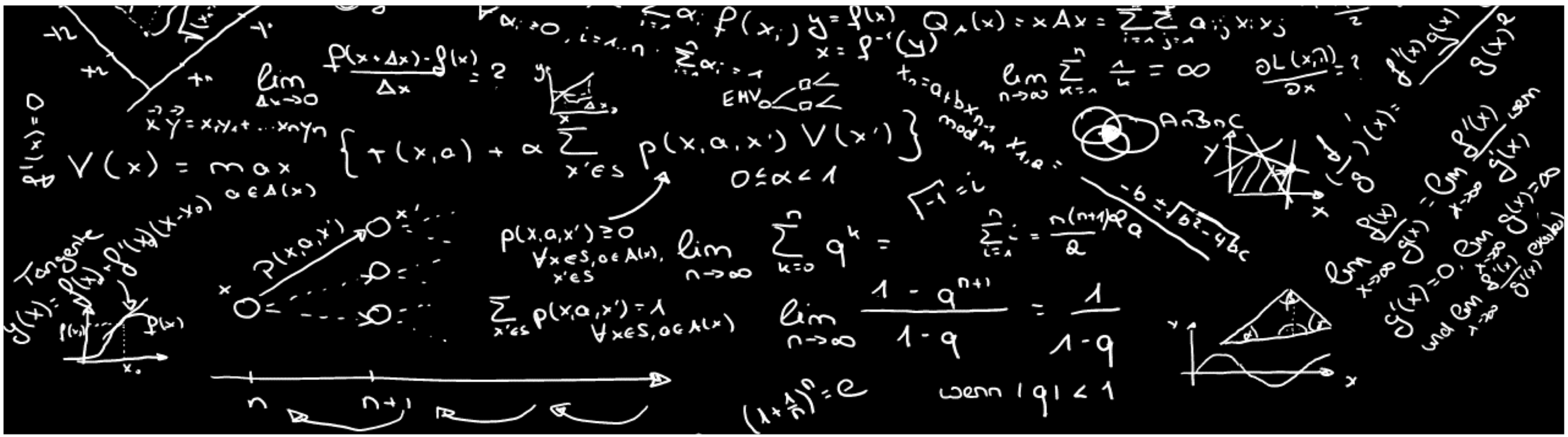
Mathematik II

Reelle Funktionen in mehreren Variablen

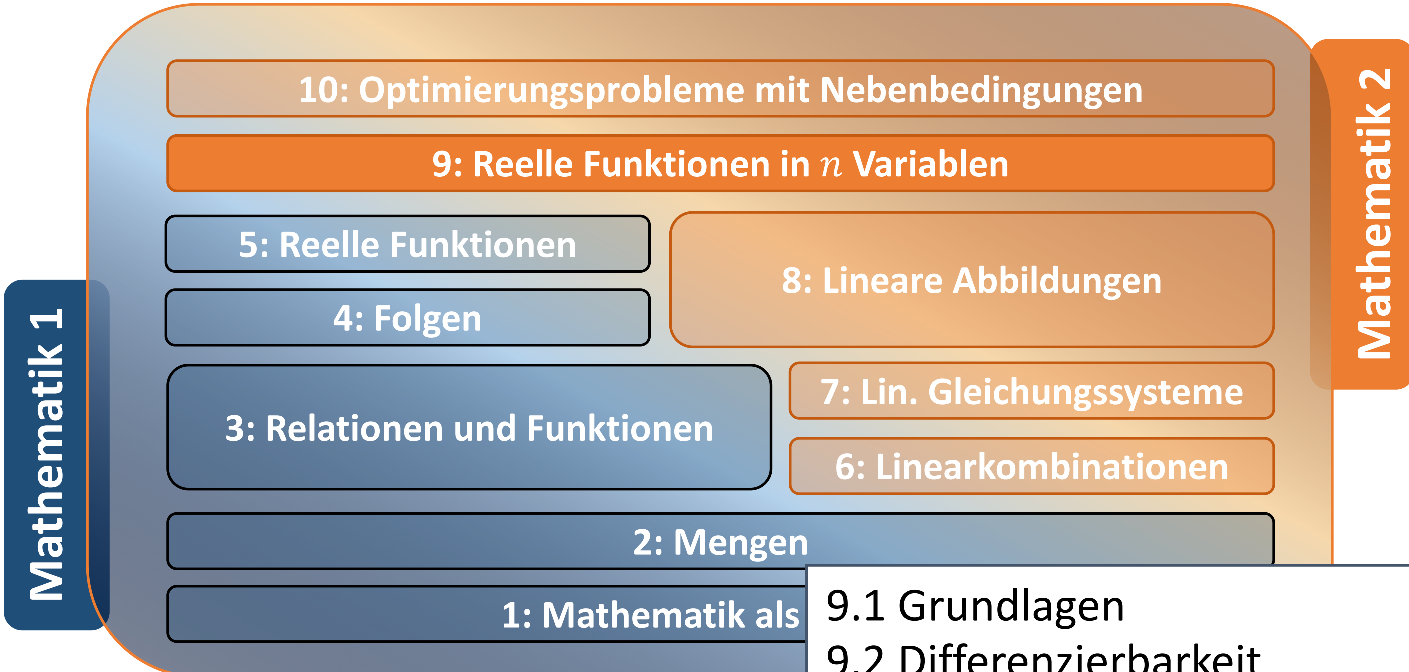
FS 2019



Universität Zürich[UZH]

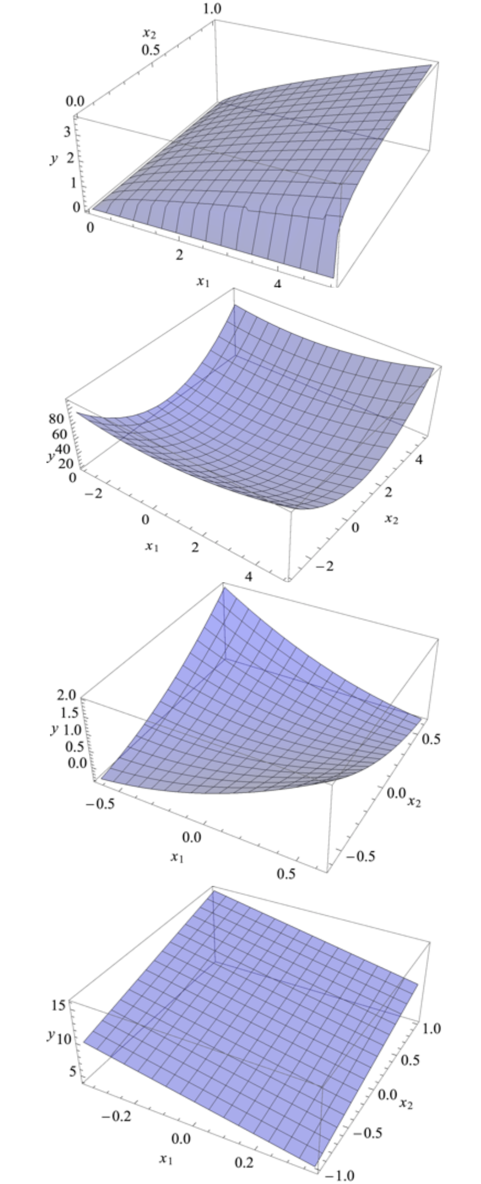
Prof. Dr. Christiane Barz
Lehrstuhl Mathematik für Wirtschaftswissenschaften
(Chair of Mathematics for Business and Economics)

Agenda



9.1 Grundlagen
9.2 Differenzierbarkeit
9.3 Eigenschaften reeller Funktionen in n Variablen
9.4 Extremwertbestimmung
9.5 Mehrfachintegrale

Reelle Funktionen in *n* Variablen



Definition 9.1.1: Reelle Funktion in *n* Variablen

Reelle Funktion in *n* Variablen

$$f : D \to Z \;\text{ mit }\; \mathbf{x} \mapsto y = f(\mathbf{x}), \quad D \subseteq \mathbb{R}^n, Z \subseteq \mathbb{R}$$

Beispiele:

- $u : (0,+\infty)^2 \to \mathbb{R}$ mit $u(\mathbf{x}) = x_1^{0.8} x_2^{0.2}$
- $f : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ mit $f(\mathbf{x}) = x_1^2 + 4(x_2 - 1)^2 + 3$
- $p : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ mit $p(\mathbf{x}) = x_1^2 + x_2^2 - 3x_1x_2$
- $g : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ mit $g(\mathbf{x}) = -8x_1 + 3x_2 + 10$

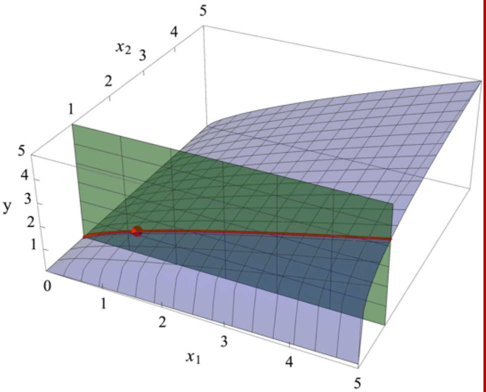
Definition 9.1.2: Besondere Funktionen

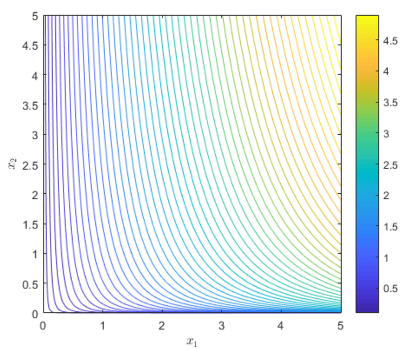
- $f(\mathbf{x}) = \mathbf{b}^T\mathbf{x} + c$
  für $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^n, c \in \mathbb{R}$

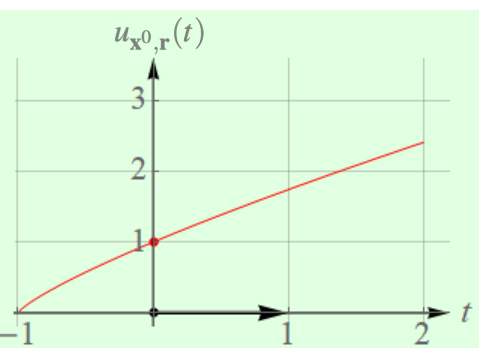
  Affin-lineare Funktion in *n* Variablen
- $f(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T A\mathbf{x} + \mathbf{b}^T\mathbf{x} + c$
  für $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^n, c \in \mathbb{R}, A \in \mathbb{R}^{n\times n}, A \neq$ Nullmatrix

  Quadratische Funktion in *n* Variablen

Höhenlinien und Vertikalschnitte







Definition 9.1.3: Höhenlinien

$N_y = \{\mathbf{x} \in D \,|\, f(\mathbf{x}) = y\}$ heisst Höhenlinie (von $f : D \to Z$) zum Niveau y.

Definition 9.1.4: Vertikalschnitte

$f_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}} : \{t \in \mathbb{R} \mid \mathbf{x}^0 + t\mathbf{r} \in D\} \to \mathbb{R}$ mit $f_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}(t) = f(\mathbf{x}^0 + t\mathbf{r})$
heisst Vertikalschnitt (von $f : D \to Z$) durch $\mathbf{x}^0 \in D$ in Richtung $\mathbf{r} \in \mathbb{R}^n$.

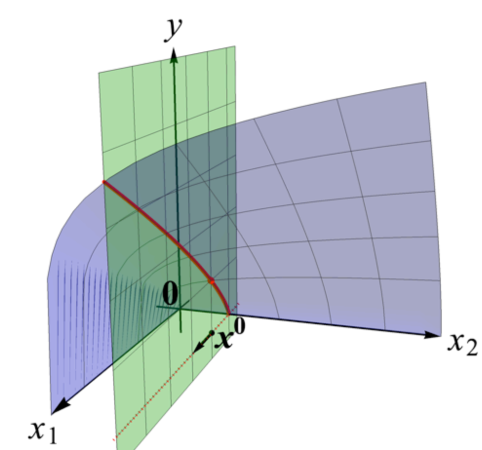
Beispiel:

- $u : (0, +\infty)^2 \to \mathbb{R}$ mit $u(\mathbf{x}) = x_1^{0.8} x_2^{0.2}$

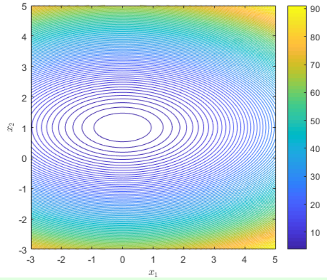
  Höhenlinie zum Niveau 1: $N_1 = \{\mathbf{x} \in (0, +\infty)^2 \mid x_1^{0.8} x_2^{0.2} = 1\}$

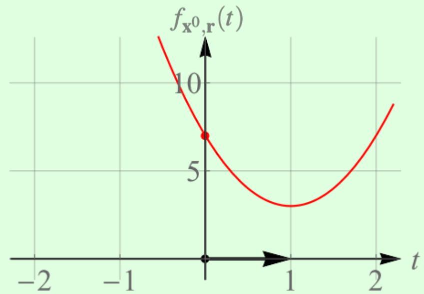
  Vertikalschnitt durch $\mathbf{x}^0 = (1, 1)^T$ in Richtung $\mathbf{r} = \mathbf{e}^1$:

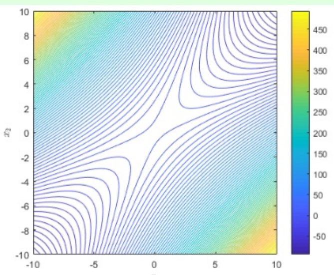
$$\begin{aligned} u_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}(t) &= u\left(\begin{pmatrix}1\\1\end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}\right) \\ &= u(1 + t \cdot 1, 1 + t \cdot 0) \\ &= (1 + t \cdot 1)^{0.8} (1 + t \cdot 0)^{0.2} \\ &= (1 + t)^{0.8} \end{aligned}$$

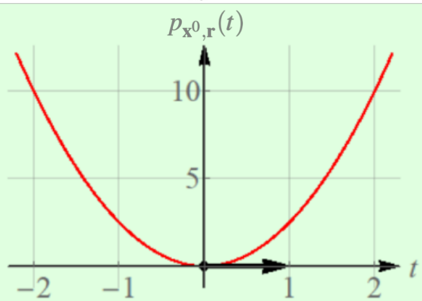


Höhenlinien und Vertikalschnitte







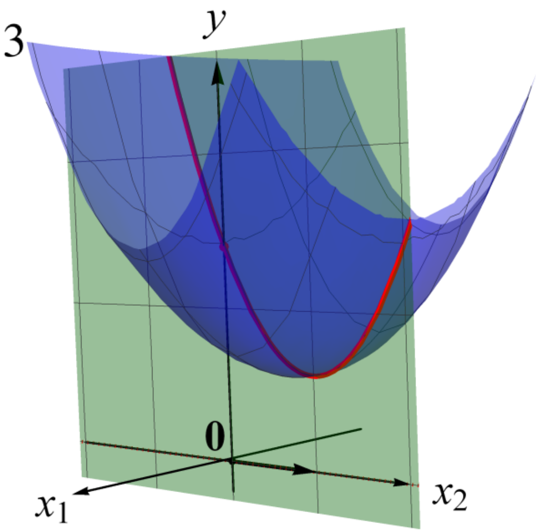


Beispiele:

