

3 Übung vom 12.05.

5. Aufgabe

(a) Es seien

$$M = \bigcap_{i=1}^k \{f_i \leq \alpha_i\} = \bigcap_{i=1}^m \{g_i \leq \beta_i\}$$

zwei Darstellungen von M . Es sei weiter $i \in \{1, \dots, k\}$ mit

$$F := M \cap \{f_i = \alpha_i\} \neq \emptyset$$

Behauptung: $\exists J \subset \{1, \dots, m\}$, $J \neq \emptyset$ [mit $F = M \cap \bigcap_{j \in J} \{g_j = \beta_j\}$]

$F \neq \emptyset$, also besitzt F relative innere Punkte, d.h. es existiert ein $\alpha > 0$ mit

$$B := \underbrace{B_\alpha(x)}_{\text{Kugel um } x \text{ mit Radius } \alpha} \cap \text{aff } F \subset F$$

wobei $x \in \text{rel int } F$ sein soll.

Wir definieren

$$J := \{i \in \{1, \dots, k\} \mid g_j(x) = \beta_j\}$$

Weil $x \in F \subset \{f_i = \alpha_i\}$, gilt $x \notin \text{int } M$. Also gilt: $\exists j \in \{1, \dots, k\} : g_j(x) = \beta_j$, somit ist $J \neq \emptyset$.

Wir setzen

$$\tilde{F} := M \cap \bigcap_{j \in J} \{g_j = \beta_j\}$$

z.z.: $\tilde{F} = F$

„ \supset “: Sei $j \in J$ und $z \in \mathbb{R}^n$ so, dass $x + z \in B$. Dann gilt:

$$x + z \in B \subset F \subset \{g_j \leq \beta_j\}$$

$$x - z \in B \subset F \subset \{g_j \leq \beta_j\}$$

Somit:

$$g_j(x + z) = g_j(x) + g_j(z) = \beta_j + g_j(z) \leq \beta_j$$

$$g_j(x - z) = g_j(x) - g_j(z) = \beta_j - g_j(z) \leq \beta_j$$

$$\Rightarrow g_j(z) = 0$$

Es gilt: $B \subset \{g_j = \beta_j\}$ für alle $j \in J$

$$\left. \begin{array}{l} F \subset \text{aff } F = \text{aff } B \subset \bigcap_{j \in J} \{g_j = \beta_j\} \\ F \subset M \end{array} \right\} \Rightarrow F \subset \tilde{F}$$

„ \subset “: Sei $y \in \tilde{F}$ und x wie zuvor.

Der Strahl $h := \{y + \beta(x - y) \mid \beta \geq 0\}$ erfüllt $h \subset \{g_j = \beta_j\} \forall j \in J$.

Weil $g_j(x) < \beta_j \forall j \notin J$ liegt $x \in \text{int} \bigcap_{j \notin J} \{g_j = \beta_j\}$.

Damit existiert aber ein $z \in h \cap M$ mit $x \in [y, z]$.

Es gilt $f_i(x) = \alpha_i$ und $f_i(y) \leq \alpha_i$ und $f_i(z) \leq \alpha_i$, sowie $f_i(\alpha y + (1 - \alpha)z) = f(x)$ für ein $\alpha \in (0, 1)$.

$$\alpha_i = f_i(x) = \alpha f_i(y) + (1 - \alpha)f_i(z) \Rightarrow f_i(y) = \alpha_i, f_i(z) = \alpha_i \Rightarrow y \in F$$

(b) Falls $M = \mathbb{R}^n$, so hat M keine Seiten.

Es sei also

$$M = \bigcap_{i=1}^k \{f_i \leq \alpha_i\}, \quad k \geq 1 \quad (*)$$

Ist $F = M \cap \{f_{i_0} = \alpha_{i_0}\}$ für ein $i_0 \in \{1, \dots, k\}$, so gilt $F = M \cap \{f_{i_0} \leq \alpha_{i_0}\} \cap \{f_{i_0} \geq \alpha_{i_0}\}$ und F ist polyedrisch nach Definition.

Jeder andere Seitentyp ist nicht-leerer Schnitt solcher Mengen, also auch polyedrisch.

