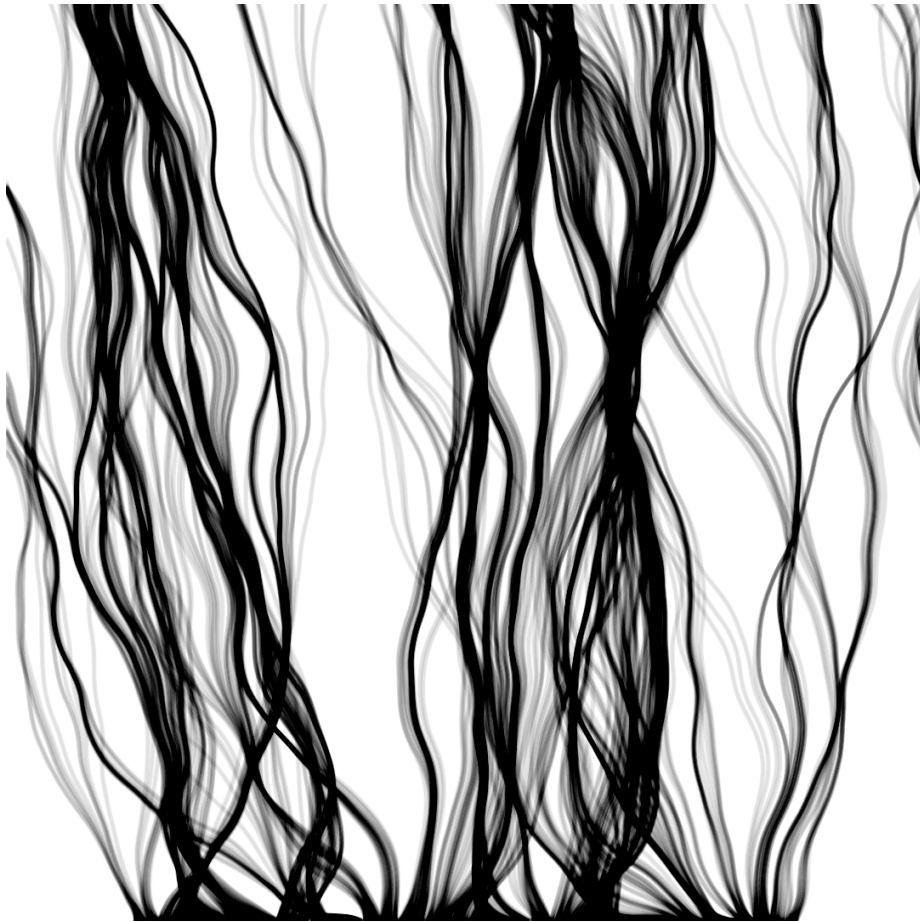


# Angewandte Mathematik

Dr. Johannes Riesterer

5. Oktober 2020



©Johannes Riesterer

## Vorwort

Kann jeder Mathematik lernen? Als Antwort auf diese Frage möchte ich auf den interessanten Lebenslauf einer der bedeutendsten Mathematikerinnen aller Zeiten eingehen (Auszug aus Wikipedia):

Emmy Noether war eine deutsche Mathematikerin, die grundlegende Beiträge zur abstrakten Algebra und zur theoretischen Physik lieferte. Insbesondere hat Noether die Theorie der Ringe, Körper und Algebren revolutioniert. Das nach ihr benannte Noether-Theorem gibt die Verbindung zwischen Symmetrien von physikalischen Naturgesetzen und Erhaltungsgrößen an.

Sie zeigte in mathematischer Richtung keine besondere Frühreife, sondern hatte in ihrer Jugend Interesse an Musik und Tanzen. Sie besuchte die Städtische Höhere Töchterschule – das heutige Marie-Therese-Gymnasium – in der Schillerstraße in Erlangen. Mathematik wurde dort nicht intensiv gelehrt. Im April 1900 legte sie die Staatsprüfung zur Lehrerin der englischen und französischen Sprache an Mädchenschulen in Ansbach ab. 1903 holte sie in Nürnberg die externe Abiturprüfung am Königlichen Realgymnasium – dem heutigen Willstätter-Gymnasium – nach.

# Inhaltsverzeichnis

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Vorwissen und Konventionen</b>                                | <b>5</b>  |
| <b>2</b> | <b>Mehrdimensionale Differentialrechnung</b>                     | <b>7</b>  |
| 2.1      | Richtungsableitung und Gradient reellwertiger Funktionen . . . . | 8         |
| 2.2      | Lokale Maxima und Minima . . . . .                               | 16        |
| 2.3      | Gradient einer mehrdimensionalen Funktion . . . . .              | 20        |
| <b>3</b> | <b>Mehrdimensionale Integralrechnung</b>                         | <b>20</b> |
| 3.1      | Lebesgue Maß . . . . .   | 20        |
| 3.2      | Lebesgue Integral . . . . .                                      | 20        |
|          | <b>Tabellenverzeichnis</b>                                       | <b>21</b> |
|          | <b>Abbildungsverzeichnis</b>                                     | <b>22</b> |

# 1 Vorwissen und Konventionen

## Differenzierbarkeit reeller Funktionen

Eine reelle Funktion  $f : (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$  heißt differenzierbar in  $x \in (a, b)$ , falls der Grenzwert  $\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h}$  existiert. In diesem Fall heißt dieser Grenzwert die Ableitung (Steigung) von  $f$  in  $x$  und wird mit  $f'(x)$  bezeichnet.