- $f : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ mit $f(\mathbf{x}) = x_1^2 + 4(x_2 - 1)^2 + 3$

  Vertikalschnitt durch $\mathbf{x}^0 = \mathbf{0}$
  in Richtung $\mathbf{r} = \mathbf{e}^2$:

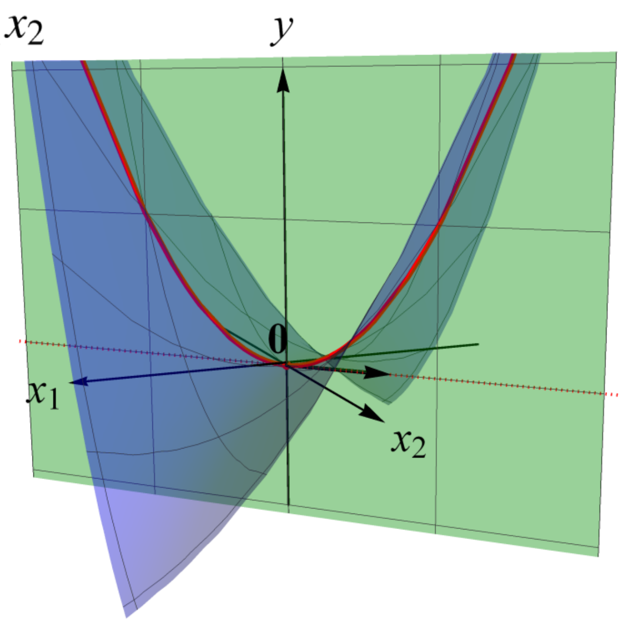
  $$f_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}(t) = f\left(\begin{pmatrix}0\\0\end{pmatrix} + t\begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix}\right) = f(0,t) = 4(t-1)^2 + 3$$

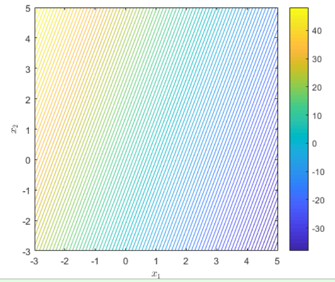


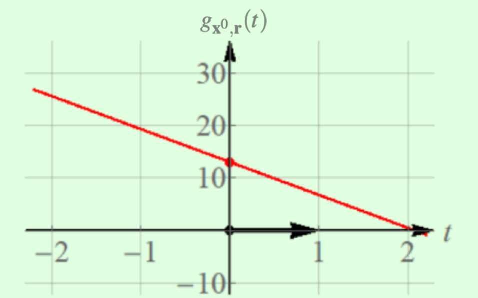
- $p : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ mit $p(\mathbf{x}) = x_1^2 + x_2^2 - 3x_1x_2$

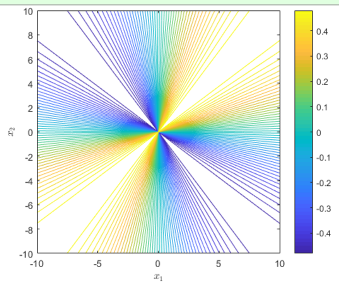
  Vertikalschnitt durch $\mathbf{x}^0 = \mathbf{0}$
  in Richtung $\mathbf{r} = (-\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}})^T$:

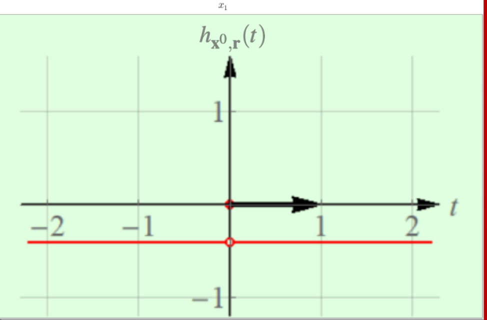
  $$p_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}(t) = p\left(\begin{pmatrix}0\\0\end{pmatrix} + t\begin{pmatrix}-\frac{1}{\sqrt{2}}\\ \frac{1}{\sqrt{2}}\end{pmatrix}\right) = p(-\tfrac{t}{\sqrt{2}}, \tfrac{t}{\sqrt{2}}) = \tfrac{5}{2}t^2$$











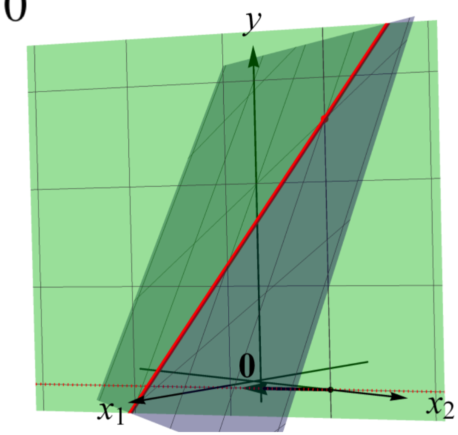
Höhenlinien und Vertikalschnitte

Beispiele:

- $g : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ mit $g(\mathbf{x}) = -8x_1 + 3x_2 + 10$

  Vertikalschnitt durch $\mathbf{x}^0 = (0,1)^T$
  in Richtung $\mathbf{r} = (\frac{1}{\sqrt{5}}, \frac{-2}{\sqrt{5}})^T$:

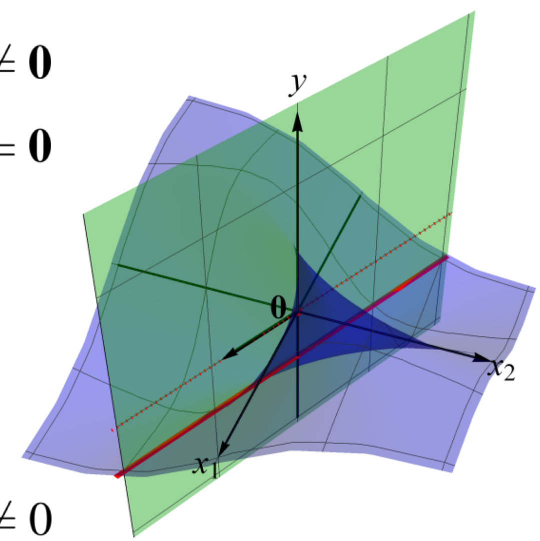
  $$g_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}(t) = g\left(\begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix} + t\begin{pmatrix}\frac{1}{\sqrt{5}}\\ \frac{-2}{\sqrt{5}}\end{pmatrix}\right)$$
  $$= g(\tfrac{t}{\sqrt{5}}, 1 - \tfrac{2t}{\sqrt{5}}) = -\tfrac{14}{\sqrt{5}}t + 13$$



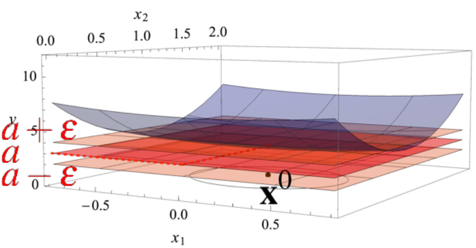
- $h : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ mit $h(\mathbf{x}) = \begin{cases} \frac{x_1 x_2}{x_1^2 + x_2^2} & \mathbf{x} \neq \mathbf{0} \\ 0 & \mathbf{x} = \mathbf{0} \end{cases}$

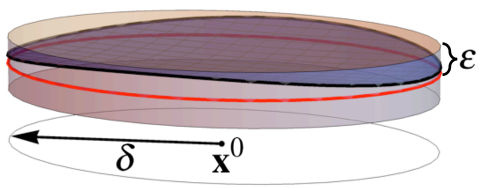
  Vertikalschnitt durch $\mathbf{x}^0 = \mathbf{0}$
  in Richtung $\mathbf{r} = (\frac{2}{\sqrt{5}}, \frac{-1}{\sqrt{5}})^T$:

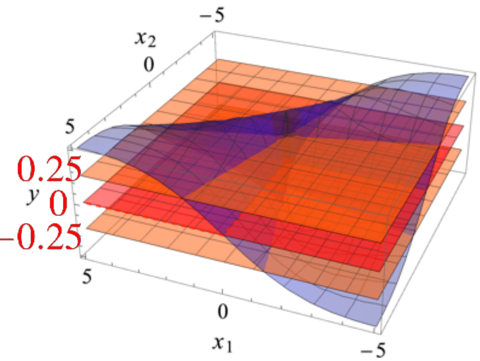
  $$h_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}(t) = h\left(\begin{pmatrix}0\\0\end{pmatrix} + t\begin{pmatrix}\frac{2}{\sqrt{5}}\\ \frac{-1}{\sqrt{5}}\end{pmatrix}\right)$$
  $$= h(\tfrac{2t}{\sqrt{5}}, -\tfrac{t}{\sqrt{5}}) = \begin{cases} -\frac{2}{5} & t \neq 0 \\ 0 & t = 0 \end{cases}$$

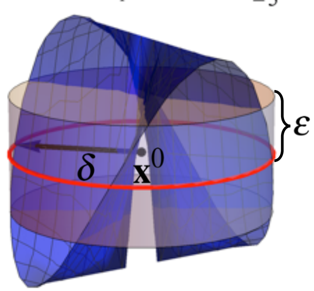


Grenzwert und Stetigkeit









Definition 9.1.5: Grenzwert

Gibt es zu jedem $\varepsilon > 0$ ein $\delta > 0$ mit $U(\mathbf{x}^0, \tilde{\delta}) \cap D \neq \{\} \forall \tilde{\delta} \leq \delta$, so dass für alle $\mathbf{x} \in U(\mathbf{x}^0, \delta) \cap D, \mathbf{x} \neq \mathbf{x}^0$: $|f(\mathbf{x}) - a| < \varepsilon$, dann $\lim\limits_{\mathbf{x}\to\mathbf{x}^0} f(\mathbf{x}) = a$.

Grenzwert

Definition 9.1.6: Stetigkeit

Gilt $\lim\limits_{\mathbf{x}\to\mathbf{x}^0} f(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}^0)$, heisst $f : D \to Z$ an der Stelle $\mathbf{x}^0 \in D$ stetig.

Ist f an jeder Stelle $\mathbf{x}^0 \in D$ stetig, so heisst f stetig.

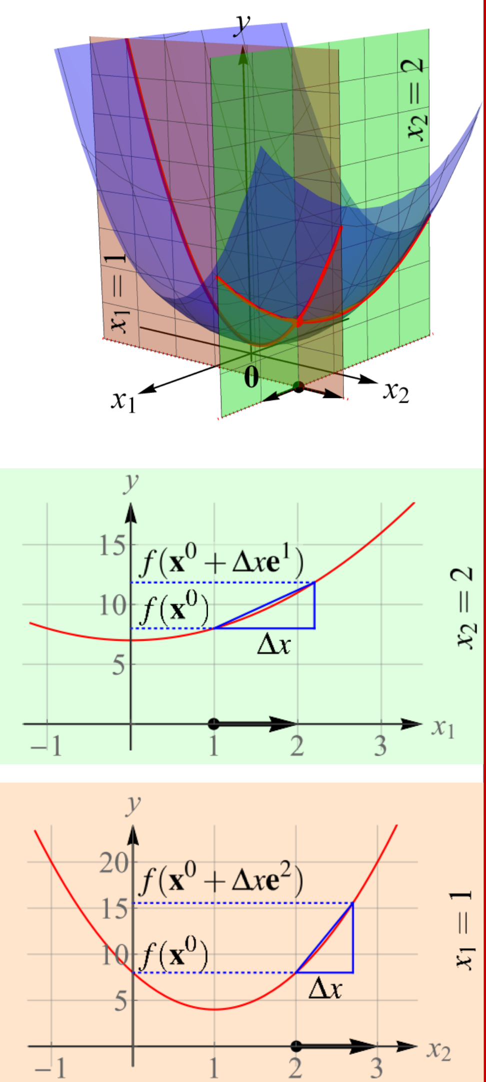
Sätze 9.1.1 – 9.1.2: Verknüpfungen stetiger Funktionen

Alle Funktionen aus Definition 9.1.2 sind stetig. Sind $f, g : D \to Z_1$, $h : g(D) \to Z_2$ stetig, dann sind $f+g$, $f-g$, $f \cdot g$, $\max\{f,g\}$, $\min\{f,g\}$ und $h \circ g$ stetig. Zudem ist f/g stetig auf $\{\mathbf{x} \in D \mid g(\mathbf{x}) \neq 0\}$.

Beispiele:

- $f : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ mit $f(\mathbf{x}) = x_1^2 + 4(x_2-1)^2 + 3$ ist stetig.
  $\mathbf{x}^0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$, $\lim\limits_{\mathbf{x}\to\mathbf{x}^0} f(\mathbf{x}) = 3 = f(\mathbf{x}^0) \Rightarrow f$ stetig an der Stelle $\mathbf{x}^0$.
- $h : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ mit $h(\mathbf{x}) = \begin{cases} \frac{x_1 x_2}{x_1^2 + x_2^2} & \mathbf{x} \neq \mathbf{0} \\ 0 & \mathbf{x} = \mathbf{0} \end{cases}$ ist stetig auf $\mathbb{R}^2 \setminus \{\mathbf{0}\}$.
  $\lim\limits_{\mathbf{x}\to\mathbf{0}} h(\mathbf{x})$ existiert nicht $\Rightarrow$ h nicht stetig an der Stelle $\mathbf{0}$.

Partielle Ableitung



Definition 9.2.1: Partielle Ableitung (Teil 1)

Sei $D \subset \mathbb{R}^n$ offen. $f : D \to Z$ heisst an der Stelle $\mathbf{x}^0 \in D$ partiell nach x_i differenzierbar, wenn folgender Grenzwert existiert:

$$\lim_{\Delta x \to 0} \frac{f(\mathbf{x}^0 + \Delta x \cdot \mathbf{e}^i) - f(\mathbf{x}^0)}{\Delta x}.$$

Partielle Ableitung $\frac{\partial f(\mathbf{x}^0)}{\partial x_i}$ bzw. $f_{x_i}(\mathbf{x}^0)$

Die Funktion mit $\mathbf{x} \mapsto f_{x_i}(\mathbf{x})$ heisst partielle Ableitung von f nach x_i.

