

Analysis III für Studierende der Ingenieurwissenschaften

Ingenuin Gasser

Fachbereich Mathematik
Universität Hamburg

Technische Universität Hamburg–Harburg
Wintersemester 2021/22

basierend auf dem Foliensatz von Jens Struckmeier Wintersemester 2020/21

Inhalte der Vorlesung Analysis III.

- 1 Partielle Ableitungen, Differentialoperatoren.
- 2 Vektorfelder, vollständiges Differential, Richtungsableitungen.
- 3 Mittelwertsätze, Satz von Taylor.
- 4 Extrema, Satz über implizite Funktionen.
- 5 Implizite Darstellung von Kurven und Flächen.
- 6 Extrema bei Gleichungsnebenbedingungen.
- 7 Newton–Verfahren, nichtlineare Gleichungen und Ausgleichsrechnung.
- 8 Bereichsintegrale, Satz von Fubini, Transformationssatz.
- 9 Potentiale, Integralsatz von Green, Integralsatz von Gauß.
- 10 Greensche Formeln, Integralsatz von Stokes.

Kapitel 1. Differentialrechnung mehrerer Variablen

1.1 Partielle Ableitungen

Im Folgenden sei

$f(x_1, \dots, x_n)$ eine skalare Funktion, die von n Variablen abhängt

Beispiel: Die Zustandsgleichung eines idealen Gases lautet $pV = RT$.

Jede der drei Größen p (Druck), V (Volumen) und T (Temperatur) läßt sich als Funktion der anderen darstellen, wobei R die universelle Gaskonstante ist.

$$p = p(V, T) = \frac{RT}{V}$$

$$V = V(p, T) = \frac{RT}{p}$$

$$T = T(p, V) = \frac{pV}{R}$$

1.1. Partielle Ableitungen

Definition: Sei $D \subset \mathbb{R}^n$ offen, $f : D \rightarrow \mathbb{R}$, $x^0 \in D$.

- $f(x)$ heißt in x^0 nach x_i **partiell differenzierbar**, falls der Grenzwert

$$\begin{aligned}\frac{\partial f}{\partial x_i}(x^0) &:= \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(x^0 + te_i) - f(x^0)}{t} \\ &= \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(x_1^0, \dots, x_i^0 + t, \dots, x_n^0) - f(x_1^0, \dots, x_i^0, \dots, x_n^0)}{t}\end{aligned}$$

existiert, wobei e_i den i -ten Einheitsvektor bezeichnet. Den Grenzwert nennt man die **partielle Ableitung** von $f(x)$ nach x_i im Punkt x^0 .

- Existieren für jeden Punkt x^0 die partiellen Ableitungen nach jeder Variablen x_i , $i = 1, \dots, n$ und sind diese **stetige Funktionen**, so nennt man $f(x)$ **stetig partiell differenzierbar** oder eine **C^1 -Funktion**.

Beispiele.

- Betrachte die Funktion

$$f(x_1, x_2) = x_1^2 + x_2^2$$

Für einen Punkt $x^0 \in \mathbb{R}^2$ existieren beide partiellen Ableitungen und diese sind auch stetig:

$$\frac{\partial f}{\partial x_1}(x^0) = 2x_1, \quad \frac{\partial f}{\partial x_2}(x^0) = 2x_2$$

Die Funktion ist also eine \mathcal{C}^1 -Funktion.

- Die Funktion

$$f(x_1, x_2) = x_1 + |x_2|$$

ist im Punkt $x^0 = (0, 0)^T$ partiell differenzierbar nach der Koordinate x_1 , aber die partielle Ableitung nach x_2 existiert im Ursprung **nicht!**

Konkretes technisches Beispiel.

Der Schalldruck einer eindimensionalen Schallwelle ist gegeben durch

$$p(x, t) = A \sin(\alpha x - \omega t)$$

Die partielle Ableitung

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \alpha A \cos(\alpha x - \omega t)$$

beschreibt zu einer festen Zeit t die **örtliche** Änderungsrate des Schalldrucks.

Die partielle Ableitung

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\omega A \cos(\alpha x - \omega t)$$

beschreibt für einen festen Ort x die **zeitliche** Änderung des Schalldruckes.

Differentiationsregeln

- Sind f, g partiell nach x_i differenzierbar, $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$, so gelten die Regeln

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha f(x) + \beta g(x)) = \alpha \frac{\partial f}{\partial x_i}(x) + \beta \frac{\partial g}{\partial x_i}(x)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (f(x) \cdot g(x)) = \frac{\partial f}{\partial x_i}(x) \cdot g(x) + f(x) \cdot \frac{\partial g}{\partial x_i}(x)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{f(x)}{g(x)} \right) = \frac{\frac{\partial f}{\partial x_i}(x) \cdot g(x) - f(x) \cdot \frac{\partial g}{\partial x_i}(x)}{g(x)^2} \quad \text{für } g(x) \neq 0$$

- Man verwendet alternativ die Bezeichnungen:

$$D_i f(x^0) \quad \text{oder} \quad f_{x_i}(x^0)$$

für die partielle Ableitung von $f(x)$ nach x_i in x^0 .

Gradient und Nabla-Operator.

Definition: Sei $f : D \rightarrow \mathbb{R}$, $D \subset \mathbb{R}^n$ offen, und partiell differenzierbar.

- Man bezeichnet den **Zeilenvektor**

$$\text{grad } f(x^0) := \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}(x^0), \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n}(x^0) \right)$$

als **Gradient** von $f(x)$ in x^0 .

- Weiterhin bezeichnet man den symbolischen Vektor

$$\nabla := \left(\frac{\partial}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial}{\partial x_n} \right)^T$$

als **Nabla-Operator**.

- So bekommt man den **Spaltenvektor**

$$\nabla f(x^0) := \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}(x^0), \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n}(x^0) \right)^T$$

Weitere Differentiationsregeln.

Seien $f(x)$ und $g(x)$ partiell differenzierbar. Dann gelten die folgenden **Differentiationsregeln**:

$$\text{grad}(\alpha f + \beta g) = \alpha \cdot \text{grad} f + \beta \cdot \text{grad} g$$

$$\text{grad}(f \cdot g) = g \cdot \text{grad} f + f \cdot \text{grad} g$$

$$\text{grad}\left(\frac{f}{g}\right) = \frac{1}{g^2}(g \cdot \text{grad} f - f \cdot \text{grad} g), \quad g \neq 0$$

Beispiele:

- Sei $f(x, y) = e^x \cdot \sin y$. Dann gilt:

$$\text{grad} f(x, y) = (e^x \cdot \sin y, e^x \cdot \cos y) = e^x(\sin y, \cos y)$$

- Für $r(x) := \|x\|_2 = \sqrt{x_1^2 + \dots + x_n^2}$ gilt

$$\text{grad} r(x) = \frac{x}{r(x)} = \frac{x}{\|x\|_2} \quad \text{für } x \neq 0,$$

wobei $x = (x_1, \dots, x_n)$ Zeilenvektor.

Partiell differenzierbar impliziert nicht Stetigkeit.

Beobachtung: Eine (nach allen Koordinaten) partiell differenzierbare Funktion ist nicht notwendigerweise eine **stetige** Funktion.

Beispiel: Betrachte die Funktion $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ definiert durch

$$f(x, y) := \begin{cases} \frac{x \cdot y}{(x^2 + y^2)^2} & : \text{für } (x, y) \neq 0 \\ 0 & : \text{für } (x, y) = 0 \end{cases}$$

Die Funktion ist auf **ganz** \mathbb{R}^2 partiell differenzierbar, und es gilt

$$f_x(0, 0) = f_y(0, 0) = 0$$

$$\frac{\partial f}{\partial x}(x, y) = \frac{y}{(x^2 + y^2)^2} - 4 \frac{x^2 y}{(x^2 + y^2)^3}, \quad (x, y) \neq (0, 0)$$

$$\frac{\partial f}{\partial y}(x, y) = \frac{x}{(x^2 + y^2)^2} - 4 \frac{xy^2}{(x^2 + y^2)^3}, \quad (x, y) \neq (0, 0)$$

Beispiel (Fortsetzung).

Berechnung der partiellen Ableitungen im Ursprung $(0, 0)$:

$$\frac{\partial f}{\partial x}(0, 0) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(t, 0) - f(0, 0)}{t} = \frac{t \cdot 0}{(t^2 + 0^2)^2} - 0 = \frac{0}{t} = 0$$

$$\frac{\partial f}{\partial y}(0, 0) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(0, t) - f(0, 0)}{t} = \frac{0 \cdot t}{(0^2 + t^2)^2} - 0 = \frac{0}{t} = 0$$

Aber: Im Nullpunkt $(0, 0)$ ist die Funktion **nicht** stetig, denn

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f\left(\frac{1}{n}, \frac{1}{n}\right) = \frac{\frac{1}{n} \cdot \frac{1}{n}}{\left(\frac{1}{n} \cdot \frac{1}{n} + \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{n}\right)^2} = \frac{\frac{1}{n^2}}{\frac{4}{n^4}} = \frac{n^2}{4} \rightarrow \infty$$

und somit gilt

$$\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} f(x, y) \neq f(0, 0) = 0$$

Beschränktheit der Ableitungen impliziert Stetigkeit.

Um die Stetigkeit einer partiell differenzierbaren Funktion zu garantieren, benötigt man zusätzliche Voraussetzungen an f .

Satz: Ist $f : D \rightarrow \mathbb{R}$, $D \subset \mathbb{R}^n$ offen, in einer Umgebung von $x^0 \in D$ partiell differenzierbar, und sind die partiellen Ableitungen $\frac{\partial f}{\partial x_i}$, $i = 1, \dots, n$, dort **beschränkt**, so ist $f(x)$ **stetig** in x^0 .

Beachte: In unserem vorigem Beispiel sind die partiellen Ableitungen in einer Umgebung der Null $(0, 0)$ **nicht** beschränkt, denn es gilt

$$\frac{\partial f}{\partial x}(x, y) = \frac{y}{(x^2 + y^2)^2} - 4 \frac{x^2 y}{(x^2 + y^2)^3} \quad \text{für } (x, y) \neq (0, 0)$$

Beweis des Satzes.

Für $\|x - x^0\|_\infty < \varepsilon$, $\varepsilon > 0$ hinreichend klein, schreiben wir:

$$\begin{aligned} f(x) - f(x^0) &= (f(x_1, \dots, x_{n-1}, x_n) - f(x_1, \dots, x_{n-1}, x_n^0)) \\ &+ (f(x_1, \dots, x_{n-1}, x_n^0) - f(x_1, \dots, x_{n-2}, x_{n-1}^0, x_n^0)) \\ &\vdots \\ &+ (f(x_1, x_2^0, \dots, x_n^0) - f(x_1^0, \dots, x_n^0)) \end{aligned}$$

Für jede Differenz auf der linken Seite, betrachten wir f als univariate Funktion:

$$g(x_n) - g(x_n^0) := f(x_1, \dots, x_{n-1}, x_n) - f(x_1, \dots, x_{n-1}, x_n^0)$$

Da f partiell differenzierbar, ist g differenzierbar und es gilt der Mittelwertsatz:

$$g(x_n) - g(x_n^0) = g'(\xi_n)(x_n - x_n^0)$$

für ein geeignetes ξ_n zwischen x_n und x_n^0 .

Beweis des Satzes (Fortsetzung).