(c) Es sei M in der Form $(*)$ gegeben und $F = M \cap \bigcap_{i \in I} \{f_i = \alpha_i\} = M \cap \bigcap_{i \in I} \{f_i \leq \alpha_i\} \cap \bigcap_{i \in I} \{f_i \geq \alpha_i\}$ mit $\emptyset \neq I \subset \{1, \dots, k\}$. (**)

Für jede Seite F' von F gilt also

$$F' = F \cap \bigcap_{j \in J} \{f_j = \alpha_j\} = M \cap \bigcap_{i \in I \cup J} \{f_i = \alpha_i\}$$

mit $J \subset \{1, \dots, k\}$.

Also ist F' Seite von M .

(d) Es seien F', F Seiten von M , $F' \subset F$. Dann existieren $I, I' \subset \{1, \dots, k\}$ mit

$$F = \underbrace{\bigcap_{i=1}^k \{f_i \leq \alpha_i\}}_{=M} \cap \bigcap_{i \in I} \{f_i = \alpha_i\}$$

$$F' = M \cap \bigcap_{i \in I'} \{f_i = \alpha_i\}$$

Es gilt:

$$F' = F \cap F' = M \cap \bigcap_{i \in I} \{f_i = \alpha_i\} \cap \bigcap_{i \in I'} \{f_i = \alpha_i\} = F \cap \bigcap_{i \in I, I'} \{f_i = \alpha_i\}$$

6. Aufgabe

„(i) \Rightarrow (ii)“: Es sei s Extremalstrahl, d.h.

$$s = M \cap \bigcap_{i \in I} \{f_i = \alpha_i\} \quad \text{mit } I \subset \{1, \dots, k\}$$

$$(M = \bigcap_{i=1}^k \{f_i \leq \alpha_i\})$$

Weiter sei $x \in s$ und $y, z \in M$ mit $x = \alpha y + (1 - \alpha)z$.

$$\text{Für } i \in I \text{ gilt: } \alpha_i = f_i(x) = \alpha \underbrace{f_i(y)}_{\leq \alpha_i} + (1 - \alpha) \underbrace{f_i(z)}_{\leq \alpha_i} \Rightarrow f_i(y) = \alpha_i, f_i(z) = \alpha_i$$

$$\Rightarrow y, z \in s$$

„(ii) \Rightarrow (i)“: Wir definieren

$$I := \{i \in \{1, \dots, k\} \mid s \subset \{f_i = \alpha_i\}\}$$

und

$$F := M \cap \bigcap_{i \in I} \{f_i = \alpha_i\}$$

$$\mathbf{z.z.: } I \neq \emptyset, F = s$$

Falls $I = \emptyset$, dann existiert $x \in s$ mit $x \in \bigcap_{i=1}^k \{f_i < \alpha_i\} = \text{int } M$.

Dann existieren aber $y, z \in M$ mit $y, z \notin s$ und $x \in [y, z]$, was ein Widerspruch zur Voraussetzung ist.

Also $I \neq \emptyset$.

Nach Definition von F ist $s \subset F$ klar.

$$\mathbf{z.z.: } F \subset s$$

Sei $y \in F$ und $x = x^0 + u^0$ (wobei $s = \{x^0 + \beta u^0 \mid \beta \geq 0\}$).

Wir betrachten den Strahl

$$h := \{y + \beta(x - y) \mid \beta \geq 0\}$$

Für $i \in I$ gilt: $h \subset \{f_i = \alpha_i\}$, also $h \subset \bigcap_{i \in I} \{f_i = \alpha_i\}$.

Wie zuvor: $f_i(x) < \alpha_i \quad \forall i \notin I$.

Also gilt $x \in \bigcap_{i \notin I} \{f_i < \alpha_i\}$.

Damit existiert aber ein $z \in h$ mit $z \neq x$ und $x \in [y, z]$. Wegen (ii) folgt daraus, dass $y, z \in s$.

Also gilt $F \subset s$.

7. Aufgabe

$M \subset \mathbb{R}^n$ mit M nichtleer, geradenfrei, polyedrisch

„ \Rightarrow “: (Sei M ein Kegel.)

