

Konvergenz

Eine Funktion $f : U \rightarrow \mathbb{R}^m$ heißt stetig in $a \in U$, wenn für alle Folgen $x_n \in U$ mit $x_n \rightarrow a$ die Folge $f(x_n)$ gegen $f(a)$ konvergiert. Dies ist gleichbedeutend damit, dass für jedes $\epsilon > 0$ ein $\delta > 0$ existiert, so dass $d(f(x), L_a) < \epsilon$ gilt für jedes x mit $d(x, a) < \delta$.

Stetigkeit

Eine Funktion $f : U \rightarrow \mathbb{R}^m$ heißt stetig, wenn sie für alle $a \in U$ stetig ist.

Mehrdimensionale Differentialrechnung

Limes

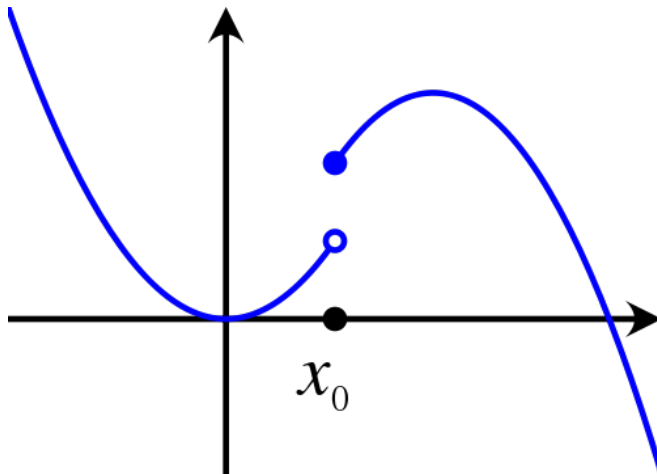


Figure: Quelle: Wikipedia:

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Upper_semi.svg

Landau Notation

Für eine Funktion $g : U \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ bezeichnen wir die Wachstumsklasse

$$o(g) := \{f : U \rightarrow \mathbb{R} \mid \lim_{x \rightarrow a} \frac{|f(x)|}{|g(x)|} = 0 \forall a \in U\}$$

$$O(g) := \{f : U \rightarrow \mathbb{R} \mid \lim_{x \rightarrow a} \frac{|f(x)|}{|g(x)|} < \infty \forall a \in U\}$$

Lokale Linearisierung

Eine Funktion $f : U \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ heisst differenzierbar in $a \in U$ falls es eine lineare Funktion $df(a) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ gibt mit

$$f(a + h) = f(a) + df(a)h + o(\|h\|) \quad (1)$$

$$\Leftrightarrow \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(a + h) - f(a) - df(a)h}{\|h\|} = 0 \quad (2)$$

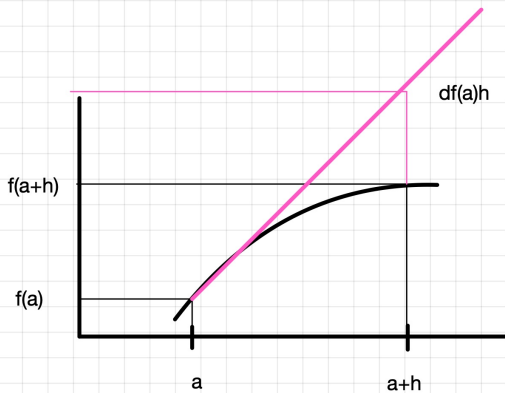
für alle $h \in \mathbb{R}^n$

Bedeutung

Eine differenzierbare Funktion kann auf hinreichend kleinen Umgebungen beliebig genau durch eine lineare Funktion approximiert werden.

Mehrdimensionale Differentialrechnung

Limes



Eindeutigkeit

Die lineare Abbildung $df(a)$ ist eindeutig bestimmt.

Beweis

Ist $df'(a)$ eine weitere Abbildung mit Eigenschaft (1), so gilt für jeden Basisvektor e_i

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(a + te_i) - f(a) - df(a)h}{\|te_i\|} = 0 \quad (3)$$

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(a + te_i) - f(a) - df'(a)h}{\|te_i\|} = 0 \quad (4)$$

$$\Rightarrow (df(a) - df'(a))(e_i) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{(df(a) - df'(a))(te_i)}{\|te_i\|} = 0 \quad (5)$$

Beispiel

$$A \in \mathbb{R}^{n \times m}, b \in \mathbb{R}^n$$

$$f(x) := A \cdot x + b \quad (6)$$

$$df(a) := A \quad (7)$$

Beweis

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{A(x+h) - A \cdot x - A \cdot h}{||h||} = \quad (8)$$