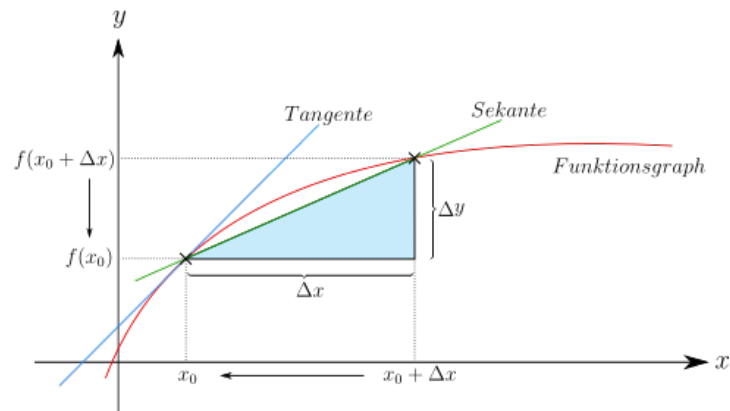


Abbildung 1: Quelle: Wikipedia: [https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Differential\\_quotient\\_of\\_a\\_function.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Differential_quotient_of_a_function.svg)

## 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  $f'(\xi) = \frac{f(b) - f(a)}{b - a}$ .

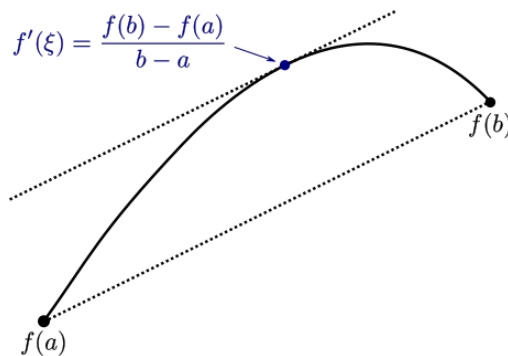


Abbildung 2: Quelle: Wikipedia: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mittelwertsatz3.svg>

### Taylorapproximation einer Veränderlichen

Jede reelle Funktion  $f$ , deren  $p + 1$ -ten Ableitungen existieren und stetig sind lässt sich mit Hilfe der Taylorreihe

$$f(x) = f(a) + \frac{1}{2!} f'(x-a) + \frac{1}{3!} f''(a)(x-a)^2 + \dots + \frac{1}{p!} f^{(p)}(a)(x-a)^{p-1} + R_{p+1}(x, a)$$

und dem Restglied  $R_p(x, a) := \frac{1}{(p+1)!} f^{(p+1)}(\xi)(x-a)^p$  mit einem  $\xi \in (x, a)$  darstellen.

### Cauchy-Schwarzsche Ungleichung

Für zwei Vektoren  $v, w \in \mathbb{R}^n$  gilt:

$$\frac{\langle v, w \rangle}{\|v\| \cdot \|w\|} = \cos(\varphi)$$

wobei  $\varphi$  der Innenwinkel zwischen  $v$  und  $w$  ist.

### Äquivalenz von Normen

Die Normen  $\|v\| := \sqrt{\sum_{i=1}^n v_i^2}$  und  $\|v\|_\infty := \max\{v_1, \dots, v_n\}$  sind Äquivalent. Sie lassen sich mit Konstanten  $k_1 \|v\| < \|v\|_\infty k_2 \|v\|$  gegeneinander abschätzen.

### Symmetrische Matrizen

Für eine symmetrische Matrix  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$  ist Äquivalent:

- $A$  hat positive Eigenwerte.
- $v^T A v > 0$  für alle  $v \neq 0$ .
- alle Unterdeterminanten sind positiv. Speziell für  $n = 2$  und  $A = \begin{pmatrix} a & b \\ b & d \end{pmatrix}$  bedeutet dies  $a > 0$  und  $ad - b^2 > 0$ .

**Definition 1** (Konventionen). In diesem Abschnitt ist  $U \subset \mathbb{R}^n$  stets eine offene

Teilmenge des  $\mathbb{R}^n$ .  $e_i := \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1(i\text{-te Zeile}) \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$  bezeichnet den  $i$ -ten Basisvektor des  $\mathbb{R}^n$ .

## 2 Mehrdimensionale Differentialrechnung

**Definition 2** (Konvergenz). Eine Folge  $(a_n)$  in  $\mathbb{R}^n$  heißt konvergent gegen den Grenzwert  $a \in \mathbb{R}^n$ , wenn gilt:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N} \forall n > N : d(a, a_n) < \varepsilon$$

in Worten: Es gibt für jedes beliebige (noch so kleine)  $\varepsilon$  einen Index  $N$  derart, dass für alle Indizes  $n > N$ , alle weiteren Folgenglieder, gilt: der Abstand  $d(a, a_n)$  ist kleiner als  $\varepsilon$ .