Anwendung des **Mittelwertsatzes** auf jeden Term der rechten Seite ergibt somit

$$\begin{aligned} f(x) - f(x^0) &= \frac{\partial f}{\partial x_n}(x_1, \dots, x_{n-1}, \xi_n) \cdot (x_n - x_n^0) \\ &+ \frac{\partial f}{\partial x_{n-1}}(x_1, \dots, x_{n-2}, \xi_{n-1}, x_n^0) \cdot (x_{n-1} - x_{n-1}^0) \\ &\vdots \\ &+ \frac{\partial f}{\partial x_1}(\xi_1, x_2^0, \dots, x_n^0) \cdot (x_1 - x_1^0) \end{aligned}$$

Mit der Beschränktheit der partiellen Ableitungen gilt

$$|f(x) - f(x^0)| \leq C_1|x_1 - x_1^0| + \dots + C_n|x_n - x_n^0|$$

für $\|x - x^0\|_\infty < \varepsilon$, und damit ist $f(x)$ **stetig** in x^0 , denn es gilt

$$f(x) \rightarrow f(x^0) \quad \text{für } \|x - x^0\|_\infty \rightarrow 0$$

Höhere Ableitungen.

Definition: Eine skalare Funktion $f(x)$ sei auf einer offenen Menge $D \subset \mathbb{R}^n$ partiell differenzierbar. Sind die partiellen Ableitungen erneut partiell differenzierbar, so erhält man sämtliche **partiellen Ableitungen zweiter Ordnung** von f mit

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i} := \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)$$

Beispiel: Partielle Ableitungen zweiter Ordnung einer Funktion $f(x, y)$:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right), \quad \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right), \quad \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}, \quad \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}$$

Seien nun $i_1, \dots, i_k \in \{1, \dots, n\}$. Dann definiert man rekursiv

$$\frac{\partial^k f}{\partial x_{i_k} \partial x_{i_{k-1}} \dots \partial x_{i_1}} := \frac{\partial}{\partial x_{i_k}} \left(\frac{\partial^{k-1} f}{\partial x_{i_{k-1}} \partial x_{i_{k-2}} \dots \partial x_{i_1}} \right)$$

Ableitungen höherer Ordnung.

Definition: Die Funktion $f(x)$ heißt k -fach partiell differenzierbar, falls alle Ableitungen der Ordnung k ,

$$\frac{\partial^k f}{\partial x_{i_k} \partial x_{i_{k-1}} \dots \partial x_{i_1}} \quad \text{für alle } i_1, \dots, i_k \in \{1, \dots, n\},$$

auf D existieren.

Alternative Notationen:

$$\frac{\partial^k f}{\partial x_{i_k} \partial x_{i_{k-1}} \dots \partial x_{i_1}} = D_{i_k} D_{i_{k-1}} \dots D_{i_1} f = f_{x_{i_1} \dots x_{i_k}}$$

Sind alle Ableitungen k -ter Ordnung stetig, so heißt die Funktion $f(x)$ k -fach stetig partiell differenzierbar oder auch C^k -Funktion auf D . Stetige Funktionen $f(x)$ nennt man auch C^0 -Funktionen.

Beispiel: Für die Funktion $f(x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n x_i^i$ gilt $\frac{\partial^n f}{\partial x_n \dots \partial x_1} = ?$

Partielle Ableitungen sind nicht beliebig vertauschbar.

ACHTUNG: Die Reihenfolge, in der die partiellen Ableitungen durchzuführen sind, ist im Allgemeinen **nicht** beliebig vertauschbar!

Beispiel: Für die Funktion

$$f(x, y) := \begin{cases} xy \frac{x^2 - y^2}{x^2 + y^2} & : \text{ für } (x, y) \neq (0, 0) \\ 0 & : \text{ für } (x, y) = (0, 0) \end{cases}$$

berechnet man direkt

$$f_{xy}(0, 0) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial f}{\partial x}(0, 0) \right) = -1$$

$$f_{yx}(0, 0) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial f}{\partial y}(0, 0) \right) = +1$$

d.h. $f_{xy}(0, 0) \neq f_{yx}(0, 0)$.

Vertauschbarkeitssatz von Schwarz.

Satz: Ist $f : D \rightarrow \mathbb{R}$, $D \subset \mathbb{R}^n$ offen, eine C^2 -Funktion, so gilt

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i}(x_1, \dots, x_n) = \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}(x_1, \dots, x_n)$$

für alle $i, j \in \{1, \dots, n\}$.

Beweisidee:

Zweifache Anwendung des Mittelwertsatzes.

Folgerung:

Ist $f(x)$ eine C^k -Funktion, so kann man die Reihenfolge der Differentiationen zur Berechnung der partiellen Ableitungen bis zur k -ten Ordnung **beliebig** vertauschen!

Beispiel zur Vertauschbarkeit partieller Ableitungen.

Berechne für die Funktion

$$f(x, y, z) = y^2 z \sin(x^3) + (\cosh y + 17e^{x^2})z^2$$

die partielle Ableitung dritter Ordnung f_{xyz} .

Die Reihenfolge der partiellen Ableitungen ist vertauschbar, da $f \in \mathcal{C}^3$.

- Differenziere zunächst nach z :

$$\frac{\partial f}{\partial z} = y^2 \sin(x^3) + 2z(\cosh y + 17e^{x^2})$$

- Differenziere dann f_z nach x (damit fällt $\cosh y$ raus):

$$\begin{aligned} f_{zx} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(y^2 \sin(x^3) + 2z(\cosh y + 17e^{x^2}) \right) \\ &= 3x^2 y^2 \cos(x^3) + 68xze^{x^2} \end{aligned}$$

- Für die partielle Ableitung von f_{zx} nach y erhalten wir schließlich

$$f_{xyz} = 6x^2 y \cos(x^3)$$

Der Laplace-Operator.

Der Laplace-Operator ist definiert durch

$$\Delta := \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2}{\partial x_i^2}$$

Für eine skalare Funktion $u(x) = u(x_1, \dots, x_n)$ gilt somit

$$\Delta u = \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} = u_{x_1 x_1} + \dots + u_{x_n x_n}$$

Beispiele für wichtige partielle Differentialgleichungen zweiter Ordnung:

$$\Delta u - \frac{1}{c^2} u_{tt} = 0 \quad (\text{Wellengleichung})$$

$$\Delta u - \frac{1}{k} u_t = 0 \quad (\text{Wärmeleitungsgleichung})$$

$$\Delta u = 0 \quad (\text{Laplace-Gleichung oder Potentialgleichung})$$

Vektorwertige Funktionen.

Definition: Sei $f : D \rightarrow \mathbb{R}^m$, $D \subset \mathbb{R}^n$ offen, $f = (f_1, \dots, f_m)^T$, eine vektorwertige Funktion.

Die Funktion f heißt **partiell differenzierbar** in $x^0 \in D$, falls für alle $i = 1, \dots, n$ die Grenzwerte

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

existieren. Die Berechnung erfolgt komponentenweise

$$\frac{\partial f}{\partial x_i}(x^0) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_i} \\ \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_i} \end{pmatrix} \quad \text{für } i = 1, \dots, n$$

Vektorfelder.

Definition: Für $m = n$ nennt man die Funktion $f : D \rightarrow \mathbb{R}^n$ ein **Vektorfeld** auf D . Ist jede Koordinatenfunktion $f_i(x)$ von $f = (f_1, \dots, f_n)^T$ eine C^k -Funktion, so nennt man f ein **C^k -Vektorfeld**.

Beispiele für Vektorfelder:

- Geschwindigkeitsfelder von strömenden Flüssigkeiten oder Gasen;
- elektromagnetische Felder;
- Temperaturgradienten in Festkörpern.

Definition: Für ein partiell differenzierbares Vektorfeld $f : D \rightarrow \mathbb{R}^n$ definiert man die **Divergenz** in $x \in D$ durch

$$\operatorname{div} f(x^0) := \sum_{i=1}^n \frac{\partial f_i}{\partial x_i}(x^0)$$

oder

$$\operatorname{div} f(x) = \nabla^T f(x) = (\nabla, f(x))$$

Rechenregeln und Rotation.

Es gelten die folgenden Rechenregeln:

$$\operatorname{div}(\alpha f + \beta g) = \alpha \operatorname{div} f + \beta \operatorname{div} g \quad \text{für } f, g : D \rightarrow \mathbb{R}^n$$

$$\operatorname{div}(\varphi \cdot f) = (\nabla \varphi, f) + \varphi \operatorname{div} f \quad \text{für } \varphi : D \rightarrow \mathbb{R}, f : D \rightarrow \mathbb{R}^n$$

Bemerkung: Ist $f : D \rightarrow \mathbb{R}$ eine \mathcal{C}^2 -Funktion, so gilt für den Laplace-Operator

$$\Delta f = \operatorname{div}(\nabla f)$$

Definition: Für ein partiell differenzierbares Vektorfeld im \mathbb{R}^3 , $f : D \rightarrow \mathbb{R}^3$, $D \subset \mathbb{R}^3$ offen, definiert man die **Rotation** durch

$$\operatorname{rot} f(x^0) := \left(\frac{\partial f_3}{\partial x_2} - \frac{\partial f_2}{\partial x_3}, \frac{\partial f_1}{\partial x_3} - \frac{\partial f_3}{\partial x_1}, \frac{\partial f_2}{\partial x_1} - \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right)^T \Big|_{x^0}$$

Alternativ Notationen und weitere Rechenregeln.

$$\operatorname{rot} f(\mathbf{x}) = \nabla \times f(\mathbf{x}) = \begin{vmatrix} \mathbf{e}_1 & \mathbf{e}_2 & \mathbf{e}_3 \\ \frac{\partial}{\partial x_1} & \frac{\partial}{\partial x_2} & \frac{\partial}{\partial x_3} \\ f_1 & f_2 & f_3 \end{vmatrix}$$

Bemerkung: Es gelten die folgenden Rechenregeln:

$$\operatorname{rot}(\alpha f + \beta g) = \alpha \operatorname{rot} f + \beta \operatorname{rot} g$$

$$\operatorname{rot}(\varphi \cdot f) = (\nabla \varphi) \times f + \varphi \operatorname{rot} f$$

Bemerkung: Ist $\varphi : D \rightarrow \mathbb{R}$, $D \subset \mathbb{R}^3$, eine \mathcal{C}^2 -Funktion, so folgt

$$\operatorname{rot}(\nabla \varphi) = 0,$$

mit dem Vertauschbarkeitssatz von Schwarz, d.h. Gradientenfelder sind stets **rotationsfrei**.

1.2 Das vollständige Differential

Definition: Sei $D \subset \mathbb{R}^n$ offen, $x^0 \in D$ und $f : D \rightarrow \mathbb{R}^m$. Die Funktion $f(x)$ heißt **differenzierbar** in x^0 (oder **vollständig differenzierbar** bzw. **total differenzierbar** in x_0), falls es eine lineare Abbildung

$$l(x, x^0) := A \cdot (x - x^0)$$

mit einer Matrix $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ gibt, für die die Approximationseigenschaft

$$f(x) = f(x^0) + A \cdot (x - x^0) + o(\|x - x^0\|)$$

gilt, d.h.

$$\lim_{x \rightarrow x^0} \frac{f(x) - f(x^0) - A \cdot (x - x^0)}{\|x - x^0\|} = 0.$$

Das vollständige Differential und die Jacobi-Matrix.

Bezeichnungen: Man nennt die lineare Abbildung l das **vollständige Differential** oder das **totale Differential** von $f(x)$ im Punkt x^0 , und man bezeichnet l mit $df(x^0)$.

Die zugehörige Matrix A heißt **Jacobi-Matrix** oder **Funktionalmatrix** von $f(x)$ im Punkt x^0 und wird mit $Jf(x^0)$ (manchmal auch mit $Df(x^0)$ oder $f'(x^0)$) bezeichnet.

Bemerkung: Für $m = n = 1$ erhalten wir die bekannte Beziehung

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + o(|x - x_0|)$$

für die Ableitung $f'(x_0)$ im Punkt x_0 .

Bemerkung: Im Fall einer skalaren Funktion ($m = 1$) ist $A = a$ ein Zeilenvektor und $a(x - x^0)$ ein Skalarprodukt $\langle a^T, x - x^0 \rangle$.

Vollständige und partielle Differenzierbarkeit.

Satz: Sei $f : D \rightarrow \mathbb{R}^m$, $x^0 \in D \subset \mathbb{R}^n$, D offen.