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{A \cdot x + A \cdot h - A \cdot x - A \cdot h}{||h||} = 0 \quad (9)$$

Ab Jetzt

Der Fall $m = 1$. Wir betrachten also Funktionen $f : U \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$

Ableitung

Ist f differenzierbarer in U , so gilt wegen der Linearität

$$df(a)h = \sum_{i=1}^n (df(a)e_i) \cdot h_i \quad (10)$$

wobei (e_1, \dots, e_n) die Standardbasis des \mathbb{R}^n ist. Die einzeilige Matrix

$$f'(a) := (df(a)e_1, \dots, df(a)e_n) \quad (11)$$

heißt Ableitung von f in a .

Richtungsableitung

Sei $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion. Für einen Vektor $h \in \mathbb{R}^n$ und einen Punkt $a \in U$ heißt der Grenzwert (falls er existiert)

$$\partial_h f(a) := \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(a + th) - f(a)}{t}$$

Richtungsableitung von f am Punkt a in Richtung h . Sie misst die Änderung der Funktion in Richtung h .

Speziell nennen wir für die Standard Basisvektoren e_i

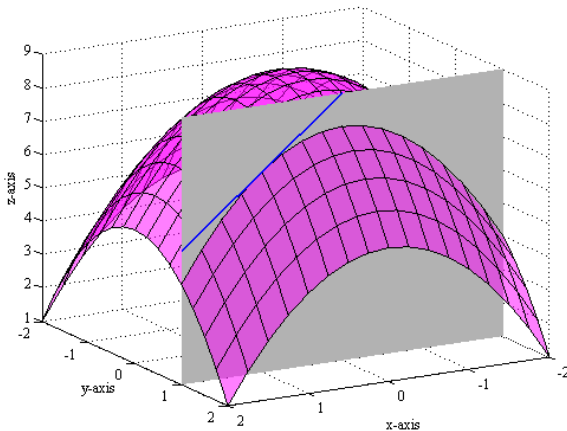
$$\frac{\partial f(a)}{\partial x_i} := \partial_{e_i} f(a) := \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(a + te_i) - f(a)}{t}$$

die partielle Ableitung von f in a nach x_i .

Mehrdimensionale Differentialrechnung

Limes

The tangent line in the direction of x .



Partielle Differenzierbarkeit

Eine Funktion $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ heißt partiell differenzierbar im Punkt $a \in U$, falls alle partiellen Ableitungen

$$\frac{\partial f(a)}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial f(a)}{\partial x_n}$$

existieren.

Beispiel

Beispiel

Ist eine Funktion f in a differenzierbar, so ist sie dort partiell differenzierbar und es gilt

$$df(a)h = f'(a)h = \sum_{i=1}^n \partial_i f(a) \cdot h_i$$
$$f'(a) = (\partial_1 f(a), \dots, \partial_n f(a))$$

Beweis

Ist f differenzierter, so gilt für $t \in \mathbb{R}$ und $h \in \mathbb{R}^n$

$$f(a + th) = f(a) + df(a)th + R(||th||)$$

$$\lim_{th \rightarrow 0} \frac{||R(th)||}{||th||} = 0$$

$$\Rightarrow \lim_{t \rightarrow 0} \frac{||R(th)||}{||th||} = 0 \Rightarrow \lim_{t \rightarrow 0} \frac{||R(th)||}{|t|} = 0$$

$$\Rightarrow df(a)h = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(a + th) - f(a)}{|t|} = \partial_h f(a)$$

$$\Rightarrow df(a)e_i = \partial_i f(a)$$

Differenzierbarkeits Kriterium

Eine Funktion $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ ist differenzierbar im Punkt $a \in U$, falls alle partiellen Ableitungen

$$\frac{\partial f(a)}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial f(a)}{\partial x_n}$$

existieren und stetig sind.

Mehrdimensionale Differentialrechnung

Vorwissen über eindimensionale Funktionen

Mittelwertsatz einer Veränderlichen

Sei $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ stetig und differenzierbar für alle $x \in (a, b)$.

Dann gibt es $\xi \in (a, b)$ mit $f'(\xi) = \frac{f(b)-f(a)}{b-a}$.

