

VORLESUNGSSKRIPT GRUNDLAGEN DER OPTIMIERUNG

WINTERSEMESTER 2023

Evelyn Herberg*

2024-01-20

*Interdisciplinary Center for Scientific Computing, Heidelberg University, 69120 Heidelberg, Germany
(evelyn.herberg@iwr.uni-heidelberg.de, <https://scoop.iwr.uni-heidelberg.de/team/eherberg>).

Basierend auf dem Skript von Prof. Dr. Roland Herzog zur gleichen Veranstaltung aus dem WS 2022.

Inhaltsverzeichnis

o	Einführung	5
§ 1	Grundbegriffe und Klassifikation von Optimierungsaufgaben	5
§ 2	Notation und Wiederholung von Diffbarkeitsbegriffen	10
1	Unrestringierte Optimierung	13
§ 3	Optimalitätsbedingungen der unrestringierten Optimierung	13
§ 4	Das Gradientenverfahren	15
§ 4.1	Vorstellung des Verfahrens	16
§ 4.2	Das Gradientenverfahren in einem alternativen Skalarprodukt	22
§ 4.3	Konvergenz bei quadratischer Zielfunktion und exakter Liniensuche	24
§ 5	Das Newton-Verfahren	31
§ 5.1	Einige Hilfsresultate	32
§ 5.2	Das lokale Newton-Verfahren für die Nullstellenbestimmung $F(x) = 0$	35
§ 5.3	Das lokale Newton-Verfahren in der Optimierung	37
§ 5.4	Ein globalisiertes Newton-Verfahren in der Optimierung	38
2	Lineare Optimierung	42
§ 6	Einführung	42
§ 6.1	Existenz von Lösungen	47
§ 6.2	Die Bedeutung der Ecken	51
§ 7	Simplex-Algorithmus	57
§ 7.1	Der Simplex-Schritt	57
§ 7.2	Der Simplex-Algorithmus	62
§ 8	Optimalitätsbedingungen der linearen Optimierung (Dualität)	67
§ 9	Duales Simplex-Verfahren	75
§ 10	Sensitivitätsanalyse	80
3	Konvexe Optimierung	86
§ 11	Einführung	86
§ 11.1	Konvexe Mengen	86

§ 11.2	Konvexe Funktionen	90
§ 12	Konvexe Optimierungsaufgaben	101
§ 13	Trennungssätze für konvexe Mengen	103
§ 13.1	Die Aufgabe der orthogonalen Projektion	103
§ 13.2	Affine Unterräume	105
§ 13.3	Topologische Eigenschaften konvexer Mengen	110
§ 13.4	Trennungssätze	118
§ 14	Das Subdifferential und die Richtungsableitung konvexer Funktionen	126
§ 14.1	Das Subdifferential	126
§ 14.2	Die Richtungsableitung	133
§ 14.3	Zusammenhang zwischen Subdifferential und Richtungsableitung	138
§ 14.4	Weitere Eigenschaften konvexer Funktionen	140

Kapitel 0 Einführung

§ 1 GRUNDBEGRIFFE UND KLASSIFIKATION VON OPTIMIERUNGSAUFGABEN

Die mathematische Optimierung beschäftigt sich mit Aufgaben der Form

$$\left. \begin{array}{lll} \text{Minimiere} & f(x) & \text{über } x \in \Omega \quad (\text{Zielfunktion}) \\ \text{sodass} & g_i(x) \leq 0 & \text{für } i \in \mathcal{I} \quad (\text{Ungleichungsnebenbedingungen}) \\ \text{und} & h_j(x) = 0 & \text{für } j \in \mathcal{E}. \quad (\text{Gleichungsnebenbedingungen}) \end{array} \right\} \quad (1.1)$$

$\Omega \subseteq \mathbb{R}^n$ heißt die **Grundmenge** und x die **Optimierungsvariable** oder einfach die **Variable** der Aufgabe. Oft sind dabei

- die Funktionen $f, g_i, h_j: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ hinreichend glatt (C^2 -Funktionen),
- \mathcal{I} und \mathcal{E} endliche (evtl. leere) Indexmengen.

Im Fall $\Omega = \mathbb{R}^n$ spricht man von **kontinuierlicher Optimierung**. Im Fall $\Omega = \mathbb{Z}^n$ handelt es sich um **diskrete (ganzzahlige) Optimierungsaufgaben**, die in dieser Lehrveranstaltung nicht behandelt werden.

Definition 1.1 (Grundbegriffe).

(i) Für eine Optimierungsaufgabe (1.1) heißt

$$F := \{x \in \Omega \mid g_i(x) \leq 0 \text{ für alle } i \in \mathcal{I}, h_j(x) = 0 \text{ für alle } j \in \mathcal{E}\}$$

die **zulässige Menge** (englisch: **feasible set**). Jedes $x \in F$ heißt **zulässiger Punkt** (englisch: **feasible point**).

(ii) Die Ungleichung $g_i(x) \leq 0$ heißt an der Stelle x **aktiv**, wenn $g_i(x) = 0$ gilt. Sie heißt **inaktiv**, wenn $g_i(x) < 0$ ist. Sie heißt **verletzt**, wenn $g_i(x) > 0$ ist.

(iii) Der Wert

$$f^* := \inf \{f(x) \mid x \in F\}$$

heißt der **Infimalwert** der Aufgabe (1.1).

(iv) Im Fall $F = \emptyset$ nennt man die Aufgabe (1.1) **unzulässig** (englisch: **infeasible**). Es gilt dann $f^* = +\infty$. Im Fall $f^* = -\infty$ heißt das Problem **unbeschränkt** (englisch: **unbounded**).

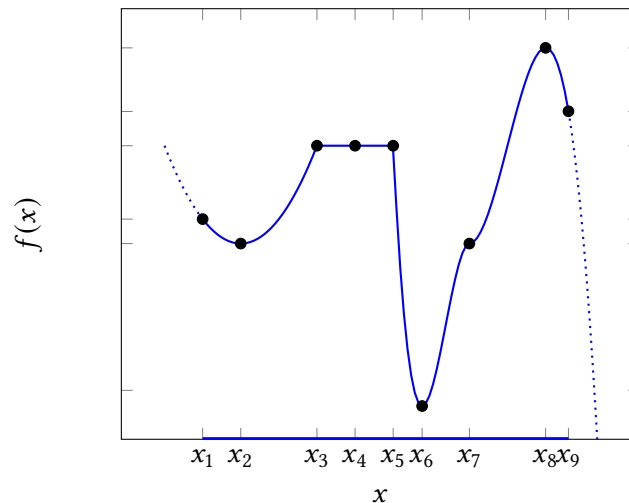


Abbildung 1.1: Illustration der Begriffe aus Definition 1.1 anhand einer Zielfunktion $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Die zulässige Menge ist das auf der x -Achse markierte Intervall.

- (v) Ein Punkt $x^* \in F$ heißt ein **globaler Minimierer**, **globale Minimalstelle** oder **global optimale Lösung**, wenn gilt:

$$f(x^*) \leq f(x) \text{ für alle } x \in F.$$

Äquivalent dazu ist: $f(x^*) = f^*$. In diesem Fall heißt die Zahl f^* dann auch das **globale Minimum** oder der **globale Minimalwert** von (1.1).

- (vi) Ein globaler Minimierer x^* heißt **strikt**, wenn gilt:

$$f(x^*) < f(x) \text{ für alle } x \in F, x \neq x^*.$$

- (vii) Ein Punkt $x^* \in F$ heißt ein **lokaler Minimierer**, **lokale Minimalstelle** oder **lokal optimale Lösung**, wenn es eine Umgebung $U(x^*)$ gibt, sodass gilt:

$$f(x^*) \leq f(x) \text{ für alle } x \in F \cap U(x^*).$$

In diesem Fall heißt $f(x^*)$ dann auch ein **lokales Minimum** oder ein **lokaler Minimalwert** von (1.1).

- (viii) Ein lokaler Minimierer x^* heißt **strikt**, wenn gilt:

$$f(x^*) < f(x) \text{ für alle } x \in F \cap U(x^*), x \neq x^*.$$

- (ix) Eine Optimierungsaufgabe (1.1) heißt **lösbar**, wenn sie mindestens einen globalen Minimierer besitzt, also einen zulässigen Punkt, an dem der Infimalwert angenommen wird. Ansonsten heißt die Aufgabe **unlösbar**.

Beachte: Eine Maximierungsaufgabe „Maximiere $f(x)$ über $x \in F$ “ kann durch Übergang zu „Minimiere $-f(x)$ über $x \in F$ “ immer in eine Minimierungsaufgabe umgeschrieben werden.

Neben der Frage, welche verschiedenen Klassen von Optimierungsaufgaben es gibt, sind folgende Fragestellungen in der mathematischen Optimierung von Bedeutung:

- (1) Wann existieren Optimallösungen?
- (2) Wie erkennt man sie? (\leadsto Optimalitätsbedingungen)
- (3) Wie kann man Lösungen algorithmisch berechnen?

In dieser Lehrveranstaltung werden wir diese Fragen für einige wichtige Typen von Optimierungsaufgaben (1.1) beantworten. Aufgaben der allgemeinen Form (1.1) mit nichtlinearer Zielfunktion und/oder nichtlinearen Nebenbedingungen werden in der Lehrveranstaltung *Nichtlineare Optimierung* behandelt. Später schließen sich Veranstaltungen beispielsweise zu unendlich-dimensionalen Optimierungsaufgaben, insbesondere Aufgaben der Optimierung mit partiellen Differentialgleichungen, an.

Solange nichts anderes gesagt wird, gehen wir ab jetzt immer von $\Omega = \mathbb{R}^n$ aus.

Definition 1.2 (Klassifikation von Optimierungsaufgaben).

- (i) Eine Optimierungsaufgabe (1.1) heißt **frei** oder **unrestringiert** (englisch: **unconstrained**), wenn $\mathcal{I} = \mathcal{E} = \emptyset$ ist, andernfalls **gleichungs-** und/oder **ungleichungs-beschränkt** oder **-restringiert** (englisch: **equality constrained**, **inequality constrained**).¹

- (ii) Ungleichungsbeschränkungen der besonders einfachen Art

$$\ell_i \leq x_i \leq u_i, \quad i = 1, \dots, n$$

mit $\ell_i \in \mathbb{R} \cup \{-\infty\}$ und $u_i \in \mathbb{R} \cup \{\infty\}$ heißen **Box-Beschränkungen** (englisch: **box constraints**, **bound constraints**) mit **oberer Schranke** u und **unterer Schranke** ℓ .

- (iii) Sind f , g und h (affin-)lineare Funktionen von x , so sprechen wir von **linearer Optimierung**.² Eine lineare Optimierungsaufgabe heißt auch **lineares Programm** (englisch: **linear program**, **LP**), also z. B.

$$\text{Minimiere } c^\top x \quad \text{sodass} \quad Ax = b \quad \text{und} \quad x \geq 0.$$

- (iv) Sind allgemeiner f und alle g_i konvexe Funktionen und sind alle h_j wieder (affin-)linear, so sprechen wir von **konvexer Optimierung**. Hierbei darf außerdem noch $\Omega \subseteq \mathbb{R}^n$ eine konvexe Teilmenge sein.³

- (v) Ist f ein quadratisches Polynom und sind g und h (affin-)linear, so sprechen wir von **quadratischer Optimierung**. Eine quadratisches Optimierungsaufgabe heißt auch **quadratisches Programm (QP)**.

¹Wir behandeln unrestringierte Aufgaben in Kapitel 1.

²Diese werden in Kapitel 2 behandelt.

³Diese Aufgaben werden in Kapitel 3 besprochen.

- (vi) Im allgemeinen Fall spricht man von **nichtlinearer Optimierung** und von einem **nichtlinearen Programm (NLP)**. Nichtlineare Optimierungsaufgaben und zugehörige Lösungsalgorithmen werden in der Lehrveranstaltung Nichtlineare Optimierung behandelt.

Bemerkung. Die Grundsteine der linearen Optimierung wurden in den 1940er Jahren von einer Projektgruppe SCOOP (Scientific Computation of Optimum Programs) um **George Dantzig** (1914–2005) bei der U.S. Air Force gelegt. Im militärischen Sprachgebrauch wurde die Ressourcenplanung als die Erstellung eines Programms bezeichnet, und diese Bezeichnung hat sich erhalten. George Dantzig entwickelte 1947 das Simplex-Verfahren (siehe **Kapitel 2**). Mehr zur Historie findet man in **Gass, Assad, 2005**.

Nicht jede Optimierungsaufgabe ist lösbar, besitzt also einen globalen Minimierer. Ein Kriterium für die Lösbarkeit liefert der Satz von Weierstraß aus der Analysis: „Stetige reellwertige Funktionen nehmen auf kompakten Mengen ihr Minimum (und ihr Maximum) an.“ Damit folgt sofort: Wenn die Zielfunktion $f: F \rightarrow \mathbb{R}$ stetig und die zulässige Menge F kompakt ist, dann besitzt die Aufgabe

$$\text{Minimiere } f(x) \quad \text{über } x \in F$$

mindestens einen globalen Minimierer. Wir wollen diese Voraussetzungen hier in zwei Richtungen abschwächen:

- (1) Es ist bereits ausreichend, dass es ein Niveau $m \in \mathbb{R}$ gibt, sodass die zugehörige **Sublevelmenge** (englisch: **sublevel set**) von f

$$L := \{x \in F \mid f(x) \leq m\}$$

nichtleer und kompakt ist.

- (2) An Stelle der Stetigkeit von f wird nur die Unterhalbstetigkeit benötigt:

Definition 1.3 (Unterhalbstetigkeit). Es sei $F \subseteq \mathbb{R}^n$ eine nichtleere Menge. Eine Funktion $f: F \rightarrow \mathbb{R}$ heißt **unterhalbstetig** (auch: **halbstetig von unten**, englisch: **lower semicontinuous**) auf F , wenn gilt:

$$(x^{(k)}) \subseteq F, \quad x^{(k)} \rightarrow x^* \in F \quad \Rightarrow \quad \liminf_{k \rightarrow \infty} f(x^{(k)}) \geq f(x^*).$$

Lemma 1.4 (Äquivalenz zur Unterhalbstetigkeit).

Es sei $F \subseteq \mathbb{R}^n$ eine nichtleere Menge. Für eine Funktion $f: F \rightarrow \mathbb{R}$ sind äquivalent:

- (i) f ist unterhalbstetig auf F .
 (ii) Alle Sublevelmengen $\{x \in F \mid f(x) \leq m\}$, $m \in \mathbb{R}$, sind abgeschlossen in F .

Beweis. Wir nehmen zunächst **Aussage (i)** an. Es sei $L := \{x \in F \mid f(x) \leq m\}$ eine Sublevelmenge von f . Wenn L leer ist, ist nichts zu zeigen. Andernfalls betrachten wir eine Folge $(x^{(k)}) \subseteq L$, die in F konvergiert, also $x^{(k)} \rightarrow x^* \in F$. Dann gilt nach Definition der Unterhalbstetigkeit $f(x^*) \leq \liminf_{k \rightarrow \infty} f(x^{(k)})$ und weiter $f(x^{(k)}) \leq m$ wegen $x^{(k)} \in L$. Daraus folgt auch $f(x^*) \leq m$, d. h., $x^* \in L$. Das zeigt, dass L in F abgeschlossen ist.

Umgekehrt gelte **Aussage (ii)**. Wir betrachten eine Folge $(x^{(k)}) \subseteq F$, $x^{(k)} \rightarrow x^* \in F$. Wir nehmen das Gegenteil von **Aussage (i)** an, also $C := \liminf_{k \rightarrow \infty} f(x^{(k)}) < f(x^*)$. Nach Definition des Limes inferior gibt es eine Teilfolge mit den Indizes $k^{(\ell)}$, sodass $f(x^{(k^{(\ell)})}) \rightarrow C < f(x^*)$ konvergiert. Aufgrund der Annahme gibt es also ein $\varepsilon > 0$ und ein $\ell_0 \in \mathbb{N}$, sodass für alle $\ell > \ell_0$ die Beziehung $f(x^{(k^{(\ell)})}) + \varepsilon \leq f(x^*)$ erfüllt ist. Mit anderen Worten: Alle „späten“ Folgenglieder von $x^{(k^{(\ell)})}$ gehören zur Sublevelmenge mit dem Niveau $f(x^*) - \varepsilon$. Nach Voraussetzung ist diese Menge abgeschlossen, also gehört auch der Grenzwert x^* zu dieser Menge. Das bedeutet aber, dass $f(x^*) \leq f(x^*) - \varepsilon$ ist – ein Widerspruch. \square

Wir formulieren nun einen allgemeinen Existenzsatz für globale Minimierer.

Satz 1.5 (Existenz eines globalen Minimierers).

Die zulässige Menge $F \subseteq \mathbb{R}^n$ sei nichtleer. Weiter sei $f: F \rightarrow \mathbb{R}$ unterhalbstetig, und für irgendein $m \in \mathbb{R}$ sei die Sublevelmenge

$$L := \{x \in F \mid f(x) \leq m\}$$

nichtleer und kompakt.⁴ Dann besitzt die Aufgabe

$$\text{Minimiere } f(x) \quad \text{über } x \in F$$

mindestens einen globalen Minimierer.

Beweis. Wir zeigen zuerst, dass f auf F nach unten beschränkt sein muss. Andernfalls gibt es eine Folge $(x^{(k)}) \subseteq F$ mit der Eigenschaft $f(x^{(k)}) \leq -k$. Für hinreichend große $k \in \mathbb{N}$ liegen die Glieder dieser Folge in der Menge L . Da aber L kompakt ist, existiert eine konvergente Teilfolge $(x^{(k^{(\ell)})}) \subseteq L$ mit der Eigenschaft $x^{(k^{(\ell)})} \rightarrow x^* \in L$ für $\ell \rightarrow \infty$. Aufgrund der Unterhalbstetigkeit von f folgt $f(x^*) \leq \liminf_{\ell \rightarrow \infty} f(x^{(k^{(\ell)})}) = -\infty$; Widerspruch.

Es sei nun $f^* := \inf_{x \in F} f(x) \in \mathbb{R}$ der endliche Infimalwert und $m \in \mathbb{R}$ ein Niveau wie in der Voraussetzung. Dann gibt es eine Folge $(x^{(k)}) \subseteq F$ mit der Eigenschaft⁵ $f(x^{(k)}) \searrow f^*$. Wir unterscheiden zwei Fälle: Falls $m = f^*$ ist, dann besteht die Sublevelmenge L nur aus globalen Minimierern und ist nach Annahme nichtleer; fertig. Andernfalls ist $m > f^*$, und wegen $f(x^{(k)}) \searrow f^*$ gilt: Für hinreichend große $k \in \mathbb{N}$ gehört die Folge zur Sublevelmenge L , und aufgrund der Kompaktheit existiert eine konvergente Teilfolge $x^{(k^{(\ell)})} \rightarrow x^*$, deren Grenzwert x^* in L liegt und insbesondere zulässig ist. Wegen der Unterhalbstetigkeit von f gilt $\lim_{\ell \rightarrow \infty} f(x^{(k^{(\ell)})}) \geq f(x^*)$, aber auch $\lim_{\ell \rightarrow \infty} f(x^{(k^{(\ell)})}) = f^*$. Dies zeigt, dass x^* ein globaler Minimierer ist. \square

⁴**Beachte:** Bei der Kompaktheit von Mengen kommt es nicht auf die Teilraumtopologie an, in der wir diese betrachten. Bei der Kompaktheit von $L = \{x \in F \mid f(x) \leq m\}$ kommt es also nicht darauf an, ob wir sie als kompakte Teilmenge von F oder von \mathbb{R}^n ansehen. Die Charakterisierung „kompakt \Leftrightarrow abgeschlossen und beschränkt“ gilt jedoch in \mathbb{R}^n und nicht in beliebigen Teilmengen.

⁵Für eine reelle Zahlenfolge $(y^{(k)})$ bedeutet $y^{(k)} \searrow y$, dass $y^{(k)} > y$ gilt und $y^{(k)} \rightarrow y$. Die Monotonie der Folge wird nicht verlangt.

§ 2 NOTATION UND WIEDERHOLUNG VON DIFFERENZIERBARKEITSBEGRIFFEN

In diesem Skript verwenden wir farbige Kennzeichnungen für **Definitionen** und **Hervorhebungen**.

- Die natürlichen Zahlen sind $\mathbb{N} = \{1, 2, \dots\}$. Wir schreiben \mathbb{N}_0 für $\mathbb{N} \cup \{0\}$.
- Wir bezeichnen offene Intervalle mit (a, b) und abgeschlossene Intervalle mit $[a, b]$.
- Matrizen werden üblicherweise mit lateinischen Großbuchstaben bezeichnet, Vektoren mit lateinischen Kleinbuchstaben und Skalare mit griechischen oder lateinischen Kleinbuchstaben. Die Einheitsmatrix wird mit Id bezeichnet. Wir unterscheiden den Vektorraum der Spaltenvektoren \mathbb{R}^n vom Vektorraum der Zeilenvektoren \mathbb{R}_n .
- Unendliche skalarwertige oder vektorwertige Folgen $\mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}^n$ bezeichnen wir mit $(x^{(k)})$ und nicht mit x_k etc., um einen Konflikt mit der Bezeichnung der Komponenten eines Vektors $x = (x_1, \dots, x_n)^T \in \mathbb{R}^n$ zu vermeiden. Endlich viele Vektoren werden dennoch auch gelegentlich mit x_1, x_2 etc. bezeichnet, wenn wir deren Komponenten nicht benötigen.
- Die durch die streng monoton wachsende Folge $\mathbb{N} \ni \ell \mapsto k^{(\ell)} \in \mathbb{N}$ gebildete **Teilfolge** einer Folge $(x^{(k)})$ wird mit $(x^{(k^{(\ell)})})$ bezeichnet.
- Für Vektoren $x, y \in \mathbb{R}^n$ bezeichnet $x^T y$ das Euklidische Skalarprodukt (Innenprodukt) und $\|x\|$ die euklidische Norm:

$$\|x\| = \sqrt{x^T x}.$$

Wir schreiben also *nicht* $\langle x, y \rangle$ oder $x \cdot y$ für das Euklidische Skalarprodukt.

- Ist $M \in \mathbb{R}^{n \times n}$ eine symmetrische, positiv definite Matrix, so erzeugt sie ein Skalarprodukt $x^T M y$ und eine Norm $\|x\|_M = \sqrt{x^T M x}$ auf \mathbb{R}^n . Es gilt $\|x\| = \|x\|_{\text{Id}}$.
- Für $\varepsilon > 0$ und $x^* \in \mathbb{R}^n$ ist

$$B_\varepsilon(x^*) := \{x \in \mathbb{R}^n \mid \|x - x^*\| < \varepsilon\}$$

die **offene ε -Umgebung** von x^* oder auch die **offene ε -Kugel** um x^* . Die **abgeschlossene ε -Umgebung** von x^* oder auch die **abgeschlossene ε -Kugel** notieren wir als

$$\overline{B_\varepsilon(x^*)} := \{x \in \mathbb{R}^n \mid \|x - x^*\| \leq \varepsilon\}.$$

- Das **Innere** einer Menge $M \subseteq \mathbb{R}^n$ bezeichnen wir mit $\text{int } M$ und den **Abschluss** mit \overline{M} .
- Für eine Funktion $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ und gegebenes $x \in \mathbb{R}^n$ heißt die Ableitung der partiellen Funktion $t \mapsto f(x + t e_i)$ an der Stelle $t = 0$ die i -te **partielle Ableitung** von f an der Stelle x , kurz: $\frac{\partial}{\partial x_i} f(x)$. Dabei ist $e_i = (0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)^T$ einer der Vektoren der Standardbasis von \mathbb{R}^n . Mit anderen Worten:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} f(x) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(x + t e_i) - f(x)}{t}.$$

- Allgemeiner heißt die Ableitung der Funktion $t \mapsto f(x + t d)$ an der Stelle $t = 0$ die **(beidseitige) Richtungsableitung** von f an der Stelle x in Richtung $d \in \mathbb{R}^n$, kurz:

$$\frac{\partial}{\partial d} f(x) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(x + t d) - f(x)}{t}.$$

- Die rechtsseitige Ableitung der Funktion $t \mapsto f(x + t d)$ an der Stelle $t = 0$ heißt die **(einseitige) Richtungsableitung** von f an der Stelle x in Richtung $d \in \mathbb{R}^n$, kurz:

$$f'(x; d) = \lim_{t \searrow 0} \frac{f(x + t d) - f(x)}{t}.$$

- Eine Funktion $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ heißt **differenzierbar** (kurz: **diffbar**) an der Stelle $x \in \mathbb{R}^n$, falls ein Vektor $v \in \mathbb{R}_n$ (Zeilenvektor) existiert, sodass gilt:

$$\frac{f(x + d) - f(x) - v d}{\|d\|} \rightarrow 0 \quad \text{für } d \rightarrow 0.$$

Der Vektor v heißt in dem Fall die **(totale) Ableitung** von f an der Stelle x und wird mit $f'(x)$ bezeichnet.

- Für diffbare Funktionen $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ gilt

$$f'(x) = \left(\frac{\partial f(x)}{\partial x_1}, \quad \dots, \quad \frac{\partial f(x)}{\partial x_n} \right) \in \mathbb{R}_n.$$

Den transponierten Vektor (Spaltenvektor)

$$\nabla f(x) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f(x)}{\partial x_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial f(x)}{\partial x_n} \end{pmatrix} = f'(x)^\top \in \mathbb{R}^n$$

bezeichnen wir als den **Gradienten** (bzgl. des Euklidischen Skalarprodukts) von f an der Stelle x .

- Für diffbare Funktionen $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ gilt:

$$f'(x; d) = \frac{\partial}{\partial d} f(x) = f'(x) d = \nabla f(x)^\top d.$$

- Eine Funktion $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ heißt **stetig partiell diffbar** oder kurz: $C^1(\mathbb{R}^n, \mathbb{R})$, wenn alle partiellen Ableitungen $\frac{\partial f(x)}{\partial x_i}$ als Funktionen von der Stelle x stetig sind. C^1 -Funktionen sind überall diffbar.
- Eine vektorwertige Funktion $F: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ heißt an der Stelle x **diffbar**, wenn alle Komponentenfunktionen F_1, \dots, F_m dort diffbar sind. In diesem Fall ist die Ableitung $F'(x)$ durch die **Jacobimatrix** von F an der Stelle x , also durch

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial F_1(x)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial F_1(x)}{\partial x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial F_m(x)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial F_m(x)}{\partial x_n} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{m \times n},$$

gegeben.

- f heißt **stetig partiell diffbar**, wenn alle Einträge der Jacobimatrix als Funktionen von der Stelle x stetig sind. C^1 -Funktionen sind überall diffbar.
- Eine Funktion $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ heißt **zweimal differenzierbar** (kurz: **zweimal diffbar**) an der Stelle $x \in \mathbb{R}^n$, falls f in einer Umgebung von x diffbar ist und die Ableitung $x \mapsto f'(x) \in \mathbb{R}^n$ an der Stelle x diffbar ist. In diesem Fall ist die zweite Ableitung $f''(x)$ durch die **Hessematrix** von f an der Stelle x , also durch die Matrix der zweiten partiellen Ableitungen

$$\left(\frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_i \partial x_j} \right)_{i,j=1}^n = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_n \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_n^2} \end{pmatrix},$$

gegeben. Diese ist dann symmetrisch (Satz von Schwarz)⁶.

- Eine Funktion $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ heißt **zweimal stetig partiell differenzierbar** oder kurz: $C^2(\mathbb{R}^n, \mathbb{R})$, wenn alle Einträge der Hessematrix als Funktionen von der Stelle x stetig sind. C^2 -Funktionen sind überall zweimal diffbar.

Schließlich benötigen wir auch den Satz von Taylor, den wir in zwei Versionen angeben:

Satz 2.1 (Taylor, siehe [Cartan, 1967](#), Theorem 5.6.3). *Es sei $G \subseteq \mathbb{R}^n$ offen, $k \in \mathbb{N}_0$ und $f: G \rightarrow \mathbb{R}$ k -mal diffbar sowie $(k+1)$ -mal diffbar im Punkt $x_0 \in G$. Dann gilt: Für alle $\varepsilon > 0$ existiert $\delta > 0$, sodass gilt:*

$$\begin{aligned} \text{im Fall } k = 0: \quad & |f(x_0 + d) - f(x_0) - f'(x_0) d| \leq \varepsilon \|d\|, \\ \text{im Fall } k = 1: \quad & |f(x_0 + d) - f(x_0) - f'(x_0) d - \frac{1}{2} d^T f''(x_0) d| \leq \varepsilon \|d\|^2, \end{aligned}$$

für alle $\|d\| < \delta$.

Satz 2.2 (Taylor, siehe [Geiger, Kanzow, 1999](#), Satz A.2 oder auch [Heuser, 2002](#), Satz 168.1).

Es sei $G \subseteq \mathbb{R}^n$ offen, $k \in \mathbb{N}_0$ und $f: G \rightarrow \mathbb{R}$ $(k+1)$ -mal stetig partiell diffbar, kurz: $C^{k+1}(G, \mathbb{R})$. Falls x_0 und $x_0 + d$ und die gesamte Verbindungsstrecke in G liegen, dann existiert $\xi \in (0, 1)$, sodass gilt:

$$\begin{aligned} \text{im Fall } k = 0: \quad & f(x_0 + d) = f(x_0) + f'(x_0 + \xi d) d \quad (\text{Mittelwertsatz}), \\ \text{im Fall } k = 1: \quad & f(x_0 + d) = f(x_0) + f'(x_0) d + \frac{1}{2} d^T f''(x_0 + \xi d) d. \end{aligned}$$

⁶siehe z. B. [Cartan, 1967](#), Proposition 5.2.2

Kapitel 1 Unrestringierte Optimierung

Wir betrachten in diesem Kapitel das unrestringierte (freie) Optimierungsproblem (1.1) mit $\Omega = \mathbb{R}^n$ und $\mathcal{I} = \mathcal{E} = \emptyset$, also

$$\text{Minimiere } f(x) \text{ über } x \in \mathbb{R}^n.$$

Wir beschränken uns auf das Auffinden *lokaler* Minimalstellen. Globale Minimierer zu bestimmen ist sehr schwierig und nur unter zusätzlichen Voraussetzungen an die Funktion f überhaupt algorithmisch möglich.

§ 3 OPTIMALITÄTSBEDINGUNGEN DER UNRESTRINGIERTEN OPTIMIERUNG

Literatur: Geiger, Kanzow, 1999, Kapitel 2

Satz 3.1 (Notwendige Bedingung 1. Ordnung).

Es sei x^* ein lokaler Minimierer, und f sei an der Stelle x^* diffbar. Dann ist die Ableitung $f'(x^*) = 0$.

Beweis. Es sei $d \in \mathbb{R}^n$ beliebig. Wir betrachten die Kurve $\gamma: (-\delta, \delta) \rightarrow \mathbb{R}^n$, $\gamma(t) := x^* + t d$. Für hinreichend kleines $\delta > 0$ verläuft diese Kurve innerhalb der Umgebung der lokalen Optimalität von x^* . Daraus folgt, dass $f \circ \gamma$ bei $t = 0$ einen lokalen Minimierer besitzt.

Aufgrund dieser lokalen Optimalität gilt für den Differenzenquotienten

$$\frac{f(\gamma(t)) - f(\gamma(0))}{t} = \frac{f(x^* + t d) - f(x^*)}{t} \begin{cases} \geq 0 & \text{für } t > 0 \\ \leq 0 & \text{für } t < 0. \end{cases}$$

Andererseits konvergiert aber der Differenzenquotient für $t \rightarrow 0$ gegen den Grenzwert $f'(x^*) d$. Es muss daher notwendigerweise $f'(x^*) d = 0$ gelten. Da $d \in \mathbb{R}^n$ beliebig war, bedeutet das $f'(x^*) = 0$. \square

Definition 3.2 (stationärer Punkt). Ein Punkt $x \in \mathbb{R}^n$ mit der Eigenschaft $f'(x) = 0$ heißt **stationärer Punkt** von f .

Beachte: Die Bedingung „ $f'(x) = 0$ “ ist keinesfalls hinreichend dafür, dass x ein lokaler Minimierer von f ist. Mit Hilfe von Bedingungen 2. Ordnung kann man stationäre Punkte genauer unterscheiden.

Satz 3.3 (Notwendige Bedingung 2. Ordnung).

Es sei x^* ein lokaler Minimierer, und f sei an der Stelle x^* zweimal diffbar. Dann ist die Hessematrix $f''(x^*)$ positiv semidefinit.¹

Beweis. Es sei $d \in \mathbb{R}^n$ beliebig. Wie in Satz 3.1 definieren wir $\gamma(t) := x^* + t d$ und betrachten wieder $\varphi := f \circ \gamma$, das bei $t = 0$ einen lokalen Minimierer besitzt. Da φ an dieser Stelle zweimal diffbar ist, folgt aus Satz 2.1: Für alle $\varepsilon > 0$ existiert $\delta > 0$, sodass

$$\left| \varphi(t) - \varphi(0) - \varphi'(0) t - \frac{1}{2} \varphi''(0) t^2 \right| \leq \varepsilon t^2$$

für alle $|t| < \delta$ ist. Aufgrund von Satz 3.1 ist $\varphi'(0) = 0$, und aus der lokalen Optimalität folgt $\varphi(0) \leq \varphi(t)$ für alle $|t|$ hinreichend klein. Wir erhalten also

$$-\frac{1}{2} \varphi''(0) t^2 \leq \varphi(t) - \varphi(0) - \frac{1}{2} \varphi''(0) t^2 \leq \varepsilon t^2$$

für alle $|t|$ hinreichend klein, folglich

$$\frac{1}{2} \varphi''(0) \geq -\varepsilon.$$

Da $\varepsilon > 0$ beliebig war, folgt $\varphi''(0) = d^\top f''(x^*) d \geq 0$. Da wiederum $d \in \mathbb{R}^n$ beliebig war, ist $f''(x^*)$ positiv semi-definit. \square

Beachte: Auch die Bedingungen „ $f'(x) = 0$ “ und „ $f''(x)$ ist positiv semidefinit“ gemeinsam sind nicht hinreichend dafür, dass x ein lokaler Minimierer von f ist.

Satz 3.4 (Hinreichende Bedingung 2. Ordnung).

Es sei f zweimal diffbar an der Stelle x^* , und es gelte

(i) $f'(x^*) = 0$ und

(ii) $f''(x^*)$ ist positiv definit mit kleinstem Eigenwert $\mu > 0$.

Dann gilt: Zu jedem $\beta \in (0, \mu)$ gibt es eine Umgebung $U_\beta(x^*)$ von x^* mit der Eigenschaft

$$f(x) \geq f(x^*) + \frac{\beta}{2} \|x - x^*\|^2 \quad \text{für alle } x \in U_\beta(x^*). \quad (3.1)$$

Insbesondere ist x^* ein strikter lokaler Minimierer von f .

Beweis. Wir nutzen dieses Mal Satz 2.1 direkt für die Funktion f (nicht entlang einer Kurve). Für jedes $\varepsilon > 0$ existiert $\delta > 0$, sodass gilt:

$$\left| f(x^* + d) - f(x^*) - f'(x^*) d - \frac{1}{2} d^\top f''(x^*) d \right| \leq \varepsilon \|d\|^2$$

¹Aufgrund der Symmetrie von $f''(x^*)$ ist dies äquivalent dazu, dass alle Eigenwerte von $f''(x^*)$ nicht-negativ sind.

für alle $\|d\| < \delta$. Nach Voraussetzung ist $f'(x^*) = 0$. Es folgt also

$$f(x^* + d) - f(x^*) - \frac{1}{2} d^T f''(x^*) d \geq -\varepsilon \|d\|^2$$

für alle $\|d\| < \delta$. Das bedeutet aber

$$f(x^* + d) \geq f(x^*) + \frac{1}{2} d^T f''(x^*) d - \varepsilon \|d\|^2$$

für alle $\|d\| < \delta$.

Aus der linearen Algebra ist bekannt, dass die Werte des Rayleigh-Quotienten für die symmetrische Matrix $f''(x^*)$ nach oben bzw. unten durch den größten bzw. den kleinsten Eigenwert beschränkt sind, dass also insbesondere gilt:

$$d^T f''(x^*) d \geq \mu \|d\|^2 \quad \text{für alle } d \in \mathbb{R}^n.$$

Nun können wir die Behauptung zeigen: Zu $\beta \in (0, \mu)$ wähle $\varepsilon := (\mu - \beta)/2 > 0$ und ein dazugehöriges $\delta > 0$. Dann gilt also

$$\begin{aligned} f(x^* + d) &\geq f(x^*) + \frac{1}{2} d^T f''(x^*) d - \varepsilon \|d\|^2 \\ &\geq f(x^*) + \frac{\mu}{2} \|d\|^2 - \varepsilon \|d\|^2 \\ &= f(x^*) + \frac{\beta}{2} \|d\|^2 \end{aligned}$$

für alle $\|d\| < \delta$. □

Zu der Eigenschaft (3.1) sagt man auch, die Funktion f habe mindestens **quadratisches Wachstum** in der Nähe von x^* bzw. f verhalte sich lokal **stark konvex** (siehe Definition 11.8).

Erfüllt f an einem stationären Punkt x^* die notwendige, aber nicht die hinreichende Bedingung 2. Ordnung, so ist keine Aussage über das Vorliegen eines lokalen Minimierers möglich. (Beispiel: $f(x) = x^3$ und $f(x) = x^4$ bei $x^* = 0$.) Es gibt also eine „unentscheidbare Lücke“ zwischen diesen Bedingungen.

Quizfrage 3.1: Kann ein Punkt x^* , der die notwendigen Bedingungen 1. und 2. Ordnung erfüllt, ein lokaler Maximierer sein?

§ 4 DAS GRADIENTENVERFAHREN

Literatur: Geiger, Kanzow, 1999, Kapitel 8

Das Gradientenverfahren ist der einfachste Vertreter in der Klasse der Abstiegsverfahren. Als **Abstiegsverfahren** bezeichnet man ein iteratives Verfahren, das entlang von Abstiegsrichtungen voranschreitet und dabei (in der Regel) eine monoton fallende Folge von Zielfunktionswerten erzeugt. Es entsteht also eine Folge von Iterierten $(x^{(k)}) \subseteq \mathbb{R}^n$, und in jeder Iteration werden folgende Schritte ausgeführt:

- (1) Bestimmen einer Abstiegsrichtung $d^{(k)}$ für f am aktuellen Punkt $x^{(k)}$.
- (2) Bestimmen einer Schrittlänge $t^{(k)} > 0$, sodass $f(x^{(k)} + t^{(k)} d^{(k)}) \leq f(x^{(k)})$ gilt.
- (3) Aufdatieren durch $x^{(k+1)} := x^{(k)} + t^{(k)} d^{(k)}$.
- (4) Erhöhen des Iterationszählers $k \leadsto k + 1$.

Annahme: In diesem § 4 sei $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ mindestens einmal stetig partiell diffbar, kurz: C^1 . Es gilt also für die (beidseitige) Richtungsableitung

$$\frac{\partial}{\partial d} f(x) := \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(x + t d) - f(x)}{t} = f'(x) d.$$

Außerdem dürfen wir den [Satz von Taylor 2.2](#) in Form des Mittelwertsatzes (also für $k = 0$) verwenden.

Definition 4.1 (Abstiegsrichtung).

Ein Vektor $d \in \mathbb{R}^n$ heißt **Abstiegsrichtung** (englisch: **descent direction**) für f im Punkt $x \in \mathbb{R}^n$, wenn gilt:

$$f'(x) d < 0. \quad (4.1)$$

Der negative Gradient $-\nabla f(x)$ ist die **Richtung des steilsten Abstiegs** (englisch: **direction of steepest descent**) von f im Punkt x . Er ist immer eine Abstiegsrichtung, außer in einem stationären Punkt. Wir können (4.1) auch schreiben als $\nabla f(x)^\top d < 0$. Anschaulich bedeutet dies, dass der Winkel zwischen der Richtung d und dem negativen Gradienten $-\nabla f(x)$ kleiner als 90° ist, siehe [Abbildung 4.1](#).

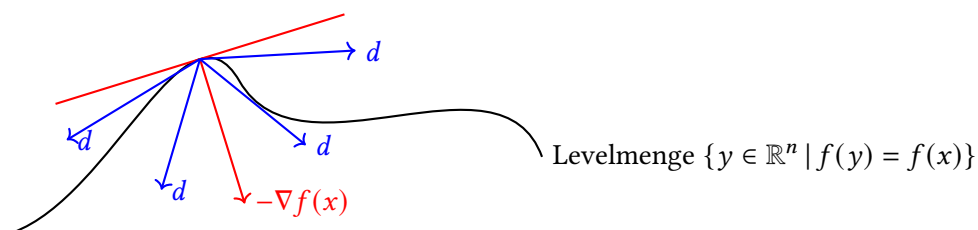


Abbildung 4.1: Verschiedene Abstiegsrichtungen d für f im Punkt x .

Ende der Woche 1

§ 4.1 VORSTELLUNG DES VERFAHRENS

Beim (einfachen) **Gradientenverfahren** wird als Abstiegsrichtung $d^{(k)} = -\nabla f(x^{(k)})$ gewählt. Es heißt deshalb auch das **Verfahren des steilsten Abstiegs** (englisch: **steepest descent method**). Es orientiert sich nur an den Funktionswerten von f , nicht an den Optimalitätsbedingungen aus § 3.

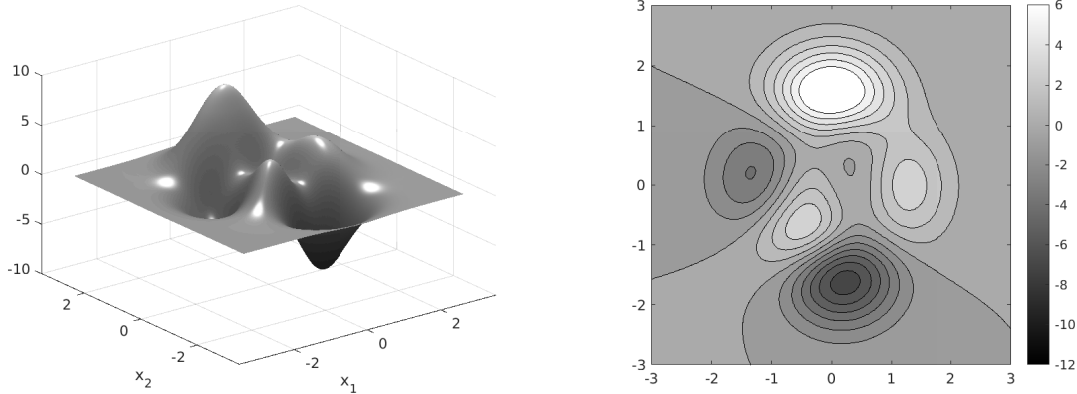


Abbildung 4.2: Sie können sich Abstiegsrichtungen an diesem Beispiel veranschaulichen: Wählen Sie einen Punkt aus und zeichnen Sie die Menge aller Abstiegsrichtungen ein.

Bei der Wahl der Schrittweiten $t^{(k)}$ verwendet das Verfahren einen Algorithmus zur **Liniensuche** (englisch: *line search*), bei der f entlang einer Richtung d nach einer geeigneten Schrittweite „durchsucht“ wird. Wie das folgende Beispiel zeigt, reicht es dabei nicht aus, dass $f(x^{(k)})$ von Iteration zu Iteration streng monoton fällt, um Konvergenz gegen einen Minimierer oder wenigstens gegen einen stationären Punkt zu erzielen:

Beispiel 4.2. Es seien $f(x) = x^2$, $x^{(0)} = 1$ und $d^{(k)} = -1$ sowie als Schrittweiten $t^{(k)} = \left(\frac{1}{2}\right)^{k+2}$ gewählt. Dann ist die Folge der Iterierten gegeben durch

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + t^{(k)} (-1) = x^{(0)} - \sum_{i=0}^k \left(\frac{1}{2}\right)^{i+2} = \frac{1}{2} + \left(\frac{1}{2}\right)^{k+2}.$$

Daraus folgt $x^{(k+1)} < x^{(k)}$ und $f(x^{(k+1)}) < f(x^{(k)})$. Die Folge der Funktionswerte fällt also streng monoton. Jedoch konvergiert $x^{(k)} \searrow x^* = 1/2$, also gegen einen „uninteressanten“ Punkt und nicht gegen den strikten globalen Minimierer von f bei $x = 0$.

Quizfrage 4.1: Was ist das „Problem“ mit den in **Beispiel 4.2** gewählten Schrittweiten?

Angeichts des **Beispiels 4.2** sollten wir uns also fragen, welche Bedingung man an die Schrittweiten stellen sollte, um Konvergenz des Gradientenverfahrens gegen einen stationären Punkt ($f'(x) = 0$) zu erhalten.

Die **exakte Liniensuche** (englisch: *exact line search*)

$$\text{„Bestimme } t^{(k)} := t_{\min} \text{ so, dass } f(x^{(k)} + t_{\min} d^{(k)}) = \min_{t \geq 0} f(x^{(k)} + t d^{(k)}) \text{ gilt“} \quad (4.2)$$

ist außer in Sonderfällen für besonders einfache Zielfunktionen f nicht praktikabel.

Daher greift man zu einer besser realisierbaren Schrittweitenstrategie: Zu einer gegebenen Abstiegsrichtung d für die Funktion f im Punkt x bestimmt man eine Schrittweite $t > 0$, sodass die **Armijo-Bedingung**² erfüllt ist:

$$f(x + t d) \leq f(x) + \sigma t f'(x) d. \quad (4.3)$$

Dabei ist $\sigma \in (0, 1)$ der **Armijo-Parameter**.

Zur Veranschaulichung der Bedingung (4.3) führen wir die **LinienSuchfunktion**

$$\varphi(t) := f(x + t d) \quad (4.4)$$

zur **Suchrichtung** d ein. Man nennt φ auch den **Schnitt** durch die Funktion f am Punkt x in Richtung d . Die Funktion φ erbt die Differenzierbarkeitseigenschaften von f , ist also auf \mathbb{R} stetig diffbar, und es gilt

$$\varphi'(t) = f'(x + t d) d.$$

Also lautet die Armijo-Bedingung (4.3) alternativ

$$\varphi(t) \leq \varphi(0) + \sigma t \varphi'(0). \quad (4.5)$$

Diese Bedingung wird in **Abbildung 4.3** illustriert.

Beachte: Beim Gradientenverfahren gilt $\varphi'(0) = f'(x) d = -\|\nabla f(x)\|^2$.

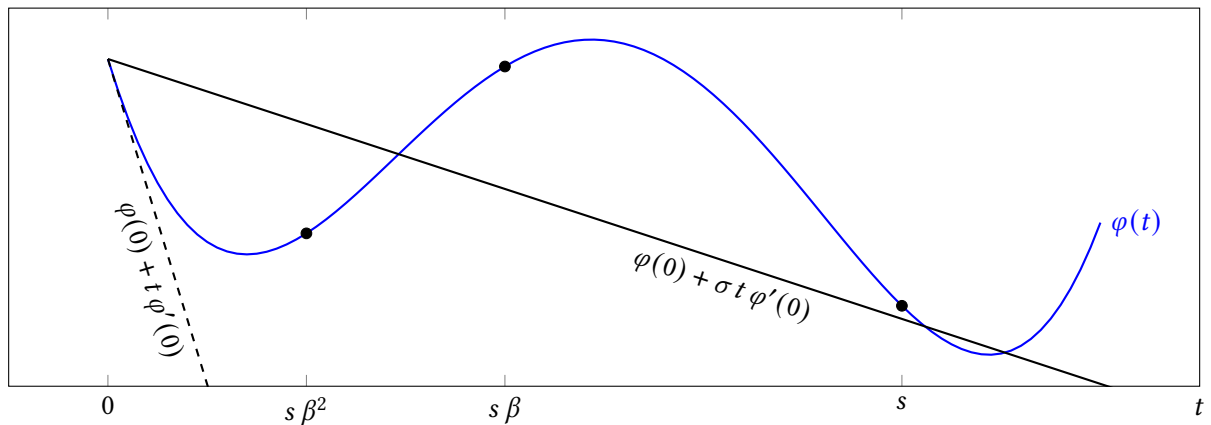


Abbildung 4.3: Darstellung der Armijo-Bedingung (4.5) und einigen Test-Schrittweiten beim Backtracking. Der Armijo-Parameter ist hier als $\sigma = 0.1$ und der Backtracking-Parameter als $\beta = 0.5$ gewählt.

In der praktischen Durchführung wird eine Schrittweite, die (4.5) erfüllt, über eine **Backtracking-Strategie** gefunden: Man beginnt mit einer Startschrittweite $s > 0$ und testet nacheinander die (kleiner werdenden) Schrittweiten $t = s, s\beta, s\beta^2$ etc., bis zum ersten Mal (4.5) erfüllt ist. Dabei ist $\beta \in (0, 1)$ der **Backtracking-Parameter**.

Satz 4.3 (Wohldefiniertheit der Armijo-Backtracking-Strategie).

Es sei $\sigma \in (0, 1)$ beliebig. Zu jedem Paar $(x, d) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n$ mit $f'(x) d < 0$ existiert ein $T > 0$, sodass die Armijo-Bedingung (4.5) für alle $t \in [0, T]$ gilt.

²Armijo, 1966

Beachte: Aus diesem Satz folgt, dass die Armijo-Backtracking-Strategie wohldefiniert ist, da ein Exponent $\ell_0 \in \mathbb{N}_0$ existiert, sodass Schrittweiten der Form $t = s \beta^\ell$ für $\ell \geq \ell_0$ immer in $[0, T]$ liegen.

Beweis. Angenommen, die Aussage sei falsch, dann existiert eine Folge $t^{(k)} \searrow 0$ mit der Eigenschaft

$$f(x + t^{(k)} d) > f(x) + \sigma t^{(k)} f'(x) d$$

für alle $k \in \mathbb{N}$, also auch

$$\frac{f(x + t^{(k)} d) - f(x)}{t^{(k)}} > \sigma f'(x) d.$$

Im Grenzübergang $k \rightarrow \infty$ folgt

$$f'(x) d \geq \sigma f'(x) d,$$

was im Widerspruch zur Voraussetzung $f'(x) d < 0$ steht. □

Wir geben nun das Gradientenverfahren mit Armijo-Liniensuche an:

Algorithmus 4.4 (Gradientenverfahren mit Armijo-Schrittweitensuche).

Eingabe: Startschätzung $x^{(0)} \in \mathbb{R}^n$

Eingabe: Armijo-Parameter $\sigma \in (0, 1)$, Backtracking-Parameter $\beta \in (0, 1)$, Startschrittweite $s > 0$

- 1: Setze $k := 0$
- 2: **while** Abbruchkriterium nicht erfüllt **do**
- 3: Setze $d^{(k)} := -\nabla f(x^{(k)})$
- 4: Bestimme eine Schrittweite $t^{(k)} > 0$ mit der Armijo-Backtracking-Strategie zur Startschrittweite s , sodass (4.3) erfüllt ist, also:

$$f(x^{(k)} + t^{(k)} d^{(k)}) \leq f(x^{(k)}) + \sigma t^{(k)} f'(x^{(k)}) d^{(k)}$$

- 5: Setze $x^{(k+1)} := x^{(k)} + t^{(k)} d^{(k)}$
- 6: Setze $k := k + 1$
- 7: **end while**

Zur Durchführung des Gradientenverfahrens mit Armijo-Schrittweitensuche werden die folgenden problemspezifischen Routinen benötigt:

- (1) Routine zur Auswertung der Zielfunktion $f(x)$.
- (2) Routine zur Auswertung der Ableitung $f'(x)$ bzw. zur Auswertung von Richtungsableitungen $f'(x) d$.

Quizfrage 4.2: Angenommen, für die Funktion f liegt (neben der Routine für die Auswertung der Funktionswerte) eine Routine vor, die zu einer gegebenen Stelle x und einer gegebenen Richtung d die Richtungsableitung $f'(x) d$ bestimmt. Wieso reicht das für die Durchführung von **Algorithmus 4.4** aus? Wie bestimmt man insbesondere den negativen Gradienten in **Zeile 3**?

Für den Beweis eines Konvergenzsatzes für das Gradientenverfahrens benötigen wir folgendes Resultat:

Lemma 4.5 (Konvergenz des Differenzenquotienten bei variabler Stelle und Richtung).

Es seien $x, d \in \mathbb{R}^n$, $(x^{(k)}), (d^{(k)}) \subseteq \mathbb{R}^n$ mit $x^{(k)} \rightarrow x$ und $d^{(k)} \rightarrow d$ sowie $t^{(k)} \searrow 0$. Dann gilt

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{f(x^{(k)} + t^{(k)} d^{(k)}) - f(x^{(k)})}{t^{(k)}} = f'(x) d.$$

Beweis. Wegen des [Mittelwertsatzes 2.2](#) existiert zu jedem $k \in \mathbb{N}$ ein $\xi^{(k)} \in (0, 1)$ mit

$$\begin{aligned} f(x^{(k)} + t^{(k)} d^{(k)}) - f(x^{(k)}) &= t^{(k)} f'(x^{(k)} + \xi^{(k)} t^{(k)} d^{(k)}) d^{(k)} \\ \Rightarrow \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{f(x^{(k)} + t^{(k)} d^{(k)}) - f(x^{(k)})}{t^{(k)}} &= \lim_{k \rightarrow \infty} \underbrace{f'(x^{(k)} + \xi^{(k)} t^{(k)} d^{(k)})}_{\rightarrow x} d^{(k)} = f'(x) d. \end{aligned}$$

□

Wir analysieren jetzt [Algorithmus 4.4](#) ohne Abbruchbedingung, sodass eine unendliche Folge $x^{(k)}$ entsteht. Insbesondere nehmen wir an, dass kein Punkt $x^{(k)}$ stationär ist.

Satz 4.6 (Ein globaler Konvergenzsatz für das Gradientenverfahren).

Jeder Häufungspunkt x^* einer durch [Algorithmus 4.4](#) erzeugten Folge $(x^{(k)})$ ist ein stationärer Punkt von f , erfüllt also $f'(x^*) = 0$.

Beweis. Es sei $x^* \in \mathbb{R}^n$ ein Häufungspunkt von $(x^{(k)})$. Es gibt also eine Teilfolge $x^{(k^{(\ell)})}$ mit $x^{(k^{(\ell)})} \rightarrow x^*$, und wegen der Stetigkeit von f gilt $f(x^{(k^{(\ell)})}) \rightarrow f(x^*)$. Da $f(x^{(k)})$ aber monoton fällt, konvergiert die gesamte Folge $f(x^{(k)}) \rightarrow f(x^*)$. Somit gilt also auch $f(x^{(k+1)}) - f(x^{(k)}) \rightarrow 0$.

Angenommen, es sei $f'(x^*) \neq 0$. Aus [Zeilen 3 bis 5](#) des [Algorithmus 4.4](#) folgt

$$\underbrace{f(x^{(k+1)}) - f(x^{(k)})}_{\rightarrow 0} \leq \sigma t^{(k)} f'(x^{(k)}) d^{(k)} = -\sigma t^{(k)} \|\nabla f(x^{(k)})\|^2 \leq 0,$$

also

$$t^{(k)} \|\nabla f(x^{(k)})\|^2 \rightarrow 0.$$

Auf der Teilfolge gilt aber auch $\nabla f(x^{(k^{(\ell)})}) \rightarrow \nabla f(x^*) \neq 0$, also muss $t^{(k^{(\ell)})} \rightarrow 0$ gelten.

Nötigenfalls durch Einschränkung auf eine weitere Teilfolge (sodass $t^{(k^{(\ell)})} \leq \beta s$ gilt, was wegen $t^{(k^{(\ell)})} \rightarrow 0$ immer geht) können wir davon ausgehen, dass in der Armijo-Backtracking-Suche die Schrittweite $\beta^{-1} t^{(k^{(\ell)})}$ probiert, aber nicht akzeptiert wurde:

$$\begin{aligned} f(x^{(k^{(\ell)})} + \beta^{-1} t^{(k^{(\ell)})} d^{(k^{(\ell)})}) &> f(x^{(k^{(\ell)})}) + \sigma \beta^{-1} t^{(k^{(\ell)})} \nabla f(x^{(k^{(\ell)})})^\top d^{(k^{(\ell)})} \\ \Rightarrow \frac{f(x^{(k^{(\ell)})} + \beta^{-1} t^{(k^{(\ell)})} d^{(k^{(\ell)})}) - f(x^{(k^{(\ell)})})}{\beta^{-1} t^{(k^{(\ell)})}} &> \sigma \nabla f(x^{(k^{(\ell)})})^\top d^{(k^{(\ell)})} = -\sigma \|\nabla f(x^{(k^{(\ell)})})\|^2. \end{aligned}$$

Die Grenzübergänge $x^{(k(\ell))} \rightarrow x^*$, $d^{(k(\ell))} = -\nabla f(x^{(k(\ell))}) \rightarrow -\nabla f(x^*)$ und $t^{(k(\ell))} \rightarrow 0$ für $\ell \rightarrow \infty$ ergeben mit [Lemma 4.5](#):

$$-\|\nabla f(x^*)\|^2 \geq -\sigma \|\nabla f(x^*)\|^2,$$

was wegen $\sigma \in (0, 1)$ zum Widerspruch führt. Es gilt also $\nabla f(x^*) = 0$ und damit $f'(x^*) = 0$. \square

Bemerkung 4.7 (Zur praktischen Implementierung des Gradientenverfahrens).

Typische Abbruchkriterien beim Gradientenverfahren³ sind:

$$(i) \quad f(x^{(k-1)}) - f(x^{(k)}) \leq ATOL_f + RTOL_f |f(x^{(k-1)})|,$$

$$(ii) \quad \|x^{(k-1)} - x^{(k)}\| \leq ATOL_x + RTOL_x \|x^{(k-1)}\|.$$

Gefordert werden beide Bedingungen gleichzeitig. Dabei wird oft $RTOL_f = RTOL_x^2$ gewählt. Als „Notbremsen“ dienen zusätzlich die Abfragen

$$(iii) \quad \|\nabla f(x^{(k)})\| \leq ATOL_{\nabla f(x)} + RTOL_{\nabla f(x)} \|\nabla f(x^{(0)})\|,$$

$$(iv) \quad k \leq k_{\max}$$

Als Parameter der Armijo-Liniensuche wählt man z. B. $\sigma = 10^{-2}$ und $\beta = 1/2$.

Quizfrage 4.3: Was kann passieren, wenn man nur [Bedingung \(i\)](#) oder nur [Bedingung \(ii\)](#) fordert?

Quizfrage 4.4: Welche Bedeutung haben die [Bedingungen \(i\)](#) bis [\(iii\)](#)?

Quizfrage 4.5: Wie setzt man ATOL und RTOL, wenn man in [Bedingungen \(i\)](#) bis [\(iii\)](#) entweder nur eine absolute oder nur eine relative Abbruchbedingung verwenden möchte?

Bemerkung 4.8 (Alternative Startschrittweite bei der Armijo-Liniensuche).

In der praktischen Durchführung verwendet man beim Gradientenverfahren oft eine iterationsabhängige Startschrittweite $s^{(k)} > 0$. Man geht davon aus, dass der durch $s^{(k)}$ erreichbare Abstieg im aktuellen Schritt in erster Näherung gleich groß sein wird wie der im letzten Schritt realisierte Abstieg:

$$\begin{aligned} s^{(k)} f'(x^{(k)}) d^{(k)} &= f(x^{(k)}) - f(x^{(k-1)}) \\ \Rightarrow s^{(k)} &= \frac{f(x^{(k)}) - f(x^{(k-1)})}{f'(x^{(k)}) d^{(k)}} > 0. \end{aligned} \tag{4.6}$$

Speziell beim Gradientenverfahren ergibt sich dann also

$$s^{(k)} = -\frac{f(x^{(k)}) - f(x^{(k-1)})}{\|\nabla f(x^{(k)})\|^2} \tag{4.7}$$

³Mehr dazu findet man etwa in [Gill, Murray, Wright, 1981](#). ATOL steht für „absolute Toleranz“ und RTOL für „relative Toleranz“.

als Vorschlag für die Startschrittweite ab Iteration $k = 1$. Ersetzt man auch die rechte Seite in (4.6) durch die lineare Näherung $f(x^{(k)}) - f(x^{(k-1)}) \approx t^{(k-1)} f'(x^{(k-1)}) d^{(k-1)}$, so erhalten wir an Stelle von (4.7) den Vorschlag

$$s^{(k)} = t^{(k-1)} \frac{\|\nabla f(x^{(k-1)})\|^2}{\|\nabla f(x^{(k)})\|^2} \quad (4.8)$$

für die Startschrittweite.

Auch unter Verwendung dieser Startschrittweiten kann man Satz 4.6 beweisen.

§ 4.2 DAS GRADIENTENVERFAHREN IN EINEM ALTERNATIVEN SKALARPRODUKT

Bei der Herleitung des Gradientenverfahrens/Verfahrens des steilsten Abstiegs haben wir stillschweigend die Eigenschaft benutzt, dass der Gradient

$$\nabla f(x) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f(x)}{\partial x_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial f(x)}{\partial x_n} \end{pmatrix}$$

die Richtung des steilsten Anstiegs und $-\nabla f(x)$ die des steilsten Abstiegs der Funktion $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ im Punkt x darstellt, die wir als Suchrichtung verwendet haben. Dies ist aber nur dann richtig, wenn der Raum der Optimierungsvariablen \mathbb{R}^n mit dem Euklidischen Skalarprodukt $(x, y) := x^\top y$ ausgestattet ist.

Wir wollen untersuchen, wie sich das Verfahren ändert, wenn man als Skalarprodukt

$$(x, y)_M := x^\top M y$$

mit einer symmetrischen, positiv definiten (s. p. d.) Matrix M wählt. Dementsprechend ändert sich auch die Norm zur Längen- und Abstandsmessung im Raum \mathbb{R}^n der Optimierungsvariablen zu

$$\|x\|_M := (x^\top M x)^{1/2}.$$

Per Definition maximiert die **Richtung des steilsten Anstiegs** den Ausdruck $f'(x) d$ über alle Vektoren $d \in \mathbb{R}^n$ konstanter Länge:

$$\begin{aligned} &\text{Maximiere} && f'(x) d && \text{über } d \in \mathbb{R}^n \\ &\text{unter} && \|d\|_M = 1. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Die Normierung auf die Länge 1 ist willkürlich gewählt. Alternativ könnten wir auch die äquivalente Aufgabe

$$\begin{aligned} &\text{Maximiere} && f'(x) d && \text{über } d \in \mathbb{R}^n \\ &\text{unter} && \|d\|_M \leq 1 \end{aligned}$$

betrachten.