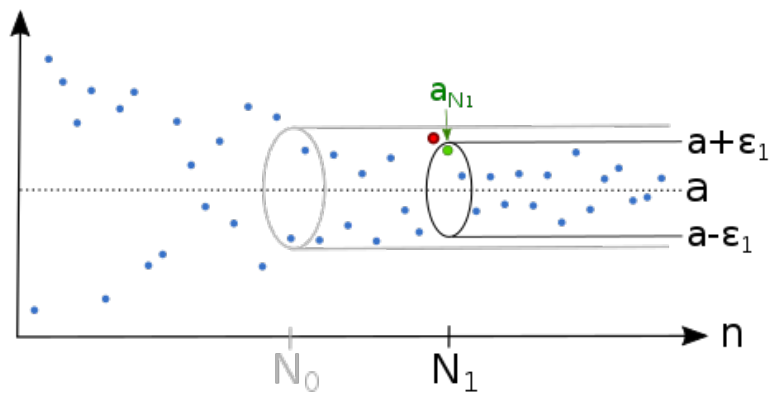


Abbildung 3: Quelle: Wikipedia: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Epsilonschlauch\\_klein.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Epsilonschlauch_klein.svg)

**Definition 3** (Grenzwert). Sei  $f : X \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  eine Funktion und  $a \in X$ . Wir nennen  $L_a \in \mathbb{R}^m$  Grenzwert von  $f$  bezüglich der Annäherung von  $x$  an  $a$ , falls für jede konvergente Folge  $x_n \rightarrow a$  die Folge  $f(x_n)$  nach  $L_a$  konvergiert. In diesem Fall bezeichnen wir

$$\lim_{x \rightarrow a} f(x) = L_a .$$

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  $d(x, a) < \delta$ .

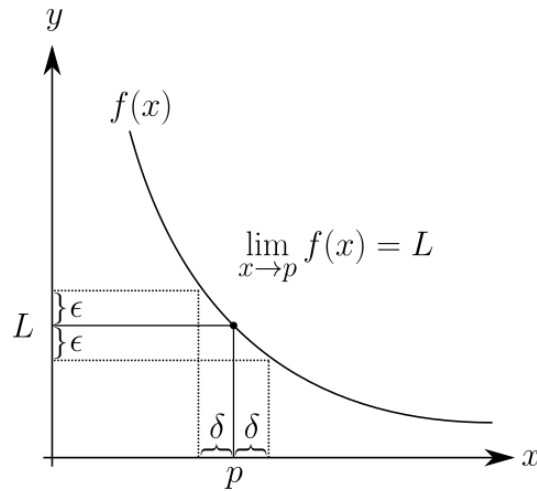


Abbildung 4: Quelle: Wikipedia: [https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Limes\\_Definition\\_Vektorgrafik.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Limes_Definition_Vektorgrafik.svg)

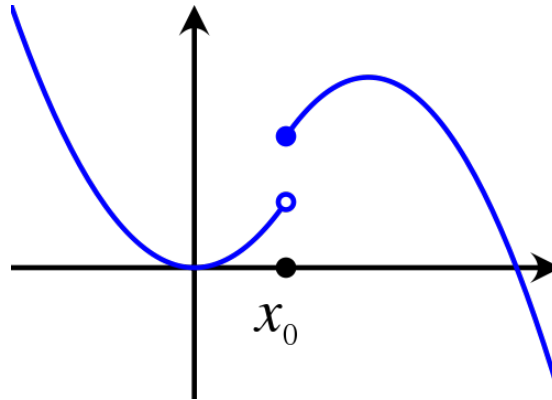


Abbildung 5: Quelle: Wikipedia: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Upper\\_semi.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Upper_semi.svg)

**Definition 4** (Stetige Funktion). *Eine reellwertige Funktion  $f : U \rightarrow \mathbb{R}$  heißt stetig, wenn für alle  $y \in U$  der Grenzwert  $\lim_{x \rightarrow y} f(x) = L_y$  existiert.*

## 2.1 Richtungsableitung und Gradient reellwertiger Funktionen

Ableitungen beschreiben bildlich gesprochen das Verhalten einer Funktion bezüglich beliebig kleiner Änderungen der Eingabewerte.

**Definition 5** (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  $e_i$

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

die partielle Ableitung von  $f$  in  $a$  nach  $x_i$ .

**Definition 6** (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.

**Definition 7** (Differenzierbarkeit). Eine Funktion  $f : U \rightarrow \mathbb{R}$  heißt 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. Mann nennt in diesem Fall die  $1 \times n$ -Matrix

$$df(a) := \left( \frac{\partial f(a)}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial f(a)}{\partial x_n} \right)$$

das Differential von  $f$  im Punkt  $a$ . 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  $df(a) \cdot h = \langle \nabla f(a), h \rangle$ .

★★★ Der Unterschied zwischen Differenzierbarkeit und partieller Differenzierbarkeit ist also, dass die partiellen Ableitungen zusätzlich zur Existenz auch stetig sein müssen.

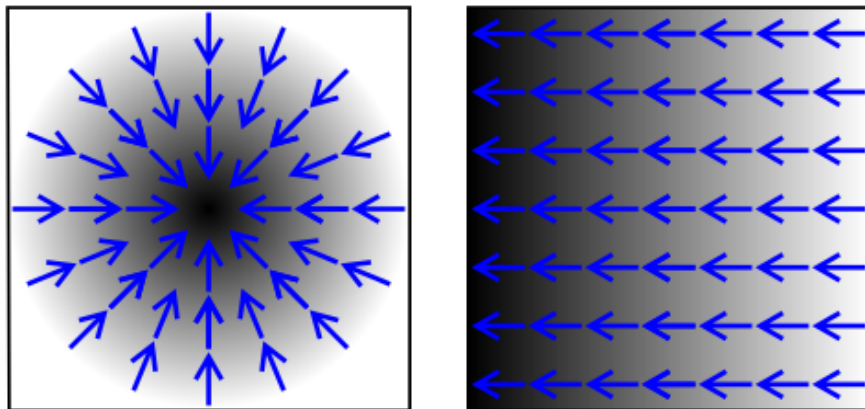


Abbildung 6: Quelle: Wikipedia: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gradient2.svg>