Beispiel:

- $f : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ mit $f(\mathbf{x}) = x_1^2 + 4(x_2 - 1)^2 + 3, \mathbf{x}^0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}$

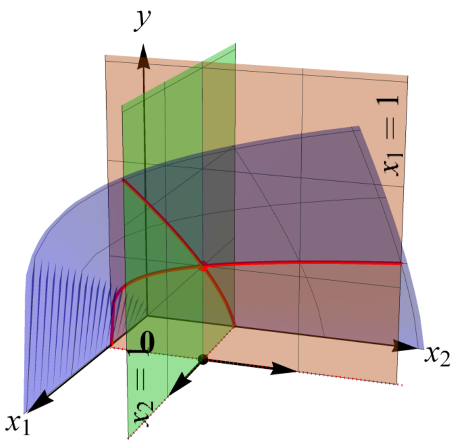
$$f_{x_1}(\mathbf{x}^0) = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{(1+\Delta x)^2 + 7 - 8}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{1 + 2\Delta x + \Delta x^2 - 1}{\Delta x} = 2$$

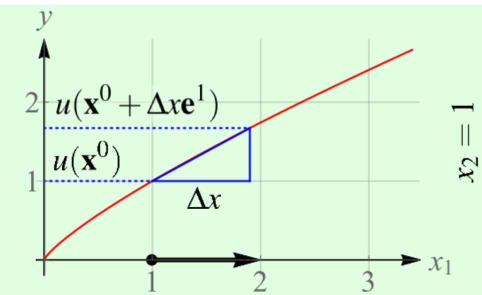
$$f_{x_1}(\mathbf{x}) = 2x_1$$

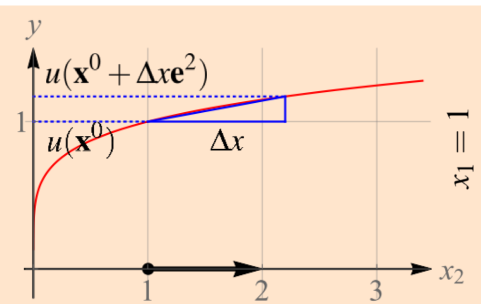
$$f_{x_2}(\mathbf{x}^0) = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{4 + 4(1+\Delta x)^2 - 8}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{8\Delta x + 4\Delta x^2}{\Delta x} = 8$$

$$f_{x_2}(\mathbf{x}) = 8(x_2 - 1)$$

Partielle Differenzierbarkeit







Definition 9.2.1: Partielle Ableitung (Teil 2)

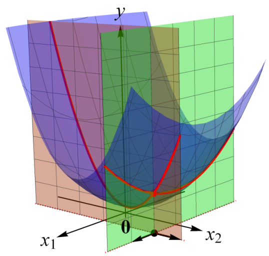
f heisst partiell differenzierbar nach x_i, $i = 1, \ldots, n$, wenn f an jeder Stelle $\mathbf{x}^0 \in D$ partiell nach x_i differenzierbar ist. Ist f nach allen Variablen partiell differenzierbar, heisst f partiell differenzierbar.

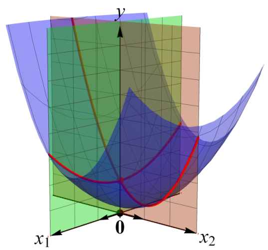
Beispiel:

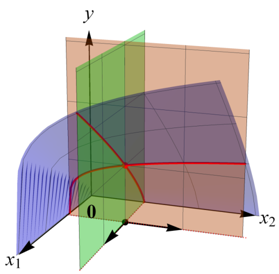
- $f : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ mit $f(\mathbf{x}) = x_1^2 + 4(x_2 - 1)^2 + 3$
- $u : (0, +\infty)^2 \to \mathbb{R}$ mit $u(\mathbf{x}) = x_1^{0.8} x_2^{0.2}$, $\mathbf{x}^0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$

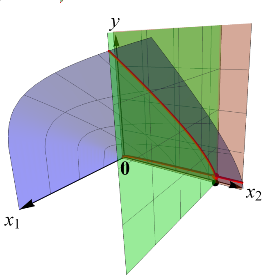
$$u_{x_1}(\mathbf{x}) = 0.8 x_1^{-0.2} x_2^{0.2} = 0.8 \left(\frac{x_2}{x_1}\right)^{0.2}, \qquad u_{x_1}(1,1) = 0.8$$

$$u_{x_2}(\mathbf{x}) = 0.2 x_1^{0.8} x_2^{-0.8} = 0.2 \left(\frac{x_1}{x_2}\right)^{0.8}, \qquad u_{x_2}(1,1) = 0.2$$









Der Gradient

Definition 9.2.2: Der Gradient

$$\operatorname{grad} f(\mathbf{x}^0) = \nabla f(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix} f_{x_1}(\mathbf{x}^0) \\ \vdots \\ f_{x_n}(\mathbf{x}^0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f(\mathbf{x}^0)}{\partial x_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial f(\mathbf{x}^0)}{\partial x_n} \end{pmatrix}$$

Gradient von f an der Stelle $\mathbf{x}^0$

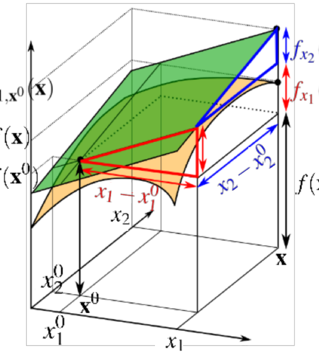
Beispiele:

- $f : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ mit $f(\mathbf{x}) = x_1^2 + 4(x_2 - 1)^2 + 3$

$$\nabla f(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix} 2x_1^0 \\ 8(x_2^0 - 1) \end{pmatrix}, \quad \nabla f(1,2) = \begin{pmatrix} 2 \\ 8 \end{pmatrix}, \quad \nabla f(0,0) = \begin{pmatrix} 0 \\ -8 \end{pmatrix}$$

- $u : (0, +\infty)^2 \to \mathbb{R}$ mit $u(\mathbf{x}) = x_1^{0.8} x_2^{0.2}$

$$\nabla u(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix} 0.8 \left(\frac{x_2^0}{x_1^0}\right)^{0.2} \\ 0.2 \left(\frac{x_1^0}{x_2^0}\right)^{0.8} \end{pmatrix}, \nabla u(1,1) = \begin{pmatrix} 0.8 \\ 0.2 \end{pmatrix}, \nabla u(1,32) = \begin{pmatrix} \frac{8}{5} \\ \frac{1}{80} \end{pmatrix}$$



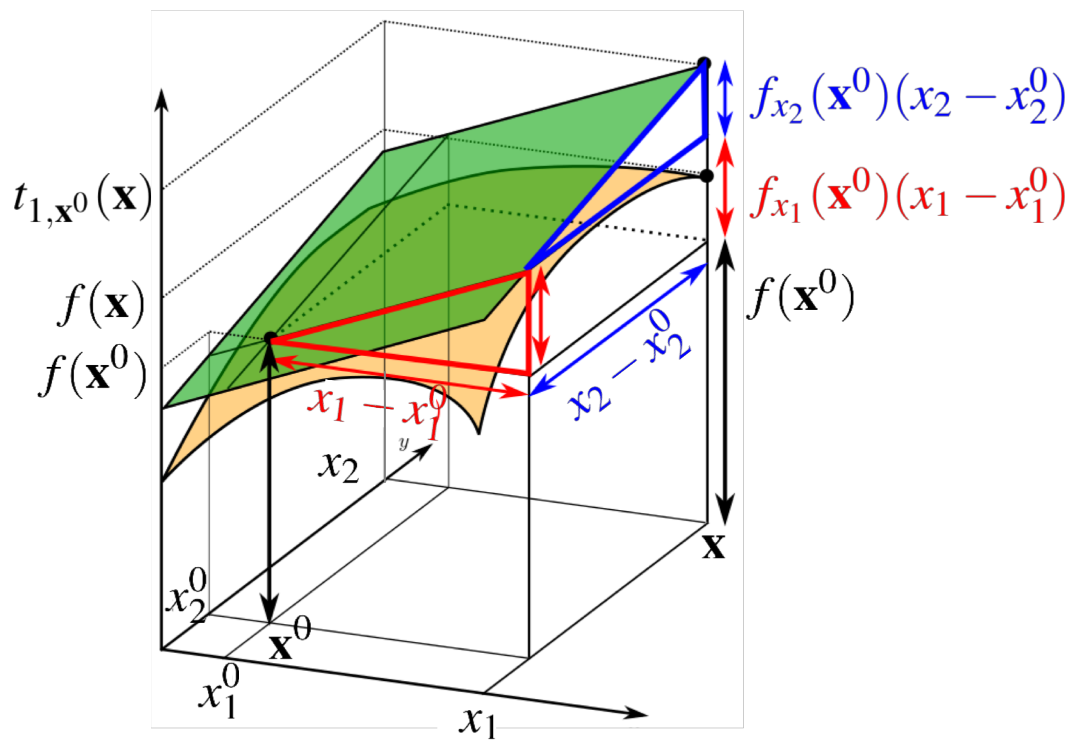
Die Tangential(hyper)ebene

Definition 9.2.3: Tangential(hyper)ebenen

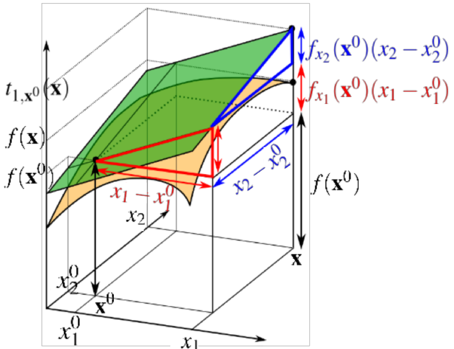
Ist $f : D \to Z$ an der Stelle $\mathbf{x}^0 \in D$ partiell differenzierbar:

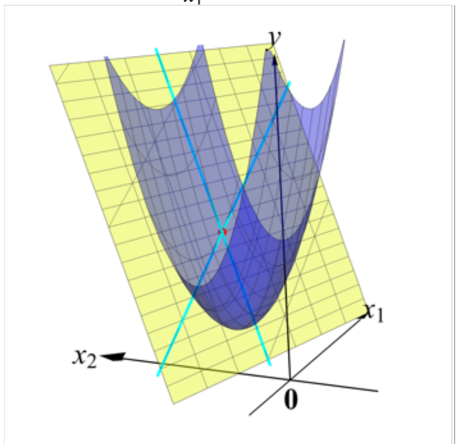
$$t_{1,\mathbf{x}^0}(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}^0) + \nabla f(\mathbf{x}^0)^T(\mathbf{x}-\mathbf{x}^0) = f(\mathbf{x}^0) + \sum_{i=1}^{n} f_{x_i}(\mathbf{x}^0)(x_i - x_i^0)$$

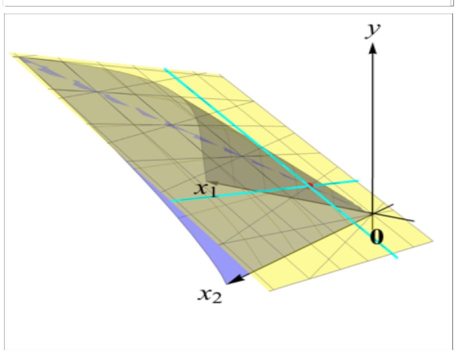
Tangente, Tangentialebene, Tangentialhyperebene



Die Tangential(hyper)ebene







Definition 9.2.3: Tangential(hyper)ebenen

Ist $f: D \to Z$ an der Stelle $\mathbf{x}^0 \in D$ partiell differenzierbar:

$$t_{1,\mathbf{x}^0}(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}^0) + \nabla f(\mathbf{x}^0)^T(\mathbf{x}-\mathbf{x}^0) = f(\mathbf{x}^0) + \sum_{i=1}^{n} f_{x_i}(\mathbf{x}^0)(x_i - x_i^0)$$

Beispiele:

- $f: \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ mit $f(\mathbf{x}) = x_1^2 + 4(x_2-1)^2 + 3$, $\mathbf{x}^0 = \begin{pmatrix}1\\2\end{pmatrix}$:

  $f(\mathbf{x}^0) = 8, \nabla f(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix}2\\8\end{pmatrix}$

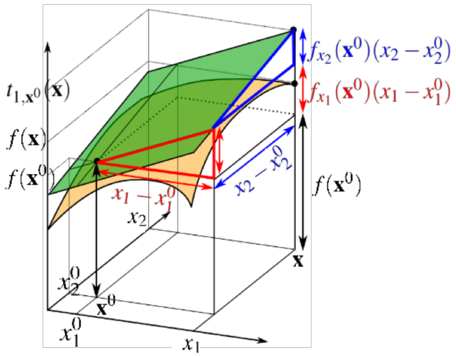
  $t_{1,\mathbf{x}^0}(\mathbf{x}) = 8 + (2,8)\begin{pmatrix}x_1-1\\x_2-2\end{pmatrix} = 8 + 2(x_1-1) + 8(x_2-2)$

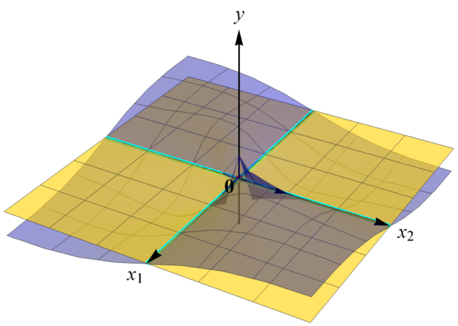
- $u: (0,+\infty)^2 \to \mathbb{R}$ mit $u(\mathbf{x}) = x_1^{0.8}x_2^{0.2}$, $\mathbf{x}^0 = \begin{pmatrix}1\\1\end{pmatrix}$:

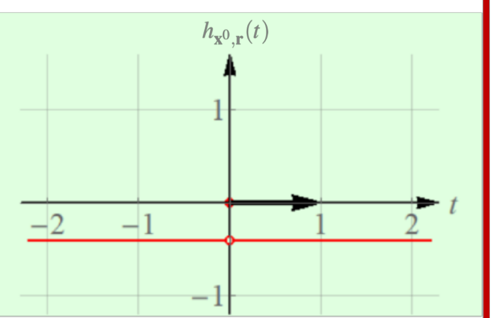
  $u(\mathbf{x}^0) = 1, \nabla u(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix}0.8\\0.2\end{pmatrix}$

  $t_{1,\mathbf{x}^0}(\mathbf{x}) = 1 + (0.8,0.2)\begin{pmatrix}x_1-1\\x_2-1\end{pmatrix} = 1 + 0.8(x_1-1) + 0.2(x_2-1)$

Partielle Differenzierbarkeit und Stetigkeit







Definitionen 9.2.4, 9.2.8: Stetig partielle Differenzierbarkeit

Ist $f: D \to Z$ partiell differenzierbar und f_{x_i} für $i = 1, \ldots, n$ stetig auf D, heisst f stetig partiell differenzierbar und total differenzierbar.

Satz 9.2.1: Stetigkeit stetig partiell differenzierbarer Funktionen

Ist f stetig partiell differenzierbar, dann ist f stetig.