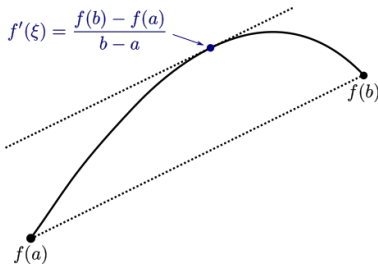


Figure: Quelle: Wikipedia:

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mittelwertsatz3.svg>

Beweis

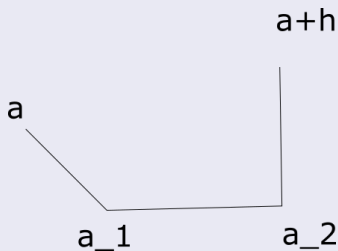


Figure: Kantenzug mit achsenparallelen Kanten

Beweis

$$a_0 := a$$

$$a_i := a_{i-1} + h_i e_i; \quad i = 1, \dots, n$$

Beweis

- $f(a+h) - f(a) = \sum_{i=1}^n (f(a_i) - f(a_{i-1}))$

Beweis

- $f(a+h) - f(a) = \sum_{i=1}^n (f(a_i) - f(a_{i-1}))$
- Mit $\varphi_i(t) := f(a_i + te_i)$ gilt $f(a_i) - f(a_{i-1}) = \varphi_i(h_i) - \varphi_i(0)$

Beweis

- $f(a + h) - f(a) = \sum_{i=1}^n (f(a_i) - f(a_{i-1}))$
- Mit $\varphi_i(t) := f(a_i + te_i)$ gilt $f(a_i) - f(a_{i-1}) = \varphi_i(h_i) - \varphi_i(0)$
- Mittelwertsatz einer Veränderlichen: Es gibt τ_i mit

$$\varphi_i(h_i) - \varphi_i(0) = h_i \varphi'(\tau_i) .$$

Beweis

- $f(a + h) - f(a) = \sum_{i=1}^n (f(a_i) - f(a_{i-1}))$
- Mit $\varphi_i(t) := f(a_i + te_i)$ gilt $f(a_i) - f(a_{i-1}) = \varphi_i(h_i) - \varphi_i(0)$
- Mittelwertsatz einer Veränderlichen: Es gibt τ_i mit

$$\varphi_i(h_i) - \varphi_i(0) = h_i \varphi'_i(\tau_i) .$$

•

$$f(a + h) - f(a) - df(a) \cdot h = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f(\xi_i)}{\partial x_i} - \frac{\partial f(a)}{\partial x_i} \right) h_i$$

Da $\varphi'_i(t) = \frac{\partial f(a_{i-1} + te_i)}{\partial x_i}$ und mit $\xi_i := a_i + \tau_i e_i$

Beweis

$$|f(a+h) - f(a) - df(a) \cdot h| \leq \|h\|_\infty \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f(\xi)}{\partial x_i} - \frac{\partial f(a)}{\partial x_i} \right|.$$

Für $h \rightarrow 0$ gilt $\xi_i \rightarrow a$ und da die partiellen Ableitung stetig sind nach Voraussetzung und alle Normen äquivalent sind folgt

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(a+h) - f(a) - df(a) \cdot h}{\|h\|} = 0$$

Eigenschaften des Differentials

Für das Differential einer differenzierbaren Funktion $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ gilt für alle $a \in U$:

- $df(a) \cdot h = \partial_h f(a).$
- $d(f \cdot g)(a) = gdf(a) + f(a)dg$
- $d(f + g)(a) = df(a) + dg(a)$

Beweis

- Für die Basisvektoren ist per Definition $df(a) \cdot e_i = \partial_{e_i} f(a)$. Da jeder Vektor h eine Linearkombination der Basisvektoren ist und df linear ist, folgt die Behauptung.
- Folgt direkt aus der entsprechenden Eigenschaft reeller Funktionen.
- Folgt direkt aus der entsprechenden Eigenschaft reeller Funktionen.

Gradient

Der Vektor

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

wird als Gradient bezeichnet. Es ist $df(a) \cdot h = \langle \nabla f(a), h \rangle$.



Gradient

Sei $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ differenzierbare Funktion, $a \in U$ und $v := \operatorname{argmax}_{\|h\|=1} \{\partial_h f(a)\}$. Dann gilt

$$\|\nabla f(a)\|_v = \nabla f(a) .$$

Gradient

Der Gradient zeigt in die Richtung des steilsten Anstiegs.

Beweis

Für beliebiges h gilt

$$\partial_h f(a) = df(a)h = \langle \nabla f(a), h \rangle = \|\nabla f(a)\| \cdot \|h\| \cdot \cos(\varphi)$$

wobei φ den Innenwinkel zwischen $\nabla f(a)$ und h bezeichnet. Für $\|h\| = 1$ wird somit $\partial_h f(a)$ maximal, wenn $\varphi = 0$ und somit $h = \frac{\nabla f(a)}{\|\nabla f(a)\|}$ ist.