**Satz 1** (Steilste Anstiegsrichtung). Für eine differenzierbare Funktion  $f : U \rightarrow \mathbb{R}$  gilt für  $a \in U$ :

$$\|\nabla f(a)\| = \max\{\partial_h f(a) \mid \|h\| = 1\}.$$

*Beweis.* Mit der CSU Ungleichung folgt für beliebiges  $h$

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

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

**Bemerkung 1.** Für das Differential einer differenzierbaren Funktion  $f : U \rightarrow \mathbb{R}$  gilt für alle  $a \in U$ :

- $df(a)(h) := df(a) \cdot h$  ist eine lineare Abbildung von  $\mathbb{R}^n$  nach  $\mathbb{R}$ .
- $df(a) \cdot h = \partial_h f(a)$ .
- $f(f \cdot g) = g(a)df(f) + f(a)dg$
- $d(f + g) = df + dg$

*Beweis.* Übung!  $\square$

**Satz 2** (Lokale Linearisierung). Ist  $f : U \rightarrow \mathbb{R}$  differenzierbar, so gibt es ein Restglied  $R(h)$  mit  $\lim_{h \rightarrow 0} \frac{R(h)}{\|h\|} = 0$  so dass für alle  $a \in U$  und  $h \in \mathbb{R}$

$$f(a + h) = f(a) + df(a) \cdot h + R(h)$$

gilt.

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

◊◊ Der Beweis beruht im Wesentlichen auf dem Mittelwertsatz einer Veränderlichen.

*Beweis.* Wir wählen einen offenen, achsenparallelen Quader  $Q \subset U$ , so dass er vollständig in  $U$  enthalten und  $a \in Q$  ist. Jeder Punkt  $a + h \in Q$  lässt sich damit durch einen achsenparallelen Streckenzug durch die Punkte

$$\begin{aligned} a_0 &:= a \\ a_i &:= a_{i-1} + h_i e_i; \quad i = 1, \dots, n \end{aligned}$$

mit  $a$  verbinden. Damit ist  $f(a + h) - f(a) = \sum_{i=1}^n (f(a_i) - f(a_{i-1}))$  und mit  $\varphi_i(t) := f(a_i + te_i)$  gilt  $f(a_i) - f(a_{i-1}) = \varphi_i(h_i) - \varphi_i(0)$ . Wegen dem Mittelwertsatz einer Veränderlichen gibt es  $\tau_i$  mit

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

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

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

und damit

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

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

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

und damit die Behauptung. □

**Definition 8** (Differenzierbarer Weg). *Ein Weg ist eine Abbildung*

$$\begin{aligned} \gamma &: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n \\ \gamma(t) &:= \begin{pmatrix} \gamma_1(t) \\ \vdots \\ \gamma_n(t) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

mit reellen, stetigen Funktionen  $y_i : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  (Damit ist auch  $\gamma$  stetig). Der Weg heißt differenzierbar, falls alle Ableitungen  $\gamma'_i(t)$  existieren. In diesem Fall bezeichnen wir

$$\gamma'(t) := \begin{pmatrix} \gamma'_1(t) \\ \vdots \\ \gamma'_n(t) \end{pmatrix}$$

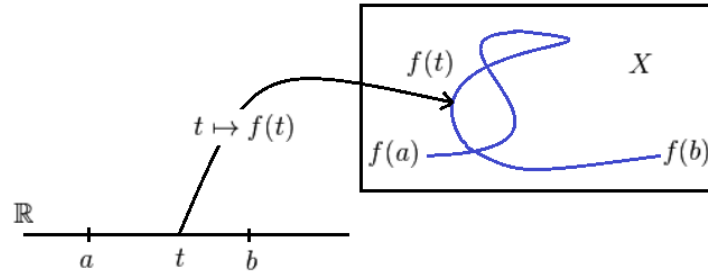


Abbildung 7: Quelle: Wikipedia: <https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:EbeneKurve.png>

**Satz 3** ((Baby) Kettenregel). Sei  $\gamma : I \rightarrow U$  ein differenzierbarer Weg und  $f : U \rightarrow \mathbb{R}$  eine differenzierbare Funktion. Dann ist  $f \circ \gamma : I \rightarrow \mathbb{R}$  differenzierbar und hat die Ableitung

$$\frac{d(f \circ \gamma)}{dt} = df(\gamma(t))\gamma'(t) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f(\gamma(t))}{\partial x_i} \gamma'_i(t)$$

★★★ Das Differential einer differenzierbaren Funktion kann als eine Abbildung von Tangenten interpretiert werden.