Beispiel:

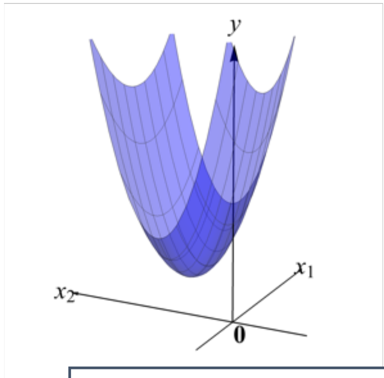
- $$h(\mathbf{x}) = \begin{cases} \frac{x_1 x_2}{x_1^2 + x_2^2} & \mathbf{x} \neq \mathbf{0} \\ 0 & \mathbf{x} = \mathbf{0} \end{cases}$$

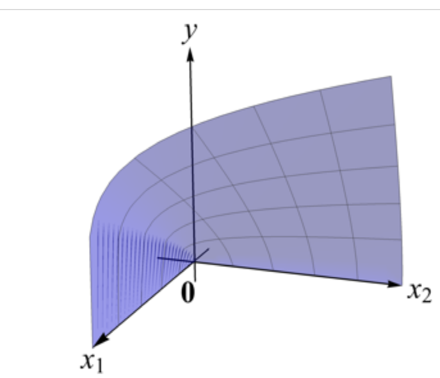
$$h_{x_1}(\mathbf{x}) = \frac{\partial h(\mathbf{x})}{\partial x_1} = \begin{cases} x_2 \frac{x_2^2 - x_1^2}{(x_1^2 + x_2^2)^2} & \mathbf{x} \neq \mathbf{0} \\ 0 & \mathbf{x} = \mathbf{0} \end{cases}$$

$$h_{x_2}(\mathbf{x}) = \frac{\partial h(\mathbf{x})}{\partial x_2} = \begin{cases} x_1 \frac{x_1^2 - x_2^2}{(x_1^2 + x_2^2)^2} & \mathbf{x} \neq \mathbf{0} \\ 0 & \mathbf{x} = \mathbf{0} \end{cases}$$

$$t_{1,\mathbf{0}}(\mathbf{x}) = 0 + (0,0) \begin{pmatrix} x_1 - 0 \\ x_2 - 0 \end{pmatrix} = 0$$

Die Hesse-Matrix





Partielle Ableitung 2. Ordnung

Definition 9.2.5 und Satz 9.2.2: Die Hesse-Matrix

Ist $f_{x_i}(\mathbf{x}) = \frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial x_i}$ partiell differenzierbar, ist $\frac{\partial f_{x_i}(\mathbf{x})}{\partial x_j} = \frac{\partial^2 f(\mathbf{x})}{\partial x_j \partial x_i} = f_{x_i x_j}(\mathbf{x})$ und

$$\nabla^2 f(\mathbf{x}^0) = H_f(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix} f_{x_1x_1}(\mathbf{x}^0) & f_{x_1x_2}(\mathbf{x}^0) & \cdots & f_{x_1x_n}(\mathbf{x}^0) \\ f_{x_2x_1}(\mathbf{x}^0) & f_{x_2x_2}(\mathbf{x}^0) & \cdots & f_{x_2x_n}(\mathbf{x}^0) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{x_nx_1}(\mathbf{x}^0) & f_{x_nx_2}(\mathbf{x}^0) & \cdots & f_{x_nx_n}(\mathbf{x}^0) \end{pmatrix}$$

Hesse-Matrix von f an der Stelle $\mathbf{x}^0$

f zweimal stetig partiell differenzierbar

Ist $f_{x_ix_j}(\mathbf{x})$ stetig für alle $i, j = 1\ldots,n$, ist $H_f(\mathbf{x}^0)$ symmetrisch.

Beispiele:

- $f : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ mit $f(\mathbf{x}) = x_1^2 + 4(x_2-1)^2 + 3$

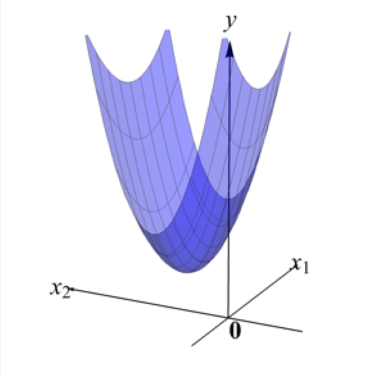
$$f_{x_1}(\mathbf{x}) = 2x_1 : \qquad f_{x_1x_1}(\mathbf{x}) = 2, \qquad f_{x_1x_2}(\mathbf{x}) = 0$$

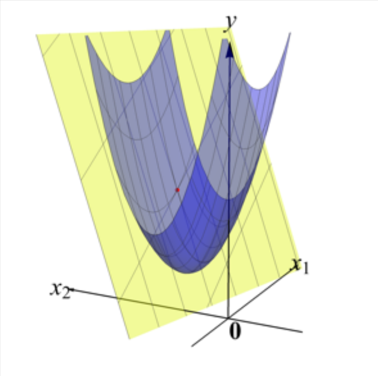
$$f_{x_2}(\mathbf{x}) = 8(x_2-1) : \qquad f_{x_2x_1}(\mathbf{x}) = 0, \qquad f_{x_2x_2}(\mathbf{x}) = 8$$

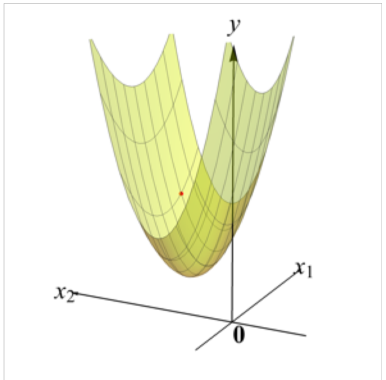
$$\nabla f(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix} 2x_1^0 \\ 8(x_2^0-1) \end{pmatrix}, \quad H_f(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 8 \end{pmatrix}$$

- $u : (0,+\infty)^2 \to \mathbb{R}$ mit $u(\mathbf{x}) = x_1^{0.8} x_2^{0.2}$

$$\nabla u(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix} 0.8\left(\frac{x_2^0}{x_1^0}\right)^{0.2} \\ 0.2\left(\frac{x_1^0}{x_2^0}\right)^{0.8} \end{pmatrix}, \quad H_u(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix} \frac{-0.16(x_2^0)^{0.2}}{(x_1^0)^{1.2}} & \frac{0.16}{(x_1^0)^{0.2}(x_2^0)^{0.8}} \\ \frac{0.16}{(x_1^0)^{0.2}(x_2^0)^{0.8}} & \frac{-0.16(x_1^0)^{0.8}}{(x_2^0)^{1.8}} \end{pmatrix}$$







Taylorpolynome

Definition 9.2.7: Taylorpolynome

Ist f an der Stelle $\mathbf{x}^0 \in D$ partiell differenzierbar:

$$t_{1,\mathbf{x}^0}(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}^0) + \nabla f(\mathbf{x}^0)^T(\mathbf{x}-\mathbf{x}^0).$$

Taylorpolynom 1. Ordnung von f an $\mathbf{x}^0$

Existieren $f_{x_i x_j}$ an der Stelle $\mathbf{x}^0 \in D$ für $i,j = 1,\dots,n$:

$$t_{2,\mathbf{x}^0}(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}^0) + \nabla f(\mathbf{x}^0)^T(\mathbf{x}-\mathbf{x}^0) + \frac{1}{2}(\mathbf{x}-\mathbf{x}^0)^T H_f(\mathbf{x}^0)(\mathbf{x}-\mathbf{x}^0).$$

Taylorpolynom 2. Ordnung von f an $\mathbf{x}^0$

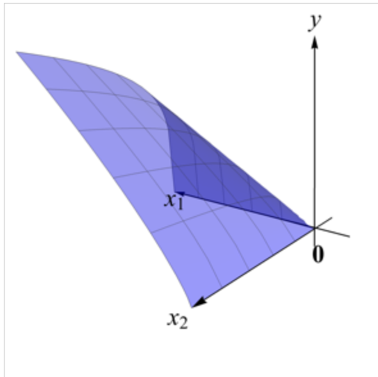
Beispiel:

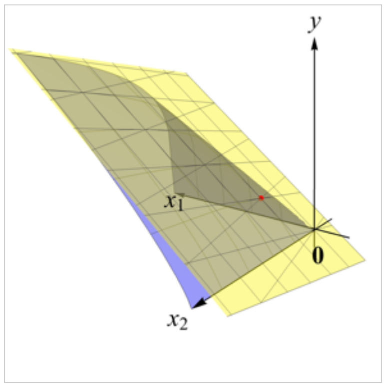
- $f(\mathbf{x}) = x_1^2 + 4(x_2-1)^2 + 3$

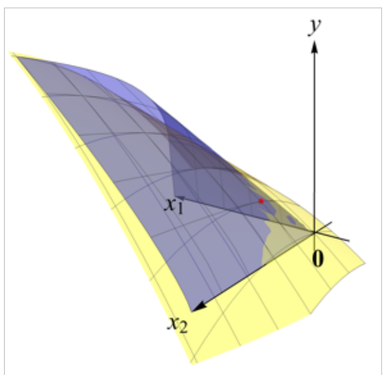
$$\mathbf{x}^0 = \begin{pmatrix}1\\2\end{pmatrix}\text{: } f(\mathbf{x}^0) = 8 \quad \nabla f(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix}2\\8\end{pmatrix} \quad H_f(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix}2 & 0\\0 & 8\end{pmatrix}$$

$$t_{1,\mathbf{x}^0}(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}^0) + \nabla f(\mathbf{x}^0)^T(\mathbf{x}-\mathbf{x}^0) = 8 + 2(x_1-1) + 8(x_2-2)$$

$$\begin{aligned} t_{2,\mathbf{x}^0}(\mathbf{x}) &= f(\mathbf{x}^0) + \nabla f(\mathbf{x}^0)^T(\mathbf{x}-\mathbf{x}^0) + \frac{1}{2}(\mathbf{x}-\mathbf{x}^0)^T H_f(\mathbf{x}^0)(\mathbf{x}-\mathbf{x}^0) \\ &= 8 + (2,8)\begin{pmatrix}x_1-1\\x_2-2\end{pmatrix} + \frac{1}{2}(x_1-1, x_2-2)\begin{pmatrix}2 & 0\\0 & 8\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x_1-1\\x_2-2\end{pmatrix} \\ &= 8 + 2(x_1-1) + 8(x_2-2) + (x_1-1)^2 + 4(x_2-2)^2 \\ &= x_1^2 + 4(x_2-1)^2 + 3 \end{aligned}$$







Taylorpolynome

Definition 9.2.7: Taylorpolynome

Ist f an der Stelle $\mathbf{x}^0 \in D$ partiell differenzierbar:

$t_{1,\mathbf{x}^0}(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}^0) + \nabla f(\mathbf{x}^0)^T(\mathbf{x}-\mathbf{x}^0)$.

Existieren $f_{x_i x_j}$ an der Stelle $\mathbf{x}^0 \in D$ für $i, j = 1, \ldots, n$:

$$t_{2,\mathbf{x}^0}(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}^0) + \nabla f(\mathbf{x}^0)^T(\mathbf{x}-\mathbf{x}^0) + \frac{1}{2}(\mathbf{x}-\mathbf{x}^0)^T H_f(\mathbf{x}^0)(\mathbf{x}-\mathbf{x}^0).$$

Beispiel:

- $u(\mathbf{x}) = x_1^{0.8} x_2^{0.2}$

$$\mathbf{x}^0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}: u(\mathbf{x}^0) = 1 \quad \nabla u(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix} 0.8 \\ 0.2 \end{pmatrix} \quad H_u(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix} -0.16 & 0.16 \\ 0.16 & -0.16 \end{pmatrix}$$

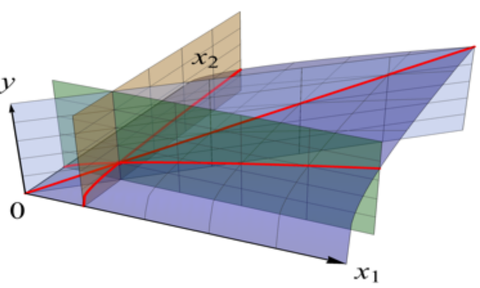
$$t_{1,\mathbf{x}^0}(\mathbf{x}) = u(\mathbf{x}^0) + \nabla u(\mathbf{x}^0)^T(\mathbf{x}-\mathbf{x}^0) = 1 + 0.8(x_1 - 1) + 0.2(x_2 - 1)$$

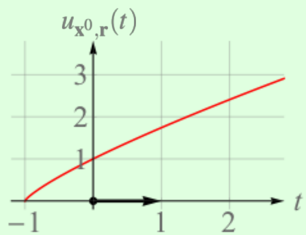
$$t_{2,\mathbf{x}^0}(\mathbf{x}) = u(\mathbf{x}^0) + \nabla u(\mathbf{x}^0)^T(\mathbf{x}-\mathbf{x}^0) + \frac{1}{2}(\mathbf{x}-\mathbf{x}^0)^T H_u(\mathbf{x}^0)(\mathbf{x}-\mathbf{x}^0)$$

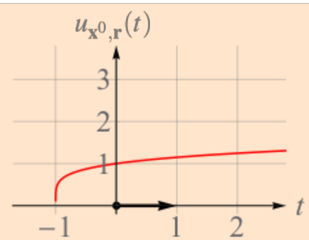
$$= 1 + \begin{pmatrix} 0.8 \\ 0.2 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} x_1 - 1 \\ x_2 - 1 \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} x_1 - 1 \\ x_2 - 1 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} -0.16 & 0.16 \\ 0.16 & -0.16 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 - 1 \\ x_2 - 1 \end{pmatrix}$$

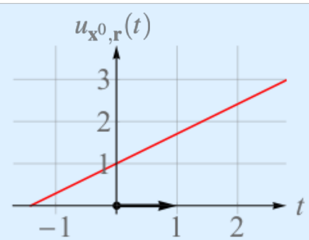
$$= 0.8x_1 + 0.2x_2 - 0.08x_1^2 - 0.08x_2^2 + 0.16x_1x_2$$

