

## ÜBUNG 9

Ausgabedatum: 9. Dezember 2024  
Abgabedatum: 16. Dezember 2024

**Hausaufgabe 9.1** (Operationen auf konvexen Mengen) 1 + 2 + 4 + 2 = 9 Punkte

Beweisen Sie Satz 13.3 aus dem Skript, also die folgenden Aussagen:

- (a) Es sei  $\{C_j\}_{j \in J}$  eine beliebige Familie konvexer Mengen in  $\mathbb{R}^n$ . Dann ist der Durchschnitt  $\bigcap_{j \in J} C_j$  konvex.
- (b) Es seien  $C_i \subseteq \mathbb{R}^{n_i}$  konvex,  $i = 1, \dots, k$ . Dann ist das kartesische Produkt  $C_1 \times \dots \times C_k$  konvex in  $\mathbb{R}^{n_1} \times \dots \times \mathbb{R}^{n_k}$ .
- (c) Es sei  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  eine (affin-)lineare Abbildung, also  $f(x) = Ax + b$ , und  $C \subseteq \mathbb{R}^n$  sowie  $D \subseteq \mathbb{R}^m$  konvexe Mengen. Dann sind das Bild  $f(C) \subseteq \mathbb{R}^m$  und das Urbild  $f^{-1}(D) \subseteq \mathbb{R}^n$  konvex.
- (d) Sind  $C_1, C_2 \subseteq \mathbb{R}^n$  konvex, dann sind die **Skalierung** (englisch: *scaling*)

$$\beta C_1 = \{\beta x_1 \mid x_1 \in C_1\} \quad \text{für } \beta \in \mathbb{R}$$

sowie die **Minkowski-Summe**

$$C_1 + C_2 = \{x_1 + x_2 \mid x_1 \in C_1, x_2 \in C_2\}$$

konvex.

**Hausaufgabe 9.2** (Extrempunkte konvexer Mengen) 1 + 1 + 3 + 1 = 6 Punkte

Die Definition Definition 6.15 eines Extrempunkts eines Polyeders können wir mit Hilfe der Beobachtungen in Hausaufgabe 5.1 direkt auf allgemeinere konvexe Mengen erweitern.

**Definition** (Extrempunkte konvexer Mengen).

Ein Vektor  $x$  aus einer konvexen Menge  $C \subseteq \mathbb{R}^n$  heißt **Extrempunkt** von  $C$ , wenn aus

$$x = \alpha y + (1 - \alpha) z$$

für  $y, z \in C$  und  $\alpha \in (0, 1)$  bereits  $y = z$  folgt.

- (a) Bestimmen Sie, wieviele Extrempunkte die abgeschlossene Kreisscheibe

$$K := \{x \in \mathbb{R}^n \mid \|x\| \leq r\}, \quad r > 0$$

besitzt.

- (b) In [Hausaufgabe 5.1](#) haben wir gezeigt, dass für jede Ecke eines Polyeders (jeden Extrempunkt) eine lineare Funktion existiert, so dass die Ecke der eindeutige Minimierer der Funktion über dem Polyeder ist. Geben Sie ein Beispiel an, das zeigt, dass diese Aussage nicht für Extrempunkte beliebiger kompakter, konvexer Mengen gilt.
- (c) Es sei eine Menge von Punkten  $V = \{x_1, \dots, x_k\}$ ,  $k \in \mathbb{N}$ ,  $k \geq 1$  gegeben. Zeigen Sie, dass die Extrempunkte von  $\text{conv}(V)$  in  $V$  liegen.
- (d) Es sei eine konvexe Menge  $C \subseteq \mathbb{R}^n$  gegeben. Zeigen Sie, dass die Menge  $\{x \in C \mid C \setminus \{x\} \text{ ist konvex}\}$  genau die Menge der Extrempunkte von  $C$  ist.

**Hausaufgabe 9.3** (Operationen auf konvexen Funktionen)

1 + 2 + 2 + 1 = 6 Punkte

Beweisen Sie Satz [13.18](#) aus der Vorlesung, also die folgenden Aussagen:

- (a) Sind  $f_i: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$  konvex auf  $\mathbb{R}^n$  und  $\beta_i \geq 0$  für  $i = 1, \dots, m$ , dann ist die durch

$$f(x) := \sum_{i=1}^m \beta_i f_i(x)$$

definierte Funktion  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$  konvex auf  $\mathbb{R}^n$ .

- (b) Sind die Funktionen  $f_i: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$  konvex auf  $\mathbb{R}^n$  für alle  $i$  aus irgendeiner Indexmenge  $I$ , dann ist die durch das punktweise Supremum

$$f(x) := \sup\{f_i(x) \mid i \in I\}$$

definierte Funktion  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$  konvex auf  $\mathbb{R}^n$ .

- (c) Ist  $g: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  affin-linear und  $f: \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$  konvex, so ist  $(f \circ g): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$  konvex auf  $\mathbb{R}^n$ .
- (d) Ist  $g: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  konvex und ist  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$  konvex und monoton wachsend, so ist  $(f \circ g): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$  konvex.

**Zusatzaufgabe 9.4** (Stabilität von Abgeschlossenheit unter Bildung der konvexen Hülle.) 3 Bonuspunkte

Beweisen oder widerlegen Sie: Ist  $M \subseteq \mathbb{R}^n$  abgeschlossen, dann ist auch  $\text{conv}(M)$  abgeschlossen.

**Zusatzaufgabe 9.5** (Jensensche Ungleichung) 4 Bonuspunkte

Zeigen Sie, dass  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$  genau dann konvex ist, wenn für jede beliebige endliche Mengen von Punkten  $\{x_1, \dots, x_k\} \in \mathbb{R}^n$  und beliebige  $(\alpha_1, \dots, \alpha_k)^\top \in \mathbb{R}^k$  mit  $\sum_{i=1}^k \alpha_i = 1$  und  $(\alpha_1, \dots, \alpha_k)^\top \geq 0$

$$f\left(\sum_{i=1}^k \alpha_i x_i\right) \leq \sum_{i=1}^k \alpha_i f(x_i)$$

gilt.

Bitte reichen Sie Ihre Lösungen als ein PDF auf [Mampf](#) ein.