- a) Ist $f(x)$ in x^0 differenzierbar, so ist $f(x)$ auch stetig in x^0 .
- b) Ist $f(x)$ in x^0 differenzierbar, so ist das (vollständige) Differential und damit auch die Jacobi-Matrix eindeutig bestimmt und es gilt

$$Jf(x^0) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}(x^0) & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n}(x^0) \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1}(x^0) & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n}(x^0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Df_1(x^0) \\ \vdots \\ Df_m(x^0) \end{pmatrix}$$

- c) Ist $f(x)$ eine C^1 -Funktion auf D , so ist $f(x)$ auf D differenzierbar.

Beweis von a).

Ist f in x^0 differenzierbar, so gilt nach Definition

$$\lim_{x \rightarrow x^0} \frac{f(x) - f(x^0) - A \cdot (x - x^0)}{\|x - x^0\|} = 0$$

Daraus folgt aber

$$\lim_{x \rightarrow x^0} \|f(x) - f(x^0) - A \cdot (x - x^0)\| = 0$$

und wir erhalten

$$\begin{aligned} \|f(x) - f(x^0)\| &\leq \|f(x) - f(x^0) - A \cdot (x - x^0)\| + \|A \cdot (x - x^0)\| \\ &\rightarrow 0 \quad \text{für } x \rightarrow x^0 \end{aligned}$$

Damit ist die Funktion f stetig im Punkt x^0 .

Beweis von b).

Sei $x = x^0 + te_i$, $|t| < \varepsilon$, $i \in \{1, \dots, n\}$. Da f im Punkt x^0 differenzierbar ist, folgt

$$\lim_{x \rightarrow x^0} \frac{f(x) - f(x^0) - A \cdot (x - x^0)}{\|x - x^0\|_\infty} = 0$$

Wir schreiben nun

$$\begin{aligned} \frac{f(x) - f(x^0) - A \cdot (x - x^0)}{\|x - x^0\|_\infty} &= \frac{f(x^0 + te_i) - f(x^0)}{|t|} - \frac{tAe_i}{|t|} \\ &= \frac{t}{|t|} \cdot \left(\frac{f(x^0 + te_i) - f(x^0)}{t} - Ae_i \right) \\ &\rightarrow 0 \quad \text{für } t \rightarrow 0 \end{aligned}$$

Daraus folgt

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(x^0 + te_i) - f(x^0)}{t} = Ae_i \quad i = 1, \dots, n$$

Beispiele.

- Betrachte die skalare Funktion $f(x_1, x_2) = x_1 e^{2x_2}$. Dann lautet die Jacobi-Matrix:

$$Jf(x_1, x_2) = Df(x_1, x_2) = e^{2x_2} (1, 2x_1)$$

- Betrachte die Funktion $f : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$ definiert durch

$$f(x_1, x_2, x_3) = \begin{pmatrix} x_1 x_2 x_3 \\ \sin(x_1 + 2x_2 + 3x_3) \end{pmatrix}$$

Die Jacobi-Matrix ergibt sich in der Form

$$Jf(x_1, x_2, x_3) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2 x_3 & x_1 x_3 & x_1 x_2 \\ \cos(s) & 2 \cos(s) & 3 \cos(s) \end{pmatrix}$$

wobei $s = x_1 + 2x_2 + 3x_3$.

Weitere Beispiele.

- Sei $f(x) = Ax$, $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ und $x \in \mathbb{R}^n$. Dann gilt

$$Jf(x) = A \quad \text{für alle } x \in \mathbb{R}^n$$

- Sei $f(x) = x^T Ax = \langle x, Ax \rangle$, $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ und $x \in \mathbb{R}^n$.
Dann gilt

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial x_i} &= \langle e_i, Ax \rangle + \langle x, Ae_i \rangle \\ &= e_i^T Ax + x^T Ae_i \\ &= x^T (A^T + A) e_i \end{aligned}$$

Daraus folgt

$$Jf(x) = \text{grad}f(x) = x^T (A^T + A)$$

Differentiationsregeln.

Satz:

- a) **Linearität:** Sind $f, g : D \rightarrow \mathbb{R}^m$ differenzierbar in $x^0 \in D$, D offen, so ist auch $\alpha f(x^0) + \beta g(x^0)$, $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$, differenzierbar in x^0 und es gilt

$$d(\alpha f + \beta g)(x^0) = \alpha df(x^0) + \beta dg(x^0)$$

$$J(\alpha f + \beta g)(x^0) = \alpha Jf(x^0) + \beta Jg(x^0)$$

- b) **Kettenregel:** Ist $f : D \rightarrow \mathbb{R}^m$ differenzierbar in $x^0 \in D$, D offen, und ist $g : E \rightarrow \mathbb{R}^k$ differenzierbar in $y^0 = f(x^0) \in E \subset \mathbb{R}^m$, E offen, so ist $g \circ f$ ebenfalls in x^0 differenzierbar.

Für die Differentiale gilt

$$d(g \circ f)(x^0) = dg(y^0) \circ df(x^0)$$

und analog für die Jacobi-Matrizen

$$J(g \circ f)(x^0) = Jg(y^0) \cdot Jf(x^0)$$

Beispiel zur Kettenregel.

Sei $h : I \rightarrow \mathbb{R}^n$, $I \subset \mathbb{R}$ Intervall, eine in $t_0 \in I$ differenzierbare Kurve mit Werten in $D \subset \mathbb{R}^n$, D offen, und $f : D \rightarrow \mathbb{R}$ eine in $x^0 = h(t_0)$ differenzierbare skalare Funktion.

Dann ist auch die Hintereinanderausführung

$$(f \circ h)(t) = f(h_1(t), \dots, h_n(t))$$

in t_0 differenzierbar, und für die Ableitung gilt:

$$\begin{aligned}(f \circ h)'(t_0) &= Jf(h(t_0)) \cdot Jh(t_0) \\ &= \operatorname{grad} f(h(t_0)) \cdot h'(t_0) \\ &= \sum_{k=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_k}(h(t_0)) \cdot h'_k(t_0)\end{aligned}$$

Richtungsableitungen.

Definition: Sei $f : D \rightarrow \mathbb{R}$, $D \subset \mathbb{R}^n$ offen, $x^0 \in D$, und $v \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$ ein Vektor. Dann heißt

$$D_v f(x^0) := \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(x^0 + tv) - f(x^0)}{t}$$

die **Richtungsableitung (Gateaux–Ableitung)** von $f(x)$ in Richtung v .

Beispiel: Sei $f(x, y) = x^2 + y^2$ und $v = (1, 1)^T$. Dann gilt für die Richtungsableitung in Richtung v :

$$\begin{aligned} D_v f(x, y) &= \lim_{t \rightarrow 0} \frac{(x+t)^2 + (y+t)^2 - x^2 - y^2}{t} \\ &= \lim_{t \rightarrow 0} \frac{2xt + t^2 + 2yt + t^2}{t} \\ &= 2(x+y) \end{aligned}$$

Bemerkungen.

- Für $v = e_j$ ist die Richtungsableitung in Richtung v gegeben durch die partielle Ableitung nach der Koordinatenrichtung x_j :

$$D_v f(x^0) = \frac{\partial f}{\partial x_j}(x^0)$$

- Ist v ein Einheitsvektor, also $\|v\| = 1$, so beschreibt die Richtungsableitung $D_v f(x^0)$ den **Anstieg** (bzw. die **Steigung**) von $f(x)$ in Richtung v .
- Ist $f(x)$ in x^0 differenzierbar, so existieren sämtliche Richtungsableitungen von $f(x)$ in x^0 und mit $h(t) = x^0 + tv$ gilt

$$D_v f(x^0) = \frac{d}{dt}(f \circ h)|_{t=0} = \text{grad } f(x^0) \cdot v$$

Dies folgt unmittelbar aus der Anwendung der Kettenregel.

Eigenschaften des Gradienten.

Satz: Sei $f : D \rightarrow \mathbb{R}$, $D \subset \mathbb{R}^n$ offen, in $x^0 \in D$ differenzierbar. Dann gilt

- a) Der Gradientenvektor $\text{grad } f(x^0) \in \mathbb{R}^n$ steht senkrecht auf der **Niveaumenge**

$$N_{x^0} := \{x \in D \mid f(x) = f(x^0)\}$$

Im Fall $n = 2$ nennt man die Niveaumengen auch **Höhenlinien**, im Fall $n = 3$ heißen die Niveaumengen auch **Äquipotentialflächen**.

- 2) Der Gradient $\text{grad } f(x^0)$ gibt die Richtung des steilsten Anstiegs von $f(x)$ in x^0 an.

Beweisidee:

- a) Anwendung der Kettenregel.
b) Für beliebige Richtung v gilt mit der Cauchy-Schwarzschen Ungleichung

$$|D_v f(x^0)| = |(\text{grad } f(x^0), v)| \leq \|\text{grad } f(x^0)\|_2$$

Gleichheit wird für $v = \text{grad } f(x^0) / \|\text{grad } f(x^0)\|_2$ angenommen.

Krummlinige Koordinaten.

Definition: Sei $\Phi : U \rightarrow V$, $U, V \subset \mathbb{R}^n$ offen, eine \mathcal{C}^1 -Abbildung, für die die Jacobimatrix $J\Phi(u^0)$ an jeder Stelle $u^0 \in U$ regulär ist.

Weiterhin existiere die Umkehrabbildung $\Phi^{-1} : V \rightarrow U$ und diese sei ebenfalls eine \mathcal{C}^1 -Abbildung.

Dann definiert $x = \Phi(u)$ eine **Koordinatentransformation** von den Koordinaten u auf x .

Beispiel: Betrachte für $n = 2$ die **Polarkoordinaten** $u = (r, \varphi)$ mit $r > 0$ und $-\pi < \varphi < \pi$ und setze

$$x = r \cos \varphi$$

$$y = r \sin \varphi$$

mit den **kartesischen Koordinaten** $x = (x, y)$.

Umrechnung der partiellen Ableitungen.

Für alle $u \in U$ mit $x = \Phi(u)$ gelten die Relationen

$$\Phi^{-1}(\Phi(u)) = u$$

$$J\Phi^{-1}(x) \cdot J\Phi(u) = I_n \quad (\text{Kettenregel})$$

$$J\Phi^{-1}(x) = (J\Phi(u))^{-1}$$

Sei nun $\tilde{f} : V \rightarrow \mathbb{R}$ eine gegebene Funktion und setze

$$f(u) := \tilde{f}(\Phi(u))$$

Dann folgt aus der Kettenregel:

$$\frac{\partial f}{\partial u_i} = \sum_{j=1}^n \frac{\partial \tilde{f}}{\partial x_j} \frac{\partial \Phi_j}{\partial u_i} =: \sum_{j=1}^n g^{ij} \frac{\partial \tilde{f}}{\partial x_j}$$

mit

$$g^{ij} := \frac{\partial \Phi_j}{\partial u_i}, \quad G(u) := (g^{ij}) = (J\Phi(u))^T$$

Notationen.

Wir verwenden die abkürzende Schreibweise

$$\frac{\partial}{\partial u_i} = \sum_{j=1}^n g^{ij} \frac{\partial}{\partial x_j}$$

Analog lassen sich die partiellen Ableitungen nach x_i durch die partiellen Ableitungen nach u_j ausdrücken mit

$$\frac{\partial}{\partial x_i} = \sum_{j=1}^n g_{ij} \frac{\partial}{\partial u_j}$$

wobei

$$(g_{ij}) := (g^{ij})^{-1} = (J\Phi)^{-T} = (J\Phi^{-1})^T$$

Man erhält diese Beziehungen durch Anwendung der Kettenregel auf Φ^{-1} .

Beispiel: Polarkoordinaten.