Ableitungen des Vertikalschnitts





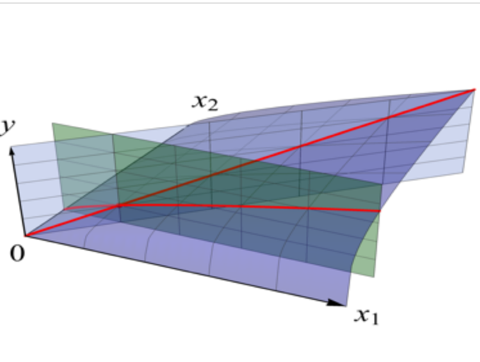


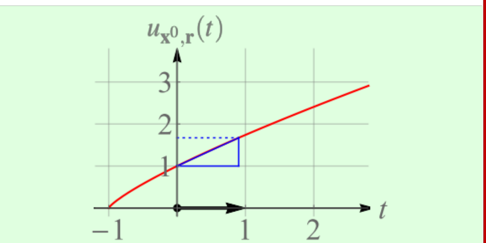


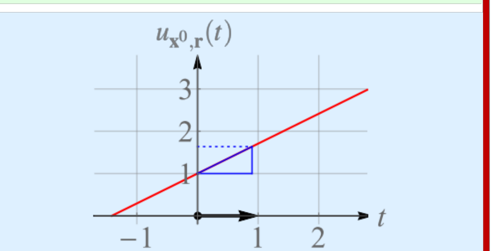
Beispiele:

$$u(\mathbf{x}) = x_1^{0.8} x_2^{0.2},\ \mathbf{x}^0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} : \nabla u(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix} 0.8 \\ 0.2 \end{pmatrix},\ H_u(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix} -0.16 & 0.16 \\ 0.16 & -0.16 \end{pmatrix}$$

- $\mathbf{r} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$: $u_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}(t) = (1+1t)^{0.8}(1+0t)^{0.2} = (1+t)^{0.8}$
  $$\frac{du_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}}{dt}(t) = 0.8(1+t)^{-0.2}, \qquad \frac{du_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}}{dt}(0) = 0.8$$
  $$\frac{d^2u_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}}{dt^2}(t) = -0.16(1+t)^{-1.2}, \qquad \frac{d^2u_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}}{dt^2}(0) = -0.16$$
- $\mathbf{r} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$: $u_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}(t) = (1+0t)^{0.8}(1+1t)^{0.2} = (1+t)^{0.2}$
  $$\frac{du_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}}{dt}(t) = 0.2(1+t)^{-0.8}, \qquad \frac{du_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}}{dt}(0) = 0.2$$
  $$\frac{d^2u_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}}{dt^2}(t) = -0.16(1+t)^{-1.8}, \qquad \frac{d^2u_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}}{dt^2}(0) = -0.16$$
- $\mathbf{r} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$: $u_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}(t) = (1+\frac{1}{\sqrt{2}}t)^{0.8}(1+\frac{1}{\sqrt{2}}t)^{0.2} = 1 + \frac{1}{\sqrt{2}}t$
  $$\frac{du_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}}{dt}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}}, \qquad \frac{du_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}}{dt}(0) = \frac{1}{\sqrt{2}}$$
  $$\frac{d^2u_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}}{dt^2}(t) = 0, \qquad \frac{d^2u_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}}{dt^2}(0) = 0$$







Die erste Richtungsableitung

Beispiele:

$$u(\mathbf{x}) = x_1^{0.8} x_2^{0.2};\ \mathbf{x}^0 = \begin{pmatrix}1\\1\end{pmatrix}: \nabla u(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix}0.8\\0.2\end{pmatrix},\ H_u(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix}-0.16 & 0.16\\ 0.16 & -0.16\end{pmatrix}$$

- $\mathbf{r} = \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}$: $u_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}(t) = (1+1t)^{0.8}(1+0t)^{0.2} = (1+t)^{0.8}$

  $$\frac{du_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}}{dt}(t) = 0.8(1+t)^{-0.2}, \qquad \frac{du_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}}{dt}(0) = 0.8 = (0.8, 0.2)\cdot\begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}$$

- $\mathbf{r} = \begin{pmatrix}\frac{1}{\sqrt{2}}\\ \frac{1}{\sqrt{2}}\end{pmatrix}$: $u_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}(t) = (1+\frac{1}{\sqrt{2}}t)^{0.8}(1+\frac{1}{\sqrt{2}}t)^{0.2} = 1+\frac{1}{\sqrt{2}}t$

  $$\frac{du_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}}{dt}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}}, \qquad \frac{du_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}}{dt}(0) = \frac{1}{\sqrt{2}} = (0.8, 0.2)\cdot\begin{pmatrix}\frac{1}{\sqrt{2}}\\ \frac{1}{\sqrt{2}}\end{pmatrix}$$

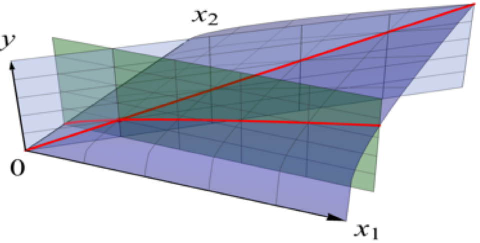
Definition 9.2.9 und Satz 9.2.5: Die erste Richtungsableitung

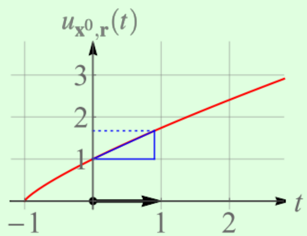
Ist f stetig partiell differenzierbar, $\mathbf{x}^0 \in D$ und $\mathbf{r} \in \mathbb{R}^n$ eine Richtung, dann

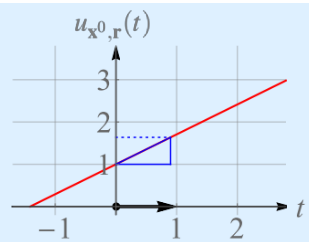
$$f'_{\mathbf{r}}(\mathbf{x}^0) = \frac{df_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}}{dt}(0) = \nabla f(\mathbf{x}^0)^T\mathbf{r}.$$

1. Richtungsableitung von f an der Stelle $\mathbf{x}^0$ in Richtung $\mathbf{r}$

Die zweite Richtungsableitung







Beispiele:

$$u(\mathbf{x}) = x_1^{0.8} x_2^{0.2},\ \mathbf{x}^0 = \begin{pmatrix}1\\1\end{pmatrix}: \nabla u(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix}0.8\\0.2\end{pmatrix}, H_u(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix}-0.16 & 0.16\\ 0.16 & -0.16\end{pmatrix}$$

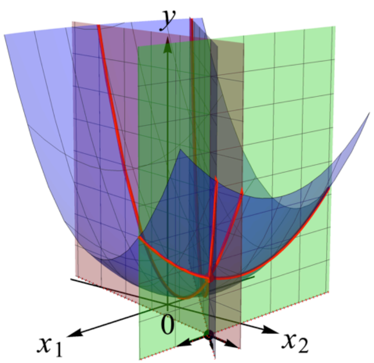
- $\mathbf{r} = \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}$: $u_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}(t) = (1+1t)^{0.8}(1+0t)^{0.2} = (1+t)^{0.8}$
  $$\frac{du_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}}{dt}(t) = 0.8(1+t)^{-0.2},\quad \frac{d^2u_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}}{dt^2}(t) = -0.16(1+t)^{-1.2}$$
  $$\frac{d^2u_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}}{dt^2}(0) = -0.16 \ = (1,0)\begin{pmatrix}-0.16 & 0.16\\ 0.16 & -0.16\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}$$
- $\mathbf{r} = \begin{pmatrix}\frac{1}{\sqrt{2}}\\ \frac{1}{\sqrt{2}}\end{pmatrix}$: $u_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}(t) = (1+\frac{1}{\sqrt{2}}t)^{0.8}(1+\frac{1}{\sqrt{2}}t)^{0.2} = 1+\frac{1}{\sqrt{2}}t$
  $$\frac{du_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}}{dt}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}},\qquad \frac{d^2u_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}}{dt^2}(t) = 0$$
  $$\frac{d^2u_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}}{dt^2}(0) = 0 \ = (\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}})\begin{pmatrix}-0.16 & 0.16\\ 0.16 & -0.16\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\frac{1}{\sqrt{2}}\\ \frac{1}{\sqrt{2}}\end{pmatrix}$$

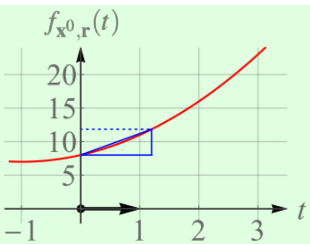
Definition 9.2.10 und Satz 9.2.7: Die zweite Richtungsableitung

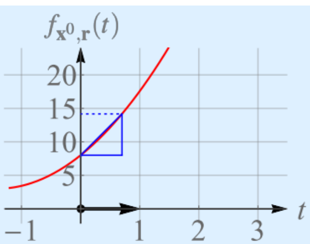
Ist f zweimal stetig partiell differenzierbar, $\mathbf{x}^0 \in D$ und $\mathbf{r} \in \mathbb{R}^n$ eine Richtung, dann

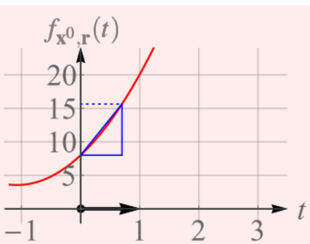
$$f''_{\mathbf{r}}(\mathbf{x}^0) = \frac{d^2 f_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}}{dt^2}(0) = \mathbf{r}^T H_f(\mathbf{x}^0)\mathbf{r}.$$

2. Richtungsableitung von f an der Stelle $\mathbf{x}^0$ in Richtung $\mathbf{r}$









Richtungsableitungen

Beispiele:

$$f(\mathbf{x}) = x_1^2 + 4(x_2-1)^2 + 3,\ \mathbf{x}^0 = \begin{pmatrix}1\\2\end{pmatrix}:\ \nabla f(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix}2\\8\end{pmatrix},\ H_f(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix}2&0\\0&8\end{pmatrix}$$

- $\mathbf{r} = \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}$:
$$f'_{\mathbf{r}}(\mathbf{x}^0) = (2,8)\begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix} = 2\cdot 1 + 8\cdot 0 = 2$$
$$f''_{\mathbf{r}}(\mathbf{x}^0) = (1,0)\begin{pmatrix}2&0\\0&8\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix} = 2$$

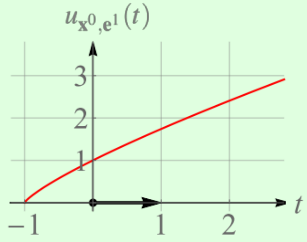
- $\mathbf{r} = \begin{pmatrix}\frac{1}{\sqrt{2}}\\\frac{1}{\sqrt{2}}\end{pmatrix}$:
$$f'_{\mathbf{r}}(\mathbf{x}^0) = (2,8)\begin{pmatrix}\frac{1}{\sqrt{2}}\\\frac{1}{\sqrt{2}}\end{pmatrix} = \frac{2}{\sqrt{2}} + \frac{8}{\sqrt{2}} = \frac{10}{\sqrt{2}}$$
$$f''_{\mathbf{r}}(\mathbf{x}^0) = \left(\frac{1}{\sqrt{2}},\frac{1}{\sqrt{2}}\right)\begin{pmatrix}2&0\\0&8\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\frac{1}{\sqrt{2}}\\\frac{1}{\sqrt{2}}\end{pmatrix} = 5$$

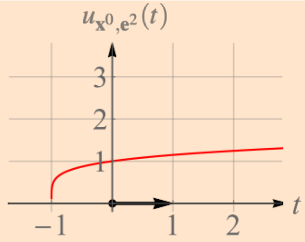
- $\mathbf{r} = \begin{pmatrix}\frac{2}{\sqrt{68}}\\\frac{8}{\sqrt{68}}\end{pmatrix}$:
$$f'_{\mathbf{r}}(\mathbf{x}^0) = (2,8)\begin{pmatrix}\frac{2}{\sqrt{68}}\\\frac{8}{\sqrt{68}}\end{pmatrix} = \frac{4}{\sqrt{68}} + \frac{64}{\sqrt{68}} = \sqrt{68}$$
$$f''_{\mathbf{r}}(\mathbf{x}^0) = \left(\frac{2}{\sqrt{68}},\frac{8}{\sqrt{68}}\right)\begin{pmatrix}2&0\\0&8\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\frac{2}{\sqrt{68}}\\\frac{8}{\sqrt{68}}\end{pmatrix} = \frac{520}{68}$$

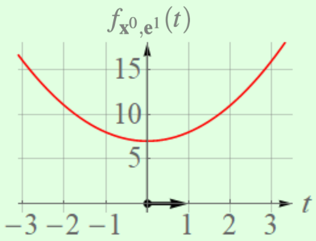
Satz 9.2.6: Richtung des steilsten Anstiegs

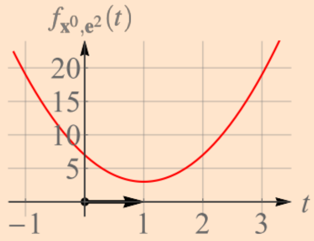
Der Gradient zeigt in die Richtung des steilsten Anstiegs.

Monotonie









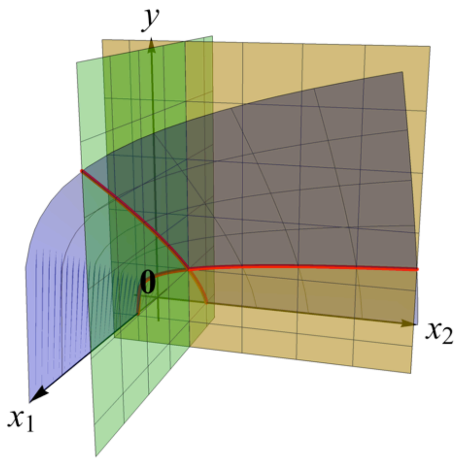
Definition 9.3.1 : Monotonie

$f: D \to Z$ heisst (streng) monoton steigend bzw. fallend in Richtung $\mathbf{r}$, wenn $f_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}(t)$ für alle $\mathbf{x}^0 \in D$ (streng) monoton steigend bzw. fallend ist.

Beispiele:

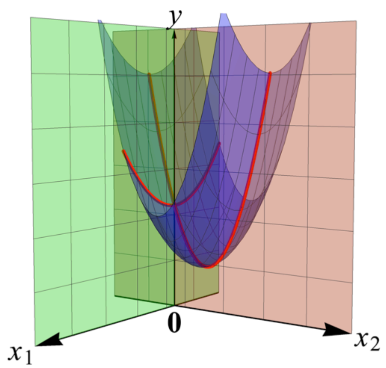
- $u(\mathbf{x}) = x_1^{0.8} x_2^{0.2}$

  u ist monoton steigend in Richtung $\mathbf{e}^1$.
  u ist monoton steigend in Richtung $\mathbf{e}^2$.