*Beweis.* Wegen der Differenzierbarkeit des Weges und der Funktion gilt für hinreichend kleine  $k \in \mathbb{R}$  und  $h \in \mathbb{R}^n$

$$\gamma(t+k) = \gamma(t) + k\gamma'(t) + r_1(k)|k|, \text{ mit } \lim_{k \rightarrow 0} r_1(k) = 0$$

$$f(\gamma(t) + h) = f(\gamma(t)) + df(\gamma(t)) \cdot \gamma'(t)h + r_2(h)||h||, \text{ mit } \lim_{h \rightarrow 0} r_2(h) = 0$$

Mit  $h := \gamma(t+k) - \gamma(t)$  folgt

$$f(\gamma(t+k)) = f(\gamma(t)) + df(\gamma(t)) \cdot \gamma'(t)k + R(k)$$

mit dem Restglied

$$R(k) := df(\gamma(t))r_1(k)|k| + r_2(\gamma(t+k) - \gamma(t))||\gamma'(t)k + r_1(k)|k||$$

Da  $\lim_{k \rightarrow 0} R(k) = 0$  folgt die Behauptung. □

**Satz 4** (Mittelwertsatz). Sei  $f : U \rightarrow \mathbb{R}$  eine differenzierbare Funktion und  $a, b \in U$ , so dass die Verbindungsstrecke von  $a$  nach  $b$  vollständig in  $U$  liegt. Dann gibt es einen Punkt  $\xi \in [a, b]$  mit

$$f(b) - f(a) = df(\xi)(b - a) .$$

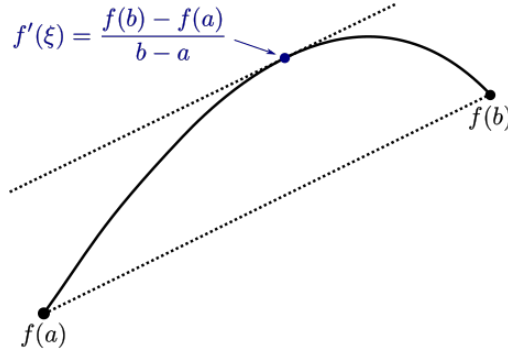


Abbildung 8: Quelle: Wikipedia

*Beweis.* Setze  $\gamma(t) := a + t(b - a)$ ,  $t \in [0, 1]$  (Verbindungsgerade zwischen  $a$  und  $b$ ) und  $F := f \circ \gamma : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ . Damit ist  $F(1) - F(0) = f(b) - f(a)$  und nach der Kettenregel ist  $F$  differenzierbar. Mit dem Mittelwertsatz einer Veränderlichen gibt es  $\tau \in (0, 1)$  mit  $F(1) - F(0) = F'(\tau) = df(\gamma(\tau))(b - a)$ . Somit ist  $\xi := \gamma(\tau)$  der gesuchte Punkt.  $\square$

**Satz 5** (Satz von Schwarz). Wenn Für eine Funktion  $f : U \rightarrow \mathbb{R}$  die Ableitungen  $\frac{\partial}{\partial x_i} f(a)$ ,  $\frac{\partial}{\partial x_j} f(a)$  und  $\frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial}{\partial x_j} f(a)$  existieren und letztere stetig ist, dann existiert auch  $\frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\partial}{\partial x_i} f(a)$  und es gilt

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial}{\partial x_j} f(a) = \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\partial}{\partial x_i} f(a)$$

★★★ Bei wiederholten Ableiten spielt die Reihenfolge keine Rolle, wenn eine der Ableitungen existiert und stetig ist.

◇◇ Der Beweis geht in zwei Schritten: Man wendet den Mittelwertsatz einer Veränderlichen auf eine Hilfsfunktion an. Damit kann man die Differenz der Ableitungen abschätzen und zeigen, dass sie beliebig klein wird und damit gleich sind.

*Beweis.* Setze  $\varphi(x, y) := f(a + xe_i + ye_j)$  mit  $(x, y) \in V \subset \mathbb{R}^2$ . Bei hinreichend kleiner Wahl von  $V$  existieren die Ableitungen  $\frac{\partial}{\partial y} \varphi$ ,  $\frac{\partial}{\partial x} \varphi$  und  $\frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial}{\partial x} \varphi$  existiert

und ist stetig nach Voraussetzung an  $f$ . Es reicht nun zu zeigen, dass  $\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} \varphi(0, 0)$  existiert und

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} \varphi(0, 0) = \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial}{\partial x} \varphi(0, 0)$$

gilt. Sei dazu  $\epsilon > 0$  und  $V' \subset V$  so gewählt, dass  $|\frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial}{\partial x} \varphi(x, y) - \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial}{\partial x} \varphi(0, 0)| < \epsilon$  gilt für  $(x, y) \in V'$ . Innerhalb eines achsenparallelen Quaders  $Q \subset V'$  mit Ecken  $(0, 0)$  und  $(h, k)$  setzen wir  $u(x) := \varphi(x, k) - \varphi(x, 0)$ . Zweimaliges Anwenden des Mittelwertsatzes einer Veränderlichen liefert

$$\begin{aligned} u(h) - u(0) &= hu'(\xi) \\ &= h \left( \frac{\partial}{\partial x} \varphi(\xi, k) - \frac{\partial}{\partial x} \varphi(\xi, 0) \right) = hk \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial}{\partial x} \varphi(\xi, \eta) . \end{aligned}$$

Damit erhalten wir die Abschätzung

$$\left| \frac{u(h) - u(0)}{hk} - \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial}{\partial x} \varphi(0, 0) \right| < \epsilon .$$