Quizfrage 4.6: Warum ist diese Aufgabe gleichwertig?

Aufgabe (4.9) ist eine restringierte Optimierungsaufgabe, die wir jedoch ohne Kenntnisse der Theorie lösen können: Wir schreiben die Zielfunktion als M -Skalarprodukt um:⁴

$$f'(x) d = \nabla f(x)^\top d = \nabla f(x)^\top M^{-1} M d = (M^{-1} \nabla f(x))^\top M d,$$

wobei die Symmetrie $M = M^\top$ benutzt wurde. Die Cauchy-Schwarzsche Ungleichung zeigt, dass dieser Ausdruck genau dann maximal wird, wenn d parallel zu $M^{-1} \nabla f(x)$ liegt. Er wird dagegen minimal, wenn d antiparallel zu $M^{-1} \nabla f(x)$ liegt. Wir fassen zusammen:

Lemma 4.9 (Richtung des steilsten Anstiegs im M -Skalarprodukt).
Falls $f'(x) \neq 0$ gilt, ist die dann eindeutige Lösung d^* von (4.9) gegeben durch

$$d^* = M^{-1} \nabla f(x) =: \nabla_M f(x). \quad (4.10)$$

(Die ohnehin willkürliche Normierung $\|d\|_M = 1$ in (4.9) wurde dabei fallengelassen.)

Daher ist $d^* = -\nabla_M f(x)$ die **Richtung des steilsten Abstiegs bzgl. des M -Skalarprodukts**. Wir berechnen diese durch Lösung des linearen Gleichungssystems

$$M d^* = -\nabla f(x). \quad (4.11)$$

Bei Verwendung des Euklidischen Skalarprodukts ($M = \text{Id}$) schreiben wir weiter $\nabla f(x)$ statt $\nabla_{\text{Id}} f(x)$. Manchmal wird die Verwendung von $\nabla_M f(x)$ an Stelle der Euklidischen Gradientenrichtung $\nabla f(x)$ als **Vorkonditionierung** (englisch: *preconditioning*) bezeichnet.

Nach Konstruktion ist für jede beliebige s. p. d. Matrix M die Lösung d^* von (4.11) eine Abstiegsrichtung für f im Punkt x . Dies können wir auch nochmals durch direkte Rechnung bestätigen, vgl. (4.1):

$$f'(x) d^* = -\nabla f(x)^\top M^{-1} \nabla f(x) = -\|\nabla f(x)\|_{M^{-1}}^2 = -\|\nabla_M f(x)\|_M^2 < 0, \quad (4.12)$$

falls nicht x bereits ein stationärer Punkt ist.

Algorithmisch ergeben sich durch Verwendung des M -Skalarprodukts an Stelle des Euklidischen Skalarprodukts folgende Änderungen: In **Algorithmus 4.4** lautet **Zeile 3** nun $d^{(k)} := -\nabla_M f(x^{(k)})$, er wird durch Lösung des linearen Gleichungssystems

$$M d^{(k)} = -\nabla f(x^{(k)})$$

ausgeführt. Die übrigen Schritte, insbesondere die Armijo-Bedingung

$$f(x^{(k)} + t^{(k)} d^{(k)}) \leq f(x^{(k)}) + \sigma t^{(k)} f'(x^{(k)}) d^{(k)}$$

bleiben unverändert. Der globale **Konvergenz-Satz 4.6** gilt weiter.

Als **Abbruchbedingung (ii)** in **Bemerkung 4.7** dient nun $\|x^{(k)} - x^{(k-1)}\|_M \leq \text{ATOL}_x + \text{RTOL}_x \|x^{(k-1)}\|_M$ und als **Bedingung (iii)** $\|\nabla_M f(x^{(k)})\|_M \leq \text{ATOL}_{\nabla f(x)} + \text{RTOL}_{\nabla_M f(x)} \|\nabla f(x^{(0)})\|_M$.

⁴Das heißt, wir bestimmen hier den Riesz-Repräsentanten von $f'(x)$ bzgl. des M -Skalarprodukts.

Quizfrage 4.7: Warum ändert sich **Abbruchbedingung (i)** nicht?

Als Startschrittweite analog zu (4.7) bzw. (4.8) wählt man

$$s^{(k)} = -\frac{f(x^{(k)}) - f(x^{(k-1)})}{\|\nabla_M f(x^{(k)})\|_M^2} \quad \text{bzw.} \quad s^{(k)} = t^{(k-1)} \frac{\|\nabla_M f(x^{(k-1)})\|_M^2}{\|\nabla_M f(x^{(k)})\|_M^2}. \quad (4.13)$$

Zur Unterscheidung vom Euklidischen Fall heißt das Verfahren dann auch das **vorkonditionierte Gradientenverfahren** (englisch: *preconditioned steepest descent method*). Wir geben es der Vollständigkeit halber nochmal an:

Algorithmus 4.10 (Vorkonditioniertes Gradientenverfahren mit Armijo-Schrittweitensuche).

Eingabe: Startschätzung $x^{(0)} \in \mathbb{R}^n$

Eingabe: Armijo-Parameter $\sigma \in (0, 1)$, Backtracking-Parameter $\beta \in (0, 1)$, Startschrittweite $s > 0$

Eingabe: s. p. d. Matrix $M \in \mathbb{R}^{n \times n}$

1: Setze $k := 0$

2: **while** Abbruchkriterium nicht erfüllt **do**

3: Bestimme $d^{(k)}$ durch Lösung des linearen Gleichungssystems $M d^{(k)} = -\nabla f(x^{(k)})$

4: Bestimme eine Schrittweite $t^{(k)} > 0$ mit der Armijo-Backtracking-Strategie zur Startschrittweite s , sodass (4.3) erfüllt ist, also:

$$f(x^{(k)} + t^{(k)} d^{(k)}) \leq f(x^{(k)}) + \sigma t^{(k)} f'(x^{(k)}) d^{(k)}$$

5: Setze $x^{(k+1)} := x^{(k)} + t^{(k)} d^{(k)}$

6: Setze $k := k + 1$

7: **end while**

Beachte: Das Verfahren verallgemeinert das unvorkonditionierte Gradientenverfahren (Algorithmus 4.4), das sich im Fall $M = \text{Id}$ ergibt.

§ 4.3 KONVERGENZ BEI QUADRATISCHER ZIELFUNKTION UND EXAKTER LINIENSUCHE

Literatur: Geiger, Kanzow, 1999, Kapitel 8.2

Um die Konvergenzgeschwindigkeit des (vorkonditionierten) Gradientenverfahrens zu untersuchen, wenden wir es auf die einfachsten sinnvollen unrestringierten Optimierungsaufgaben an. Bei diesen ist die Zielfunktion ein stark konvexes (siehe Kapitel 3) quadratisches Polynom:

$$f(x) = \frac{1}{2} x^\top Q x + c^\top x + \gamma \quad (4.14)$$

mit einer s. p. d. Matrix $Q \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $c \in \mathbb{R}^n$ und $\gamma \in \mathbb{R}$. Der globale Minimierer von f ist eindeutig und charakterisiert durch $f'(x^*) = 0$, also durch das lineare Gleichungssystem

$$Q x^* = -c \quad \text{oder äquivalent} \quad x^* = -Q^{-1}c, \quad (4.15)$$

denn dies ist die einzige Lösung der notwendigen Bedingungen (Satz 3.1), und die hinreichenden Bedingungen (Satz 3.4) sind dort erfüllt. Für ein beliebiges $x \in \mathbb{R}^n$ bezeichnen wir die Größe

$$r := Qx + c = \nabla f(x)$$

auch als das zu x gehörige **Residuum** (englisch: *residual*).

Quizfrage 4.8: An welcher Stelle geht die Symmetrie der Matrix Q ein?

Natürlich wird man das Gradientenverfahren (Algorithmus 4.11) zur Lösung von (4.14) bzw. des linearen Gleichungssystems (4.15) überhaupt nur dann in Erwägung ziehen, wenn

- (1) die direkte Lösung des linearen Gleichungssystems (4.15) mit dem Gauss-Verfahren etwa aufgrund der Dimension von Q zu aufwändig ist
- (2) oder wenn die Matrix Q nicht explizit vorliegt, sondern nur eine Funktion, die Matrix-Vektor-Produkte Qx auswertet.

Beachte: Das Verfahren kommt bereits mit Matrix-Vektor-Produkten Qx aus. Diese werden bei der Berechnung des Gradienten $\nabla f(x) = Qx + c$ in Zeile 3 benötigt.

Im Fall der quadratischen Zielfunktion lässt sich sogar die exakte Schrittweite (4.2)

$$t_{\min} = \arg \min_{t \geq 0} f(x^{(k)} + t d^{(k)})$$

im k -ten Schritt berechnen:

$$t^{(k)} := t_{\min} = \frac{(d^{(k)})^\top M d^{(k)}}{(d^{(k)})^\top Q d^{(k)}}. \quad (4.16)$$

Das wird in Hausaufgabe 2.4 nachgerechnet.

In diesem Abschnitt wählen wir statt der Armijo-Strategie in Algorithmus 4.4 stets die exakte Schrittweite (4.16). Der Vollständigkeit halber geben wir das vorkonditionierte Gradientenverfahren für diesen Spezialfall nochmals an:

Algorithmus 4.11 (Vorkonditioniertes Gradientenverfahren bei quadratischer Zielfunktion).

Eingabe: Startschätzung $x^{(0)} \in \mathbb{R}^n$

Eingabe: s. p. d. Matrix $M \in \mathbb{R}^{n \times n}$

- 1: Setze $k := 0$
- 2: Setze $r^{(0)} := Qx^{(0)} + c$
- 3: Setze $d^{(0)} := -M^{-1}r^{(0)}$
- 4: **while** Abbruchkriterium nicht erfüllt **do**
- 5: Setze $q^{(k)} := Qd^{(k)}$
- 6: Setze $t^{(k)} := -\frac{(r^{(k)})^\top d^{(k)}}{(d^{(k)})^\top q^{(k)}}$
- 7: Setze $x^{(k+1)} := x^{(k)} + t^{(k)} d^{(k)}$
- 8: Setze $r^{(k+1)} := r^{(k)} + t^{(k)} q^{(k)}$
- 9: Setze $d^{(k+1)} := -M^{-1}r^{(k+1)}$

```

10:   Setze  $k := k + 1$ 
11: end while
12: return  $x^{(k)}$ 

```

Es stellt sich nun die Frage nach dem Konvergenzverhalten sowie nach der Rolle des Vorkonditionierers/Skalarprodukts M . Dazu geben wir zunächst ein Hilfsresultat an, das die Funktionswerte, den Fehler $x - x^*$ und das Residuum in Beziehung setzt:

Lemma 4.12. *Es gilt*

$$f(x) - f(x^*) = \frac{1}{2} \|x - x^*\|_Q^2 = \frac{1}{2} \|r\|_{Q^{-1}}^2. \quad (4.17)$$

Beweis. Durch direkte Rechnung ergibt sich

$$\begin{aligned}
f(x) - f(x^*) &= \frac{1}{2} x^\top Q x + c^\top x + \gamma - \frac{1}{2} (x^*)^\top Q x^* - c^\top x^* - \gamma \\
&= \frac{1}{2} x^\top Q x - (x^*)^\top Q x - \frac{1}{2} (x^*)^\top Q x^* + (x^*)^\top Q x^* \quad \text{denn } c = -Q x^* \\
&= \frac{1}{2} x^\top Q x - (x^*)^\top Q x + \frac{1}{2} (x^*)^\top Q x^* \\
&= \frac{1}{2} \|x - x^*\|_Q^2 \\
&= \frac{1}{2} (x - x^*)^\top r = \frac{1}{2} r^\top Q^{-1} r \quad \text{denn } r = Q(x - x^*) \\
&= \frac{1}{2} \|r\|_{Q^{-1}}^2.
\end{aligned}$$

□

Für die Iterierten von [Algorithmus 4.11](#) zur Minimierung von (4.14) gilt nun die folgende Rekursion:

$$\begin{aligned}
f(x^{(k+1)}) - f(x^*) &= \frac{1}{2} \|r^{(k+1)}\|_{Q^{-1}}^2 = \frac{1}{2} \|r^{(k)} + t^{(k)} Q d^{(k)}\|_{Q^{-1}}^2 && \text{wegen (4.17)} \\
&= \frac{1}{2} \|r^{(k)}\|_{Q^{-1}}^2 + t^{(k)} (r^{(k)})^\top d^{(k)} + \frac{1}{2} (t^{(k)})^2 (d^{(k)})^\top Q d^{(k)} \\
&= \frac{1}{2} \|r^{(k)}\|_{Q^{-1}}^2 - \frac{[(r^{(k)})^\top d^{(k)}]^2}{(d^{(k)})^\top Q d^{(k)}} + \frac{1}{2} \frac{[(r^{(k)})^\top d^{(k)}]^2}{(d^{(k)})^\top Q d^{(k)}} && \text{wegen } t^{(k)} = -\frac{(r^{(k)})^\top d^{(k)}}{(d^{(k)})^\top Q d^{(k)}} \\
&= \frac{1}{2} \|r^{(k)}\|_{Q^{-1}}^2 - \frac{1}{2} \frac{[(r^{(k)})^\top d^{(k)}]^2}{(d^{(k)})^\top Q d^{(k)}} \\
&= \left(1 - \frac{[(r^{(k)})^\top d^{(k)}]^2}{[(d^{(k)})^\top Q d^{(k)}] [(r^{(k)})^\top Q^{-1} r^{(k)}]} \right) (f(x^{(k)}) - f(x^*)) && \text{wegen (4.17).}
\end{aligned}$$

Hier setzen wir nun den speziellen Zusammenhang $r^{(k)} = -M d^{(k)}$ für die Iterierten aus [Algorithmus 4.11](#) ein:

$$= \left(1 - \frac{[(d^{(k)})^\top M d^{(k)}]^2}{[(d^{(k)})^\top Q d^{(k)}] [(d^{(k)})^\top M Q^{-1} M d^{(k)}]} \right) (f(x^{(k)}) - f(x^*)) \quad (4.18)$$

Für die weitere Abschätzung des Bruches benutzen wir die **Kantorovich-Ungleichung**, die wir zunächst für den Fall $M = \text{Id}$ angeben:

Lemma 4.13 (Kantorovich-Ungleichung). *Es sei $Q \in \mathbb{R}^{n \times n}$ s. p. d. und $\alpha := \lambda_{\min}(Q)$ sowie $\beta := \lambda_{\max}(Q)$. Dann gilt*

$$1 \leq \frac{(x^\top Q x) (x^\top Q^{-1} x)}{\|x\|^4} \leq \frac{(\alpha + \beta)^2}{4 \alpha \beta} \leq \frac{\beta}{\alpha} \quad (4.19)$$

für alle $x \in \mathbb{R}^n, x \neq 0$.

Beachte: Für den Rayleigh-Quotienten von Q gilt

$$\frac{x^\top Q x}{\|x\|^2} \leq \lambda_{\max}(Q) = \beta \quad \text{und analog} \quad \frac{x^\top Q^{-1} x}{\|x\|^2} \leq \lambda_{\max}(Q^{-1}) = 1/\alpha.$$

Die zugehörigen Eigenvektoren erfüllen die Ungleichungen jeweils mit Gleichheit. Die offensichtliche Abschätzung

$$\frac{(x^\top Q x) (x^\top Q^{-1} x)}{\|x\|^4} \leq \frac{\beta}{\alpha}$$

ist jedoch nicht scharf, da derselbe Vektor x i. A. nicht gleichzeitig Eigenvektor zum größten und zum kleinsten Eigenwert sein kann. Die Kantorovich-Ungleichung (4.19) verbessert diese Abschätzung.

Beweis. Aus der Cauchy-Schwarz-Ungleichung folgt⁵

$$\|x\|^2 = x^\top x = x^\top Q^{-1/2} Q^{1/2} x \leq \|Q^{-1/2} x\| \|Q^{1/2} x\|.$$

Durch Quadrieren erhalten wir

$$\|x\|^4 \leq \|Q^{-1/2} x\|^2 \|Q^{1/2} x\|^2 = (x^\top Q x) (x^\top Q^{-1} x)$$

und damit die untere Schranke in (4.19).

Es seien nun⁶ $\lambda_1, \dots, \lambda_n > 0$ die Eigenwerte von Q und v_1, \dots, v_n ein Satz zugehöriger orthonormaler Eigenvektoren. Es sei $x \in \mathbb{R}^n, x \neq 0$ beliebig. Wir stellen x als $x = \sum_{i=1}^n \gamma_i v_i$ dar. O. B. d. A. sei $\|x\|^2 = \sum_{i=1}^n \gamma_i^2 = 1$. Einsetzen in die linke Seite von (4.19) ergibt:

$$\frac{(x^\top Q x) (x^\top Q^{-1} x)}{\|x\|^4} = \underbrace{\left[\sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma_i^2 \right]}_{=\mathbb{E}(T)} \underbrace{\left[\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \gamma_i^2 \right]}_{=\mathbb{E}(1/T)}.$$

⁵Hierbei ist $Q^{1/2}$ die Matrixwurzel der s. p. d. Matrix Q , also diejenige eindeutig bestimmte s. p. d. Matrix, deren Quadrat wieder Q ist. Weiter ist $Q^{-1/2}$ die Inverse von $Q^{1/2}$. $Q^{-1/2}$ ist gleichzeitig die Matrixwurzel der s. p. d. Matrix Q^{-1} .

⁶Wir folgen ab hier dem Beweis von [Anderson, 1971](#), wie er in der Masterarbeit [Alpargu, 1996](#), Abschnitt 1.2.2 wiedergegeben ist.

Es ist jetzt aus Gründen der Übersichtlichkeit hilfreich, diese Faktoren als Erwartungswerte einer „Zufallsvariablen“ T bzw. $1/T$ zu interpretieren, wobei T die Werte $\lambda_i \in [\alpha, \beta]$ mit „Wahrscheinlichkeit“ γ_i^2 annimmt. Für $0 < \alpha \leq T \leq \beta$ gilt

$$0 \leq (\beta - T)(T - \alpha) = (\beta + \alpha - T)T - \alpha\beta,$$

also auch

$$\frac{1}{T} \leq \frac{\alpha + \beta - T}{\alpha\beta}$$

und daher (Erwartungswert nehmen)

$$\begin{aligned} \mathbb{E}(T) \mathbb{E}(1/T) &\leq \mathbb{E}(T) \frac{\alpha + \beta - \mathbb{E}(T)}{\alpha\beta} \\ &= \frac{(\alpha + \beta)^2}{4\alpha\beta} - \frac{1}{\alpha\beta} \left[\mathbb{E}(T) - \frac{1}{2}(\alpha + \beta) \right]^2 \\ &\leq \frac{(\alpha + \beta)^2}{4\alpha\beta}. \end{aligned}$$

Damit ist die erste (wesentliche) obere Schranke in (4.19) bewiesen. Die noch fehlende Ungleichung folgt elementar aus $0 < \alpha \leq \beta$. \square

Um die Kantorovich-Ungleichung zur Abschätzung von (4.18) verwenden zu können, benötigen wir noch eine Verallgemeinerung von der Euklidischen Norm $\|x\|$ auf die M -Norm $\|x\|_M$. Im Folgenden seien $\lambda_{\min}(Q; M) > 0$ und $\lambda_{\max}(Q; M) > 0$ der kleinste und größte Eigenwert des **verallgemeinerten Eigenwertproblems** (englisch: *generalized eigenvalue problem*)

$$Qx = \lambda Mx \quad \text{oder äquivalent} \quad M^{-1}Qx = \lambda x$$

mit den s. p. d. Matrizen Q und M .

Lemma 4.14 (verallgemeinerte Kantorovich-Ungleichung). *Es seien $Q \in \mathbb{R}^{n \times n}$ und $M \in \mathbb{R}^{n \times n}$ beide s. p. d. und $\alpha := \lambda_{\min}(Q; M)$ sowie $\beta := \lambda_{\max}(Q; M)$. Dann gilt*

$$1 \leq \frac{(x^T Q x)(x^T M Q^{-1} M x)}{\|x\|_M^4} \leq \frac{(\alpha + \beta)^2}{4\alpha\beta} \leq \frac{\beta}{\alpha} \quad (4.20)$$

für alle $x \in \mathbb{R}^n, x \neq 0$.

Beweis. Für die Abschätzung nach unten verwenden wir

$$\|x\|_M^2 = x^T M x = x^T Q^{1/2} Q^{-1/2} M x \leq (x^T Q x)^{1/2} (x^T M Q^{-1} M x)^{1/2}$$

und daher $\|x\|_M^4 \leq (x^T Q x)(x^T M Q^{-1} M x)$.

Wir benutzen nun die Cholesky-Zerlegung⁷ $M = LL^T$ und setzen $y := L^T x$, also $x = L^{-T} y$ ein:

$$\frac{(x^T Q x)(x^T M Q^{-1} M x)}{(x^T M x)^2} = \frac{(y^T L^{-1} Q L^{-T} y)(y^T L^T Q^{-1} L y)}{(y^T y)^2}.$$

⁷Stattdessen könnten wir auch mit der Matrix-Wurzel $M^{1/2}$ arbeiten.

Dies entspricht der Form in (4.19) mit der s. p. d. Matrix $\tilde{Q} := L^{-1}Q L^{-\top}$. Deren Eigenpaare (λ, v) erfüllen

$$\tilde{Q} v = L^{-1}Q L^{-\top} v = \lambda v, \quad v \neq 0,$$

also auch

$$Q L^{-\top} v = \lambda L v.$$

Ersetzen wir noch v durch $L^{\top} w$, so erhalten wir

$$Q w = \lambda M w. \quad (4.21)$$

Damit ist gezeigt, dass (λ, v) genau dann ein Eigenpaar von $\tilde{Q} = L^{-1}Q L^{-\top}$ ist, wenn $(\lambda, w = L^{-\top} v)$ ein Eigenpaar des verallgemeinerten Eigenwertproblems (4.21) ist. Insbesondere sind die Eigenwerte gleich. Es seien nun wie angenommen $0 < \alpha \leq \beta$ die extremalen Eigenwerte von (4.21), dann sind dies auch die extremalen Eigenwerte von \tilde{Q} , und die Behauptung folgt aus der gewöhnlichen Kantorovich-Ungleichung (4.19). \square

Mit Hilfe der **verallgemeinerten (spektralen) Konditionszahl** (englisch: *generalized (spectral) condition number*) von Q bzgl. M ,

$$\kappa := \text{cond}_2(Q; M) = \frac{\lambda_{\max}(Q; M)}{\lambda_{\min}(Q; M)} \quad (4.22)$$

können wir die Abschätzung (4.20) auch in der äquivalenten Form

$$1 \leq \frac{(x^{\top} Q x) (x^{\top} M Q^{-1} M x)}{\|x\|_M^4} \leq \frac{(\kappa + 1)^2}{4 \kappa} \leq \kappa \quad (4.23)$$

schreiben.

Mit Hilfe der verallgemeinerten Kantorovich-Ungleichung (4.20) folgt nun für die in (4.18) abzuschätzende Klammer:

$$1 - \frac{[(d^{(k)})^{\top} M d^{(k)}]^2}{[(d^{(k)})^{\top} Q d^{(k)}] [(d^{(k)})^{\top} M Q^{-1} M d^{(k)}]} \leq 1 - \frac{4 \alpha \beta}{(\alpha + \beta)^2} = \frac{(\beta - \alpha)^2}{(\beta + \alpha)^2} = \left(\frac{\kappa - 1}{\kappa + 1} \right)^2.$$

Ende der Woche 2

Damit haben wir das klassische Konvergenzresultat des (vorkonditionierten) Gradientenverfahrens bewiesen:

Satz 4.15 (Globaler Konvergenzsatz für quadratische Zielfunktionen).

Es seien Q und M s. p. d. Matrizen und κ die verallgemeinerte Konditionszahl von Q bzgl. M , siehe (4.22). Das Gradientenverfahren im M -Skalarprodukt (Algorithmus 4.10) mit exakter Schrittweite t_{\min} , angewendet zur Minimierung der Zielfunktion (4.14), konvergiert für jeden Startvektor $x^{(0)} \in \mathbb{R}^n$ gegen den eindeutigen globalen Minimierer x^* , und es gelten die Abschätzungen

$$f(x^{(k+1)}) - f(x^*) \leq \left(\frac{\kappa - 1}{\kappa + 1} \right)^2 (f(x^{(k)}) - f(x^*)) \quad (4.24)$$

und deswegen auch

$$\|x^{(k+1)} - x^*\|_Q \leq \left(\frac{\kappa - 1}{\kappa + 1}\right) \|x^{(k)} - x^*\|_Q, \quad (4.25a)$$

$$\|x^{(k)} - x^*\|_Q \leq \left(\frac{\kappa - 1}{\kappa + 1}\right)^k \|x^{(0)} - x^*\|_Q. \quad (4.25b)$$

Beachte: Damit können wir das Gradientenverfahren auch als ein iteratives Verfahren zur Lösung linearer Gleichungssysteme mit s. p. d. Koeffizientenmatrizen verstehen.

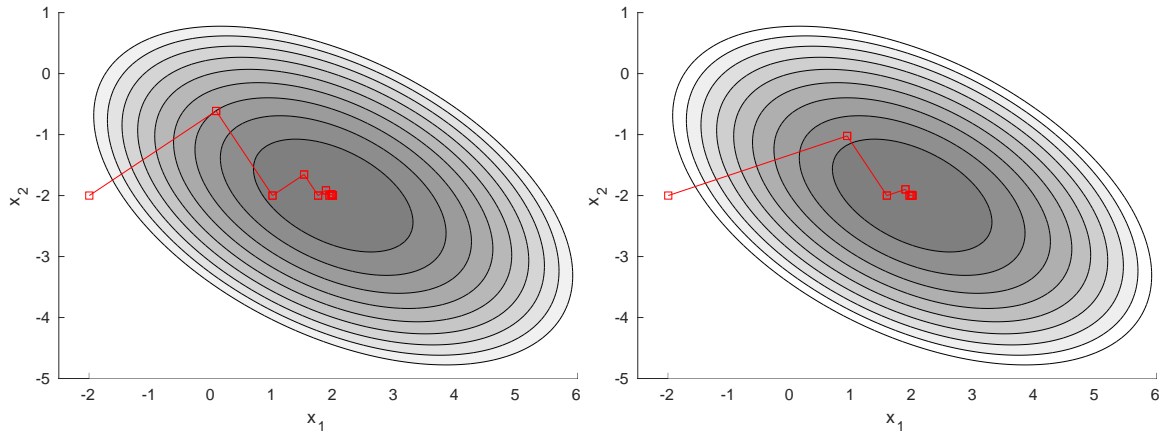


Abbildung 4.4: Illustration des Gradientenverfahrens (Algorithmus 4.10) mit Startpunkt $x^{(0)} = (-2, -2)^T$ und exakter Schrittweite (4.16) für die Minimierung von (4.14) mit $Q = \begin{pmatrix} 3 & 2 \\ 2 & 6 \end{pmatrix}$ und $c = \begin{pmatrix} -2 \\ 8 \end{pmatrix}$. Die exakte Lösung ist $x^* = (2, -2)^T$. Verlauf bei Verwendung des Skalarprodukts $M = \text{Id}$ (links) und $M = \text{diag}(Q)$ (rechts).

Bemerkung 4.16 (Zum Konvergenzverhalten des Gradientenverfahrens).

- (i) Für große Konditionszahlen κ ist die Konvergenz sehr langsam. Es zeigt sich ein Zick-Zack-Verlauf bei den Iterierten.
- (ii) Im gegenteiligen Extremfall ist $\kappa = 1$, d. h., $M = Q$ (oder ein Vielfaches davon), konvergiert das Gradientenverfahren in einem Schritt: $x^{(1)} = x^*$. Allerdings bedeutet dies, dass bei der Berechnung der Suchrichtung $d^{(0)} = -\nabla_M f(x^{(0)})$ ein lineares Gleichungssystem mit $M = Q$ als Koeffizientenmatrix zu lösen ist. Wenn man dies kann, so kann man natürlich auch direkt die Optimalitätsbedingungen $Qx^* = -c$ lösen.
- (iii) Für allgemeine C^2 -Funktionen f ist die Konvergenzgeschwindigkeit in der Nähe eines lokalen Minimums x^* , an dem $f''(x^*)$ s. p. d. ist, wegen

$$f(x) = f(x^*) + \nabla f(x^*)^T (x - x^*) + \frac{1}{2} (x - x^*)^T f''(x^* + \xi(x - x^*)) (x - x^*)$$

durch die verallgemeinerte Konditionszahl der Hessematrix $f''(x^*)$ bzgl. M bestimmt.

- (iv) In der Praxis sucht man einen Kompromiss bei der Wahl von M , sodass die Konditionszahl κ möglichst klein, lineare Gleichungssysteme mit M als Koeffizientenmatrix aber noch leicht zu lösen

sind. Manchmal ist bereits die Wahl

$$M = \text{diag}(f''(x^{(0)}))$$

konvergenzbeschleunigend.

Das in vielerlei Hinsicht beste Abstiegsverfahren zur Minimierung von (4.14) bzw. zur Lösung linearer Gleichungssysteme (4.15) mit s. p. d. Matrix Q ist das **Verfahren der konjugierten Gradienten (CG-Verfahren)**, siehe Vorlesung *Nichtlineare Optimierung* oder *Numerische Lineare Algebra*. Beim CG-Verfahren erhält man mit i. W. demselben Aufwand pro Iteration an Stelle von (4.25b) die Konvergenzabschätzung

$$\|x^{(k)} - x^*\|_Q \leq 2 \left(\frac{\sqrt{\kappa} - 1}{\sqrt{\kappa} + 1} \right)^k \|x^{(0)} - x^*\|_Q.$$

Es gibt auch nichtlineare Varianten des CG-Verfahrens für allgemeine Zielfunktionen, siehe Lehrveranstaltung *Nichtlineare Optimierung*.

§ 5 DAS NEWTON-VERFAHREN

Wir untersuchen in diesem Abschnitt das Newton-Verfahren zur Lösung der (nichtlinearen) Gleichung $F(x) = 0$. Dabei wird $F: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ im gesamten Abschnitt als stetig partiell diffbar (C^1 -Funktion) angenommen. Später wenden wir das Verfahren auf die notwendige Bedingung 1. Ordnung der Aufgabe „Minimiere $f(x)$ über $x \in \mathbb{R}^n$ “ an, also zur Lösung von $F(x) = \nabla f(x) = 0$.

Idee: Es sei $x^{(0)}$ die Schätzung einer Nullstelle von F . Wir legen im Punkt $x^{(0)}$ die Tangente (ein **lineares Modell**) an die Funktion und bestimmen deren Nullstelle:

$$F(x^{(0)}) + F'(x^{(0)})(x - x^{(0)}) = 0 \quad \Leftrightarrow \quad x = x^{(0)} - F'(x^{(0)})^{-1}F(x^{(0)}).$$

Diese Nullstelle dient als nächste Iterierte usw.

Der Vektor $F(x^{(k)})$ heißt dabei das **Residuum** zur Iterierten $x^{(k)}$, und $F'(x^{(k)})$ ist die zugehörige **Jacobimatrix**:

$$F'(x) = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1(x)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial F_1(x)}{\partial x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial F_n(x)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial F_n(x)}{\partial x_n} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n \times n}.$$

Algorithmus 5.1 (Lokales Newton-Verfahren).

Eingabe: Startschätzung $x^{(0)} \in \mathbb{R}^n$

- 1: Setze $k := 0$
- 2: **while** Abbruchkriterium nicht erfüllt **do**
- 3: Löse das lineare Gleichungssystem $F'(x^{(k)}) d^{(k)} := -F(x^{(k)})$ für die **Newton-Richtung** $d^{(k)}$
- 4: Setze $x^{(k+1)} := x^{(k)} + d^{(k)}$
- 5: Setze $k := k + 1$
- 6: **end while**

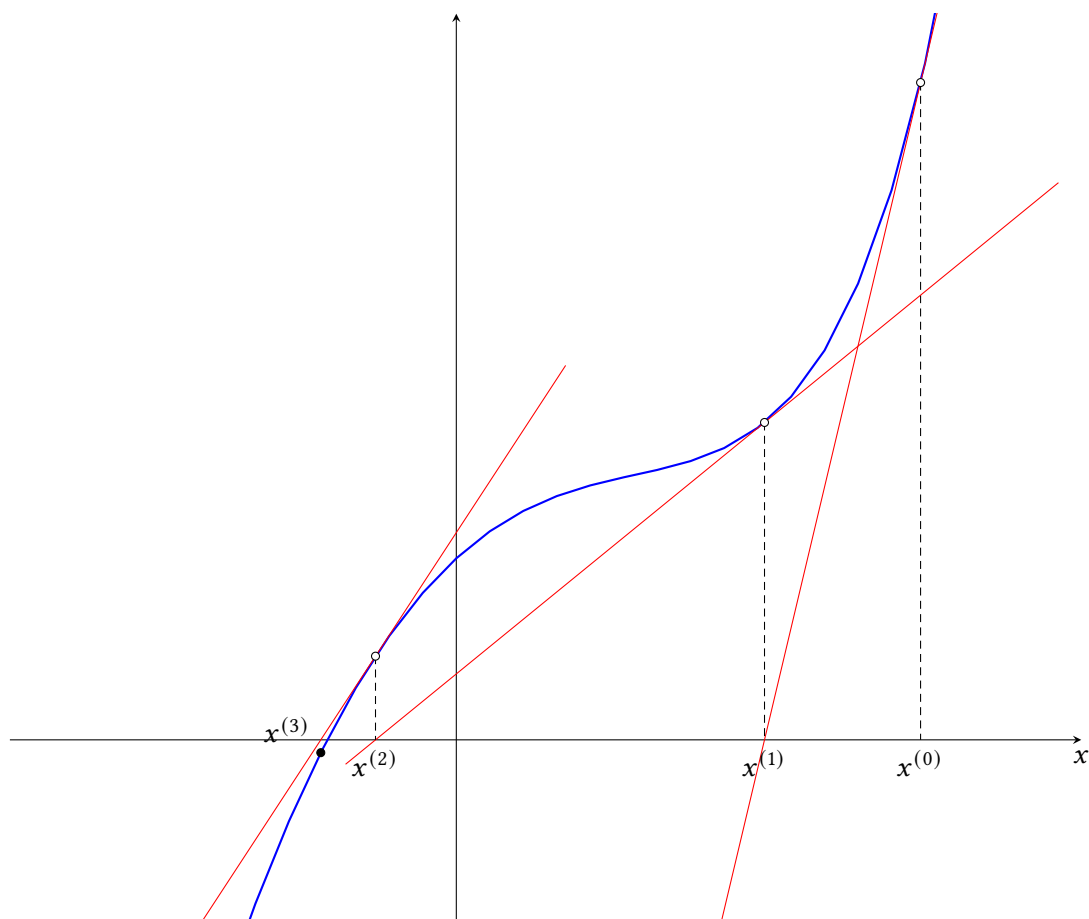


Abbildung 5.1: Illustration des Newton-Verfahrens zur Suche einer Nullstelle der Funktion $F(x) = \exp(0.9x) - x^2$.

§ 5.1 EINIGE HILFSRESULTATE

Literatur: Geiger, Kanzow, 1999, Kapitel 7, Lemma B.7 und B.8

Definition 5.2 (Matrixnorm).

Es sei $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$. Wir definieren die durch die Euklidischen Normen im \mathbb{R}^n und \mathbb{R}^m induzierte **Matrixnorm**

$$\|A\| = \max_{x \neq 0} \frac{\|Ax\|}{\|x\|} = \max_{\|x\|=1} \|Ax\|.$$

$\|A\|$ wird auch als **Spektralnorm** von A bezeichnet, und es gilt der Zusammenhang

$$\|A\| = \sigma_{\max}(A) = \sqrt{\lambda_{\max}(A^T A)}$$

mit dem größten Singulärwert σ_{\max} von A und dem größten Eigenwert λ_{\max} von $A^T A$. Weiter gilt $\|Ax\| \leq \|A\|\|x\|$ und $\|AB\| \leq \|A\|\|B\|$ für alle Matrizen A, B und Vektoren x passender Größe.

Lemma 5.3 (Banach-Lemma).

(i) Es sei $M \in \mathbb{R}^{n \times n}$ mit $\|M\| < 1$. Dann ist $\text{Id} - M$ regulär (invertierbar), und es gilt

$$\|(\text{Id} - M)^{-1}\| \leq \frac{1}{1 - \|M\|}.$$

(ii) Es seien $A, B \in \mathbb{R}^{n \times n}$ mit $\|\text{Id} - BA\| < 1$. Dann sind A und B regulär, und es gilt

$$\|B^{-1}\| \leq \frac{\|A\|}{1 - \|\text{Id} - BA\|} \quad \text{und} \quad \|A^{-1}\| \leq \frac{\|B\|}{1 - \|\text{Id} - BA\|}.$$

Aussage (i) besagt, Matrizen „in der Nähe“ der Einheitsmatrix invertierbar sind. **Aussage (ii)** besagt, dass wenn $\text{Id} - BA$ klein ist, also $B \approx A^{-1}$ gilt, notwendig A und B invertierbar sind.

Beweis. **Aussage (i):** Für $x \in \mathbb{R}^n$ gilt

$$\|(\text{Id} - M)x\| = \|x - Mx\| \geq \|x\| - \|Mx\| \geq \underbrace{(1 - \|M\|)}_{>0} \|x\|.$$

Es folgt $(\text{Id} - M)x \neq 0$ für $x \neq 0$, d. h., $\text{Id} - M$ ist injektiv und damit regulär.

Es sei nun $y \in \mathbb{R}^n$ beliebig und $x := (\text{Id} - M)^{-1}y$. Für eine Abschätzung der Norm von $(\text{Id} - M)^{-1}$ müssen wir $\|x\|$ durch $\|y\|$ abschätzen. Die Abschätzung oben zeigt

$$\begin{aligned} \|y\| &\geq (1 - \|M\|) \|x\| \\ \Rightarrow \|(\text{Id} - M)^{-1}\| &= \max_{y \neq 0} \frac{\|(\text{Id} - M)^{-1}y\|}{\|y\|} \leq \frac{1}{1 - \|M\|}. \end{aligned}$$

Aussage (ii): Es sei $M = \text{Id} - BA$, also $\|M\| < 1$. Wegen **Aussage (i)** ist $\text{Id} - M = \text{Id} - (\text{Id} - BA) = BA$ regulär, d. h., A und B sind beide regulär. Weiter gilt

$$\begin{aligned} (\text{Id} - M)^{-1} &= (BA)^{-1} = A^{-1}B^{-1} \\ \Rightarrow B^{-1} &= A(\text{Id} - M)^{-1} \\ \Rightarrow \|B^{-1}\| &\leq \|A\| \|(\text{Id} - M)^{-1}\| \stackrel{(i)}{\leq} \frac{\|A\|}{1 - \|M\|} = \frac{\|A\|}{1 - \|\text{Id} - BA\|}. \end{aligned}$$

Die andere Ungleichung folgt analog. □

Lemma 5.4. Es sei F eine C^1 -Funktion, $x^* \in \mathbb{R}^n$ und die Jacobimatrix $F'(x^*)$ regulär. Dann existieren eine offene Kugel $B_\delta(x^*)$ mit $\delta > 0$ und eine Konstante $c > 0$, sodass $F'(x)$ für alle $x \in B_\delta(x^*)$ regulär ist, und es gilt:

$$\|F'(x)^{-1}\| \leq c := 2 \|F'(x^*)^{-1}\| \quad \text{für alle } x \in B_\delta(x^*).$$

Beweis. Da F' im Punkt x^* stetig ist, existiert ein $\delta > 0$ mit

$$\|F'(x^*) - F'(x)\| \leq \varepsilon = \frac{1}{2 \|F'(x^*)^{-1}\|}$$

für alle $x \in B_\delta(x^*)$, also auch

$$\begin{aligned} \|\text{Id} - F'(x^*)^{-1} F'(x)\| &= \|F'(x^*)^{-1} (F'(x^*) - F'(x))\| \\ &\leq \|F'(x^*)^{-1}\| \|F'(x^*) - F'(x)\| \\ &\leq 1/2 < 1. \end{aligned}$$

Nach dem **Banach-Lemma 5.3, Aussage (ii)** [mit $A = F'(x)$ und $B = F'(x^*)^{-1}$] folgt, dass $F'(x)$ für $x \in B_\delta(x^*)$ regulär ist, und es gilt

$$\|F'(x)^{-1}\| \leq \frac{\|F'(x^*)^{-1}\|}{1 - \|\text{Id} - F'(x^*)^{-1} F'(x)\|} \leq 2 \|F'(x^*)^{-1}\| =: c.$$

□

Bemerkung 5.5 (Einordnung von **Lemma 5.4**).

Lemma 5.4 korrespondiert zu einem allgemeineren Ergebnis der Funktionalanalysis: Die Menge aller stetig invertierbaren linearen Operatoren zwischen Banachräumen ist offen.

Lemma 5.6. Es sei F eine C^1 -Funktion und $x^* \in \mathbb{R}^n$. Für alle $\varepsilon > 0$ existiert $\delta > 0$ mit

$$\|F(x) - F(x^*) - F'(x)(x - x^*)\| \leq \varepsilon \|x - x^*\|$$

für alle $\|x - x^*\| \leq \delta$.

Quizfrage 5.1: Was würde die Aussage des Satzes bedeuten, wenn an Stelle von x der Punkt x^* stehen würde?

Beweis. Es sei $\varepsilon > 0$ gegeben. Aus der Dreiecksungleichung ergibt sich

$$\begin{aligned} \|F(x) - F(x^*) - F'(x)(x - x^*)\| \\ \leq \|F(x) - F(x^*) - F'(x^*)(x - x^*)\| + \|F'(x^*) - F'(x)\| \|x - x^*\|. \end{aligned}$$

Da F nach Voraussetzung in x^* diffbar ist, existiert $\delta_1 > 0$ mit

$$\|F(x) - F(x^*) - F'(x^*)(x - x^*)\| \leq \frac{\varepsilon}{2} \|x - x^*\|$$

für alle $\|x - x^*\| < \delta_1$. Andererseits ist F' stetig in x^* , sodass $\delta_2 > 0$ existiert mit

$$\|F'(x^*) - F'(x)\| \leq \frac{\varepsilon}{2}$$

für alle $\|x - x^*\| < \delta_2$. Mit $\delta := \min\{\delta_1, \delta_2\}$ folgt die Behauptung. □

Zur Charakterisierung der Konvergenzgeschwindigkeit von Algorithmen führen wir folgende Begriffe ein:

Definition 5.7 (Q-Konvergenzraten).

Es sei $(x^{(k)}) \subseteq \mathbb{R}^n$ eine Folge und $x^* \in \mathbb{R}^n$.

(i) $(x^{(k)})$ konvergiert gegen x^* (mindestens) **Q-linear**, falls ein $c \in (0, 1)$ existiert mit

$$\|x^{(k+1)} - x^*\| \leq c \|x^{(k)} - x^*\| \quad \text{für alle } k \in \mathbb{N} \text{ hinreichend groß.}$$

(ii) $(x^{(k)})$ konvergiert gegen x^* (mindestens) **Q-superlinear**, falls es eine Nullfolge $(\epsilon^{(k)})$ gibt mit

$$\|x^{(k+1)} - x^*\| \leq \epsilon^{(k)} \|x^{(k)} - x^*\| \quad \text{für alle } k \in \mathbb{N}.$$

(iii) Es gelte $x^{(k)} \rightarrow x^*$. Die Folge $(x^{(k)})$ konvergiert gegen x^* (mindestens) **Q-quadratisch**, falls ein $C > 0$ existiert mit

$$\|x^{(k+1)} - x^*\| \leq C \|x^{(k)} - x^*\|^2 \quad \text{für alle } k \in \mathbb{N}.$$

Abschätzung (4.25a) zeigt beispielsweise die Q-lineare Konvergenz des Gradientenverfahrens bei quadratischer Zielfunktion.

Quizfrage 5.2: Angenommen, eine Folge konvergiere Q-superlinear wie oben definiert. Konvergiert sie dann auch noch Q-superlinear, wenn man die in der Definition verwendete Euklidische Norm durch die Norm $\|x\|_M$ mit einer s. p. d. Matrix M austauscht? Wie ist das bei Q-quadratischer Konvergenz? Und bei Q-linearer Konvergenz?

§ 5.2 DAS LOKALE NEWTON-VERFAHREN FÜR DIE NULLSTELLENBESTIMMUNG $F(x) = 0$

Wir können nun einen lokalen Konvergenzsatz für Algorithmus 5.1 (ohne Abbruchbedingung) beweisen:

Satz 5.8 (Lokaler Konvergenzsatz für das lokale Newton-Verfahren).

Es sei F eine C^1 -Funktion und $x^* \in \mathbb{R}^n$ ein Punkt mit $F(x^*) = 0$ und $F'(x^*)$ regulär. Dann existiert eine offene Kugel $B_\delta(x^*)$ von x^* mit $\delta > 0$, sodass für jedes $x^{(0)} \in B_\delta(x^*)$ gilt:

(i) Das lokale Newton-Verfahren ist wohldefiniert und erzeugt eine Folge $(x^{(k)})$, die gegen x^* konvergiert.

(ii) Die Konvergenzrate ist Q-superlinear.

(iii) Ist F' Lipschitz-stetig in $B_\delta(x^*)$, so ist die Konvergenzrate sogar Q-quadratisch.

Beweis. **Aussage (i):** Nach Lemma 5.4 existieren $\delta_1 > 0$ und $c > 0$, sodass $F'(x)$ für alle $x \in B_{\delta_1}(x^*)$ regulär ist mit

$$\|F'(x)^{-1}\| \leq c = 2 \|F(x^*)^{-1}\|. \quad (5.1)$$

Nach Lemma 5.6 existiert zu $\varepsilon = 1/(2c)$ ein $\delta_2 > 0$ mit

$$\|F(x) - F(x^*) - F'(x)(x - x^*)\| \leq \frac{1}{2c} \|x - x^*\| \quad (5.2)$$

für alle $x \in B_{\delta_2}(x^*)$.

Setze $\delta := \min\{\delta_1, \delta_2\}$ und wähle $x^{(0)} \in B_\delta(x^*)$. Dann ist der Schritt $x^{(1)} := x^{(0)} - F'(x^{(0)})^{-1}F(x^{(0)})$ wohldefiniert, und es gilt

$$\begin{aligned} \|x^{(1)} - x^*\| &= \|x^{(0)} - x^* - F'(x^{(0)})^{-1}F(x^{(0)})\| \\ &= \|F'(x^{(0)})^{-1}[F'(x^{(0)})(x^{(0)} - x^*) - F(x^{(0)}) + \overbrace{F(x^*)}^{=0}]\| \\ &\leq \|F'(x^{(0)})^{-1}\| \|F(x^{(0)}) - F(x^*) - F'(x^{(0)})(x^{(0)} - x^*)\| \\ &\leq c \frac{1}{2c} \|x^{(0)} - x^*\| = \frac{1}{2} \|x^{(0)} - x^*\|, \end{aligned}$$

also liegt auch $x^{(1)}$ wieder in $B_\delta(x^*)$. Per Induktion ist $x^{(k)}$ wohldefiniert, gehört zu $B_\delta(x^*)$, und $x^{(k)} \rightarrow x^*$ Q-linear.

Aussage (ii): Wir stellen zunächst eine Gleichung für den Fehler auf:⁸

$$\begin{aligned} x^{(k+1)} - x^* &= x^{(k)} - x^* - F'(x^{(k)})^{-1}(F(x^{(k)}) - F(x^*)) \\ &= F'(x^{(k)})^{-1}[F'(x^{(k)})(x^{(k)} - x^*) - (F(x^{(k)}) - F(x^*))] \\ &= F'(x^{(k)})^{-1}\left[F'(x^{(k)})(x^{(k)} - x^*) - \int_0^1 F'(x^{(k)} + t(x^* - x^{(k)}))(x^{(k)} - x^*) dt\right] \\ &= F'(x^{(k)})^{-1}\left[\int_0^1 F'(x^{(k)}) - F'(x^{(k)} + t(x^* - x^{(k)})) dt\right](x^{(k)} - x^*). \end{aligned}$$

Daraus erhalten wir folgende wichtige Abschätzung:

$$\|x^{(k+1)} - x^*\| \leq \|F'(x^{(k)})^{-1}\| \int_0^1 \overbrace{\|F'(x^{(k)}) - F'(x^{(k)} + t(x^* - x^{(k)}))\|}^{=: D^{(k)}(t)} dt \|x^{(k)} - x^*\|. \quad (5.3)$$

Wegen $x^{(k)} \rightarrow x^*$ gilt $x^{(k)} + t(x^* - x^{(k)}) \rightarrow x^*$ gleichmäßig auf $t \in [0, 1]$. Außerdem ist F' stetig. Zu jedem $\varepsilon > 0$ existiert also ein Index $k_0 \in \mathbb{N}$ mit

$$\begin{aligned} \|D^{(k)}(t)\| &\leq \varepsilon \quad \text{für alle } k \geq k_0 \text{ und alle } t \in [0, 1]. \\ \Rightarrow \quad 0 &\leq \int_0^1 \|D^{(k)}(t)\| dt \leq \varepsilon \quad \text{für alle } k \geq k_0. \end{aligned}$$

Das bedeutet aber: $\int_0^1 \|D^{(k)}(t)\| dt \rightarrow 0$. Jetzt liefern (5.1) und (5.3):

$$\|x^{(k+1)} - x^*\| \leq c \int_0^1 \|D^{(k)}(t)\| dt \|x^{(k)} - x^*\|,$$

⁸**Beachte:** Unter dem Integral stehen Matrizen.

also die Q-superlineare Konvergenz.

Quizfrage 5.3: Welche Norm ist im Ausdruck $\|D^{(k)}(t)\|$ eigentlich gemeint?

Aussage (iii): Da $x^{(k)}$ und $x^{(k)} + t(x^* - x^{(k)})$ für alle $t \in [0, 1]$ in $B_\delta(x^*)$ liegen, können wir das Integral unter den stärkeren Voraussetzungen besser abschätzen:

$$\int_0^1 \|F'(x^{(k)}) - F'(x^{(k)} + t(x^* - x^{(k)}))\| dt \leq \int_0^1 L t \|x^* - x^{(k)}\| dt = \frac{L}{2} \|x^{(k)} - x^*\|.$$

Aus (5.3) erhalten wir nun:

$$\|x^{(k+1)} - x^*\| \leq c \frac{L}{2} \|x^{(k)} - x^*\|^2.$$

□

Bemerkung 5.9 (Zum lokalen Newton-Verfahren).

- (i) Das lokale Newton-Verfahren ([Algorithmus 5.1](#)) kann scheitern, denn $F'(x^{(k)})$ muss nicht regulär sein, falls man außerhalb der (unbekannten) garantierten Konvergenzumgebung $B_\delta(x^*)$ startet.
- (ii) Das sogenannte **vereinfachte Newton-Verfahren**, bei dem in [Zeile 3](#) von [Algorithmus 5.1](#) statt $F'(x^{(k)})$ die feste (invertierbare) Matrix $F'(x^{(0)})$ verwendet wird, konvergiert noch lokal Q-linear.

Quizfrage 5.4: Was unterscheidet ein vereinfachtes Newton-Verfahren vom Gradientenverfahren in der Optimierung?

§ 5.3 DAS LOCALE NEWTON-VERFAHREN IN DER OPTIMIERUNG

Literatur: Geiger, Kanzow, 1999, Kapitel 9

Für den Rest von § 5 wird f als zweimal stetig partiell diffbar (C^2 -Funktion) angenommen. Wir betrachten wieder die unrestringierte Aufgabe

$$\text{Minimiere } f(x) \text{ über } x \in \mathbb{R}^n. \quad (5.4)$$

Das Newton-Verfahren in der Optimierung lässt sich auf zwei verschiedene Weisen motivieren:

- (i) Die notwendige Optimalitätsbedingung 1. Ordnung für (5.4) lautet

$$f'(x) = 0 \quad \text{oder äquivalent} \quad \nabla f(x) = 0,$$

siehe [Satz 3.1](#). Wenden wir zur Lösung dieser i. A. nichtlinearen Gleichung (Nullstellensuche) das Newton-Verfahren mit $F(x) = \nabla f(x)$ und $F'(x) = f''(x)$ an, so erhalten wir die Iterationsvorschrift

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - f''(x^{(k)})^{-1} \nabla f(x^{(k)}). \quad (5.5)$$

- (ii) Im aktuellen Iterationspunkt $x^{(k)}$ ersetzen wir (5.4) durch die Minimierung des **quadratischen Ersatzmodells** (Taylorpolynoms)

$$m^{(k)}(x) := f(x^{(k)}) + \nabla f(x^{(k)})^\top (x - x^{(k)}) + \frac{1}{2} (x - x^{(k)})^\top f''(x^{(k)}) (x - x^{(k)}). \quad (5.6)$$

Falls die Hessematrix $f''(x^{(k)})$ positiv definit ist, so ist der eindeutige Minimierer durch

$$0 = \nabla m^{(k)}(x) = \nabla f(x^{(k)}) + f''(x^{(k)})(x - x^{(k)})$$

charakterisiert, vgl. (4.15). Wir wählen die Lösung dieses lineare Gleichungssystem als nächste Iterierte $x^{(k+1)}$ und erhalten wiederum die Iterationsvorschrift

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - f''(x^{(k)})^{-1} \nabla f(x^{(k)}).$$

Bemerkung 5.10 (Zum lokalen Newton-Verfahren).

- (i) *Satz 5.8 liefert die lokal Q -superlineare bzw. Q -quadratische Konvergenz von Algorithmus 5.1 mit $F(x) = \nabla f(x)$ gegen einen stationären Punkt x^* von f . Dieser kann auch ein lokaler Maximierer oder ein Sattelpunkt von f sein, da wir $f''(x^*)$ nur als regulär und nichts über die Definitheit voraussetzen.*
- (ii) *Ist $f''(x^{(k)})$ s. p. d., so ist die aus dem linearen Gleichungssystem*

$$f''(x^{(k)}) d^{(k)} = -\nabla f(x^{(k)})$$

*erhaltene **Newton-Richtung** $d^{(k)}$ eine Abstiegsrichtung für f , vergleiche (4.12):*

$$f'(x^{(k)}) d^{(k)} = \nabla f(x^{(k)})^\top d^{(k)} = -\nabla f(x^{(k)})^\top \underbrace{f''(x^{(k)})^{-1}}_{\text{positiv definit}} \nabla f(x^{(k)}) < 0, \quad \text{falls } \nabla f(x^{(k)}) \neq 0.$$

Wegen der festen Schrittweite $t^{(k)} = 1$ im lokalen Newton-Verfahren ist jedoch i. A. kein Abstieg in f garantiert, wenn $x^{(k)}$ „weit“ von einem lokalen Minimierer x^ entfernt ist.*

- (iii) *Das Newton-Verfahren ist invariant gegenüber affin-linearen Transformationen in der Grundmenge und in der Wertemenge. Das bedeutet, dass das Verfahren, angewendet auf die Aufgaben*

$$\text{Minimiere } f(x) \text{ über } x \in \mathbb{R}^n \quad \text{und} \quad \text{Minimiere } c f(Ay + b) + d \text{ über } y \in \mathbb{R}^n$$

mit regulärer Matrix $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $b \in \mathbb{R}^n$, $c > 0$ und $d \in \mathbb{R}$ folgende Eigenschaft besitzt: Gelten für die Startschätzungen $x^{(0)} = Ay^{(0)} + b$, dann gilt auch $x^{(k)} = Ay^{(k)} + b$ für alle $k \in \mathbb{N}$.

§ 5.4 EIN GLOBALISIERTES NEWTON-VERFAHREN IN DER OPTIMIERUNG

Idee: Kombiniere die globalen Konvergenzeigenschaften des Gradientenverfahrens (Algorithmus 4.10) mit der schnellen lokalen Konvergenz des Newton-Verfahrens (Algorithmus 5.1).

Algorithmus 5.11 (**Globalisiertes Newton-Verfahren** in der Optimierung).

Eingabe: Startschätzung $x^{(0)} \in \mathbb{R}^n$

Eingabe: Armijo-Parameter $\sigma \in (0, 1/2)$, Backtracking-Parameter $\beta \in (0, 1)$

Eingabe: Globalisierungs-Parameter $\varrho_1 > 0$, $\varrho_2 > 0$ und $p > 0$

Eingabe: s. p. d. Matrix $M \in \mathbb{R}^{n \times n}$

1: Setze $k := 0$

2: **while** Abbruchkriterium nicht erfüllt **do**

3: Löse, wenn es eindeutig möglich ist, das lineare Gleichungssystem

$$f''(x^{(k)}) d^{(k)} = -\nabla f(x^{(k)})$$

nach der Newton-Richtung $d^{(k)}$

4: Ist dieses System nicht oder nicht eindeutig lösbar oder gilt

$$-f'(x^{(k)}) d^{(k)} \leq \min\{\varrho_1, \varrho_2 \|d^{(k)}\|_M^p\} \|d^{(k)}\|_M^2, \quad (5.7)$$

so setze $d^{(k)} := -\nabla_M f(x^{(k)})$

// Fallback auf Gradientenrichtung

5: Bestimme eine Schrittweite $t^{(k)}$ mit der Armijo-Backtracking-Strategie zur Startschrittweite $s = 1$, sodass (4.3) erfüllt ist, also:

$$f(x^{(k)} + t^{(k)} d^{(k)}) \leq f(x^{(k)}) + \sigma t^{(k)} f'(x^{(k)}) d^{(k)}$$

6: Setze $x^{(k+1)} := x^{(k)} + t^{(k)} d^{(k)}$

7: Setze $k := k + 1$

8: **end while**

Zur Durchführung des globalisierten Newton-Verfahrens werden die folgenden problemspezifischen Routinen benötigt:

- (1) Routine zur Auswertung der Zielfunktion $f(x)$.
- (2) Routine zur Auswertung der Ableitung $f'(x)$ bzw. des Gradienten $\nabla f(x)$.
- (3) Routine zur Auswertung der Hessematrix $f''(x)$.

Ende der Woche 3

Bemerkung 5.12 (Zum globalisierten Newton-Verfahren).

- (i) Bei unbrauchbarer Newton-Richtung weichen wir also auf einen Gradientenschritt aus. Entweder die nicht erfüllte Bedingung (5.7) oder aber die Wahl $d^{(k)} = -\nabla_M f(x^{(k)})$ sichert $f'(x^{(k)}) d^{(k)} < 0$. Die Armijo-Backtracking-Strategie liefert also immer eine Schrittweite (Satz 4.3), und der Algorithmus ist wohldefiniert.
- (ii) Die Bedingung (5.7) kann auch für Abstiegsrichtungen erfüllt sein, wenn der Abstieg „nicht gut genug“ ist. Je näher wir der Lösung kommen, desto toleranter wollen wir allerdings sein, da wir die lokal schnelle Konvergenz des Newton-Verfahrens realisieren möchten.

- (iii) Als Abbruchbedingungen kommen wiederum diejenigen aus [Bemerkung 4.7](#) zum Einsatz.
- (iv) Die Vorgabe $\sigma < 1/2$ und die Wahl der Startschrittweite $s = 1$ sind wesentlich, damit für hinreichend große $k \in \mathbb{N}$ tatsächlich volle Newton-Schritte ($t^{(k)} = 1$) gegangen werden können.
- (v) Im praktischen Einsatz kommt in [Algorithmus 5.11](#) auch die nicht-monotone Armijo-Regel zum Einsatz, bei der hinreichender Abstieg nur im Vergleich zum Maximum der letzten Funktionswerte gefordert wird, siehe [Geiger, Kanzow, 1999](#), Ende Abschnitt 9.3, S.96.

Wir geben Konvergenzaussagen für [Algorithmus 5.11](#) ohne Abbruchbedingung, sodass eine unendliche Folge $(x^{(k)})$ entsteht, an.

Satz 5.13 (Globaler Konvergenzsatz für das globalisierte Newton-Verfahren).

Es sei $(x^{(k)})$ eine durch [Algorithmus 5.11](#) erzeugte Folge. Dann gilt:

- (i) Jeder Häufungspunkt x^* von $(x^{(k)})$ ist ein stationärer Punkt von f , erfüllt also $f'(x^*) = 0$.
- (ii) Ist x^* ein isolierter Häufungspunkt von $(x^{(k)})$, dann konvergiert bereits die gesamte Folge $x^{(k)} \rightarrow x^*$.

Beweis. Siehe [Geiger, Kanzow, 1999](#), Satz 9.5 und Satz 9.7 □

Satz 5.14 (Lokaler Konvergenzsatz für das globalisierte Newton-Verfahren).

Es seien $(x^{(k)})$, $(d^{(k)})$ durch den [Algorithmus 5.11](#) erzeugte Folgen. Ist x^* ein Häufungspunkt von $(x^{(k)})$ und ist $f''(x^*)$ s. p. d., so gilt:

- (i) Die gesamte Folge $(x^{(k)})$ konvergiert gegen den strikten lokalen Minimierer x^* .
- (ii) Für alle hinreichend großen $k \in \mathbb{N}$ ist die verwendete Suchrichtung $d^{(k)}$ immer die Newton-Richtung, und es wird die volle Schrittweite $t^{(k)} = 1$ akzeptiert.
- (iii) $(x^{(k)})$ konvergiert Q -superlinear gegen x^* .
- (iv) Ist f'' Lipschitz-stetig in einer Umgebung von x^* , so konvergiert $(x^{(k)})$ Q -quadratisch gegen x^* .

Beweis. Siehe [Geiger, Kanzow, 1999](#), Satz 9.10 □

Alle hier besprochenen Basis-Algorithmen zur Lösung freier Optimierungsaufgaben sind **Liniensuchverfahren** (englisch: *line search methods*), die in jeder Iteration

- (1) eine Suchrichtung $d^{(k)}$
- (2) und anschließend eine geeignete Schrittweite $t^{(k)}$

bestimmen. Als Alternative sind auch **Trust-Region-Verfahren** (englisch: *trust-region methods*) etabliert, die beide Schritte gemeinsam durchführen, siehe Vorlesung *Nichtlineare Optimierung* und Geiger, Kanzow, 1999, Abschnitt 14.