Wir betrachten die Polarkoordinaten

$$x = \Phi(u) = \begin{pmatrix} r \cos \varphi \\ r \sin \varphi \end{pmatrix}$$

Dann berechnet man

$$J\Phi(u) = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -r \sin \varphi \\ \sin \varphi & r \cos \varphi \end{pmatrix}$$

und damit

$$(g^{ij}) = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -r \sin \varphi & r \cos \varphi \end{pmatrix} \quad (g_{ij}) = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\frac{1}{r} \sin \varphi \\ \sin \varphi & \frac{1}{r} \cos \varphi \end{pmatrix}$$

Partielle Ableitungen für die Polarkoordinaten.

Für die Umrechnung der partiellen Ableitungen bekommt man nun

$$\frac{\partial}{\partial x} = \cos \varphi \frac{\partial}{\partial r} - \frac{1}{r} \sin \varphi \frac{\partial}{\partial \varphi}$$

$$\frac{\partial}{\partial y} = \sin \varphi \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r} \cos \varphi \frac{\partial}{\partial \varphi}$$

Beispiel: Umrechnung des **Laplace-Operator** auf Polarkoordinaten

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} = \cos^2 \varphi \frac{\partial^2}{\partial r^2} - \frac{\sin(2\varphi)}{r} \frac{\partial^2}{\partial r \partial \varphi} + \frac{\sin^2 \varphi}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\sin(2\varphi)}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} + \frac{\sin^2 \varphi}{r} \frac{\partial}{\partial r}$$

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2} = \sin^2 \varphi \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\sin(2\varphi)}{r} \frac{\partial^2}{\partial r \partial \varphi} + \frac{\cos^2 \varphi}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} - \frac{\sin(2\varphi)}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} + \frac{\cos^2 \varphi}{r} \frac{\partial}{\partial r}$$

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}$$

Beispiel: Kugelkoordinaten.

Wir betrachten die Kugelkoordinaten

$$x = \Phi(u) = \begin{pmatrix} r \cos \varphi \cos \theta \\ r \sin \varphi \cos \theta \\ r \sin \theta \end{pmatrix}$$

Die Jacobi-Matrix ist dann gegeben durch:

$$J\Phi(u) = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \theta & -r \sin \varphi \cos \theta & -r \cos \varphi \sin \theta \\ \sin \varphi \cos \theta & r \cos \varphi \cos \theta & -r \sin \varphi \sin \theta \\ \sin \theta & 0 & r \cos \theta \end{pmatrix}$$

Partielle Ableitungen für die Kugelkoordinaten.

Für die Umrechnung der partiellen Ableitungen bekommt man nun

$$\frac{\partial}{\partial x} = \cos \varphi \cos \theta \frac{\partial}{\partial r} - \frac{\sin \varphi}{r \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \varphi} - \frac{1}{r} \cos \varphi \sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta}$$

$$\frac{\partial}{\partial y} = \sin \varphi \cos \theta \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\cos \varphi}{r \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \varphi} - \frac{1}{r} \sin \varphi \sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta}$$

$$\frac{\partial}{\partial z} = \sin \theta \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r} \cos \theta \frac{\partial}{\partial \theta}$$

Beispiel: Umrechnung des **Laplace-Operators** auf Kugelkoordinaten

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2 \cos^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} - \frac{\tan \theta}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta}$$

Kapitel 1. Differentialrechnung mehrerer Variablen

1.3 Mittelwertsätze und Taylor-Entwicklungen

Satz (Mittelwertsatz): Sei $f : D \rightarrow \mathbb{R}$ eine auf einer offenen Menge $D \subset \mathbb{R}^n$ differenzierbare, skalare Funktion. Weiterhin seien $a, b \in D$ Punkte in D , so dass die Verbindungsstrecke

$$[a, b] := \{a + t(b - a) \mid t \in [0, 1]\}$$

ganz in D liegt. Dann gibt es eine Zahl $\theta \in (0, 1)$ mit

$$f(b) - f(a) = \text{grad } f(a + \theta(b - a)) \cdot (b - a)$$

Beweis: Wir setzen

$$h(t) := f(a + t(b - a))$$

Aus dem Mittelwertsatz für **eine** Veränderliche folgt dann mit der Kettenregel

$$\begin{aligned} f(b) - f(a) &= h(1) - h(0) = h'(\theta) \cdot (1 - 0) \\ &= \text{grad } f(a + \theta(b - a)) \cdot (b - a) \end{aligned}$$

Definition und Beispiel.

Definition: Gilt die Bedingung $[a, b] \subset D$ für **alle** Punkte $a, b \in D$, so heißt die Menge D **konvex**.

Beispiel zum Mittelwertsatz: Gegeben sei die skalare Funktion

$$f(x, y) := \cos x + \sin y$$

Offensichtlich gilt

$$f(0, 0) = f(\pi/2, \pi/2) = 1 \quad \Rightarrow \quad f(\pi/2, \pi/2) - f(0, 0) = 0$$

Nach dem Mittelwertsatz existiert ein $\theta \in (0, 1)$ mit

$$\text{grad } f \left(\theta \begin{pmatrix} \pi/2 \\ \pi/2 \end{pmatrix} \right) \cdot \begin{pmatrix} \pi/2 \\ \pi/2 \end{pmatrix} = 0$$

In der Tat gilt diese Beziehung für $\theta = \frac{1}{2}$.

Mittelwertsatz gilt nur für **skalare** Funktionen.

Beachte: Der Mittelwertsatz für mehrere Variablen gilt nur für **skalare** Funktionen, aber i.A. nicht für **vektorwertige** Funktionen!

Beispiel: Betrachte die **vektorwertige** Funktion

$$f(t) := \begin{pmatrix} \cos t \\ \sin t \end{pmatrix}, \quad t \in [0, \pi/2]$$

Nun gilt

$$f(\pi/2) - f(0) = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

und

$$f' \left(\theta \frac{\pi}{2} \right) \cdot \left(\frac{\pi}{2} - 0 \right) = \frac{\pi}{2} \begin{pmatrix} -\sin(\theta\pi/2) \\ \cos(\theta\pi/2) \end{pmatrix}$$

ABER: Die Vektoren auf der rechten Seite haben die Längen $\sqrt{2}$ bzw. $\pi/2$!

Der Mittelwert–Abschätzungssatz für vektorwertige Funktionen.

Satz: Die Funktion $f : D \rightarrow \mathbb{R}^m$ sei differenzierbar auf der offenen Menge $D \subset \mathbb{R}^n$. Weiterhin seien a, b Punkte in D mit $[a, b] \subset D$. Dann gibt es ein $\theta \in (0, 1)$ mit

$$\|f(b) - f(a)\|_2 \leq \|Jf(a + \theta(b - a)) \cdot (b - a)\|_2$$

Beweisidee: Anwendung des Mittelwertsatzes auf die **skalare** Funktion $g(x)$ definiert durch

$$g(x) := (f(b) - f(a))^T f(x) \quad (\text{Skalarprodukt!})$$

Bemerkung: Eine andere (abgeschwächte) Form der Mittelwert–Abschätzung ist

$$\|f(b) - f(a)\| \leq \sup_{\xi \in [a, b]} \|Jf(\xi)\| \cdot \|(b - a)\|$$

wobei $\|\cdot\|$ eine beliebige Vektor– bzw. zugehörige Matrixnorm ist.

Taylor-Entwicklungen: Notationen.

Zunächst definieren wir einen **Multiindex** $\alpha \in \mathbb{N}_0^n$ als

$$\alpha := (\alpha_1, \dots, \alpha_n) \in \mathbb{N}_0^n$$

Weiterhin sei

$$|\alpha| := \alpha_1 + \dots + \alpha_n \quad \alpha! := \alpha_1! \cdots \alpha_n!$$

Ist $f : D \rightarrow \mathbb{R}$ $|\alpha|$ -mal stetig differenzierbar, so setzen wir

$$D^\alpha = D_1^{\alpha_1} D_2^{\alpha_2} \dots D_n^{\alpha_n} = \frac{\partial^{|\alpha|} f}{\partial x_1^{\alpha_1} \dots \partial x_n^{\alpha_n}},$$

wobei $D_i^{\alpha_i} = \underbrace{D_i \dots D_i}_{\alpha_i\text{-mal}}$ und wir schreiben

$$x^\alpha := x_1^{\alpha_1} x_2^{\alpha_2} \dots x_n^{\alpha_n} \quad \text{für } x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n.$$

Der Satz von Taylor.

Satz: (Satz von Taylor)

Sei $D \subset \mathbb{R}^n$ offen und konvex, $f : D \rightarrow \mathbb{R}$ eine C^{m+1} -Funktion und sei $x_0 \in D$. Dann gilt für $x \in D$ die **Taylor-Entwicklung**

$$f(x) = T_m(x; x_0) + R_m(x; x_0)$$
$$T_m(x; x_0) = \sum_{|\alpha| \leq m} \frac{D^\alpha f(x_0)}{\alpha!} (x - x_0)^\alpha = \underbrace{f(x_0)}_{T_0} + \underbrace{\text{gerade } f(x_0) \cdot (x - x_0)}_{T_1} + \dots$$
$$R_m(x; x_0) = \sum_{|\alpha|=m+1} \frac{D^\alpha f(x_0 + \theta(x - x_0))}{\alpha!} (x - x_0)^\alpha$$

Handwritten notes:
To the right of the first equation: $\frac{\partial}{\partial x_1} f(x_0) (x_1 - x_1^0) + \frac{\partial}{\partial x_2} f(x_0) (x_2 - x_2^0) + \dots$
Under the second equation: T_0 and T_1 are written under $f(x_0)$ and $\text{gerade } f(x_0) \cdot (x - x_0)$ respectively, with a bracket underneath.

mit einem geeigneten $\theta \in (0, 1)$.

Bezeichnung: In der obigen Taylor-Entwicklung heißt $T_m(x; x_0)$ **Taylor-Polynom m -ten Grades** und $R_m(x; x_0)$ wird als **Lagrange-Restglied** bezeichnet.

Herleitung der Taylorschen Formel.

Wir definieren eine skalare Funktion **einer** Variablen $t \in [0, 1]$ als

$$g(t) := f(x_0 + t(x - x_0))$$

$g(0) = f(x_0)$
 $g(1) = f(x)$

und berechnen die Taylor-Entwicklung **um** $t = 0$. Es gilt: *1-dimensional*

$$g(1) = \underbrace{g(0)}_{T_1(1;0)} + g'(0) \cdot (1 - 0) + \frac{1}{2} \underbrace{g''(\xi)}_{R_1(1;0)} \cdot (1 - 0)^2 \quad \text{für ein } \xi \in (0, 1).$$

Die Berechnung von $g'(0)$ liefert mit der Kettenregel

$$\begin{aligned} g'(0) &= \left. \frac{d}{dt} f(x_1^0 + t(x_1 - x_1^0), x_2^0 + t(x_2 - x_2^0), \dots, x_n^0 + t(x_n - x_n^0)) \right|_{t=0} \\ &= D_1 f(x_0) \cdot (x_1 - x_1^0) + \dots + D_n f(x_0) \cdot (x_n - x_n^0) = \text{grad } f(x_0) \cdot (x - x^0) \\ &= \sum_{|\alpha|=1} \frac{D^\alpha f(x_0)}{\alpha!} \cdot (x - x_0)^\alpha \end{aligned}$$

Fortsetzung der Herleitung.