Da

$$\begin{aligned} \lim_{k \rightarrow 0} \frac{u(h) - u(0)}{hk} &= \lim_{k \rightarrow 0} \frac{1}{h} \left( \frac{\varphi(h, k) - \varphi(h, 0)}{k} - \frac{\varphi(0, k) - \varphi(0, 0)}{k} \right) \\ &= \left( \frac{\frac{\partial}{\partial y} \varphi(h, 0) - \frac{\partial}{\partial y} \varphi(0, 0)}{k} \right) \end{aligned}$$

und

$$\lim_{h \rightarrow 0} \left( \frac{\frac{\partial}{\partial y} \varphi(h, 0) - \frac{\partial}{\partial y} \varphi(0, 0)}{k} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} \varphi(0, 0)$$

folgt die Behauptung. □

### Anwendung: Taylorreihe

**Definition 9** ( $\mathcal{C}^k$ -Funktion). Eine Funktion  $f : U \rightarrow \mathbb{R}$  für die alle partiellen Ableitungen

$$\frac{\partial}{\partial x_{i_1}} \cdots \frac{\partial}{\partial x_{i_k}} f(a)$$

mit  $i_1 + \cdots + i_k \leq k$  existieren und stetig sind heißt  $\mathcal{C}^k$ -Funktion oder  $k$ -mal stetig differenzierbar. Eine  $\mathcal{C}^1$ -Funktion ist also eine differenzierbare Funktion.

**Definition 10** (Höhere Ableitungen). Für eine Funktion  $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $a \in U$  und Vektoren  $v^1, \dots, v^p \in \mathbb{R}^n$  heißt

$$d^p f(a)(v^1, \dots, v^p) := \partial_{v^1} \dots \partial_{v^p} f(a)$$

die  $p$ -te Richtungsableitung von  $f$ . Sie ist wegen dem Satz von Schwarz wohldefiniert. Mit Bemerkung 1 ist

$$d^p f(a)(v^1, \dots, v^p) = \sum_{i_1=1}^n \cdots \sum_{i_p=1}^n \frac{\partial}{\partial x_{i_1}} \cdots \frac{\partial}{\partial x_{i_p}} f(a) \cdot v_{i_1}^1 \cdots v_{i_p}^p.$$

**Bemerkung 2.** Für  $p = 2$  und  $u, v \in \mathbb{R}^n$  ist

$$d^2 f(a)(u, v) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial}{\partial x_j} f(a) v_i u_j$$

und mit

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

ist  $d^2 f(a)(u, v) = u^T \cdot f''(a) \cdot v$ . Die Matrix  $f''(a)$  wird auch Hesse-Matrix genannt. Nach dem Satz von Schwarz ist sie symmetrisch.

**Satz 6** (Taylorapproximation). Sei  $f : U \rightarrow \mathbb{R}$  eine  $\mathcal{C}^{p+1}$ -Funktion und  $x, a \in U$ , so dass die Verbindung zwischen  $x$  und  $a$  in  $U$  liegt. Dann gilt

$$f(x) = f(a) + \sum_{k=1}^p d^k f(a)(x-a)^k + R_{p+1}(x; a)$$

mit dem Restglied  $R_{p+1}(x; a) := \frac{1}{(p+1)!} d^{p+1} f(\xi)(x-a)^{p+1}$  für ein  $\xi \in [a, x]$ .

*Beweis.* Sei  $h := (x-a)$  und  $F(t) := f(a+th)$  mit  $t \in [0, 1]$ . Wiederholte Anwendung der (Baby) Kettenregel mit  $\gamma(t) := a+th$  ergibt

$$\begin{aligned} F'(t) &= \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial x_i} f(a+th) h_i \\ F''(t) &= \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\partial}{\partial x_i} f(a+th) h_i h_j \\ &\vdots \\ F^p(t) &= \sum_{i_1=1}^n \cdots \sum_{i_p=1}^n \frac{\partial}{\partial x_{i_1}} \cdots \frac{\partial}{\partial x_{i_p}} f(a+th) h_{i_1} \cdots h_{i_p}. \end{aligned}$$

Mit der Taylorapproximation für Funktionen einer Veränderlichen folgt

$$F(1) = F(0) + F'(0) + \frac{1}{2!} F''(0) + \cdots + \frac{1}{p!} F^p(0) + R_{p+1}$$

mit dem Restglied  $R_{p+1} := \frac{1}{(p+1)!} F^{p+1}(\tau)$  mit  $\tau \in [0, 1]$ . Da nach Konstruktion  $F(0) = a$  und  $F(1) = f(x)$  folgt insgesamt die Behauptung.  $\square$

**Satz 7** (Qualitative Taylorformel). Sei  $T_p(x, a) = f(a) + \sum_{k=1}^p d^k f(a)(x - a)^k$  die Taylornäherung einer  $C^p$ -Funktion. Dann gilt:

$$\lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x) - T_p(x; a)}{\|x - a\|^p} = 0 .$$

*Beweis.* Da die partiellen Ableitungen stetig sind, gibt es für jedes  $\epsilon > 0$  ein Radius  $r > 0$ , dass für alle  $y \in K_r(a)$

$$\frac{1}{p!}(d^p f(y) - d^p f(a))h^p \leq \epsilon \|h\|_\infty^p .$$

Mit der Taylorapproximation ist

$$f(x) = T_{p-1}(x, a) + \frac{1}{p!} d^p f(\xi)(x - a)^p = T_p(x, a) + \frac{1}{p!} (d^p f(\xi) - d^p f(a))h^p(x - a)^p$$

Mit obiger Abschätzung folgt die Behauptung.  $\square$

## 2.2 Lokale Maxima und Minima

**Definition 11** (Extremum). Sei  $f : X \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  eine reelle Funktion. Ein Punkt  $a \in X$  heißt lokales Maximum bzw. Minimum, falls eine Umgebung  $U$  von  $a$  existiert, so dass  $f(x) \leq f(a)$  bzw.  $f(x) \geq f(a)$  für alle  $x \in U$  gilt. Liegt einer der beiden Fälle vor, so spricht man von einem lokalen Extremum. Gilt strikt  $f(x) < f(a)$  bzw.  $f(x) > f(a)$ , so nennt man das Extremum isoliert. Ist  $U = X$  so nennt man es auch globales Maximum bzw. Minimum.