Allen hier besprochenen Verfahren ist gemeinsam, dass sie die Suchrichtung $d^{(k)}$ durch Minimierung eines lokalen quadratischen Ersatzmodells

$$q^{(k)}(d) := f(x^{(k)}) + f'(x^{(k)})d + \frac{1}{2}d^T B^{(k)}d$$

gewinnen, d. h. (bei s. p. d. Matrix $B^{(k)}$) aus dem linearen Gleichungssystem

$$B^{(k)}d^{(k)} = -\nabla f(x^{(k)}).$$

Folgende Tabelle fasst typische Eigenschaften dieser Verfahren zusammen:

Gradientenverfahren	$B^{(k)} = \text{Id}$	Q-linear, einfaches Verfahren
vork. Gradientenverf.	$B^{(k)} = M$	Q-linear, einfaches Verfahren
Quasi-Newton-Verf.	$B^{(k)}$ variiert	bis Q-superlinear, oft guter Kompromiss
Newton-Verfahren	$B^{(k)} = f''(x^{(k)})$	Q-superlinear oder besser, aber aufwändig

Mehr insbesondere zu Quasi-Newton-Verfahren folgt in der Vorlesung *Nichtlineare Optimierung*.

Kapitel 2 Lineare Optimierung

§ 6 EINFÜHRUNG

Literatur: Geiger, Kanzow, 2002, Kapitel 3.1

Lineare Optimierungsaufgaben (**lineare Programme, LP**) sind insbesondere in den Wirtschaftswissenschaften von großer Bedeutung. Sie umfassen u. a. Transport- und Logistikprobleme, Kürzeste-Wege-Aufgaben usw. Es sind im gesamten Kapitel 2 stets f , g und h aus der allgemeinen Aufgabenstellung (1.1) (affin-)lineare Funktionen von x , und die Grundmenge ist $\Omega = \mathbb{R}^n$.

Eine lineare Optimierungsaufgabe kann also immer in folgender Form geschrieben werden:

$$\left. \begin{array}{ll} \text{Minimiere} & c^T x + \gamma \quad \text{über } x \in \mathbb{R}^n \\ \text{sodass} & A_{\text{ineq}} x \leq b_{\text{ineq}} \\ \text{und} & A_{\text{eq}} x = b_{\text{eq}}. \end{array} \right\} \quad (6.1)$$

Dabei heißt $c \in \mathbb{R}^n$ der **Kostenvektor** der Aufgabe. Weiter sind $A_{\text{ineq}} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ und $b_{\text{ineq}} \in \mathbb{R}^m$ sowie $A_{\text{eq}} \in \mathbb{R}^{p \times n}$ und $b_{\text{eq}} \in \mathbb{R}^p$. Die Ungleichungen sind komponentenweise zu verstehen. Es ist erlaubt, dass $m = 0$ (keine Ungleichungen) oder $p = 0$ (keine Gleichungen) gilt, sodass die Beschränkungen des jeweiligen Typs nicht vertreten sind.

Quizfrage 6.1: In der Regel setzt man den konstanten Term γ in der Zielfunktion gleich null. Warum stellt das keine Einschränkung in der Aufgabenstellung dar?

Quizfrage 6.2: Warum stellt der Verzicht auf Ungleichungen der Form $A_{\text{ineq}} x \geq b_{\text{ineq}}$ ebenfalls keine Einschränkung in der Aufgabenstellung dar?

Lineare Programme sind Spezialfälle konvexer Optimierungsaufgaben (Kapitel 3), daher brauchen wir nicht zwischen lokalen und globalen Lösungen zu unterscheiden (Satz 12.2). Wir wollen das hier aber schon einmal direkt nachweisen:

Satz 6.1. *Jeder lokale Minimierer von (6.1) ist bereits ein globaler Minimierer.*

Beweis. Wir bezeichnen mit

$$F := \{x \in \mathbb{R}^n \mid A_{\text{ineq}} x \leq b_{\text{ineq}} \text{ und } A_{\text{eq}} x = b_{\text{eq}}\}$$

die zulässige Menge und mit $f(x) := c^T x + \gamma$ die Zielfunktion. Es sei nun x^* ein lokaler Minimierer von (6.1), d. h., es existiert eine Umgebung $U(x^*)$ mit $f(x^*) \leq f(x)$ für alle $x \in F \cap U(x^*)$, vgl. Definition 1.1.

Wir führen einen Widerspruchsbeweis. Angenommen, es gäbe ein $\hat{x} \in F$ mit $f(\hat{x}) < f(x^*)$. Wir betrachten Punkte x_α entlang der Verbindungsstrecke zwischen x^* und \hat{x} , also

$$x_\alpha = \alpha \hat{x} + (1 - \alpha) x^* \quad \text{mit } \alpha \in [0, 1].$$

Alle diese Punkte x_α sind zulässig, denn:

$$\begin{aligned} A_{\text{ineq}} x_\alpha &= A_{\text{ineq}} (\alpha \hat{x} + (1 - \alpha) x^*) = \alpha A_{\text{ineq}} \hat{x} + (1 - \alpha) A_{\text{ineq}} x^* \leq \alpha b_{\text{ineq}} + (1 - \alpha) b_{\text{ineq}} = b_{\text{ineq}}, \\ A_{\text{eq}} x_\alpha &= A_{\text{eq}} (\alpha \hat{x} + (1 - \alpha) x^*) = \alpha A_{\text{eq}} \hat{x} + (1 - \alpha) A_{\text{eq}} x^* = \alpha b_{\text{eq}} + (1 - \alpha) b_{\text{eq}} = b_{\text{eq}}. \end{aligned}$$

Für die Werte der Zielfunktion gilt

$$\begin{aligned} f(x_\alpha) &= c^T x_\alpha + \gamma \\ &= c^T (\alpha \hat{x} + (1 - \alpha) x^*) + \gamma \\ &= \alpha (c^T \hat{x} + \gamma) + (1 - \alpha) (c^T x^* + \gamma) \\ &= \alpha f(\hat{x}) + (1 - \alpha) f(x^*). \end{aligned}$$

Für $\alpha \in (0, 1]$ folgt daher wegen $f(\hat{x}) < f(x^*)$:

$$f(x_\alpha) < \alpha f(x^*) + (1 - \alpha) f(x^*) = f(x^*).$$

Nun liegt aber für hinreichend kleines $\alpha > 0$ der Punkt x_α in der Umgebung $U(x^*)$ und damit in $U(x^*) \cap F$. Dies steht im Widerspruch zur lokalen Optimalität von x^* . Also kann ein \hat{x} wie oben angenommen nicht existieren, d. h., es gilt

$$f(x^*) \leq f(x) \quad \text{für alle } x \in F.$$

Mit anderen Worten: Jeder lokale Minimierer von (6.1) ist bereits ein globaler Minimierer. \square

Beispiel 6.2 (Mozartproblem).

Eine Firma stellt Mozartkugeln und Mozarttaler her und benötigt dafür folgende Zutaten pro Einheit des hergestellten Produkts:

	Marzipan	Nougat	Schokolade	Gewinn pro Einheit
Mozartkugeln	1	1	2	9
Mozarttaler	2	1	1	8
Lagerbestand	9	6	11	

Wir möchten bestimmen, wieviele Einheiten an Mozartkugeln und -talern produziert werden sollten, um den Gewinn zu maximieren.

Es sei

$$\begin{aligned} x_1 &= \text{Menge an Mozartkugeln,} \\ x_2 &= \text{Menge an Mozarttalern.} \end{aligned}$$

Wir erhalten folgende lineare Optimierungsaufgabe:

$$\left. \begin{array}{ll} \text{Maximiere} & 9x_1 + 8x_2 \quad \text{über } x \in \mathbb{R}^2 \\ & x_1 + 2x_2 \leq 9 \quad (\text{Marzipanbedingung}) \\ \text{sodass} & x_1 + x_2 \leq 6 \quad (\text{Nougatbedingung}) \\ & 2x_1 + x_2 \leq 11 \quad (\text{Schokoladenbedingung}) \\ \text{und} & x_1 \geq 0 \\ & x_2 \geq 0. \end{array} \right\} \quad (6.2)$$

Quizfrage 6.3: Welche Bedeutung hat die Nichtnegativitätsbedingung $x \geq 0$ in dieser Aufgabe? Was würde etwa eine negative Produktionsmenge $x_1 < 0$ praktisch bedeuten?

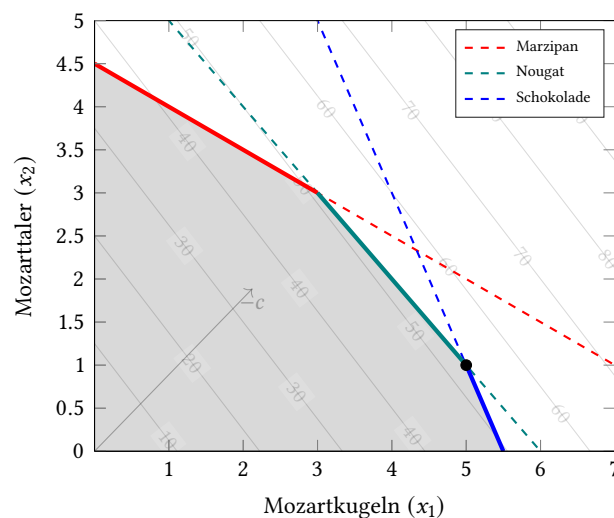


Abbildung 6.1: Zulässige Menge (Fünfeck), Niveaulinien der Zielfunktion und globaler Maximierer beim Mozartproblem (Beispiel 6.2).

Aus der Modellierung von Beispiel 6.2 ergibt sich der folgende häufig vorkommende Spezialfall der allgemeinen linearen Optimierungsaufgabe (6.1):

$$\left. \begin{array}{ll} \text{Maximiere} & c^T x \quad \text{über } x \in \mathbb{R}^n \\ \text{sodass} & Ax \leq b \\ \text{und} & x \geq 0. \end{array} \right\} \quad (6.3)$$

Dabei ist $c \in \mathbb{R}^n$ der **Kostenvektor** (englisch: *cost vector*), $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ die **Bedarfs-** oder **Aufwandsmatrix** (englisch: *demand matrix*) und $b \in \mathbb{R}^m$ der **Ressourcenvektor** (englisch: *resource vector*), wobei $m \in \mathbb{N}$ ist. Ein LP der Gestalt (6.3) heißt in **kanonischer Form**. Beim Mozartproblem (6.2) ist z. B.

$$c = \begin{pmatrix} 9 \\ 8 \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 1 & 1 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} 9 \\ 6 \\ 11 \end{pmatrix}.$$

Wie können wir ein LP der allgemeinen Form (6.1) in kanonischer Form schreiben? Enthält ein solches LP

- (i) eine Gleichungsbeschränkung $a^T x = \beta$, so können wir diese in Form zweier Ungleichungen, $a^T x \leq \beta$ und $-a^T x \leq -\beta$, schreiben.
- (ii) für eine Variable x_i keine Beschränkung der Form $x_i \geq 0$ (**freie Variable**, englisch: *free variable*), so ersetzen wir $x_i := x_i^+ - x_i^-$ und fordern $x_i^+ \geq 0$ und $x_i^- \geq 0$.

(Also $x_i^+ := \max\{x_i, 0\}$ und $x_i^- := \min\{x_i, 0\}$ komponentenweise, z.B. für $x_i = (0, -2, 5)^T \in \mathbb{R}^3$ dann $x_i^+ = (0, 0, 5)^T \in \mathbb{R}^3$ und $x_i^- = (0, -2, 0)^T \in \mathbb{R}^3$.)

Mit Hilfe dieser Transformationen kann gezeigt werden:

Lemma 6.3 (Transformierbarkeit in kanonische Form).
Jedes LP ist äquivalent zu einem LP in kanonischer Form.

Quizfrage 6.4: Was bedeutet diese Äquivalenz genau?

Definition 6.4 (Hyperebene, Halbraum, Polyeder).

- (i) Es sei $a \in \mathbb{R}^n$, $a \neq 0$ und $\beta \in \mathbb{R}$. Die Menge

$$H(a, \beta) := \{x \in \mathbb{R}^n \mid a^T x = \beta\} \quad (6.4)$$

heißt **Hyperebene** (englisch: *hyperplane*) im \mathbb{R}^n mit **Normalenvektor** a (englisch: *normal vector*).

- (ii) Eine Hyperebene teilt den Raum \mathbb{R}^n in zwei abgeschlossene **Halbräume** (englisch: *half-spaces*)

$$\begin{aligned} H^-(a, \beta) &:= \{x \in \mathbb{R}^n \mid a^T x \leq \beta\} && \text{negativer Halbraum,} \\ H^+(a, \beta) &:= \{x \in \mathbb{R}^n \mid a^T x \geq \beta\} && \text{positiver Halbraum.} \end{aligned} \quad (6.5)$$

- (iii) Der Durchschnitt endlich vieler abgeschlossener Halbräume wird als (**konvexes**) **Polyeder** (griechisch für „Vielflächner“, englisch: *polyhedron*) bezeichnet.

Ein Polyeder kann also durch endlich viele affin-lineare Gleichungs- und Ungleichungsrestriktionen beschrieben werden. Insbesondere ist die zulässige Menge

$$\{x \in \mathbb{R}^n \mid Ax \leq b, x \geq 0\}$$

der Aufgabe (6.3) ein Polyeder. Ein Beispiel war bereits in [Abbildung 6.1](#) zu sehen.

Für die algorithmische Behandlung von LPs sind Gleichungen allerdings geeigneter als Ungleichungen. Daher führen wir jetzt die für uns wichtigste Form linearer Optimierungsaufgaben ein.

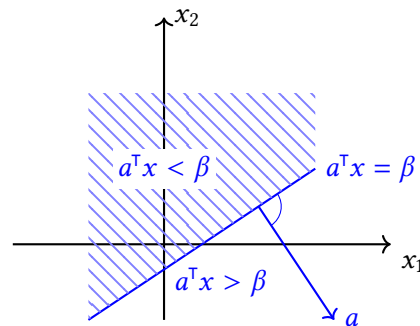


Abbildung 6.2: Darstellung einer Hyperebene mit Normalenvektor a und der beiden Halbräume.

Definition 6.5 (LP in Normalform).

Ein LP der Gestalt

$$\left. \begin{array}{ll} \text{Minimiere} & c^T x \quad \text{über } x \in \mathbb{R}^n \\ \text{sodass} & Ax = b \\ \text{und} & x \geq 0 \end{array} \right\} \quad (6.6)$$

mit $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $b \in \mathbb{R}^m$ und $c \in \mathbb{R}^n$ heißt in **Normalform** bzw. **Standardform**.

Wie können wir ein LP der allgemeinen Form (6.1) in Normalform schreiben? Enthält ein solches LP

- (i) eine Ungleichungsbeschränkung $a^T x \leq \beta$, so führen wir eine zusätzliche, sogenannte **Schlupfvariable** (**Überschussvariable**, englisch: *slack variable*) s ein und ersetzen die Ungleichung durch

$$a^T x + s = \beta, \quad s \geq 0.$$

- (ii) freie Variablen x_i , so setzen wir wie bereits bei der Umwandlung einer Aufgabe in kanonische Form $x_i := x_i^+ - x_i^-$ und fordern $x_i^+ \geq 0$ und $x_i^- \geq 0$.

Beachte: Eine Schlupfvariable gibt den Abstand (englisch: *slack*) zur Gleichheit an.

Mit obigen Umformungen kann man zeigen:

Lemma 6.6 (Transformierbarkeit in Normalform).

Jedes LP ist äquivalent zu einem LP in Normalform.

Beispiel 6.7 (Mozartproblem in Normalform).

Wir führen drei Schlupfvariablen s_1, s_2, s_3 ein:

$$\left. \begin{array}{ll} \text{Minimiere} & -9x_1 - 8x_2 \\ \text{sodass} & x_1 + 2x_2 + s_1 = 9 \\ & x_1 + x_2 + s_2 = 6 \\ & 2x_1 + x_2 + s_3 = 11 \\ \text{und} & x_1, x_2 \geq 0 \\ & s_1, s_2, s_3 \geq 0. \end{array} \right\} \quad (6.7)$$

Die Aufgabe hat nun fünf Variablen $(x, s) \in \mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}^3$!

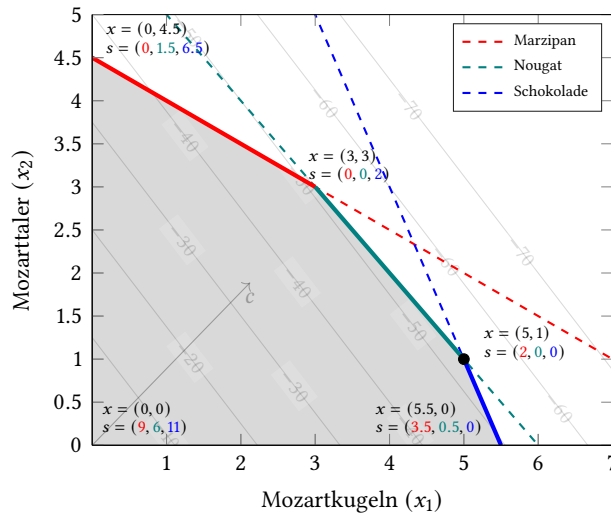


Abbildung 6.3: Darstellung der Ecken der zulässigen Menge beim Mozartproblem in Normalform (6.7) mitsamt den jeweiligen Werten der Schlupfvariablen.

Sofern nichts anderes gesagt wird, gehen wir jetzt immer davon aus, dass ein LP in Normalform vorliegt. Die zulässige Menge

$$P := \{x \in \mathbb{R}^n \mid Ax = b, x \geq 0\} \quad (6.8a)$$

heißt dann ein **in Normalform beschriebenes Polyeder**, kurz: **Polyeder in Normalform**. Für die Dimension der Matrix $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ nehmen wir dabei an:¹

$$1 \leq m \leq n. \quad (6.8b)$$

§ 6.1 EXISTENZ VON LÖSUNGEN

In diesem Abschnitt gehen wir der Frage nach, wann die lineare Optimierungsaufgabe (6.6) eine Lösung besitzt.

¹Für $m = 0$ ist die Aufgabe entweder unbeschränkt (wenn mindestens ein $c_i < 0$ ist), oder $x^* = 0$ ist eine Lösung (wenn $c \geq 0$ gilt). Im Fall $m > n$ können entweder solange redundante Gleichungen gestrichen werden, bis $m \leq n$ wird, oder $Ax = b$ ist unlösbar, d. h. (6.6) ist unzulässig.

Vorüberlegung:

Die zulässige Menge $P \subseteq \mathbb{R}^n$ von (6.6) ist immer abgeschlossen. (**Quizfrage 6.5:** Warum eigentlich?) Falls sie auch nichtleer und beschränkt (also kompakt) ist, dann besitzt die stetige Zielfunktion $c^\top x$ über P nach dem Satz von Weierstraß bzw. Satz 1.5 einen Minimierer. Allerdings ist die zulässige Menge P im Allgemeinen nicht beschränkt, siehe Abbildung 6.4. Mit Satz 1.5 können wir dann nicht argumentieren, da die Sublevelmengen $L := \{x \in P \mid c^\top x \leq m\}$ möglicherweise nicht beschränkt (also nicht kompakt) sind.

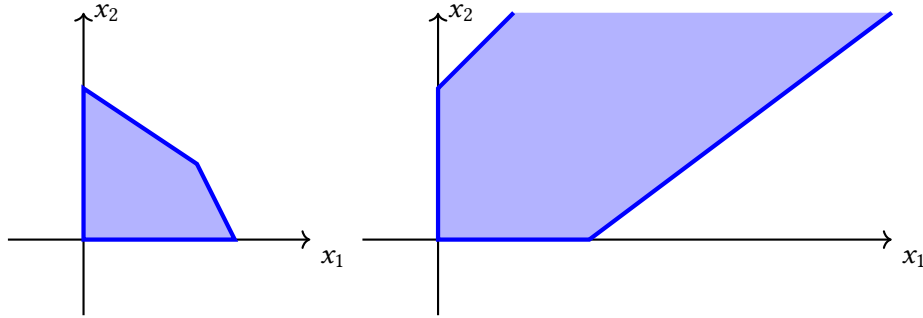


Abbildung 6.4: Kompaktes (abgeschlossenes und beschränktes) Polyeder (links) und unbeschränktes Polyeder (rechts).

Intuitiv sollte klar sein, dass ein LP unbeschränkt ist, falls die Zielfunktion entlang eines Strahles $t \mapsto x + t d$ abfällt, der für alle $t \geq 0$ in der zulässigen Menge bleibt. Wir formulieren dies als Resultat:

Lemma 6.8. Wir betrachten ein LP in Normalform (6.6) mit zulässiger Menge P wie in (6.8). Weiter sei $P \neq \emptyset$. Ist f^* endlich, dann gilt $c^\top d \geq 0$ für alle Richtungen in der Menge

$$\{d \in \mathbb{R}^n \mid A d = 0, d \geq 0\}. \quad (6.9)$$

Die Menge in (6.9) wird **Rezessionskegel** (englisch: *recession cone*) des Polyeders (6.8) genannt.²

Quizfrage 6.6: Was bedeutet $c^\top d \geq 0$?

Quizfrage 6.7: Welche Bedeutung hat der Rezessionskegel?

Beweis. Wir führen einen Widerspruchsbeweis. Angenommen, es gebe eine Richtung d aus der Menge (6.9) mit der Eigenschaft $c^\top d < 0$. Dann ist $x + t d$ für alle $t \geq 0$ zulässig, und es gilt

$$c^\top (x + t d) = c^\top x + t c^\top d \rightarrow -\infty \text{ für } t \rightarrow \infty.$$

Daraus folgt $f^* = -\infty$, im Widerspruch zur Endlichkeit von f^* . □

Satz 6.9 (Existenzsatz für LPs).

²Eine Menge $K \subseteq \mathbb{R}^n$ heißt ein **Kegel** (englisch: *cone*), wenn $\beta x \in K$ gilt für $x \in K$ und alle $\beta > 0$.

Wir betrachten ein LP in allgemeiner Form (6.1) mit zulässiger Menge F . Ist der Infimalwert

$$f^* = \inf \{c^\top x \mid x \in F\}$$

endlich, also die Aufgabe (6.1) weder unzulässig ($f^* = +\infty$) noch unbeschränkt ($f^* = -\infty$), so besitzt (6.6) mindestens einen Minimierer.

Zum Beweis des Satzes benötigen wir ein Hilfsresultat. Dieses sagt aus, dass die Menge der nicht-negativen Linearkombinationen einer gegebenen Menge von Vektoren abgeschlossen ist.

Lemma 6.10 (Abgeschlossenheit der Menge nicht-negativer Linearkombinationen).

Es sei $B \in \mathbb{R}^{m \times n}$ eine Matrix (ohne Einschränkungen an die Dimensionen $n, m \in \mathbb{N}$). Die Menge

$$K := \{Bd \mid d \in \mathbb{R}^n, d \geq 0\} \quad (6.10)$$

der nicht-negativen Linearkombinationen der Spalten von B ist abgeschlossen.

Quizfrage 6.8: Wie kann man sich die Menge in (6.10) grafisch vorstellen?

Beweis. (Werner, 2007, Lemma 1.5)

Wir bezeichnen die Spalten von B mit $b_1, \dots, b_n \in \mathbb{R}^m$ und die Komponenten des Vektors d , also die Koeffizienten der Linearkombination, mit $\delta_1, \dots, \delta_n$. Wir benutzen Induktion nach der Spaltenanzahl n . Es sei zunächst $n = 1$, dann ist

$$K = \{Bd \mid d \in \mathbb{R}^n, d \geq 0\} = \{\delta_1 b_1 \mid \delta_1 \geq 0\}$$

eine abgeschlossene Halbgerade oder $\{0\}$.

Induktionsschluss von $n - 1$ auf n : Es sei bereits gezeigt, dass die Menge der nicht-negativen Linearkombinationen von höchstens $n - 1$ Vektoren abgeschlossen ist. Es sei nun K von den n Vektoren b_1, \dots, b_n erzeugt. Wir müssen zeigen, dass K abgeschlossen ist.

Wir machen eine Fallunterscheidung:

Fall 1: Falls diese n Vektoren linear **un**abhängig sind, dann hat $B \in \mathbb{R}^{m \times n}$ vollen (Spalten-)Rang, also $\text{Rang}(B) = n$. Also ist $B^\top B \in \mathbb{R}^{n \times n}$ positiv definit, insbesondere invertierbar. Wir betrachten eine Folge $d^{(k)} \subseteq \mathbb{R}^n$ nichtnegativer Vektoren, sodass $Bd^{(k)} \subseteq K$ gilt und $Bd^{(k)} =: y^{(k)} \rightarrow y$ in \mathbb{R}^m . Zu zeigen ist $y \in K$. Aufgrund des vollen Rangs von B können wir die Koeffizienten $d^{(k)}$ aus $y^{(k)}$ eindeutig rekonstruieren:

$$d^{(k)} = (B^\top B)^{-1} B^\top y^{(k)} \geq 0.$$

Der Grenzübergang $k \rightarrow \infty$ zeigt die Konvergenz der Folge $d^{(k)}$ gegen einen Grenzwert $d \geq 0$, und es gilt $Bd = y$. Damit gehört der Grenzwert y zu K . **Beachte:** In diesem Fall wird die Induktionsannahme gar nicht verwendet.

Fall 2: Falls die Vektoren b_1, \dots, b_n linear abhängig sind, dann existieren Zahlen $\gamma_1, \dots, \gamma_n$ mit der Eigenschaft

$$\sum_{i=1}^n \gamma_i b_i = 0, \quad (6.11)$$

wobei nicht alle $\gamma_i = 0$ sind. Sagen wir o. B. d. A., mindestens ein γ_i ist < 0 . Es sei nun $y \in K$ ein beliebiges Element in K mit der Darstellung

$$y = \sum_{i=1}^n \delta_i b_i, \quad \delta_i \geq 0. \quad (6.12)$$

Wir werden gleich zeigen, dass sich y bereits als nichtnegative Linearkombination von nur $n - 1$ der Vektoren b_1, \dots, b_n darstellen lässt. Da $y \in K$ beliebig war, folgt dann

$$K = \bigcup_{s=1}^n \{B_{-s} d \mid d \in \mathbb{R}^{n-1}, d \geq 0\},$$

wobei B_{-s} die Matrix B ohne die Spalte b_s bezeichnet. Nach Induktionsvoraussetzung ist jede der Mengen in der Vereinigung abgeschlossen, also auch deren endliche Vereinigung.

In der Linearkombination (6.12) seien alle $\delta_i > 0$, ansonsten sind wir fertig. Es sei $1 \leq s \leq n$ einer derjenigen Indizes, für die gilt:

$$-\frac{\delta_s}{\gamma_s} = \min \left\{ -\frac{\delta_i}{\gamma_i} \mid \gamma_i < 0, i = 1, \dots, n \right\} =: t > 0.$$

Wir geben nun eine neue Linearkombination für y an mit Koeffizienten

$$\widehat{\delta}_i := \delta_i + t \gamma_i, \quad i = 1, \dots, n.$$

Nach Konstruktion sind alle $\widehat{\delta}_i \geq 0$, und es gilt $\widehat{\delta}_s = 0$. In der Tat gilt

$$y = \sum_{i=1}^n \delta_i b_i \stackrel{(6.11)}{=} \sum_{i=1}^n (\delta_i + t \gamma_i) b_i = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq s}}^n \widehat{\delta}_i b_i.$$

Damit ist gezeigt: $y \in \{B_{-s} d \mid d \in \mathbb{R}^{n-1}, d \geq 0\}$. □

Die Menge (6.10) heißt auch die **konische Hülle** (englisch: *conic hull*) der Vektoren b_1, \dots, b_n , kurz:

$$K = \{B d \mid d \in \mathbb{R}^n, d \geq 0\} = \text{cone}\{b_1, \dots, b_n\}. \quad (6.13)$$

Wir können nun Satz 6.9 beweisen.

Beweis von Satz 6.9. Wir können o. B. d. A. annehmen, dass das betreffende LP in Normalform (6.6) mit zulässiger Menge wie in (6.8) gegeben ist.

Quizfrage 6.9: Warum können wir o. B. d. A. von einem LP in Normalform ausgehen?

Es sei $f^* = \inf\{c^T x \mid x \in P\}$ der endliche Optimalwert von (6.6). Es existiert also eine sogenannte Minimalfolge $(x^{(k)}) \subseteq P$ mit der Eigenschaft $c^T x^{(k)} \searrow f^*$.

Wir betrachten die Folge

$$y^{(k)} := \begin{pmatrix} c^T x^{(k)} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c^T x^{(k)} \\ Ax^{(k)} - b \end{pmatrix}.$$

Diese konvergiert gegen $(f^*, 0)^T \in \mathbb{R} \times \mathbb{R}^m$. Andererseits gehören die Glieder der Folge zu der Menge

$$\tilde{K} := \left\{ \begin{pmatrix} c^T z \\ Az - b \end{pmatrix} \in \mathbb{R} \times \mathbb{R}^m \mid z \geq 0 \right\}.$$

Diese Menge ist, abgesehen von der Verschiebung um den konstanten Vektor $\begin{pmatrix} 0 \\ b \end{pmatrix}$, von der Bauart (6.10) mit der Matrix $B = \begin{pmatrix} c^T \\ A \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{(1+m) \times n}$. Nach Lemma 6.10 ist \tilde{K} abgeschlossen. Daraus folgt, dass der Grenzwert $\begin{pmatrix} f^* \\ 0 \end{pmatrix}$ der Folge $(y^{(k)})$ in \tilde{K} liegt. Das heißt, es existiert ein $x^* \geq 0$ mit der Eigenschaft $c^T x^* = f^*$ und $Ax^* - b = 0$. Damit ist x^* eine Lösung des LP (6.6). \square

Bemerkung 6.11. Es ist eine durchaus bemerkenswerte Eigenschaft linearer Optimierungsaufgaben, dass sie bereits dann eine optimale Lösung besitzen, wenn der Infimalwert endlich ist. Wie wir aus Beispielen wie „Minimiere $1/x$ unter der Nebenbedingung $x \geq 1$ “ wissen, ist das für nichtlineare Aufgaben i. A. nicht der Fall.

§ 6.2 DIE BEDEUTUNG DER ECKEN

Definition 6.12 (Extremalpunkt bzw. Ecke eines Polyeders).

Ein Vektor $x \in P$ heißt **Extremalpunkt** (englisch: **extremal point**) oder **Ecke** (englisch: **vertex**) eines Polyeders P (nicht notwendig in Normalform gegeben), wenn aus

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

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

Eine Ecke ist also dadurch gekennzeichnet, dass sie nicht auf der Verbindungsstrecke zweier anderer Punkte y, z von P liegt. Man sagt auch: Eine Ecke ist keine echte Konvexkombination (Definition 11.4) zweier anderer Punkte von P .

Ecken eines Polyeders in Normalform können wie folgt charakterisiert werden:

Satz 6.13 (Charakterisierung der Ecken eines Polyeders in Normalform).

Es sei P ein Polyeder in Normalform wie in (6.8) und $x \in P$ gegeben. Ferner sei $I(x) = \{1 \leq i \leq n \mid x_i > 0\}$ die Menge der **inaktiven Indizes** (bzgl. der Ungleichungen $x \geq 0$). Dann sind äquivalent:

- (i) x ist eine Ecke von P
- (ii) Die Menge der Spalten $(a_i)_{i \in I(x)}$ von A ist linear **unabhängig**.

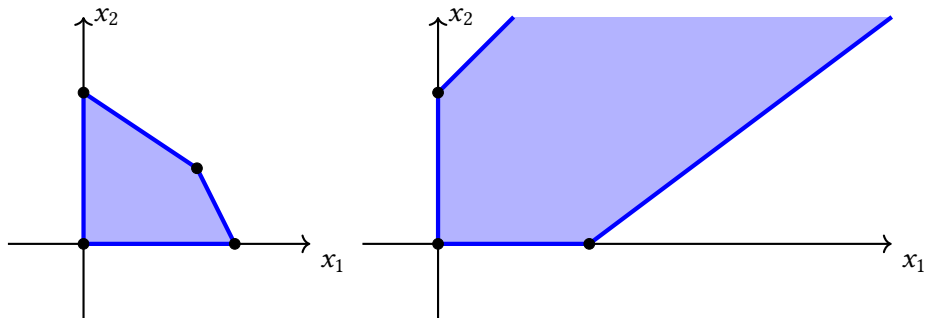


Abbildung 6.5: Polyeder (nicht in Normalform) und ihre Ecken: Viereck im \mathbb{R}^2 und unbeschränktes Polyeder mit drei Ecken im \mathbb{R}^2 .

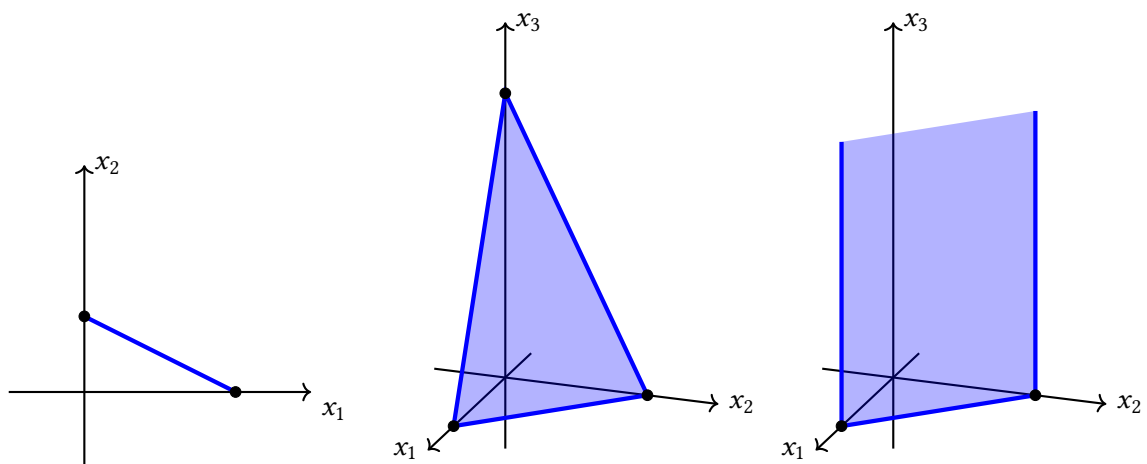


Abbildung 6.6: Polyeder in Normalform und ihre Ecken: Strecke im \mathbb{R}^2 ($n = 2, m = 1$) und Flächen im \mathbb{R}^3 ($n = 3, m = 1$).

Beachte: Insbesondere ist $x = 0$, sofern zu P gehörig, immer eine Ecke.

Beweis. **Aussage (i) \Rightarrow Aussage (ii):** Es sei x eine Ecke von P . Wir nehmen an, dass die Spalten $(a_i)_{i \in I(x)}$ linear **abhängig** sind. Damit muss natürlich notwendigerweise $I(x) \neq \emptyset$ sein. Wegen der linearen Abhängigkeit gibt es Koeffizienten γ_i , sodass gilt:

$$\sum_{i \in I(x)} \gamma_i a_i = 0,$$

und mindestens ein γ_i ist $\neq 0$. Wegen $x_i > 0$ für alle $i \in I(x)$ existiert $\delta > 0$, sodass $x_i \pm \delta \gamma_i \geq 0$ bleibt für alle $i \in I(x)$. Wir definieren nun Punkte $y, z \in \mathbb{R}^n$ durch

$$y_i = \begin{cases} x_i + \delta \gamma_i, & \text{falls } i \in I(x) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{und} \quad z_i = \begin{cases} x_i - \delta \gamma_i, & \text{falls } i \in I(x) \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$$

Damit ist $y \neq z$, und es gilt $y, z \geq 0$ sowie

$$Ay = \sum_{i=1}^n y_i a_i = \sum_{i \in I(x)} (x_i + \delta \gamma_i) a_i = b + \delta \sum_{i \in I(x)} \gamma_i a_i = b,$$

also liegt $y \in P$. Ganz analog folgt auch $z \in P$. Dies ist aber ein Widerspruch zur **Definition 6.12** einer Ecke, denn es gilt $x = \frac{y+z}{2}$ mit $y \neq z$.

Aussage (ii) \Rightarrow Aussage (i): Umgekehrt seien nun die Spaltenvektoren $(a_i)_{i \in I(x)}$ linear **unabhängig**. (Möglicherweise ist $I(x) = \emptyset$.) Für zwei Vektoren $y, z \in P$ gelte $x = \alpha y + (1 - \alpha) z$ mit einem $\alpha \in (0, 1)$. Wir müssen $y = z$ zeigen. Für alle $j \notin I(x)$ gilt $x_j = y_j = z_j = 0$ wegen $y, z \geq 0$. Also ist

$$0 = b - b = A(y - z) = \sum_{i \in I(x)} (y_i - z_i) a_i,$$

und aus der linearen Unabhängigkeit der $(a_i)_{i \in I(x)}$ folgt $y_i = z_i$ auch für $i \in I(x)$. Insgesamt gilt also $y = z$, d. h., nach **Definition 6.12** ist x eine Ecke von P . \square

Ende der Woche 4

Beachte: Der Koordinatenvektor einer Ecke eines Polyeders in Normalform (6.8) muss mindestens $n - m$ Nulleinträge haben, da jeweils höchstens m Spalten von $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ linear unabhängig sind (siehe auch **Abbildung 6.6**).

Aus **Satz 6.13** ergibt sich folgende Idee zur Generierung potentieller Ecken:

- Jeder Vektor $x \in P \subseteq \mathbb{R}^n$ wird durch n (linear unabhängige) Bedingungen an seine Koordinaten festgelegt.
- Wähle eine Indexmenge $N \subseteq \{1, 2, \dots, n\}$ mit $|N| = n - m$ und setze $x_i = 0$ für $i \in N$.
- Die restlichen Indizes bilden die Menge $B = \{1, 2, \dots, n\} \setminus N$ mit $|B| = m$.

Die Wahl von N erfolge so, dass der Punkt x durch die Bedingungen $Ax = b$ und $x_i = 0$ für $i \in N$ eindeutig bestimmt ist. Die Spalten von A und die Komponenten von x werden so umsortiert und partitioniert, dass wir

$$A = [A_B \ A_N] \quad \text{und} \quad Ax = A_B x_B + A_N \underbrace{x_N}_{=0} = A_B x_B = b$$

erhalten. Nun soll also $A_B x_B = b$ eindeutig lösbar sein, also muss A_B invertierbar (regulär) sein.

Beachte: Damit es eine solche Indexmenge B geben kann, muss notwendig A vollen Rang haben, also $\text{Rang}(A) = m$ gelten. Dies kann zumindest theoretisch immer durch Streichen von Zeilen erreicht werden, wobei numerisch die Bestimmung des Ranges schwierig sein kann.

Definition 6.14 (Basisvektor, Basis).

Es sei P wie in (6.8) ein Polyeder in Normalform. Weiter sei $B \subseteq \{1, \dots, n\}$ mit $|B| = m$ eine (geordnete) Indexmenge (ein m -Tupel) von Spaltenindizes und $N = \{1, \dots, n\} \setminus B$.

- (i) Ist die mit den Spaltenindizes B gebildete Untermatrix A_B regulär, so heißt die Indexmenge B eine **Basis** (englisch: **basis**) und A_B die zugehörige **Basismatrix** (englisch: **basis matrix**). N heißt dann **Nichtbasis** (englisch: **nonbasis**) und A_N die zugehörige **Nichtbasismatrix** (englisch: **nonbasis matrix**).
- (ii) Es sei A_B eine Basismatrix. Ein Punkt $x \in \mathbb{R}^n$ heißt ein **Basisvektor** (englisch: **basic vector**) von P zur Basis B , wenn $A_B x_B = b$ und $x_N = 0$ gilt.
- (iii) Ein Basisvektor heißt **zulässig** (englisch: **feasible basic vector**), wenn $x_B \geq 0$ gilt.
- (iv) Ist x ein Basisvektor zur Basis B , dann heißen die Komponenten von x_B **abhängige Variable** (englisch: **dependent variable**) und die Komponenten von x_N **unabhängige Variable** (englisch: **independent variable**).

Beachte: In der Literatur wird ein Basisvektor auch häufig als **Basislösung** (englisch: **basic solution**) bezeichnet. Der Begriff „-lösung“ weist darauf hin, dass der Vektor das lineare Gleichungssystem $Ax = b$ löst. Dieser Praxis folgen wir hier nicht, um Verwechslungen mit Optimallösungen zu vermeiden.

Beispiel 6.15 (Basisvektoren, vgl. Geiger, Kanzow, 2002, Beispiel 3.17).

Es seien

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad b = \begin{pmatrix} 4 \\ 6 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}$$

gegeben. Der Vektor $x = (2, 0, 0, 2, 6, 0, 3)^T$ ist zulässiger Basisvektor zur Basis $B = \{1, 4, 5, 7\}$, denn: Die Untermatrix

$$A_B = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

ist regulär (d. h., B ist Basis), und es gilt $x_B = (2, 2, 6, 3)^T \geq 0$, $x_N = (0, 0, 0)^T$ sowie $A_B x_B = b$. Ein anderer zulässiger Basisvektor, dieses Mal zur Basis $B = \{4, 5, 6, 7\}$, ist $x_B = b$, da $b \geq 0$ ist.

Satz 6.16 (Zusammenhang zwischen Ecken und zulässigen Basisvektoren).

Es sei P wie in (6.8) ein Polyeder in Normalform, und es gelte $\text{Rang}(A) = m$. Dann sind äquivalent:

- (i) $x \in \mathbb{R}^n$ ist eine Ecke von P .
- (ii) $x \in \mathbb{R}^n$ ist zulässiger Basisvektor von P zu einer geeigneten Basis.

Beweis. Der Beweis ist Inhalt von [Hausaufgabe 5.1](#). □

Beachte: Eine Ecke kann mehrere Darstellungen als zulässiger Basisvektor zu verschiedenen Basen besitzen, siehe auch [Hausaufgabe 5.2](#).

Satz 6.17 (Hauptsatz der linearen Optimierung, vgl. [Geiger, Kanzow, 2002](#), Satz 3.6).

Es sei P wie in (6.8) ein Polyeder in Normalform, und es gelte $\text{Rang}(A) = m$. Dann gilt:

- (i) Ist $P \neq \emptyset$, dann besitzt P mindestens einen zulässigen Basisvektor (eine Ecke).
- (ii) P hat nur endlich viele zulässige Basisvektoren (Ecken).
- (iii) Besitzt das Problem

$$\text{Minimiere } c^T x \quad \text{sodass } x \in P$$

eine Lösung, so ist auch einer der zulässigen Basisvektoren von P eine Lösung.

Die **Aussage (iii)** bedeutet, dass die Lösungsmenge eines LPs unter den obigen Voraussetzungen entweder leer ist oder mindestens eine Ecke enthält.

Beweis. **Aussage (i):** Zunächst stellen wir fest, dass es mindestens eine Basis gibt, da $\text{Rang}(A) = m$ gilt. Gehört der Nullvektor zu P , dann ist er ein zulässiger Basisvektor zu jeder Basis. Andernfalls wählen wir ein $x^* \in P$ mit der minimalen Anzahl positiver Komponenten. Die Indexmenge $\mathcal{I}(x^*) = \{1 \leq i \leq n \mid x_i^* > 0\}$ ist nicht leer. Wir zeigen, dass die Spaltenvektoren $(a_i)_{i \in \mathcal{I}(x^*)}$ linear **un**abhängig sind. Nach [Satz 6.13](#) ist dann x^* eine Ecke, und nach [Satz 6.16](#) auch ein zulässiger Basisvektor von P (zu einer geeigneten Basis, die durch Auffüllen von $\mathcal{I}(x^*)$ entsteht).

Wir führen einen Widerspruchsbeweis und nehmen an, die Spaltenvektoren $(a_i)_{i \in \mathcal{I}(x^*)}$ seien linear **ab**hängig, also gilt

$$\sum_{i \in \mathcal{I}(x^*)} \gamma_i a_i = 0,$$

und o. B. d. A. ist mindestens ein $\gamma_i < 0$. Wegen $x_i^* > 0$ für alle $i \in I(x^*)$ können wir wie im Beweis von Lemma 6.10 $\delta = \min \left\{ -\frac{x_i^*}{\gamma_i} \mid \gamma_i < 0, i \in I(x^*) \right\} > 0$ wählen. Daraus folgt, dass

$$x_i^* + \delta \gamma_i \geq 0 \quad \text{für alle } i \in I(x^*)$$

ist und mindestens einmal Gleichheit gilt. Der Vektor

$$\bar{x} = \begin{cases} x_i^* + \delta \gamma_i, & \text{falls } i \in I(x^*) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

gehört dann zu P (Beweis wie in Satz 6.13), hat aber weniger positive Komponenten als x^* , im Widerspruch zur Voraussetzung.

Aussage (ii): Es gibt nur endlich viele, nämlich höchstens $\binom{n}{m}$ Möglichkeiten, eine Basis, d. h. m linear unabhängige Spalten von A auszuwählen.³ Zu jeder Basis gehört nur genau ein Basisvektor (der auch unzulässig sein kann).

Aussage (iii): Nach Voraussetzung ist der Optimalwert

$$f^* = \inf \{ c^T x \mid x \in P \}$$

endlich und wird auch angenommen. Wir betrachten nun das LP mit der modifizierten zulässigen Menge

$$\begin{aligned} &\text{Minimiere} \quad c^T x \quad \text{über } x \in \mathbb{R}^n \\ &\text{sodass} \quad x \in \widehat{P} = \{ x \in \mathbb{R}^n \mid Ax = b, x \geq 0, c^T x = f^* \}. \end{aligned}$$

Nach Voraussetzung ist auch $\widehat{P} \neq \emptyset$, und \widehat{P} ist wieder ein Polyeder in Normalform (es ist einfach eine Zeile in A und b hinzugekommen). Ist nun $\widehat{P} = P$, also die Zielfunktion konstant auf P , so sind insbesondere alle zulässigen Basisvektoren von P Lösung.

Ist dagegen $\widehat{P} \subsetneq P$, so gilt $\text{Rang} \left(\begin{bmatrix} A \\ c^T \end{bmatrix} \right) = m+1$.⁴ Nach Aussage (i) besitzt \widehat{P} mindestens einen zulässigen Basisvektor x^* , der nach Satz 6.16 eine Ecke von \widehat{P} ist. Es bleibt noch zu zeigen, dass x^* auch Ecke von P ist. Es seien also $y, z \in P$ und $\alpha \in (0, 1)$, sodass $x^* = \alpha y + (1 - \alpha) z$ gilt.

$$f^* \stackrel{x^* \in \widehat{P}}{=} c^T x^* = \underbrace{\alpha c^T y}_{\geq f^*} + (1 - \alpha) \underbrace{c^T z}_{\geq f^*} \geq \alpha f^* + (1 - \alpha) f^* = f^*.$$

Also gilt $c^T y = c^T z = f^*$, d. h., $y, z \in \widehat{P}$. Da x^* eine Ecke von \widehat{P} ist, muss $y = z$ gelten. Damit ist x^* eine Ecke von P und nach Satz 6.16 auch zulässiger Basisvektor von P , und wegen $x^* \in \widehat{P}$ ist x^* eine Lösung des LP. \square

Beachte: Jeder zulässige Basisvektor x^* von P könnte die Lösung eines LP in Normalform sein, d. h., es gibt einen Kostenvektor c , sodass x^* die einzige Lösung des LP

$$\text{Minimiere} \quad c^T x \quad \text{sodass } x \in P$$

ist. Dies wird in Hausaufgabe 5.1 bewiesen und in Hausaufgabe 5.3 am Beispiel des Mozartproblems betrachtet.

³Hierbei ignorieren wir die Anordnung der Basiselemente, da sie keinen Einfluss auf den zugehörigen Basisvektor hat.

⁴Zu den Gleichungen $Ax = b$ ist eine neue Zeile dazukommen, die wesentlich ist.

§ 7 SIMPLEX-ALGORITHMUS

Literatur: Geiger, Kanzow, 2002, Kapitel 3.2–3.4

Idee des Simplex-Algorithmus’: Laufe von einem zulässigen Basisvektor (Ecke) zu einem benachbarten mit besserem (kleinerem) Funktionswert, bis es keinen besseren Nachbarn mehr gibt. Dabei heißen zwei Basisvektoren **benachbart**, wenn sich die zugehörigen Basen in genau einem Index unterscheiden.

Im gesamten § 7 sei P wie in (6.8) ein Polyeder in Normalform, und es gelte $\text{Rang}(A) = m$.

§ 7.1 DER SIMPLEX-SCHRITT

Literatur: Geiger, Kanzow, 2002, Kapitel 3.2

Es sei x irgendein (zulässiger) Basisvektor von P (zur Konstruktion siehe § 7.2) zur Basis B , und es sei $N = \{1, \dots, n\} \setminus B$. Die Spalten von A und die Komponenten von x und c seien entsprechend partitioniert. Um zu einer benachbarten Ecke zu gelangen, müssen wir einem Index $r \in N$ erlauben, sich von der Null zu lösen, während die anderen Nichtbasis-Einträge bei Null verbleiben. Wir machen also den Ansatz

$$x_r(t) := t \geq 0, \quad x_j(t) := 0 \text{ für alle } j \in N \setminus \{r\}$$

oder kurz: $x_N(t) = t e_r$ mit einem Standard-Basisvektor $e_r \in \mathbb{R}^{n-m}$, $t \geq 0$. Die Basis-Einträge $x_B(t)$ berechnen wir in Abhängigkeit von $x_N(t)$ aus dem linearen Gleichungssystem

$$A_B x_B(t) + A_N x_N(t) = b \quad \Leftrightarrow \quad x_B(t) = A_B^{-1}(b - t A_N e_r) = x_B + t \underbrace{(-A_B^{-1} a_r)}_{=: \Delta x_B}. \quad (7.1)$$

Hierbei ist a_r die r -te Spalte von A , und Δx_B bezeichnet die Richtung der Änderungen der x_B -Komponenten.

Durch Einsetzen von (7.1) erhalten wir folgende Darstellungen der Werte der Zielfunktion in Abhängigkeit von $t \geq 0$:

$$\begin{aligned} c^T x(t) &= c_B^T x_B(t) + c_N^T x_N(t) \\ &= c_B^T x_B + t c_B^T \Delta x_B + t c_N^T e_r \\ &= c^T x + t \begin{pmatrix} c_B \\ c_N \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \Delta x_B \\ e_r \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (7.2)$$

und

$$\begin{aligned}
 c^T x(t) &= c_B^T x_B(t) + c_N^T x_N(t) \\
 &= c_B^T A_B^{-1} (b - t A_N e_r) + t c_N^T e_r \\
 &= c^T x + t \underbrace{(c_N - A_N^T A_B^{-T} c_B)^T}_{=: \tilde{c}_N} e_r \\
 &= c^T x + t \tilde{c}_r.
 \end{aligned} \tag{7.3}$$

Die Größe \tilde{c}_N bezeichnet man als den Vektor der **reduzierten Kosten** (englisch: *reduced cost vector*). Er ist durch die Daten der Aufgabe sowie durch die aktuelle Basis eindeutig bestimmt. Er erlaubt es uns, zu erkennen, wenn der gegenwärtige Basisvektor bereits ein Minimierer ist.

Beachte: Wir können die reduzierten Kosten als Kostenvektor einer reduzierten Aufgabe verstehen, bei der die Basis-Variablen mit Hilfe von $x_B := A_B^{-1}(b - A_N x_N)$ eliminiert worden sind.

Quizfrage 7.1: Wie sieht diese reduzierte Aufgabe genau aus?

Lemma 7.1 (Erkennen einer Lösung).

Es sei x ein zulässiger Basisvektor zur Basis B . Wenn für die reduzierten Kosten

$$\tilde{c}_N := c_N - A_N^T A_B^{-T} c_B \geq 0 \tag{7.4}$$

gilt, dann ist x eine Lösung des LP (6.6).

Beweis. Es sei z ein beliebiger für (6.6) zulässiger Vektor (nicht notwendig ein Basisvektor). Dennoch partitionieren wir z ebenso wie x . Wir vergleichen die Funktionswerte $c^T x$ und $c^T z$ mit einer Rechnung ähnlich wie in (7.3):

$$\begin{aligned}
 c^T z &= c_B^T z_B + c_N^T z_N \\
 &= c_B^T A_B^{-1} (b - A_N z_N) + c_N^T z_N \\
 &= c^T x + (c_N - A_N^T A_B^{-T} c_B)^T z_N \\
 &= c^T x + \tilde{c}_N^T z_N.
 \end{aligned}$$

Da $z_N \geq 0$ ist, gilt $c^T z \geq c^T x$, d. h., x ist ein Minimierer der Aufgabe (6.6). \square

Quizfrage 7.2: Was vermuten Sie, gilt auch die Umkehrung von Lemma 7.1?

Wir gehen für die weitere Herleitung des Simplex-Schrittes also jetzt davon aus, dass \tilde{c}_N noch nicht in allen Einträgen ≥ 0 ist. Welche benachbarte Ecke soll das Verfahren dann wählen? Auch darüber gibt der Vektor der reduzierten Kosten Aufschluss. Damit die Zielfunktion fällt, wählen wir einen Index $r \in N$ aus, für den $\tilde{c}_r < 0$ ist, denn wegen (7.2) fallen dann die Werte proportional zu $t \geq 0$. Diese Auswahlentscheidung nennt man auch „**pricing**“.

Es ergibt sich die Frage, wie groß t werden darf, sodass $x_B(t)$ noch zulässig, also $x_B(t) \geq 0$ bleibt. Die Darstellung (7.1)

$$x_B(t) = x_B + t \Delta x_B$$

liefert darüber Aufschluss.

Lemma 7.2 (Erkennen eines unbeschränkten LPs).

Gilt $\Delta x_B \geq 0$, so ist das LP (6.6) unbeschränkt, also nicht lösbar.

Beweis. Nach Konstruktion erfüllt $x(t)$ für alle $t \in \mathbb{R}$ die Bedingung $Ax(t) = b$. Nach Voraussetzung gilt außerdem $x_B(t) \geq 0$ für alle $t \geq 0$, d. h., $x(t)$ ist für alle $t \geq 0$ zulässig für (6.6).

Es gilt nach (7.1) und (7.2):

$$c^T x(t) = c^T x + t \begin{pmatrix} c_B \\ c_N \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \Delta x_B \\ e_r \end{pmatrix} = c^T x + t \underbrace{\tilde{c}_r}_{<0} \rightarrow -\infty \quad \text{für } t \rightarrow \infty.$$

□

Beachte: Das ist genau die Situation, die in Lemma 6.8 beschrieben wird: Die Richtung $d = \begin{pmatrix} \Delta x_B \\ e_r \end{pmatrix}$ ist im Rezessionskegel der zulässigen Menge von (6.6) und ist eine Abstiegsrichtung für die Zielfunktion.

Wir gehen für die weitere Beschreibung des Simplex-Schrittes also jetzt davon aus, dass $\Delta x_i < 0$ für mindestens ein $i \in B$ ist. Die Zulässigkeitsbedingung für $x(t)$ ist genau dann erfüllt, wenn

$$t \geq 0 \quad \text{und} \quad x_B(t) = x_B + t \Delta x_B \geq 0$$

gilt oder äquivalent dazu:

$$0 \leq t \leq -\frac{x_i}{\Delta x_i} \quad \text{für alle } i \in B \text{ mit } \Delta x_i < 0.$$

Um mit $x_B(t)$ einen neuen zulässigen Basisvektor zu erhalten, muss eine Komponente von B nach N wechseln, denn r wechselt ja von N nach B . Wir wählen deshalb die größtmögliche Schrittlänge:

$$\hat{t} := \min \left\{ -\frac{x_i}{\Delta x_i} \mid i \in B, \Delta x_i < 0 \right\} = -\frac{x_\ell}{\Delta x_\ell} \quad \text{„Quotiententest“ (englisch: ratio test).} \quad (7.5)$$

Es ist also ℓ der Index bzw. einer der Indizes, an denen das Minimum angenommen wird. Damit wird dann $x_\ell(\hat{t}) = 0$ sein, und wir nehmen den Index ℓ in die neue Nichtbasis auf.

Wir fassen zusammen: Als **Simplex-Schritt** (englisch: *simplex step*) bezeichnet man, ausgehend von der gegebenen Basis B und dem zugehörigen zulässigen Basisvektor x :

- (i) die Berechnung der reduzierten Kosten \tilde{c}_N nach (7.4) (lineares Gleichungssystem mit A_B^T lösen),
- (ii) die Auswahl eines Index' $r \in N$ mit $\tilde{c}_r < 0$,
- (iii) die Bestimmung des Vektors Δx_B nach (7.1) (lineares Gleichungssystem mit A_B lösen) und der Schrittlänge \hat{t} nach (7.5)
- (iv) und die Bestimmung des neuen zulässigen Basisvektors $x^+ := x(\hat{t})$ und der geänderten Basis $B^+ := (B \cup \{r\}) \setminus \{\ell\}$ und Nichtbasis $N^+ := (N \cup \{\ell\}) \setminus \{r\}$.

Satz 7.3 (Simplex-Schritt).

Es sei x ein zulässiger Basisvektor von P zur Basis B , und es sei $N = \{1, \dots, n\} \setminus B$. Es gelte $\tilde{c}_r < 0$ für mindestens ein $r \in N$, und es sei $\Delta x_B := -A_B^{-1} a_r$. Es gelte weiter $\Delta x_i < 0$ für mindestens ein $i \in B$. Wird dann $\hat{t} \geq 0$ nach (7.5) bestimmt und wird das Minimum für den Index $\ell \in B$ angenommen, so gelten für den Vektor x^+ mit

$$x_i^+ := \begin{cases} x_i + \hat{t} \Delta x_i & \text{für } i \in B, i \neq \ell, \\ \hat{t} & \text{für } i = r, \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

die folgenden Aussagen:

(i) Der Vektor x^+ ist zulässiger Basisvektor von P zur neuen Basis

$$B^+ := (B \cup \{r\}) \setminus \{\ell\}.$$

(ii) Für die Zielfunktionswerte gilt

$$c^\top x^+ = c^\top x + \hat{t} \tilde{c}_r \leq c^\top x.$$

Beweis. Für Aussage (i) müssen wir zeigen:

- (a) $A_{B^+} x_{B^+}^+ = b$,
- (b) $x_{N^+}^+ = 0$,
- (c) $x_{B^+}^+ \geq 0$ und
- (d) A_{B^+} ist regulär.

Die Punkte (a) bis (c) folgen aus der Konstruktion von x^+ . Wir weisen noch nach, dass die Spalten $(a_i)_{i \in B^+}$ linear unabhängig sind und machen dafür den Ansatz:

$$\begin{aligned} 0 &= \sum_{i \in B, i \neq \ell} \gamma_i a_i + \gamma_r a_r \\ &= \sum_{i \in B, i \neq \ell} \gamma_i a_i - \gamma_r A_B \Delta x_B \\ &= \sum_{i \in B, i \neq \ell} \gamma_i a_i - \gamma_r \left(\sum_{i \in B} \Delta x_i a_i \right) \\ &= \sum_{i \in B, i \neq \ell} (\gamma_i - \gamma_r \Delta x_i) a_i - \gamma_r \Delta x_\ell a_\ell. \end{aligned}$$

Nach Voraussetzung waren die Spalten $(a_i)_{i \in B}$ linear unabhängig, also folgt

$$\gamma_i - \gamma_r \Delta x_i = 0 \quad \text{für alle } i \in B, i \neq \ell \quad \text{und} \quad \gamma_r \Delta x_\ell = 0.$$

Wegen $\Delta x_\ell < 0$ gilt $\gamma_r = 0$ und damit $\gamma_i = 0$ für alle $i \in B, i \neq \ell$.

Die Aussage (ii) folgt aus (7.3). □

Bemerkung 7.4 (Der Fall $c^\top x^+ = c^\top x$).

Es gelten die Voraussetzungen von [Satz 7.3](#).

- (i) Der Fall $c^\top x^+ = c^\top x$ tritt genau dann auf, wenn sich im Quotiententest (7.5) $\hat{t} = 0$ ergibt, also auch $x^+ = x$ gilt. Es ändern sich also nur die Indexmenge $B \rightsquigarrow B^+$ und $N \rightsquigarrow N^+$. Dieselbe Ecke hat also eine Darstellung als Basisvektor zu verschiedenen Basen. Dazu muss allerdings notwendig

$$x_i = 0 \quad \text{für mindestens ein } i \in B \quad (7.6)$$

gelten. Ein Basisvektor x , für den (7.6) zutrifft, heißt **entartet** (englisch: **degenerate**).⁵

- (ii) Ist x dagegen ein nicht entarteter Basisvektor, so gilt unter den Voraussetzungen von [Satz 7.3](#) immer $\hat{t} > 0$ und daher

$$c^\top x^+ = c^\top x + \hat{t} \tilde{c}_r < c^\top x.$$

Der Zielfunktionswert nimmt dann also strikt ab.

Beispiel 7.5 (Nochmal [Beispiel 6.15](#)).

Wir führen einen Simplex-Schritt für [Beispiel 6.15](#) durch, ausgehend vom (zulässigen) Basisvektor $x = (2, 0, 0, 2, 6, 0, 3)^\top$ zur Basis $B = \{1, 4, 5, 7\}$. Der Zielfunktionswert ist $c^\top x = (-2, -3, -4, 0, 0, 0, 0) x = -4$.

- (i) Die reduzierten Kosten sind

$$\begin{aligned} \tilde{c}_N &= c_N - A_N^\top A_B^{-\top} c_B \\ &= \begin{pmatrix} -3 \\ -4 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} -2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}}_{=(0,0,-2,0)^\top} \\ &= \begin{pmatrix} -3 \\ -4 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -2 \\ 0 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} -3 \\ -4 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -3 \\ -4 \\ 2 \end{pmatrix} =: \begin{pmatrix} \tilde{c}_2 \\ \tilde{c}_3 \\ \tilde{c}_6 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

- (ii) Wir wählen einen Index $r \in N = \{2, 3, 6\}$ mit $\tilde{c}_r < 0$ aus, hier $r = 3$ (Alternative: $r = 2$).