Berechnung von $g''(0)$ liefert

$$g''(0) = \frac{d^2}{dt^2} f(x_0 + t(x - x_0)) \Big|_{t=0} = \frac{d}{dt} \sum_{k=1}^n D_k f(x_0 + t(x - x_0)) (x_k - x_k^0) \Big|_{t=0}$$

Handwritten notes: $g''(t)$ above the derivative; $g(x) = f(x_0 + t(x - x_0)) \cdot (x - x_0)$ above the sum.

$$= \sum_{i,j=1}^h (x_j - x_j^0) \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} f(x_0 + t(x - x_0)) (x_i - x_i^0) \Big|_{t=0} = (*)$$
$$= D_{11} f(x_0) (x_1 - x_1^0)^2 + D_{21} f(x_0) (x_1 - x_1^0) (x_2 - x_2^0)$$

$$+ \dots + D_{ij} f(x_0) (x_i - x_i^0) (x_j - x_j^0) + \dots +$$

$$+ D_{n-1,n} f(x_0) (x_{n-1} - x_{n-1}^0) (x_n - x_n^0) + D_{nn} f(x_0) (x_n - x_n^0)^2$$

$$(*) = \sum_{i,j=1}^h (x_j - x_j^0) \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} f(x_0) (x_i - x_i^0) = (x - x^0)^T A (x - x^0)$$
$$= \sum_{|\alpha|=2} \frac{D^\alpha f(x_0)}{\alpha!} (x - x_0)^\alpha \quad (\text{Vertauschungssatz von Schwarz!})$$

Handwritten note: Q_{ij} below the sum.

Nun: Beweis der Taylor-Formel mittels vollständiger Induktion!

Beweis des Satzes von Taylor.

Die Funktion

$$g(t) := f(x^0 + t(x - x^0))$$

ist $(m + 1)$ -mal stetig differenzierbar, und es gilt

$$g(1) = \sum_{k=0}^m \frac{g^{(k)}(0)}{k!} + \frac{g^{(m+1)}(\theta)}{(m+1)!} \quad \text{für ein } \theta \in [0, 1].$$

Weiterhin gilt (per Induktion über k)

$$\frac{g^{(k)}(0)}{k!} = \sum_{|\alpha|=k} \frac{D^\alpha f(x^0)}{\alpha!} (x - x^0)^\alpha$$

und

$$\frac{g^{(m+1)}(\theta)}{(m+1)!} = \sum_{|\alpha|=m+1} \frac{D^\alpha f(x^0 + \theta(x - x^0))}{\alpha!} (x - x^0)^\alpha$$

Beispiel zur Taylor-Entwicklung.

- 1 Berechne das Taylor-Polynom $T_2(x; x_0)$ zweiten Grades der Funktion

$$f(x, y, z) = x y^2 \sin z$$

zum Entwicklungspunkt $(x, y, z) = (1, 2, 0)^T$.

- 2 Die Berechnung von $T_2(x; x_0)$ benötigt die partiellen Ableitungen bis zur zweiten Ordnung.
- 3 Diese Ableitungen müssen am Punkt $(x, y, z) = (1, 2, 0)^T$ ausgewertet werden.
- 4 Als Ergebnis erhält man $T_2(x; x_0)$ in der Form

$$T_2(x; x_0) = 4z(x + y - 2)$$

- 5 Berechnung auf Folie.

$$f(x, y, z) = xy^2 \sin z \quad x^0 = (1, 2, 0)$$

$$f(1, 2, 0) = 0$$

$$T_0 = 0$$

$$\text{grad } f(x, y, z) = (y^2 \sin z, 2xy \sin z, xy^2 \cos z)$$

$$\text{grad } f(1, 2, 0) \cdot \begin{pmatrix} x-1 \\ y-2 \\ z-0 \end{pmatrix} = (0, 0, 4) \cdot \begin{pmatrix} x-1 \\ y-2 \\ z \end{pmatrix} = 4z$$

$$T_1 = 0 + 4z$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial z}, \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial z}, \begin{pmatrix} f_{xx} & f_{xy} & f_{xz} \\ f_{yx} & f_{yy} & f_{yz} \\ f_{zx} & f_{zy} & f_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\frac{1}{1!1!0!} \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial z} \Big|_{x^0} (x-1)z$$

$$\alpha = (1, 0, 1)$$

$$\frac{1}{0!1!1!} \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial z} \Big|_{x^0} (y-2)z$$

$$\alpha = (0, 1, 1)$$

Bemerkung zum Restglied eines Taylor-Polynoms.

Bemerkung: Das Restglied eines Taylor-Polynoms enthält **alle** partiellen Ableitungen der Ordnung $(m + 1)$:

$f: \mathbb{D} \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$

$$R_m(x; x_0) = \sum_{|\alpha|=m+1} \frac{D^\alpha f(x_0 + \theta(x - x_0))}{\alpha!} (x - x_0)^\alpha$$

Sind all diese Ableitungen in der Nähe von x_0 durch eine Konstante C beschränkt, so gilt die **Restgliedabschätzung**

$$\boxed{|R_m(x; x_0)|} \leq \frac{n^{m+1}}{(m+1)!} C \boxed{\|x - x_0\|_\infty^{m+1}}$$

Für die Approximationsgüte des Taylor-Polynoms einer \mathcal{C}^{m+1} -Funktion folgt daher

$$f(x) = T_m(x; x_0) + O(\|x - x_0\|^{m+1})$$

Spezialfall $m = 1$: Für eine \mathcal{C}^2 -Funktion $f(x)$ bekommt man

$$f(x) = \underbrace{f(x^0) + \text{grad } f(x^0) \cdot (x - x^0)}_{T_1(x; x_0)} + \underbrace{O(\|x - x^0\|^2)}_{\text{Restglied}}$$

Die Hesse-Matrix.

Man nennt die Matrix

$$Hf(x_0) := \begin{pmatrix} f_{x_1 x_1}(x_0) & \dots & f_{x_1 x_n}(x_0) \\ \vdots & & \vdots \\ f_{x_n x_1}(x_0) & \dots & f_{x_n x_n}(x_0) \end{pmatrix}$$

die **Hesse-Matrix** von $f(x)$ im Punkt x_0 .

Hesse-Matrix = Jacobi-Matrix des Gradienten ∇f

Die Taylor-Entwicklung einer \mathcal{C}^3 -Funktion lautet daher

$$f(x) = \underbrace{f(x_0) + \text{grad } f(x_0)(x - x_0) + \frac{1}{2}(x - x_0)^T Hf(x_0)(x - x_0)}_{T_2(x, x_0)} + O(\|x - x_0\|^3)$$

Die Hesse-Matrix einer \mathcal{C}^2 -Funktion ist symmetrisch.

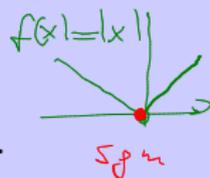
Kapitel 2. Anwendungen der Differentialrechnung mehrerer Variablen

2.1 Extrema von Funktionen mehrerer Veränderlichen

Definition: Sei $f : D \rightarrow \mathbb{R}$, $D \subset \mathbb{R}^n$, und $x^0 \in D$. Dann hat $f(x)$ in x^0

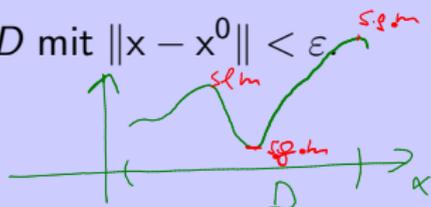
- ein **globales Maximum**, falls $f(x) \leq f(x^0)$ für alle $x \in D$.
- ein **strenges globales Maximum**, falls $f(x) < f(x^0)$ für alle $x \in D$.
- ein **lokales Maximum**, falls es ein $\varepsilon > 0$ gibt mit

$$f(x) \leq f(x^0) \quad \text{für alle } x \in D \text{ mit } \|x - x^0\| < \varepsilon.$$



- ein **strenges lokales Maximum**, falls es ein $\varepsilon > 0$ gibt mit

$$f(x) < f(x^0) \quad \text{für alle } x \in D \text{ mit } \|x - x^0\| < \varepsilon.$$



Analoge Definitionen für Minima.

Notwendige Bedingung für lokale Extrema.

Satz: Besitzt eine C^1 -Funktion $f(x)$ in einem Punkt $x^0 \in D^0$ ein **lokales Extremum** (Minimum oder Maximum), so gilt

$$\text{grad } f(x^0) = 0 \in \mathbb{R}^n$$

$f(x) = |x|$
 $f \notin C^1$ $f'(0) \nexists$
 $x=0$ Extremum

Beweis: Für ein beliebiges $v \in \mathbb{R}^n$, $v \neq 0$ ist die Funktion

$$\varphi(t) := f(x^0 + tv)$$

in einer Umgebung von $t^0 = 0$ stetig differenzierbar.

Weiterhin hat $\varphi(t)$ bei $t^0 = 0$ ein lokales Extremum. Damit folgt:

$\varphi \in C^1$ $\Rightarrow 0 = \varphi'(0) = \text{grad } f(x^0) \cdot v$ $\Rightarrow \text{grad } f(x^0) \cdot v = 0$
 $\forall v \neq 0$

Handwritten notes: f in x_0 Extremum
Kettenregel

Da dies für alle $v \neq 0$ gilt, folgt die Bedingung:

$$\text{grad } f(x^0) = (0, \dots, 0)^T$$

Handwritten notes: z.B. $v = \text{grad } f(x_0)$
 $\Rightarrow |\text{grad } f(x_0)|^2 = 0$

Bemerkungen zu lokalen Extremwerten.

Bemerkungen:

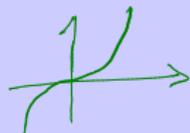
$grad f: D \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ Vektorfeld

- Die Bedingung $grad f(x^0) = 0$ liefert gewöhnlich ein **nichtlineares** Gleichungssystem zur Berechnung von $x = x^0$ mit n Gleichungen und n Unbekannten.
- Die Punkte $x^0 \in D^0$ mit $grad f(x^0) = 0$ nennt man **stationäre Punkte** von $f(x)$. Stationäre Punkte sind **nicht** notwendigerweise lokale Extremwerte. Zum Beispiel besitzt die Funktion

$$f(x, y) := x^2 - y^2$$

$$f(x) = x^3 \quad 0 \text{ stat. P.}$$
$$f'(0) = 0$$

$$grad f(x, y) = 2(x, -y)$$



den Gradienten

und hat daher nur einen stationären Punkt $x^0 = (0, 0)^T$. Der Punkt x^0 ist jedoch ein **Sattelpunkt** von f , d.h. in jeder Umgebung von x^0 gibt es zwei Punkte x^1 und x^2 mit

$$f(x^1) < f(x^0) < f(x^2).$$

Klassifikation stationärer Punkte.

Satz: Sei $f(x)$ eine \mathcal{C}^2 -Funktion auf D^0 und $x^0 \in D^0$ ein stationärer Punkt von $f(x)$, d.h. $\text{grad } f(x^0) = 0$.

a) Notwendige Bedingung

Ist x^0 ein lokales Extremum von $f(x)$, so gilt:

x^0 lokales Minimum $\Rightarrow H f(x^0)$ positiv semidefinit

x^0 lokales Maximum $\Rightarrow H f(x^0)$ negativ semidefinit

b) Hinreichende Bedingung

Ist $H f(x^0)$ positiv definit (bzw. negativ definit), so ist x^0 ein strenges lokales Minimum (bzw. Maximum) von $f(x)$.

Ist $H f(x^0)$ indefinit, so ist x^0 ein Sattelpunkt, d.h. es gibt in jeder Umgebung von x^0 Punkte x^1 und x^2 mit $f(x^1) < f(x^0) < f(x^2)$.

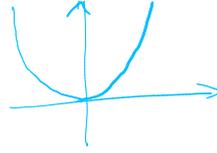
x_0 stat. P., f sei C^2

x_0 strang. lokales Minimum $\not\Rightarrow$ $Hf(x_0)$ positiv definit

$$f(x) = x^4$$

$x_0 = 0$ stat. pt.

$f''(x_0) = 0$ x_0 strang. Min.



Beweis des Satzes, Teil a).

Sei x^0 ein lokales Minimum. Für $v \neq 0$ und $\varepsilon > 0$ hinreichend klein folgt aus der Taylor-Formel

$$f(x^0 + \varepsilon v) - f(x^0) = \underbrace{\frac{1}{2}(\varepsilon v)^T H f(x^0 + \theta \varepsilon v)(\varepsilon v)}_{R_1(x; x_0)} \geq 0 \quad (1)$$

Handwritten notes:
- $x = x_0 + \varepsilon v$
- $x - x_0 = \varepsilon v$
- $\text{grad } f(x_0) = 0$
- $\text{grad } f(x_0) \cdot \varepsilon v = 0$
- weil lokales Min.

mit $\theta = \theta(\varepsilon, v) \in (0, 1)$.