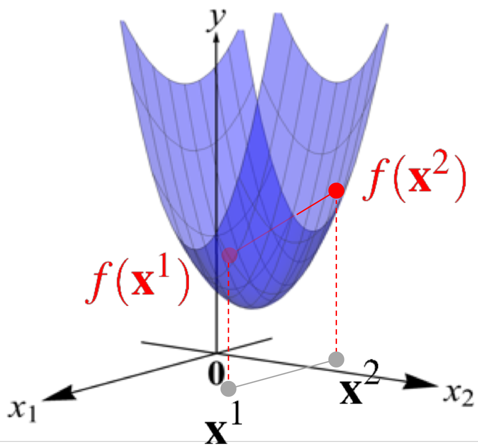
- $f(\mathbf{x}) = x_1^2 + 4(x_2 - 1)^2 + 3$

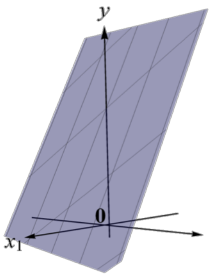
  f ist nicht monoton steigend in Richtung $\mathbf{e}^1$.
  f ist nicht monoton steigend in Richtung $\mathbf{e}^2$.

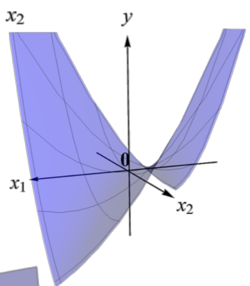


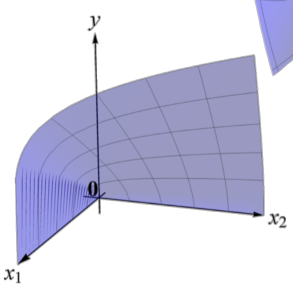
Konvexität

f (streng) konvex $\Leftrightarrow$ $f_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}$ für alle $\mathbf{x}^0, \mathbf{r}$ (streng) konvex









Definition 9.3.2: Konvexität

Sei D konvex. $f : D \to Z$ heisst konvex bzw. streng konvex, falls

$$f(\alpha \mathbf{x}^1 + (1-\alpha)\mathbf{x}^2) \leq \alpha f(\mathbf{x}^1) + (1-\alpha) f(\mathbf{x}^2) \text{ bzw.}$$
$$f(\alpha \mathbf{x}^1 + (1-\alpha)\mathbf{x}^2) < \alpha f(\mathbf{x}^1) + (1-\alpha) f(\mathbf{x}^2) \;\forall \mathbf{x}^1, \mathbf{x}^2 \in D, \alpha \in (0,1).$$

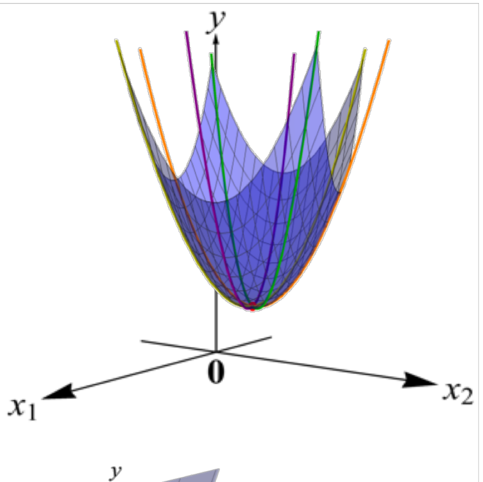
f heisst (streng) konkav in D, falls $-f$ (streng) konvex in D ist.

Beispiele:

- $f(\mathbf{x}) = x_1^2 + 4(x_2-1)^2 + 3$
  f ist streng konvex. f ist nicht konkav.
- $g(\mathbf{x}) = -8x_1 + 3x_2 + 10$
  g ist konvex. g ist konkav.
- $p(\mathbf{x}) = x_1^2 + x_2^2 - 3x_1x_2$
  p ist nicht konvex. p ist nicht konkav.
- $u(\mathbf{x}) = x_1^{0.8} x_2^{0.2}$
  u ist nicht konvex. u ist konkav.

Kriterien

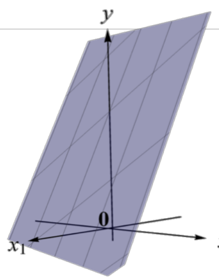
f (streng) konvex $\Leftrightarrow$
$f_{\mathbf{x}^0,\mathbf{r}}$ für alle $\mathbf{x}^0, \mathbf{r}$ (streng) konvex

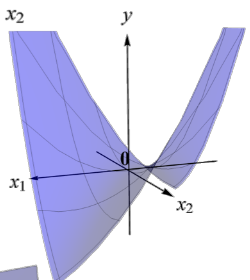


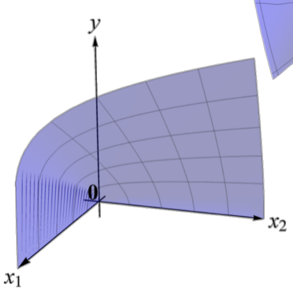
Sätze 9.3.3 – 9.3.4: Konvexitätskriterien

D offen und konvex, $f : D \to Z$ zweimal stetig partiell differenzierbar:

- $\mathbf{r}^T H_f(\mathbf{x}^0)\mathbf{r} > 0 \quad \forall \mathbf{x}^0 \in D,\, \mathbf{r} \neq \mathbf{0} \Rightarrow f$ ist streng konvex in D.
- $\mathbf{r}^T H_f(\mathbf{x}^0)\mathbf{r} \geq 0 \quad \forall \mathbf{x}^0 \in D,\, \mathbf{r} \neq \mathbf{0} \Leftrightarrow f$ ist konvex in D.
- $\mathbf{r}^T H_f(\mathbf{x}^0)\mathbf{r} < 0 \quad \forall \mathbf{x}^0 \in D,\, \mathbf{r} \neq \mathbf{0} \Rightarrow f$ ist streng konkav in D.
- $\mathbf{r}^T H_f(\mathbf{x}^0)\mathbf{r} \leq 0 \quad \forall \mathbf{x}^0 \in D,\, \mathbf{r} \neq \mathbf{0} \Leftrightarrow f$ ist konkav in D.







Beispiele:

- $f(\mathbf{x}) = x_1^2 + 4(x_2-1)^2 + 3 \quad f''_{\mathbf{r}}(\mathbf{x}^0) = \mathbf{r}^T \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 8 \end{pmatrix} \mathbf{r} = 2r_1^2 + 8r_2^2$
  f ist streng konvex. f ist nicht konkav.
- $g(\mathbf{x}) = -8x_1 + 3x_2 + 10 \quad g''_{\mathbf{r}}(\mathbf{x}^0) = \mathbf{r}^T \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{r} = 0$
  g ist konvex. g ist konkav.
- $p(\mathbf{x}) = x_1^2 + x_2^2 - 3x_1x_2 \quad p''_{\mathbf{r}}(\mathbf{x}^0) = \mathbf{r}^T \begin{pmatrix} 2 & -3 \\ -3 & 2 \end{pmatrix} \mathbf{r} = 2r_1^2 + 2r_2^2 - 6r_1r_2$
  p ist nicht konvex. p ist nicht konkav.
- $u(\mathbf{x}) = x_1^{0.8}x_2^{0.2} \quad u''_{\mathbf{r}}(\mathbf{x}^0) = \mathbf{r}^T \begin{pmatrix} \frac{-0.16(x_2^0)^{0.2}}{(x_1^0)^{1.2}} & \frac{0.16}{(x_1^0)^{0.2}(x_2^0)^{0.8}} \\ \frac{0.16}{(x_1^0)^{0.2}(x_2^0)^{0.8}} & \frac{-0.16(x_1^0)^{0.8}}{(x_2^0)^{1.8}} \end{pmatrix} \mathbf{r}$
  u ist nicht konvex. u ist konkav.

Definitheit von Matrizen

Positiv definite Matrizen

Positiv semi-definite Matrizen

Indefinite Matrizen

Negativ semi-definite Matrizen

Negativ definite Matrizen

Definition 9.3.3: Definitheit von Matrizen

Eine symmetrische $n \times n$-Matrix A heisst

- **positiv definit**, $A \succ 0$, wenn $\mathbf{r}^T A\mathbf{r} > 0$ für alle $\mathbf{r} \neq \mathbf{0}$;
- **positiv semidefinit**, $A \succeq 0$, wenn $\mathbf{r}^T A\mathbf{r} \geq 0$ für alle $\mathbf{r} \neq \mathbf{0}$;
- **negativ definit**, $A \prec 0$, wenn $\mathbf{r}^T A\mathbf{r} < 0$ für alle $\mathbf{r} \neq \mathbf{0}$;
- **negativ semidefinit**, $A \preceq 0$, wenn $\mathbf{r}^T A\mathbf{r} \leq 0$ für alle $\mathbf{r} \neq \mathbf{0}$;
- **indefinit**, wenn A weder positiv definit, positiv semidefinit, negativ definit, noch negativ semidefinit ist.

Beispiele:

- $A = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 8 \end{pmatrix}$ $\quad \mathbf{r}^T A\, \mathbf{r} = 2r_1^2 + 8r_2^2$
- $B = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ $\quad \mathbf{r}^T B\, \mathbf{r} = 0$
- $C = \begin{pmatrix} 2 & -3 \\ -3 & 2 \end{pmatrix}$ $\quad \mathbf{r}^T C\, \mathbf{r} = 2r_1^2 + 2r_2^2 - 6r_1 r_2$
- $D = \begin{pmatrix} -0.16 & 0.16 \\ 0.16 & -0.16 \end{pmatrix}$ $\quad \mathbf{r}^T D\, \mathbf{r} = -0.16r_1^2 - 0.16r_2^2 + 0.32r_1 r_2$

Eigenwerte und Definitheit

Eigenvektorbestimmung

1. Berechne $\det(A - \lambda I)$

2. Finde alle $\lambda \in \mathbb{R}$: $\det(A - \lambda I) = 0$

3. Zu jedem λ: Löse $(A - \lambda I)\mathbf{v} = \mathbf{0}$. $\Rightarrow \mathbf{v} \in \mathbb{L} \setminus \{\mathbf{0}\}$ Eigenvektor zum Eigenwert λ

Satz 9.3.5: Eigenwerte und Definitheit

Eine symmetrische $n \times n$-Matrix A mit Eigenwerten $\lambda_1, \ldots, \lambda_n \in \mathbb{R}$ ist

- positiv definit $\Leftrightarrow \lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_n > 0$;
- positiv semidefinit $\Leftrightarrow \lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_n \geq 0$;
- negativ definit $\Leftrightarrow \lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_n < 0$;
- negativ semidefinit $\Leftrightarrow \lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_n \leq 0$;
- indefinit $\Leftrightarrow$ mindestens ein Eigenwert positiv und einer negativ.

Beispiele:

- $A = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 8 \end{pmatrix}$ $\quad \det(A - \lambda I) = (2-\lambda)(8-\lambda)$ $\Rightarrow \lambda_1 = 2, \lambda_2 = 8$
- $B = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ $\quad \det(B - \lambda I) = \lambda^2$ $\Rightarrow \lambda_1 = 0, \lambda_2 = 0$
- $C = \begin{pmatrix} 2 & -3 \\ -3 & 2 \end{pmatrix}$ $\quad \det(C - \lambda I) = \lambda^2 - 4\lambda - 5$ $\Rightarrow \lambda_1 = 5, \lambda_2 = -1$
- $D = \begin{pmatrix} -0.16 & 0.16 \\ 0.16 & -0.16 \end{pmatrix}$ $\quad \det(D - \lambda I) = \lambda(\lambda + 0.32)$ $\Rightarrow \lambda_1 = 0, \lambda_2 = -0.32$

Determinanten und Definitheit

$$\begin{array}{ccccc} U_1 & U_2 & U_3 & & U_n \end{array}$$

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \cdots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix}$$

Definition 9.3.4 und Satz 9.3.6: Hauptunterdeterminanten

Ist A eine symmetrische $n \times n$-Matrix, dann: $\det(U_1) = a_{11}$ und

i-te Hauptunterdeterminante

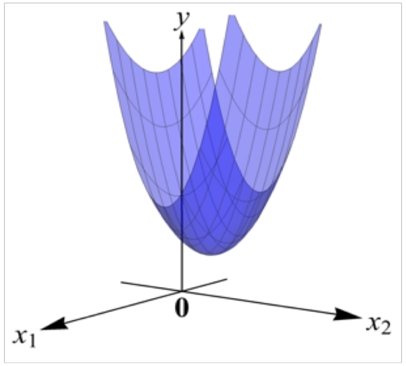
$$\det(U_i) = \det \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1i} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{i1} & \dots & a_{ii} \end{pmatrix}, \quad i = 2, \dots, n.$$

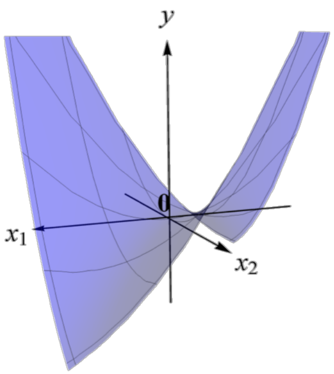
- A ist positiv definit $\Leftrightarrow \det(U_i) > 0$ für alle $i = 1, \dots, n$;
- A ist negativ definit $\Leftrightarrow (-1)^i \det(U_i) > 0$ für alle $i = 1, \dots, n$;
- A positiv semidefinit $\Rightarrow \det(U_i) \geq 0$ für alle $i = 1, \dots, n$;
- A negativ semidefinit $\Rightarrow \det(U_i)(-1)^i \geq 0$ für alle $i = 1, \dots, n$.

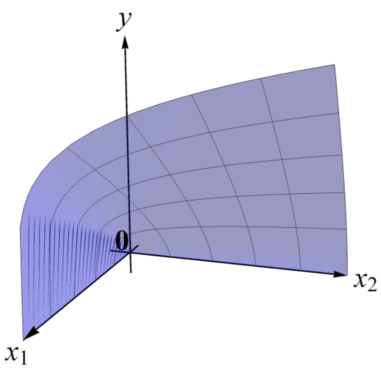
Beispiele:

- $A = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 8 \end{pmatrix}$ $\quad \det(U_1) = 2,$ $\det(U_2) = 16 - 0 = 16$
- $C = \begin{pmatrix} 2 & -3 \\ -3 & 2 \end{pmatrix}$ $\quad \det(U_1) = 2,$ $\det(U_2) = 4 - 9 = -5$
- $D = \begin{pmatrix} -0.16 & 0.16 \\ 0.16 & -0.16 \end{pmatrix}$ $\quad \det(U_1) = -0.16,$ $\det(U_2) = (-0.16)^2 - 0.16^2 = 0$

Definitheit und zweite Richtungsableitungen







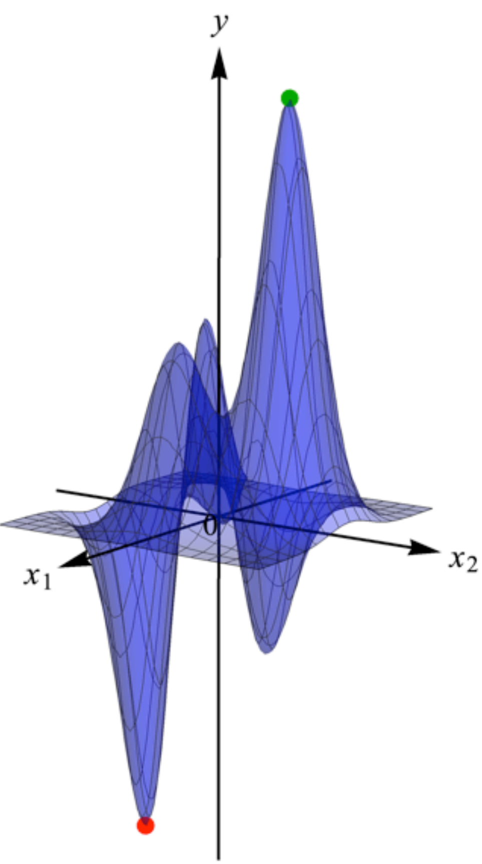
Satz 9.3.7: Definitheit und Konvexität

Ist $f : D \to Z$ an der Stelle $\mathbf{x}^0 \in D$ zweimal stetig partiell differenzierbar:

- $H_f(\mathbf{x}^0)$ positiv definit für alle $\mathbf{x}^0 \in D \Rightarrow f$ streng konvex;
- $H_f(\mathbf{x}^0)$ positiv semidefinit für alle $\mathbf{x}^0 \in D \Leftrightarrow f$ konvex;
- $H_f(\mathbf{x}^0)$ negativ definit für alle $\mathbf{x}^0 \in D \Rightarrow f$ streng konkav;
- $H_f(\mathbf{x}^0)$ negativ semidefinit für alle $\mathbf{x}^0 \in D \Leftrightarrow f$ konkav.