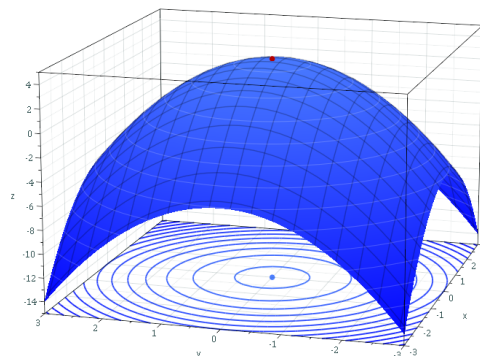


Abbildung 9: Quelle: Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/File:MaximumParaboloid.png>

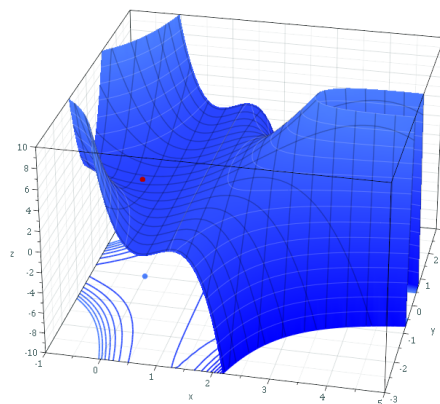


Abbildung 10: Quelle: Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/File:MaximumCounterexample.png>

**Satz 8** (Notwendiges Kriterium). *Ist  $f : U \rightarrow \mathbb{R}$  differenzierbar und hat  $f$  in  $a \in U$  ein lokales Extremum, so gilt*

$$\frac{\partial}{\partial x_1} = \dots = \frac{\partial}{\partial x_n} = 0.$$

*Dies ist gleichbedeutend mit  $df(a) = 0$ .*

*Beweis.* Setze  $F_k(t) := f(a + te_k)$ . Da  $f$  ein Extremum in  $a$  hat, hat  $F_k$  in einer hinreichend kleinen Umgebung um 0 ein Extremum. Da  $F_k$  eine Funktion einer Veränderlichen ist, gilt  $F'_k(0) = 0$ . Da  $\frac{\partial}{\partial x_k} f(a) = F'_k(0)$  folgt die Behauptung.  $\square$

**Satz 9** (Hinreichendes Kriterium). *Ist  $f : U \rightarrow \mathbb{R}$  eine  $C^2$ -Funktion und ist  $f'(a) = 0$  für ein  $a \in U$ . Dann gilt:*

- $f''(a) > 0 \Rightarrow f$  hat in  $a$  ein isoliertes lokales Minimum.

- $f''(a) > 0 \Rightarrow f$  hat in  $a$  ein isoliertes lokales Maximum.
- $f''(a) \geq 0 \Rightarrow f$  hat in  $a$  kein lokales Extremum.

*Beweis.* Sei  $f'(a) = 0$  und  $f''(a) > 0$ . Mit der Taylorformel gilt für hinreichend kurze Vektoren  $h \in \mathbb{R}^n$

$$f(a+h) = f(a) + \frac{1}{2}h^T f''(a)h + R(h)$$

mit  $\lim_{h \rightarrow 0} \frac{R(h)}{\|h\|^2} = 0$ . Für  $\|h\| \leq 1$  hat  $h^T f''(a)h$  sein Maximum  $m$  auf dem Einheitskreis  $\{h \in \mathbb{R}^n \mid \|h\| = 1\}$  da  $f''(a) > 0$ .

$$h^T f''(a)h = \|h\| \frac{1}{\|h\|} h^T f''(a) \|h\| \frac{1}{\|h\|} h \geq m \|h\|^2.$$

Wir wählen  $\epsilon$  so klein, dass  $R(h) \leq \frac{m}{2} \|h\|^2$  gilt für  $\|h\| < \epsilon$  (was geht wegen Taylorformel). Damit erhalten wir

$$f(a+h) \geq f(a) + m \|h\|^2.$$

und damit hat  $f$  ein lokales Minimum in  $a$ .

Der Fall  $f''(a) < 0$  wird mit Betrachtung von  $-f$  durch den vorigen Fall bewiesen.