Der Gradient in der Taylorentwicklung verschwindet, $\text{grad } f(x^0) = 0$, denn x^0 ist stationär.

Aus (1) folgt

$$v^T H f(x^0 + \theta \varepsilon v) v \geq 0 \quad (2)$$

Da $f(x)$ eine C^2 -Funktion ist, ist die Hesse-Matrix eine stetige Abbildung. Im Grenzwert $\varepsilon \rightarrow 0$ folgt daher aus (2),

$$v^T H f(x^0) v \geq 0 \quad \forall v \in \mathbb{R}^n$$

d.h. $H f(x^0)$ ist positiv semidefinit.

Beweis des Satzes, Teil b).

Ist $Hf(x^0)$ positiv definit, so ist $Hf(x)$ ebenfalls in einer hinreichend kleinen Umgebung $x \in K_\varepsilon(x^0) \subset D$ um x^0 positiv definit. Dies folgt aus der Stetigkeit der zweiten partiellen Ableitungen.

Für $x \in K_\varepsilon(x^0)$, $x \neq x^0$ gilt damit

$$\begin{aligned} f(x) - f(x^0) &= \frac{1}{2}(x - x^0)^T Hf(x^0 + \theta(x - x^0))(x - x^0) \\ &> 0 \end{aligned}$$

mit $\theta \in (0, 1)$, d.h. $f(x)$ hat in x^0 ein strenges lokales Minimum.

Ist $Hf(x^0)$ indefinit, so existieren zu Eigenwerten von $Hf(x^0)$ mit verschiedenen Vorzeichen gewisse Eigenvektoren v w mit

$$v^T Hf(x^0)v > 0$$

$$w^T Hf(x^0)w < 0$$

und somit ist x^0 ein Sattelpunkt.

Bemerkungen.

- Ein stationärer Punkt x^0 mit $\det Hf(x^0) = 0$ heißt **ausgeartet**. Die Hesse-Matrix besitzt dann den **Eigenwert $\lambda = 0$** .
- Ist x^0 **nicht** ausgeartet, so gibt es 3 Fälle für die Eigenwerte von $Hf(x^0)$:
 - alle EW sind strikt positiv $\Rightarrow x^0$ ist strenges lokales Minimum
 - alle EW sind strikt negativ $\Rightarrow x^0$ ist strenges lokales Maximum
 - es gibt strikt pos. und neg. EW $\Rightarrow x^0$ Sattelpunkt
- Die folgenden Implikationen gelten (**aber für keine die Umkehrung**)

$$\begin{array}{ccc} x^0 \text{ lokales Minimum} & \Leftarrow & x^0 \text{ strenges lokales Minimum} \\ \downarrow & & \uparrow \text{ i.A.} \\ Hf(x^0) \text{ positiv semidefinit} & \Leftarrow & Hf(x^0) \text{ positiv definit} \end{array}$$

Weitere Bemerkung.

- Ist $f(x)$ eine C^3 -Funktion, x^0 ein stationärer Punkt von $f(x)$ und $Hf(x^0)$ positiv definit, so gilt die Abschätzung:

$$(x - x^0)^T Hf(x^0) (x - x^0) \geq \lambda_{\min} \cdot \|x - x^0\|^2$$

wobei λ_{\min} den kleinsten Eigenwert der Hesse-Matrix bezeichnet.

Nach dem Satz von Taylor gilt dann:

$$\begin{aligned} f(x) - f(x^0) &\geq \frac{1}{2} \lambda_{\min} \|x - x^0\|^2 + R_3(x; x^0) \\ &\geq \|x - x^0\|^2 \left(\frac{\lambda_{\min}}{2} - C \|x - x^0\| \right) \end{aligned}$$

mit einer geeigneten Konstanten $C > 0$.

Um x^0 wächst $f(x)$ somit mindestens quadratisch mit dem Abstand von x^0 .

Beispiel.

Wir betrachten die Funktion

$$f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$$

$$f(x, y) := y^2(x - 1) + x^2(x + 1)$$

und suchen die stationären Punkte:

$$\text{grad } f(x, y) = (y^2 + x(3x + 2), 2y(x - 1))^T$$

2 ge.
2 wk.

Die Bedingung $\text{grad } f(x, y) = 0$ liefert die beiden stationären Punkte

$$x^0 = (0, 0)^T \quad \text{und} \quad x^1 = (-2/3, 0)^T.$$

Die jeweiligen Hesse-Matrizen von f an den Stellen x^0 und x^1 lauten

$$Hf(x^0) = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & -2 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad Hf(x^1) = \begin{pmatrix} -2 & 0 \\ 0 & -10/3 \end{pmatrix}$$

Die Matrix $Hf(x^0)$ ist indefinit, also ist x^0 ein Sattelpunkt, $Hf(x^1)$ ist negativ definit, somit ist x^1 ein strenges lokales Maximum von $f(x)$.

Kapitel 2. Anwendungen der Differentialrechnung mehrerer Variablen

2.2 Implizit definierte Funktionen

Ziel: Untersuche die Lösungsmengen von *nichtlinearen* Gleichungssystemen der Form

$$g(x) = 0$$

mit $g : D \rightarrow \mathbb{R}^m$, $D \subset \mathbb{R}^n$, d.h. wir betrachten m Gleichungen für n Unbekannte mit

$$m < n.$$

Also: Es gibt *weniger* Gleichungen als Unbekannte.

Man nennt dann das Gleichungssystem *unterbestimmt* und die Lösungsmenge $G \subset \mathbb{R}^n$ enthält gewöhnlich *unendlich* viele Punkte.

Auflösbarkeit von (nichtlinearen) Gleichungen.

Frage: Kann man das System $g(x) = 0$ nach bestimmten Unbekannten, zum Beispiel den letzten m Variablen x_{n-m+1}, \dots, x_n **auflösen**?

Mit anderen Worten: Existiert eine Funktion $f(x_1, \dots, x_{n-m})$ mit

$$g(x) = 0 \iff (x_{n-m+1}, \dots, x_n)^T = f(x_1, \dots, x_{n-m})$$

Terminologie: "Auflösen" bedeutet also die letzten m Variablen durch die ersten $n - m$ Variablen zu beschreiben.

Weitere Frage: Nach welchen m Variablen lässt sich das Gleichungssystem auflösen? Ist die Auflösung *global* auf dem Definitionsbereich D möglich oder nur *lokal* auf einer Teilmenge $\tilde{D} \subset D$?

Geometrische Interpretation: Die Lösungsmenge G von $g(x) = 0$ lässt sich (zumindest lokal) als Graph einer Funktion $f : \mathbb{R}^{n-m} \rightarrow \mathbb{R}^m$ darstellen.

Beispiel.

Die Kreisgleichung

$$g(x, y) = x^2 + y^2 - r^2 = 0 \quad \text{mit } r > 0$$

definiert ein **unterbestimmtes** nichtlineares Gleichungssystem, denn wir haben **zwei** Unbekannte (x, y) , aber nur **eine** Gleichung.

Die Kreisgleichung lässt sich **lokal** auflösen und definiert dabei die folgenden vier Funktionen:

$$y = \sqrt{r^2 - x^2}, \quad -r \leq x \leq r$$

$$y = -\sqrt{r^2 - x^2}, \quad -r \leq x \leq r$$

$$x = \sqrt{r^2 - y^2}, \quad -r \leq y \leq r$$

$$x = -\sqrt{r^2 - y^2}, \quad -r \leq y \leq r$$

Beispiel.

Sei $g(x)$ eine affin-lineare Funktion, d.h. g hat die Form

$$g(x) = Cx + b \quad \text{für } C \in \mathbb{R}^{m \times n}, b \in \mathbb{R}^m$$

Wir spalten die Variablen x in zwei Vektoren auf

$$x^{(1)} = (x_1, \dots, x_{n-m})^T \in \mathbb{R}^{n-m} \quad \text{und} \quad x^{(2)} = (x_{n-m+1}, \dots, x_n)^T \in \mathbb{R}^m$$

Aufspaltung der Matrix $C = [B, A]$ ergibt die Darstellung

$$g(x) = Bx^{(1)} + Ax^{(2)} + b$$

mit $B \in \mathbb{R}^{m \times (n-m)}$, $A \in \mathbb{R}^{m \times m}$.

Das Gleichungssystem $g(x) = 0$ ist genau dann nach den Variablen $x^{(2)}$ (eindeutig) auflösbar, falls A regulär ist:

$$g(x) = 0 \quad \iff \quad x^{(2)} = -A^{-1}(Bx^{(1)} + b) = f(x^{(1)})$$

Fortsetzung des Beispiels.

Frage: Wie kann man die Matrix A in Abhängigkeit von g schreiben?

Aus der Darstellung

$$g(x) = Bx^{(1)} + Ax^{(2)} + b$$

erkennt man direkt, dass

$$A = \frac{\partial g}{\partial x^{(2)}}(x^{(1)}, x^{(2)})$$

gilt, d.h. A ist die Jacobi-Matrix der Abbildung

$$x^{(2)} \rightarrow g(x^{(1)}, x^{(2)})$$

für festes $x^{(1)}$!

Fazit: Auflösbarkeit ist somit gegeben, falls die Jacobi-Matrix regulär ist.

Satz über implizite Funktionen.

Satz: Sei $g : D \rightarrow \mathbb{R}^m$ eine \mathcal{C}^1 -Funktion, $D \subset \mathbb{R}^n$ offen. Die Variablen in D seien (x, y) mit $x \in \mathbb{R}^{n-m}$ und $y \in \mathbb{R}^m$. Der Punkt $(x^0, y^0) \in D$ sei eine Lösung von $g(x^0, y^0) = 0$.

Falls die Jacobi-Matrix

$$\frac{\partial g}{\partial y}(x^0, y^0) := \begin{pmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial y_1}(x^0, y^0) & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial y_m}(x^0, y^0) \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g_m}{\partial y_1}(x^0, y^0) & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial y_m}(x^0, y^0) \end{pmatrix}$$

regulär ist, so gibt es Umgebungen U von x^0 und V von y^0 , $U \times V \subset D$ und eine eindeutig bestimmte stetig differenzierbare Funktion $f : U \rightarrow V$ mit

$$f(x^0) = y^0 \quad \text{und} \quad g(x, f(x)) = 0 \quad \text{für alle } x \in U$$

und

$$Jf(x) = - \left(\frac{\partial g}{\partial y}(x, f(x)) \right)^{-1} \left(\frac{\partial g}{\partial x}(x, f(x)) \right)$$

Beispiel.

Für die Kreisgleichung $g(x, y) = x^2 + y^2 - r^2 = 0$, $r > 0$ findet man im Punkt $(x^0, y^0) = (0, r)$

$$\frac{\partial g}{\partial x}(0, r) = 0, \quad \frac{\partial g}{\partial y}(0, r) = 2r \neq 0$$

Man kann also in einer Umgebung von $(0, r)$ die Kreisgleichung nach y auflösen:

$$f(x) = \sqrt{r^2 - x^2}$$

Die Ableitung $f'(x)$ kann man durch **implizite Differentiation** berechnen:

$$g(x, y(x)) = 0 \quad \implies \quad g_x(x, y(x)) + g_y(x, y(x))y'(x) = 0$$

Also

$$2x + 2y(x)y'(x) = 0 \quad \implies \quad y'(x) = f'(x) = -\frac{x}{y(x)}$$

Ein weiteres Beispiel.

Betrachte die Gleichung $g(x, y) = e^{y-x} + 3y + x^2 - 1 = 0$.