Beispiele:

- $f(\mathbf{x}) = x_1^2 + 4(x_2 - 1)^2 + 3$ mit $H_f(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 8 \end{pmatrix}$ für alle $\mathbf{x}^0 \in \mathbb{R}^2$
  positiv definit$\Rightarrow f$ streng konvex.
- $p(\mathbf{x}) = x_1^2 + x_2^2 - 3x_1x_2$ mit $H_p(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix} 2 & -3 \\ -3 & 2 \end{pmatrix}$ für alle $\mathbf{x}^0 \in \mathbb{R}^2$
  indefinit $\Rightarrow p$ weder konvex noch konkav.
- $u(\mathbf{x}) = x_1^{0.8} x_2^{0.2}$ mit $H_u(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix} -0.16 & 0.16 \\ 0.16 & -0.16 \end{pmatrix}$ für $\mathbf{x}^0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$
  negativ semidefinit $\Rightarrow u$ konkav.



Globale Extrema

Definition 9.4.1: Supremum, Infimum und globale Extrema

Sei $f : D \to Z$. Ist $f(D)$ beschränkt

Supremum

- nach oben, ist $\sup\limits_{\mathbf{x}\in D} f(\mathbf{x}) = \sup f(D)$, sonst $\sup\limits_{\mathbf{x}\in D} f(\mathbf{x}) = +\infty$

Infimum

- nach unten, ist $\inf\limits_{\mathbf{x}\in D} f(\mathbf{x}) = \inf f(D)$, sonst $\inf\limits_{\mathbf{x}\in D} f(\mathbf{x}) = -\infty$.

Gibt es ein

Globale Maximal-/ Extremalstelle

Globales Maximum/ Extremum

- $\mathbf{x}^{\max} \in D$ mit $f(\mathbf{x}^{\max}) \geq f(\mathbf{x})\ \forall \mathbf{x} \in D$, dann ist $\max\limits_{\mathbf{x}\in D} f(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}^{\max})$;
- $\mathbf{x}^{\min} \in D$ mit $f(\mathbf{x}^{\min}) \leq f(\mathbf{x})\ \forall \mathbf{x} \in D$, dann ist $\min\limits_{\mathbf{x}\in D} f(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}^{\min})$.

Globale Minimal-/ Extremalstelle

Globales Minimum/ Extremum

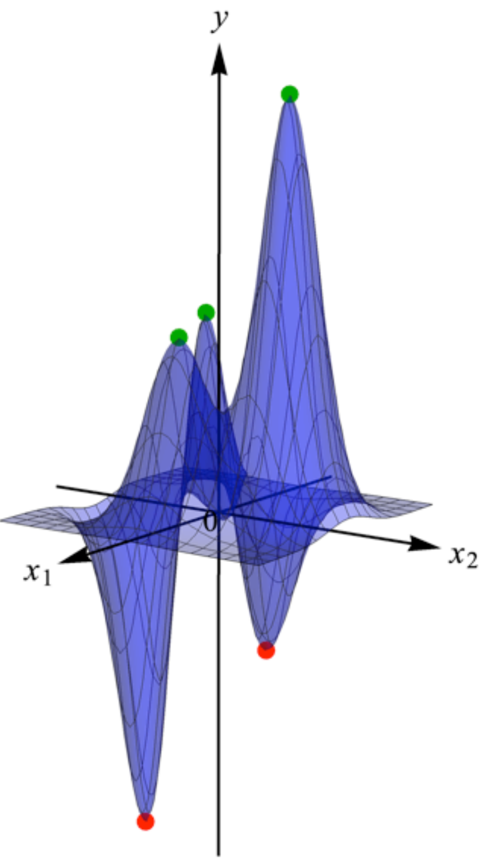
Die Menge aller globalen Maximal- bzw. Minimalstellen ist
$\arg\max\limits_{\mathbf{x}\in D} f(\mathbf{x})$ bzw. $\arg\min\limits_{\mathbf{x}\in D} f(\mathbf{x})$.

Satz 9.4.3: Min-Max Dualität

Existiert das globale Maximum bzw. Minimum von f, so gilt

$$\min_{\mathbf{x}\in D}(-f(\mathbf{x})) = -\max_{\mathbf{x}\in D} f(\mathbf{x}) \quad \text{bzw.} \quad \max_{\mathbf{x}\in D}(-f(\mathbf{x})) = -\min_{\mathbf{x}\in D} f(\mathbf{x}).$$

Lokale Extrema



Definition 9.4.2: Lokale Extrema und Extremalstellen

Lokale Maximalstelle

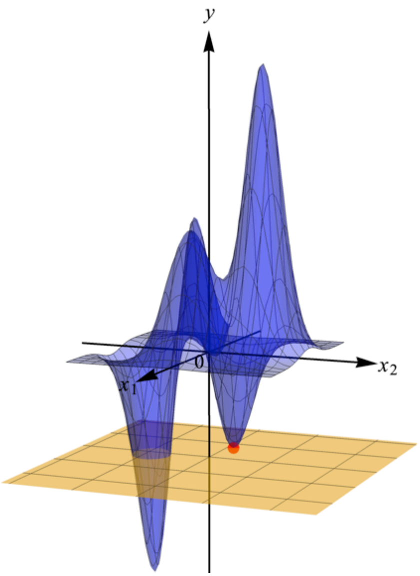
$f: D \to Z$ hat in $\mathbf{x}^0 \in D$ ein lokales Maximum $f(\mathbf{x}^0)$, falls ein $\varepsilon > 0$ existiert mit $f(\mathbf{x}^0) \geq f(\mathbf{x})$ für alle $\mathbf{x} \in U(\mathbf{x}^0, \varepsilon) \cap D$.

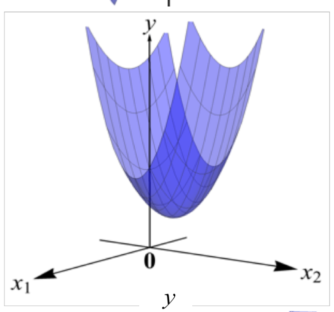
Lokale Minimalstelle

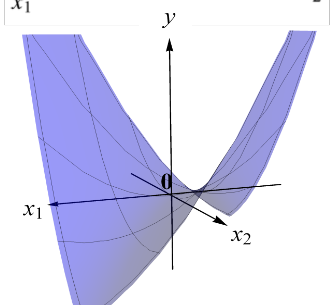
$f: D \to Z$ hat in $\mathbf{x}^0 \in D$ ein lokales Minimum $f(\mathbf{x}^0)$, falls ein $\varepsilon > 0$ existiert mit $f(\mathbf{x}^0) \leq f(\mathbf{x})$ für alle $\mathbf{x} \in U(\mathbf{x}^0, \varepsilon) \cap D$.

Ein lokales Extremum ist ein lokales Maximum oder Minimum, eine lokale Extremalstelle ist eine lokale Minimal- oder Maximalstelle.

Notwendiges Kriterium 1. Ordnung







Satz 9.4.1: Notwendiges Kriterium erster Ordnung (Fermat)

Ist D offen und $f : D \to Z$ stetig partiell differenzierbar, dann gilt:
$\mathbf{x}^0 \in D$ lokale Extremalstelle $\Rightarrow \nabla f(\mathbf{x}^0) = \mathbf{0}$.

Definition 9.4.3: Stationäre Stelle

Gilt $\nabla f(\mathbf{x}^0) = \mathbf{0}$, nennt man $\mathbf{x}^0$ eine stationäre Stelle.

Beispiele:

- $f(\mathbf{x}) = x_1^2 + 4(x_2 - 1)^2 + 3$

  $$\nabla f(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix} 2x_1^0 \\ 8(x_2^0 - 1) \end{pmatrix}$$

  $$\Rightarrow \text{Stationäre Stelle } \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

- $p(\mathbf{x}) = x_1^2 + x_2^2 - 3x_1x_2$

  $$\nabla p(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix} 2x_1^0 - 3x_2^0 \\ 2x_2^0 - 3x_1^0 \end{pmatrix}$$

  $$\Rightarrow \text{Stationäre Stelle } \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \mathbf{0}$$

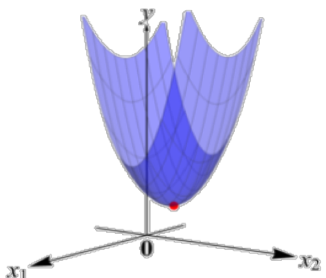
Positiv definit → Min

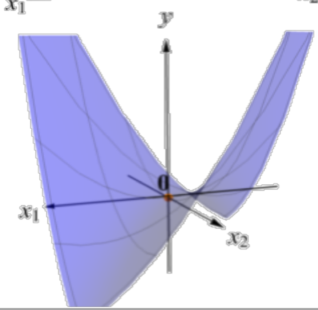
Positiv semi-definite Matrizen

Indefinit → Sattelpunkt

Negativ semi-definite Matrizen

Negativ definit → Max





Hinreichende Kriterien 2. Ordnung

Definition 9.4.4: Sattelpunkt

Ist $\mathbf{x}^0$ eine stationäre Stelle, an der kein lokales Extremum vorliegt, dann spricht man von einem Sattelpunkt an der Stelle $\mathbf{x}^0$.

Satz 9.4.2: Hinreichende Kriterien 2. Ordnung

Ist D offen, $f : D \to Z$ zweimal stetig partiell differenzierbar, $\mathbf{x}^0 \in D$ und $\nabla f(\mathbf{x}^0) = \mathbf{0}$, dann gilt:

- $H_f(\mathbf{x}^0)$ positiv definit $\Rightarrow$ f hat in $\mathbf{x}^0$ ein lokales Minimum;
- $H_f(\mathbf{x}^0)$ negativ definit $\Rightarrow$ f hat in $\mathbf{x}^0$ ein lokales Maximum;
- $H_f(\mathbf{x}^0)$ ist indefinit $\Rightarrow$ f hat in $\mathbf{x}^0$ einen Sattelpunkt.

Beispiele:

- $f(\mathbf{x}) = x_1^2 + 4(x_2 - 1)^2 + 3, \quad \nabla f\begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix} = \mathbf{0}$

  $H_f\begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}2 & 0\\0 & 8\end{pmatrix}$ positiv definit $\Rightarrow$ lokales Minimum

- $p(\mathbf{x}) = x_1^2 + x_2^2 - 3x_1x_2, \qquad \nabla p\begin{pmatrix}0\\0\end{pmatrix} = \mathbf{0}$

  $H_p\begin{pmatrix}0\\0\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}2 & -3\\-3 & 2\end{pmatrix}$ indefinit $\Rightarrow$ Sattelpunkt

Notwendige Kriterien 2. Ordnung

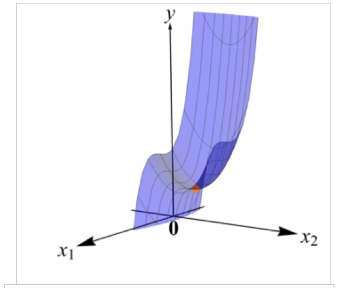
Positiv definit → Min

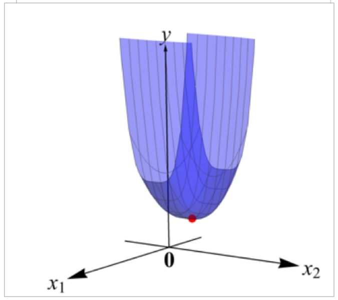
Positiv semi-definit → Min oder Sattelpunkt*

Indefinit → Sattelpunkt

Negativ semi-definit → Max oder Sattelpunkt*

Negativ definit → Max





Satz 9.4.5: Notwendige Kriterien 2. Ordnung

Ist D offen, $f : D \to Z$ zweimal stetig partiell differenzierbar, $\mathbf{x}^0 \in D$ und $\nabla f(\mathbf{x}^0) = \mathbf{0}$, dann gilt:

- $\mathbf{x}^0$ lokale Minimalstelle $\Rightarrow H_f(\mathbf{x}^0)$ positiv semidefinit.
- $\mathbf{x}^0$ lokale Maximalstelle $\Rightarrow H_f(\mathbf{x}^0)$ negativ semidefinit.