$M \neq \emptyset$, M polyedrisch, M geradenfrei $\Rightarrow \text{vert } M \neq \emptyset$

Sei $x \in \text{vert } M$.

Falls $x \neq 0$, so gilt $0 \in M$, $2x \in M$ und es gilt $x \in [0, 2x]$. **Widerspruch zu x Ecke!**

Also muss $x = 0$ sein. [Also: $\text{vert } M = \{0\}$]

„ \Rightarrow “: Sei $\text{vert } M = \{0\}$.

Nach Vorlesung: (*) $M = \text{conv} \{ \{0\} \cup \text{exth } M \}$

[exth ist die Vereinigung aller Extremalstrahlen]

Ist $M = \{0\}$, so ist M Kegel. Also gelte nun $\text{exth } M \neq \emptyset$.

Es sei $s \in \text{exth } M$, also $s = \{x^0 + \beta u^0 \mid \beta \geq 0\}$, $x^0 \in \mathbb{R}^n$, $u^0 \in S^{n-1}$.

[$S^{n-1} = \{u \in \mathbb{R}^n : \|u\| = 1\}$ Einheitssphäre]

$$\begin{aligned} x^0 \in \text{vert } s &\Rightarrow x^0 \text{ ist 0-Seite von } s \\ &\stackrel{\text{Aufgabe 5}}{\Rightarrow} x^0 \text{ ist 0-Seite von } M \\ &\Rightarrow x^0 \in \text{vert } M \\ &\Rightarrow x^0 = 0 \end{aligned}$$

D.h. jeder Extremalstrahl ist von der Form $\{\beta u^0 \mid \beta \geq 0\}$ für ein $u^0 \in S^{n-1}$.

Seien $u^1, \dots, u^k \in S^{n-1}$ die Richtungen der Extremalstrahlen. Dann gilt:

$$M = \text{conv} \left\{ \{0\} \cup \bigcup_{i=1}^k \{\beta u^i \mid \beta \geq 0\} \right\}$$

und man rechnet einfach nach, dass M Kegel ist.

8. Aufgabe

O.E. $y^i \neq 0$ für $i = 1, \dots, m$.

Wir definieren $M := \text{conv} \{y^1, \dots, y^m\}$.

Dann gilt: $0 \notin M$. Denn andernfalls:

$$0 = \beta_1 y^1 + \dots + \beta_m y^m \quad \text{mit } \beta_i \geq 0 \text{ und } \sum_{i=1}^m \beta_i = 1$$

$$\text{O.E. } \xRightarrow{\beta_1 > 0} y^1 = -\left(\underbrace{\alpha_2}_{=\frac{\beta_2}{\beta_1}} y^2 + \dots + \underbrace{\alpha_m}_{=\frac{\beta_m}{\beta_1}} y^m\right) \quad \text{mit } \alpha_i \geq 0$$

Also gilt $-y^1 \in V \Rightarrow$ Gerade, die von y^1 und $-y^1$ aufgespannt wird, liegt auch in V . **Widerspruch!**

Es sei $x_0 \in M$ mit $\|x_0\| = \min_{x \in M} \|x\|$.

Wir definieren $f := \langle \cdot, x_0 \rangle$.

Dann gilt: $f(z) \geq 0 \quad \forall z \in M$. Ansonsten Widerspruch zur Wahl von x_0 !⁽¹⁾

$V = \bigcup_{\alpha \geq 0} \alpha M \subset \{f \geq 0\}$ und $V \setminus \{0\} \subset \{f > 0\}$ und wir haben die Behauptung.

Anmerkung (1): Man kann sich das anschaulich klar machen. Im zweidimensionalen zeichne die Gerade $\{f = 0\}$. Sei $z \in M$ in der Halbebene, in der x_0 nicht liegt, z.B. $z \in \{f < 0\}$ (dann $f(z) < 0$). $[z, x_0] \subset M$ und schon findet man einen Punkt der näher am Nullpunkt ist als x_0 . [...]

Zusatzaufgabe

Musterlösung online.