Es gilt

$$\frac{\partial g}{\partial y}(x, y) = e^{y-x} + 3 > 0 \quad \text{für alle } x \in \mathbb{R}.$$

Die Gleichung ist also für jedes $x \in \mathbb{R}$ nach $y =: f(x)$ auflösbar und $f(x)$ ist eine stetig differenzierbare Funktion. Implizite Differentiation liefert

$$e^{y-x}(y' - 1) + 3y' + 2x = 0 \quad \implies \quad y' = \frac{e^{y-x} - 2x}{e^{y-x} + 3}$$

Erneute Differentiation liefert

$$e^{y-x}y'' + e^{y-x}(y' - 1)^2 + 3y'' + 2 = 0 \quad \implies \quad y' = -\frac{2 + e^{y-x}(y' - 1)^2}{e^{y-x} + 3}$$

Aber: Explizites Auflösen nach y (mit Hilfe elementarer Funktionen) ist in diesem Fall nicht möglich!

Allgemeine Bemerkung.

Implizites Differenzieren einer durch

$$g(x, y) = 0, \quad \frac{\partial g}{\partial y} \neq 0$$

implizit definierten Funktion $y = f(x)$, mit $x, y \in \mathbb{R}$, ergibt

$$f'(x) = -\frac{g_x}{g_y}$$

$$f''(x) = -\frac{g_{xx}g_y^2 - 2g_{xy}g_xg_y + g_{yy}g_x^2}{g_y^3}$$

Daher ist der Punkt x^0 ein **stationärer** Punkt von $f(x)$, falls gilt

$$g(x^0, y^0) = g_x(x^0, y^0) = 0 \quad \text{und} \quad g_y(x^0, y^0) \neq 0$$

Weiter ist x^0 ein **lokales Maximum** (bzw. **Minimum**), falls

$$\frac{g_{xx}(x^0, y^0)}{g_y(x^0, y^0)} > 0 \quad \left(\text{bzw.} \quad \frac{g_{xx}(x^0, y^0)}{g_y(x^0, y^0)} < 0 \right)$$

Implizite Darstellung ebener Kurven.

Betrachte die Lösungsmenge einer skalaren Gleichungen

$$g(x, y) = 0$$

Falls gilt

$$\text{grad } g = (g_x, g_y) \neq 0$$

so definiert $g(x, y)$ lokal eine Funktion $y = f(x)$ oder $x = \bar{f}(y)$.

Definition: Ein Lösungspunkt (x^0, y^0) der Gleichung $g(x, y) = 0$ mit

- $\text{grad } g(x^0, y^0) \neq 0$ heißt **regulärer** Punkt,
- $\text{grad } g(x^0, y^0) = 0$ heißt **singulärer** Punkt.

Beispiel: Betrachte wieder die Kreisgleichung

$$g(x, y) = x^2 + y^2 - r = 0 \quad \text{mit } r > 0.$$

Auf der Kreislinie liegen **keine** singulären Punkte!

Horizontale und vertikale Tangenten.

Bemerkung:

a) Gilt für einen regulären Punkt (x^0, y^0)

$$g_x(x^0) = 0 \quad \text{und} \quad g_y(x^0) \neq 0$$

so besitzt die Lösungskurve eine **horizontale Tangente** in x^0 .

b) Gilt für einen regulären Punkt (x^0, y^0)

$$g_x(x^0) \neq 0 \quad \text{und} \quad g_y(x^0) = 0$$

so besitzt die Lösungskurve eine **vertikale Tangente** in x^0 .

c) Ist x^0 ein **singulärer Punkt**, so wird die Lösungsmenge bei x^0 "in zweiter Näherung" durch folgende **quadratische Gleichung** approximiert.

$$g_{xx}(x^0)(x - x^0)^2 + 2g_{xy}(x^0)(x - x^0)(y - y^0) + g_{yy}(x^0)(y - y^0)^2 = 0$$

Bemerkungen.

Wegen c) erhält man für $g_{xx}, g_{xy}, g_{yy} \neq 0$:

$\det Hg(x^0) > 0$: x^0 ist ein **isolierter Punkt** der Lösungsmenge

$\det Hg(x^0) < 0$: x^0 ist ein **Doppelpunkt**

$\det Hg(x^0) = 0$: x^0 ist ein **Rückkehrpunkt** bzw. eine **Spitze**

Geometrische Interpretation:

- Gilt $\det Hg(x^0) > 0$, so sind beide Eigenwerte von $Hg(x^0)$ entweder strikt positiv oder strikt negativ, d.h. x^0 ist ein strenges lokales **Minimum** oder **Maximum** von $g(x)$.
- Gilt $\det Hg(x^0) < 0$, so haben die beiden Eigenwerte von $Hg(x^0)$ ein unterschiedliches Vorzeichen, d.h. x^0 ist ein **Sattelpunkt** von $g(x)$.
- Gilt $\det Hg(x^0) = 0$, so ist der stationäre Punkt x^0 von $g(x)$ **ausgeartet**.

Beispiel 1.

Betrachte den singulären Punkt $x^0 = 0$ der impliziten Gleichung

$$g(x, y) = y^2(x - 1) + x^2(x - 2) = 0$$

Berechnung der partiellen Ableitungen bis zur Ordnung 2:

$$g_x = y^2 + 3x^2 - 4x$$

$$g_y = 2y(x - 1)$$

$$g_{xx} = 6x - 4$$

$$g_{xy} = 2y$$

$$g_{yy} = 2(x - 1)$$

$$Hg(0) = \begin{pmatrix} -4 & 0 \\ 0 & -2 \end{pmatrix}$$

Also ist $x^0 = 0$ ein **isolierter Punkt**.

Beispiel 2.

Betrachte den singulären Punkt $x^0 = 0$ der impliziten Gleichung

$$g(x, y) = y^2(x - 1) + x^2(x + q^2) = 0$$

Berechnung der partiellen Ableitungen bis zur Ordnung 2:

$$g_x = y^2 + 3x^2 + 2xq^2$$

$$g_y = 2y(x - 1)$$

$$g_{xx} = 6x + 2q^2$$

$$g_{xy} = 2y$$

$$g_{yy} = 2(x - 1)$$

$$Hg(0) = \begin{pmatrix} 2q^2 & 0 \\ 0 & -2 \end{pmatrix}$$

Also ist $x^0 = 0$ für $q \neq 0$ ein **Doppelpunkt**.

Beispiel 3.

Betrachte den singulären Punkt $x^0 = 0$ der impliziten Gleichung

$$g(x, y) = y^2(x - 1) + x^3 = 0$$

Berechnung der partiellen Ableitungen bis zur Ordnung 2:

$$g_x = y^2 + 3x^2$$

$$g_y = 2y(x - 1)$$

$$g_{xx} = 6x$$

$$g_{xy} = 2y$$

$$g_{yy} = 2(x - 1)$$

$$Hg(0) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -2 \end{pmatrix}$$

Also ist $x^0 = 0$ eine **Spitze** (bzw. ein **Rückkehrpunkt**).

Implizite Darstellung von Flächen.

- Die Lösungsmenge einer skalaren Gleichung $g(x, y, z) = 0$ ist für $\text{grad } g \neq 0$ lokal eine **Fläche** im \mathbb{R}^3 .
- Für die **Tangentialebene** in $x^0 = (x^0, y^0, z^0)^T$ mit $g(x^0) = 0$ und $\text{grad } g(x^0) \neq 0^T$ bekommen wir für $\Delta x^0 = x - x^0$ mit Taylor-Entwicklung

$$\text{grad } g \cdot \Delta x^0 = g_x(x^0)(x - x^0) + g_y(x^0)(y - y^0) + g_z(x^0)(z - z_0) = 0$$

d.h. der Gradient steht senkrecht auf der Fläche $g(x, y, z) = 0$.

- Ist zum Beispiel $g_z(x^0) \neq 0$, so gibt es lokal bei x^0 eine Darstellung der Form

$$z = f(x, y)$$

und für die **partielle Ableitungen** von $f(x, y)$ bekommt man

$$\text{grad } f(x, y) = (f_x, f_y) = -\frac{1}{g_z}(g_x, g_y) = \left(-\frac{g_x}{g_z}, \frac{g_y}{g_z} \right)$$

mit dem Satz über implizite Funktionen.

Das Umkehrproblem.

Frage: Lässt sich ein vorgegebenes Gleichungssystem

$$y = f(x)$$

mit $f : D \rightarrow \mathbb{R}^n$, $D \subset \mathbb{R}^n$ offen, nach x auflösen, also **invertieren**?

Satz: (**Umkehrsatz**)

Sei $f : D \rightarrow \mathbb{R}^n$, $D \subset \mathbb{R}^n$ offen, eine \mathcal{C}^1 -Funktion. Ist für ein $x^0 \in D$ die Jacobi-Matrix $Jf(x^0)$ regulär, so gibt es Umgebungen U und V von x^0 und $y^0 = f(x^0)$, so dass f den Bereich U **bijektiv** auf V abbildet.

Die Umkehrfunktion $f^{-1} : V \rightarrow U$ ist ebenfalls eine \mathcal{C}^1 -Funktion und es gilt für alle $x \in U$:

$$Jf^{-1}(y) = (Jf(x))^{-1}, \quad y = f(x)$$

Bemerkung: Man nennt dann f lokal einen \mathcal{C}^1 -Diffeomorphismus.

Kapitel 2. Anwendungen der Differentialrechnung mehrerer Variablen

2.3 Extremalprobleme unter Nebenbedingungen

Frage: Welche Abmessungen sollte eine Metalldose haben, damit bei vorgegebenem Volumen der Materialverbrauch am geringsten ist?

Lösungsansatz: Sei $r > 0$ der Radius und $h > 0$ die Höhe der Dose. Dann gilt

$$V = \pi r^2 h$$

$$O = 2\pi r^2 + 2\pi rh$$

Setze bei vorgegebenem Volumen $c \in \mathbb{R}_+$, und mit $x := r, y := h$,

$$f(x, y) = 2\pi x^2 + 2\pi xy$$

$$g(x, y) = \pi x^2 y - c = 0$$

Bestimme das Minimum der Funktion $f(x, y)$ auf der Menge

$$G := \{(x, y) \in \mathbb{R}_+^2 \mid g(x, y) = 0\}$$

Lösung des restringierten Minimierungsproblems.

Aus $g(x, y) = \pi x^2 y - c = 0$ folgt

$$y = \frac{c}{\pi x^2}$$

Einsetzen in $f(x, y)$ ergibt

$$h(x) := 2\pi x^2 + 2\pi x \frac{c}{\pi x^2} = 2\pi x^2 + \frac{2c}{x}$$

Bestimme das Minimum der Funktion $h(x)$:

$$h'(x) = 4\pi x - \frac{2c}{x^2} = 0 \quad \Rightarrow \quad 4\pi x = \frac{2c}{x^2} \quad \Rightarrow \quad x = \left(\frac{c}{2\pi}\right)^{1/3}$$

Hinreichende Bedingung

$$h''(x) = 4\pi + \frac{4c}{x^3} \quad \Rightarrow \quad h''\left(\left(\frac{c}{\pi}\right)^{1/3}\right) = 12\pi > 0$$

Allgemeine Formulierung des Problems.

Bestimme die Extremwerte der Funktion $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ unter den Nebenbedingungen

$$g(x) = 0$$

wobei $g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$.

Die Nebenbedingungen lauten also

$$g_1(x_1, \dots, x_n) = 0$$

$$\vdots$$

$$g_m(x_1, \dots, x_n) = 0$$

Alternativ: Bestimme die Extremwerte der Funktion $f(x)$ auf der Menge

$$G := \{x \in \mathbb{R}^n \mid g(x) = 0\}$$

Die Lagrange-Funktion und das Lagrange-Lemma.

Wir definieren die **Lagrange-Funktion**

$$F(x) := f(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i g_i(x)$$

und suchen die Extremwerte von $F(x)$ für festes $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_m)^T$.

Die Zahlen λ_i , $i = 1, \dots, m$ nennt man **Lagrange-Multiplikatoren**.