- (iii) Wir berechnen

$$\Delta x_B = -A_B^{-1} a_r = - \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix} =: \begin{pmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_4 \\ \Delta x_5 \\ \Delta x_7 \end{pmatrix}$$

⁵Da bei der Bestimmung von \hat{t} jedoch nicht alle Basis-Indizes mitspielen, sondern nur diejenigen mit $\Delta x_i < 0$, ist auch bei einem entarteten Basisvektor durchaus $\hat{t} > 0$ möglich.

und führen den Quotiententest durch:

$$\hat{t} := \min \left\{ -\frac{x_i}{\Delta x_i} \mid i \in B, \Delta x_i < 0 \right\} = \min \left\{ \underbrace{\frac{2}{1}}_{i=4}, \underbrace{\frac{6}{1}}_{i=5}, \underbrace{\frac{3}{1}}_{i=7} \right\}.$$

Beachte: $\Delta x_1 = 0$ nimmt an der Minimumbildung nicht teil! Das Minimum $\hat{t} = 2$ wird eindeutig beim Index $\ell = 4$ angenommen.

- (iv) Die neue Basis ist also $B^+ = (B \cup \{r\}) \setminus \{\ell\} = \{1, 3, 5, 7\}$ und die Nichtbasis $N^+ = \{2, 4, 6\}$. Neuer Basisvektor ist

$$x^+ = \begin{pmatrix} 2 + \hat{t} \Delta x_1 & \text{bleibt in } B^+ \\ 0 & \text{bleibt in } N^+ \\ 0 + \hat{t} & \text{wechselt in } B^+ \\ 2 + \hat{t} \Delta x_4 = 0 & \text{wechselt in } N^+ \\ 6 + \hat{t} \Delta x_5 & \text{bleibt in } B^+ \\ 0 & \text{bleibt in } N^+ \\ 3 + \hat{t} \Delta x_7 & \text{bleibt in } B^+ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 2 \\ 0 \\ 4 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

mit neuem Funktionswert $c^T x^+ = -12$. Wie erwartet hat sich der Funktionswert also um $\hat{t} \tilde{c}_r = 2(-4) = -8$ verändert.

Würden wir in *Schritt (ii)* stattdessen den Index $r = 2$ wählen, so erhielten wir $\Delta x_B = (0, -1, -3, 0)^T$ und dann in *Schritt (iii)* im Quotiententest $\hat{t} = 2$ und $\ell = 4$ oder $\ell = 5$. Dies würde dazu führen, dass in jedem Fall beide Koordinaten $x_4^+ = x_5^+ = 0$ werden, d. h., x^+ ist dann ein entarteter Basisvektor. Wir erhielten dann in *Schritt (iv)* $B^+ = \{1, 2, 5, 7\}$ und $N^+ = \{3, 4, 6\}$ oder $B^+ = \{1, 2, 4, 7\}$ und $N^+ = \{3, 5, 6\}$ und in beiden Fällen $x^+ = (2, 2, 0, 0, 0, 0, 3)^T$ mit neuem Funktionswert $c^T x^+ = -10$.

Ende der Woche 5

§ 7.2 DER SIMPLEX-ALGORITHMUS

Literatur: Geiger, Kanzow, 2002, Kapitel 3.3–3.4

Wir geben jetzt den kompletten Simplex-Algorithmus zur Lösung des LP (6.6) in Normalform mit $\text{Rang}(A) = m$ an. Der leichten Lesbarkeit wegen verzichten wir darauf, die Iterierten nach dem Iterationszähler k zu benennen.

Algorithmus 7.6 (Simplex-Algorithmus (Dantzig 1947)).

Eingabe: Aufgabenbeschreibung durch A , b und c

Eingabe: zulässiger Basisvektor x von P mit zugehöriger Basis B und Nichtbasis N

Ausgabe: ein optimaler Basisvektor von (6.6) oder die Aussage, dass (6.6) unbeschränkt ist

1: Setze $k := 0$

2: Berechne die reduzierten Kosten

$$\tilde{c}_N := c_N - A_N^T A_B^{-T} c_B$$

```

3: if  $\tilde{c}_N \geq 0$  then
4:    $x$  ist eine Lösung von (6.6), STOP
5: else
6:   Wähle einen Index  $r \in N$  mit  $\tilde{c}_r < 0$ 
7:   Berechne  $\Delta x_B := -A_B^{-1} a_r$ 
8:   if  $\Delta x_B \geq 0$  then
9:     Aufgabe (6.6) ist unbeschränkt, STOP
10:  else
11:    Bestimme  $\hat{t} \geq 0$  und  $\ell \in B$  gemäß
    
```

$$\hat{t} := \min \left\{ -\frac{x_i}{\Delta x_i} \mid i \in B, \Delta x_i < 0 \right\} = -\frac{x_\ell}{\Delta x_\ell}$$

```

12:   Setze
    
```

$$x_i^+ := \begin{cases} x_i + \hat{t} \Delta x_i & \text{für } i \in B, i \neq \ell, \\ \hat{t} & \text{für } i = r, \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

```

13:   Setze  $B^+ := (B \cup \{r\}) \setminus \{\ell\}$ 
14:   Setze  $N^+ := (N \cup \{\ell\}) \setminus \{r\}$ 
15:   Setze  $x := x^+$ 
16:   Setze  $B := B^+$  und  $N := N^+$ 
17:   Setze  $k := k + 1$ 
18: end if
19: end if
20: Gehe zu Zeile 2
    
```

Quizfrage 7.3: Bei der Herleitung des Simplex-Verfahrens bedeuteten A_B und A_N sowie x_B und x_N immer eine Auswahl von Spalten von A bzw. von Einträgen in x . Es sind also $x_B \in \mathbb{R}^m$ und $x_N \in \mathbb{R}^{n-m}$ „kurze“ Vektoren und $A_B \in \mathbb{R}^{m \times m}$ und $A_N \in \mathbb{R}^{m \times (n-m)}$ „schmale“ Matrizen. Würde man das auch in dieser Form z. B. in PYTHON implementieren? Wo könnte ein Nachteil liegen?

Wir können einen vorläufigen Konvergenzsatz für das Simplex-Verfahren angeben, der allerdings die nicht vorab überprüfbare Voraussetzung verwendet, dass im Verlauf keine entarteten Basisvektoren auftreten.

Satz 7.7 (Endlichkeit des Simplex-Verfahrens).

Sind alle im Simplex-Verfahren auftretenden Basisvektoren nicht entartet, so bricht das Verfahren nach endlich vielen Iterationen ab, und zwar entweder mit einem optimalen Basisvektor (Ecke) von (6.6) oder mit der Feststellung, dass (6.6) unbeschränkt ist.

Beweis. Nach [Bemerkung 7.4 Punkt \(ii\)](#) gilt $c^\top x^+ < c^\top x$ für alle Iterierten. Daher kann kein Basisvektor mehrfach im Verfahren auftreten. Da es nach [Satz 6.17](#) nur endlich viele zulässige Basisvektoren gibt, muss das Verfahren in [Zeile 4](#) oder in [Zeile 9](#) abbrechen. \square

Der **Simplex-Algorithmus 7.6** lässt noch Freiheiten

- bei der Wahl der Austausch-Indizes r in **Zeile 6**
- und evtl. bei der Wahl von ℓ in **Zeile 11**,

vgl. **Beispiel 7.5**. Durch geeignete Zusatzregeln kann man erreichen, dass das Verfahren auch bei Vorkommen entarteter Basisvektoren immer terminiert.

Dabei geht es um die Vermeidung von Zyklen, d. h. Situationen, in denen

$$x^{(k)} = x^{(k+1)} = \dots = x^{(k+p)}$$

und

$$B^{(k)} \rightsquigarrow B^{(k+1)} \rightsquigarrow \dots \rightsquigarrow B^{(k+p)} = B^{(k)}$$

gilt.

Man kann zeigen, dass ein gerade aus der Basis entfernter Index im nächsten Schritt nicht sofort wieder aufgenommen wird. Somit haben Zyklen mindestens die Länge 3.

Satz 7.8 (Regel von Bland).

*Wählt man in **Zeile 6** den Index r und in **Zeile 11** den Index ℓ als den jeweils kleinsten in Frage kommenden Index, dann bricht der **Simplex-Algorithmus 7.6** stets nach endlich vielen Iterationen ab, und zwar entweder mit einer Lösung von (6.6) oder mit der Feststellung, dass (6.6) unbeschränkt ist.*

Beweis. Mit der Zusatzregel von Bland kann man zeigen, dass keine Zyklen mehr auftreten, siehe **Geiger, Kanzow, 2002**, Satz 3.27. □

Bemerkung 7.9 (Alternativer Beweis von **Satz 6.9**).

*Der Simplex-Algorithmus in Verbindung mit der Regel von Bland bietet eine konstruktive Möglichkeit, den **Existenzsatz 6.9** zu beweisen.*

Quizfrage 7.4: Angenommen, das Simplex-Verfahren hat einen optimalen Basisvektor x^* gefunden, es gibt aber noch weitere optimale Basisvektoren. Wie können wir das Verfahren dazu benutzen, ausgehend von x^* einen weiteren optimalen Basisvektor zu bestimmen? Dies ist Inhalt von **Hausaufgabe 6.2**

Quizfrage 7.5: Was könnte der Grund sein, warum man im Simplex-Verfahren mit benachbarten Ecken arbeitet? Man könnte doch auch größere Änderungen in den Basis-Indizes zulassen?

Quizfrage 7.6: Ist das Simplex-Verfahren ein Abstiegsverfahren? Wenn ja, können Sie die Schritte **Schritte (1) bis (3)** eines allgemeinen Abstiegsverfahrens (siehe Anfang von § 4 auf **Seite 15**) im Simplex-Verfahren (**Algorithmus 7.6**) wiederfinden?

FINDEN DER ERSTEN ECKE

Beachte: Für den Start des **Simplex-Algorithmus 7.6** muss ein zulässiger Basisvektor von P bekannt sein.

Beobachtung: War das LP ursprünglich in kanonischer Form (6.3) gegeben (etwa beim Mozartproblem, Beispiel 6.2), also in der Form

$$\left. \begin{array}{ll} \text{Maximiere} & c^T x \\ \text{sodass} & Ax \leq b \\ \text{und} & x \geq 0 \end{array} \right\}$$

mit $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $b \in \mathbb{R}^m$ und $c \in \mathbb{R}^n$, und führen wir Schlupfvariablen $s \in \mathbb{R}^m$ ein, so erhalten wir das äquivalente Problem in Normalform mit den Variablen $(x, s) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m$:

$$\left. \begin{array}{ll} \text{Minimiere} & -c^T x \\ \text{sodass} & Ax + s = b \\ \text{und} & x \geq 0, \quad s \geq 0. \end{array} \right\}$$

Falls $b \geq 0$ ist, dann ist $\begin{pmatrix} 0 \\ b \end{pmatrix}$ ein zulässiger Basisvektor zur Basis $B = \{n+1, \dots, n+m\}$, mit dem man das Verfahren starten kann.

Im Allgemeinen kann man einen zulässigen Basisvektor für (6.6) durch Lösen eines Hilfsproblems („**Phase I**“) bestimmen:

Satz 7.10 (Phase-I-Problem).

In dem LP in Normalform (6.6) sei (o. B. d. A.) $b \geq 0$.⁶ Dann gelten für das Hilfsproblem

$$\left. \begin{array}{ll} \text{Minimiere} & \mathbf{1}^T z \quad \text{über } (x, z) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \\ \text{sodass} & Ax + z = b \\ \text{und} & x \geq 0, \quad z \geq 0 \end{array} \right\} \quad (7.7)$$

mit $\mathbf{1} = (1, 1, \dots, 1)^T \in \mathbb{R}^m$ folgende Aussagen:

- (i) Der Vektor $\begin{pmatrix} x \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ b \end{pmatrix}$ ist ein zulässiger Basisvektor für (7.7) zur Basis $B = \{n+1, \dots, n+m\}$.
- (ii) Das LP (7.7) besitzt eine Lösung.
- (iii) Es sei $\begin{pmatrix} x^* \\ z^* \end{pmatrix}$ ein optimaler Basisvektor für (7.7). Ist $z^* \neq 0$, so besitzt das LP (6.6) keinen zulässigen Punkt. Ist dagegen $z^* = 0$ und gilt $\text{Rang}(A) = m$, so ist x^* ein (zulässiger) Basisvektor für (6.6) zu einer geeigneten Basis.

Die Voraussetzung $b \geq 0$ ist keine Einschränkung, ggf. multiplizieren wir betreffende Zeilen von $Ax = b$ mit -1 .

⁶Über den Rang von A muss hier nichts vorausgesetzt werden. Der Rang von $[A, \text{Id}]$ ist immer gleich m .

Beweis. **Aussage (i)** folgt sofort aus der Definition eines Basisvektors, da die zugehörigen Spalten von $[A, \text{Id}]$ gerade die Einheitsmatrix Id bilden. Damit ist das Hilfsproblem (7.7) nicht unzulässig.

Aussage (ii): Wegen $z \geq 0$ ist die Zielfunktion $1^T z = \sum_{i=1}^m z_i$ über der zulässigen Menge selbst ≥ 0 , d. h., (7.7) ist nicht unbeschränkt. Aus Satz 6.9 folgt die Existenz einer Lösung.

Aussage (iii): Es sei $\begin{pmatrix} x^* \\ z^* \end{pmatrix}$ ein optimaler Basisvektor für (7.7) und zunächst $z^* \neq 0$. Der Optimalwert von (7.7) ist daher $1^T z^* > 0$. Gäbe es einen zulässigen Punkt \tilde{x} von (6.6), so wäre $\begin{pmatrix} \tilde{x} \\ 0 \end{pmatrix}$ zulässig für (7.7) mit Funktionswert 0, im Widerspruch zur Optimalität von $\begin{pmatrix} x^* \\ z^* \end{pmatrix}$.

Wir betrachten nun den Fall $z^* = 0$. Es sei B^* mit $|B^*| = m$ eine zu $\begin{pmatrix} x^* \\ z^* \end{pmatrix}$ gehörige Basis. Es ist also $[A, \text{Id}]_{B^*}$ regulär. Nach Definition gehören positive Komponenten von x^* notwendig zu B^* , sodass die zugehörigen Spalten von A linear unabhängig sind. Falls erforderlich, können diese Spalten durch weitere Spalten von A zu m linear unabhängigen Spalten ergänzt werden, da $\text{Rang}(A) = m$ vorausgesetzt wurde. Mit $Ax^* = b$ folgt hieraus, dass x^* ein (möglicherweise entarteter) zulässiger Basisvektor für (6.6) ist. \square

Bemerkung 7.11 (Zu Phase I und II).

- (i) Das Hilfsproblem (7.7) ist wiederum ein LP in Normalform, dessen Matrix $[A, \text{Id}]$ stets vollen Rang m hat.
- (ii) Wir können das Simplex-Verfahren (Algorithmus 7.6) in der **Phase I** auf das Hilfsproblem (7.7) anwenden. Ein erster zulässiger Basisvektor ist nach Satz 7.10 (i) bekannt. Dann erhalten wir (wenn wir Zyklen mit der Regel von Bland vermeiden) im Fall $\text{Rang}(A) = m$ nach endlich vielen Schritten entweder einen zulässigen Basisvektor für das eigentliche LP (6.6) oder die Information, dass (6.6) unzulässig ist (keinen zulässigen Punkt besitzt).
- (iii) Ist der in Phase I berechnete Basisvektor $\begin{pmatrix} x^* \\ z^* \end{pmatrix}$ entartet, so enthält die Basis B^* möglicherweise noch Indizes in $\{n+1, \dots, n+m\}$, die man vor dem Start des eigentlichen Simplex-Algorithmus („Phase II“) für (6.6) in zusätzlichen Schritten noch austauschen muss. Wie dies funktioniert wird in Hausaufgabe 6.3 gezeigt.
- (iv) Für Phase I haben wir nicht benötigt, dass A vollen Rang hat, da $[A, \text{Id}]$ in jedem Fall vollen Rang hat. Erhält man dann $z^* = 0$ und ist der Rang von A nicht maximal, so kann x^* unmöglich ein Basisvektor für (6.6) mit einer Basis in $\{1, \dots, n\}$ sein. Aus Phase I erhält man dann aber Informationen darüber, welche Zeile(n) von $Ax = b$ gestrichen werden können. Details dazu können Sie zum Beispiel in Geiger, Kanzow, 2002, Aufgabe 3.23 finden.

Quizfrage 7.7: Wieviele Iterationen benötigt das Simplex-Verfahren in Phase I mindestens, um einen zulässigen Basisvektor der Aufgabe (6.6) zu einer Basis in $\{1, \dots, n\}$ zu finden?

Bemerkung 7.12 (Zur Komplexität des Simplex-Verfahrens).

Es gibt ein konstruiertes Beispiel von Klee, Minty, 1972⁷, bei dem alle Ecken eines Polyeders besucht werden, und zwar in jeder Problemdimension (Anzahl der Variablen) n . Da die Anzahl der Ecken exponentiell mit

⁷siehe z. B. Hamacher, Klamroth, 2006, S.81

n wächst, ist das Simplex-Verfahren im schlechtesten Fall von der Laufzeit nicht polynomial in n . Dies ist eine Motivation für Innere-Punkte-Verfahren. Im Mittel verhält sich das Simplex-Verfahren jedoch deutlich besser als in diesem schlechtesten Fall. (Siehe Arbeiten zurückgehend auf https://de.wikipedia.org/wiki/Karl_Heinz_Borgwardt.)

§ 8 OPTIMALITÄTSBEDINGUNGEN DER LINEAREN OPTIMIERUNG (DUALITÄT)

Literatur: Geiger, Kanzow, 2002, Kapitel 3.1.2

Wir betrachten weiterhin ein LP in Normalform, also

$$\left. \begin{array}{ll} \text{Minimiere} & c^T x \quad \text{über } x \in \mathbb{R}^n \\ \text{sodass} & Ax = b \\ \text{und} & x \geq 0 \end{array} \right\} \quad (8.1)$$

mit $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $b \in \mathbb{R}^m$ und $c \in \mathbb{R}^n$.

Beachte: Über den Rang von A sowie die Dimensionen von $m, n \in \mathbb{N}$ wird in diesem Abschnitt nichts vorausgesetzt.

Eng verwandt mit (8.1) ist das folgende LP, das dieselben Daten (A, b, c) verwendet:

$$\left. \begin{array}{ll} \text{Maximiere} & b^T \lambda \quad \text{über } \lambda \in \mathbb{R}^m \\ \text{sodass} & A^T \lambda \leq c. \end{array} \right\} \quad (8.2)$$

Führen wir in (8.2) die **dualen Schlupfvariablen** (englisch: *dual slack variables*) $\mu \in \mathbb{R}^n$ ein, so erhalten wir die zu (8.2) äquivalente und von uns bevorzugte Darstellung:

$$\left. \begin{array}{ll} \text{Maximiere} & b^T \lambda \quad \text{über } (\lambda, \mu) \in \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^n \\ \text{sodass} & A^T \lambda + \mu = c \\ \text{und} & \mu \geq 0. \end{array} \right\} \quad (8.3)$$

Achtung: Das LP (8.3) liegt nicht in Normalform vor, da die Bedingung $\lambda \geq 0$ fehlt (und die Zielfunktion maximiert wird).

Definition 8.1 (Duales LP).

Das LP (8.2) bzw. (8.3) heißt das zu (8.1) gehörige **duale LP** (englisch: *dual LP*). In diesem Zusammenhang heißt (8.1) das **primale LP** (englisch: *primal LP*). Man spricht auch von **primal-dualen Paaren** (englisch: *primal-dual pair*).

Beispiel 8.2. Wir betrachten das Mozartproblem in Normalform, vgl. (6.7):

$$\begin{array}{ll} \text{Minimiere} & (-9 \quad -8 \quad 0 \quad 0 \quad 0) x \quad \text{über } x \in \mathbb{R}^5 \\ \text{sodass} & \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x = \begin{pmatrix} 9 \\ 6 \\ 11 \end{pmatrix} \\ \text{und} & x \geq 0. \end{array}$$

Das zugehörige duale LP lautet

$$\begin{aligned} &\text{Maximiere} \quad (9 \quad 6 \quad 11) \lambda + (0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0) \mu \quad \text{über } (\lambda, \mu) \in \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^5 \\ &\text{sodass} \quad \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \lambda + \mu = \begin{pmatrix} -9 \\ -8 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\ &\text{und} \quad \mu \geq 0. \end{aligned}$$

Quizfrage 8.1: Was ist die duale Aufgabe der dualen Aufgabe (8.3)? (Siehe auch [Hausaufgabe 6.4.](#))

Ziel: Verständnis des Zusammenhangs von (8.1) und (8.3)

Wir bezeichnen wie bisher auch den Optimalwert von (8.1) mit f^* und den Optimalwert von (8.2) bzw. von (8.3) mit d^* :

$$\begin{aligned} f^* &:= \inf \{c^T x \mid Ax = b, x \geq 0\} \\ d^* &:= \sup \{b^T \lambda \mid A^T \lambda \leq c\} = \sup \{b^T \lambda \mid A^T \lambda + \mu = c, \mu \geq 0\}. \end{aligned}$$

Quizfrage 8.2: Welchen Wert hat d^* , wenn die duale Aufgabe unbeschränkt bzw. unzulässig ist?

Satz 8.3 (Schwache Dualität) (englisch: *weak duality*).

Es sei $x \in \mathbb{R}^n$ zulässig für das primale LP (8.1), und es sei $(\lambda, \mu) \in \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^n$ zulässig für das duale LP (8.3). Dann gilt für die Funktionswerte

$$b^T \lambda \leq c^T x.$$

Beachte: Schwache Dualität bedeutet also gerade: $d^* \leq f^*$.

Beweis. Aus der Zulässigkeit ergibt sich

$$b^T \lambda = (Ax)^T \lambda = x^T (A^T \lambda) = x^T (c - \mu) = c^T x - x^T \mu \leq c^T x, \quad (8.4)$$

denn wegen $x \geq 0$ und $\mu \geq 0$ gilt $x^T \mu \geq 0$. □

Bemerkung 8.4 (Veranschaulichung des dualen LPs).

Jedes zulässige Paar (λ, μ) des dualen LPs (8.3) liefert mit $b^T \lambda$ eine untere Schranke für den optimalen Zielfunktionswert des primalen LPs, also

$$b^T \lambda \leq f^* := \inf \{c^T x \mid Ax = b, x \geq 0\}.$$

Wegen $Ax = b$ im primalen LP gilt auch $\lambda^T Ax = \lambda^T b$ für alle $\lambda \in \mathbb{R}^m$ (Linearkombination der Gleichungen). Im dualen LP suchen wir also eine Linearkombination der Gleichungsnebenbedingungen $Ax = b$ (repräsentiert durch den Koeffizientenvektor $\lambda \in \mathbb{R}^m$), die den Wert der primalen Zielfunktion am stärksten einschränkt.⁸

⁸Eine analoge Aussage gilt natürlich auch für das primale LP. Die Sprechweise von primal-dualen Paaren ist daher gerechtfertigt.

Folgerung 8.5 (Erkennen primal-dualer Lösungen).

Es sei $x^* \in \mathbb{R}^n$ zulässig für das primale LP (8.1), und es sei $(\lambda^*, \mu^*) \in \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^n$ zulässig für das duale LP (8.3). Falls

$$c^T x^* = b^T \lambda^* \quad (8.5)$$

gilt, dann ist x^* eine Lösung des primalen LP, und (λ^*, μ^*) ist eine Lösung des dualen LP.

Beweis. Es seien x und (λ, μ) irgendwelche zulässigen Punkte für das primale bzw. das duale LP. Aus der schwachen Dualität (Satz 8.3) folgt

$$\underbrace{b^T \lambda \leq c^T x^* = b^T \lambda^*}_{\text{primale Optimalität}} \leq \underbrace{c^T x}_{\text{duale Optimalität}},$$

d. h., x^* ist eine Lösung von (8.1), und (λ^*, μ^*) ist Lösung von (8.3). □

Der folgende Satz zeigt, dass das System

$$\left. \begin{array}{ll} A^T \lambda + \mu = c, & \mu \geq 0 \quad \text{duale Zulässigkeit} \\ Ax = b, & x \geq 0 \quad \text{primale Zulässigkeit} \\ x_i \mu_i = 0, & i = 1, \dots, n \quad \text{Komplementarität} \end{array} \right\} \quad (8.6)$$

notwendige und hinreichende Optimalitätsbedingungen sind, und zwar gleichzeitig für das primale wie auch für das duale LP.

Beachte: Die Komplementaritätsbedingungen (englisch: *complementary slackness conditions*) $x_i \mu_i = 0$ können äquivalent auch summiert formuliert werden:

$$x^T \mu = \sum_{i=1}^n x_i \mu_i = 0.$$

Satz 8.6 (Notwendige und hinreichende Optimalitätsbedingungen).

- (i) Ist x^* eine Lösung für das primale LP (8.1), dann existieren (λ^*, μ^*) , sodass (x^*, λ^*, μ^*) das System (8.6) erfüllt.
- (ii) Ist (λ^*, μ^*) eine Lösung für das duale LP (8.3), dann existiert x^* , sodass (x^*, λ^*, μ^*) das System (8.6) erfüllt.
- (iii) Erfüllt (x^*, λ^*, μ^*) das System (8.6), dann ist x^* eine Lösung von (8.1), und (λ^*, μ^*) ist eine Lösung von (8.3).

In jedem Fall sind die Optimalwerte gleich: $f^* = d^*$.

Für den Beweis der Aussagen (i) und (ii) benötigen wir folgendes Hilfsresultat.

Lemma 8.7 (Farkas-Lemma (1902)).

Es seien $B \in \mathbb{R}^{m \times n}$ und $c \in \mathbb{R}^n$. Dann sind äquivalent:

- (i) Das System $B^T \xi = c$ besitzt eine Lösung $\xi \geq 0$.
- (ii) Es gilt $c^T d \geq 0$ für alle Elemente der Menge $\{d \in \mathbb{R}^n \mid B d \geq 0\}$.

Aussage (i) bedeutet, dass c in der abgeschlossenen Menge

$$K := \{B^T \xi \mid \xi \in \mathbb{R}^m, \xi \geq 0\}$$

liegt, vgl. Lemma 6.10. Um **Aussage (ii)** zu veranschaulichen, machen wir folgende Überlegung:

$$\begin{aligned} B d \geq 0 &\Leftrightarrow \xi^T B d \geq 0 \quad \text{für alle } \xi \geq 0 \\ &\Leftrightarrow (B^T \xi)^T d \geq 0 \quad \text{für alle } \xi \geq 0 \\ &\Leftrightarrow K \text{ gehört zum Halbraum } H^+(d, 0). \end{aligned}$$

Die **Aussage (ii)** können wir also lesen als: „Wann immer der Halbraum $H^+(d, 0)$ die Menge K enthält, enthält er auch den Punkt c .“ Die Negation von **Aussage (ii)** bedeutet dagegen, dass es eine Hyperebene $H(d, 0)$ gibt, sodass K im Halbraum $H^+(d, 0)$ enthalten ist, der Punkt c aber nicht. Man nennt dann $H(d, 0)$ eine **trennende Hyperebene** (englisch: *separating hyperplane*).

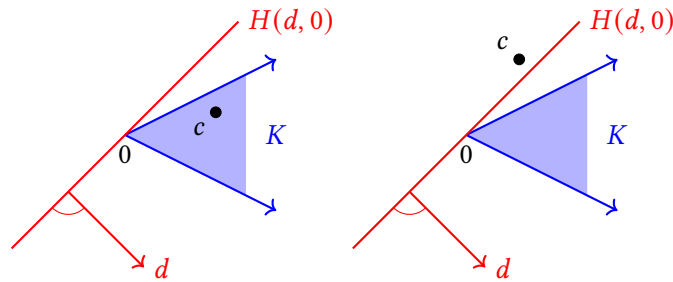


Abbildung 8.1: Illustration der beiden Fälle (links: **Aussagen (i) und (ii)** sind beide erfüllt und rechts: beide nicht erfüllt) im Farkas-Lemma 8.7.

Beweis von Lemma 8.7. Wir zeigen zunächst **Aussage (i) \Rightarrow Aussage (ii)**: Es sei dazu $\xi \geq 0$ mit $B^T \xi = c$ gegeben. Weiter sei $d \in \mathbb{R}^n$ so, dass $B d \geq 0$ gilt. Dann folgt

$$c^T d = (B^T \xi)^T d = \xi^T (B d) \geq 0.$$

Um **Aussage (ii) \Rightarrow Aussage (i)** zu zeigen, verwenden wir Kontraposition (\neg **Aussage (i)** $\Rightarrow \neg$ **Aussage (ii)**). Wir nehmen also an, dass $c \notin K$ liegt. Wegen $0 \in K$ gilt insbesondere $c \neq 0$. Es sei $\overline{B_R}(c)$ die abgeschlossene Kugel mit Radius $R = \|c\|$. Wir betrachten die Aufgabe der orthogonalen Projektion von c auf die Menge $K \cap \overline{B_R}(c)$, also

$$\begin{aligned} &\text{Minimiere} \quad \|x - c\| \quad \text{über } x \in \mathbb{R}^n \\ &\text{unter} \quad x \in K \cap \overline{B_R}(c). \end{aligned} \tag{8.7}$$

Da K nach Lemma 6.10 abgeschlossen und $\overline{B_R(c)}$ kompakt ist, ist auch $K \cap \overline{B_R(c)}$ kompakt. Nach dem Satz von Weierstraß bzw. Satz 1.5 besitzt (8.7) daher einen globalen Minimierer w . Der Punkt w ist gleichzeitig ein globaler Minimierer der relaxierten Aufgabe

$$\begin{aligned} &\text{Minimiere} \quad \|x - c\| \quad \text{über } x \in \mathbb{R}^n \\ &\text{unter} \quad x \in K, \end{aligned} \tag{8.8}$$

weil Punkte außerhalb von $\overline{B_R(c)}$ als globale Minimierer von (8.8) nicht in Betracht kommen. (**Quizfrage 8.3:** Warum können Punkte außerhalb von $\overline{B_R(c)}$ nicht globaler Minimierer von (8.8) sein?)

Behauptung: Der Vektor $d = w - c$ dient als Normalenvektor einer Hyperebene, die K vom Punkt c trennt. Die Konstruktion wird in Abbildung 8.2 veranschaulicht. Beachte, dass $K \ni w \neq c \notin K$ gilt, also $d \neq 0$.

Es sei y ein beliebiger Punkt in K . Wir betrachten Punkte auf der Verbindungsstrecke von y und w , also $\alpha y + (1 - \alpha) w$ für $\alpha \in [0, 1]$. Diese gehören ebenfalls zu K (**Quizfrage 8.4:** Warum?). Wir erhalten

$$\begin{aligned} \|w - c\|^2 &\leq \|\alpha y + (1 - \alpha) w - c\|^2 \quad (\text{denn } w \text{ ist optimal für (8.8)}) \\ &= \|\alpha(y - w) + (w - c)\|^2 \\ &= \alpha^2 \|y - w\|^2 + 2\alpha(y - w)^T(w - c) + \|w - c\|^2. \end{aligned}$$

Daraus folgt

$$2(y - w)^T \underbrace{(w - c)}_{=d} \geq -\alpha \|y - w\|^2$$

für alle $\alpha \in [0, 1]$. Der Grenzübergang $\alpha \searrow 0$ zeigt

$$(y - w)^T d \geq 0 \text{ für alle } y \in K. \tag{8.9}$$

Durch Einsetzen von $y = 2w$ und $y = 0$ (beide gehören zu K) folgt daraus $w^T d \geq 0$ und gleichzeitig $w^T d \leq 0$, also

$$w^T d = 0. \tag{8.10}$$

Außerdem erhalten wir

$$c^T d = (c - w)^T d + w^T d = -\underbrace{\|w - c\|^2}_{=d \neq 0} + \underbrace{w^T d}_{=0} < 0. \tag{8.11}$$

Insgesamt folgt

$$y^T d \stackrel{(8.9)}{\geq} w^T d = 0 \stackrel{(8.11)}{>} c^T d \quad \text{für alle } y \in K.$$

Diese Ungleichung zeigt, dass tatsächlich wie behauptet $K \subseteq H^+(d, 0)$ ist, aber $c \notin H^+(d, 0)$. Die Aussage (ii) gilt also nicht, was zu zeigen war. \square

Wir können nun Satz 8.6 beweisen.

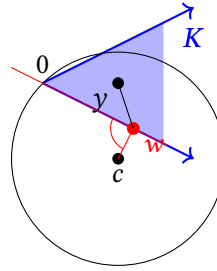


Abbildung 8.2: Illustration der Konstruktion des Normalenvektors $d = w - c$ der trennenden Hyperebene (rot) im Beweis des [Farkas-Lemmas 8.7](#).

Beweis von Satz 8.6. Wir zeigen zunächst die hinreichenden Bedingungen.

Aussage (iii): Aus (8.6) folgt insbesondere, dass x^* und (λ^*, μ^*) zulässig sind für (8.1) und (8.3). Wegen (8.4) gilt

$$b^\top \lambda^* = c^\top x^* - \underbrace{(x^*)^\top \mu^*}_{=0} = c^\top x^*. \quad (8.12)$$

Folgerung 8.5 zeigt nun, dass x^* und (λ^*, μ^*) bereits Lösungen von (8.1) bzw. (8.3) sind.

Aussage (i): Um die notwendigen Bedingungen zu zeigen, benötigen wir das [Farkas-Lemma 8.7](#).⁹ Es sei also x^* eine Lösung des primalen LP (8.1). Insbesondere ist f^* endlich, und aus [Lemma 6.8](#) folgt, dass $c^\top d \geq 0$ für alle Richtungen im Rezeptionskegel

$$\{d \in \mathbb{R}^n \mid Ad = 0, d \geq 0\}$$

gilt. Setzen wir

$$B := \begin{bmatrix} A \\ -A \\ \text{Id} \end{bmatrix},$$

so ist $Bd \geq 0$ äquivalent zu $Ad = 0$ und $d \geq 0$. Es ist also gerade die **Aussage (ii)** des [Farkas-Lemma 8.7](#) erfüllt. Daraus folgt, dass ein Vektor $\xi = (\lambda^+, \lambda^-, \mu) \geq 0$ existiert mit $B^\top \xi = c$. Setzen wir noch $\lambda := \lambda^+ - \lambda^-$, dann folgt $A^\top \lambda + \mu = c$ und $\mu \geq 0$. Das heißt, das duale LP ist zulässig.

Wegen der schwachen Dualität ([Satz 8.3](#)) $d^* \leq f^*$ ist der duale Optimalwert d^* endlich. Aus [Satz 6.9](#) (in der Variante für das duale LP) folgt, dass die duale Aufgabe (8.3) lösbar ist. Es existiert also ein für die duale Aufgabe zulässiges Paar (λ^*, μ^*) , sodass $b^\top \lambda^* = d^*$ gilt. Wir müssen noch zeigen, dass $d^* = f^*$ gilt und nicht etwa $d^* < f^*$. Dann folgt aus (8.12) die noch fehlende Komplementaritätsbedingung $(x^*)^\top \mu^* = 0$, die den Beweis von (8.6) vervollständigt.

Um $d^* = f^*$ zu bestätigen, wenden wir nochmals das [Farkas-Lemma 8.7](#) an, dieses Mal in der Form \neg **Aussage (i)** $\Rightarrow \neg$ **Aussage (ii)**. Es sei dazu $\varepsilon > 0$ beliebig. Wir wissen, dass das System

$$\underbrace{\begin{bmatrix} A & 0 \\ c^\top & 1 \end{bmatrix}}_{=: B^\top} \underbrace{\begin{pmatrix} x \\ \alpha \end{pmatrix}}_{=: \xi} = \begin{pmatrix} b \\ f^* - \varepsilon \end{pmatrix}$$

⁹Ein direkter Beweis ohne Rückgriff auf das Farkas-Lemma oder den Simplex-Algorithmus findet sich bei [Forsgren, 2008](#).

für $\begin{pmatrix} x \\ \alpha \end{pmatrix} \geq 0$ nicht lösbar ist, denn das würde bedeuten: $Ax = b$, $x \geq 0$ und $c^T x \leq c^T x + \alpha = f^* - \varepsilon$; es wäre also x ein primal zulässiger Punkt mit kleinerem Funktionswert als der Optimalwert. Aus dem [Farkas-Lemma 8.7](#) folgt jetzt, dass es einen Vektor d geben muss, für den $Bd \geq 0$ gilt sowie $\begin{pmatrix} b \\ f^* - \varepsilon \end{pmatrix}^T d < 0$. Wir partitionieren $d =: \begin{pmatrix} -\lambda \\ \alpha \end{pmatrix}$ und erhalten

$$\begin{bmatrix} A^T & c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} -\lambda \\ \alpha \end{pmatrix} \geq 0 \quad \text{und} \quad \begin{pmatrix} b \\ f^* - \varepsilon \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} -\lambda \\ \alpha \end{pmatrix} < 0,$$

also

$$A^T \lambda \leq \alpha c, \quad \alpha \geq 0 \quad \text{und} \quad b^T \lambda > \alpha (f^* - \varepsilon). \quad (8.13)$$

Der Fall $\alpha = 0$ führt schnell zum Widerspruch, denn dann wäre

$$0 \geq \underbrace{x^T}_{\geq 0} \underbrace{(A^T \lambda)}_{\leq 0} = \lambda^T (Ax) = b^T \lambda > 0.$$

Es muss also $\alpha > 0$ sein, und wir können durch Skalierung $\alpha = 1$ in (8.13) erreichen.¹⁰ Damit gilt also nun

$$A^T \lambda \leq c \quad \text{und} \quad b^T \lambda > f^* - \varepsilon.$$

Damit ist λ dual zulässig, und aufgrund der Optimalität von x^* und des [schwachen Dualitätssatzes 8.3](#) gilt $f^* = c^T x^* \geq b^T \lambda > f^* - \varepsilon$. Da $\varepsilon > 0$ beliebig war, muss $f^* = d^* := \sup\{b^T \lambda \mid A^T \lambda \leq c\} = \sup\{b^T \lambda \mid A^T \lambda + \mu = c, \mu \geq 0\}$ gelten.

Der Beweis von [Aussage \(ii\)](#) folgt ganz analog zum Beweis von [Aussage \(i\)](#). □

Ende der Woche 6

Der [Satz 8.6](#) sagt im Prinzip aus, dass wir das primale LP nicht lösen können, ohne auch das duale LP gleichzeitig zu lösen. Es ist daher nicht verwunderlich, dass im Simplex-Algorithmus, den wir in [§ 7](#) besprochen haben, auch die dualen Optimierungsvariablen (λ, μ) implizit vorkommen. Bei der Berechnung der reduzierten Kosten treten die Größen

$$\begin{aligned} \lambda &:= A_B^{-T} c_B, \\ \tilde{c}_N &:= \mu_N := c_N - A_N^T \lambda, \\ \mu_B &:= 0 \end{aligned} \quad (8.14)$$

auf. In jedem Simplex-Schritt sind alle Bedingungen im Optimalitätssystem (8.6) erfüllt mit Ausnahme von $\mu_N \geq 0$. Die Iterierten sind also primal zulässig und *dual unzulässig*, bis eine optimale Ecke gefunden wurde.

Genauer heißt [Algorithmus 7.6](#) auch **primaler Simplex-Algorithmus** (englisch: *primal simplex algorithm*). Es gibt auch ein **duales Simplex-Verfahren**, in welcher in jedem Schritt alle Bedingungen im Optimalitätssystem (8.6) erfüllt sind mit Ausnahme von $x_B \geq 0$. Die Iterierten des dualen Simplex-Verfahrens sind also dual zulässig und *primal unzulässig*. Wir besprechen das duale Simplex-Verfahren in [§ 9](#).

¹⁰Wir ersetzen dazu α durch $\alpha/\alpha = 1$ und λ durch λ/α .

Satz 8.8 (Mögliche primal-duale Situationen).

Für jedes primal-duale Paar von LP können folgende Situationen auftreten:

		duales LP (8.2) bzw. (8.3)		
		lösbar $d^* \in \mathbb{R}$	unbeschränkt $d^* = \infty$	unzulässig $d^* = -\infty$
primales LP (8.1)	lösbar $f^* \in \mathbb{R}$	(I) $d^* = f^*$	—	—
	unbeschränkt $f^* = -\infty$	—	—	(III)
	unzulässig $f^* = \infty$	—	(III)	(II)

Beweis. Zu Zeile 1 und Spalte 1:

$$\begin{aligned}
 & f^* \in \mathbb{R} \\
 \stackrel{(\text{Satz 6.9})}{\Leftrightarrow} & \text{das primale Problem (8.1) besitzt eine Lösung} \\
 \stackrel{(\text{Satz 8.6})}{\Leftrightarrow} & \text{die Optimalitätsbedingungen (8.6) besitzen eine Lösung} \\
 \stackrel{(\text{Satz 8.6})}{\Leftrightarrow} & \text{das duale Problem (8.3) besitzt eine Lösung} \\
 \stackrel{(\text{Satz 6.9})}{\Leftrightarrow} & d^* \in \mathbb{R}.
 \end{aligned}$$

Für „ \Leftarrow “ in der letzten Aussage: Bringe (8.3) in Normalform und benutze Satz 6.9. Aus dem schwachen Dualitätssatz 8.3 und (8.12) folgt außerdem, dass dann $d^* = f^*$ gelten muss.

Zu Zeile 2: Es sei $P \neq \emptyset$ und $f^* = -\infty$. Falls $D \neq \emptyset$ wäre, so würde nach dem schwachen Dualitätssatz 8.3 $d^* \leq f^* = -\infty$ gelten, Widerspruch, also muss $D = \emptyset$ und $d^* = -\infty$ gelten. Analoges gilt für die 2. Spalte (Fall (III)).

Fall (II) kann auftreten. □

Quizfrage 8.5: Kennen Sie Beispiele für Fall (II) und Fall (III)? (Hausaufgabe 7.1)

Bemerkung 8.9 (Starke Dualität).

Zu der Erkenntnis $d^* = f^*$ im Fall (I) sagt man auch: „Es tritt **keine Dualitätslücke** auf“ (zwischen den Optimalwerten, englisch: **no duality gap**) oder „Es herrscht **starke Dualität**“ (englisch: **strong duality**).

§ 9 DUALES SIMPLEX-VERFAHREN

Literatur: Nocedal, Wright, 2006, Kapitel 13.6, Vanderbei, 2008, Kapitel 6.4

In diesem Abschnitt geben wir eine zweite Variante des Simplex-Verfahrens an, das sogenannte **duale Simplex-Verfahren** (englisch: *dual simplex method*). Bei dieser tauschen primale und duale Variablen praktisch ihre Rollen. Eine Motivation dafür, beide Varianten zu betrachten, sind die unterschiedlichen Warmstart-Eigenschaften der beiden Varianten. Darunter versteht man die Fähigkeit eines Verfahrens, bei einer Änderung der Aufgabe die neue Lösung kostengünstig, ausgehend von der bisherigen Lösung, aufzudatieren. Wir gehen auf die Warmstart-Fähigkeiten später noch genauer ein.

Wir verwenden weiter den Begriff **Basis** wie in Definition 6.14, also als eine Auswahl von m Indizes aus $\{1, \dots, n\}$, sodass die Untermatrix A_B regulär ist.

Beachte: Eine Basis B legt gemäß

$$\begin{aligned} \lambda &:= A_B^{-\top} c_B, \\ x_B &:= A_B^{-1} b, \quad \mu_B := 0, \\ x_N &:= 0, \quad \mu_N := c_N - A_N^\top \lambda \end{aligned} \tag{9.1}$$

sowohl die primalen wie auch die dualen Variablen eindeutig fest.

Eine Basis B heißt **primal zulässig** (englisch: *primal feasible*), wenn der durch (9.1) beschriebene Vektor x primal zulässig ist, also die Bedingung $x_B \geq 0$ erfüllt. Eine Basis B heißt **dual zulässig** (englisch: *dual feasible*), wenn das durch (9.1) beschriebene Paar von Vektoren (λ, μ) dual zulässig ist, also die Bedingung $\mu_N \geq 0$ erfüllt. Im Unterschied zum primalen Simplex-Verfahren werden wir mit primal unzulässigen Basisvektoren arbeiten. Dafür sind die Größen (λ, μ) stets dual zulässig, siehe Tabelle 9.1.

	Eigenschaft	primales Simplex-Verfahren	duales Simplex-Verfahren
primale Zulässigkeit	$x_B \geq 0$	✓	erst in der Lösung
	$x_N = 0$	✓	✓
	$Ax = b$	✓	✓
duale Zulässigkeit	$\mu_B = 0$	✓	✓
	$\mu_N \geq 0$	erst in der Lösung	✓
	$A^\top \lambda + \mu = c$	✓	✓
Komplementarität	$x^\top \mu = 0$	✓	✓

Tabelle 9.1: Unterschiede zwischen primalem und dualem Simplex-Verfahren.

Bemerkung: Diese Eigenschaft des primalen Simplex-Verfahrens können Sie an der [Hausaufgabe 6.1](#) überprüfen, indem Sie dort die dualen Variablen identifizieren und auf Zulässigkeit überprüfen.

Wir leiten jetzt einen Schritt des dualen Simplex-Verfahrens analog zu § 7.1 her. Es sei dazu als Ausgangspunkt eine dual zulässige Basis B gegeben und (λ, μ) die dazugehörigen dualen Variablen gemäß (9.1). Zur Motivation des *pricing*-Schritts untersuchen wir, was passiert, wenn wir einem der Indizes in $\mu_B = 0$ erlauben, sich von der Null zu lösen. Wir machen also den Ansatz $\mu_B(t) := t e_\ell$ mit einem Standard-Basisvektor $e_\ell \in \mathbb{R}^m$, $t \geq 0$. In Abhängigkeit von t ergibt sich der Wert von λ nun aus

$$A_B^\top \lambda(t) + \mu_B(t) = c_B,$$

also

$$\lambda(t) = A_B^{-\top} (c_B - t e_\ell) = \lambda + t \underbrace{(-A_B^{-\top} e_\ell)}_{=: \Delta \lambda}.$$

Welchen Index ℓ wählen wir? Dazu betrachten wir die Werte der dualen Zielfunktion:

$$b^\top \lambda(t) = b^\top \lambda - t b^\top A_B^{-\top} e_\ell = b^\top \lambda - t e_\ell^\top x_B = b^\top \lambda - t x_\ell.$$

Hier übernimmt also $x_B := A_B^{-1} b$ die Rolle der reduzierten Kosten. Da wir die duale Zielfunktion maximieren wollen, wählen wir $\ell \in B$ so, dass $x_\ell < 0$ ist. Falls bereits $x_B \geq 0$ gilt, so haben wir eine primal und dual optimale Lösung gefunden. (**Quizfrage 9.1:** Begründung?)

Nach diesem **pricing**-Schritt berechnen wir $\Delta \lambda := -A_B^{-\top} e_\ell$. Die Aufdatierung von μ_N erhalten wir aus

$$\mu_N(t) = c_N - A_N^\top \lambda(t) = c_N - A_N^\top (\lambda + t \Delta \lambda) = \mu_N + t \underbrace{(-A_N^\top \Delta \lambda)}_{=: \Delta \mu_N}.$$

Die Wahl der Schrittweite ergibt sich aus der Bedingung der dualen Zulässigkeit, also $\mu_N(t) \geq 0$. Wir erhalten ähnlich zum primalen **Quotiententest** (englisch: *ratio test*)

$$\hat{t} := \min \left\{ -\frac{\mu_i}{\Delta \mu_i} \mid i \in N, \Delta \mu_i < 0 \right\} = -\frac{\mu_r}{\Delta \mu_r}.$$

Falls $\Delta \mu_N \geq 0$ ist, so ist die duale Aufgabe unbeschränkt und damit auch die primale Aufgabe nicht lösbar. (Die primale Aufgabe ist dann notwendigerweise unzulässig, siehe Satz 8.8).

Schließlich datieren wir zur Vorbereitung des nächsten Schrittes die dualen Variablen gemäß

$$\lambda^+ := \lambda + \hat{t} \Delta \lambda \quad \text{und} \quad \mu_i^+ := \begin{cases} \mu_i + \hat{t} \Delta \mu_i & \text{für } i \in N, i \neq r, \\ \hat{t} & \text{für } i = \ell, \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

und die Basis/Nichtbasis auf:

$$B^+ := (B \cup \{r\}) \setminus \{\ell\} \\ N^+ := (N \cup \{\ell\}) \setminus \{r\}.$$

Der Vollständigkeit halber geben wir das duale Simplex-Verfahren nochmal komplett an und stellen es dem primalen Verfahren gegenüber (Algorithmen 9.1 und 9.2). Nachdem wir in (8.14) gesehen haben, in welcher Beziehung die reduzierten Kosten zu den dualen Variablen stehen, nutzen wir die Gelegenheit, die dualen Variablen im primalen Verfahren nochmal mit den üblichen Bezeichnungen (λ, μ) umzubenennen.

Algorithmus 9.1 (Primaler Simplex-Algorithmus (Dantzig 1947)).

Eingabe: Aufgabenbeschreibung durch A, b, c

Eingabe: primal zulässiger Basisvektor x von P mit zugehöriger Basis B und Nichtbasis N

Ausgabe: ein optimaler Basisvektor von (8.1) (und ein optimaler Basisvektor (8.3)) oder die Aussage, dass (8.1) unbeschränkt ist

- 1: Setze $k := 0$
- 2: Berechne die primalen reduzierten Kosten (dualen Variablen)

$$\begin{aligned}\lambda &:= A_B^{-T} c_B \\ \mu_N &:= c_N - A_N^T \lambda \\ \mu_B &:= 0\end{aligned}$$

- 3: **if** $\mu_N \geq 0$ **then**
- 4: x ist eine Lösung von (8.1), und (λ, μ) ist eine Lösung von (8.3), **STOP**
- 5: **else**
- 6: Wähle einen Index $r \in N$ mit $\mu_r < 0$
- 7: Berechne

$$\Delta x_B := -A_B^{-1} a_r$$

- 8: **if** $\Delta x_B \geq 0$ **then**
- 9: Aufgabe (8.1) ist unbeschränkt, **STOP**
- 10: **else**
- 11: Bestimme $\hat{t} \geq 0$ und $\ell \in B$ gemäß

$$\hat{t} := \min \left\{ -\frac{x_i}{\Delta x_i} \mid i \in B, \Delta x_i < 0 \right\} = -\frac{x_\ell}{\Delta x_\ell}$$

- 12: Setze

$$x_i^+ := \begin{cases} x_i + \hat{t} \Delta x_i & \text{für } i \in B, i \neq \ell, \\ \hat{t} & \text{für } i = r, \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

- 13: Setze $B^+ := (B \cup \{r\}) \setminus \{\ell\}$
- 14: Setze $N^+ := \{1, \dots, n\} \setminus B^+$
- 15: Setze $x := x^+$
- 16: Setze $B := B^+$ und $N := N^+$
- 17: Setze $k := k + 1$
- 18: **end if**
- 19: **end if**
- 20: Gehe zu Zeile 2

Algorithmus 9.2 (Dualer Simplex-Algorithmus (Lemke, 1954)).

Eingabe: Aufgabenbeschreibung durch A, b, c

Eingabe: dual zulässiger Basisvektor (λ, μ) von P mit zugehöriger Basis B und Nichtbasis N

Ausgabe: ein optimaler Basisvektor von (8.3) (und ein optimaler Basisvektor von (8.1)) oder die Aussage, dass (8.3) unbeschränkt ist

- 1: Setze $k := 0$
- 2: Berechne die dualen reduzierten Kosten (primale Variablen)

$$\begin{aligned}x_B &:= A_B^{-1} b \\ x_N &:= 0\end{aligned}$$

- 3: **if** $x_B \geq 0$ **then**
- 4: (λ, μ) ist eine Lösung von (8.3), und x ist eine Lösung von (8.1), **STOP**
- 5: **else**
- 6: Wähle einen Index $\ell \in B$ mit $x_\ell < 0$
- 7: Berechne

$$\begin{aligned}\Delta \lambda &:= -A_B^{-T} e_\ell \\ \Delta \mu_N &:= -A_N^T \Delta \lambda\end{aligned}$$

- 8: **if** $\Delta \mu_N \geq 0$ **then**
- 9: Aufgabe (8.3) ist unbeschränkt, **STOP**
- 10: **else**
- 11: Bestimme $\hat{t} \geq 0$ und $r \in N$ gemäß

$$\hat{t} := \min \left\{ -\frac{\mu_i}{\Delta \mu_i} \mid i \in N, \Delta \mu_i < 0 \right\} = -\frac{\mu_r}{\Delta \mu_r}$$

- 12: Setze $\lambda^+ := \lambda + \hat{t} \Delta \lambda$ und

$$\mu_i^+ := \begin{cases} \mu_i + \hat{t} \Delta \mu_i & \text{für } i \in N, i \neq r, \\ \hat{t} & \text{für } i = \ell, \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

- 13: Setze $B^+ := (B \cup \{r\}) \setminus \{\ell\}$
- 14: Setze $N^+ := \{1, \dots, n\} \setminus B^+$
- 15: Setze $\lambda := \lambda^+$ und $\mu := \mu^+$
- 16: Setze $B := B^+$ und $N := N^+$
- 17: Setze $k := k + 1$
- 18: **end if**
- 19: **end if**
- 20: Gehe zu Zeile 2

Eine erste dual zulässige Ecke (sofern existent) kann mit Hilfe eines dualen Phase-I-Problems gefunden werden.

Wir gehen jetzt auf die eingangs erwähnten Warmstart-Fähigkeiten des primalen und dualen Simplex-Verfahrens ein und betrachten dazu zwei Situationen. In beiden Fällen gehen wir davon aus, dass wir mit Hilfe des (primalen oder dualen) Simplex-Verfahrens bereits eine optimale Lösung $x \in \mathbb{R}^n$ des primalen Problems (8.1) mit Basis B und gleichzeitig eine optimale Lösung $(\lambda, \mu) \in \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^n$ des dualen Problems bestimmt haben.

HINZUFÜGEN EINER VARIABLEN

Zunächst betrachten wir die Situation, dass wir der primalen Aufgabe eine neue Variable \bar{x} hinzufügen, also die Aufgabe zu

$$\begin{aligned} &\text{Minimize} && \begin{pmatrix} c \\ \bar{c} \end{pmatrix}^\top \begin{pmatrix} x \\ \bar{x} \end{pmatrix} && \text{über } \begin{pmatrix} x \\ \bar{x} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n+1} \\ &\text{sodass} && [A \quad \bar{a}] \begin{pmatrix} x \\ \bar{x} \end{pmatrix} = b \\ &\text{und} && \begin{pmatrix} x \\ \bar{x} \end{pmatrix} \geq 0 \end{aligned} \tag{9.2}$$

erweitern wollen. Wir können die neue Variable mit $\bar{x} = 0$ initialisieren und erhalten einen weiterhin primal zulässigen Basisvektor zur bisherigen Basis B . Die neue Nichtbasis ist $N \cup \{n+1\}$. Die Bedingungen der dualen Zulässigkeit für das neue Problem lauten

$$\begin{bmatrix} A^\top \\ \bar{a}^\top \end{bmatrix} \lambda + \begin{pmatrix} \mu \\ \bar{\mu} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c \\ \bar{c} \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \mu \\ \bar{\mu} \end{pmatrix} \geq 0. \tag{9.3}$$

Wir können die neue duale Schlupfvariable $\bar{\mu}$ mit $\bar{c} - \bar{a}^\top \lambda$ initialisieren, aber sie wird i. A. nicht $\bar{\mu} \geq 0$ erfüllen. Die Komplementaritätsbedingung $x^\top \mu + \bar{x}^\top \bar{\mu} = 0$ gilt aber weiterhin.

Diese Situation ist prädestiniert für das primale Simplex-Verfahren. Wir können es mit dem primal zulässigen Basisvektor warmstarten. Eine erneute Phase I ist nicht erforderlich. Das duale Simplex-Verfahren dagegen würde in Ermangelung eines dual zulässigen Basisvektors mit einem Phase-I-Vorlauf starten müssen und könnte von der zuvor bestimmten Lösung nicht profitieren.

HINZUFÜGEN EINER NEBENBEDINGUNG

Wir betrachten jetzt eine andere Veränderung der primalen Aufgabe (8.1) und fügen ihr eine neue Ungleichungsnebenbedingung $\bar{a}^\top x \leq \bar{b}$ bzw. $\bar{a}^\top x + \bar{x} = \bar{b}$ mit zugehöriger Schlupfvariable \bar{x} hinzu:

$$\begin{aligned} &\text{Minimiere} \quad \begin{pmatrix} c \\ 0 \end{pmatrix}^\top \begin{pmatrix} x \\ \bar{x} \end{pmatrix} \quad \text{über} \quad \begin{pmatrix} x \\ \bar{x} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R} \\ &\text{sodass} \quad \begin{bmatrix} A & 0 \\ \bar{a}^\top & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ \bar{x} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b \\ \bar{b} \end{pmatrix} \\ &\text{und} \quad \begin{pmatrix} x \\ \bar{x} \end{pmatrix} \geq 0. \end{aligned} \tag{9.4}$$

Die Bedingungen der dualen Zulässigkeit für die neue Aufgabe lauten

$$\begin{bmatrix} A^\top & \bar{a} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \lambda \\ \bar{\lambda} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mu \\ \bar{\mu} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \mu \\ \bar{\mu} \end{pmatrix} \geq 0. \tag{9.5}$$

Die bisherige Lösung x wird i. A. nicht länger primal zulässig sein, da $\bar{a}^\top x \leq \bar{b}$ verletzt ist. Wir können aber die bisherige dual optimale Lösung durch $\bar{\lambda} = \bar{\mu} = 0$ erweitern und sind weiterhin dual zulässig. Genauer erweitern wir die bisherige Basis zu $B \cup \{n+1\}$. Die neue Basismatrix ist daher

$$\begin{bmatrix} A_B & 0 \\ \bar{a}_B^\top & 1 \end{bmatrix}.$$

Diese ist weiterhin regulär (**Quizfrage 9.2:** Warum?), sodass wir tatsächlich von einer Basis sprechen können.

Diese Situation ist nun wie geschaffen für das duale Simplex-Verfahren. Wir können es mit dem dual zulässigen Basisvektor warmstarten. Eine erneute duale Phase I ist nicht erforderlich. Das primale Simplex-Verfahren dagegen würde angesichts eines fehlenden primal zulässigen Basisvektors mit einem Phase-I-Vorlauf starten müssen und könnte von der zuvor bestimmten Lösung nicht profitieren.

Bemerkung 9.3 (Das duale Simplex-Verfahren in der ganzzahligen linearen Optimierung). Die in (9.4) beschriebene Situation, dass wir einem bereits gelösten LP eine Ungleichungsnebenbedingung hinzufügen wollen, kommt vor allem bei der Lösung sogenannter **(gemischt-)ganzzahliger linearer Optimierungsaufgaben** (**(gemischt-)ganzzahliges lineares Programm**, englisch: **mixed-integer linear program**, **MILP**) vor. Das sind lineare Optimierungsaufgaben, bei denen einige oder alle der Optimierungsvariablen x_i ganzzahlig sein müssen, also $x_i \in \mathbb{Z}$ an Stelle von $x_i \in \mathbb{R}$. Bei Verwendung der Normalform geht es z. B. um Aufgaben der Form

$$\left. \begin{aligned} &\text{Minimiere} \quad c^\top x \quad \text{über} \quad x \in \mathbb{Z}^n \\ &\text{sodass} \quad Ax = b \\ &\text{und} \quad x \geq 0. \end{aligned} \right\} \tag{9.6}$$

Solche Aufgaben fallen in den Bereich der ganzzahligen Optimierung. In einem gängigen Lösungsansatz, den man **branch and bound** nennt, wird zunächst ein relaxiertes LP gelöst, bei dem die Ganzzahligkeitsbedingungen vernachlässigt werden, also (8.1). Dessen Lösung bezeichnen wir jetzt mit x^* . Dann wird

eine Variable x_i^* ausgewählt, die die Ganzzahligkeitsbedingung verletzt, und es werden die zwei LPs

$$\left. \begin{array}{l} \text{Minimiere } c^T x \text{ über } x \in \mathbb{R}^n \\ \text{sodass } Ax = b \\ \text{und } x \geq 0 \\ \text{sowie } x_i \geq \lceil x_i^* \rceil \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \text{Minimiere } c^T x \text{ über } x \in \mathbb{R}^n \\ \text{sodass } Ax = b \\ \text{und } x \geq 0 \\ \text{sowie } x_i \leq \lfloor x_i^* \rfloor \end{array} \right. \quad (9.7)$$

gelöst. Dabei sind $\lceil \cdot \rceil$ und $\lfloor \cdot \rfloor$ die **obere** bzw. **untere Gaußklammer** (englisch: **ceiling and floor functions**), d. h.,

$$\begin{aligned} \lceil z \rceil &:= \min\{y \in \mathbb{Z} \mid y \geq z\} && \text{(kleinste ganze Zahl oberhalb von } z), \\ \lfloor z \rfloor &:= \max\{y \in \mathbb{Z} \mid y \leq z\} && \text{(kleinste ganze Zahl unterhalb von } z). \end{aligned}$$

Für die Lösung der beiden Aufgaben in (9.7) bietet sich das duale Simplex-Verfahren besonders an, weil die Lösung ohne die hinzugefügten Ungleichungsnebenbedingungen bereits bekannt ist.

§ 10 SENSITIVITÄTSANALYSE

In diesem Abschnitt gehen wir der Frage nach, wie empfindlich (sensitiv) der Optimalwert (also der Zielfunktionswert an einer optimalen Lösung) eines LPs in Normalform (8.1) gegenüber Änderungen im Kostenvektor c und in der rechten Seite b abhängen.

Motivation: Was wäre etwa beim Mozartproblem (Beispiel 6.7), wenn wir den Gewinn c pro produzierter Einheit Mozartkugeln/-taler ändern, indem wir die Verkaufspreise abändern? Und was passiert, wenn wir eine Änderung in den nutzbaren Ressourcen (dem Lagerbestand b) feststellen, z. B. durch den unerwarteten Verfall von Zutaten?

