichung:**
   $2(||v||^2 + ||w||^2) = ||v+w||^2 + ||v-w||^2$

Für eine bel. Norm gilt: Die Parallelogrammgleichung gilt $\Longleftrightarrow$ Die Norm kommt von einem Skalarprodukt. Dann erhält man das Skalarprodukt durch Polarisation und es gilt: $||v|| = \sqrt{\langle v, v \rangle}$.

3.8.1 Skalarprodukt

$\langle x, y \rangle = x^T E y$

- bilinear: $\langle a, b+c \rangle = \langle a, b \rangle + \langle a, c \rangle$
- symmetr.: $\langle a, b \rangle = \langle b, a \rangle$
- pos. definit: $\langle v, v \rangle > 0$ oder $\langle v, v \rangle = 0 \Rightarrow v = 0$

3.8.2 Norm

Abbildung $|| \cdot || : V \to \mathbb{R}$ mit den Eigenschaften:

- $||\lambda v|| = |\lambda| \, ||v|| \quad \forall \lambda \in \mathbb{R}, v \in V$
- $||a|| > 0$ oder $||a|| = 0 \Rightarrow a = 0$
- $\forall v, w \in V$ gilt die Dreiecksungleichung:
  $||v+w|| \leq ||v|| + ||w||$

3.9. Gram-Schmidt-Orthonormalisierung

w_n Ausgangsvektoren, v_n Orthonormale Vektoren:
$\tilde{v_3} = w_3 - \langle w_3, v_1 \rangle v_1 - \langle w_3, v_2 \rangle v_2$

3.9.1 orthogonale Projektion

Abbildung $\pi_U : V \to U$ die Vektoren in V auf einen Unterraum projeziert.
Für eine Orthonormalbasis $u_1, ..., u_k$ von U gilt:
$\pi_U(v) = \sum_{i=1}^k \langle v, u_i \rangle u_i$

3.9.2 orthogonales Komplement $U^\perp$

Vektoren, die senkrecht zu einem Unterraum U sind.

- $U^\perp = \operatorname{Kern} \pi_U$
- $U^\perp$ sind alle Vektoren, dessen Skalarprodukt mit Vektoren aus dem Unterraum 0 ist: $A^T v = 0$ mit A als Matrix der Basen des Unterraums als Spalten.

3.9.3 Adjungierte f^* von $f \in \operatorname{End}(V)$

$\langle f(v), w \rangle = \langle v, f^*(w) \rangle$
Ist B Orthonormalbasis von V, so gilt: $D_{B,B}(f^*) = D_{B,B}(f)^T$

3.9.4 Orthogonale Abbildung

Bildet Orthonormalbasis auf Orthonormalbasis ab $\to$ Zeilen und Spalten der orthogonalen Matrix A sind Orthonormalbasen.
$A^T = A^{-1}$ und $\det A = \pm 1$

3.10. Vektorprodukt

$v \times x = \begin{pmatrix} v_2 w_3 - v_3 w_2 \\ v_3 w_1 - v_1 w_3 \\ v_1 w_2 - v_2 w_1 \end{pmatrix}$

$||v \times w|| = ||v|| \, ||w|| \sin \angle(v, w)$
$\det(u, v, w) = \langle u, v \times w \rangle$

3.11. Eigenvektoren und Eigenwerte

Berechnung zu Matrix A:
Eigenwerte: $\chi_A(\lambda) := \det(A - \lambda I) \stackrel{!}{=} 0$
Eigenvektoren: $E_\lambda = \operatorname{Kern}(A - \lambda I)$

3.11.1 Definitionen

- **Spektrum**: Menge an Eigenwerten einer Matrix
- **Eigenraum E_λ zum Eigenwert λ**: Unterraum, den die Eigenvektoren zu einem Eigenwert λ aufspannen
- **geometrische Vielfachheit**: $\dim E_\lambda$
- **algebraische Vielfachheit**: Die Vielfachheit der Nullstelle des charakteristischen Polynoms χ_A (z.B. doppelte Nullstelle)

3.11.2 Eigenschaften

- Basiswechsel mit Basiswechselmatrix B: $B^{-1}AB$ ändert die Eigenwerte von A nicht
- Eigenvektoren zu verschiedenen Eigenwerten sind linear unabhängig