Beispiele:

- $\tilde{f}(\mathbf{x}) = x_1^2 + 4(x_2-1)^3 + 3$

$$\nabla \tilde{f}(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix} 2x_1^0 \\ 12(x_2^0-1)^2 \end{pmatrix} \quad \Rightarrow \text{Stationäre Stelle } \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$H_{\tilde{f}}(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 24(x_2^0-1) \end{pmatrix}, \quad H_{\tilde{f}}\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ positiv semidefinit } \Rightarrow \,?$$

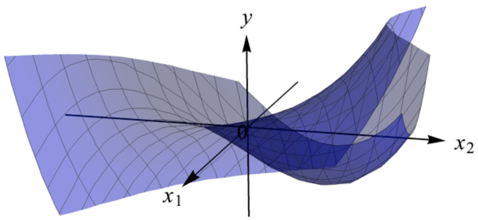
- $\hat{f}(\mathbf{x}) = x_1^2 + 4(x_2-1)^4 + 3$

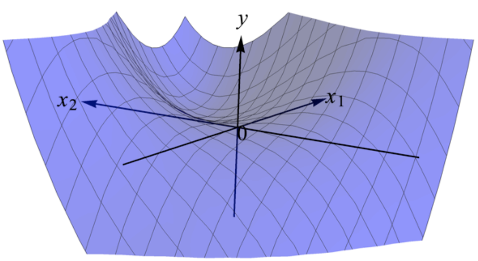
$$\nabla \hat{f}(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix} 2x_1^0 \\ 16(x_2^0-1)^3 \end{pmatrix} \quad \Rightarrow \text{Stationäre Stelle } \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

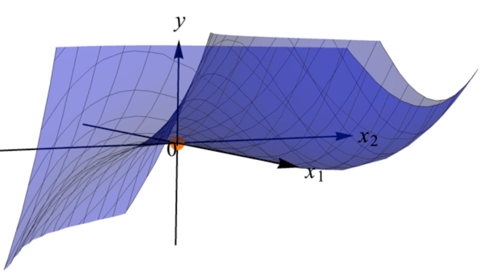
$$H_{\hat{f}}(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 48(x_2^0-1)^2 \end{pmatrix}, H_{\hat{f}}\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ positiv semidefinit } \Rightarrow \,?$$

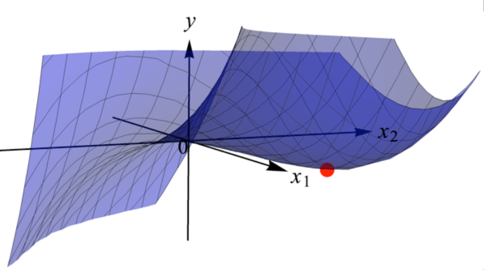
* Ist $H_f(\mathbf{x}^0)$=Nullmatrix, kann max, min oder Sattelpunkt vorliegen

Beispiel einer Funktion mit zwei stationären Stellen









Beispiel:

- $q(\mathbf{x}) = x_1^3 + x_2^3 - 3x_1x_2$

  $$\nabla q(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix} 3(x_1^0)^2 - 3x_2^0 \\ 3(x_2^0)^2 - 3x_1^0 \end{pmatrix} \quad \Rightarrow \text{Stationäre Stellen } \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ und } \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

  $$H_q(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix} 6x_1^0 & -3 \\ -3 & 6x_2^0 \end{pmatrix}$$

  $$\text{An der Stelle } \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}: H_q\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -3 \\ -3 & 0 \end{pmatrix}$$

  $$\text{indefinit} \Rightarrow \text{Sattelpunkt an der Stelle } \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

  $$\text{An der Stelle } \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}: H_q\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6 & -3 \\ -3 & 6 \end{pmatrix}$$

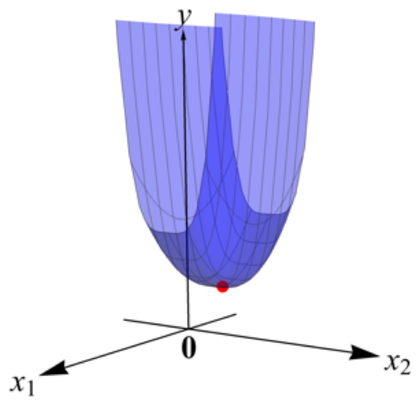
  $$\text{positiv definit} \Rightarrow \text{Minimum an der Stelle } \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Globale Extrema konvexer Funktionen

Satz 9.4.6: Globale Extrema konvexer und konkaver Funktionen

Ist D offen, konvex und $f : D \to Z$ stetig partiell differenzierbar:

- Ist f konvex, gilt: $\mathbf{x}^0 \in D$ globale Minimalstelle $\Leftrightarrow \nabla f(\mathbf{x}^0) = \mathbf{0}$;
- Ist f konkav, gilt: $\mathbf{x}^0 \in D$ globale Maximalstelle $\Leftrightarrow \nabla f(\mathbf{x}^0) = \mathbf{0}$.



Beispiel:

- $\hat{f}(\mathbf{x}) = x_1^2 + 4(x_2 - 1)^4 + 3$

$$\nabla \hat{f}(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix} 2x_1^0 \\ 16(x_2^0 - 1)^3 \end{pmatrix} \quad \Rightarrow \text{Stationäre Stelle} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$H_{\hat{f}}(\mathbf{x}^0) = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 48(x_2^0 - 1)^2 \end{pmatrix}$$

Für alle $\mathbf{x}^0 \in \mathbb{R}^2$ gilt: $\det(H_{\hat{f}}(\mathbf{x}^0) - \lambda I) = (2 - \lambda)(48(x_2^0 - 1)^2 - \lambda)$

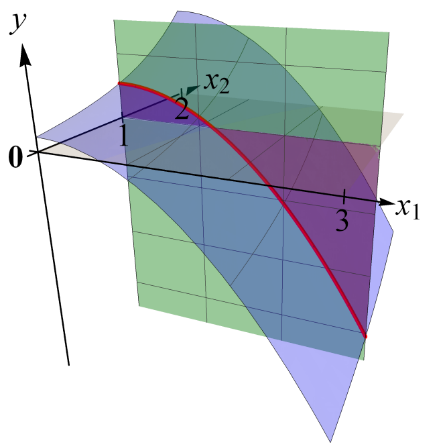
$$\Rightarrow \lambda_1 = 2 > 0,\ \lambda_2 = 48(x_2^0 - 1)^2 \geq 0$$

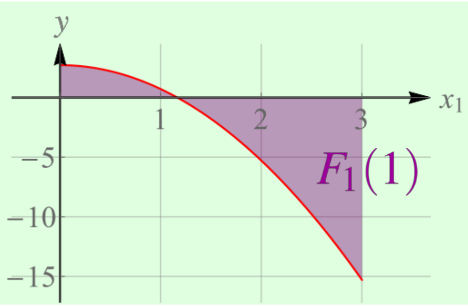
$\Rightarrow$ Hesse-Matrix positiv semidefinit, $\mathbf{r}^T H_{\hat{f}}(\mathbf{x}^0)\mathbf{r} \geq 0$, für alle $\mathbf{x}^0$

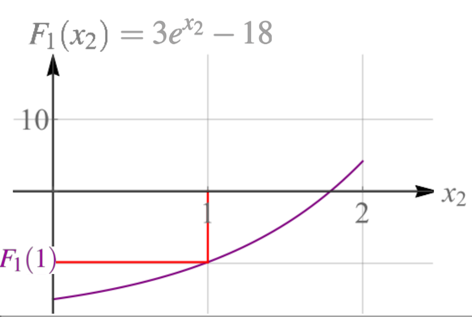
$\Rightarrow \hat{f}$ konvex

$\Rightarrow$ Stationäre Stelle ist globale Minimalstelle

Doppelintegrale







Definition 9.5.1: Parameterintegrale

Sei $f : [a_1, b_1] \times [a_2, b_2] \to \mathbb{R}$ stetig,

$$F_1(x_2) = \int_{a_1}^{b_1} f(\mathbf{x}) dx_1, \qquad F_2(x_1) = \int_{a_2}^{b_2} f(\mathbf{x}) dx_2.$$

(Parameter-)Integral von f über x_1 (für festes x_2)

(Parameter-)Integral von f über x_2 (für festes x_1)

Beispiel:

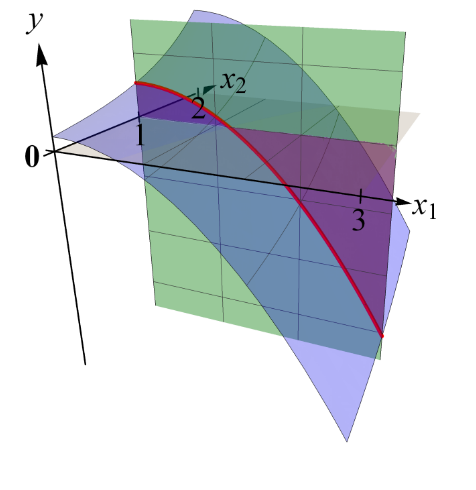
- $f : [0, 3] \times [0, 2] \to \mathbb{R}$ mit $f(\mathbf{x}) = -2x_1^2 + e^{x_2}$

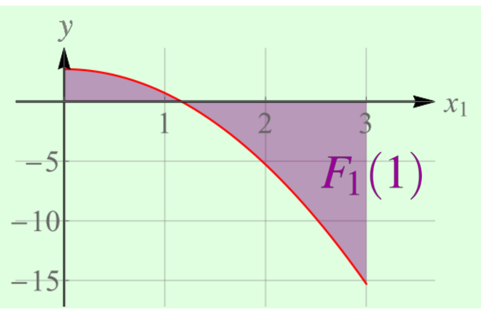
$$F_1(x_2) = \int_0^3 -2x_1^2 + e^{x_2} dx_1$$

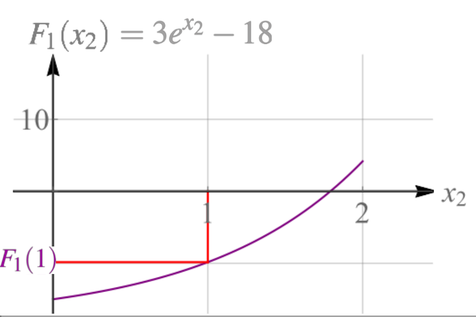
$$= \left[\frac{-2}{3} x_1^3 + x_1 e^{x_2} \right]_0^3$$

$$= -18 + 3e^{x_2} - 0 = 3e^{x_2} - 18.$$

Doppelintegrale







Definition 9.5.2 und Satz 9.5.1: Doppelintegrale

Sei $f : [a_1, b_1] \times [a_2, b_2] \to \mathbb{R}$ stetig,

$$\int_{a_2}^{b_2} F_1(x_2)dx_2 = \int_{a_2}^{b_2} \left(\int_{a_1}^{b_1} f(\mathbf{x})dx_1 \right) dx_2 =$$

$$\int_{a_1}^{b_1} F_2(x_1)dx_1 = \int_{a_1}^{b_1} \left(\int_{a_2}^{b_2} f(\mathbf{x})dx_2 \right) dx_1$$

Doppelintegral der Funktion f über $[a_1, b_1] \times [a_2, b_2]$

Beispiel:

- $f : [0,3] \times [0,2] \to \mathbb{R}$ mit $f(\mathbf{x}) = -2x_1^2 + e^{x_2}$

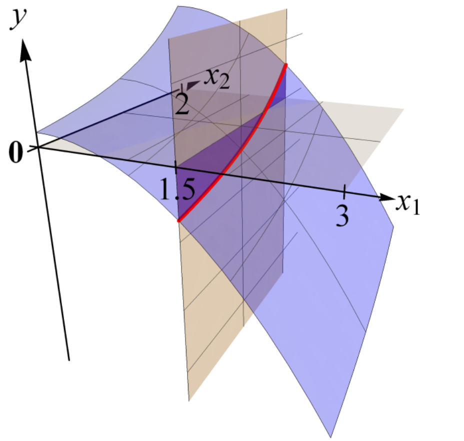
$$\int_0^2 \underbrace{\int_0^3 (-2x_1^2 + e^{x_2})dx_1}_{F_1(x_2)} \, dx_2$$

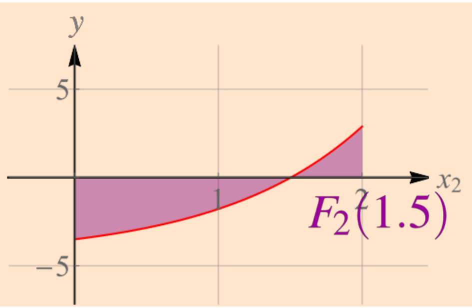
$$= \int_0^2 (3e^{x_2} - 18)dx_2$$

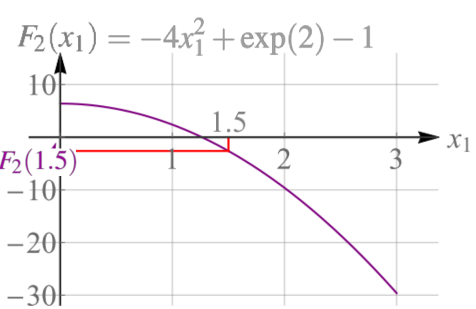
$$= \left[3e^{x_2} - 18x_2\right]_0^2$$

$$= 3e^2 - 18 \cdot 2 - 3e^0 + 0 = 3e^2 - 39$$

Doppelintegrale







Beispiel:

- $f : [0,3] \times [0,2] \to \mathbb{R}$ mit $f(\mathbf{x}) = -2x_1^2 + e^{x_2}$

$$F_2(x_1) = \int_0^2 -2x_1^2 + e^{x_2} dx_2 \qquad = \left[-2x_1^2 x_2 + e^{x_2}\right]_0^2$$

$$= -2x_1^2 \cdot 2 + e^2 - 1 = -4x_1^2 + e^2 - 1$$

$$\int_0^3 \int_0^2 (-2x_1^2 + e^{x_2}) dx_2 \; dx_1$$

$$= \int_0^3 (-4x_1^2 + e^2 - 1) dx_1 = \left[-4\frac{x_1^3}{3} + x_1 e^2 - x_1\right]_0^3$$

$$= -4\frac{3^3}{3} + 3e^2 - 3 + 4\frac{0^3}{3} - 0e^2 + 0$$

$$= 3e^2 - 39$$

$$= \int_0^2 \int_0^3 (-2x_1^2 + e^{x_2}) dx_1 \; dx_2$$

Ein (unvollständiger) Rückblick

- Eine reelle Funktion $f : D \to Z$ in n Variablen bildet $D \subseteq \mathbb{R}^n$ auf $f(D) \subseteq Z \subseteq \mathbb{R}$ ab.
- Der Gradient einer partiell differenzierbaren Funktion f an der Stelle $\mathbf{x}^0$ ist ein Spaltenvektor, welcher alle partiellen Ableitungen an der Stelle enthält. Ist f zweimal partiell differenzierbar, ist die Hesse-Matrix an der Stelle $\mathbf{x}^0$ die Matrix aller zweiten partiellen Ableitungen.
- Ob eine symmetrische Matrix A positiv oder negativ (semi-)definit ist, kann mithilfe des Vorzeichens von $\mathbf{x}^T A\mathbf{x}$, mithilfe der Eigenwerte von A und ggf. mithilfe der Hauptunterdeterminanten entschieden werden.
- Ist die Hesse-Matrix an allen Stellen des Definitionsbereichs positiv bzw. negativ semidefinit, ist die Funktion f konvex bzw. konkav.
- An einer stationäre Stelle $\mathbf{x}^0$ gilt $\nabla f(\mathbf{x}^0) = \mathbf{0}$. Ist $f : D \to Z$ stetig partiell differenzierbar mit $D \subseteq R^n$ offen, dann ist jedes lokale Extremum eine stationäre Stelle.
- Ist f zweimal stetig partiell differenzierbar auf einem offenen Definitionsbereich D, und ist die Hesse-Matrix an einer stationären Stelle positiv bzw. negativ definit, so befindet sich an der stationären Stelle ein lokales Minimum bzw. Maximum.