Quizfrage 10.1: Was sind weitere Beispiele linearer Optimierungsaufgaben, bei denen es von Interesse sein könnte, Änderungen von b und/oder c zu untersuchen? Durch welche Ereignisse könnten diese Änderungen ausgelöst worden sein?

Quizfrage 10.2: Was sind Beispiele von Veränderungen in der Aufgabenstellungen, die *nicht* durch Änderungen in b und/oder c dargestellt werden können? (Siehe auch [Hausaufgabe 7.2.](#))

Natürlich könnten wir die Aufgabe mit den modifizierten Daten b oder c einfach erneut lösen und die Änderung in der Zielfunktion ablesen. Es wird sich jedoch zeigen, dass wir in vielen Fällen eine Vorhersage bereits auf Basis der Lösung des unveränderten Problems treffen können.

Wir machen in diesem Abschnitt folgende **Voraussetzung**: Es seien x^* und (λ^*, μ^*) Lösungen der primalen Aufgabe (8.1) bzw. der dualen Aufgabe (8.3) zu einer Basis B , also optimale Ecken, wie sie mit dem primalen oder dem dualen Simplex-Verfahren berechnet werden.

ÄNDERUNGEN IM KOSTENVEKTOR

Wir bezeichnen mit $\Delta c \in \mathbb{R}^n$ eine Änderungsrichtung im Kostenvektor c der primalen Aufgabe und betrachten folgende Familie primal-dualer Aufgaben mit Parameter $t \in \mathbb{R}$:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Minimiere} \quad (c + t \Delta c)^\top x \\ \text{sodass} \quad Ax = b \\ \text{und} \quad x \geq 0 \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Maximiere} \quad b^\top \lambda \\ \text{sodass} \quad A^\top \lambda + \mu = c + t \Delta c \\ \text{und} \quad \mu \geq 0. \end{array} \right. \quad (10.1)$$

Welche Aussagekraft besitzen die Lösungen x^* und (λ^*, μ^*) des „ungestörten“ Aufgabenpaares ($t = 0$) noch für (10.1)?

Da (10.1) dieselbe primal zulässige Menge besitzt wie die ungestörte Aufgabe (8.1), ist x^* weiterhin primal zulässig. Die dual zulässige Menge hat sich jedoch gegenüber (8.3) geändert. Wir können aber den Versuch unternehmen, die duale Lösung aufzudatieren. Dazu gehen wir wie in § 9 bei der Herleitung des dualen Simplex-Verfahrens vor. Durch die Basis B sind die dualen Variablen wie folgt festgelegt, vgl. (9.1):

$$\lambda(t) = \lambda^* + t \Delta \lambda \quad \text{mit } \Delta \lambda := A_B^{-\top} \Delta c_B \quad (10.2a)$$

$$\mu_N(t) = \mu_N^* + t \Delta \mu_N \quad \text{mit } \Delta \mu_N := \Delta c_N - A_N^\top \Delta \lambda \quad (10.2b)$$

$$\mu_B(t) \equiv \mu_B^* = 0. \quad (10.2c)$$

Wann sind die auf diese Art und Weise erhaltenen Vektoren x^* und $(\lambda(t), \mu(t))$ optimal für (10.1)? Wir überprüfen dazu die Optimalitätsbedingungen (8.6). Die primale Zulässigkeit

$$Ax^* = b, \quad x^* \geq 0$$

ist erfüllt, ebenso die Komplementaritätsbedingung:

$$\underbrace{(x_B^*)^\top \mu_B(t)}_{=0} + \underbrace{(x_N^*)^\top \mu_N(t)}_{=0} = 0.$$

Bzgl. der dualen Zulässigkeit ist die erste Bedingung

$$\begin{aligned} A^\top \lambda(t) + \mu(t) &= \begin{pmatrix} A_B^\top \lambda^* + t A_B^\top A_B^{-\top} \Delta c_B + \mu_B(t) \\ A_N^\top \lambda^* + t A_N^\top A_B^{-\top} \Delta c_B + \mu_N(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_B + t \Delta c_B + 0 \\ A_N^\top \lambda^* + t A_N^\top A_B^{-\top} \Delta c_B + \mu_N^* + t \Delta c_N - t A_N^\top A_B^{-\top} \Delta c_B \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} c_B + t \Delta c_B \\ c_N + t \Delta c_N \end{pmatrix} = c + t \Delta c \end{aligned}$$

nach Konstruktion von $\lambda(t)$ und $\mu(t)$ erfüllt. Die Vorzeichenbedingung $\mu_N(t) \geq 0$ jedoch gilt nicht automatisch, sondern genau dann, wenn der Störungsparameter t der Bedingung¹¹

$$\sup_{\substack{i \in N \\ \Delta \mu_i > 0}} \underbrace{\left\{ -\frac{\mu_i^*}{\Delta \mu_i} \right\}}_{\leq 0} \leq t \leq \inf_{\substack{i \in N \\ \Delta \mu_i < 0}} \underbrace{\left\{ -\frac{\mu_i^*}{\Delta \mu_i} \right\}}_{\geq 0}. \quad (10.3)$$

¹¹Wir schreiben hier sup und inf statt max und min, da die betreffenden Indexmengen durchaus leer sein können. Beispielsweise ist, sofern $\mu_N \geq 0$ gilt, die Indexmenge für die obere Schranke leer, sodass die betreffende Ungleichung in (10.3) zu „ $t \leq \inf \emptyset = \infty$ “ wird, was als $t < \infty$ zu interpretieren ist.

genügt.

Beachte: Die durch (10.3) beschriebene Menge ist ein abgeschlossenes (möglicherweise unbeschränktes) Intervall $I(\Delta c)$, das die 0 enthält. Im Extremfall ist $I(\Delta c) = \{0\}$.

Für $t \in I(\Delta c)$ ist also tatsächlich x^* auch für die gestörten Probleme (10.1) weiterhin eine optimale Ecke. Der zugehörige Optimalwert lässt sich daher bequem aus der primalen Aufgabe ablesen:

$$f^*(t) = (c + t \Delta c)^T x^* = f^* + t \Delta c^T x^*. \quad (10.4)$$

Wir fassen unsere Erkenntnisse zusammen:

Satz 10.1 (Sensitivitätssatz bei LP bei Änderungen im Kostenvektor).

Es seien x^* und (λ^*, μ^*) Lösungen der primalen Aufgabe (8.1) bzw. der dualen Aufgabe (8.3) zu einer Basis B . Dann gilt:

(i) Für beliebiges $\Delta c \in \mathbb{R}^n$ und zugehörige t gemäß (10.3) ist x^* für (10.1)_{primal} weiterhin ein optimaler Basisvektor, und $(\lambda(t), \mu(t))$ aus (10.2) ist ein optimaler Basisvektor für (10.1)_{dual}. Der gemeinsame Optimalwert beider Aufgaben ist $c^T x^* + t (\Delta c)^T x^*$.

(ii) Ist die rechte Grenze des Intervalls (10.3) echt positiv, dann ist die Optimalwertfunktion

$$c \mapsto \Phi(c) := \text{gemeinsamer Optimalwert von (8.1) und (8.3)}$$

an der Stelle c in Richtung Δc (einseitig) richtungsdiffbar, und die Richtungsableitung ist gegeben durch

$$\Phi'(c; \Delta c) = (\Delta c)^T x^*.$$

(iii) Ist μ^* nicht entartet, gilt also $\mu_N^* > 0$, dann ist die Optimalwertfunktion in einer offenen Kugel $B_r(c)$ von c linear mit

$$\Phi(c + \Delta c) = (c + \Delta c)^T x^* \quad \text{für } \Delta c \in B_r(0).$$

Damit ist Φ überall in dieser Kugel differenzierbar, und es gilt

$$\Phi'(c + \Delta c) \equiv (x^*)^T \quad \text{für } \Delta c \in B_r(0).$$

Beweis. **Aussage (i):** Diese Aussage haben wir durch Bestätigung der Optimalitätsbedingungen (8.6) bereits bewiesen.

Aussage (ii): Unter der genannten Voraussetzung ist $\Phi(c + t \Delta c)$ für hinreichend kleine $t > 0$ durch (10.4) gegeben. Für die Richtungsdiffbarkeit von Φ betrachten wir den Differenzenquotienten für solche t :

$$\frac{\Phi(c + t \Delta c) - \Phi(c)}{t} = \frac{c^T x^* + t (\Delta c)^T x^* - c^T x^*}{t} = (\Delta c)^T x^*,$$

also ist das auch der Wert im Grenzwert $t \searrow 0$, der Richtungsableitung $\Phi'(c; \Delta c)$.

Aussage (iii): Wenn μ^* nicht entartet ist, dann enthält das zulässige Intervall (10.3) für jede beliebige Richtung Δc immer ein offenes Intervall um die 0. Wir müssen aber zeigen, dass die Länge dieses Intervalls über alle Richtungen Δc konstanter Norm gleichmäßig von 0 weg beschränkt bleibt. Wir zeigen dazu, dass die Funktion, die die obere Intervallgrenze angibt,

$$\Delta c \mapsto \inf_{\substack{i \in N \\ \Delta \mu_i < 0}} \underbrace{\left\{ -\frac{\mu_i^*}{\Delta \mu_i} \right\}}_{\geq 0}, \quad (10.5)$$

auf der Einheitssphäre $\{\Delta c \in \mathbb{R}^n \mid \|\Delta c\| = 1\}$ gleichmäßig von 0 weg beschränkt ist. Das ist ausreichend, weil sich die untere Intervallgrenze durch den Übergang $\Delta c \rightsquigarrow -\Delta c$ ergibt.

Wegen (10.2) hängt $\Delta \mu_N$ linear (und damit stetig) von Δc ab:

$$\Delta \mu_N = \Delta c_N - A_N^T A_B^{-T} \Delta c_B.$$

Da die Sphäre kompakt ist, existiert für jede Komponente $i \in N$ von $\Delta \mu_N$ ein endliches

$$\beta_i := \max\{\Delta \mu_i = [\Delta c_N - A_N^T A_B^{-T} \Delta c_B]_i \mid \|\Delta c\| = 1\}.$$

Es gilt $\beta_i > 0$ für alle $i \in N$. (**Quizfrage 10.3:** Warum?) Wir setzen nun $\beta := \max\{\beta_i \mid i \in N\} > 0$ und $\alpha := \min\{\mu_i^* \mid i \in N\} > 0$.

Für beliebiges Δc aus der Einheitssphäre und das zugehörige $\Delta \mu$ gilt: Falls $\Delta \mu_N \geq 0$ ist, dann erhalten wir

$$\inf_{\substack{i \in N \\ \Delta \mu_i < 0}} \left\{ -\frac{\mu_i^*}{\Delta \mu_i} \right\} = \inf \emptyset = \infty.$$

Andernfalls gilt

$$\inf_{\substack{i \in N \\ \Delta \mu_i < 0}} \left\{ -\frac{\mu_i^*}{\Delta \mu_i} \right\} = \min_{\substack{i \in N \\ \Delta \mu_i < 0}} \left\{ -\frac{\mu_i^*}{\Delta \mu_i} \right\} \geq \frac{\min_{i \in N} \mu_i^*}{\max_{\substack{i \in N \\ \Delta \mu_i < 0}} \{-\Delta \mu_i\}} \geq \frac{\alpha}{\max_{\substack{i \in N \\ \Delta \mu_i < 0}} \{-\Delta \mu_i\}} \geq \frac{\alpha}{\beta} > 0.$$

Die letzte Ungleichung gilt, da wir jeden der im Nenner vorkommenden Werte mit $0 < -\Delta \mu_i \leq \beta_i \leq \beta$ abschätzen können und daher auch $\max\{-\Delta \mu_i \mid i \in N, \Delta \mu_i < 0\} \leq \beta$ gilt. Zusammenfassend bekommen wir also die gewünschte Aussage

$$\inf_{\|\Delta c\|=1} \inf_{\substack{i \in N \\ \Delta \mu_i < 0}} \left\{ -\frac{\mu_i^*}{\Delta \mu_i} \right\} \geq \frac{\alpha}{\beta} =: r > 0.$$

Daraus folgt, dass die Vereinigung der Menge aller zulässigen Störungen $t \Delta c$ die offene Kugel $B_r(c)$ enthält:

$$\bigcup_{\|\Delta c\|=1} \{t \Delta c \mid t \in I(\Delta c)\} \supseteq \bigcup_{\|\Delta c\|=1} \{t \Delta c \mid t \in (-r, r)\} = B_r(c).$$

Weiter folgt in Verbindung mit (10.4), dass für alle Kostenvektoren $c + \Delta c$ mit $\Delta c \in B_r(0)$ die Optimalwertfunktion die Gestalt $\Phi(c + \Delta c) = \Phi(c) + \Delta c^T x^* = (c + \Delta c)^T x^*$ hat. Die Differenzierbarkeit von Φ in $B_r(c)$ mit Ableitung $(x^*)^T$ ist eine unmittelbare Konsequenz. \square

ÄNDERUNGEN IN DER RECHTEN SEITE

Wir betrachten jetzt Änderungen in der rechten Seite b und bezeichnen mit $\Delta b \in \mathbb{R}^m$ eine entsprechende Änderungsrichtung. Das primal-duale Paar von Aufgaben hat nun die Gestalt

$$\left. \begin{array}{l} \text{Minimiere} \quad c^\top x \\ \text{sodass} \quad Ax = b + t \Delta b \\ \text{und} \quad x \geq 0 \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Maximiere} \quad (b + t \Delta b)^\top \lambda \\ \text{sodass} \quad A^\top \lambda + \mu = c \\ \text{und} \quad \mu \geq 0. \end{array} \right. \quad (10.6)$$

Dieses Mal ist (λ^*, μ^*) weiterhin dual zulässig, die primal zulässige Menge hat sich jedoch geändert. Wir unternehmen daher jetzt den Versuch, die primale Lösung aufzudatieren. Das Vorgehen ähnelt dem bei der Herleitung des primalen Simplex-Verfahrens in § 7. Durch die Basis B ist die primale Variable wie folgt festgelegt:

$$x_B(t) = x_B^* + t \Delta x_B \quad \text{mit} \quad \Delta x_B := A_B^{-1} \Delta b \quad (10.7a)$$

$$x_N(t) \equiv x_N^* = 0. \quad (10.7b)$$

Wann sind die auf diese Art und Weise erhaltenen Vektoren $x(t)$ und (λ^*, μ^*) optimal für (10.6)? Wir überprüfen dazu die Optimalitätsbedingungen (8.6). Die duale Zulässigkeit

$$A^\top \lambda^* + \mu^* = c, \quad \mu^* \geq 0$$

ist erfüllt, ebenso die Komplementaritätsbedingung:

$$\underbrace{(x_B(t))^\top \mu_B^*}_{=0} + \underbrace{(x_N(t))^\top \mu_N^*}_{=0} = 0.$$

Bzgl. der primalen Zulässigkeit ist die erste Bedingung

$$Ax(t) = A_B x_B(t) + A_N x_N(t) = A_B x_B^* + t A_B \Delta x_B + A_N x_N = A_B x_B^* + t A_B A_B^{-1} \Delta b + 0 = b + t \Delta b$$

nach Konstruktion von $x(t)$ erfüllt. Die Vorzeichenbedingung $x_B(t) \geq 0$ jedoch gilt nicht automatisch, sondern genau dann, wenn der Störungsparameter t der Bedingung

$$\sup_{\substack{i \in B \\ \Delta x_i > 0}} \underbrace{\left\{ -\frac{x_i^*}{\Delta x_i} \right\}}_{\leq 0} \leq t \leq \inf_{\substack{i \in B \\ \Delta x_i < 0}} \underbrace{\left\{ -\frac{x_i^*}{\Delta x_i} \right\}}_{\geq 0} \quad (10.8)$$

genügt.

Für diese t ist also tatsächlich (λ^*, μ^*) auch für die gestörten Probleme (10.6) weiterhin eine optimale Ecke. Der zugehörige Optimalwert lässt sich daher dieses Mal bequem aus der dualen Aufgabe ablesen:

$$d^*(t) = (b + t \Delta b)^\top \lambda^* = d^* + t \Delta b^\top \lambda^*. \quad (10.9)$$

Ende der Woche 7

Die Erkenntnisse fassen wir wie folgt zusammen:

Satz 10.2 (Sensitivitätssatz bei LP bei Änderungen in der rechten Seite).

Es seien x^* und (λ^*, μ^*) Lösungen der primalen Aufgabe (8.1) bzw. der dualen Aufgabe (8.3) zu einer Basis B . Dann gilt:

- (i) Für beliebiges $\Delta b \in \mathbb{R}^m$ und zugehörige t gemäß (10.8) ist (λ^*, μ^*) für (10.6)_{dual} weiterhin ein optimaler Basisvektor, und $x(t)$ aus (10.7) ist ein optimaler Basisvektor für (10.6)_{primal}. Der gemeinsame Optimalwert beider Aufgaben ist $b^\top \lambda^* + t (\Delta b)^\top \lambda^*$.
- (ii) Ist die rechte Grenze des Intervalls (10.8) echt positiv, dann ist die Optimalwertfunktion

$$b \mapsto \Psi(b) := \text{gemeinsamer Optimalwert von (8.1) und (8.3)}$$

an der Stelle b in Richtung Δb (einseitig) richtungsdiffbar, und die Richtungsableitung ist gegeben durch

$$\Psi'(b; \Delta b) = (\Delta b)^\top \lambda^*.$$

- (iii) Ist x^* nicht entartet, gilt also $x_B^* > 0$, dann ist die Optimalwertfunktion in einer offenen Kugel $B_r(b)$ von b linear mit

$$\Psi(b + \Delta b) = (b + \Delta b)^\top \lambda^* \quad \text{für } \Delta b \in B_r(0).$$

Damit ist Ψ überall in dieser Kugel differenzierbar, und es gilt

$$\Psi'(b + \Delta b) \equiv (\lambda^*)^\top \quad \text{für } \Delta b \in B_r(0).$$

Der Beweis erfolgt analog zum Beweis von Satz 10.1.

Bemerkung 10.3 (Zur Bedeutung der Komplementaritätsbedingung). Angenommen, x^* und (λ^*, μ^*) sind Lösungen der primalen Aufgabe (8.1) bzw. der dualen Aufgabe (8.3) zu einer Basis B , also optimale Ecken, wie sie mit dem primalen oder dem dualen Simplex-Verfahren berechnet werden. Stellt man fest, dass $\mu_i^* = 0$ ist, so bedeutet das, dass die Ungleichung $x_i^* \geq 0$ unwesentlich für die Lösung der primalen Aufgabe ist.

Kapitel 3 Konvexe Optimierung

§ 11 EINFÜHRUNG

Unser Ziel ist es auch in diesem Kapitel wieder, notwendige und hinreichende Optimalitätsbedingungen herzuleiten und grundlegende Verfahren für konvexe Optimierungsaufgaben kennenzulernen. Charakteristisch für die konvexe Optimierung wird das Zusammenspiel zwischen Eigenschaften konvexer Mengen und konvexer Funktionen sein.

Bemerkenswert dabei ist, welche starken topologischen bzw. analytischen Eigenschaften aus der Konvexität von Mengen bzw. Funktionen folgen, siehe z. B. [Satz 13.19](#).

§ 11.1 KONVEXE MENGEN

Literatur: [Geiger, Kanzow, 2002](#), Kapitel 2.1.1

Definition 11.1 (Konvexe Menge).

Eine Menge $C \subseteq \mathbb{R}^n$ heißt **konvex**, wenn mit $x, y \in C$ und $\alpha \in [0, 1]$ auch $\alpha x + (1 - \alpha)y \in C$ ist, also die gesamte Verbindungsstrecke von x und y .



Abbildung 11.1: Konvexe Mengen (blau) und eine nichtkonvexe Menge (rot) im \mathbb{R}^2 .

Beispiel 11.2 (Konvexe Mengen).

Wichtige konvexe Mengen sind:

- (i) offene Kugeln $B_\varepsilon(y) = \{x \in \mathbb{R}^n \mid \|x - y\| < \varepsilon\}$,

- (ii) abgeschlossene Kugeln $\overline{B_\varepsilon(y)} = \{x \in \mathbb{R}^n \mid \|x - y\| \leq \varepsilon\}$,
- (iii) Hyperebenen $H(a, \beta) = \{x \in \mathbb{R}^n \mid a^\top x = \beta\}$ mit $a \in \mathbb{R}^n$, $a \neq 0$ und $\beta \in \mathbb{R}$,
- (iv) offene Halbräume $\{x \in \mathbb{R}^n \mid a^\top x < \beta\}$,
- (v) abgeschlossene Halbräume $H^-(a, \beta) = \{x \in \mathbb{R}^n \mid a^\top x \leq \beta\}$ und $H^+(a, \beta) = \{x \in \mathbb{R}^n \mid a^\top x \geq \beta\}$,
- (vi) das Einheitssimplex im \mathbb{R}^n (siehe [Abbildung 11.2](#))

$$\Delta_n = \left\{ x \in \mathbb{R}^n \mid \sum_{i=1}^n x_i \leq 1, x_i \geq 0, i = 1, \dots, n \right\}.$$

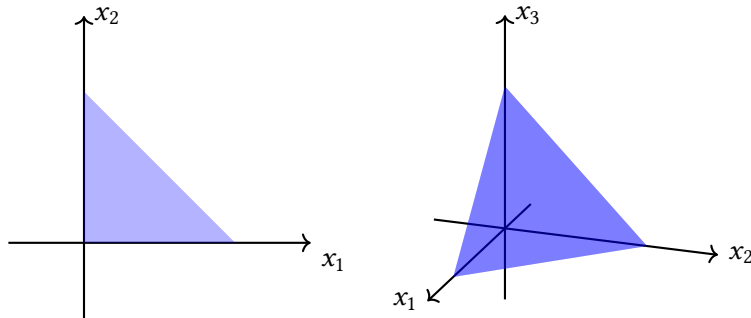


Abbildung 11.2: Einheitssimplizes im \mathbb{R}^2 und \mathbb{R}^3 .

Quizfrage 11.1: Was sind die konvexen Teilmengen von \mathbb{R} ?

Satz 11.3 (Operationen auf konvexen Mengen).

- (i) 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.
- (ii) 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 $\mathbb{R}^{n_1} \times \dots \times \mathbb{R}^{n_k}$.
- (iii) Es sei $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ eine (affin-)lineare Abbildung, also $f(x) = Ax + b$, und $C \subseteq \mathbb{R}^n$ und $D \subseteq \mathbb{R}^m$ konvexe Mengen. Dann sind das Bild $f(C) \subseteq \mathbb{R}^m$ und das Urbild $f^{-1}(D) \subseteq \mathbb{R}^n$ konvex.
- (iv) Sind $C_1, C_2 \subseteq \mathbb{R}^n$ konvex, dann sind

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

sowie die **Minkowski-Summe**

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

konvex. Insbesondere sind Verschiebungen (Translationen) konvexer Mengen, die sich ergeben, wenn man in der Minkowski-Summe $C_2 = \{x\}$ setzt, konvex. Man schreibt dann auch $C_1 + x$ statt $C_1 + \{x\}$.

Beachte: Eine Menge $C \subseteq \mathbb{R}^n$ ist genau dann konvex, wenn $\alpha C + (1 - \alpha) C \subseteq C$ für alle $\alpha \in [0, 1]$ gilt.

Beweis. Der Beweis ist Gegenstand von [Hausaufgabe 8.1](#). □

Quizfrage 11.2: Ist die Vereinigung konvexer Mengen wieder konvex?

Definition 11.4 (Konvexkombination).

- (i) $x \in \mathbb{R}^n$ heißt eine **Konvexkombination** von $x_1, \dots, x_m \in \mathbb{R}^n$, falls $x = \sum_{i=1}^m \alpha_i x_i$ gilt mit Koeffizienten $\alpha_i \geq 0$ und $\sum_{i=1}^m \alpha_i = 1$. Eine solche Konvexkombination heißt **echt**, wenn alle $\alpha_i > 0$ sind.
- (ii) Ist $M \subseteq \mathbb{R}^n$ irgendeine (nicht notwendigerweise endliche) Menge, so heißt x eine Konvexkombination von M , wenn x eine Konvexkombination von endlich vielen Vektoren $x_1, \dots, x_m \in M$ ist.

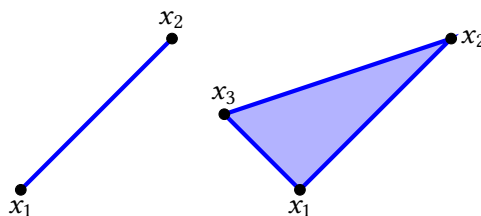


Abbildung 11.3: Konvexkombinationen von zwei und drei Punkten in \mathbb{R}^2 . Bei zwei Punkten kann man auch $\alpha x_1 + (1 - \alpha) x_2$ mit $\alpha \in [0, 1]$ schreiben.

Beachte: An dieser Stelle wird die Bemerkung nach [Definition 6.12](#) klar, dass die Ecken eines Polyeders P genau diejenigen Punkte von P sind, die sich nicht als echte Konvexkombination zweier verschiedener Elemente von P schreiben lassen.

Lemma 11.5 (Charakterisierung konvexer Mengen).

Eine Menge $M \subseteq \mathbb{R}^n$ ist genau dann konvex, wenn sie alle Konvexkombinationen von M enthält.

Beweis. „ \Rightarrow “: Es sei M konvex. Wir haben zu zeigen: Für $m \in \mathbb{N}$ und $x_1, \dots, x_m \in M$ sowie $\alpha_1, \dots, \alpha_m \geq 0$ mit $\sum_{i=1}^m \alpha_i = 1$ gilt: $x = \sum_{i=1}^m \alpha_i x_i \in M$. Wir verwenden dazu Induktion nach der Anzahl m der beteiligten Vektoren: Für $m = 1, 2$ ist die Behauptung erfüllt. (**Quizfrage 11.3:** Warum?) Es sei bereits gezeigt, dass M alle Konvexkombinationen von höchstens m Elementen enthält.

Schluss auf $m + 1$: Es seien $\alpha_i \geq 0$, $\sum_{i=1}^{m+1} \alpha_i = 1$ und $x = \sum_{i=1}^{m+1} \alpha_i x_i$. O. B. d. A. gelte $\alpha_{m+1} < 1$. (Ansonsten ist $x = x_{m+1}$ und nichts zu zeigen.) Setze $\beta_i := \frac{\alpha_i}{1 - \alpha_{m+1}}$ für $i = 1, \dots, m$. Dann ist $\beta_i \geq 0$ und $\sum_{i=1}^m \beta_i = 1$. Der Vektor $y := \sum_{i=1}^m \beta_i x_i$ gehört zu M , also auch die folgende Konvexkombination von y und x_{m+1} : $x = (1 - \alpha_{m+1}) y + \alpha_{m+1} x_{m+1}$.

„ \Leftarrow “: Es seien $x_1, x_2 \in M$. Nach Voraussetzung enthält M alle Konvexkombinationen $\alpha x_1 + (1 - \alpha) x_2$ mit $\alpha \in [0, 1]$, d. h., M ist nach Definition konvex. □

Definition 11.6 (Konvexe Hülle).

Es sei $M \subseteq \mathbb{R}^n$. Der Durchschnitt aller konvexen Teilmengen von \mathbb{R}^n , die M enthalten, also

$$\text{conv}(M) = \bigcap \{C \subseteq \mathbb{R}^n \mid C \text{ ist konvex und } M \subseteq C\}, \quad (11.1)$$

heißt die **konvexe Hülle** von M . $\text{conv}(M)$ ist also die kleinste konvexe Menge, die M enthält.

Beachte: Es gilt $\underbrace{M \subseteq \text{conv}(M)}_{\text{„Hülle“} \quad \text{konvex}}$, daher der Name **konvexe Hülle**.

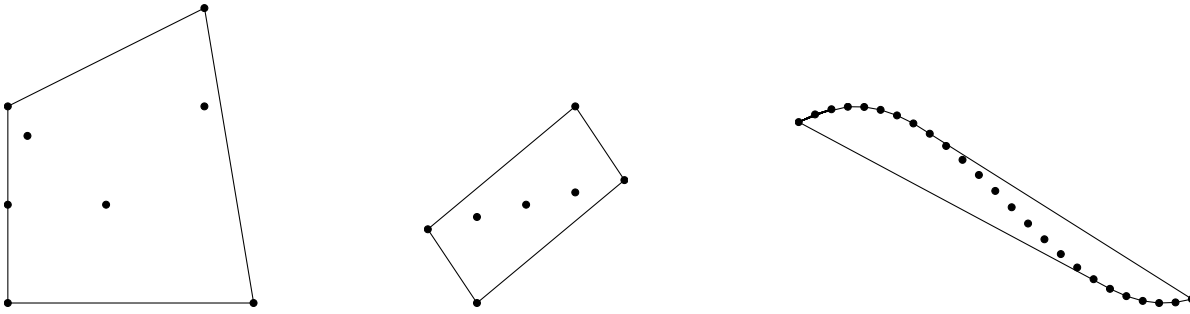


Abbildung 11.4: Konvexe Hüllen einiger Punktmengen in \mathbb{R}^2 .

Lemma 11.7 (Charakterisierung der konvexen Hülle).

Es sei $M \subseteq \mathbb{R}^n$. Dann gilt:

$$\text{conv}(M) = \text{Menge aller Konvexkombinationen von } M.$$

Beweis. Es sei C die Menge aller Konvexkombinationen von M . Natürlich gilt dann $M \subseteq C$. Im Fall $M = \emptyset$ ist nichts zu zeigen, weil dann auch $C = \emptyset$ ist. Wir gehen also jetzt von $M \neq \emptyset$ aus.

„ $\text{conv}(M) \subseteq C$ “: Wir zeigen: C ist konvex. Damit kommt diese Menge im Durchschnitt (11.1) vor, also gilt $\text{conv}(M) \subseteq C$.

Es seien $x, y \in C$, also gibt es Zahlen $m, \ell \in \mathbb{N}$ und $\beta_1, \dots, \beta_m \geq 0$ sowie $\gamma_1, \dots, \gamma_\ell \geq 0$ mit $\sum_{i=1}^m \beta_i = 1$ und $\sum_{j=1}^\ell \gamma_j = 1$, sodass $x = \sum_{i=1}^m \beta_i x_i$ und $y = \sum_{j=1}^\ell \gamma_j y_j$ gelten mit irgendwelchen $x_1, \dots, x_m \in M$ und $y_1, \dots, y_\ell \in M$. Es sei $\alpha \in [0, 1]$. Dann gilt

$$\alpha x + (1 - \alpha) y = \alpha \sum_{i=1}^m \beta_i x_i + (1 - \alpha) \sum_{j=1}^\ell \gamma_j y_j,$$

d. h., $\alpha x + (1 - \alpha) y$ ist Linearkombination der $\{x_i\}_{i=1}^m \cup \{y_j\}_{j=1}^\ell$. Die Koeffizienten sind ≥ 0 und ergeben in der Summe 1. Damit ist $\alpha x + (1 - \alpha) y \in C$, also C konvex.

„ $\text{conv}(M) \supseteq C$ “: Es sei $x \in C$, also eine Konvexkombination von M . Wegen $M \subseteq \text{conv}(M)$ ist x auch eine Konvexkombination von $\text{conv}(M)$. $\text{conv}(M)$ ist konvex, stimmt also nach Lemma 11.5 mit der Menge seiner Konvexkombinationen überein. Also ist $x \in \text{conv}(M)$. \square

Beachte: M ist konvex $\Leftrightarrow M = \text{conv}(M)$.

§ 11.2 KONVEXE FUNKTIONEN

Literatur: Geiger, Kanzow, 2002, Kapitel 2.1.2

Definition 11.8 (Konvexe Funktion).

Es sei $C \subseteq \mathbb{R}^n$ konvex. Eine Funktion $f: C \rightarrow \mathbb{R}$ heißt

(i) **konvex** (englisch: **convex**) auf C , falls

$$f(\alpha x + (1 - \alpha) y) \leq \alpha f(x) + (1 - \alpha) f(y) \quad (11.2)$$

für alle $x, y \in C$ und $\alpha \in [0, 1]$ gilt.

(ii) **strikt konvex** (englisch: **strictly convex**) auf C , falls

$$f(\alpha x + (1 - \alpha) y) < \alpha f(x) + (1 - \alpha) f(y) \quad (11.3)$$

für alle $x, y \in C$ mit $x \neq y$ und $\alpha \in (0, 1)$ gilt.

(iii) **μ -stark konvex** (englisch: **μ -strongly convex**) oder **stark konvex** mit Parameter $\mu > 0$ auf C , falls

$$f(\alpha x + (1 - \alpha) y) + \frac{\mu}{2} \alpha (1 - \alpha) \|x - y\|^2 \leq \alpha f(x) + (1 - \alpha) f(y) \quad (11.4)$$

für alle $x, y \in C$ und $\alpha \in [0, 1]$ gilt.

(iv) **konkav** (englisch: **concave**) bzw. **strikt konkav** bzw. **stark konkav** auf C , wenn $-f$ konvex bzw. strikt konvex bzw. stark konvex auf C ist.

Die Bedingung (11.2) können wir so lesen, dass der Funktionswert an einer Konvexkombination immer kleiner oder gleich der Konvexkombination der Funktionswerte ist. Anschaulich bedeutet (11.2) damit, dass der Funktionsgraph von f unterhalb aller Sehnen verläuft, siehe [Abbildung 11.5](#).

Beachte: Zur Definition einer konvexen Funktion gehört notwendigerweise auch eine *konvexe Definitionsmenge*.

Beachte: In Geiger, Kanzow, 1999, Definition 3.2 wird die Bedingung (iii) als **gleichmäßige Konvexität** (englisch: **uniform convexity**) bezeichnet. Das ist in der Literatur leider nicht einheitlich.

Quizfrage 11.4: Was hat die μ -starke Konvexität von f mit der Konvexität von $f(\cdot) - \frac{\mu}{2} \|\cdot\|^2$ zu tun?

Beachte: Für Funktionen $f: C \rightarrow \mathbb{R}$ wie in [Definition 11.8](#) gilt:

$$f \text{ stark konvex} \quad \Rightarrow \quad f \text{ strikt konvex} \quad \Rightarrow \quad f \text{ konvex.}$$

Beispiel 11.9 (Beispiele konvexer Funktionen).

(i) Die *affin-lineare Funktion* $f(x) = a^T x + \beta$ ist gleichzeitig konvex und konkav auf \mathbb{R}^n .

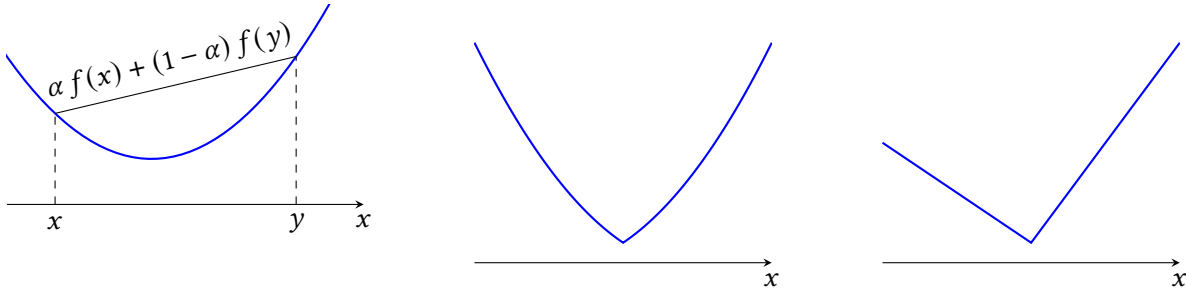


Abbildung 11.5: Beispiele strikt konvexer Funktionen (links und Mitte) und konvexe, aber nicht strikt konvexe Funktion (rechts) auf Intervallen in \mathbb{R} .

(ii) Die quadratische Funktion $f(x) = \frac{1}{2}x^T Q x + c^T x + \gamma$ mit symmetrischer Matrix $Q \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ist

- konvex $\Leftrightarrow Q$ ist positiv semidefinit,
- μ -stark konvex $\Leftrightarrow Q$ ist positiv definit mit kleinstem Eigenwert $\lambda_{\min}(Q) \geq \mu > 0$.

(iii) $f(x) = \|x - z\|$ mit $z \in \mathbb{R}^n$ ist konvex auf \mathbb{R}^n , aber nicht strikt konvex.

(iv) $f(x) = \|x - z\|^2$ mit $z \in \mathbb{R}^n$ ist stark konvex auf \mathbb{R}^n mit $\mu = 2$.

(v) $f(x) = \|x - z\|^4$ mit $z \in \mathbb{R}^n$ ist strikt konvex auf \mathbb{R}^n , aber nicht stark konvex.

(vi) $f(x) = \exp(x)$ ist strikt konvex auf \mathbb{R} , aber nicht stark konvex.

(vii) $f(x) = \exp(x)$ ist stark konvex auf jedem Intervall $[c, \infty)$ mit $c \in \mathbb{R}$.

(viii) $f(x) = \ln(x)$ ist strikt konkav auf $(0, \infty)$, aber nicht stark konkav.

Quizfrage 11.5: Gibt es außer affin-linearen Funktionen noch weitere Funktionen auf \mathbb{R}^n , die gleichzeitig konvex und konkav sind?

In der konvexen Optimierung ist es hilfreich, auch Funktionen zuzulassen, deren Funktionswerte in $\mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ liegen. Man spricht dann von **erweitert reellwertigen Funktionen**. In $\mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ gelten folgende Regeln:

- (i) $a + \infty = \infty + a = \infty$ für alle $a \in \mathbb{R}$ sowie für $a = \infty$.
- (ii) $a - \infty = -\infty + a = -\infty$ für alle $a \in \mathbb{R}$ sowie für $a = -\infty$.
- (iii) $a \infty = \infty a = \infty$ für alle $a > 0$ sowie für $a = \infty$.
- (iv) $a \infty = \infty a = -\infty$ für alle $a < 0$ sowie für $a = -\infty$.
- (v) $a(-\infty) = (-\infty)a = -\infty$ für alle $a > 0$ sowie für $a = \infty$.

- (vi) $a(-\infty) = (-\infty)a = \infty$ für alle $a < 0$ sowie für $a = -\infty$.
- (vii) $0\infty = \infty 0 = 0$ $(-\infty) = (-\infty)0 = 0$.
- (viii) $-\infty < a < \infty$ für alle $a \in \mathbb{R}$.
- (ix) $-\infty \leq a \leq \infty$ für alle $a \in \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$.

Die Kombinationen $\infty - \infty$ und $-\infty + \infty$ sind undefiniert und müssen vermieden werden.

Die Kommutativität und Assoziativität der Addition und der Multiplikation sowie das Distributivgesetz gelten auch in $\mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ weiter, sofern in den betreffenden Ausdrücken jeweils alle Terme definiert sind. Beispielsweise gilt $(2+1)\infty = 2\infty + 1\infty = \infty + \infty = \infty$. Beim Ausdruck $(-3+1)\infty = -2\infty = -\infty$ jedoch darf man das Distributivgesetz nicht anwenden, da $-\infty + \infty$ nicht erklärt ist.

Der Mehrwert erweitert reellwertiger Funktionen liegt in folgenden Überlegungen begründet:

- (1) Wir können jede reellwertige Funktion $f: M \rightarrow \mathbb{R}$, die auf einer Teilmenge $M \subseteq \mathbb{R}^n$ definiert ist, auf ganz \mathbb{R}^n fortsetzen, in dem wir $\bar{f}: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$ definieren als

$$\bar{f}(x) := \begin{cases} f(x) & \text{falls } x \in M, \\ \infty & \text{falls } x \notin M. \end{cases} \quad (11.5)$$

Daher haben wir es nur noch mit Funktionen zu tun, die auf ganz \mathbb{R}^n definiert sind.

- (2) Wir können die zulässige Menge einer Optimierungsaufgabe einfach dadurch in die Aufgabe einbauen, dass wir den Wert der Zielfunktion außerhalb der zulässigen Menge auf ∞ setzen. Dies gelingt einfach durch Addition einer Indikatorfunktion.

Definition 11.10 (Indikatorfunktion).

Es sei $M \subseteq \mathbb{R}^n$ irgendeine Menge. Die Funktion $I_M: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$, definiert durch

$$I_M(x) = \begin{cases} 0, & \text{falls } x \in M, \\ \infty, & \text{falls } x \notin M, \end{cases} \quad (11.6)$$

heißt die **Indikatorfunktion** (englisch: **indicator function**) von M .

Der Mehrwert von Funktionen, die auch den Wert $-\infty$ annehmen, wird bei den Richtungsableitungen in § 14.2 deutlich werden. In manchen Resultaten, etwa in Satz 11.17, wird dieser Fall auch ausgeschlossen.

Definition 11.11 (Eigentlicher Definitionsbereich, eigentliche Funktion).

Es sei $f: M \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ eine Funktion. Dann heißt

$$\text{dom } f := \{x \in M \mid f(x) < \infty\} \quad (11.7)$$

der **eigentliche Definitionsbereich** oder englisch: **(effective) domain** von f . Die Funktion f heißt **eigentlich** (englisch: **proper function**), wenn f nirgendwo den Wert $-\infty$ annimmt und f nicht identisch ∞ (also $\text{dom } f \neq \emptyset$) ist.

Beachte: Wenn f eine konvexe Funktion (also auch die Definitionsmenge M konvex) ist, dann ist $\text{dom } f$ konvex.

Wir erweitern jetzt die Definition 11.8 auf erweitert reellwertige Funktionen. Änderungen gegenüber Definition 11.8 sind farblich hervorgehoben. Insbesondere sind die Begriffe **strikte** und **starke Konvexität** nicht für beliebige erweitert reellwertige Funktionen sinnvoll. Die eigentlichen Funktionen sind aber eine geeignete Funktionenklasse dafür.

Definition 11.12 (Erweitert reellwertige konvexe Funktion).

Es sei $C \subseteq \mathbb{R}^n$ konvex.

(i) Eine Funktion $f: C \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ heißt **konvex** (englisch: **convex**) auf \mathbb{R}^n , falls

$$f(\alpha x + (1 - \alpha) y) \leq \alpha f(x) + (1 - \alpha) f(y) \quad (11.8)$$

gilt für alle $x, y \in C$ und $\alpha \in [0, 1]$, für die die rechte Seite definiert ist.

(ii) Eine **eigentliche** Funktion $f: C \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$ heißt **strikt konvex** auf \mathbb{R}^n , falls

$$f(\alpha x + (1 - \alpha) y) < \alpha f(x) + (1 - \alpha) f(y) \quad (11.9)$$

gilt für alle $x, y \in \text{dom } f \subseteq C$ mit $x \neq y$ und $\alpha \in (0, 1)$.

(iii) Eine **eigentliche** Funktion $f: C \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$ heißt **μ -stark konvex** oder **stark konvex** mit Parameter $\mu > 0$ auf C , falls

$$f(\alpha x + (1 - \alpha) y) + \frac{\mu}{2} \alpha (1 - \alpha) \|x - y\|^2 \leq \alpha f(x) + (1 - \alpha) f(y) \quad (11.10)$$

gilt für alle $x, y \in C$ und $\alpha \in [0, 1]$.

Beachte: Die rechte Seite in (11.8) ist genau dann nicht für alle $\alpha \in [0, 1]$ definiert, wenn $f(x) = \infty$ und $f(y) = -\infty$ gilt oder umgekehrt. In (11.9) und (11.10) ist das ausgeschlossen, da f eigentlich ist.

Quizfrage 11.6: Gilt für erweitert reellwertige, eigentliche Funktionen noch immer die Aussage „ f stark konvex $\Rightarrow f$ strikt konvex $\Rightarrow f$ konvex“?

Satz 11.13 (Konvexität der Erweiterung konvexer Funktionen).

(i) Es sei $C \subseteq \mathbb{R}^n$ konvex und $f: C \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ konvex. Dann ist die Fortsetzung $\bar{f}: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ auf \mathbb{R}^n konvex.

(ii) Es sei $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ konvex. Dann ist $\text{dom } f \subseteq \mathbb{R}^n$ konvex, und die Einschränkung $f|_{\text{dom } f}: \text{dom } f \rightarrow \mathbb{R} \cup \{-\infty\}$ ist auf $\text{dom } f$ konvex.

Beachte: Dieses Resultat zeigt, dass wir im Folgenden immer davon ausgehen können, dass eine konvexe Funktion auf ganz \mathbb{R}^n definiert ist. Wir werden daher auch nicht mehr zwischen f und \bar{f} unterscheiden.

Beweis. **Aussage (i):** Es sei $C \subseteq \mathbb{R}^n$ konvex und $f: C \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ konvex. Wir müssen zeigen:

$$\bar{f}(\alpha x + (1 - \alpha) y) \leq \alpha \bar{f}(x) + (1 - \alpha) \bar{f}(y) \quad (11.11)$$

für alle $x, y \in \mathbb{R}^n$ und alle $\alpha \in [0, 1]$, für die die rechte Seite definiert ist.

Falls $x, y \in C$ liegen, dann ist (11.11) nach Definition erfüllt, da \bar{f} auf der gesamten Verbindungsstrecke zwischen x und y mit f übereinstimmt.

Falls $x \notin C$ liegt, also $\bar{f}(x) = \infty$, und $y \in C$ gilt, dann ist die rechte Seite in (11.11) entweder gleich ∞ für alle $\alpha \in [0, 1]$ oder (im Fall $\bar{f}(y) = f(y) = -\infty$) nur für $\alpha \in \{0, 1\}$ definiert. In jedem Fall ist (11.11) erfüllt.

Dieselbe Argumentation ist natürlich gültig, wenn $y \notin C$ und $x \in C$ liegt.

Im Fall $x, y \notin C$ gilt $\bar{f}(x) = \bar{f}(y) = \infty$, daher ist (11.11) ebenfalls für alle $\alpha \in [0, 1]$ erfüllt.

Aussage (ii): Es sei $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ konvex, es gilt also

$$f(\alpha x + (1 - \alpha) y) \leq \alpha f(x) + (1 - \alpha) f(y) \quad (11.12)$$

für alle $x, y \in \mathbb{R}^n$ und alle $\alpha \in [0, 1]$, für die die rechte Seite definiert ist.

Wir zeigen zunächst, dass $\text{dom } f \subseteq \mathbb{R}^n$ konvex ist. Es seien dazu $x, y \in \text{dom } f$. Dann ist die rechte Seite in (11.12) für alle $\alpha \in [0, 1]$ definiert. (**Quizfrage 11.7:** Warum?) Aus (11.12) folgt

$$f(\alpha x + (1 - \alpha) y) \leq \underbrace{\alpha f(x)}_{< \infty} + \underbrace{(1 - \alpha) f(y)}_{< \infty} < \infty$$

für alle $\alpha \in [0, 1]$, sodass die linke Seite nicht ∞ ist. Also gehört $\alpha x + (1 - \alpha) y$ zu $\text{dom } f$. Dieselbe Ungleichung zeigt auch bereits, dass $f|_{\text{dom } f}: \text{dom } f \rightarrow \mathbb{R}$ wie behauptet konvex ist. \square

Folgerung 11.14 (Konvexität der Indikatorfunktion). *Die Indikatorfunktion $I_M: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$ einer Menge $M \subseteq \mathbb{R}^n$ ist genau dann konvex, wenn die Menge M konvex ist.*

Definition 11.15 (Epigraph). *Sei $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ eine Funktion, dann bezeichnet man die Menge aller Punkte, die auf oder über dem Graph der Funktion liegen als **Epigraph**:*

$$\text{epi } f := \left\{ \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R} \mid y \geq f(x) \right\}. \quad (11.13)$$

Beachte: Dann gilt $f(x) = \inf\{y \in \mathbb{R} \mid (x, y) \in \text{epi } f\}$.

Es gilt folgende wichtige Charakterisierung konvexer Funktionen:

Satz 11.16 (Epigraph-Charakterisierung konvexer Funktionen).

Eine Funktion $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ ist genau dann konvex, wenn ihr Epigraph eine konvexe Menge ist.

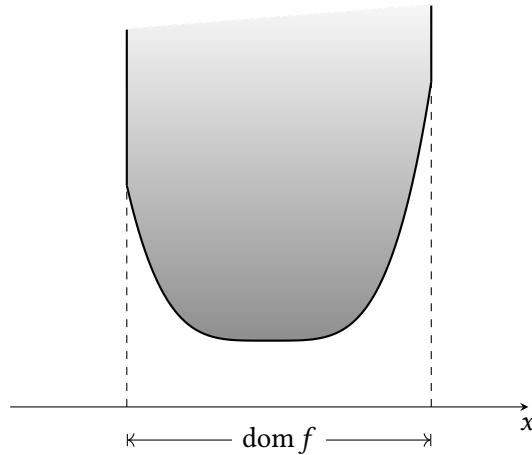


Abbildung 11.6: Epigraph einer Funktion $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$.

Beweis. Es sei zunächst f konvex, und es seien $\begin{pmatrix} x \\ \gamma \end{pmatrix}$ und $\begin{pmatrix} y \\ \delta \end{pmatrix}$ Punkte in $\text{epi } f$. Insbesondere ist also $f(x) < \infty$ und $f(y) < \infty$. Die Ungleichung (11.8) gilt also für alle $\alpha \in [0, 1]$, d. h.,

$$f(\alpha x + (1 - \alpha) y) \leq \alpha f(x) + (1 - \alpha) f(y) \leq \alpha \gamma + (1 - \alpha) \delta.$$

Das bedeutet aber

$$\begin{pmatrix} \alpha x + (1 - \alpha) y \\ \alpha \gamma + (1 - \alpha) \delta \end{pmatrix} = \alpha \begin{pmatrix} x \\ \gamma \end{pmatrix} + (1 - \alpha) \begin{pmatrix} y \\ \delta \end{pmatrix} \in \text{epi } f.$$

Also ist $\text{epi } f$ konvex.

Ende der Woche 8

Umgekehrt sei nun $\text{epi } f$ konvex und $x, y \in \mathbb{R}^n$. Wir müssen (11.8) für diejenigen $\alpha \in [0, 1]$ nachweisen, für die rechte Seite definiert ist.

Wir unterscheiden einige Fälle. Wenn $f(x)$ und $f(y)$ beide endlich sind, dann gehören $\begin{pmatrix} x \\ f(x) \end{pmatrix}$ und $\begin{pmatrix} y \\ f(y) \end{pmatrix}$ zu $\text{epi } f$. Die Konvexität von $\text{epi } f$ zeigt, dass auch $\alpha \begin{pmatrix} x \\ f(x) \end{pmatrix} + (1 - \alpha) \begin{pmatrix} y \\ f(y) \end{pmatrix}$ zu $\text{epi } f$ gehört, also gilt (11.8), was zu zeigen war.

Im Fall $f(x) = \infty$ und $f(y) > -\infty$ ist die Ungleichung (11.8) trivialerweise für alle $\alpha \in [0, 1]$ erfüllt. Dasselbe gilt im umgekehrten Fall $f(x) > -\infty$ und $f(y) = \infty$.

Es verbleiben drei Fälle. In einem davon ist $f(x) = -\infty$ und $f(y)$ endlich. Nach Voraussetzung gehört $\begin{pmatrix} x \\ \gamma \end{pmatrix}$ zu $\text{epi } f$ für jedes $\gamma \in \mathbb{R}$. Weiter sei $\begin{pmatrix} y \\ \delta \end{pmatrix}$ ebenfalls in $\text{epi } f$. Die Konvexität von $\text{epi } f$ impliziert, dass auch $\alpha \begin{pmatrix} x \\ \gamma \end{pmatrix} + (1 - \alpha) \begin{pmatrix} y \\ \delta \end{pmatrix}$ zu $\text{epi } f$ gehört, also gilt

$$f(\alpha x + (1 - \alpha) y) \leq \alpha \gamma + (1 - \alpha) \delta$$

für alle $\alpha \in [0, 1]$. Da $\gamma \in \mathbb{R}$ beliebig ist, folgt daraus

$$f(\alpha x + (1 - \alpha) y) = -\infty$$

für alle $\alpha \in (0, 1]$. Deshalb ist die Ungleichung (11.8) für alle diese α und auch für $\alpha = 0$ erfüllt.

Eine ähnliche Argumentation zeigt die Behauptung im Fall $f(x)$ endlich und $f(y) = -\infty$ sowie auch im Fall $f(x) = f(y) = -\infty$. \square

Satz 11.17 (Operationen auf konvexen Funktionen).

(i) 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 .

Beachte: Wir lassen hier nicht zu, dass eine der Funktionen f_i irgendwo den Wert $-\infty$ annimmt. Wegen der Summenbildung wäre sonst möglicherweise $f(x)$ nicht definiert.

(ii) 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 .

(iii) 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 .

(iv) 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.

Beachte: Aus Aussage (iv) folgt insbesondere, dass die Funktion g^2 konvex auf \mathbb{R}^n ist, wenn $g: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ konvex ist und $g(x) \geq 0$ gilt für alle $x \in \mathbb{R}^n$. (**Quizfrage 11.8:** Genaue Begründung?)

Beweis. Der Beweis ist Inhalt von [Hausaufgabe 8.4](#). \square

Im Folgenden wollen wir die Konvexität diffbarer Funktionen mit Hilfe der ersten und zweiten Ableitung charakterisieren. Natürlich impliziert die Diffbarkeit, dass die Funktionswerte endlich sind, daher gelten die Charakterisierungen in [Satz 11.18](#) und [Satz 11.19](#) nur für reellwertige konvexe Funktionen.

Satz 11.18 (Charakterisierung konvexer Funktionen mittels erster Ableitung).

Es sei $C \subseteq \mathbb{R}^n$ offen und konvex sowie $f: C \rightarrow \mathbb{R}$ diffbar. Dann gelten:

(a) Es sind äquivalent:

(i) f ist konvex auf C .

(ii) Für alle $x, y \in C$ gilt:

$$f(x) - f(y) \geq f'(y)(x - y). \quad (11.14)$$

(iii) Für alle $x, y \in C$ gilt:

$$(f'(x) - f'(y))(x - y) \geq 0. \quad (11.15)$$

Man sagt zu (11.15), die Ableitung f' sei auf C ein **monotoner Operator**.

(b) Es sind äquivalent:

(i) f ist strikt konvex auf C .

(ii) Für alle $x, y \in C$ mit $x \neq y$ gilt:

$$f(x) - f(y) > f'(y)(x - y). \quad (11.16)$$

(iii) Für alle $x, y \in C$ mit $x \neq y$ gilt:

$$(f'(x) - f'(y))(x - y) > 0. \quad (11.17)$$

Man sagt zu (11.17), die Ableitung f' sei auf C ein **strikt monotoner Operator**.

(c) Es sind äquivalent:

(i) f ist stark konvex auf C .

(ii) Es existiert $\mu > 0$, sodass für alle $x, y \in C$ gilt:

$$f(x) - f(y) \geq f'(y)(x - y) + \frac{\mu}{2} \|x - y\|^2. \quad (11.18)$$

(iii) Es existiert $\mu > 0$, sodass für alle $x, y \in C$ gilt:

$$(f'(x) - f'(y))(x - y) \geq \mu \|x - y\|^2. \quad (11.19)$$

Man sagt zu (11.19), die Ableitung f' sei auf C ein **stark monotoner Operator**.

Beachte: Nach Aussage (a) ist eine diffbare Funktion $f: C \rightarrow \mathbb{R}$ genau dann konvex, wenn der Graph oberhalb aller seiner Tangentialebenen

$$T(x; y) := f(y) + f'(y)(x - y) \quad (\text{Tangentialebene an } f \text{ im Punkt } y \in C)$$

verläuft, siehe Abbildung 11.7. Anders ausgedrückt: Eine diffbare Funktion ist genau dann konvex, wenn alle Taylormodelle erster Ordnung (Tangenten) die Funktion unterschätzen.

Beachte: Für konvexe C^2 -Funktionen konvergiert das lokale Newton-Verfahren der Optimierung § 5.3 sogar global.

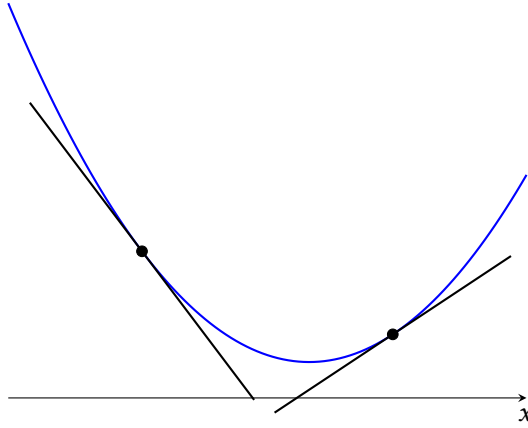


Abbildung 11.7: Charakterisierung der Konvexität diffbarer Funktionen über ihre Tangenten.

Beweis. Wir zeigen nur die **Aussage (c)** über die Charakterisierung der starken Konvexität. Die **Aussagen (a)** und **(b)** lassen sich analog beweisen.

(i) ⇒ (ii): Es sei f stark konvex auf C und $x, y \in C$, $\alpha \in [0, 1]$. Dann gilt

$$\begin{aligned} f(y + \alpha(x - y)) &= f(\alpha x + (1 - \alpha)y) \leq \alpha f(x) + (1 - \alpha)f(y) - \frac{\mu}{2} \alpha(1 - \alpha) \|x - y\|^2 \\ \Rightarrow \frac{f(y + \alpha(x - y)) - f(y)}{\alpha} &\leq f(x) - f(y) - \frac{\mu}{2} (1 - \alpha) \|x - y\|^2 \\ \Rightarrow f'(y)(x - y) &\leq f(x) - f(y) - \frac{\mu}{2} \|x - y\|^2 \quad (\text{Grenzübergang } \alpha \searrow 0), \end{aligned}$$

d. h., es gilt (11.18).

(ii) ⇒ (i): Es gelte (11.18), und es seien $x, y \in C$ und $\alpha \in [0, 1]$. Setze $z := \alpha x + (1 - \alpha)y$. Eine zweimalige Anwendung von (11.18) ergibt

$$\begin{aligned} f(x) - f(z) &\geq f'(z)(x - z) + \frac{\mu}{2} \|x - z\|^2, \\ f(y) - f(z) &\geq f'(z)(y - z) + \frac{\mu}{2} \|y - z\|^2. \end{aligned}$$

Wir multiplizieren die erste Ungleichung mit α , die zweite mit $(1 - \alpha)$ und addieren:

$$\alpha f(x) + (1 - \alpha)f(y) - f(z) \geq \underbrace{\alpha f'(z)x + (1 - \alpha)f'(z)y - f'(z)z}_{=0 \text{ nach Definition von } z} + \underbrace{\frac{\mu}{2} \alpha \|x - z\|^2 + \frac{\mu}{2} (1 - \alpha) \|y - z\|^2}_{=\frac{\mu}{2} \alpha(1 - \alpha) \|x - y\|^2 \text{ (nachrechnen)}}.$$

Durch Einsetzen von $z = \alpha x + (1 - \alpha)y$ folgt schließlich

$$\alpha f(x) + (1 - \alpha)f(y) - f(\alpha x + (1 - \alpha)y) \geq \frac{\mu}{2} \alpha(1 - \alpha) \|x - y\|^2,$$

d. h., f ist stark konvex.

(ii) \Rightarrow (iii): Es seien $x, y \in C$. Eine zweimalige Anwendung von (11.18) ergibt

$$\begin{aligned} f(x) - f(y) &\geq f'(y)(x - y) + \frac{\mu}{2} \|x - y\|^2, \\ f(y) - f(x) &\geq f'(x)(y - x) + \frac{\mu}{2} \|x - y\|^2, \end{aligned}$$

und aus der Addition der Ungleichungen folgt (11.19).

(iii) \Rightarrow (ii): Es seien $x, y \in C$. Wir betrachten die Funktion $t \mapsto D(t) := f(y + t(x - y))$ und deren Ableitung $t \mapsto d(t) := f'(y + t(x - y))^T(x - y)$ auf $[0, 1]$. Wir zeigen zunächst, dass d auf $[0, 1]$ stark monoton ist. Es seien dazu $s, t \in [0, 1]$ beliebig. Dann ist

$$\begin{aligned} (d(t) - d(s))(t - s) &= [f'(y + t(x - y))^T(x - y) - f'(y + s(x - y))^T(x - y)](t - s) \\ &= [f'(y + t(x - y)) - f'(y + s(x - y))]^T(t - s)(x - y) \\ &\geq \mu \|(t - s)(x - y)\|^2 \quad \text{wegen (11.19)} \\ &= \mu \|x - y\|^2 |t - s|^2. \end{aligned}$$

Da monotone Funktionen Riemann-integrierbar sind (Heuser, 2003, Satz 83.3), ist der Hauptsatz der Differential- und Integralrechnung (siehe etwa Heuser, 2003, Satz 79.1) anwendbar, und es folgt

$$D(1) - D(0) = \int_0^1 d(t) \, dt.$$

Daher gilt weiter

$$\begin{aligned} D(1) - D(0) - d(0) &= \int_0^1 [d(t) - d(0)] \, dt \\ &= \int_0^1 \frac{1}{t} [d(t) - d(0)] (t - 0) \, dt \\ &\geq \mu \|x - y\|^2 \int_0^1 t \, dt \\ &= \frac{\mu}{2} \|x - y\|^2. \end{aligned}$$

Das Einsetzen der Definitionen von D und d ergibt schließlich

$$f(x) - f(y) - f'(y)(x - y) \geq \frac{\mu}{2} \|x - y\|^2,$$

also (11.18). □

Satz 11.19 (Charakterisierung konvexer Funktionen mittels zweiter Ableitungen).

Es sei $C \subseteq \mathbb{R}^n$ offen und konvex sowie $f: C \rightarrow \mathbb{R}$ zweimal diffbar. Dann gelten:

(a) Es sind äquivalent:

(i) f ist konvex auf C .

(ii) $f''(x)$ ist positiv semidefinit (hat nur nicht-negative Eigenwerte) für alle $x \in C$.

(b) Ist $f''(x)$ positiv definit für alle $x \in C$, so ist f strikt konvex auf C .

(c) Es sind äquivalent:

(i) f ist stark konvex auf C mit Konstante $\mu > 0$.

(ii) Der kleinste Eigenwert von $f''(x)$ erfüllt $\lambda_{\min}(f''(x)) \geq \mu > 0$ für alle $x \in C$.

Beachte: Die Umkehrung von Aussage (b) gilt nicht, wie das Beispiel $f(x) = x^4$ zeigt. Diese Funktion ist strikt konvex auf \mathbb{R} , aber $f''(0) = 0$ ist nur semidefinit.