3.12. unitäre Vektorräume

Vektorräume über $\mathbb{C}$, wobei gilt

- $\langle \cdot, \cdot \rangle$ ist linear im ersten Argument (2. Argument konstant gehalten)
- $\langle v, w_1 + w_2 \rangle = \langle v, w_1 \rangle + \langle v, w_2 \rangle$ (nur im 2. Argument)
- $\langle v, \lambda w \rangle = \overline{\lambda} \langle v, w \rangle$ (nur im 2. Argument)
- $\langle v, w \rangle = \overline{\langle w, v \rangle}$
- $\langle v, v \rangle > 0 \; \forall v \in V \setminus \{0\}$

Äquivalente ($\Longleftrightarrow$) Aussagen:

- f ist unitär
- f ist längentreu
- $f^* \circ f = f \circ f^* = id \Longleftrightarrow A^*A = AA^* = I$
- Die Zeilen und Spalten von A bilden jeweils eine Orthonormalbasis

3.13. Diagonalisierung

3.13.1 Diagonalisierbarkeit

- f ist diagonalisierbar, falls V eine Basis aus Eigenvektoren besitzt
- $D_f \in K^{n\times n}$ ist diagonalisierbar, falls $B^{-1}D_f B$ Diagonalgestalt hat (B: Basiswechselmatrix, D_f: Darstellungsmatrix)
- V kann als direkte Summe aller Eigenräume geschrieben werden: $\dim E_{\lambda_1} + ... + \dim E_{\lambda_k} = \dim V$. Die Basis aus Eigenvektoren bildet sich aus der Vereinigung der Basen der Eigenräume.
  Hat man z.B. zwei Mal den gleichen Eigenwert μ, so ist A nur diagonalisierbar, falls $\dim E_\mu = 2$ ist. Es also zwei Eigenvektoren zu dem Eigenwert μ gibt
- Jede Selbstadjungierte ($f^* = f$) ist diagonalisierbar mit einer Orthonormalbasis aus Eigenvektoren

3.13.2 Spur $\operatorname{tr} A$

Summe der Diagonaleinträge einer Matrix. Immer gleich der Summe der Eigenwerte

4. Matrix-Lookup-Table

4.1. Rechenregeln

- $A \in \mathbb{R}^{m\times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n\times k} \to AB$ definiert: $AB \in \mathbb{R}^{m\times k}$
- $\det A = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$, $A \in \mathbb{R}^{2\times 2}$
- $\det A = a_{11}(a_{22}a_{33} - a_{23}a_{32}) - a_{12}(a_{21}a_{33} - a_{23}a_{31}) + a_{13}(a_{21}a_{32} - a_{22}a_{31})$

4.2. Standard-Matrix

- Menge an lin. unabh. Spalten/Zeilen von A: $\operatorname{Rang} A$
- $\dim(\operatorname{Kern} A) =$ Spaltenanzahl $- \operatorname{Rang} A$
- $f : V \to W$: $\dim V =$ Spaltenanzahl, $\dim W =$ Zeilenanzahl
- $\operatorname{Rang}(AB) \leq \min(\operatorname{Rang} A, \operatorname{Rang} B)$

4.2.1 Invertierbarkeit $A \in \operatorname{Mat}(n, n, K)$

- A invertb. $\iff \operatorname{Rang} A = n \iff \dim(\operatorname{Kern} A) = 0 \to A$ besitzt keine Nullzeile/-spalte
- A invertierbar $\iff A$ bijektiv
- A invertierbar $\iff \det A \neq 0$
- A Nullzeile/-spalte $\iff A$ nicht invertb.

4.2.2 Transposition

- $\operatorname{Rang} A = \operatorname{Rang} A^T$ (Zeilenrang = Spaltenrang)
- symmetr. Matrix: $A^T = A$: $a_{ji} = a_{ij}$
- schiefsymmetr. Matrix: $A^T = -A^T$: $a_{ji} = -a_{ij}$
- $(A^T)^{-1} = (A^{-1})^T$

4.3. Gauß

- Anzahl der lin. unabh. Nicht-Nullzeilen $\iff \operatorname{Rang} A$

4.3.1 Lösbarkeit der erw. Matrix $[A|b]$

- Unlösbar: Es existiert Nullzeile links und ein Nicht-Null Eintrag rechts
- Eindeutig lösbar: $\operatorname{Rang} A =$ Anzahl der Variablen und $b \in \operatorname{Bild} A$
- Unendl. viele Lösungen: $\operatorname{Rang} A <$ Anzahl der Variablen $\to$ Nullzeile rechts und Nulleintrag links
- Homog. System $b = 0$: Lösungsmenge ist VR - der $\operatorname{Kern} A \Rightarrow \dim L = \dim V - \operatorname{Rang} A$
- Inhomog. System: Lösungsmenge ist Partikularlösung + Kern (affiner Unterraum)