Satz: (**Lagrange-Lemma**) Minimiert (bzw. maximiert) x^0 die Lagrange-Funktion $F(x)$ (für ein festes λ) über D und gilt $g(x^0) = 0$, so liefert x^0 das Minimum (bzw. Maximum) von $f(x)$ über $G := \{x \in D \mid g(x) = 0\}$.

Beweis: Für ein beliebiges $x \in D$ gilt nach Voraussetzung

$$f(x^0) + \lambda^T g(x^0) \leq f(x) + \lambda^T g(x)$$

Wählt man speziell $x \in G$, so ist $g(x) = g(x^0) = 0$, also auch $f(x^0) \leq f(x)$.

Eine notwendige Bedingung für lokale Extrema.

Sind f und g_i , $i = 1, \dots, m$, C^1 -Funktionen, so ist eine notwendige Bedingung für eine Extremstelle x^0 von $F(x)$ gegeben durch

$$\text{grad } F(x) = \text{grad } f(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \text{grad } g_i(x) = 0$$

Zusammen mit den Nebenbedingungen $g(x) = 0$ ergibt sich ein (nichtlineares) Gleichungssystem mit $(n + m)$ Gleichungen und $(n + m)$ Unbekannten x und λ . Die Lösungen (x^0, λ^0) sind die Kandidaten für die gesuchten Extremstellen, denn diese erfüllen die o.g. notwendige Bedingung.

Alternativ: Definiere eine Lagrange-Funktion

$$G(x, \lambda) := f(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i g_i(x)$$

und suche die Extremstellen von $G(x, \lambda)$ bezüglich x **und** λ .

Einige Bemerkungen zu hinreichenden Bedingungen.

- 1 Man kann auch eine **hinreichende** Bedingung aufstellen:
Sind die Funktionen f und g \mathcal{C}^2 -Funktionen und ist die Hesse-Matrix $HF(x^0)$ der Lagrange-Funktion positiv (bzw. negativ) definit, so ist x^0 tatsächlich ein strenges lokales Minimum (bzw. Maximum) von $f(x)$ auf G .
- 2 In den meisten Anwendungen ist die hinreichende Bedingung allerdings **nicht** erfüllt, obwohl x^0 ein strenges lokales Extremum ist.
- 3 Insbesondere kann man aus der Indefinitheit der Hesse-Matrix $HF(x^0)$ **nicht** schließen, dass x^0 kein Extremwert ist.
- 4 Ähnlich problematisch ist die hinreichende Bedingung, die man aus der Hesse-Matrix für die Lagrange-Funktion $G(x, \lambda)$ bezüglich x **und** λ erhält.

Ein Beispiel zu restringierten Minimierungsproblems.

Gesucht seien die Extrema von $f(x, y) := xy$ auf der Kreisscheibe

$$K := \{(x, y)^T \mid x^2 + y^2 \leq 1\}$$

Da die betrachte Funktion f stetig und $K \subset \mathbb{R}^2$ kompakt ist, folgt aus der Min–Max–Eigenschaft die Existenz von globalen Maxima und Minima auf K .

Wir betrachten zunächst das Innere K^0 von K , also die **offene** Menge

$$K^0 := \{(x, y)^T \mid x^2 + y^2 < 1\}$$

Die notwendige Bedingung für einen Extremwert lautet nun

$$\text{grad } f = (y, x) = 0$$

Somit ist der Ursprung $x^0 = 0$ Kandidat für ein (lokales) Extremum.

Fortsetzung des Beispiels.

Die Hesse-Matrix im Ursprung, gegeben durch

$$Hf(0) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

und ist **indefinit**. Daher ist x^0 ein **Sattelpunkt**.

Die Extrema der Funktion müssen also auf dem Rand liegen, der eine **Gleichungsnebenbedingung** darstellt:

$$g(x, y) = x^2 + y^2 - 1 = 0$$

Wir suchen also die Extremwerte von $f(x, y) = xy$ unter der Nebenbedingung $g(x, y) = 0$.

Die Lagrange-Funktion lautet

$$F(x, y) = xy + \lambda(x^2 + y^2 - 1)$$

Komplettierung des Beispiels.

Damit ergibt sich das (nichtlineare) Gleichungssystem

$$y + 2\lambda x = 0$$

$$x + 2\lambda y = 0$$

$$x^2 + y^2 = 1$$

mit den vier Lösungen

$$\lambda = \frac{1}{2} \quad : \quad x^{(1)} = (\sqrt{1/2}, -\sqrt{1/2})^T \quad x^{(2)} = (-\sqrt{1/2}, \sqrt{1/2})^T$$

$$\lambda = -\frac{1}{2} \quad : \quad x^{(3)} = (\sqrt{1/2}, \sqrt{1/2})^T \quad x^{(4)} = (-\sqrt{1/2}, -\sqrt{1/2})^T$$

Minima und **Maxima** lassen sich nun einfach aus den **Funktionswerten** ablesen

$$f(x^{(1)}) = f(x^{(2)}) = -1/2 \quad f(x^{(3)}) = f(x^{(4)}) = 1/2$$

d.h. Minima sind $x^{(1)}$ und $x^{(2)}$, Maxima sind $x^{(3)}$ und $x^{(4)}$.

Lagrange–Multiplikatoren–Regel.

Satz: Seien $f, g_1, \dots, g_m : D \rightarrow \mathbb{R}$ jeweils \mathcal{C}^1 –Funktionen, und sei $x^0 \in D$ ein lokales Extremum von $f(x)$ unter der Nebenbedingung $g(x) = 0$. Weiterhin gelte die **Regularitätsbedingung**

$$\text{rang} \left(Jg(x^0) \right) = m$$

Dann existieren **Lagrange–Multiplikatoren** $\lambda_1, \dots, \lambda_m$, so dass für die **Lagrange Funktion**

$$F(x) := f(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i g_i(x)$$

die folgende **notwendige Bedingung erster Ordnung** gilt:

$$\text{grad } F(x^0) = 0$$

Notwendige Bedingung zweiter Ordnung und hinreichende Bedingung.

Satz: 1) Ist $x^0 \in D$ ein **lokales Minimum** von $f(x)$ unter der Nebenbedingung $g(x) = 0$, ist die Regularitätsbedingung erfüllt und sind $\lambda_1, \dots, \lambda_m$ zugehörige Lagrange-Multiplikatoren, so ist die Hesse-Matrix $HF(x^0)$ der Lagrange-Funktion **positiv semidefinit** auf dem Tangentialraum

$$TG(x^0) := \{y \in \mathbb{R}^n \mid \text{grad } g_i(x^0) \cdot y = 0 \text{ für } i = 1, \dots, m\}$$

d.h., es gilt $y^T HF(x^0) y \geq 0$ für alle $y \in TG(x^0)$.

2) Ist für einen Punkt $x^0 \in G$ die Regularitätsbedingung erfüllt, existieren Lagrange-Multiplikatoren $\lambda_1, \dots, \lambda_m$, so dass x^0 ein stationärer Punkt der zugehörigen Lagrange-Funktion ist, und ist die Hesse-Matrix $HF(x^0)$ **positiv definit** auf dem Tangentialraum $TG(x^0)$, d.h., gilt

$$y^T HF(x^0) y > 0 \quad \forall y \in TG(x^0) \setminus \{0\},$$

so ist x^0 ein **strenges lokales Minimum** von $f(x)$ unter der Nebenbedingung $g(x) = 0$.

Beispiel.

Man bestimme das globale Maximum der Funktion

$$f(x, y) = -x^2 + 8x - y^2 + 9$$

unter der Nebenbedingung

$$g(x, y) = x^2 + y^2 - 1 = 0$$

Die Lagrange-Funktion ist

$$F(x, y) = -x^2 + 8x - y^2 + 9 + \lambda(x^2 + y^2 - 1)$$

Aus der notwendigen Bedingung ergibt sich das nichtlineare System

$$-2x + 8 = -2\lambda x$$

$$-2y = -2\lambda y$$

$$x^2 + y^2 = 1$$

Fortsetzung des Beispiels.

Aus der notwendigen Bedingung ergibt sich das nichtlineare System

$$-2x + 8 = -2\lambda x$$

$$-2y = -2\lambda y$$

$$x^2 + y^2 = 1$$

Aus der ersten Gleichung folgt $\lambda \neq 1$. Verwendet man dies in der zweiten Gleichung, so gilt $y = 0$. Aus der dritten Gleichung erkennt man sofort $x = \pm 1$. Demnach sind die beiden Punkte $(x, y) = (1, 0)$ und $(x, y) = (-1, 0)$ Kandidaten für das globale Maximum. Wegen

$$f(1, 0) = 16 \quad f(-1, 0) = 0$$

wird das globale Maximum von $f(x, y)$ unter der Nebenbedingung $g(x, y) = 0$ im Punkt $(x, y) = (1, 0)$ angenommen.

Ein weiteres Beispiel.

Man bestimme die lokalen Extremwerte der Funktion

$$f(x, y, z) = 2x + 3y + 2z$$

auf dem Durchschnitt des Zylindersmantels

$$M_Z := \{(x, y, z)^T \in \mathbb{R}^3 \mid x^2 + y^2 = 2\}$$

mit der Ebene

$$E := \{(x, y, z)^T \in \mathbb{R}^3 \mid x + z = 1\}$$

Umformulierung: Bestimme die Extremwerte der Funktion $f(x, y, z)$ unter den Nebenbedingungen

$$g_1(x, y, z) := x^2 + y^2 - 2 = 0$$

$$g_2(x, y, z) := x + z - 1 = 0$$

Fortsetzung des Beispiel.

Die Jacobi-Matrix

$$Jg(x) = \begin{pmatrix} 2x & 2y & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

hat den Rang 2, d.h. wir können über die Lagrange-Funktion Extremwerte bestimmen:

$$F(x, y, z) = 2x + 3y + 2z + \lambda_1(x^2 + y^2 - 2) + \lambda_2(x + z - 1)$$

Die notwendige Bedingung ergibt das nichtlineare Gleichungssystem

$$2 + 2\lambda_1 x + \lambda_2 = 0$$

$$3 + 2\lambda_1 y = 0$$

$$2 + \lambda_2 = 0$$

$$x^2 + y^2 = 2$$

$$x + z = 1$$

Fortsetzung des Beispiel.

Die notwendige Bedingung ergibt das nichtlineare Gleichungssystem

$$2 + 2\lambda_1 x + \lambda_2 = 0$$

$$3 + 2\lambda_1 y = 0$$

$$2 + \lambda_2 = 0$$

$$x^2 + y^2 = 2$$

$$x + z = 1$$

Aus der ersten und dritten Gleichung folgt

$$2\lambda_1 x = 0$$

Aus der zweiten Gleichung folgt $\lambda_1 \neq 0$, also $x = 0$.
Damit ergeben sich die möglichen Extremwerte als

$$(x, y, z) = (0, \sqrt{2}, 1) \quad (x, y, z) = (0, -\sqrt{2}, 1)$$

Komplettierung des Beispiel.

Die möglichen Extremwerte sind also

$$(x, y, z) = (0, \sqrt{2}, 1) \quad (x, y, z) = (0, -\sqrt{2}, 1)$$

und liegen offensichtlich auf der Mantelfläche M_Z des Zylinders Z mit

$$Z = \{(x, y, z)^T \in \mathbb{R}^3 \mid x^2 + y^2 \leq 2\}$$

$$M_Z = \{(x, y, z)^T \in \mathbb{R}^3 \mid x^2 + y^2 = 2\}$$

Man berechnet nun die zugehörigen Funktionswerte

$$f(0, \sqrt{2}, 1) = 3\sqrt{2} + 2$$

$$f(0, -\sqrt{2}, 1) = -3\sqrt{2} + 2$$

Daher liegt im Punkt $(x, y, z) = (0, \sqrt{2}, 1)$ ein Maximum und im Punkt $(x, y, z) = (0, -\sqrt{2}, 1)$ ein Minimum vor.