Beweis. Wir beweisen zuerst Aussage (c).

(i) \Rightarrow (ii): Es sei f stark konvex auf C mit Konstante $\mu > 0$. Nach Satz 11.18 (c) ist f' dann stark monoton auf C , erfüllt also (11.19). Für beliebiges $x \in C$ und $d \in \mathbb{R}^n$ ist daher

$$\begin{aligned} d^T f''(x) d &= \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f'(x + td) - f'(x)}{t} d \\ &= \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f'(x + td) - f'(x)}{t^2} (td) \\ &\geq \lim_{t \rightarrow 0} \frac{1}{t^2} \mu \|td\|^2 \quad \text{wegen (11.19)} \\ &= \mu \|d\|^2. \end{aligned}$$

Daraus folgt, dass $\lambda_{\min}(f''(x)) \geq \mu$ ist.

(ii) \Rightarrow (i): Es gelte nun umgekehrt $\lambda_{\min}(f''(x)) \geq \mu > 0$ für alle $x \in C$. Es seien $x, y \in C$ beliebig. Die Funktion $D(t) = f'(y + t(x - y))(x - y)$ ist diffbar und monoton wachsend in $t \in [0, 1]$, da ihre Ableitung $d(t) = (x - y)^T f''(y + t(x - y))(x - y)$ auf $[0, 1]$ nach Voraussetzung nichtnegativ ist.

Aus dem Hauptsatz der Differential- und Integralrechnung, angewendet auf die Funktion D und ihre Ableitung d , folgt

$$D(1) - D(0) = \int_0^1 d(t) dt,$$

also

$$\begin{aligned} [f'(x) - f'(y)](x - y) &= \int_0^1 (x - y)^T f''(y + t(x - y))(x - y) dt \\ &\geq \mu \int_0^1 \|x - y\|^2 dt \\ &= \mu \|x - y\|^2. \end{aligned}$$

Das heißt, f' ist stark monoton, und nach Satz 11.18 (c) ist f stark konvex.

Der Beweis von Aussage (a) erfolgt genau auf die gleiche Weise mit $\mu = 0$. Zum Beweis von Aussage (b) nehmen wir an, dass $f''(x)$ für alle $x \in C$ positiv definit ist. Es seien $x, y \in C$, $x \neq y$, und wir setzen D

und d wie oben. Dann ist $d(t) > 0$ für alle $t \in [0, 1]$. Wieder mit dem Hauptsatz der Differential- und Integralrechnung folgt

$$[f'(x) - f'(y)](x - y) = \int_0^1 (x - y)^T f''(y + t(x - y))(x - y) dt > 0.$$

Das heißt, f' ist strikt monoton, und aus Satz 11.18 (b) folgt die strikte Konvexität von f auf C . \square

§ 12 KONVEXE OPTIMIERUNGSAUFGABEN

Wir betrachten die **konvexe Optimierungsaufgabe**

$$\text{Minimiere } f(x) \text{ über } x \in \mathbb{R}^n \quad (12.1)$$

mit konvexer Zielfunktion $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$. Diese Problemklasse enthält insbesondere Aufgaben der Form

$$\text{Minimiere } g(x) \text{ über } x \in C, \quad (12.2)$$

wobei die zulässige Menge $C \subseteq \mathbb{R}^n$ konvex und $g: C \rightarrow \mathbb{R}$ eine konvexe reellwertige Funktion ist. Setzen wir dann $f := g + I_C$ mit der Indikatorfunktion I_C von C , setzen also g durch den Wert ∞ außerhalb von C fort, so ergibt sich eine Aufgabe der Form (12.1). Formal handelt es sich bei (12.1) um eine unrestringierte Optimierungsaufgabe, die jedoch implizit die Nebenbedingung $x \in C = \text{dom } f$ enthält. Beispiele für (12.1) sind sämtliche linearen Optimierungsaufgaben aus Kapitel 2, nicht notwendigerweise in Normalform. Weitere Beispiele folgen.

Die Grundbegriffe aus Definition 1.1 gelten i. W. auch für Aufgaben mit erweitert reellwertigen Zielfunktionen weiter. Wir wiederholen sie hier jedoch der Klarheit wegen.

Definition 12.1 (Grundbegriffe für die konvexe Optimierung).

(i) Der Wert

$$f^* := \inf \{f(x) \mid x \in \mathbb{R}^n\}$$

heißt der **Infimalwert** der Aufgabe (12.1).

(ii) Ein Punkt $x^* \in \text{dom } f$ heißt ein **globaler Minimierer**, **globale Minimalstelle** oder **global optimale Lösung**, wenn gilt:

$$f(x^*) \leq f(x) \text{ für alle } x \in \mathbb{R}^n.$$

Äquivalent dazu ist: $f(x^*) = f^*$. In diesem Fall heißt die Zahl f^* dann auch das **globale Minimum** oder der **globale Minimalwert** von (12.1).

(iii) Ein Punkt $x^* \in \text{dom } f$ heißt ein **lokaler Minimierer**, **lokale Minimalstelle** oder **lokal optimale Lösung**, wenn es eine Umgebung $U(x^*)$ gibt, sodass gilt:

$$f(x^*) \leq f(x) \text{ für alle } x \in U(x^*).$$

In diesem Fall heißt $f(x^*)$ dann auch ein **lokales Minimum** oder ein **lokaler Minimalwert** von (12.1).

Beachte: Wenn der Infimalwert f^* endlich ist, nennen wir ihn auch **Optimalwert**.

Beachte: Dem Begriff des lokalen und globalen Minimierers haben wir die Bedingung $x^* \in \text{dom } f$ hinzugefügt. Der Funktionswert dort darf also nicht ∞ sein. Das erfolgt vor dem Hintergrund, dass wir bei der Formulierung von (12.2) in der Form (12.1) den Funktionswert $f(x) = \infty$ ja gerade als Kennzeichen dafür verwenden, dass der zugehörige Punkt x unzulässig war.

Der Optimalwert f^* der Aufgabe (12.1) ist wieder entweder $f^* = -\infty$, oder f^* ist endlich, oder es gilt $f^* = \infty$. Letzteres ist genau dann der Fall, wenn $f \equiv \infty$ ist, also $\text{dom } f = \emptyset$ gilt. Diesen Fall werden wir aber im Folgenden oft ausschließen, ebenso wie den Fall, dass f den Wert $-\infty$ annimmt. Mit anderen Worten: Wir werden oft annehmen, dass f eine eigentliche Funktion ist.

Die fundamentale Bedeutung der Konvexität in der Optimierung erläutert der folgende Satz.

Satz 12.2 (Hauptsatz der konvexen Optimierung).

- (i) Jeder lokale Minimierer von (12.1) ist bereits ein globaler Minimierer.
- (ii) Die Lösungsmenge von (12.1) ist konvex (evtl. leer).
- (iii) Ist f eigentlich und strikt konvex auf \mathbb{R}^n , so besitzt (12.1) höchstens eine Lösung.

Beachte: Wir brauchen also in der konvexen Optimierung nicht zwischen lokalen und globalen Minimierern zu unterscheiden!

Beweis. Aussage (i): Es sei x^* lokaler Minimierer, d. h., es gilt $f(x^*) < \infty$, und es existiert eine Umgebung $U(x^*)$ mit $f(x^*) \leq f(x)$ für alle $x \in U(x^*)$, vgl. Definition 12.1. Im Fall $f(x^*) = -\infty$ ist x^* zweifelsohne auch ein globaler Minimierer. Wir nehmen also nun an, dass $f(x^*)$ endlich ist. Angenommen, es gäbe ein $\hat{x} \in \mathbb{R}^n$ mit $f(\hat{x}) < f(x^*)$. Für $\alpha \in (0, 1]$ gilt dann

$$f(\alpha \hat{x} + (1 - \alpha) x^*) \leq \alpha f(\hat{x}) + (1 - \alpha) f(x^*) < f(x^*),$$

wobei alle Terme wohldefiniert sind. Für α hinreichend klein liegt aber $\alpha \hat{x} + (1 - \alpha) x^* \in U(x^*)$, im Widerspruch zur lokalen Optimalität von x^* . Also kann ein solches \hat{x} nicht existieren, d. h., es ist

$$f(x^*) \leq f(x) \quad \text{für alle } x \in \mathbb{R}^n.$$

Aussage (ii): Es seien x^* und x^{**} Lösungen von (12.1), also $f(x^*) = f(x^{**}) = f^*$ (Optimalwert). Für $\alpha \in [0, 1]$ gilt

$$f(\alpha x^* + (1 - \alpha) x^{**}) \leq \alpha f(x^*) + (1 - \alpha) f(x^{**}) = f^*.$$

Das zeigt, dass auch $\alpha x^* + (1 - \alpha) x^{**}$ ein Minimierer von (12.1) ist.

Aussage (iii): Es seien x^* und x^{**} zwei verschiedene Minimierer von (12.1), insbesondere gilt $x^*, x^{**} \in \text{dom } f$. Da f eigentlich ist, haben wir außerdem $f(x^*) = f(x^{**}) = f^* \in \mathbb{R}$ (also nicht $-\infty$). Die Konvexkombination $(x^* + x^{**})/2$ liegt ebenfalls in $\text{dom } f$, daher folgt aus der strikten Konvexität (11.9)

$$f\left(\frac{x^* + x^{**}}{2}\right) < \frac{1}{2}f(x^*) + \frac{1}{2}f(x^{**}) = f^*,$$

im Widerspruch zur Optimalität von x^* und x^{**} . □

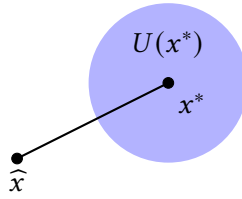


Abbildung 12.1: Illustration zum Beweis von Satz 12.2 (i) (lokale Minimierer sind globale Minimierer).

§ 13 TRENNUNGSSÄTZE FÜR KONVEXE MENGEN

Die Trennung zweier konvexer Mengen mittels einer Hyperebene sind ein zentrales Hilfsmittel in der konvexen Analysis und damit auch in der konvexen Optimierung. Nach einigen Vorbereitungen zu den topologischen Eigenschaften konvexer Mengen folgen der Trennungssatz 13.26, der eigentliche Trennungssatz 13.30 und der strikte Trennungssatz 13.32 in § 13.4.

§ 13.1 DIE AUFGABE DER ORTHOGONALEN PROJEKTION

Literatur: Geiger, Kanzow, 2002, Kapitel 2.1.3

Das folgende Beispiel führt eine der wichtigsten konvexen Optimierungsaufgaben ein.

Beispiel 13.1 (Projektionsaufgabe). Zu einer nichtleeren, abgeschlossenen, konvexen Menge $C \subseteq \mathbb{R}^n$ und einem gegebenen Punkt $p \in \mathbb{R}^n$ suchen wir denjenigen Punkt $x \in C$, der p am nächsten liegt, also die **orthogonale Projektion** von p auf C (bzgl. des Euklidischen Skalarprodukts), kurz: $\text{proj}_C(p)$. Als Optimierungsaufgabe können wir dies in der Form

$$\text{Minimiere } f(x) := \|x - p\| + I_C(x) \quad \text{über } x \in \mathbb{R}^n \quad (13.1)$$

oder auch als (vgl. Hausaufgabe 1.4)

$$\text{Minimiere } g(x) := \frac{1}{2} \|x - p\|^2 + I_C(x) \quad \text{über } x \in \mathbb{R}^n \quad (13.2)$$

schreiben. Beide Zielfunktionen in (13.1) und (13.2) sind eigentlich (**Quizfrage 13.1:** Warum?).

Lemma 13.2 (Projektionsaufgabe: Existenz und Eindeutigkeit).

Es sei $C \subseteq \mathbb{R}^n$ nichtleer, abgeschlossen und konvex. Für jedes $p \in \mathbb{R}^n$ besitzen (13.1) und (13.2) dieselbe eindeutige Lösung x^* .

Beweis. Es sei $p \in \mathbb{R}^n$. Wir betrachten zunächst (13.2). Um die Existenz einer Lösung zu zeigen, führen wir eine Hilfsaufgabe ein. Dazu wählen wir ein $w \in C$ beliebig und definieren B als die kompakte Kugel

$$B := \overline{B_r(p)} \quad \text{mit } r := \|p - w\|.$$

Die Hilfsaufgabe lautet

$$\begin{aligned} &\text{Minimiere} \quad \frac{1}{2} \|x - p\|^2 \quad \text{über } x \in \mathbb{R}^n \\ &\text{unter} \quad x \in C \cap B. \end{aligned} \tag{13.3}$$

Ein Punkt $x^* \in C$ ist genau dann ein globaler Minimierer von (13.2), wenn er ein globaler Minimierer von (13.3) ist (**Quizfrage 13.2:** Warum?). Die zulässige Menge von (13.3) ist nicht leer (denn sie enthält den Punkt w) und als Schnitt der abgeschlossenen Menge C mit der kompakten Menge B wieder kompakt. Nach dem Satz von Weierstraß bzw. Satz 1.5 besitzt (13.3) und damit (13.2) einen globalen Minimierer x^* . Die Eindeutigkeit des globalen Minimierers von (13.2) folgt aus der strikten Konvexität von g mit Satz 12.2 (iii).

Mit Hilfe von Hausaufgabe 1.4 und der strikten Monotonie der Wurzelfunktion auf $\mathbb{R}_{\geq 0}$ kann gezeigt werden, dass jeder lokale Minimierer von (13.2) auch ein lokaler Minimierer von (13.1) ist und umgekehrt. Da beide Aufgaben konvex sind, sind lokale Minimierer bereits globale Minimierer. Damit besitzen (13.1) und (13.2) denselben eindeutigen globalen Minimierer $x^* = \text{proj}_C(p)$. \square

Ende der Woche 9

Satz 13.3 (Projektionssatz: notwendige und hinreichende Bedingungen für (13.2)).

Es sei $C \subseteq \mathbb{R}^n$ nichtleer, abgeschlossen und konvex und $p \in \mathbb{R}^n$. Es gilt $x^* = \text{proj}_C(p)$ genau dann, wenn $x^* \in C$ ist und gilt:

$$(x^* - p)^\top (x - x^*) \geq 0 \quad \text{für alle } x \in C. \tag{13.4}$$

Beachte: (13.4) ist eine **Variationsungleichung**. Sie besagt, dass der Winkel zwischen $x^* - p$ und $x - x^*$ 90° nicht übersteigen darf. Anders ausgedrückt: C ist enthalten im Halbraum $H^+(a, \beta) = \{x \in \mathbb{R}^n \mid a^\top x \geq \beta\}$ mit Normalenvektor $a = x^* - p$ und $\beta = a^\top x^*$, vgl. Abbildung 13.1.

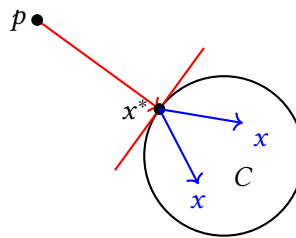


Abbildung 13.1: Der Winkel zwischen $x^* - p$ und $x - x^*$ darf 90° nicht übersteigen.

Beweis. Wir definieren wie in (13.1) und (13.2) die Funktionen

$$f(x) := \|x - p\| + I_C(x) \quad \text{und} \quad g(x) := \frac{1}{2} \|x - p\|^2 + I_C(x).$$

„ \Rightarrow “: Es sei $x^* = \text{proj}_C(p)$, also insbesondere $x^* \in C$. Dann gilt $x^* + \alpha(x - x^*) \in C$ für alle $x \in C$ und $\alpha \in [0, 1]$. Aus der Optimalität von x^* folgt

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \|x^* - p\|^2 = g(x^*) &\leq g(x^* + \alpha(x - x^*)) = \frac{1}{2} \|(x^* - p) + \alpha(x - x^*)\|^2 \\ \Rightarrow 0 &\leq \alpha(x^* - p)^\top(x - x^*) + \frac{\alpha^2}{2} \|x - x^*\|^2. \end{aligned}$$

Division durch α und Grenzübergang $\alpha \searrow 0$ liefern die Behauptung (13.4).

„ \Leftarrow “: Es gelte $x^* \in C$ und (13.4). Daraus folgt

$$\begin{aligned} 0 &\geq (p - x^*)^\top(x - x^*) \quad \text{für alle } x \in C \\ &= (p - x^*)^\top(x - p + p - x^*) \\ &= (p - x^*)^\top(x - p) + \|p - x^*\|^2 \\ &\geq -\|p - x^*\| \|x - p\| + \|p - x^*\|^2 \quad (\text{Cauchy-Schwarz}). \end{aligned}$$

Daraus folgt weiter $f(x) = \|x - p\| \geq \|p - x^*\| = f(x^*)$ für alle $x \in C$, d. h., $x^* = \text{proj}_C(p)$. □

§ 13.2 AFFINE UNTERRÄUME

Definition 13.4 (Affiner Unterraum). Eine Menge $A \subseteq \mathbb{R}^n$ heißt ein **affiner Unterraum** (englisch: **affine subspace**) von \mathbb{R}^n , wenn mit $x, y \in A$ und $\alpha \in \mathbb{R}$ auch $\alpha x + (1 - \alpha)y \in A$ liegt, also die gesamte Verbindungsgerade durch x und y .

Lemma 13.5 (Struktur affiner Unterräume). Eine Menge $A \subseteq \mathbb{R}^n$ ist genau dann ein affiner Unterraum von \mathbb{R}^n , wenn es einen Unterraum $U \subseteq \mathbb{R}^n$ und einen Vektor $x_0 \in \mathbb{R}^n$ gibt, sodass gilt:

$$A = U + x_0. \tag{13.5}$$

In diesem Fall gilt (13.5) für jedes $x_0 \in A$, und U ist unabhängig von der Wahl von x_0 .

Beachte: Der zu einem affinen Unterraum A gehörende Unterraum U heißt auch der **Richtungsraum** von A . Ein affiner Unterraum ist nach (13.5) also ein „verschobener“ Unterraum, siehe Abbildung 13.2.

Beweis. „ \Leftarrow “: Es sei A eine Menge von der Form (13.5). Weiter seien $x_1, x_2 \in A$, also $x_1 = u_1 + x_0$ und $x_2 = u_2 + x_0$ mit $u_1, u_2 \in U$. Schließlich sei $\alpha \in \mathbb{R}$. Dann ist auch

$$\alpha x_1 + (1 - \alpha)x_2 = \alpha(u_1 + x_0) + (1 - \alpha)(u_2 + x_0) = \underbrace{\alpha u_1 + (1 - \alpha)u_2}_{\in U} + x_0$$

von der Form (13.5).

„ \Rightarrow “: Es sei A ein affiner Unterraum und $x_0 \in A$ beliebig, aber fest. Definiere $U := \{x - x_0 \mid x \in A\}$. Nach Konstruktion gilt dann $A = U + x_0$. Wir müssen zeigen: U ist ein Unterraum von \mathbb{R}^n . Es seien

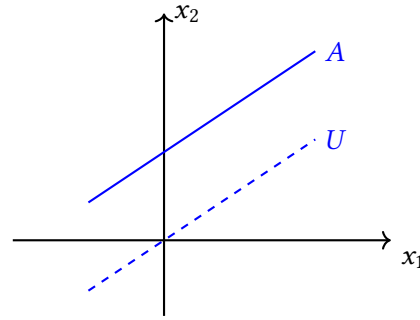


Abbildung 13.2: Ein 1-dimensionaler affiner Unterraum A von \mathbb{R}^2 . Der zugehörige Richtungsraum U ist gestrichelt gezeichnet.

dazu $u_1 = x_1 - x_0$ und $u_2 = x_2 - x_0$ Elemente von U mit irgendwelchen $x_1, x_2 \in A$. Dann sind $2x_1 + (1-2)x_0 = 2x_1 - x_0 \in A$ und $2x_2 + (1-2)x_0 = 2x_2 - x_0 \in A$ und daher

$$\begin{aligned}
 u_1 + u_2 &= x_1 - x_0 + x_2 - x_0 \\
 &= \overbrace{\frac{1}{2}(2x_1 - x_0) + \left(1 - \frac{1}{2}\right)(2x_2 - x_0)}^{\in A} - x_0 \in A - x_0.
 \end{aligned} \tag{13.6}$$

Das zeigt $u_1 + u_2 \in U$, also $U + U \subseteq U$. Weiterhin sei $\beta \in \mathbb{R}$, dann gilt

$$\begin{aligned}
 \beta u_1 &= \beta(x_1 - x_0) \\
 &= \underbrace{\beta x_1 + (1 - \beta)x_0}_{\in A} - x_0.
 \end{aligned}$$

Das zeigt $\beta u_1 \in U$, also $\beta U \subseteq U$. Damit ist U ein Unterraum.

Der Beweis der letzten Implikation zeigt auch, dass (13.5) für jedes beliebige $x_0 \in A$ mit einem Unterraum der Form $\{x - x_0 \mid x \in A\}$ gilt. Es bleibt also lediglich zu zeigen, dass die Mengen $\{x - x_0 \mid x \in A\}$ und $\{x - \tilde{x}_0 \mid x \in A\}$ für beliebige $x_0, \tilde{x}_0 \in A$ übereinstimmen. Es seien dafür $x, x_0, \tilde{x}_0 \in A$. Wir schreiben $x - x_0 = x - x_0 + \tilde{x}_0 - \tilde{x}_0$, und weil

$$x - x_0 + \tilde{x}_0 = \underbrace{x - x_0 + \tilde{x}_0 - x_0}_{\in \{x - x_0 \mid x \in A\}} + x_0 \in A,$$

ist der Unterraum U unabhängig vom gewählten Aufpunkt x_0 . □

Wir ordnen einem affinen Unterraum A die **Dimension** $\dim A := \dim U$ zu. Aus technischen Gründen ist es günstig, den Fall zuzulassen, bei dem $A = \emptyset$ ist damit auch $U = \emptyset$ ist. In diesem Fall setzen wir $\dim A := \dim U = -1$.

Quizfrage 13.3: Welche Gestalt hat A im Fall $\dim A = 0$?

Definition 13.6 (Affine Unabhängigkeit, Affinkombination).

- (i) Eine Menge von Vektoren $\{x_0, x_1, \dots, x_k\}$ in \mathbb{R}^n , $k \in \mathbb{N}_0$, heißt **affin unabhängig** (englisch: **affine independent**), wenn die Vektoren $x_1 - x_0, \dots, x_k - x_0$ linear unabhängig sind.¹
- (ii) Eine maximale Menge affin unabhängiger Vektoren eines affinen Unterraumes A von \mathbb{R}^n heißt eine **affine Basis** von A .
- (iii) Ein Vektor $x \in \mathbb{R}^n$ heißt eine **Affinkombination** von $x_0, \dots, x_m \in \mathbb{R}^n$, $m \in \mathbb{N}_0$, wenn gilt:

$$x = \sum_{i=0}^m \alpha_i x_i$$

mit Koeffizienten $\alpha_i \in \mathbb{R}$, die $\sum_{i=0}^m \alpha_i = 1$ erfüllen. Ist $M \subseteq \mathbb{R}^n$ irgendeine (nicht notwendig endliche) Menge, so heißt x eine Affinkombination von M , wenn x eine Affinkombination von endlich vielen Vektoren $x_0, \dots, x_m \in M$ ist.

Lemma 13.7 (Dimension eines affinen Unterraums).

Es sei $A \subseteq \mathbb{R}^n$ ein affiner Unterraum.

- (i) A besitzt genau dann eine affine Basis $\{x_0, x_1, \dots, x_k\}$ aus $k + 1$ Elementen mit $k \in \mathbb{N}_0$, wenn $\dim A = k$ ist.
- (ii) Ist $\{x_0, x_1, \dots, x_k\}$ eine affine Basis von A , dann lässt sich jedes Element von A auf eindeutige Art und Weise aus $\{x_0, x_1, \dots, x_k\}$ affinkombinieren. Genauer hat jedes $x \in A$ die Darstellung

$$x = \sum_{i=0}^k \alpha_i x_i \tag{13.7}$$

mit Koeffizienten $\alpha = (\alpha_0, \dots, \alpha_k)^\top$, die sich aus der eindeutigen Lösung des linearen Gleichungssystems

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ | & & | \\ x_0 & \cdots & x_k \\ | & & | \end{bmatrix}}_{=:B} \underbrace{\begin{pmatrix} \alpha_0 \\ \vdots \\ \alpha_k \end{pmatrix}}_{=:b} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 \\ | \\ x \\ | \end{pmatrix}}_{=:b} \tag{13.8}$$

ergeben. Die Matrix $B \in \mathbb{R}^{(n+1) \times (k+1)}$ hat Rang $k + 1$. Daher ist $B^\top B$ regulär, und (13.8) kann äquivalent als

$$B^\top B \alpha = B^\top b \tag{13.9}$$

geschrieben werden.

Beachte: Für $A = \emptyset$ ist $k = -1$ und die affine Basis die leere Menge.

Beweis. Der Beweis ist Inhalt von **Hausaufgabe 10.2**. □

¹Ein einzelner Vektor $x_0 \in \mathbb{R}^n$ ist also immer affin unabhängig.

Lemma 13.8 (Operationen auf affinen Unterräumen).

Es sei $A = U + x_0$ und $B = V + y_0$ zwei affine Unterräume von \mathbb{R}^n wie in (13.5).

(i) Die folgenden Aussagen sind äquivalent:

- (a) $A = B$.
- (b) $U = V$ und $x_0 - y_0 \in U$.
- (c) $U = V$ und $0 \in A - B$.
- (d) $U = V$ und $A \cap B \neq \emptyset$.

Beachte: Aussage (b) besagt, dass wir jeden beliebigen Aufpunkt $x_0 \in A$ wählen können, um einen affinen Unterraum $A = U + x_0$ zu repräsentieren.

(ii) Die Menge $\alpha A + \beta B$ für beliebige $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$ ist ein affiner Unterraum von \mathbb{R}^n .

(iii) $A \cap B$ ist ein affiner Unterraum von \mathbb{R}^n .

Beweis. Aussage (i): Wir zeigen zunächst (a) \Rightarrow (c). Es sei zunächst $A = B$. Es gilt $U = A - A = A - B$ und andererseits $V = B - B = A - B$, also $U = V$. Die Folgerung $0 \in A - B$ ist klar.

Wir zeigen nun (c) \Rightarrow (a). Es seien dazu $U = V$ und $0 \in A - B$. Aus letzterer Beziehung folgt, dass es $u \in U$ und $v \in V$ gibt, sodass $u + x_0 = v + y_0$ gilt. Es sei nun $x_1 = u_1 + x_0$ irgendein Punkt in A mit irgendeinem $u_1 \in U$. Dann ist $x_1 = u_1 - u + u + x_0 = u_1 - u + v + y_0$. Da $u_1 - u + v \in U = V$ gilt, liegt $x_1 \in B$, also $A \subseteq B$. Analog zeigt man $B \subseteq A$.

Die Äquivalenz (c) \Leftrightarrow (d) ist klar. Wir zeigen nun noch (b) \Leftrightarrow (d). Dazu sei $U = V$. Wir müssen überprüfen, dass die Bedingungen $x_0 - y_0 \in U$ und $A \cap B \neq \emptyset$ äquivalent sind. Es sei zunächst $x_0 - y_0 \in U$, also $x_0 = u + y_0$ für ein $u \in U$. Damit ist $x_0 = 0 + x_0 \in A$ und ebenfalls $x_0 = u + y_0 \in B$, also liegt $x_0 \in A \cap B$. Umgekehrt gebe es ein $x \in A \cap B$, also gilt $x = u + x_0 = v + y_0$ mit irgendwelchen $u, v \in U$. Dann ist $x_0 - y_0 = u - v \in U$.

Aussage (ii): Für $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$ besteht $\alpha A + \beta B$ aus Elementen der Form $x = \alpha(u + x_0) + \beta(v + y_0)$ mit irgendwelchen $u \in U$ und $v \in V$. Da $\alpha u \in U$ und $\beta v \in V$ gilt und $U + V$ ein Unterraum von \mathbb{R}^n ist, ist gezeigt, dass $\alpha A + \beta B$ ein affiner Unterraum ist.

Aussage (iii): Im Fall $A \cap B = \emptyset$ ist nichts zu zeigen. Es sei also $x \in A \cap B$. Wir können also gemäß Aussage (i) (b) $A = U + x$ und $B = V + x$ darstellen. Folglich gilt $A \cap B = (U \cap V) + x$, und da $U \cap V$ ein Unterraum von \mathbb{R}^n ist, ist $A \cap B$ ein affiner Unterraum. \square

Definition 13.9 (Affine Hülle). Es sei $M \subseteq \mathbb{R}^n$. Der Durchschnitt aller affinen Unterräume von \mathbb{R}^n , die M enthalten, also

$$\text{aff}(M) = \bigcap \{A \subseteq \mathbb{R}^n \mid A \text{ ist affiner Unterraum von } \mathbb{R}^n \text{ und } M \subseteq A\}, \quad (13.10)$$

heißt die **affine Hülle** von M . $\text{aff}(M)$ ist also der kleinste affine Unterraum, der M enthält.

Beachte: Es gilt $M \subseteq \underbrace{\text{aff}(M)}_{\text{„Hülle“}} \underbrace{\text{affin}}$, daher der Name **affine Hülle**.

Definition 13.10 (Dimension einer Menge). Es sei $M \subseteq \mathbb{R}^n$. Die **(affine) Dimension** von M ist $\dim M := \dim \text{aff}(M)$.

Quizfrage 13.4: Ist diese Definition konsistent mit den bereits bekannten Definitionen der Dimension von Unterräumen von \mathbb{R}^n und von affinen Unterräumen von \mathbb{R}^n ?

Analog zu [Lemma 11.5](#) und [Lemma 11.7](#) gilt:

Lemma 13.11 (Charakterisierung affiner Unterräume und der affinen Hülle).

Es sei $M \subseteq \mathbb{R}^n$ eine beliebige Menge.

- (i) Eine Menge $M \subseteq \mathbb{R}^n$ ist genau dann ein affiner Unterraum, wenn sie alle Affinkombinationen ihrer Elemente enthält.
- (ii) $\text{aff}(M)$ ist gleich der Menge aller Affinkombinationen von M .
- (iii) Es gilt $M \subseteq \text{conv}(M) \subseteq \text{aff}(M)$.

Beachte: A ist affiner Unterraum $\Leftrightarrow A = \text{aff}(A)$.

Beweis. Aussage (i): „ \Rightarrow “: Es sei M ein affiner Unterraum von \mathbb{R}^n . Für $m \in \mathbb{N}$ und $x_1, \dots, x_m \in M$ sowie $\alpha_1, \dots, \alpha_m \in \mathbb{R}$ mit $\sum_{i=1}^m \alpha_i = 1$ ist zu zeigen: $x = \sum_{i=1}^m \alpha_i x_i \in M$.

Induktion nach m : Für $m = 1, 2$ ist die Behauptung erfüllt. Es sei bereits gezeigt, dass M alle Affinkombinationen von höchstens m Elementen enthält.

Schluss auf $m + 1$ für $m \geq 2$: Es seien $\alpha_i \in \mathbb{R}$, $\sum_{i=1}^{m+1} \alpha_i = 1$ und $x = \sum_{i=1}^{m+1} \alpha_i x_i$. O. B. d. A. gilt $\alpha_{m+1} \neq 1$. (Es können nur dann alle Koeffizienten $\alpha_i = 1$ sein, wenn $m = 0$ ist.) Setze $\beta_i := \frac{\alpha_i}{1 - \alpha_{m+1}}$ für $i = 1, \dots, m$. Dann ist $\sum_{i=1}^m \beta_i = 1$. Der Vektor $y = \sum_{i=1}^m \beta_i x_i$ gehört zu M , also auch $x = (1 - \alpha_{m+1}) y + \alpha_{m+1} x_{m+1}$.

„ \Leftarrow “: Es seien $x_1, x_2 \in M$. Nach Voraussetzung enthält M alle Affinkombinationen $\alpha x_1 + (1 - \alpha) x_2$, d. h., M ist affiner Unterraum.

Aussage (ii): Es sei A die Menge aller Affinkombinationen von M . Natürlich gilt dann $M \subseteq A$. Im Fall $M = \emptyset$ ist nichts zu zeigen, weil dann auch $A = \emptyset$ ist. Wir gehen also jetzt von $M \neq \emptyset$ aus.

„ $\text{aff}(M) \subseteq A$ “: Wir zeigen: A ist ein affiner Unterraum. Damit kommt diese Menge im Durchschnitt (13.10) vor, also gilt $\text{aff}(M) \subseteq A$.

Es seien $x, y \in A$, also gibt es Zahlen $m, \ell \in \mathbb{N}$ und $\beta_1, \dots, \beta_m \in \mathbb{R}$ sowie $\gamma_1, \dots, \gamma_\ell \in \mathbb{R}$ mit $\sum_{i=1}^m \beta_i = 1$ und $\sum_{j=1}^\ell \gamma_j = 1$, sodass $x = \sum_{i=1}^m \beta_i x_i$ und $y = \sum_{j=1}^\ell \gamma_j y_j$ gelten mit irgendwelchen $x_1, \dots, x_m \in M$ und $y_1, \dots, y_\ell \in M$. Es sei $\alpha \in \mathbb{R}$. Dann gilt

$$\alpha x + (1 - \alpha) y = \alpha \sum_{i=1}^m \beta_i x_i + (1 - \alpha) \sum_{j=1}^\ell \gamma_j y_j,$$

d. h., $\alpha x + (1 - \alpha) y$ ist Linearkombination der $\{x_i\}_{i=1}^m \cup \{y_j\}_{j=1}^\ell$. Die Koeffizienten ergeben in der Summe 1. Damit ist $\alpha x + (1 - \alpha) y \in A$, also A ist affiner Unterraum.

„ $\text{aff}(M) \supseteq A$ “: Es sei $x \in A$, also eine Affinkombination von M . Wegen $M \subseteq \text{aff}(M)$ ist x auch eine Affinkombination von $\text{aff}(M)$. $\text{aff}(M)$ ist ein affiner Unterraum, stimmt also nach [Aussage \(i\)](#) mit der Menge seiner Affinkombinationen überein. Also ist $x \in \text{aff}(M)$.

[Aussage \(iii\)](#): Nach [Lemma 11.7](#) gilt $M \subseteq \text{conv}(M)$, und $\text{conv}(M)$ sind gerade die Konvexkombinationen von M . Da jede Konvexkombination auch eine Affinkombination ist, gilt weiter $\text{conv}(M) \subseteq \text{aff}(M)$. \square

Satz 13.12. *Es sei $M \subseteq \mathbb{R}^n$ eine beliebige Menge der Dimension k . Dann existieren $k + 1$ affin unabhängige Punkte $x_0, \dots, x_k \in M$, die eine affine Basis von $\text{aff}(M)$ bilden.*

Beweis. Die affine Hülle $\text{aff}(M)$ besteht aus den Affinkombinationen von M ([Lemma 13.11](#)). Da die Dimension einer Menge von Affinkombinationen gleich der maximalen Anzahl affin unabhängiger Punkte ist, folgt die Behauptung. \square

§ 13.3 TOPOLOGISCHE EIGENSCHAFTEN KONVEXER MENGEN

Wir geben jetzt einen wichtigen Satz der Konvexgeometrie an, der die Arbeit mit konvexen Hüllen erheblich vereinfacht:

Satz 13.13 (Carathéodory). *Es sei $M \subseteq \mathbb{R}^n$ eine beliebige Menge der Dimension k und $x \in \text{conv}(M)$ eine Konvexkombination von Punkten $x_0, \dots, x_m \in M$ mit $m \geq 0$. Dann ist x bereits eine Konvexkombination von höchstens $k + 1$ dieser Punkte.*

Beachte: Dass jedes $x \in \text{conv}(M)$ eine Konvexkombination von Punkten $x_0, \dots, x_m \in M$ mit $m \geq 0$ ist, ist durch [Lemma 11.7](#) gesichert. Der Satz besagt, dass bereits eine Teilmenge von (höchstens) $k + 1$ dieser Punkte ausreicht, aus denen man x konvexkombinieren kann. Die Auswahl dieser Punkte hängt von x ab. Im Einzelfall können auch weniger als $k + 1$ Punkte ausreichen. Das ist z. B. dann der Fall, wenn $x \in M$ ist.

Beweis. Der Beweis ist Inhalt von [Hausaufgabe 10.4](#). \square

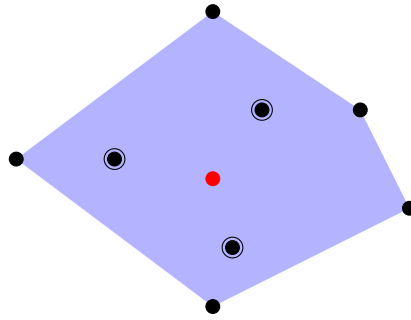


Abbildung 13.3: Illustration des **Satzes von Carathéodory 13.13** für eine Menge der Dimension $k = 2$. Die schwarzen Punkte bilden die Menge M . Der rote Punkt $x \in \text{conv}(M)$ ist bereits eine Konvexkombination der drei hervorgehobenen Punkte.

Eine konvexe Menge $C \subseteq \mathbb{R}^n$, deren Dimension $\dim C < n$ ist, besitzt keine inneren Punkte in \mathbb{R}^n . (**Quizfrage 13.5:** Ist das anschaulich klar?) Das ändert sich, wenn man zur Relativtopologie in $\text{aff}(C)$ übergeht. Dies führt zu folgenden Begriffen:

Definition 13.14 (Relatives Inneres). *Es sei $C \subseteq \mathbb{R}^n$ eine konvexe Menge.*

- (i) Ein Punkt $x \in C$ heißt ein **relativ innerer Punkt** von C , wenn es ein $\varepsilon > 0$ gibt, sodass $B_\varepsilon(x) \cap \text{aff}(C) \subseteq C$ liegt. Die Menge aller relativ inneren Punkte von C heißt das **relative Innere** (englisch: **relative interior**) und wird mit $\text{rel int}(C)$ bezeichnet.
- (ii) Ein Punkt $x \in \mathbb{R}^n$ heißt ein **relativer Randpunkt** von C , wenn $x \in \overline{C} \setminus \text{rel int}(C)$ liegt. Die Menge aller relativen Randpunkte von C heißt der **relative Rand** (englisch: **relative boundary**) und wird mit $\text{rel } \partial(C)$ bezeichnet.

Quizfrage 13.6: Was ist $\text{rel int}(C)$, wenn die konvexe Menge $C \subseteq \mathbb{R}^n$ die volle Dimension n hat?

Quizfrage 13.7: Was ist $\text{rel int}(A)$ für einen affinen Unterraum $A \subseteq \mathbb{R}^n$?

Quizfrage 13.8: Wenn $C_1 \subseteq C_2$ ist, gilt dann auch immer $\text{rel int}(C_1) \subseteq \text{rel int}(C_2)$?

Quizfrage 13.9: Warum benötigen wir keinen Begriff des relativen Abschlusses?

Satz 13.15 (vgl. Jarre, Stoer, 2004, Satz 7.2.5).

Jede nichtleere konvexe Menge $C \subseteq \mathbb{R}^n$ besitzt ein nichtleeres relatives Inneres. Es gilt: $\dim \text{rel int}(C) = \dim C$.

Beweis. Es sei $k := \dim C$. Da C nichtleer ist, gilt, $k \geq 0$. Es gibt also nach **Satz 13.12** affin unabhängige Punkte $x_0, \dots, x_k \in C$. Nach **Lemma 13.7** lässt sich jeder Punkt $x \in \text{aff}(C)$ eindeutig als Affinkombination $x = \sum_{i=0}^k \alpha_i x_i$ schreiben, wobei sich die Koeffizienten aus der eindeutigen Lösung des linearen Gleichungssystems (13.9) ergeben:

$$B^T B \alpha = B^T b.$$

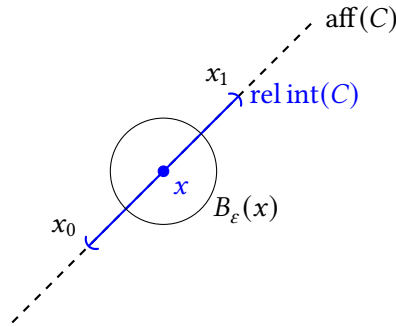


Abbildung 13.4: Illustration einer 1-dimensionalen konvexen Menge $C = \text{conv}(\{x_0, x_1\}) = \{\alpha x_0 + (1 - \alpha) x_1 \mid \alpha \in [0, 1]\}$ und ihres relativen Inneren $\text{rel int}(C) = \{\alpha x_0 + (1 - \alpha) x_1 \mid \alpha \in (0, 1)\}$ in \mathbb{R}^2 . Insbesondere der Punkt x ist ein relativ innerer Punkt.

Wir zeigen jetzt, dass der Mittelpunkt der Punkte $\{x_0, \dots, x_k\}$

$$\bar{x} := \frac{1}{k+1} \sum_{i=0}^k x_i$$

ein relativ innerer Punkt von C ist. Dazu konstruieren wir eine abgeschlossene Kugel

$$\overline{B_\varepsilon^{\|\cdot\|_\infty}(\bar{x})} = \{x \in \mathbb{R}^n \mid \|x - \bar{x}\|_\infty \leq \varepsilon\}$$

mit der Eigenschaft $\overline{B_\varepsilon^{\|\cdot\|_\infty}(\bar{x})} \cap \text{aff}(C) \subseteq \text{conv}(\{x_0, \dots, x_k\}) \subseteq \text{conv}(C) = C$. (**Quizfrage 13.10:** Warum gilt die letzte Inklusion?)

Wir setzen dazu $\varepsilon := 1/((k+1)\|(B^T B)^{-1} B^T\|_\infty)$. Dabei ist $\|\cdot\|_\infty$ die durch die ∞ -Norm im Definitions- und Bildbereich induzierte Matrixnorm, also²

$$\|A\|_\infty = \max_{x \neq 0} \frac{\|Ax\|_\infty}{\|x\|_\infty} = \max_{\|x\|_\infty=1} \|Ax\|_\infty. \quad (13.11)$$

Es sei nun $x \in \overline{B_\varepsilon^{\|\cdot\|_\infty}(\bar{x})} \cap \text{aff}(C)$. Wir bezeichnen mit α die Koeffizienten in der Affinkombination $x = \sum_{i=0}^k \alpha_i x_i$. Weiterhin sind $\bar{\alpha}$ die Koeffizienten von \bar{x} , also $\bar{\alpha} = \frac{1}{k+1} \mathbf{1}$. Um zu zeigen, dass tatsächlich $x \in \text{conv}(\{x_0, \dots, x_k\})$ liegt, müssen wir für die Koeffizienten zeigen: $\alpha \geq 0$. Es gilt

$$\begin{aligned} \|\alpha - \bar{\alpha}\|_\infty &= \|(B^T B)^{-1} B^T \left[\begin{pmatrix} 1 \\ x \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 \\ \bar{x} \end{pmatrix} \right]\|_\infty \leq \|(B^T B)^{-1} B^T\|_\infty \left\| \begin{pmatrix} 1 \\ x \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 \\ \bar{x} \end{pmatrix} \right\|_\infty \\ &= \|(B^T B)^{-1} B^T\|_\infty \|x - \bar{x}\|_\infty \leq \|(B^T B)^{-1} B^T\|_\infty \varepsilon = \frac{1}{k+1}. \end{aligned}$$

Daraus folgt wie gewünscht $\alpha \geq 0$ mit Hilfe der Dreiecksungleichung.

Ende der Woche 10

²Diese ist auch als **Zeilensummennorm** bekannt, da für $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ die folgende Beziehung gilt:

$$\|A\|_\infty = \max \left\{ \sum_{j=1}^n |a_{ij}| \mid i = 1, \dots, m \right\}.$$

$\|A\|_\infty$ ist also das Maximum der betragsweisen Zeilensummen.

Wir zeigen jetzt noch, dass die Dimension von $\text{rel int}(C)$ ebenfalls gleich k ist. Dazu geben wir $k+1$ affin unabhängige Punkte in $\text{rel int}(C)$ an. Damit ist $\dim \text{rel int}(C) \geq k$, und da außerdem $\text{rel int}(C) \subseteq C$ die Beziehung $\dim \text{rel int}(C) \leq \dim C = k$ impliziert, ist dann die Behauptung gezeigt. Zur Konstruktion der Punkte machen wir den Ansatz

$$\bar{x}_i := \beta \bar{x} + (1 - \beta) x_i$$

und wählen $\beta \in (0, 1)$ so klein, dass $\|\bar{x}_i - \bar{x}\|_\infty \leq \varepsilon$ bleibt für alle $i = 0, \dots, k$. Damit liegen alle $\bar{x}_i \in B_\varepsilon^{\|\cdot\|_\infty}(\bar{x})$ und außerdem in $\text{aff}(C)$ (**Quizfrage 13.11**: Begründung?).

Um die affine Unabhängigkeit der Punkte $\{\bar{x}_0, \dots, \bar{x}_k\}$ zu zeigen, machen wir den Ansatz

$$\begin{aligned} 0 &= \sum_{i=1}^k \gamma_i (\bar{x}_i - \bar{x}_0) = \sum_{i=1}^k \gamma_i (\beta \bar{x} + (1 - \beta) x_i - \beta \bar{x} - (1 - \beta) x_0) \\ &= (1 - \beta) \sum_{i=1}^k \gamma_i (x_i - x_0). \end{aligned}$$

Da die Punkte $\{x_0, \dots, x_k\}$ aber affin unabhängig sind, folgt $\gamma_i = 0$ für alle $i = 1, \dots, k$. Also sind auch die Punkte $\{\bar{x}_0, \dots, \bar{x}_k\}$ affin unabhängig. \square

Lemma 13.16 (**Accessibility lemma**, vgl. Jarre, Stoer, 2004, Lemma 7.2.6).

Es seien $C \subseteq \mathbb{R}^n$ konvex, $x_1 \in \bar{C}$ und $x_2 \in \text{rel int}(C)$. Dann gilt $\alpha x_1 + (1 - \alpha) x_2 \in \text{rel int}(C)$ für alle $\alpha \in [0, 1)$, d. h., die gesamte Verbindungsstrecke (evtl. mit Ausnahme von x_1 selbst) gehört zum relativen Inneren von C .

Beweis. Aufgrund der Voraussetzung $x_1 \in \bar{C}$ gilt $x_1 \in C + B_\varepsilon(0)$ für alle $\varepsilon > 0$. Wegen $x_2 \in \text{rel int}(C)$ gibt es ein $r > 0$, sodass $B_r(x_2) \cap \text{aff}(C) \subseteq C$ liegt.

Es sei nun $\alpha \in [0, 1)$ beliebig und $x := \alpha x_1 + (1 - \alpha) x_2$. Wir zeigen: Mit $r(\alpha) := \frac{1-\alpha}{1+\alpha} r$ gilt $B_{r(\alpha)}(x) \cap \text{aff}(C) \subseteq C$, d. h., $x \in \text{rel int}(C)$. Dazu halten wir zunächst fest:

$$\begin{aligned} B_{r(\alpha)}(x) &= B_{r(\alpha)}(\alpha x_1 + (1 - \alpha) x_2) \\ &= \alpha x_1 + (1 - \alpha) x_2 + B_{r(\alpha)}(0) \\ &\subseteq \alpha (C + B_{r(\alpha)}(0)) + (1 - \alpha) x_2 + B_{r(\alpha)}(0) \\ &= \alpha C + (1 - \alpha) x_2 + (1 + \alpha) B_{r(\alpha)}(0) \\ &= \alpha C + (1 - \alpha) [x_2 + B_r(0)] \\ &= \alpha C + (1 - \alpha) B_r(x_2), \end{aligned}$$

siehe auch **Abbildung 13.5**. Durch den Schnitt mit $\text{aff}(C)$ folgt

$$B_{r(\alpha)}(x) \cap \text{aff}(C) \subseteq [\alpha C + (1 - \alpha) B_r(x_2)] \cap \text{aff}(C).$$

Wegen $\text{aff}(C) = \alpha \text{aff}(C) + (1 - \alpha) \text{aff}(C)$ (**Quizfrage 13.12**: Begründung?) gilt weiter

$$B_{r(\alpha)}(x) \cap \text{aff}(C) \subseteq \underbrace{\alpha [C \cap \text{aff}(C)]}_{\subseteq C} + (1 - \alpha) \underbrace{[B_r(x_2) \cap \text{aff}(C)]}_{\subseteq C} \subseteq C.$$

Die letzte Inklusion folgt aus der Konvexität von C . □

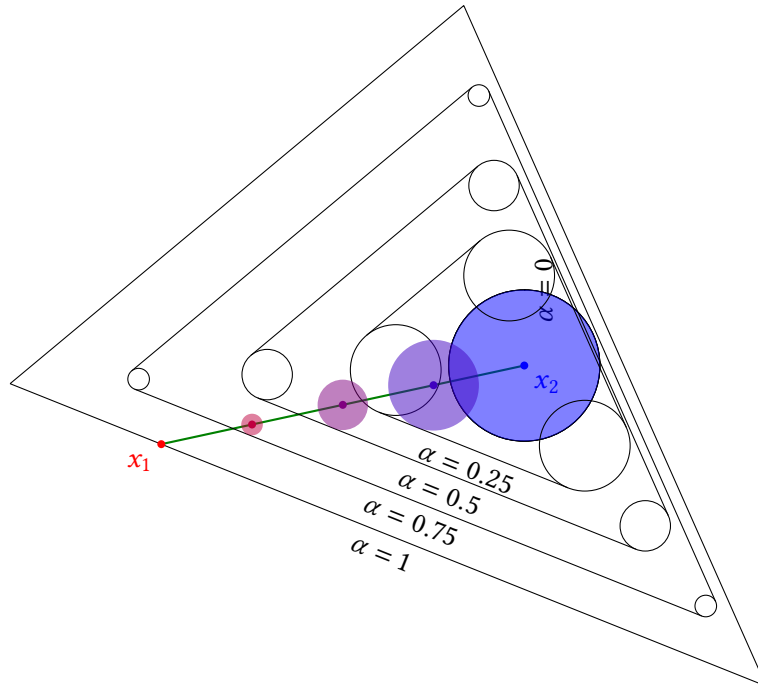


Abbildung 13.5: Illustration der Inklusion $B_{r(\alpha)}(x) \subseteq \alpha C + (1 - \alpha) B_r(x_2)$ aus dem Beweis des **Accessibility lemmas 13.16** für $\alpha \in \{0, 0.25, 0.5, 0.75, 1\}$. Die farbig hervorgehobenen Kugeln sind die Mengen $B_{r(\alpha)}(x)$. Die Mengen $\alpha C + (1 - \alpha) B_r(x_2)$ sind die Dreiecke mit den abgerundeten Ecken. Die Extremfälle sind $\alpha = 1$ (die Menge C selbst, also das äußere Dreieck) und $\alpha = 0$ (die blaue Kugel, kein Dreieck mehr zu erkennen).

Wir geben noch eine nützliche Charakterisierung des relativen Inneren einer konvexen Menge an, die es uns erlaubt, mit einzelnen Richtungen zu argumentieren statt gleichzeitig mit allen Richtungen in einer Kugel:

Lemma 13.17 (Charakterisierung des relativen Inneren einer konvexen Menge).

Es sei $C \subseteq \mathbb{R}^n$ konvex und nichtleer. Für einen Punkt $x \in \mathbb{R}^n$ sind folgende Aussagen äquivalent:

- (i) $x \in \text{rel int}(C)$.
- (ii) Zu jedem $y \in \text{aff}(C)$ existiert ein $\varepsilon > 0$, sodass $x + \varepsilon(y - x) \in C$ und $x - \varepsilon(y - x) \in C$ liegen.
- (iii) Zu jedem $y \in C$ existiert ein $\varepsilon > 0$, sodass $x + \varepsilon(y - x) \in C$ und $x - \varepsilon(y - x) \in C$ liegen.

Quizfrage 13.13: Was bedeutet die Bedingung aus **Aussage (iii)** anschaulich?

Beweis. **Aussage (i) \Rightarrow Aussage (ii):** Es sei $x \in \text{rel int}(C)$ und $y \in \text{aff}(C)$. Wir können $y \neq x$ annehmen, sonst ist die Aussage klar. Wegen $x \in \text{rel int}(C)$ gibt es ein $\tilde{\varepsilon} > 0$, sodass $B_{\tilde{\varepsilon}}(x) \cap \text{aff}(C) \subseteq C$. Für $\varepsilon := \tilde{\varepsilon}/\|y - x\|$ sind dann

$$\underbrace{x + \varepsilon(y - x)}_{=\varepsilon y + (1-\varepsilon)x \in \text{aff}(C)} \in B_{\tilde{\varepsilon}}(x) \cap \text{aff}(C) \subseteq C \quad \text{und} \quad \underbrace{x - \varepsilon(y - x)}_{=-\varepsilon y + (1+\varepsilon)x \in \text{aff}(C)} \in B_{\tilde{\varepsilon}}(x) \cap \text{aff}(C) \subseteq C.$$

Aussage (ii) \Rightarrow Aussage (iii): Klar, da $C \subseteq \text{aff}(C)$ ist.

Aussage (iii) \Rightarrow Aussage (i): Nach [Satz 13.15](#) können wir ein $y \in \text{rel int}(C)$ wählen, insbesondere gilt $y \in C$. Nach Voraussetzung existiert $\varepsilon > 0$, sodass $z := x - \varepsilon(y - x) \in C$ liegt. Das heißt aber auch

$$x = \frac{1}{1+\varepsilon} z + \frac{\varepsilon}{1+\varepsilon} y,$$

d. h., x ist eine echte Konvexkombination von $z \in C$ und $y \in \text{rel int}(C)$. Nach dem [Accessibility lemma 13.16](#) gehört also x zu $\text{rel int}(C)$. \square

Lemma 13.18 (Relatives Inneres des Epigraphen, vgl. [Rockafellar, 1970](#), Lemma 7.3).

Es sei $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ konvex. Dann gilt

$$\text{rel int epi } f = \left\{ \begin{pmatrix} x \\ \gamma \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R} \mid x \in \text{rel int dom } f, \gamma > f(x) \right\}. \quad (13.12)$$

Beweis. Der Beweis ist Inhalt von [Hausaufgabe 11.1](#). \square

Satz 13.19 ([Rockafellar, 1970](#), Theorem 6.2).

(i) Ist $C \subseteq \mathbb{R}^n$ konvex, dann sind das relative Innere $\text{rel int}(C)$ und der Abschluss \overline{C} konvex.

(ii) Die Mengen C , $\text{rel int}(C)$ und \overline{C} haben alle dieselbe affine Hülle, also auch dieselbe Dimension.

Beweis. **Aussage (i):** Es sei $C \subseteq \mathbb{R}^n$ konvex. Wir zeigen zuerst, dass $\text{rel int}(C)$ konvex ist. Es seien dazu $x_1, x_2 \in \text{rel int}(C)$ und $\alpha \in [0, 1]$. Dann gehört nach [Lemma 13.16](#) auch die Konvexkombination $\alpha x_1 + (1 - \alpha) x_2$ zu $\text{rel int}(C)$, also ist $\text{rel int}(C)$ konvex.

Der Abschluss von C erfüllt die Beziehung

$$\overline{C} = \bigcap \{C + \overline{B_\varepsilon(0)} \mid \varepsilon > 0\}.$$

Die Mengen, über die der Durchschnitt gebildet wird, sind nach [Beispiel 11.2](#) und [Satz 11.3](#) konvex, also ist auch \overline{C} konvex.

Aussage (ii): Wir zeigen jetzt noch $\text{aff rel int}(C) = \text{aff } C = \text{aff } \overline{C}$. Aufgrund von $\text{rel int}(C) \subseteq C \subseteq \overline{C}$ folgt

$$\text{aff rel int}(C) \subseteq \text{aff } C \subseteq \text{aff } \overline{C}.$$

Wegen $\bar{C} \subseteq \text{aff}(C)$ gilt auch $\text{aff } \bar{C} \subseteq \text{aff } \text{aff}(C) = \text{aff}(C)$. Also bleibt noch $\text{aff rel int}(C) = \text{aff } C$ zu zeigen. Wir wissen aber bereits aus [Satz 13.15](#), dass $\dim \text{rel int}(C) = \dim C$ gilt, also muss $\text{aff rel int}(C) = \text{aff } C$ sein. \square

Satz 13.20 ([Rockafellar, 1970](#), Theorem 6.3).

Es sei $C \subseteq \mathbb{R}^n$ konvex. Dann gelten:

- (i) $\overline{\text{rel int}(C)} = \bar{C}$, d. h., $\text{rel int}(C)$ und C haben denselben Abschluss.
- (ii) $\text{rel int}(C) = \text{rel int}(\bar{C})$, d. h., C und \bar{C} haben dasselbe relative Innere.
- (iii) $\text{rel } \partial(C) = \text{rel } \partial(\bar{C})$, d. h., C und \bar{C} haben denselben relativen Rand.

Beweis. Wir können $C \neq \emptyset$ annehmen, ansonsten sind alle Mengen leer.

Aussage (i): Die Inklusion $\overline{\text{rel int}(C)} \subseteq \bar{C}$ folgt unmittelbar aus $\text{rel int}(C) \subseteq C$. Für die umgekehrte Aussage sei nun $x_1 \in \bar{C}$ und $x_2 \in \text{rel int}(C)$. Dann ist nach [Lemma 13.16](#) $\alpha x_1 + (1 - \alpha) x_2 \in \text{rel int}(C)$. Der Grenzübergang $\alpha \nearrow 1$ zeigt $x_1 \in \overline{\text{rel int}(C)}$.

Aussage (ii): Aus $C \subseteq \bar{C}$ und der Tatsache, dass beide Mengen dieselbe affine Hülle haben ([Satz 13.19](#)) folgt $\text{rel int}(C) \subseteq \text{rel int}(\bar{C})$. Für die umgekehrte Aussage sei nun $x \in \text{rel int}(\bar{C})$, also existiert $\varepsilon > 0$ mit $B_\varepsilon(x) \cap \text{aff}(C) \subseteq \bar{C}$. Es sei außerdem $y \in \text{rel int}(C)$ ([Satz 13.15](#)). Ist $y = x$, so sind wir fertig. Es sei also jetzt $y \neq x$. Ziel ist die Konstruktion eines Punktes $z \in \bar{C}$, sodass x als echte Konvexkombination von $y \in \text{rel int}(C)$ und $z \in \bar{C}$ geschrieben werden kann. Denn dann folgt aus [Lemma 13.16](#), dass $x \in \text{rel int}(C)$ liegt.

Wir definieren

$$z := x + \delta(x - y) \quad \text{mit } \delta := \frac{\varepsilon}{\|x - y\|}.$$

Dann ist $\|z - x\| = \delta \|x - y\| = \varepsilon$, also gilt $z \in \overline{B_\varepsilon(x)}$. Wegen $\overline{B_\varepsilon(x)} \cap \text{aff}(C) \subseteq \bar{C}$ (**Quizfrage 13.14:** Begründung?) folgt auch $z \in \bar{C}$. Wir können nun x schreiben als echte Konvexkombination

$$x = \frac{1}{1 + \delta} z + \left(1 - \frac{1}{1 + \delta}\right) y$$

mit $z \in \bar{C}$ und $y \in \text{rel int}(C)$. Nach [Lemma 13.16](#) gilt $x \in \text{rel int}(C)$, was zu zeigen war.

Aussage (iii): Nach Definition des relativen Randes gilt

$$\text{rel } \partial(C) = \bar{C} \setminus \text{rel int}(C)$$

und weiter

$$\text{rel } \partial(\bar{C}) = \bar{C} \setminus \text{rel int}(\bar{C}) = \bar{C} \setminus \text{rel int}(C),$$

wobei die letzte Gleichheit aus [Aussage \(i\)](#) folgt. \square

Folgerung 13.21 (Gleichheit der Abschlüsse und der relativen Inneren konvexer Mengen).

Es seien $C_1, C_2 \subseteq \mathbb{R}^n$ konvex. Die folgenden Aussagen sind äquivalent:

(i) $\overline{C_1} = \overline{C_2}$.

(ii) $\text{rel int}(C_1) = \text{rel int}(C_2)$.

Beweis. **Aussage (i) \Rightarrow Aussage (ii):** Aus $\overline{C_1} = \overline{C_2}$ folgt $\text{rel int}(\overline{C_1}) = \text{rel int}(\overline{C_2})$. **Satz 13.20 (ii)** impliziert $\text{rel int}(C_1) = \text{rel int}(C_2)$.

Aussage (ii) \Rightarrow Aussage (i): Aus $\text{rel int}(C_1) = \text{rel int}(C_2)$ folgt $\overline{\text{rel int}(C_1)} = \overline{\text{rel int}(C_2)}$. **Satz 13.20 (i)** impliziert $\overline{C_1} = \overline{C_2}$. \square

Definition 13.22 (Algebraisches Inneres). Es sei $M \subseteq \mathbb{R}^n$. Ein Punkt $x_0 \in M$ heißt ein **algebraisch innerer Punkt** von M , wenn gilt: Für jedes $d \in \mathbb{R}^n$ existiert ein $\varepsilon_d > 0$, sodass

$$\{x_0 + t d \mid 0 \leq t < \varepsilon_d\} \subseteq M$$

liegt. Die Menge aller algebraisch inneren Punkte von M heißt das **algebraische Innere** (englisch: **algebraic interior** oder englisch: **core**) von M , kurz: $\text{core } M$.

Es ist leicht zu sehen, dass $\text{int } M \subseteq \text{core } M$ gilt.³ Die Umkehrung ist jedoch i. A. falsch. Es gilt aber:

Lemma 13.23 (Algebraisches Inneres konvexer Mengen).

Es sei $C \subseteq \mathbb{R}^n$ konvex. Dann gilt $\text{int } C = \text{core } C$.

Beweis. Es ist nur $\text{core } C \subseteq \text{int } C$ zu bestätigen. Im Fall $\text{core } C = \emptyset$ ist nichts zu zeigen. Es sei also $x_0 \in \text{core } C$. Dann ist $\dim C = n$ und damit $\text{aff } C = \mathbb{R}^n$. (**Quizfrage 13.15:** Begründung?) Nach Definition des algebraischen Inneren ist die Bedingung aus **Lemma 13.17 (ii)** erfüllt. Damit gehört x_0 zu $\text{rel int } C = \text{int } C$. \square

Quizfrage 13.16: Was ist ein Beispiel für einen Punkt einer Menge, der algebraisch innerer Punkt ist, aber kein innerer Punkt?

³Wir erinnern uns: $x \in \text{int } M$ gilt, wenn es ein $\varepsilon > 0$ gibt, sodass $B_\varepsilon(x) \subseteq M$.

§ 13.4 TRENNUNGSSÄTZE

Literatur: Geiger, Kanzow, 2002, Kapitel 2.1.4

Wir kommen nun zu den wichtigsten Resultaten in diesem Abschnitt, dem **Trennungssatz 13.26**, dem **eigentlichen Trennungssatz 13.30** und dem **strikten Trennungssatz 13.32**. Das Ziel ist jeweils die Trennung zweier konvexer Mengen durch eine Hyperebene, sodass jede der Mengen in einem anderen Halbraum liegt und – je nach Voraussetzung – gewisse Zusatzeigenschaften gelten.

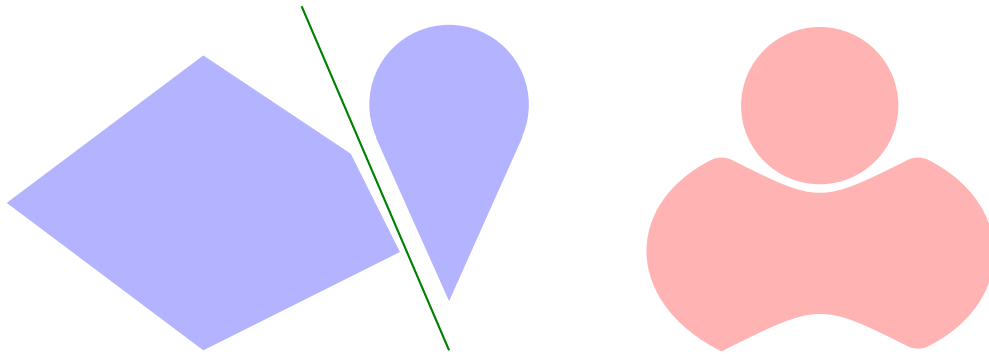


Abbildung 13.6: Zwei disjunkte konvexe Mengen (links) sind durch eine Hyperebene trennbar. Ist eine der Mengen nichtkonvex, stimmt diese Aussage nicht mehr (rechts).

Definition 13.24 (Trennende Hyperebene).

Es seien $A, B \subseteq \mathbb{R}^n$ zwei nichtleere Mengen und $H(a, \beta) = \{x \in \mathbb{R}^n \mid a^\top x = \beta\}$ eine Hyperebene.

- (i) Wir sagen, $H(a, \beta)$ sei eine **trennende Hyperebene** (englisch: **separating hyperplane**) für die Mengen A und B , falls eine der Mengen in $H^-(a, \beta)$ und die andere in $H^+(a, \beta)$ enthalten ist, wenn also gilt

$$a^\top x \leq \beta \leq a^\top y \quad \text{für alle } x \in A \text{ und alle } y \in B. \quad (13.13)$$

- (ii) Wir sagen, die Hyperebene $H(a, \beta)$ sei eine **eigentlich trennende Hyperebene** (englisch: **properly separating hyperplane**) für die Mengen A und B , falls $H(a, \beta)$ die Mengen A und B trennt, aber nicht beide Mengen A und B enthält, wenn also gilt:

$$a^\top x \leq \beta \leq a^\top y \quad \text{für alle } x \in A \text{ und alle } y \in B \quad (13.14a)$$

und

$$a^\top \bar{x} < a^\top \bar{y} \quad \text{für ein } \bar{x} \in A \text{ und ein } \bar{y} \in B. \quad (13.14b)$$

- (iii) Wir sagen, die Hyperebene $H(a, \beta)$ sei eine **strikt trennende Hyperebene** (englisch: **strictly separating hyperplane**) für die Mengen A und B , falls genau eine der Mengen im offenen Halbraum $\text{int } H^-(a, \beta)$ und die andere im offenen Halbraum $\text{int } H^+(a, \beta)$ enthalten ist, wenn also gilt

$$a^\top x < \beta < a^\top y \quad \text{für alle } x \in A \text{ und alle } y \in B. \quad (13.15)$$

Beachte: Der „Offset“ β ist nicht die entscheidende Größe in der [Definition 13.24](#). Gilt beispielsweise $a^\top x \leq a^\top y$ für alle $x \in A$ und alle $y \in B$, dann lässt sich β in (13.13) immer nachträglich passend definieren.

Quizfrage 13.17: Wie kann man in den einzelnen Fällen der [Definition 13.24](#) das β jeweils passend definieren, wenn man den Normalenvektor a bereits kennt?

Wir beginnen mit einer Aussage zur Trennung eines Punktes und einer konvexen Menge. Aus diesem Spezialfall leiten wir dann anschließend den ersten [Trennungssatz 13.26](#) her.

Lemma 13.25 (Trennung von Punkt und konvexer Menge).

Es sei $C \subseteq \mathbb{R}^n$ konvex und nichtleer und $\bar{x} \in \mathbb{R}^n$ ein Punkt, sodass $\bar{x} \notin \text{int } C$. Dann existiert eine Hyperebene $H(a, \beta)$, die \bar{x} von C trennt, sodass also gilt:

$$a^\top x \geq \beta \geq a^\top \bar{x} \quad \text{für alle } x \in C. \quad (13.16)$$

Beweis. Wir wählen eine Folge $x^{(k)}$ mit der Eigenschaft $x^{(k)} \notin \bar{C}$ und $x^{(k)} \rightarrow \bar{x}$ gilt. Dass dies immer möglich ist, sehen wir ein, indem wir drei Fälle unterscheiden:

- (1) Falls $\bar{x} \notin \bar{C}$ liegt, wähle $x^{(k)} \equiv \bar{x}$.
- (2) Ansonsten liegt $\bar{x} \in \bar{C}$.
 - (2a) Falls C nicht die volle Dimension hat, so ist $C \subseteq x_0 + U$ mit einem Unterraum U einer Dimension $< n$. Wir können dann $x^{(k)} = \bar{x} + (1/k)a$ wählen mit einem $a \in U^\perp$.
 - (2b) Andernfalls hat C volle Dimension, und es liegt $\bar{x} \in \bar{C} \setminus \text{int } C = \partial C = \partial(\bar{C})$ nach [Satz 13.20\(iii\)](#). Jede Umgebung eines Randpunktes von \bar{C} schneidet die Menge \bar{C} und ihr Komplement $\mathbb{R}^n \setminus \bar{C}$. Also können wir $x^{(k)} \in B_{1/k}(\bar{x}) \cap (\mathbb{R}^n \setminus \bar{C})$ auswählen, woraus $x^{(k)} \rightarrow \bar{x}$ folgt.

Die Menge \bar{C} ist nichtleer, abgeschlossen und konvex. Nach [Lemma 13.2](#) existiert die orthogonale Projektion $\hat{x}^{(k)} := \text{proj}_{\bar{C}}(x^{(k)})$, und nach [Satz 13.3](#) ist diese charakterisiert durch

$$\begin{aligned} (\hat{x}^{(k)} - x^{(k)})^\top x &\geq (\hat{x}^{(k)} - x^{(k)})^\top \hat{x}^{(k)} \quad \text{für alle } k \in \mathbb{N} \text{ und alle } x \in \bar{C} \\ &= (\hat{x}^{(k)} - x^{(k)})^\top (\hat{x}^{(k)} - x^{(k)} + x^{(k)}) \\ &= \|\hat{x}^{(k)} - x^{(k)}\|^2 + (\hat{x}^{(k)} - x^{(k)})^\top x^{(k)} \\ &\geq (\hat{x}^{(k)} - x^{(k)})^\top x^{(k)}. \end{aligned} \quad (13.17)$$

Wir setzen

$$a^{(k)} := \frac{\hat{x}^{(k)} - x^{(k)}}{\|\hat{x}^{(k)} - x^{(k)}\|}.$$

Beachte: Der Nenner ist $\neq 0$, da $\hat{x}^{(k)} \in \bar{C}$ und $x^{(k)} \notin \bar{C}$.

Damit erhalten wir aus (13.17)

$$a^{(k)\top} x \geq a^{(k)\top} x^{(k)} \quad \text{für alle } k \in \mathbb{N} \text{ und alle } x \in \overline{C},$$

d. h., mit dem Normalenvektor $a^{(k)}$ können wir jeweils den Punkt $x^{(k)}$ von \overline{C} trennen. Wegen $\|a^{(k)}\| = 1$ und der Kompaktheit der Einheitssphäre in \mathbb{R}^n existiert eine konvergente Teilfolge $a^{(k(\ell))} \rightarrow a$ mit $\|a\| = 1$, und der Grenzübergang $\ell \rightarrow \infty$ zeigt die Behauptung

$$a^\top x \geq a^\top \bar{x} \quad \text{für alle } x \in \overline{C}. \quad \square$$

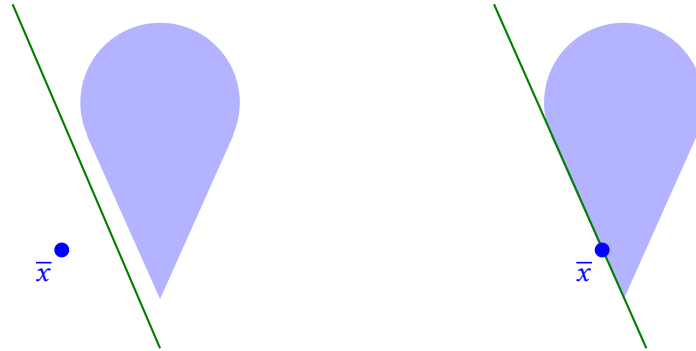


Abbildung 13.7: Illustration von Lemma 13.25 in zwei Fällen.

Satz 13.26 (Trennungssatz).

Es seien $C_1, C_2 \subseteq \mathbb{R}^n$ konvex und nichtleer sowie $C_1 \cap C_2 = \emptyset$. Dann existiert eine Hyperebene $H(a, \beta)$, die C_1 und C_2 trennt, sodass also gilt:

$$a^\top x_1 \leq \beta \leq a^\top x_2 \quad \text{für alle } x_1 \in C_1 \text{ und alle } x_2 \in C_2. \quad (13.18)$$

Beweis. Wir betrachten

$$C := C_2 - C_1 = \{x_2 - x_1 \mid x_1 \in C_1, x_2 \in C_2\},$$

also die Minkowski-Summe von C_2 und $-C_1$. Nach Satz 11.3 ist C konvex, und wegen $C_1 \cap C_2 = \emptyset$ gilt $0 \notin C$, also erst recht $0 \notin \text{int } C$. Aus Lemma 13.25 bekommen wir die Existenz einer Hyperebene $H(a, \beta)$, sodass $0 \leq a^\top x$ gilt für alle $x \in C$. Das heißt aber

$$a^\top x_1 \leq a^\top x_2 \quad \text{für alle } x_1 \in C_1 \text{ und alle } x_2 \in C_2. \quad \square$$

Quizfrage 13.18: Gilt auch die folgende Umkehrung des Satzes: „Wenn zwei nichtleere, konvexe Mengen C_1 und C_2 durch eine Hyperebene getrennt werden können, dann gilt notwendigerweise $C_1 \cap C_2 = \emptyset$ “?

Für den folgenden, sogenannten **eigentlichen Trennungssatz 13.30** benötigen wir einige vorbereitende Aussagen.

Lemma 13.27 (Abschluss und relatives Inneres unter linearen Transformationen, vgl. [Rockafellar, 1970](#), Theorem 6.6).

Es sei $C \subseteq \mathbb{R}^n$ konvex und $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$. Dann ist auch $AC = \{Ax \mid x \in C\} \subseteq \mathbb{R}^m$ konvex, und es gilt:

$$(i) \quad \overline{AC} \subseteq \overline{AC}.$$

$$(ii) \quad A \operatorname{rel int}(C) = \operatorname{rel int}(AC).$$

Beweis. Im Fall $C = \emptyset$ ist nichts zu zeigen. Wir gehen also ab jetzt von $C \neq \emptyset$ aus. Die Konvexität von AC ist offensichtlich.

Aussage (i): Es sei $\bar{x} \in \overline{C}$, dann existiert eine Folge $(x^{(k)}) \subseteq C$ mit der Eigenschaft $x^{(k)} \rightarrow \bar{x}$. Das impliziert $Ax^{(k)} \in AC$ und $Ax^{(k)} \rightarrow A\bar{x}$, also gilt $A\bar{x} \in \overline{AC}$.

Aussage (ii): Es gilt

$$\begin{aligned} A \operatorname{rel int}(C) &\subseteq AC \subseteq \overline{AC} = \overline{A \operatorname{rel int}(C)} \quad \text{nach Satz 13.20} \\ &\subseteq \overline{A \operatorname{rel int}(C)} \quad \text{nach Aussage (i).} \end{aligned}$$

Die Bildung des Abschlusses in allen Termen dieser Ungleichung zeigt $\overline{AC} = \overline{A \operatorname{rel int}(C)}$. Aus [Folgerung 13.21](#) folgt damit:

$$\operatorname{rel int}(AC) = \operatorname{rel int}(A \operatorname{rel int}(C)) \subseteq A \operatorname{rel int}(C).$$

Um die umgekehrte Inklusion zu zeigen, sei $z \in A \operatorname{rel int}(C)$, d. h., $z = Az'$ für ein $z' \in \operatorname{rel int}(C)$. Weiter sei x irgendein Element von AC , d. h., $x = Ax'$ für ein $x' \in C$. Aus [Lemma 13.17 \(i\) \$\Rightarrow\$ \(iii\)](#) folgt, dass $y' := z' \pm \varepsilon (x' - z')$ für ein geeignetes $\varepsilon > 0$ in C liegt, also

$$y := Ay' = z \pm \varepsilon (x - z) \in AC.$$

Das heißt aber, dass die Voraussetzung aus [Lemma 13.17 \(iii\)](#) für die Menge AC erfüllt ist, also gehört z zu $\operatorname{rel int}(AC)$, was $A \operatorname{rel int}(C) \subseteq \operatorname{rel int}(AC)$ zeigt. \square

Beachte: Die [Aussage \(i\)](#) verwendet nur die Stetigkeit linearer Abbildungen und gilt auch für nicht-konvexe Mengen.

Folgerung 13.28 (Relatives Inneres der Minkowski-Summe, vgl. [Jarre, Stoer, 2004](#), Satz 7.2.8).

Es seien $C_1, C_2 \subseteq \mathbb{R}^n$ konvex. Dann gilt

$$\operatorname{rel int}(C_1) + \operatorname{rel int}(C_2) = \operatorname{rel int}(C_1 + C_2). \quad (13.19)$$

Beweis. Setze $C := C_1 \times C_2 \subseteq \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \cong \mathbb{R}^{2n}$ und $A := [\operatorname{Id} \quad \operatorname{Id}]$, sodass also $A \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = x_1 + x_2$ gilt. Dann ist C nach [Satz 11.3](#) konvex, und aus [Lemma 13.27](#) folgt

$$\operatorname{rel int}(C_1) + \operatorname{rel int}(C_2) = A \operatorname{rel int}(C) = \operatorname{rel int}(AC) = \operatorname{rel int}(C_1 + C_2). \quad \square$$

Vor dem Beweis des [eigentlichen Trennungssatzes 13.30](#) betrachten wir wieder zunächst den Spezialfall, dass eine der zu trennenden Mengen nur aus einem Punkt besteht.

Lemma 13.29 (Eigentliche Trennung von Punkt und konvexer Menge).

Es sei $C \subseteq \mathbb{R}^n$ konvex und nichtleer. Falls $0 \notin \text{rel int}(C)$ liegt, dann lassen sich 0 und C durch eine Hyperebene $H(a, \beta)$ eigentlich trennen.

Beweis. Im Fall $0 \notin \bar{C}$, wählen wir $a := \text{proj}_{\bar{C}}(0)$. Dann ist $a \neq 0$. Der [Projektionssatz 13.3](#) impliziert

$$(a - 0)^\top (x - a) \geq 0 \quad \text{für alle } x \in C,$$

also gilt $a^\top x \geq \|a\|^2 > 0 = a^\top 0$ für alle $x \in C$. Dies zeigt die eigentliche (und sogar die strikte) Trennung von 0 und C in diesem Fall.

Andernfalls gilt $0 \in \bar{C} \setminus \text{rel int}(C) = \text{rel } \partial(C)$. Ähnlich wie in [Lemma 13.25](#) (Fall 2b) können wir eine Folge $(x^{(k)}) \subseteq \text{aff}(C)$ mit der Eigenschaft $x^{(k)} \notin \bar{C}$ und $x^{(k)} \rightarrow 0$ konstruieren. Wegen $0 \in \bar{C} \subseteq \text{aff}(C)$ ist $U := \text{aff}(C)$ ein Unterraum von \mathbb{R}^n . Da 0 ein relativer Randpunkt von C ist, schneidet jede Kugel $B_\varepsilon(0)$ sowohl U als auch \bar{C} als auch das Komplement $\mathbb{R}^n \setminus \bar{C}$. Wir können somit $x^{(k)} \in B_{1/k}(0) \cap (\mathbb{R}^n \setminus \bar{C})$ wählen. Nun setzen wir

$$\hat{x}^{(k)} := \text{proj}_{\bar{C}}(x^{(k)}).$$

Diese Folge erfüllt $\hat{x}^{(k)} \neq x^{(k)}$ und $\hat{x}^{(k)} \rightarrow 0$, und der [Projektionssatz 13.3](#) impliziert

$$(\hat{x}^{(k)} - x^{(k)})^\top (x - \hat{x}^{(k)}) \geq 0 \quad \text{für alle } x \in C. \quad (13.20)$$

Wir setzen

$$a^{(k)} := \frac{\hat{x}^{(k)} - x^{(k)}}{\|\hat{x}^{(k)} - x^{(k)}\|}$$

und schreiben [\(13.20\)](#) als

$$(a^{(k)})^\top x \geq (a^{(k)})^\top \hat{x}^{(k)} \quad \text{für alle } x \in C. \quad (13.21)$$

Wegen $\|a^{(k)}\| = 1$ gibt es eine konvergente Teilfolge $a^{(k^{(\ell)})} \rightarrow a$ mit $\|a\| = 1$ und insbesondere $a \neq 0$. Weiter gehört wegen $x^{(k)} \in U$ und $\hat{x}^{(k)} \in \bar{C} \subseteq U$ auch $a^{(k)}$ zu U , und damit gilt auch $a \in U$. Der Grenzübergang auf der Teilfolge in [\(13.21\)](#) zeigt schließlich

$$a^\top x \geq a^\top 0 = 0 \quad \text{für alle } x \in C$$

Es bleibt zu zeigen, dass es ein $\bar{x} \in C$ gibt, sodass $a^\top \bar{x} > 0$ gilt. Nehmen wir an, dies sei nicht der Fall, d. h., es gelte $a^\top x = 0$ für alle $x \in C$. Weil $a \in U = \text{aff}(C)$ liegt, gibt es Punkte $x_i \in C$ und Koeffizienten α_i , sodass

$$a = \sum_{i=0}^m \alpha_i x_i$$

gilt sowie $\sum_{i=0}^m \alpha_i = 1$. Das impliziert aber

$$\|a\|^2 = a^\top \sum_{i=0}^m \alpha_i x_i = \sum_{i=0}^m \alpha_i \underbrace{a^\top x_i}_{=0} = 0,$$

im Widerspruch zu $\|a\| = 1$. Folglich muss es ein $\bar{x} \in C$ geben, sodass $a^T \bar{x} > 0$ gilt. \square

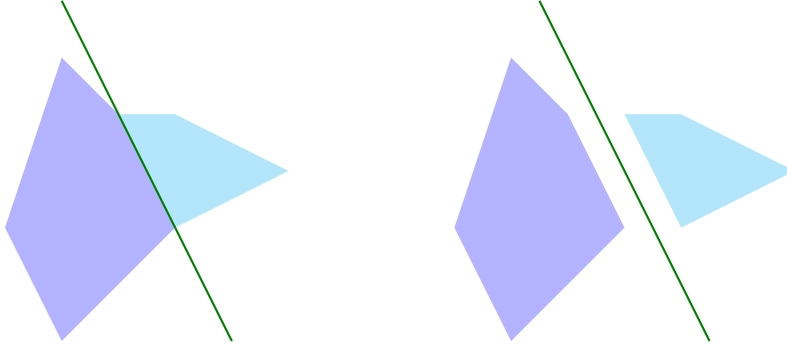


Abbildung 13.8: Illustration von Satz 13.30 (eigentliche Trennung) und Satz 13.32 (strikte Trennung).

Satz 13.30 (Eigentlicher Trennungssatz, vgl. Jarre, Stoer, 2004, Satz 7.2.8).

Es seien $C_1, C_2 \subseteq \mathbb{R}^n$ konvex und nichtleer. Genau dann lassen sich C_1 und C_2 durch eine Hyperebene $H(a, \beta)$ eigentlich trennen, wenn $\text{rel int}(C_1) \cap \text{rel int}(C_2) = \emptyset$ gilt.

Beweis. Wir nehmen zunächst an, dass C_1 und C_2 durch $H(a, \beta)$ eigentlich getrennt werden. Es gilt also $a^T x \leq \beta \leq a^T y$ für alle $x \in C_1$ und alle $y \in C_2$, und es gibt $\bar{x} \in C_1$ und $\bar{y} \in C_2$, für die $a^T \bar{x} < a^T \bar{y}$ gilt. Wir zeigen nun:

$$a^T x < a^T y \quad \text{für alle } x \in \text{rel int}(C_1) \text{ und alle } y \in \text{rel int}(C_2), \quad (13.22)$$

woraus dann $\text{rel int}(C_1) \cap \text{rel int}(C_2) = \emptyset$ folgt. Nehmen wir an, dass (13.22) unwahr ist, dann gibt es ein $x \in \text{rel int}(C_1)$ und ein $y \in \text{rel int}(C_2)$ mit $a^T x = a^T y$. Für hinreichend kleines $\varepsilon > 0$ sind $\hat{x} := x - \varepsilon(\bar{x} - x) \in C_1$ und $\hat{y} := y - \varepsilon(\bar{y} - y) \in C_2$. Dann ist aber

$$a^T(\hat{x} - \hat{y}) = a^T(x - \varepsilon(\bar{x} - x) - y + \varepsilon(\bar{y} - y)) = \varepsilon a^T(\bar{y} - \bar{x}) > 0$$

im Widerspruch zu $a^T x \leq a^T y$ für alle $x \in C_1$ und alle $y \in C_2$.

Umgekehrt nehmen wir nun an, dass $\text{rel int}(C_1) \cap \text{rel int}(C_2) = \emptyset$ gilt. Insbesondere ist dann

$$0 \notin \text{rel int}(C_1) - \text{rel int}(C_2) = \text{rel int}(C_1 - C_2),$$

wobei die Gleichheit der Mengen wie in Folgerung 13.28 folgt. Nach Lemma 13.29 können also 0 und $C := C_1 - C_2$ eigentlich getrennt werden. Das heißt, es gibt ein $a \in \mathbb{R}^n$, $a \neq 0$, sodass $a^T x \leq 0$ gilt für alle $x \in C$, und es existiert ein $\bar{x} \in C$ mit $a^T \bar{x} < 0$. Das bedeutet aber $a^T x_1 \leq a^T x_2$ für alle $x_1 \in C_1$ und alle $x_2 \in C_2$, und für gewisse $\bar{x}_1 \in C_1$ und $\bar{x}_2 \in C_2$ gilt $a^T \bar{x}_1 < a^T \bar{x}_2$. \square

Wir bereiten nun den strikten Trennungssatz 13.32 vor.

Lemma 13.31 (Abgeschlossenheit der Minkowskisumme).

Es seien $M_1, M_2 \subseteq \mathbb{R}^n$, M_1 abgeschlossen und M_2 kompakt. Dann ist die Minkowski-Summe $M_1 + M_2$ abgeschlossen.

Beachte: Die Konvexität der beiden Mengen spielt hier keine Rolle.

Beweis. Wir setzen $M := M_1 + M_2$. Falls M_1 oder M_2 die leere Menge ist, dann ist $M = \emptyset$ und die Aussage klar. Es sei nun also $M_1, M_2 \neq \emptyset$ und damit $M \neq \emptyset$. Weiter sei $z^{(k)} \subseteq M$ eine konvergente Folge mit Grenzwert z . Es existieren also Folgen $x^{(k)} \subseteq M_1$ und $y^{(k)} \subseteq M_2$ mit $z^{(k)} = x^{(k)} + y^{(k)}$.

$$M_2 \text{ ist beschränkt} \Rightarrow y^{(k)} \text{ ist beschränkt} \Rightarrow x^{(k)} \text{ ist beschränkt.}$$

Es existieren also konvergente Teilfolgen $x^{(k(\ell))} \rightarrow x$ und $y^{(k(\ell))} \rightarrow y$, sodass auch $z^{(k(\ell))} = x^{(k(\ell))} + y^{(k(\ell))} \rightarrow x + y$ für $\ell \rightarrow \infty$. M_1 und M_2 sind abgeschlossen, also liegt $x + y \in M_1 + M_2 = M$. Andererseits konvergiert $z^{(k(\ell))}$ auch gegen z , also gilt $z = x + y \in M$, d. h., M ist abgeschlossen. \square

Beachte: Das folgende Gegenbeispiel zeigt, dass die Minkowski-Summe zweier abgeschlossener Mengen nicht notwendig abgeschlossen ist, selbst wenn die Mengen konvex sind:

$$M_1 = \left\{ \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \mid xy \geq 1, x > 0 \right\} \quad \text{und} \quad M_2 = \mathbb{R} \times \{0\} \quad \text{mit} \quad M_1 + M_2 = \mathbb{R} \times (0, \infty).$$

Satz 13.32 (Strikter Trennungssatz, vgl. Geiger, Kanzow, 2002, Satz 2.24).

Es seien $C_1, C_2 \subseteq \mathbb{R}^n$ konvex und nichtleer sowie $C_1 \cap C_2 = \emptyset$. Weiter sei C_1 abgeschlossen und C_2 kompakt. Dann existiert eine Hyperebene $H(a, \beta)$, die C_1 und C_2 strikt trennt, also

$$a^T x_1 < \beta < a^T x_2 \quad \text{für alle } x_1 \in C_1 \text{ und alle } x_2 \in C_2. \quad (13.23)$$

Beweis. Wir betrachten die Optimierungsaufgabe

$$\text{Minimiere} \quad \|x_1 - x_2\|, \quad (x_1, x_2) \in C_1 \times C_2. \quad (13.24)$$

Eine Lösung (x_1^*, x_2^*) dieser Aufgabe, sofern existent, realisiert den Abstand zwischen C_1 und C_2 , also gilt $\|x_1^* - x_2^*\| = \inf \{\|x_1 - x_2\| \mid x_1 \in C_1, x_2 \in C_2\}$.

Um die Existenz einer Lösung zu zeigen, halten wir fest, dass die Menge $C := C_1 - C_2$ nichtleer sowie nach Satz 11.3 konvex und nach Lemma 13.31 abgeschlossen ist. (13.24) ist also gleichzeitig eine Projektionsaufgabe (13.1), und zwar projizieren wir den Vektor $0 \in \mathbb{R}^n$ auf die konvexe, abgeschlossene Menge C . Es sei nun $(x_1^*, x_2^*) \in C_1 \times C_2$ die nach Lemma 13.2 eindeutige Lösung von (13.24). Wir konstruieren daraus nun die Daten (a, β) der Hyperebene und setzen dazu

$$a := \frac{x_2^* - x_1^*}{2} \neq 0, \quad \hat{x} := \frac{x_1^* + x_2^*}{2}, \quad \beta := a^T \hat{x}.$$

Wir zeigen nun, dass

$$x_1^* = \text{proj}_{C_1}(\hat{x}), \quad x_2^* = \text{proj}_{C_2}(\hat{x}). \quad (13.25)$$

gilt. Dazu seien $x_1 \in C_1$ und $x_2 \in C_2$ beliebig, dann gilt

$$\begin{aligned} \|x_1^* - \hat{x}\| + \|\hat{x} - x_2^*\| &= \|x_1^* - \hat{x} + (\hat{x} - x_2^*)\|, \quad \text{denn } x_1^* - \hat{x} = \hat{x} - x_2^* \\ &= \|x_1^* - x_2^*\| \\ &\leq \|x_1 - x_2\|, \quad \text{denn } (x_1^*, x_2^*) \text{ ist optimal für (13.24)} \\ &\leq \|x_1 - \hat{x}\| + \|\hat{x} - x_2\| \quad \text{wegen der Dreiecksungleichung.} \end{aligned}$$

Setzen wir speziell $x_2 = x_2^*$ ein, so folgt

$$\|x_1^* - \hat{x}\| \leq \|x_1 - \hat{x}\| \quad \text{für alle } x_1 \in C_1.$$

Setzen wir dagegen $x_1 = x_1^*$, so folgt

$$\|x_2^* - \hat{x}\| \leq \|x_2 - \hat{x}\| \quad \text{für alle } x_2 \in C_2.$$

Dies bestätigt (13.25). Aus dem **Projektionssatz 13.3** folgt daher

$$-a^\top(x_1 - x_1^*) = (x_1^* - \hat{x})^\top(x_1 - x_1^*) \geq 0 \quad \text{für alle } x_1 \in C_1.$$

Dies impliziert

$$a^\top x_1 \leq a^\top x_1^* = a^\top \hat{x} + a^\top(x_1^* - \hat{x}) = \beta - \|a\|^2 < \beta \quad \text{für alle } x_1 \in C_1.$$

Analog zeigt man

$$a^\top x_2 \geq a^\top x_2^* = a^\top \hat{x} + a^\top(x_2^* - \hat{x}) = \beta + \|a\|^2 > \beta \quad \text{für alle } x_2 \in C_2. \quad \square$$

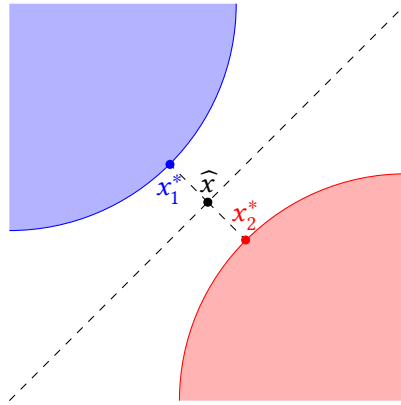


Abbildung 13.9: Illustration der Lage der Punkte x_1^* , x_2^* und \hat{x} im Beweis des **strikten Trennungssatzes 13.32**.

Quizfrage 13.19: Wie kann man die „Lücke“ $\inf\{a^\top x_2 \mid x_2 \in C_2\} - \sup\{a^\top x_1 \mid x_1 \in C_1\}$ interpretieren?

Beachte: Mit dem strikten Trennungssatz kann man z. B. beweisen, dass sich abgeschlossene konvexe Mengen als Schnitt abgeschlossener Halbräume darstellen lassen, siehe **Hausaufgabe 12.1**.

Bemerkung 13.33 (Der strikte Trennungssatz und das Farkas-Lemma).

Das **Farkas-Lemma 8.7** ist eine spezielle Version des **strikten Trennungssatzes 13.32**, und zwar für den Fall, dass C_1 ein abgeschlossener, konvexer Kegel (siehe **Lemma 6.10**)

$$C_1 = \{B^\top \xi \mid \xi \in \mathbb{R}^m, \xi \geq 0\}$$

und C_2 die kompakte einpunktige Menge $C_2 = \{c\}$ ist.

§ 14 DAS SUBDIFFERENTIAL UND DIE RICHTUNGSABLEITUNG KONVEXER FUNKTIONEN

Literatur: Geiger, Kanzow, 2002, Kapitel 6.3, Rockafellar, 1970

Ziel: Verallgemeinerung der Ableitung für nicht-glatte konvexe Funktionen

§ 14.1 DAS SUBDIFFERENTIAL

Definition 14.1 (Subdifferential).

Es sei $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ eine konvexe Funktion.

- (i) Ein Vektor $s \in \mathbb{R}^n$ heißt ein (Euklidischer) **Subgradient** von f im Punkt $x_0 \in \mathbb{R}^n$, wenn die **Subgradientenungleichung** gilt:

$$f(x) \geq f(x_0) + s^\top(x - x_0) \quad \text{für alle } x \in \mathbb{R}^n. \quad (14.1)$$

Wenn $f(x_0) \in \mathbb{R}$ liegt, dann sagt man: Die rechte Seite in (14.1) ist eine **lineare Minorante** (mit Euklidischem Gradienten s), die f in x_0 **stützt**, kurz: eine **lineare Stützfunktion**.⁴

- (ii) Die Menge $\partial f(x_0)$ aller Subgradienten im Punkt x_0 heißt das **Subdifferential** von f in x_0 .

- (iii) f heißt **subdifferenzierbar** (kurz: **subdiffbar**) im Punkt $x_0 \in \mathbb{R}^n$, wenn $\partial f(x_0) \neq \emptyset$ ist.

Beachte: (14.1) verallgemeinert die Ungleichung (11.14), die für konvexe *diffbare* Funktionen gilt. Das Subdifferential an der Stelle x_0 besteht gerade aus allen Gradienten linearer Funktionen, die f im Punkt x_0 stützen.

Eine einfache, aber wichtige Anwendung des Subdifferentials ist folgende.

Satz 14.2 (0 im Subdifferential).

Es sei $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ eine konvexe Funktion. Dann gilt:

- (i) Wenn x_0 ein globaler Minimierer von f ist, dann ist $0 \in \partial f(x_0)$.
- (ii) Wenn $f \not\equiv \infty$ ist und $0 \in \partial f(x_0)$ ist, dann ist x_0 ein globaler Minimierer von f .

Beweis. **Aussage (i):** Es sei x_0 ein globaler Minimierer von f , insbesondere gilt also $f(x_0) < \infty$. Aufgrund der globalen Optimalität von x_0 folgt

$$f(x) \geq f(x_0) + 0^\top(x - x_0),$$

⁴Eine andere Anschauung: $\begin{pmatrix} s \\ -1 \end{pmatrix}$ ist Normalenvektor einer Hyperebene durch den Punkt $\begin{pmatrix} x_0 \\ f(x_0) \end{pmatrix}$, die den (Epi-)Graphen in diesem Punkt stützt.

was $0 \in \partial f(x_0)$ bestätigt.

Aussage (ii): Aus $0 \in \partial f(x_0)$ folgt sofort mit (14.1), dass $f(x) \geq f(x_0)$ für alle $x \in \mathbb{R}^n$ gilt. Außerdem kann nicht $f(x_0) = \infty$ gelten, da f nach Voraussetzung nicht identisch ∞ ist. (**Quizfrage 14.1:** Genaue Begründung?) Damit ist x_0 ein globaler Minimierer von f , siehe Definition 12.1. \square

Satz 14.3 (Elementare Eigenschaften des Subdifferentials). *Es sei $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ eine konvexe Funktion und $x_0 \in \mathbb{R}^n$. Dann ist $\partial f(x_0)$ abgeschlossen und konvex (möglicherweise leer).*

Beweis. Der Beweis ist Inhalt von Hausaufgabe 12.2. \square

Bemerkung 14.4 (Zum Begriff „Subgradient“). Die Bezeichnung **Subgradient** ist eigentlich irreführend, weil das Subdifferential den Begriff der Ableitung ersetzt und nicht den Gradienten (der ja nichts anderes als eine vom verwendeten Innenprodukt abhängige Darstellung der Ableitung ist). Konzeptionell besser wäre es daher, einen Vektor $s \in \mathbb{R}_n$ (Zeilenvektor) eine **Subableitung** von f im Punkt $x_0 \in \mathbb{R}^n$ zu nennen, wenn $f(x) \geq f(x_0) + s(x - x_0)$ für alle $x \in \mathbb{R}^n$ gilt, und das Subdifferential aus allen Subableitungen bestehen zu lassen. Leider ist diese Bezeichnungsweise überhaupt nicht verbreitet. Wir folgen daher der allgemein üblichen Bezeichnung und sprechen von Subgradienten (hier stets im Sinne des Euklidischen Skalarprodukts).

Quizfrage 14.2: Wie würde die Definition eines Subgradienten von f im Punkt x_0 bzgl. des M -Skalarprodukts aussehen?

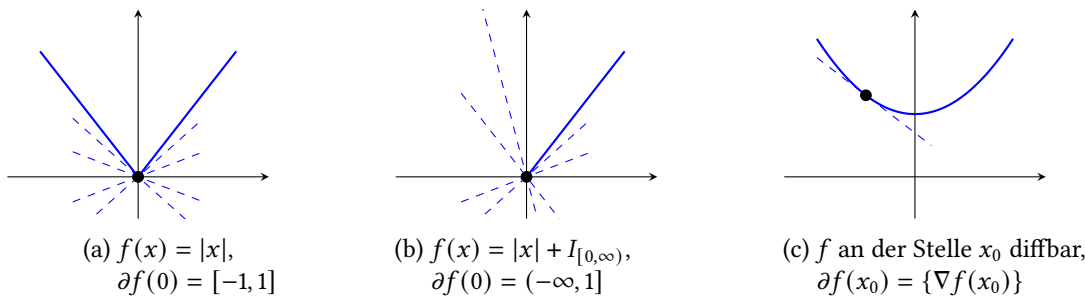


Abbildung 14.1: Das Subdifferential $\partial f(x_0)$ besteht aus den Steigungen aller linearen Minoranten an f im Punkt x_0 .

Beispiel 14.5 (Beispiele zum Subdifferential).

Wir betrachten als Beispiel für f verschiedene Normen auf \mathbb{R}^n . Der Nachweis der nachfolgenden Aussagen ist Inhalt von Hausaufgabe 12.3.

(i) $f(x) = \|x\|_1 = \sum_{i=1}^n |x_i|$. Dann ist $s \in \partial f(x)$ genau dann, wenn gilt:

$$s_i \in \begin{cases} \{-1\} & \text{falls } x_i < 0, \\ [-1, 1] & \text{falls } x_i = 0, \\ \{1\} & \text{falls } x_i > 0, \end{cases}$$

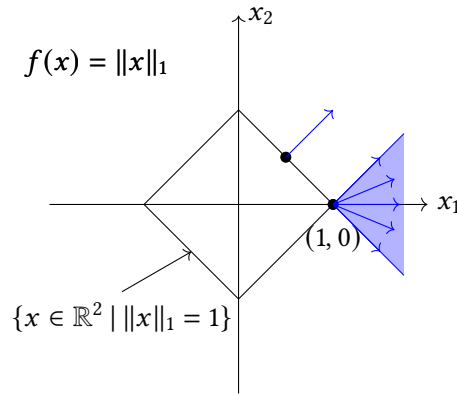


Abbildung 14.2: Das Subdifferential der 1-Norm $\|x\|_1 = |x_1| + |x_2|$ (Beispiel 14.5) in zwei Punkten aus der Levelmenge $\{x \in \mathbb{R}^2 \mid \|x\|_1 = 1\}$.

für alle $i = 1, \dots, n$.

(ii) $f(x) = \|x\|_2 = \left(\sum_{i=1}^n |x_i|^2\right)^{1/2}$. Dann gilt

$$\partial f(x) = \begin{cases} \left\{ \frac{x}{\|x\|_2} \right\}, & \text{falls } x \neq 0, \\ \{s \in \mathbb{R}^n \mid \|s\|_2 \leq 1\}, & \text{falls } x = 0. \end{cases}$$

(iii) $f(x) = \|x\|_\infty = \max_{i=1, \dots, n} |x_i|$. Dann gilt für $x \neq 0$

$$\partial f(x) = \left\{ s \in \mathbb{R}^n \mid \begin{array}{l} \|s\|_1 = 1, \ s_i \geq 0 \text{ für diejenigen } i \text{ mit } x_i = \|x\|_\infty, \\ s_i \leq 0 \text{ für diejenigen } i \text{ mit } -x_i = \|x\|_\infty, \\ \text{und } s_i = 0 \text{ für diejenigen } i \text{ mit } |x_i| < \|x\|_\infty \end{array} \right\}$$

sowie

$$\partial f(0) = \{s \in \mathbb{R}^n \mid \|s\|_1 \leq 1\}.$$

Das folgende Beispiel zeigt, dass das Subdifferential eigentlicher konvexer Funktionen auch in Punkten, die zu $\text{dom } f$ gehören, leer sein kann.

Beispiel 14.6 (Leeres Subdifferential).

(a) Es sei

$$f(x) := \begin{cases} -\sqrt{1-x^2} & \text{für } x \in [-1, 1], \\ \infty & \text{sonst.} \end{cases}$$

Dann ist f eine eigentliche, konvexe, unterhalbstetige Funktion, aber $\partial f(1) = \partial f(-1) = \emptyset$.

(b) Es sei

$$f(x) := \begin{cases} 1 & \text{für } x = 0, \\ x & \text{für } x > 0, \\ \infty & \text{für } x < 0. \end{cases}$$

Dann ist f eine eigentliche, konvexe (aber nicht unterhalbstetige) Funktion, und es gilt $\partial f(0) = \emptyset$.

Dieses Beispiel deutet schon darauf hin, dass es die Punkte des relativen Randes von $\text{dom } f$ sind, in denen das Subdifferential leer sein kann. In der Tat gilt folgender Satz:

Satz 14.7 (Wann ist das Subdifferential leer bzw. nichtleer? vgl. Rockafellar, 1970, Theorem 23.4).

Es sei $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ konvex.

(i) Falls f nicht identisch ∞ ist, dann gilt: Für alle $x_0 \notin \text{dom } f$ ist $\partial f(x_0) = \emptyset$.

(ii) Für alle $x_0 \in \text{rel int}(\text{dom } f)$ ist $\partial f(x_0) \neq \emptyset$.

Beweis. **Aussage (i):** Es sei $x_0 \notin \text{dom } f$, also $f(x_0) = \infty$. Nach Voraussetzung existiert ein $x \in \text{dom } f$. Die Subgradientenungleichung (14.1), also

$$\underbrace{f(x)}_{<\infty} \geq \underbrace{f(x_0)}_{=\infty} + s^T(x - x_0)$$

kann mit diesem x für kein $s \in \mathbb{R}^n$ erfüllt sein.

Aussage (ii): Es sei $x_0 \in \text{rel int}(\text{dom } f) \subseteq \text{dom } f$. Falls $f(x_0) = -\infty$ gilt, so ist offensichtlich $\partial f(x_0) = \mathbb{R}^n$ und die Aussage bewiesen. Wir gehen also nun von $f(x_0) \in \mathbb{R}$ aus und betrachten den Epigraphen

$$\text{epi } f = \left\{ \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R} \mid y \geq f(x) \right\}.$$

Nach Satz 11.16 ist $\text{epi } f \subseteq \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}$ konvex. Wir wenden den eigentlichen Trennungssatz 13.30 an, um die Mengen $C_1 = \left\{ \begin{pmatrix} x_0 \\ f(x_0) \end{pmatrix} \right\}$ und $C_2 = \text{epi } f$ eigentlich zu trennen. Beachte, dass $\text{rel int}(C_1) \cap \text{rel int}(C_2) = \emptyset$ ist, da der Punkt $\begin{pmatrix} x_0 \\ f(x_0) \end{pmatrix}$ zu $\text{epi } f$, aber nicht zu $\text{rel int}(\text{epi } f)$ gehört (**Quizfrage 14.3:** Begründung?). Es existiert also eine Hyperebene $H(a, \beta)$ mit Normalenvektor $a = -(s, \sigma) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}$, $(s, \sigma) \neq 0$, die den Punkt $\begin{pmatrix} x_0 \\ f(x_0) \end{pmatrix}$ und $\text{epi } f$ eigentlich trennt, demnach gilt

$$\begin{pmatrix} s \\ \sigma \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} s \\ \sigma \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} x_0 \\ f(x_0) \end{pmatrix} \quad \text{für alle } \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \in \text{epi } f, \quad (14.2)$$

und es existiert ein Punkt $\begin{pmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{pmatrix} \in \text{epi } f$ mit der Eigenschaft

$$\begin{pmatrix} s \\ \sigma \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{pmatrix} < \begin{pmatrix} s \\ \sigma \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} x_0 \\ f(x_0) \end{pmatrix}. \quad (14.3)$$

Wir zeigen $\sigma \leq 0$ und unterscheiden drei Fälle:

(i) Ist $f(x_0) = 0$, so folgt aus (14.2) mit der Wahl $x = x_0$ und $y = 1$:

$$s^T x_0 + \sigma \leq s^T x_0 + 0.$$

(ii) Ist $f(x_0) > 0$, so folgt aus (14.2) mit der Wahl $x = x_0$ und $\gamma = 2f(x_0)$:

$$s^\top x_0 + 2\sigma f(x_0) \leq s^\top x_0 + \sigma f(x_0).$$

(iii) Ist $f(x_0) < 0$, so folgt aus (14.2) mit der Wahl $x = x_0$ und $\gamma = 0$:

$$s^\top x_0 + 0 \leq s^\top x_0 + \sigma f(x_0).$$

In allen drei Fällen folgt aus der jeweiligen Ungleichung $\sigma \leq 0$.

Wir zeigen jetzt, dass sogar $\sigma < 0$ gilt, indem wir die Annahme $\sigma = 0$ zum Widerspruch führen. Aus $\sigma = 0$ folgt mit (14.3) $s^\top(\bar{x} - x_0) < 0$. Da $x_0 \in \text{rel int}(\text{dom } f)$ war, existiert nach Lemma 13.17 ein $\varepsilon > 0$, sodass auch $\tilde{x} := x_0 - \varepsilon(\bar{x} - x_0)$ noch zu $\text{dom } f$ gehört. Durch Einsetzen von $\left(\begin{smallmatrix} \tilde{x} \\ f(\tilde{x}) \end{smallmatrix}\right) \in \text{epi } f$ in (14.2) erhalten wir den Widerspruch

$$s^\top x_0 - \varepsilon \underbrace{s^\top(\bar{x} - x_0)}_{<0} \leq s^\top x_0.$$

Durch positive Skalierung des Normalenvektors $a = -(s, \sigma)$ können wir nun o. B. d. A. $\sigma = -1$ annehmen. Dann ergibt sich aus (14.2) mit der Wahl $\gamma = f(x)$ die Folgerung

$$s^\top x - f(x) \leq s^\top x_0 - f(x_0) \quad \text{für alle } x \in \text{dom } f.$$

Da dieselbe Ungleichung trivialerweise auch für $x \notin \text{dom } f$ gilt, erhalten wir schließlich

$$f(x) \geq f(x_0) + s^\top(x - x_0) \quad \text{für alle } x \in \mathbb{R}^n,$$

d. h., $s \in \partial f(x_0)$. □

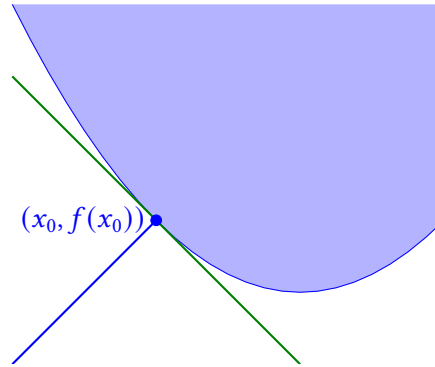


Abbildung 14.3: Konstruktion eines Subgradienten aus dem Beweis von Satz 14.7 mit Hilfe des Normalenvektors einer Hyperebene, die den Punkt $(x_0, f(x_0))$ eigentlich von $\text{epi } f$ trennt.

Ein wichtiger Satz über das Subdifferential ist die folgende Summenregel, deren Beweis wiederum den [eigentlichen Trennungssatz 13.30](#) verwendet.

Satz 14.8 (Summenregel für das Subdifferential, vgl. [Rockafellar, 1970](#), Theorem 23.8).

Es seien $f_1, f_2: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$ zwei konvexe Funktionen.

(i) Es gilt

$$\partial f_1(x_0) + \partial f_2(x_0) \subseteq \partial(f_1 + f_2)(x_0) \quad \text{für alle } x_0 \in \mathbb{R}^n. \quad (14.4)$$

(ii) Falls

$$(\text{rel int dom } f_1) \cap (\text{rel int dom } f_2) \neq \emptyset \quad (14.5)$$

erfüllt ist, dann gilt sogar

$$\partial f_1(x_0) + \partial f_2(x_0) = \partial(f_1 + f_2)(x_0) \quad \text{für alle } x_0 \in \mathbb{R}^n. \quad (14.6)$$

Beweis. **Aussage (i):** Es sei $x_0 \in \mathbb{R}^n$ beliebig, aber fest. Falls $\partial f_1(x_0) = \emptyset$ oder $\partial f_2(x_0) = \emptyset$ ist, dann ist die linke Seite in (14.4) die leere Menge und nichts zu zeigen. Es sei also $s \in \partial f_1(x_0) + \partial f_2(x_0)$, d. h., $s = s_1 + s_2$ mit $s_1 \in \partial f_1(x_0)$ und $s_2 \in \partial f_2(x_0)$. Die Subdifferentialungleichung (14.1) liefert

$$\begin{aligned} f_1(x) &\geq f_1(x_0) + s_1^\top(x - x_0), \\ f_2(x) &\geq f_2(x_0) + s_2^\top(x - x_0) \end{aligned}$$

für alle $x \in \mathbb{R}^n$. Die Addition der Ungleichungen ergibt (**Quizfrage 14.4:** Warum stimmt das auch dann, wenn hier nicht-endliche Funktionswerte vorkommen?)

$$(f_1 + f_2)(x) \geq (f_1 + f_2)(x_0) + (s_1 + s_2)^\top(x - x_0),$$

für alle $x \in \mathbb{R}^n$, d. h., wir haben $s = s_1 + s_2 \in \partial(f_1 + f_2)(x_0)$.

Aussage (ii): Wir nehmen jetzt an, dass $(\text{rel int dom } f_1) \cap (\text{rel int dom } f_2) \neq \emptyset$ gilt und zeigen die umgekehrte Inklusion. Es sei dazu weiterhin $x_0 \in \mathbb{R}^n$ beliebig, aber fest. Wir können von $\partial(f_1 + f_2)(x_0) \neq \emptyset$ ausgehen, sonst ist wegen (14.4) auch $\partial f_1(x_0) = \partial f_2(x_0) = \emptyset$ und die Behauptung gezeigt.

Es sei also $s \in \partial(f_1 + f_2)(x_0)$. Aus **Satz 14.7 (i)** folgt $x_0 \in \text{dom}(f_1 + f_2)$, also sind $f_1(x_0)$ und $f_2(x_0)$ beide endlich. Wir müssen zeigen, dass s zerlegt werden kann in $s = s_1 + s_2$ mit $s_1 \in \partial f_1(x_0)$ und $s_2 \in \partial f_2(x_0)$.

Wir setzen

$$\begin{aligned} g_1(x) &:= f_1(x + x_0) - f_1(x_0) - s^\top x \\ g_2(x) &:= f_2(x + x_0) - f_2(x_0). \end{aligned}$$

Diese Funktionen sind zunächst wohldefiniert, denn der Fall $\infty - \infty$ tritt nicht auf, da $f_1(x_0)$ und $f_2(x_0)$ beide endlich sind. Die Funktionen g_1 und g_2 erfüllen außerdem noch immer die Voraussetzung $(\text{rel int dom } g_1) \cap (\text{rel int dom } g_2) \neq \emptyset$, und die Voraussetzung $s \in \partial(f_1 + f_2)(x_0)$ wird zu $0 \in \partial(g_1 + g_2)(\tilde{x}_0)$ mit $\tilde{x}_0 := 0$. (**Quizfrage 14.5:** Details?) Wir müssen jetzt also zeigen: Es gibt ein $\tilde{s} \in \partial g_1(0)$, sodass $-\tilde{s} \in \partial g_2(0)$ ist. Dies erfolgt unter Anwendung des **eigentlichen Trennungssatzes 13.30**.

Wir betrachten dazu die konvexen Mengen⁵

$$\begin{aligned} C_1 &:= \left\{ \begin{pmatrix} x \\ \gamma \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R} \mid \gamma \geq g_1(x) \right\} = \text{epi } g_1, \\ C_2 &:= \left\{ \begin{pmatrix} x \\ \gamma \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R} \mid \gamma \leq -g_2(x) \right\} = \text{hypo } -g_2. \end{aligned}$$

(Quizfrage 14.6: Warum sind beide dieser Mengen nichtleer?) Lemma 13.18 zeigt

$$\begin{aligned} \text{rel int}(C_1) &= \left\{ \begin{pmatrix} x \\ \gamma \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R} \mid x \in \text{rel int}(\text{dom } g_1), \gamma > g_1(x) \right\}, \\ \text{rel int}(C_2) &= \left\{ \begin{pmatrix} x \\ \gamma \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R} \mid x \in \text{rel int}(\text{dom } g_2), \gamma < -g_2(x) \right\}. \end{aligned}$$

Wegen $0 \in \partial(g_1 + g_2)(\tilde{x}_0)$ ist $\tilde{x}_0 = 0$ nach Satz 14.2 (ii) ein globaler Minimierer für $g_1 + g_2$ mit Funktionswert $(g_1 + g_2)(0) = 0$. Daraus folgt, dass $\text{rel int}(C_1) \cap \text{rel int}(C_2) = \emptyset$ ist. (Quizfrage 14.7: Details?)

Nach dem eigentlichen Trennungssatz 13.30 lassen sich nun C_1 und C_2 durch eine Hyperebene $H(a, \beta)$ eigentlich trennen. Wir schreiben den Normalenvektor als $a = \begin{pmatrix} \tilde{s} \\ \sigma \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}$. Es gilt also

$$\begin{pmatrix} \tilde{s} \\ \sigma \end{pmatrix}^\top \begin{pmatrix} x_1 \\ \gamma_1 \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} \tilde{s} \\ \sigma \end{pmatrix}^\top \begin{pmatrix} x_2 \\ \gamma_2 \end{pmatrix} \quad \text{für alle } \begin{pmatrix} x_1 \\ \gamma_1 \end{pmatrix} \in C_1 \text{ und } \begin{pmatrix} x_2 \\ \gamma_2 \end{pmatrix} \in C_2, \quad (14.7)$$

und es existieren $\begin{pmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{\gamma}_1 \end{pmatrix} \in C_1$ und $\begin{pmatrix} \bar{x}_2 \\ \bar{\gamma}_2 \end{pmatrix} \in C_2$, für die die Ungleichung strikt ist. Die Komponente σ kann nicht gleich Null sein, denn sonst hätten wir $\text{dom } g_1$ und $\text{dom } g_2$ durch eine Hyperebene mit Normalenvektor \tilde{s} eigentlich getrennt, was aufgrund der Voraussetzung $(\text{rel int dom } g_1) \cap (\text{rel int dom } g_2) \neq \emptyset$ und Satz 13.30 aber nicht möglich ist.

Wegen $(g_1 + g_2)(0) = 0$ liegt $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \in C_1 \cap C_2$. Aus (14.7) folgt somit $\sigma \leq 0$. Da $\sigma \neq 0$ ist, können wir a so skalieren, dass $\sigma = -1$ wird. Außerdem gilt wegen $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \in C_1 \cap C_2$, dass die eigentlich trennende Hyperebene $H(a, \beta)$ den Offset $\beta = 0$ hat. Es folgt nun aus (14.7)

$$\begin{pmatrix} \tilde{s} \\ -1 \end{pmatrix}^\top \begin{pmatrix} x_1 \\ \gamma_1 \end{pmatrix} \leq 0 \leq \begin{pmatrix} \tilde{s} \\ -1 \end{pmatrix}^\top \begin{pmatrix} x_2 \\ \gamma_2 \end{pmatrix} \quad \text{für alle } \begin{pmatrix} x_1 \\ \gamma_1 \end{pmatrix} \in C_1 \text{ und } \begin{pmatrix} x_2 \\ \gamma_2 \end{pmatrix} \in C_2,$$

also

$$\begin{aligned} \tilde{s}^\top x &\leq \gamma \quad \text{für alle } \begin{pmatrix} x \\ \gamma \end{pmatrix} \in C_1, \\ \tilde{s}^\top x &\geq \gamma \quad \text{für alle } \begin{pmatrix} x \\ \gamma \end{pmatrix} \in C_2. \end{aligned}$$

Wegen $g_1(0) = g_2(0) = 0$ und der Definition von C_1 und C_2 heißt das aber

$$\begin{aligned} g_1(x) &\geq g_1(0) + \tilde{s}^\top(x - 0) \quad \text{für alle } x \in \mathbb{R}^n, \\ g_2(x) &\geq g_2(0) + (-\tilde{s})^\top(x - 0) \quad \text{für alle } x \in \mathbb{R}^n. \end{aligned}$$

Also folgt schließlich $\tilde{s} \in \partial g_1(\tilde{x}_0)$ und $-\tilde{s} \in \partial g_2(\tilde{x}_0)$, was zu zeigen war. \square

⁵Der Hypograph einer Funktion $f := \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ ist die Menge

$$\text{hypo } f := \left\{ \begin{pmatrix} x \\ \gamma \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R} \mid \gamma \leq f(x) \right\}.$$

Der Hypograph von f ist konvex genau dann, wenn f konkav ist.

Wie das folgende Beispiel zeigt, ist die Gleichheit der Subdifferentialia (14.6) ohne eine Regularitätsbedingung wie $(\text{rel int dom } f_1) \cap (\text{rel int dom } f_2) \neq \emptyset$ im Allgemeinen falsch.

Beispiel 14.9 (Phelps, 1993, Bemerkung nach Theorem 3.16).

Es seien $f_1 := I_{C_1}$ und $f_2 := I_{C_2}$ zwei Indikatorfunktionen auf \mathbb{R}^2 , und zwar für die konvexen Mengen

$$\begin{aligned} C_1 &:= \{(x, y) \mid y \geq x^2\} = \text{epi}(x \mapsto x^2) \\ C_2 &:= \{(x_1, x_2) \mid x_2 = 0\}. \end{aligned}$$

Dann ist $\partial f_1(0, 0) = \{(s_1, s_2) \mid s_1 = 0, s_2 \leq 0\}$ und $\partial f_2(0, 0) = \{(s_1, s_2) \mid s_1 = 0\}$, jedoch $\partial(f_1 + f_2)(0, 0) = \mathbb{R}^2$. Die Regularitätsbedingung (14.5) ist nicht erfüllt, denn es gilt $\text{dom } f_1 \cap \text{dom } f_2 = C_1 \cap C_2 = \{(0, 0)\}$, und dieser Punkt ist kein relativ innerer Punkt von C_1 .

Wir schließen diesen Abschnitt mit der Kettenregel, die wir hier ohne Beweis angeben.

Satz 14.10 (Kettenregel für das Subdifferential, vgl. Rockafellar, 1970, Theorem 23.9⁶).

Es sei $f: \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$ konvex und $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$. Weiter sei $g: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$ definiert durch $g(x) := f(Ax)$.

(i) Es gilt:

$$A^T \partial f(Ax_0) \subseteq \partial g(x_0) \quad \text{für alle } x_0 \in \mathbb{R}^n. \quad (14.8)$$

(ii) Falls

$$(\text{Bild } A) \cap (\text{rel int dom } f) \neq \emptyset \quad (14.9)$$

erfüllt ist, dann gilt sogar

$$A^T \partial f(Ax_0) = \partial g(x_0) \quad \text{für alle } x_0 \in \mathbb{R}^n. \quad (14.10)$$

Weitere Eigenschaften des Subdifferentials folgen in § 14.3.

§ 14.2 DIE RICHTUNGSABLEITUNG

Frage: Gibt es einen Zusammenhang des Subdifferentials mit der Richtungsableitung?

Definition 14.11 ((Einseitige) Richtungsableitung).

⁶In Rockafellar, 1970, Theorem 23.9 wird f als eigentlich vorausgesetzt. Der Fall $f \equiv \infty$, den unsere Formulierung des Satzes mit abdeckt, ist aber klar, da dann auch $g(x) \equiv \infty$ ist und (14.8) dann $\mathbb{R}^n \subseteq \mathbb{R}^n$ lautet.

Es seien $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ eine (nicht notwendigerweise konvexe) Funktion, $x_0 \in \mathbb{R}^n$ ein Punkt, an dem $f(x_0)$ endlich ist, und $d \in \mathbb{R}^n$. Dann heißt der Grenzwert (sofern er in $\mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ existiert)

$$f'(x_0; d) := \lim_{t \searrow 0} \frac{f(x_0 + t d) - f(x_0)}{t} \quad (14.11)$$

die **(einseitige) Richtungsableitung** der Funktion f im Punkt x_0 in Richtung d .

Beachte: Da $f(x_0)$ endlich ist, ist der Differenzenquotient für alle $t > 0$ definiert und nimmt Werte in $\mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ an.

Beispiel 14.12 (Beispiele zur Richtungsableitung).

Wir betrachten als Beispiel für f wie in [Beispiel 14.5](#) verschiedene Normen auf \mathbb{R}^n .

(i) $f(x) = \|x\|_1 = \sum_{i=1}^n |x_i|$. Dann gilt

$$f'(x; d) = \sum_{\substack{i=1 \\ x_i > 0}}^n d_i - \sum_{\substack{i=1 \\ x_i < 0}}^n d_i + \sum_{\substack{i=1 \\ x_i = 0}}^n |d_i|.$$

(ii) $f(x) = \|x\|_2 = \left(\sum_{i=1}^n |x_i|^2 \right)^{1/2}$. Dann gilt

$$f'(x; d) = \begin{cases} \frac{x^\top d}{\|x\|_2}, & \text{falls } x \neq 0, \\ \|d\|_2, & \text{falls } x = 0. \end{cases}$$

(iii) $f(x) = \|x\|_\infty = \max_{i=1, \dots, n} |x_i|$. Dann gilt für $x \neq 0$

$$f'(x; d) = \max \{ (\operatorname{sgn} x_i) d_i \mid i = 1, \dots, n, |x_i| = \|x\|_\infty \}$$

sowie

$$f'(0; d) = \|d\|_\infty.$$

Zur weiteren Untersuchung der Richtungsableitung führen wir die Abkürzung

$$q(t) := \frac{f(x_0 + t d) - f(x_0)}{t}, \quad t > 0 \quad (14.12)$$

für den Differenzenquotienten ein, wenn die Funktion f , der Punkt x_0 und die Richtung $d \in \mathbb{R}^n$ aus dem Kontext klar sind.

Lemma 14.13 (Monotonie des Differenzenquotienten, vgl. [Rockafellar, 1970](#), Theorem 23.1).

Es seien $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ konvex, $x_0 \in \mathbb{R}^n$ ein Punkt, an dem $f(x_0)$ endlich ist, und $d \in \mathbb{R}^n$. Dann ist $q(t)$ definiert und monoton wachsend auf $\mathbb{R}_{>0}$.

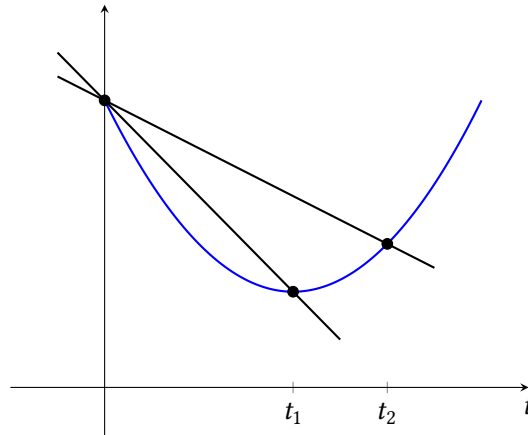


Abbildung 14.4: Illustration der Monotonie des Differenzenquotienten q (Lemma 14.13).

Beweis. Es sei $0 < t_1 < t_2$. Aus

$$x_0 + t_1 d = \frac{t_1}{t_2}(x_0 + t_2 d) + \left(1 - \frac{t_1}{t_2}\right) x_0$$

und der Konvexität von f folgt

$$f(x_0 + t_1 d) = f\left(\frac{t_1}{t_2}(x_0 + t_2 d) + \left(1 - \frac{t_1}{t_2}\right) x_0\right) \leq \frac{t_1}{t_2} f(x_0 + t_2 d) + \left(1 - \frac{t_1}{t_2}\right) f(x_0).$$

Da $f(x_0)$ endlich ist, ist die rechte Seite definiert. Aus der obigen Ungleichung folgt weiter

$$f(x_0 + t_1 d) - f(x_0) \leq \frac{t_1}{t_2} f(x_0 + t_2 d) - \frac{t_1}{t_2} f(x_0)$$

und damit $q(t_1) \leq q(t_2)$. □

Quizfrage 14.8: An welcher Stelle im Beweis geht die Voraussetzung ein, dass $f(x_0)$ endlich ist?

Satz 14.14 (Existenz und elementare Eigenschaften der Richtungsableitung, vgl. Rockafellar, 1970, Theorem 23.1).

Es seien $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ konvex und $x_0 \in \mathbb{R}^n$ ein Punkt, an dem $f(x_0)$ endlich ist. Dann existiert die Richtungsableitung $f'(x_0; d)$ mit Werten in $\mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ für alle Richtungen $d \in \mathbb{R}^n$. Es gilt

$$f(x) \geq f(x_0) + f'(x_0; x - x_0) \quad \text{für alle } x \in \mathbb{R}^n. \quad (14.13)$$

Die Richtungsableitung hat folgende Eigenschaften:

(i) Die Funktion

$$\mathbb{R}^n \ni d \mapsto f'(x_0; d) \in \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\} \quad (14.14)$$

ist positiv homogen und konvex.

(ii) Die Funktion (14.14) ist **subadditiv**:

$$f'(x_0; d_1 + d_2) \leq f'(x_0; d_1) + f'(x_0; d_2) \quad (14.15)$$

für alle $d_1, d_2 \in \mathbb{R}^n$, für die die rechte Seite definiert ist.

(iii) Es gilt $f'(x_0; 0) = 0$.

(iv) Es gilt

$$-f'(x_0; -d) \leq f'(x_0; d) \quad \text{für alle } d \in \mathbb{R}^n.$$

(v) Es sei U der Richtungsraum von $\text{aff}(\text{dom } f)$ und $x_0 \in \text{rel int}(\text{dom } f)$. Dann ist $f'(x_0; d) \in \mathbb{R}$ (also die Richtungsableitung endlich) für alle $d \in U$ und $f'(x_0; d) = \infty$ für alle $d \notin U$.

Beachte: Dass es wichtig ist, in (14.15) nur Fälle zu betrachten, für die die rechte Seite definiert ist, sieht man an dem folgenden Beispiel:

$$f(x) = \begin{cases} -\sqrt{1-x^2}, & \text{für } |x| \leq 1, \\ \infty, & \text{sonst.} \end{cases}$$

An der Stelle $x_0 = 1$ ist $f'(x_0; d) = \infty$ für $d > 0$, $f'(x_0; d) = -\infty$ für $d < 0$ und $f'(x_0; 0) = 0$, und d_1 und d_2 können beide Vorzeichen haben.

Beweis. Aus der Monotonie von q (Lemma 14.13) folgt

$$f'(x_0; d) = \lim_{t \searrow 0} q(t) = \inf_{t > 0} q(t) \in \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}.$$

Mit $x \in \mathbb{R}^n$ beliebig und $d := x - x_0$ folgt außerdem aus der Monotonie von q

$$f'(x_0; d) = \lim_{t \searrow 0} q(t) \leq q(1) = \frac{f(x_0 + 1 \cdot d) - f(x_0)}{1} = f(x) - f(x_0)$$

und damit die Ungleichung (14.13).

Zu Aussage (i): Für $\alpha > 0$ und $d \in \mathbb{R}^n$ gilt

$$f'(x_0; \alpha d) = \lim_{t \searrow 0} \frac{f(x_0 + t \alpha d) - f(x_0)}{t} = \alpha \lim_{t \searrow 0} \frac{f(x_0 + t \alpha d) - f(x_0)}{\alpha t} = \alpha f'(x_0; d),$$

d. h., $d \mapsto f'(x_0; d)$ ist positiv homogen. Um die Konvexität zu zeigen, seien $d_1, d_2 \in \mathbb{R}^n$ und $\alpha \in [0, 1]$. Wir müssen zeigen (vgl. (11.8)):

$$f'(x_0; \alpha d_1 + (1 - \alpha) d_2) \leq \alpha f'(x_0; d_1) + (1 - \alpha) f'(x_0; d_2), \quad (14.16)$$

sofern die rechte Seite definiert ist, wovon wir ab sofort ausgehen. Es gibt folgende Fälle.

- $f'(x_0; d_1)$ und $f'(x_0; d_2)$ sind beide endlich. Aufgrund der Monotonie des Differenzenquotienten müssen dann auch $f(x_0 + t d_1)$ und $f(x_0 + t d_2)$ für $t \in (0, t_0)$ endlich sein. Für diese Werte von t folgt

$$\begin{aligned} & f(x_0 + t(\alpha d_1 + (1 - \alpha) d_2)) - f(x_0) \\ &= f(\alpha(x_0 + t d_1) + (1 - \alpha)(x_0 + t d_2)) - f(x_0) \\ &\leq \alpha [f(x_0 + t d_1) - f(x_0)] + (1 - \alpha) [f(x_0 + t d_2) - f(x_0)] \end{aligned} \quad (14.17)$$

aus der Konvexität von f . Die Division durch $t > 0$ und der (monotone) Grenzübergang $\lim_{t \searrow 0}$ auf der linken Seite zeigen weiter

$$\begin{aligned} & f'(x_0; \alpha d_1 + (1 - \alpha) d_2) \\ & \leq \frac{f(x_0 + t(\alpha d_1 + (1 - \alpha) d_2)) - f(x_0)}{t} \\ & \leq \alpha \frac{f(x_0 + t d_1) - f(x_0)}{t} + (1 - \alpha) \frac{f(x_0 + t d_2) - f(x_0)}{t} \end{aligned} \quad (14.18)$$

für $t \in (0, t_0)$. Durch Grenzübergang auf der rechten Seite der Ungleichung folgt nun die gewünschte Ungleichung (14.16).

- Dasselbe Argument kann auf den Fall erweitert werden, dass $f'(x_0; d_1)$ und $f'(x_0; d_2)$ endlich oder ∞ sind. Dann sind die Werte von $f(x_0 + t d_1)$ und $f(x_0 + t d_2)$ für $t \in (0, t_0)$ endlich oder ∞ .
- Es verbleibt der Fall, in dem $f'(x_0; d_1) = -\infty$ und $f'(x_0; d_2)$ endlich oder ebenfalls $-\infty$ ist. (Der Beweis im umgekehrten Fall geht analog.) In diesem Fall sind die Werte von $f(x_0 + t d_1)$ und $f(x_0 + t d_2)$ für $t \in (0, t_0)$ endlich oder $-\infty$. Auch in diesem Fall gelten (14.17) und (14.18) für ein Intervall $(0, t_0)$, und der Grenzübergang zeigt (14.16).

Zu Aussage (ii): Aus der positiven Homogenität und der Konvexität von $f'(x_0; \cdot)$ folgt

$$\begin{aligned} & f'(x_0; d_1 + d_2) \\ & = 2 f'(x_0; \tfrac{1}{2}(d_1 + d_2)) \quad (\text{positive Homogenität}) \\ & \leq 2 \tfrac{1}{2} f'(x_0; d_1) + 2 \tfrac{1}{2} f'(x_0; d_2), \end{aligned}$$

sofern die rechte Seite definiert ist.

Zu Aussage (iii): Für $d = 0$ gilt

$$f'(x_0; d) = \lim_{t \searrow 0} \frac{f(x_0 + t \cdot 0) - f(x_0)}{t} = 0.$$

Zu Aussage (iv): Aus Aussage (iii) und Aussage (ii) folgt

$$0 = f'(x_0; d - d) \leq f'(x_0; d) + f'(x_0; -d),$$

sofern die rechte Seite definiert ist. Wenn das der Fall ist, dann sieht man die behauptete Ungleichung $-f'(x_0; -d) \leq f'(x_0; d)$ leicht ein, und zwar auch dann, wenn $f'(x_0; -d)$ oder $f'(x_0; d)$ oder beide gleich ∞ sind. Es verbleiben die Fälle $f'(x_0; d) = \infty$ und $f'(x_0; -d) = -\infty$ bzw. $f'(x_0; d) = -\infty$ und $f'(x_0; -d) = \infty$, für die ebenfalls die Ungleichung $-f'(x_0; -d) \leq f'(x_0; d)$ gilt.

Zu Aussage (v): Es sei $x_0 \in \text{rel int}(\text{dom } f)$ und $d \in U$, dem Richtungsraum von $\text{aff}(\text{dom } f)$. Dann ist $x_0 \pm \varepsilon d \in \text{dom } f$ für hinreichend kleines $\varepsilon > 0$, siehe Lemma 13.17. Folglich sind die Ausdrücke

$$\frac{f(x_0 + t d) - f(x_0)}{t} \quad \text{und} \quad \frac{f(x_0 - t d) - f(x_0)}{t}$$

für hinreichend kleine $t > 0$ endlich, und aufgrund der Monotonie des Differenzenquotienten folgt $-\infty \leq f'(x_0; d) < \infty$ und $-\infty \leq f'(x_0; -d) < \infty$. Zusammen mit [Aussage \(iv\)](#) ergibt sich also

$$-\infty < -f'(x_0; -d) \leq f'(x_0; d) < \infty,$$

d. h. $f'(x_0; d)$ ist endlich.

Andererseits gehört, falls $d \notin U$ liegt, $x_0 + t d$ für *alle* $t > 0$ *nicht* zu $\text{aff}(\text{dom } f)$ und damit auch nicht zu $\text{dom } f$. In diesem Fall ist also $f(x_0 + t d) = \infty$ für alle $t > 0$ und damit $q(t) \equiv \infty$, folglich $f'(x_0; d) = \infty$. \square

Folgerung 14.15 (Endlichkeit der Richtungsableitung). *Ist $f(x_0)$ endlich und $x_0 \in \text{int dom } f$, dann ist die Richtungsableitung $f'(x_0; d)$ für alle $d \in \mathbb{R}^n$ endlich.*

Beweis. Da $\text{int dom } f$ nichtleer ist, ist $\dim \text{dom } f = n$ und damit der Richtungsraum $U = \mathbb{R}^n$. Die Behauptung folgt nun aus [Satz 14.14 \(v\)](#). \square

§ 14.3 ZUSAMMENHANG ZWISCHEN SUBDIFFERENTIAL UND RICHTUNGSABLEITUNG

Das wesentliche Resultat, in dem sich Subdifferential und Richtungsableitung einer konvexen Funktion gegenseitig charakterisieren, ist der folgende Satz.

Satz 14.16 (Zusammenhang zwischen Subdifferential und Richtungsableitung, vgl. [Rockafellar, 1970](#), Theorem 23.2 und 23.4).

Es sei $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ konvex.

(i) Für jedes $x_0 \in \mathbb{R}^n$, an dem $f(x_0)$ endlich ist, gilt:

$$\partial f(x_0) = \{s \in \mathbb{R}^n \mid s^\top d \leq f'(x_0; d) \text{ für alle } d \in \mathbb{R}^n\}. \quad (14.19)$$

(Möglicherweise sind beide Mengen leer.)

(ii) Für jedes $x_0 \in \text{rel int}(\text{dom } f)$, an dem $f(x_0)$ endlich ist, und $d \in \mathbb{R}^n$ gilt:

$$f'(x_0; d) = \sup\{s^\top d \mid s \in \partial f(x_0)\} \in \mathbb{R} \cup \{\infty\}. \quad (14.20)$$

Genauer: Es sei U der Richtungsraum von $\text{aff}(\text{dom } f)$. Ist $d \in U$, dann sind beide Seiten in [\(14.20\)](#) endlich, und das Supremum ist ein Maximum. Ist $d \notin U$, dann sind beide Seiten in [\(14.20\)](#) gleich ∞ .

Die Aussage [\(14.20\)](#) ist in der Literatur auch als **max formula** bekannt.

Beweis. [Aussage \(i\)](#): Es sei zunächst $s \in \partial f(x_0)$ und $d \in \mathbb{R}^n$ beliebig, aber fest. Aus der Subgradientenungleichung [\(14.1\)](#) folgt

$$f(x_0 + t d) \geq f(x_0) + s^\top (t d)$$

für alle $t > 0$. Da $f(x_0)$ nach Voraussetzung endlich ist, ergibt das Sortieren der Terme und Division durch t

$$\frac{f(x_0 + t d) - f(x_0)}{t} \geq s^\top d,$$

und durch Grenzübergang folgt $f'(x_0; d) \geq s^\top d$.

Nun sei $s \in \mathbb{R}^n$ ein Vektor mit der Eigenschaft $s^\top d \leq f'(x_0; d)$ für alle $d \in \mathbb{R}^n$. Weiter sei $x \in \mathbb{R}^n$ beliebig und $d := x - x_0$. Aus der Monotonie des Differenzenquotienten ([Lemma 14.13](#)) folgt insbesondere

$$s^\top (x - x_0) = s^\top d \leq f'(x_0; d) = \lim_{t \searrow 0} q(t) \leq q(1) = \frac{f(x_0 + 1 d) - f(x_0)}{1},$$

d. h., es gilt

$$f(x) \geq f(x_0) + s^\top (x - x_0).$$

Da $x \in \mathbb{R}^n$ beliebig war, folgt $s \in \partial f(x_0)$.

Aussage (ii): Es sei $x_0 \in \text{rel int}(\text{dom } f)$. Dann ist $\partial f(x_0) \neq \emptyset$ nach [Satz 14.7](#). Es sei $d \in \mathbb{R}^n$ beliebig, aber fest. Die Richtungsableitung $f'(x_0; d)$ existiert (mit Werten in $\mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$) nach [Satz 14.14](#). Nach **Aussage (i)** gilt $f'(x_0; d) \geq s^\top d$ für alle $s \in \partial f(x_0)$, also auch

$$f'(x_0; d) \geq \sup\{s^\top d \mid s \in \partial f(x_0)\}. \quad (14.21)$$

Die rechte Seite kann nicht gleich $-\infty$ sein. (**Quizfrage 14.9:** Warum?)

Wir müssen zeigen, dass in (14.21) Gleichheit gilt. Es sei dazu U der Richtungsraum von $\text{aff dom } f$. Wir unterscheiden zwei Fälle. Falls $d \notin U$ liegt, dann ist $f'(x_0; d) = \infty$ nach [Satz 14.14 \(v\)](#). Wir müssen zeigen, dass dann auch die rechte Seite in (14.21) gleich ∞ ist. Wir können d eindeutig darstellen als $d = d_1 + d_2$ mit $d_1 \in U$ und $d_2 \in U^\perp$. Nach Annahme ist $d_2 \neq 0$. Es sei \bar{s} irgendein festes Element von $\partial f(x_0)$; es gilt nach **Aussage (i)** also $\bar{s}^\top y \leq f'(x_0; y)$ für alle $y \in \mathbb{R}^n$. Wir zeigen, dass $\bar{s} + \alpha d_2$ für alle $\alpha \in \mathbb{R}$ in $\partial f(x_0)$ liegt. Dazu zeigen wir:

$$(\bar{s} + \alpha d_2)^\top y \leq f'(x_0; y) \quad (14.22)$$

für alle $y \in \mathbb{R}^n$. Falls $y \notin U$ liegt, dann ist die rechte Seite in (14.22) gleich ∞ , die linke Seite aber endlich. Falls dagegen $y \in U$ liegt, dann ist $d_2^\top y = 0$, also gilt (14.22) auch in diesem Fall. Für die rechte Seite in (14.21) erhalten wir nun

$$\sup\{s^\top d \mid s \in \partial f(x_0)\} \geq \sup\{(\bar{s} + \alpha d_2)^\top d \mid \alpha \in \mathbb{R}\} = \bar{s}^\top d + \sup\{\alpha \|d_2\|^2 \mid \alpha \in \mathbb{R}\} = \infty.$$

Damit ist in diesem Fall die Gleichheit in (14.21) gezeigt.

Im anderen Fall ist $d \in U$. Wir definieren die Funktion $g(d) := f'(x_0; d)$. Diese ist nach [Satz 14.14 \(i\)](#) konvex mit Werten in $\mathbb{R} \cup \{\infty\}$, da der Wert $-\infty$ oben durch (14.21) bereits ausgeschlossen wurde. Ihr eigentlicher Definitionsbereich ist $\text{dom } g = U$, siehe [Satz 14.14 \(v\)](#). Da U ein Unterraum von \mathbb{R}^n ist, gilt $\text{rel int}(U) = U$. Nach [Satz 14.7 \(ii\)](#) existiert also ein Element $\bar{s} \in \partial g(d)$, d. h., es gilt

$$f'(x_0; y) \geq f'(x_0; d) + \bar{s}^\top (y - d) \quad \text{für alle } y \in \mathbb{R}^n. \quad (14.23)$$

Setzen wir speziell $y = 0$ ein, so folgt

$$0 \geq f'(x_0; d) - \bar{s}^\top d.$$

Setzen wir andererseits $y = 2d$ ein, so ergibt sich

$$f'(x_0; 2d) = 2f'(x_0; d) \geq f'(x_0; d) + \bar{s}^\top(2d - d),$$

d. h. $f'(x_0; d) \geq \bar{s}^\top d$. Durch beide Ungleichungen zusammen erhalten wir also $f'(x_0; d) = \bar{s}^\top d$. Es bleibt zu zeigen, dass \bar{s} zu $\partial f(x_0)$ gehört. Aus (14.23) folgt nun aber $f'(x_0; y) \geq f'(x_0; d) + \bar{s}^\top(y - d) = \bar{s}^\top y$ für alle $y \in \mathbb{R}^n$. Nach Aussage (i) gilt damit tatsächlich $\bar{s} \in \partial f(x_0)$, und wir haben gezeigt:

$$f'(x_0; d) \geq \sup\{s^\top d \mid s \in \partial f(x_0)\} \geq \bar{s}^\top d = f'(x_0; d).$$

Insbesondere ist das Supremum ein Maximum. □

Folgerung 14.17 (Unbeschränktheit des Subdifferentials). *Es sei $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ konvex. Weiter sei $f(x_0)$ endlich und $\partial f(x_0) \neq \emptyset$. Dann gehört mit jedem $s \in \partial f(x_0)$ auch $s + U^\perp$ zu $\partial f(x_0)$, wobei U der Richtungsraum von $\text{aff dom } f$ und U^\perp sein orthogonales Komplement ist. Wenn also $\dim \text{dom } f < n$ ist, dann ist $\partial f(x_0)$ unbeschränkt.*

Quizfrage 14.10: Wie kann man sich diese Tatsache grafisch vorstellen?

Beweis. Es sei $s \in \partial f(x_0)$ und $\bar{d} \in U^\perp$. Nach Satz 14.16 Aussage (i) gilt $s^\top d \leq f'(x_0; d)$ für alle $d \in \mathbb{R}^n$. Wir zeigen, dass diese Ungleichung auch für $s + \bar{d}$ gilt. Es sei dazu $d \in \mathbb{R}^n$ beliebig. Wir können d eindeutig darstellen als $d = d_1 + d_2$ mit $d_1 \in U$ und $d_2 \in U^\perp$. Falls $d_2 \neq 0$ gilt, dann ist $x_0 + t d$ für alle $t \neq 0$ nicht zu $\text{aff dom } f$ und erst recht nicht zu $\text{dom } f$, also folgt $f'(x_0; d) = \infty$, womit

$$(s + \bar{d})^\top d \leq f'(x_0; d)$$

gezeigt ist. Andernfalls ist $d_2 = 0$, also $d \in U$, und daher gilt

$$(s + \bar{d})^\top d = s^\top d \leq f'(x_0; d)$$

nach Voraussetzung. Aus Satz 14.16 Aussage (i) folgt nun, dass auch $s + \bar{d}$ zu $\partial f(x_0)$ gehört. □

§ 14.4 WEITERE EIGENSCHAFTEN KONVEXER FUNKTIONEN

Lemma 14.18 (Lokale Beschränktheit nach oben impliziert lokale Lipschitz-Stetigkeit).

Es sei $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$ konvex und $x_0 \in \text{dom } f$. Wenn f auf einer Kugel $B_r(x_0)$ nach oben beschränkt ist, dann gilt:

- (i) f ist auf $B_r(x_0)$ auch nach unten beschränkt.
- (ii) f ist auf $B_{r/2}(x_0)$ Lipschitz-stetig.

Beweis. **Aussage (i):** Es gelte $f \leq \tilde{M}$ auf der Kugel $B_r(x_0)$ für ein $\tilde{M} \in \mathbb{R}$. Es sei $x \in B_r(x_0)$ ein beliebiges Element und $y := 2x_0 - x = x_0 - (x - x_0)$ die Reflexion von x am Mittelpunkt x_0 . Dann liegt y ebenfalls in $B_r(x_0)$, und es gilt aufgrund der Konvexität von f

$$f(x_0) = f\left(\frac{x+y}{2}\right) \leq \frac{1}{2}f(x) + \frac{1}{2}f(y).$$

(Der Fall $\infty - \infty$ auf der rechten Seite kann wegen $f \leq \tilde{M}$ nicht auftreten.) Durch Umstellen ergibt sich $f(x) \geq 2f(x_0) - f(y) \geq 2f(x_0) - \tilde{M}$, die gesuchte endliche untere Schranke.

Aussage (ii): Aufgrund von **Aussage (i)** ist

$$M := \sup\{|f(x)| \mid x \in B_r(x_0)\}$$

endlich. Es seien $x, y \in B_{r/2}(x_0)$ und $x \neq y$. Wir definieren $z := x + \frac{r}{2} \frac{(x-y)}{\|x-y\|}$. Dann ist $z \in x + \frac{r}{2}B_1(0) \subseteq x_0 + rB_1(0) = B_r(x_0)$. Wir setzen $\alpha := \frac{r}{2\|x-y\|}$. Also ist $z = x + \alpha(x-y)$ und daher⁷

$$x = \frac{1}{\alpha+1}z + \frac{\alpha}{\alpha+1}y.$$

Die Konvexität von f ergibt

$$f(x) \leq \frac{1}{\alpha+1}f(z) + \frac{\alpha}{\alpha+1}f(y)$$

und damit

$$f(x) - f(y) \leq \frac{1}{\alpha+1}[f(z) - f(y)] \leq \frac{2M}{\alpha+1} = 2M \frac{2\|x-y\|}{r+2\|x-y\|} \leq \frac{4M}{r}\|x-y\|.$$

Durch Vertauschen den Rollen von x und y erhalten wir ganz analog $f(y) - f(x) \leq \frac{4M}{r}\|x-y\|$, also zusammen

$$|f(x) - f(y)| \leq \frac{4M}{r}\|x-y\| \tag{14.24}$$

für alle $x, y \in B_{r/2}(x_0)$. □

Beachte: Es sieht hier zunächst so aus, als würde die Lipschitz-Konstante in (14.24) für $r \searrow 0$ „explodieren“. Jedoch gilt natürlich eine Abschätzung (14.24) mit derselben Lipschitz-Konstanten auch auf allen Kugeln um x_0 mit kleinerem Radius.

Es stellt sich die Frage, in welchen Punkten $x_0 \in \text{dom } f$ die Voraussetzung von **Lemma 14.18** gilt, also dass $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$ in einer Umgebung von x_0 nach oben beschränkt (und damit bereits in einer kleineren Umgebung von x_0 Lipschitz-stetig) ist. Dazu muss natürlich notwendigerweise $x_0 \in \text{int dom } f$ sein. Das ist aber auch bereits hinreichend, wie das folgende Resultat zeigt.

Satz 14.19 (Stetigkeit konvexer Funktionen).

Es sei $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$ konvex. Folgende Aussagen sind für $x_0 \in \mathbb{R}^n$ äquivalent:

⁷Es gilt $\alpha \in (1/2, \infty)$, wobei α groß ist für $y \approx x$ und $\alpha \approx 1/2$, falls $\|y - x\| \approx r$. Damit liegt $1/(\alpha+1)$ in $(0, 2/3)$ und $\alpha/(\alpha+1)$ in $(1/3, 1)$.

- (i) $x_0 \in \text{int dom } f$.
- (ii) f ist in einer Umgebung von x_0 nach oben beschränkt.
- (iii) f ist in einer Umgebung von x_0 Lipschitz-stetig.
- (iv) f ist im Punkt x_0 stetig.

Beachte: Konvexe *eigentliche* Funktionen sind also genau im (möglicherweise leeren) Inneren ihres eigentlichen Definitionsbereiches **lokal beschränkt** und **lokal Lipschitz-stetig**.⁸

Beweis. Aussage (ii) \Rightarrow Aussage (iii): Das wurde in Lemma 14.18 gezeigt.

Aussage (iii) \Rightarrow Aussage (iv): Das ist offensichtlich.

Aussage (iv) \Rightarrow Aussage (i): Das folgt sofort aus der ε - δ -Definition der Stetigkeit.

Aussage (i) \Rightarrow Aussage (ii): Es sei $x_0 \in \text{int dom } f$. Wir können affin unabhängige Vektoren v_0, \dots, v_n und $r > 0$ so wählen, dass mit $\Delta := \text{conv}(\{v_0, \dots, v_n\})$ gilt: $B_r(x_0) \subseteq \Delta \subseteq \text{dom } f$. (Zur Konstruktion siehe nachfolgendes Lemma 14.20.) Jeder Punkt $x \in B_r(x_0) \subseteq \Delta$ hat dann eine eindeutige Darstellung als Konvexkombination

$$x = \sum_{j=0}^n \alpha_j v_j$$

mit Koeffizienten $\alpha_j \geq 0$ und $\sum_{j=0}^n \alpha_j = 1$. Aus der Jensenschen Ungleichung (Hausaufgabe 9.1) für die konvexe Funktion f folgt nun

$$f(x) = f\left(\sum_{j=0}^n \alpha_j v_j\right) \leq \sum_{j=0}^n \alpha_j f(v_j) \leq \underbrace{\max_{j=0, \dots, n} f(v_j)}_{=: M} \sum_{j=0}^n \alpha_j = M$$

für alle $x \in \Delta$ und insbesondere für alle $x \in B_r(x_0)$. □

Lemma 14.20 (Zwischen eine Menge und einen inneren Punkt passt immer ein Simplex⁹).

Es sei $M \subseteq \mathbb{R}^n$ eine Menge und $x_0 \in \text{int } M$, sodass $B_R(x_0) \subseteq M$ liegt. Dann existieren affin unabhängige Punkte $v_0, \dots, v_n \in M$ und ein $r > 0$, sodass mit der konvexen Hülle $\Delta := \text{conv}(\{v_0, \dots, v_n\})$ gilt:

$$B_r(x_0) \subseteq \Delta \subseteq B_R(x_0) \subseteq M.$$

Quizfrage 14.11: Wie kann diese Aussage veranschaulicht werden?

⁸Eine Funktion $f: M \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ heißt **lokal beschränkt**, wenn zu jedem Punkt $x_0 \in M$ eine Umgebung $U(x_0)$ und eine Konstante $C(x_0) \in \mathbb{R}$ existieren, sodass $|f(x)| \leq C(x_0)$ für alle $x \in U(x_0) \cap M$ gilt. Eine Funktion $f: M \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ heißt **lokal Lipschitz-stetig**, wenn zu jedem Punkt $x_0 \in M$ eine Umgebung $U(x_0)$ und eine Konstante $L(x_0) \in \mathbb{R}$ existieren, sodass $|f(x) - f(y)| \leq L(x_0) \|x - y\|$ für alle $x \in U(x_0) \cap M$ gilt. Man kann beide Begriffe auf Teilmengen $N \subseteq M$ einschränken und spricht dann von **lokaler Beschränktheit auf N** bzw. **lokaler Lipschitz-Stetigkeit auf N** .

⁹Ein **Simplex** (Plural: **Simplizes**) im \mathbb{R}^n ist die konvexe Hülle affin unabhängiger Punkte im \mathbb{R}^n .

Beweis. Wir gehen zur Vereinfachung der Notation von $x_0 = 0$ und $R = 1$ aus, was wir immer erreichen können, indem wir M durch $(M - x_0)/R$ ersetzen.

Die gesuchten Punkte können wir nun beispielsweise wählen als

$$v_0 := -\frac{1}{n+1} \mathbf{1} \quad \text{und} \quad v_j := e_j - \frac{1}{n+1} \mathbf{1}, \quad j = 1, \dots, n.$$

Hierbei ist e_j der j -te Einheitsvektor im \mathbb{R}^n . Die affine Unabhängigkeit der v_j sowie die Eigenschaft $\|v_j\| < 1$ für $j = 0, \dots, n$ prüft man leicht nach. Da $B_1(0)$ konvex ist, folgt bereits

$$\Delta \subseteq B_1(0) \subseteq M.$$

Aufgrund der affinen Unabhängigkeit lässt sich jedes $x \in \mathbb{R}^n$ eindeutig als Affinkombination $x = \sum_{j=0}^n \alpha_j v_j$ schreiben mit Koeffizienten, die $\sum_{j=0}^n \alpha_j = 1$ erfüllen. Der Ursprung ist gerade der Mittelpunkt von v_0, \dots, v_n , hat also den Koeffizientenvektor $\bar{\alpha} = 1/(n+1) \mathbf{1}$, denn es gilt

$$\sum_{j=0}^n \bar{\alpha}_j v_j = \frac{1}{n+1} \sum_{j=0}^n v_j = \frac{1}{n+1} \left[-\frac{n+1}{n+1} \mathbf{1} + \sum_{j=1}^n e_j \right] = \frac{1}{n+1} \left[-\frac{n+1}{n+1} \mathbf{1} + \mathbf{1} \right] = 0.$$

Insbesondere ist der Ursprung also eine echte Konvexkombination der Punkte v_0, \dots, v_n . Aufgrund der stetigen (linearen) Abhängigkeit der Koeffizienten α vom Punkt x gilt für eine ganze Umgebung $B_r(0)$ mit geeignetem Radius $r > 0$ die Eigenschaft $\alpha \geq 0$, d. h., $B_r(0) \subseteq \Delta$, was zu zeigen war.

Genauer: Wir können wie im Beweis von [Satz 13.15](#) vorgehen. Das lineare Gleichungssystem, das die Koeffizienten der Darstellung eines beliebigen Punktes x als Affinkombination der Punkte v_0, \dots, v_n ermittelt, vgl. [\(13.8\)](#), lautet

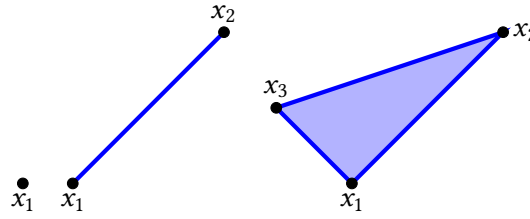
$$\underbrace{\begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ | & & | \\ v_0 & \cdots & v_n \\ | & & | \end{bmatrix}}_{=:B} \underbrace{\begin{pmatrix} \alpha_0 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{pmatrix}}_{=:b} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 \\ | \\ x \\ | \end{pmatrix}}_{=:b}.$$

Durch die Wahl $\varrho := 1/((n+1)\|B^{-1}\|_\infty)$ erreichen wir zunächst $\overline{B_\varrho^{\|\cdot\|_\infty}(\bar{x})} \subseteq \Delta$. (**Quizfrage 14.12:** Warum müssen wir hier, anders als im Beweis von [Satz 13.15](#), nicht $\|(B^T B)^{-1} B^T\|_\infty$ nehmen?) Die Äquivalenz der Normen $\|\cdot\|_\infty$ und $\|\cdot\|_2$ im \mathbb{R}^n , insbesondere $\|\cdot\|_\infty \leq \|\cdot\|_2$, zeigt schließlich, dass wir $r := \varrho$ wählen können, sodass (sogar für die abgeschlossene) r -Kugel gilt:

$$\overline{B_r(0)} \subseteq \overline{B_\varrho^{\|\cdot\|_\infty}(\bar{x})} \subseteq \Delta \subseteq B_1(0) \subseteq M. \quad \square$$

Aus dem [Satz 14.19](#) folgen weitere Konsequenzen für das Subdifferential und die Richtungsableitung konvexer Funktionen. Wir wissen bereits aus [Satz 14.14 \(v\)](#), dass in Punkten $x_0 \in \text{int dom } f$ gilt, dass $f'(x_0; d)$ für alle Richtungen $d \in \mathbb{R}^n$ endlich ist. Es gilt jedoch mehr:

Lemma 14.21 (Lipschitz-Stetigkeit der Richtungsableitung).

Abbildung 14.5: Simplices der Dimensionen 0, 1 und 2 im \mathbb{R}^2 .

Es seien $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$ konvex und $x_0 \in \text{int dom } f$. Weiter sei L eine Lipschitz-Konstante von f in einer Kugel $B_r(x_0)$, siehe Satz 14.19. Dann gilt

$$|f'(x_0; d_1) - f'(x_0; d_2)| \leq L \|d_1 - d_2\| \quad \text{für alle } d_1, d_2 \in \mathbb{R}^n \quad (14.25)$$

und insbesondere

$$|f'(x_0; d)| \leq L \|d\| \quad (14.26)$$

für alle $d \in \mathbb{R}^n$.

Beweis. Es sei $d \in \mathbb{R}^n$ beliebig. Für hinreichend kleines $t > 0$ gilt

$$|f(x_0 + t d) - f(x_0)| \leq L t \|d\|.$$

Die Division durch t und der Grenzübergang $t \searrow 0$ zeigt $|f'(x_0; d)| \leq L \|d\|$.

Um die Lipschitz-Stetigkeit von $f'(x_0; \cdot)$ zu zeigen, schätzen wir ab:

$$\begin{aligned} f'(x_0; d_1) - f'(x_0; d_2) &= f'(x_0; d_1) - f'(x_0; d_1 + (d_2 - d_1)) \\ &\geq f'(x_0; d_1) - f'(x_0; d_1) - f'(x_0; d_2 - d_1) \quad \text{wegen der Subadditivität, siehe (14.15)} \\ &\geq -L \|d_1 - d_2\|. \end{aligned}$$

Beachte: Die Subadditivitätsungleichung (14.15) gilt, weil alle vorkommenden Werte $f'(x_0; \cdot)$ wegen (14.26) endlich sind. Analog gilt auch

$$\begin{aligned} f'(x_0; d_1) - f'(x_0; d_2) &= f'(x_0; d_2 + (d_1 - d_2)) - f'(x_0; d_2) \\ &\leq f'(x_0; d_2) + f'(x_0; d_1 - d_2) - f'(x_0; d_2) \quad \text{wegen der Subadditivität, siehe (14.15)} \\ &\leq L \|d_1 - d_2\|. \end{aligned}$$

Das zeigt die Behauptung (14.25). □

Wir wissen bereits aus Satz 14.7 und Satz 14.3, dass das Subdifferential einer konvexen Funktion $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ in Punkten $x_0 \in \text{rel int}(\text{dom } f)$ nichtleer, abgeschlossen und konvex ist. Im folgenden Satz wird das Subdifferential in inneren Punkten von $\text{dom } f$ noch genauer charakterisiert.

Satz 14.22 (Kompaktheit des Subdifferentials).

Es sei $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$ konvex. Es sei weiter $x_0 \in \text{int dom } f$ und L eine Lipschitz-Konstante von f in einer Kugel $B_r(x_0)$, siehe Satz 14.19. Dann ist $\partial f(x_0)$ kompakt, und es gilt $\|s\| \leq L$ für alle $s \in \partial f(x_0)$.

Beweis. Für $s \in \partial f(x_0)$ gilt nach Satz 14.16 Aussage (i) und Lemma 14.21:

$$s^\top d \leq f'(x_0; d) \leq L \|d\| \quad \text{für alle } d \in \mathbb{R}^n.$$

Mit der Wahl $d = s$ folgt $\|s\| \leq L$. □

Bemerkung 14.23 (Verallgemeinerung von Satz 14.22).

Es sei $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$ konvex. Wenn $x_0 \in \text{rel int}(\text{dom } f)$ ist, dann gilt

$$\partial f(x_0) = U^\perp + \partial(f|_{\text{aff dom } f})(x_0). \quad (14.27)$$

Hier ist U der Richtungsraum von $\text{aff dom } f$ und U^\perp sein orthogonales Komplement. Der Ausdruck $\partial(f|_{\text{aff dom } f})(x_0)$ ist das Subdifferential der Einschränkung von f auf $\text{aff dom } f$. Für diese Funktion ist x_0 ein innerer Punkt, und man kann zeigen, dass $\partial(f|_{\text{aff dom } f})(x_0)$ kompakt ist.

Satz 14.24 (Beschränktheit des Subdifferentials, vgl. Geiger, Kanzow, 2002, Lemma 6.19).

Es sei $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$ konvex und $B \subseteq \text{int dom } f$ eine kompakte Menge. Dann ist die Bildmenge

$$\partial f(B) = \bigcup_{x \in B} \partial f(x)$$

ebenfalls beschränkt.

Beweis. Wir betrachten die Überdeckung von B durch offene Kugeln

$$\bigcup_{x \in B} B_{r_x}(x),$$

wobei die Radien $r_x > 0$ so gewählt werden, dass $\overline{B_{2r_x}(x)} \subseteq \text{int dom } f$ bleibt. Aufgrund der Kompaktheit von B sind endlich viele Kugeln zur Überdeckung ausreichend, sagen wir

$$B \subseteq \bigcup_{j=1, \dots, m} B_{r_j}(x_j) \subseteq \bigcup_{j=1, \dots, m} \overline{B_{2r_j}(x_j)} \subseteq \text{int dom } f.$$

Nach Satz 14.19 ist f stetig auf $\text{int dom } f$ und damit auf jeder der endlich vielen kompakten Kugeln $\overline{B_{2r_j}(x_j)}$ beschränkt. Somit ist f auch auf der endlichen Vereinigung $\bigcup_{j=1, \dots, m} \overline{B_{2r_j}(x_j)}$ beschränkt.

Es sei nun $\bar{s} \in \partial f(\bar{x})$ für ein $\bar{x} \in B$. Es gilt also

$$f(x) \geq f(\bar{x}) + \bar{s}^\top (x - \bar{x}) \quad \text{für alle } x \in \mathbb{R}^n.$$

Der Punkt \bar{x} gehört zu B , liegt also in einer der Kugeln, sagen wir in $B_{r_j}(x_j)$. Wir betrachten zunächst den Fall $\bar{s} \neq 0$. Der Punkt $x := \bar{x} + \frac{r_j}{\|\bar{s}\|} \bar{s}$ gehört zu $B_{2r_j}(x_j)$, denn es gilt

$$\|x - x_j\| \leq \|x - \bar{x}\| + \|\bar{x} - x_j\| < \left\| \frac{r_j}{\|\bar{s}\|} \bar{s} \right\| + r_j = 2r_j.$$

Wir setzen x in die Subgradientenungleichung oben ein und erhalten

$$f(x) \geq f(\bar{x}) + \bar{s}^\top \frac{r_j}{\|\bar{s}\|} \bar{s} = f(\bar{x}) + r_j \|\bar{s}\|,$$

also

$$\|\bar{s}\| \leq \frac{1}{r_j} [f(x) - f(\bar{x})].$$

Da x zu $\bigcup_{j=1,\dots,m} \overline{B_{2r_j}(x_j)}$ und \bar{x} zu $\bigcup_{j=1,\dots,m} B_{r_j}(x_j) \subseteq \overline{B_{2r_j}(x_j)}$ gehört, wo f beschränkt ist, und $\bar{s} \in \partial f(B)$ bis auf die Annahme $\bar{s} \neq 0$ beliebig war, folgt, dass $\partial f(B) \setminus \{0\}$ beschränkt ist und damit auch $\partial f(B)$. \square

Satz 14.25 (Subdifferential einer konvexen diffbaren Funktion, vgl. [Rockafellar, 1970](#), Theorem 25.1).
Es sei $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ konvex.

- (i) Wenn f an der Stelle x_0 diffbar ist, dann ist $\partial f(x_0) = \{\nabla f(x_0)\}$, und es gilt $x_0 \in \text{int dom } f$.
- (ii) Wenn das Subdifferential $\partial f(x_0)$ einelementig ist, dann gilt $x_0 \in \text{int dom } f$, und f ist an der Stelle x_0 diffbar.

Beweis. **Aussage (i):** Es sei f an der Stelle x_0 diffbar, insbesondere ist also $f(x_0)$ endlich. Aufgrund der Diffbarkeit sind die Richtungsableitungen gegeben durch $f'(x_0; d) = \nabla f(x_0)^\top d$. Gemäß [Satz 14.16 Aussage \(i\)](#) ist $s \in \partial f(x_0)$ genau dann, wenn $s^\top d \leq f'(x_0; d)$, also

$$s^\top d \leq \nabla f(x_0)^\top d$$

für alle $d \in \mathbb{R}^n$ gilt. Diese Bedingung ist aber genau für $s = \nabla f(x_0)$ erfüllt. (**Quizfrage 14.13:** Warum?) Weiter folgt aus der Diffbarkeit von f an der Stelle x_0 auch die Stetigkeit von f an dieser Stelle. Daraus folgt insbesondere, dass f in einer Umgebung von x_0 nur endliche Werte annimmt, sodass $x_0 \in \text{int dom } f$ folgt.

Aussage (ii): Es sei $\partial f(x_0) = \{s\}$. Daraus folgt zunächst, dass $f(x_0)$ endlich ist denn: Wäre $f(x_0)$ nicht endlich, so würde die Subgradientenungleichung (14.1) zeigen, dass entweder $\partial f(x_0) = \emptyset$ ist (im Fall $f(x_0) = \infty$ und $\text{dom } f \neq \emptyset$) oder aber $\partial f(x_0) = \mathbb{R}^n$ (im Fall $f \equiv \infty$ oder im Fall $f(x_0) = -\infty$).

Wir zeigen weiter, dass $x_0 \in \text{int dom } f$ folgt. Aus [Folgerung 14.17](#) ergibt sich zunächst, dass $\text{dom } f$ notwendigerweise volle Dimension haben muss, da sonst $\partial f(x_0)$ unbeschränkt wäre. Angenommen, $x_0 \notin \text{int dom } f$, dann gilt auch $x_0 \notin \text{core dom } f$ nach [Lemma 13.23](#). Es gibt also eine Richtung $\bar{d} \in \mathbb{R}^n$, $\bar{d} \neq 0$, sodass $x_0 \in \text{dom } f$ liegt, aber $x_0 + \varepsilon \bar{d} \notin \text{dom } f$ für alle $\varepsilon > 0$. Daraus folgt $f'(x_0; \bar{d}) = \infty$.

Wir zeigen unter Verwendung von [Satz 14.16 Aussage \(i\)](#), dass dann auch $s + \bar{d} \in \partial f(x_0)$ gilt, im Widerspruch zu Voraussetzung, dass $\partial f(x_0)$ einelementig ist. Es sei dazu $d \in \mathbb{R}^n$ beliebig. Wir können d eindeutig darstellen als $d = d_1 + d_2$ mit $d_1 \perp \bar{d}$ und $d_2 \in \text{span}\{\bar{d}\}$, also $d = d_1 + \alpha \bar{d}$. Wir machen eine Fallunterscheidung nach dem Vorzeichen von α . Wenn $\alpha > 0$ ist, dann gilt

$$f'(x_0; d) \leq f'(x_0; d_1) + \alpha f'(x_0; \bar{d}) = \infty$$

wegen [Satz 14.14](#). Damit ist in diesem Fall $(s + \bar{d})^\top d \leq f'(x_0; d)$ klar. Andernfalls ist $\alpha \leq 0$ und daher

$$(s + \bar{d})^\top d = s^\top d + \bar{d}^\top (d_1 + \alpha \bar{d}) = s^\top d + \alpha \|\bar{d}\|^2 \leq s^\top d \leq f'(x_0; d),$$

wobei die letzte Ungleichung wieder aus [Satz 14.16 Aussage \(i\)](#) folgt. Wir haben also gezeigt, dass

$$(s + \bar{d})^\top d \leq f'(x_0; d) \quad \text{für alle } d \in \mathbb{R}^n$$

gilt. Aus [Satz 14.16 Aussage \(i\)](#) folgt damit $s + \bar{d} \in \partial f(x_0)$, Widerspruch. Folglich gilt notwendigerweise $x_0 \in \text{int dom } f$.

Wir müssen noch zeigen, dass f an der Stelle x_0 diffbar ist. Dazu definieren wir die konvexe (Restglied-) Funktion $g: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$,

$$g(\delta x) := f(x_0 + \delta x) - f(x_0) - s^\top \delta x.$$

Für diese gilt dann $g(\delta x) \geq 0$ sowie $0 \in \text{int dom } g$ und $\partial g(0) = \{0\}$ (**Quizfrage 14.14**: Warum gelten diese Eigenschaften?). Wir müssen zeigen:

$$\lim_{\delta x \rightarrow 0} \frac{g(\delta x)}{\|\delta x\|} = 0. \quad (14.28)$$

Es sei $R > 0$ so, dass $B_R(0) \subseteq \text{dom } g$ liegt. [Lemma 14.20](#) zeigt, dass es affin unabhängige Punkte v_0, \dots, v_n und ein $r > 0$ gibt, sodass mit $\Delta := \text{conv}(\{v_0, \dots, v_n\})$ gilt: $B_r(0) \subseteq \Delta \subseteq B_R(0) \subseteq \text{dom } g$. Folglich gilt $\|v_j\| < R$ für alle $j = 0, \dots, n$.

Jedes Element in Δ und insbesondere jedes $y \in B_r(0)$ hat eine (eindeutige) Darstellung als Konvexkombination

$$y = \sum_{j=0}^n \alpha_j v_j \quad (14.29)$$

mit Koeffizienten $\alpha_j \geq 0$ und $\sum_{j=0}^n \alpha_j = 1$.

Es sei nun $\delta x \in \mathbb{R}^n$ beliebig, aber fest, mit $\|\delta x\| < \frac{r^2}{R}$ und $\delta x \neq 0$. Daraus folgt $\frac{\|\delta x\|}{r} \|v_j\| < r$.

Wir schätzen nun ab:

$$\begin{aligned} g(\delta x) &= g\left(\frac{\|\delta x\|}{r} r \frac{\delta x}{\|\delta x\|}\right) \\ &= g\left(\frac{\|\delta x\|}{r} \sum_{j=0}^n \alpha_j v_j\right) \quad \text{wegen (14.29)} \\ &\leq \sum_{j=0}^n \alpha_j g\left(\frac{\|\delta x\|}{r} v_j\right) \quad \text{Jensensche Ungleichung (Hausaufgabe 9.1)} \\ &\leq \max_{j=0, \dots, n} g\left(\frac{\|\delta x\|}{r} v_j\right). \end{aligned} \quad (14.30)$$

Die Funktionswerte sind alle endlich, da, wie bereits gezeigt, $\frac{\|\delta x\|}{r} v_j \in B_r(0) \subseteq \text{dom } g$ liegt.

Nach Satz 14.16 Aussage (ii) gilt wegen $g(0) = 0$ und $\partial g(0) = \{0\}$:

$$g'(0; d) = \max\{s^\top d \mid s \in \partial g(0)\} = 0$$

für alle $d \in \mathbb{R}^n$. Zusammen mit der Monotonie des Differenzenquotienten (Lemma 14.13) erhalten wir

$$0 = g'(0; d) = \lim_{t \searrow 0} \frac{g(td) - g(0)}{t} = \lim_{t \searrow 0} \frac{g(td)}{t} \leq \frac{g(td)}{t} \quad (14.31)$$

für alle $t > 0$ und alle $d \in \mathbb{R}^n$. Wir können nun die Restgliedabschätzung (14.28) zeigen: Wegen (14.30) haben wir

$$0 \leq \frac{g(\delta x)}{\|\delta x\|} \leq \max_{j=0, \dots, n} \frac{g\left(\frac{\|\delta x\|}{r} v_j\right)}{\|\delta x\|},$$

und wegen (14.31) gilt für jeden Term unter dem Maximum auf der rechten Seite

$$\lim_{\|\delta x\| \searrow 0} \frac{g\left(\frac{\|\delta x\|}{r} v_j\right)}{\|\delta x\|} = \lim_{t \searrow 0} \frac{g\left(\frac{t}{r} v_j\right)}{t} = 0.$$

Somit erhalten wir

$$0 \leq \lim_{\|\delta x\| \searrow 0} \frac{g(\delta x)}{\|\delta x\|} = 0,$$

was zu zeigen war. □

Index

- μ -stark konvexe Funktion, 90, 93
- abgeschlossene ε -Kugel, 10
- abgeschlossene ε -Umgebung, 10
- abhängige Variable, 54
- Ableitung, 11
- Abschluss einer Menge, 10
- Abstiegsrichtung, 16
- Abstiegsverfahren, 15
- Accessibility lemma, 113
- affin unabhängig, 107
- affine Basis, 107
- affine Dimension einer Menge, 109
- affine Hülle, 109
- affiner Unterraum, 105
- Affinkombination, 107
- aktive Ungleichung, 5
- algebraisch innerer Punkt, 117
- algebraisches Inneres, 117
- Armijo-Bedingung, 18
- Armijo-Parameter, 18
- Aufwandsmatrix, 44
- Backtracking-Parameter, 18
- Backtracking-Strategie, 18
- Basis, 54
- Basislösung, 54
- Basismatrix, 54
- Basisvektor, 54
 - benachbart, 57
- Bedarfmatrix, 44
- beidseitige Richtungsableitung, 11
- Box-Beschränkungen, 7
- C^1 -Funktion, 11
- C^2 -Funktion, 12
- CG-Verfahren, 31
- differenzierbare Funktion, 11
- Dimension einer Menge, 109
- Dimension eines affinen Unterraums, 106
- diskrete Optimierung, 5
- dual zulässige Basis, 75
- duale Schlupfvariablen, 67
- duales LP, 67
- duales Simplex-Verfahren, 73, 75
- Dualitätslücke, 74
- echte Konvexkombination, 88
- Ecke, 51
- eigentlich trennende Hyperebene, 118
- eigentliche Funktion, 92
- eigentlicher Definitionsbereich, 92
- einseitige Richtungsableitung, 11, 134
- entarteter Basisvektor, 61
- Epigraph, 94
- erweitert reellwertige Funktion, 91
- exakte Liniensuche, 17
- Extremalpunkt, 51
- Farkas-Lemma, 70, 125
- freie Optimierungsaufgabe, 7
- freie Variable, 45
- ganzzahlige lineare Optimierungsaufgabe, 79
- ganzzahliges lineares Programm, 79
- Gaußklammer
 - obere, 80
 - untere, 80
- gleichungsbeschränkte Optimierungsaufgabe,
 - 7
- Gleichungsnebenbedingung, 5
- global optimale Lösung, 6, 101
- globale Minimalstelle, 6, 101
- globaler Minimalwert, 6, 101
- globaler Minimierer, 6, 101
- globales Minimum, 6, 101
- Globalisiertes Newton-Verfahren, 39
- Gradient, 11
- Gradientenverfahren, 16

- Grundmenge, 5
- Halbraum, 45
- Hessematrix, 12
- Hyperebene, 45
- Hypograph, 132
- inaktive Indizes, 51
- inaktive Ungleichung, 5
- Indikatorfunktion, 92
- Infimalwert, 5, 101
- Inneres einer Menge, 10
- Jacobimatrix, 11
- kanonische Form, 44
- Kantorovich-Ungleichung, 27
- Kegel, 48
- konische Hülle, 50
- konkave Funktion, 90
- kontinuierliche Optimierung, 5
- konvexe Funktion, 90, 93
- konvexe Hülle, 89
- konvexe Menge, 86
- konvexe Optimierungsaufgabe, 7, 101
- Konvexkombination, 88
- Kostenvektor, 42, 44
- lineare Minorante, 126
- lineare Optimierungsaufgabe, 7
- lineare Stützfunktion, 126
- lineares Modell, 31
- lineares Programm, 7, 42
- Liniensuche, 17
- Liniensuchfunktion, 18
- Liniensuchverfahren, 40
- lokal beschränkte Funktion, 142
- lokal Lipschitz-stetige Funktion, 142
- lokal optimale Lösung, 6, 101
- lokale Minimalstelle, 6, 101
- lokaler Minimalwert, 6, 101
- lokaler Minimierer, 6, 101
- lokales Minimum, 6, 101
- Lokales Newton-Verfahren, 31
- LP, *siehe* lineares Programm
- lösbare Optimierungsaufgabe, 6
- Matrixnorm, 32
- max formula, 138
- MILP, *siehe* ganzzahliges lineares Programm
- Minkowski-Summe, 87
- Mittelwertsatz, 12
- monotoner Operator, 97
- negativer Halbraum, 45
- Newton-Richtung, 31, 38
- Nichtbasis, 54
- Nichtbasismatrix, 54
- nichtlineare Optimierungsaufgabe, 8
- nichtlineares Programm, 8
- NLP, *siehe* nichtlineares Programm
- Normalenvektor, 45
- Normalform, 46
- obere Schranke, 7
- offene ε -Kugel, 10
- offene ε -Umgebung, 10
- Optimalwert, 102
- Optimierungsvariable, 5
- orthogonale Projektion, 103
- partielle Ableitung, 10
- Phase-I-Problem, 65
- Phase-II-Problem, 66
- Polyeder, 45
- Polyeder in Normalform, 47
- positiver Halbraum, 45
- pricing im dualen Simplex-Verfahren, 76
- pricing im primalen Simplex-Verfahren, 58
- primal zulässige Basis, 75
- primal-duales Paar, 67
- primales LP, 67
- primales Simplex-Verfahren, 73
- Q-lineare Konvergenz, 35
- Q-quadratische Konvergenz, 35
- Q-superlineare Konvergenz, 35
- QP, *siehe* quadratisches Programm
- quadratische Optimierungsaufgabe, 7
- quadratisches Ersatzmodell, 38
- quadratisches Programm, 7
- quadratisches Wachstum, 15
- Quotiententest im dualen Simplex-Verfahren, 76
- Quotiententest im primalen Simplex-Verfahren, 59

- reduzierte Kosten im primalen Simplex-Verfahren, 58
- relativ innerer Punkt, 111
- relativer Rand, 111
- relativer Randpunkt, 111
- relatives Inneres, 111
- Residuum, 25, 31
- Ressourcenvektor, 44
- Rezessionskegel, 48
- Richtung des steilsten Abstiegs, 16
- Richtung des steilsten Abstiegs im M -Skalarprodukt, 23
- Richtungsableitung, 134
- Richtungsraum, 105
- Schlupfvariable, 46
- Schnitt durch eine Funktion, 18
- schwache Dualität, 68
- Simplex, 142
- Simplex-Schritt, 59
- Spektralnrm, 32
- stark konkave Funktion, 90
- stark konvexe Funktion, 90, 93
- stark monotoner Operator, 97
- starke Dualität, 74
- stationärer Punkt, 13
- strikt konkave Funktion, 90
- strikt konvexe Funktion, 90, 93
- strikt monotoner Operator, 97
- strikt trennende Hyperebene, 118
- strikt globaler Minimierer, 6
- strikt lokaler Minimierer, 6
- Subableitung, 127
- subadditiv, 135
- Subdifferential, 126
- subdifferenzierbare Funktion, 126
- Subgradient, 126
- Subgradientenungleichung, 126
- Sublevelmenge, 8
- Suchrichtung, 18
- Teilfolge, 10
- trennende Hyperebene, 70, 118
- Trust-Region-Verfahren, 41
- unabhängige Variable, 54
- unbeschränkte Optimierungsaufgabe, 5
- ungleichungsbeschränkte Optimierungsaufgabe, 7
- Ungleichungsnebenbedingung, 5
- unlösbare Optimierungsaufgabe, 6
- unrestringierte Optimierungsaufgabe, 7
- untere Schranke, 7
- unterhalbstetige Funktion, 8
- unzulässige Optimierungsaufgabe, 5
- Variationsungleichung, 104
- verallgemeinerte Konditionszahl, 29
- verallgemeinertes Eigenwertproblem, 28
- vereinfachtes Newton-Verfahren, 37
- Verfahren der konjugierten Gradienten, 31
- Verfahren des steilsten Abstiegs, 16
- verletzte Ungleichung, 5
- von unten halbsetige Funktion, 8
- vorkonditioniertes Gradientenverfahren, 24
- Vorkonditionierung, 23
- Zeilensummennorm, 112
- Zielfunktion, 5
- zulässige Menge, 5
- zulässiger Basisvektor, 54
- zulässiger Punkt, 5
- zweimal differenzierbare Funktion, 12
- Überschussvariable, 46

Literatur

- Alpargu, G. (1996). „The Kantorovich Inequality, with Some Extensions and with Some Statistical Applications“. Magisterarb. Department of Mathematics und Statistics, McGill University, Montreal, Canada.
- Anderson, T. W. (1971). *The Statistical Analysis of Time Series*. John Wiley & Sons, Inc., New York-London-Sydney. DOI: [10.1002/9781118186428](https://doi.org/10.1002/9781118186428).
- Armijo, L. (1966). „Minimization of functions having Lipschitz continuous first partial derivatives“. *Pacific Journal of Mathematics* 16.1, S. 1–3. DOI: [10.2140/pjm.1966.16.1](https://doi.org/10.2140/pjm.1966.16.1).
- Cartan, H. (1967). *Calcul Différentiel*. Paris: Hermann, S. 178.
- Forsgren, A. (2008). *An elementary proof of optimality conditions for linear programming*. TRITA-MAT 2008-OS6. Department of Mathematics, Royal Institute of Technology (KTH) Stockholm.
- Gass, S. I.; A. A. Assad (2005). *An Annotated Timeline of Operations Research: An Informal History*. Bd. 75. International Series in Operations Research & Management Science. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers.
- Geiger, C.; C. Kanzow (1999). *Numerische Verfahren zur Lösung unrestringierter Optimierungsaufgaben*. New York: Springer. DOI: [10.1007/978-3-642-58582-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-58582-1).
- Geiger, C.; C. Kanzow (2002). *Theorie und Numerik restringierter Optimierungsaufgaben*. New York: Springer. DOI: [10.1007/978-3-642-56004-0](https://doi.org/10.1007/978-3-642-56004-0).
- Gill, P. E.; W. Murray; M. H. Wright (1981). *Practical Optimization*. London: Academic Press.
- Hamacher, H.; B. Klamroth (2006). *Lineare Optimierung und Netzwerkoptimierung*. 2. Aufl. Vieweg. DOI: [10.1007/978-3-8348-9031-3](https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9031-3).
- Heuser, H. (2002). *Lehrbuch der Analysis. Teil 2*. 12. Aufl. Stuttgart: B.G.Teubner. DOI: [10.1007/978-3-322-96826-5](https://doi.org/10.1007/978-3-322-96826-5).
- Heuser, H. (2003). *Lehrbuch der Analysis. Teil 1*. 15. Aufl. Vieweg+Teubner Verlag. DOI: [10.1007/978-3-322-96828-9](https://doi.org/10.1007/978-3-322-96828-9).
- Jarre, F.; J. Stoer (2004). *Optimierung*. Springer. DOI: [10.1007/978-3-642-18785-8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-18785-8).
- Klee, V.; G. J. Minty (1972). „How good is the simplex algorithm?“ *Inequalities III: Proceedings of the Third Symposium on Inequalities held at the University of California, Los Angeles, September 1–9, 1969*. Hrsg. von O. Shisha. Academic Press, New York, S. 159–175.
- Lemke, C. E. (1954). „The dual method of solving the linear programming problem“. *Naval Research Logistics Quarterly* 1, S. 36–47. DOI: [10.1002/nav.3800010107](https://doi.org/10.1002/nav.3800010107).
- Nocedal, J.; S. J. Wright (2006). *Numerical Optimization*. 2. Aufl. New York: Springer. DOI: [10.1007/978-0-387-40065-5](https://doi.org/10.1007/978-0-387-40065-5).
- Phelps, R. R. (1993). *Convex Functions, Monotone Operators and Differentiability*. 2. Aufl. Springer Berlin Heidelberg. DOI: [10.1007/978-3-540-46077-0](https://doi.org/10.1007/978-3-540-46077-0).
- Rockafellar, R. T. (1970). *Convex Analysis*. Bd. 28. Princeton Mathematical Series. Princeton, New Jersey: Princeton University Press. URL: <https://www.jstor.org/stable/j.ctt14bs1ff>.
- Vanderbei, R. J. (2008). *Linear Programming: Foundations and Extensions*. Operations Research, Management Science. New York, NY: Springer. DOI: [10.1007/978-0-387-74388-2](https://doi.org/10.1007/978-0-387-74388-2).

Werner, J. (2007). *Vorlesung über Optimierung*. Lecture Notes, Department of Mathematics, University of Hamburg, Germany. URL: <http://num.math.uni-goettingen.de/werner/>.