Es sei nun  $f''(a) \geq 0$  und  $v$  mit  $v^T f''(a)v > 0$  und  $w$  mit  $w^T f''(a)w < 0$ . Betrachten wir die Funktionen

$$\begin{aligned} F_v(t) &:= f(a+tv) \\ F_w(t) &:= f(a+tw) \end{aligned}$$

dann ist

$$\begin{aligned} F'_v(t) &= 0; \quad F''_v(0) = v^T f''(a)v > 0 \\ F'_w(t) &= 0; \quad F''_w(0) = w^T f''(a)w < 0 \end{aligned}$$

und somit hat  $F_v$  ein isoliertes lokales Maximum und  $F_w$  ein isoliertes lokales Minimum und damit  $f$  kein lokales Extremum in  $a$ .  $\square$

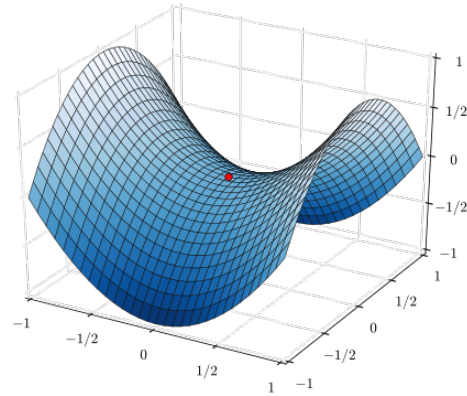


Abbildung 11: Quelle: Wikipedia: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Saddle\\_point.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Saddle_point.svg)

### Anwendung: Gradientenverfahren

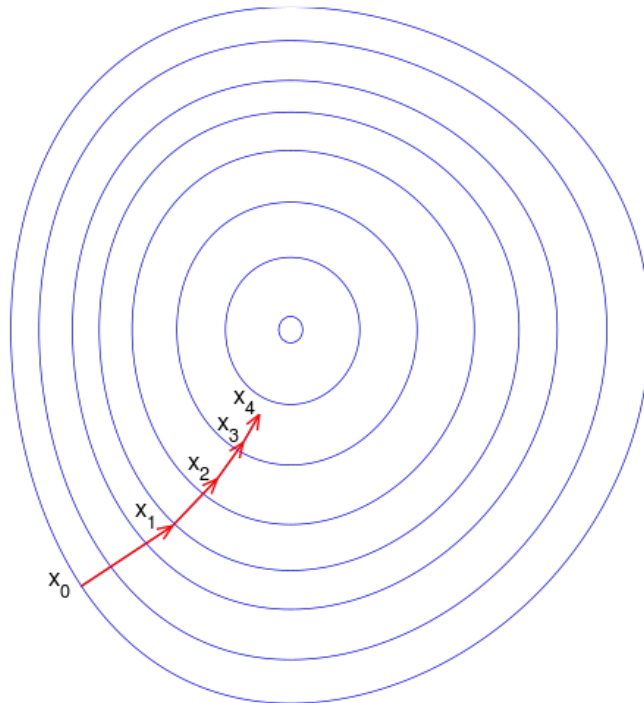


Abbildung 12: Quelle: Wikipedia: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gradient\\_descent.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gradient_descent.svg)

## 2.3 Gradient einer mehrdimensionalen Funktion

Anwendung: Automatisches Ableiten

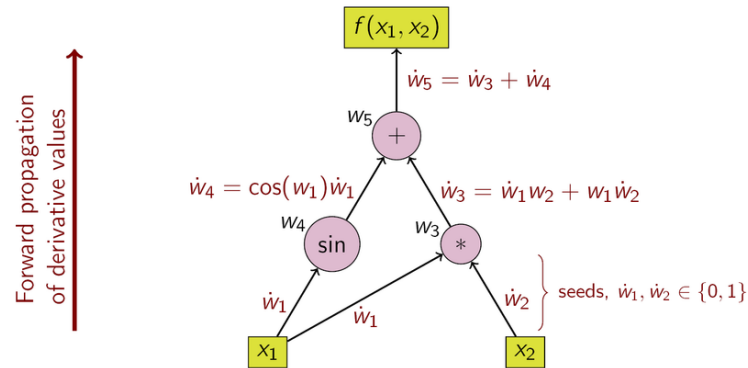


Abbildung 13: Quelle: Wikipedia

Automatisches Ableiten in Pytorch

Anwendung: Backpropagation

## 3 Mehrdimensionale Integralrechnung

### 3.1 Lebesgue Maß

### 3.2 Lebesgue Integral

Anwendung: Fourierreihen, Fouriertransformation und FFT

## Tabellenverzeichnis

## Abbildungsverzeichnis

|    |  |    |
|----|--|----|
| 1  | Quelle: Wikipedia: <a href="https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Differencial_quotient_of_a_function.svg">https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Differencial_quotient_of_a_function.svg</a> | 5  |
| 2  | Quelle: Wikipedia: <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mittelwertsatz3.svg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mittelwertsatz3.svg</a>                                 | 5  |
| 3  | Quelle: Wikipedia: <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Epsilonschlauch_klein.svg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Epsilonschlauch_klein.svg</a>                     | 7  |
| 4  | Quelle: Wikipedia: <a href="https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Limes_Definition_Vektorgrafik.svg">https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Limes_Definition_Vektorgrafik.svg</a>             | 8  |
| 5  | Quelle: Wikipedia: <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Upper_semi.svg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Upper_semi.svg</a>   | 8  |
| 6  | Quelle: Wikipedia: <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gradient2.svg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gradient2.svg</a>   | 10 |
| 7  | Quelle: Wikipedia: <a href="https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:EbeneKurve.png">https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:EbeneKurve.png</a>   | 12 |
| 8  | Quelle: Wikipedia . . . . .  | 13 |
| 9  | Quelle: Wikipedia: <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/File:MaximumParaboloid.png">https://en.wikipedia.org/wiki/File:MaximumParaboloid.png</a>                                       | 17 |
| 10 | Quelle: Wikipedia: <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/File:MaximumCounterexample.png">https://en.wikipedia.org/wiki/File:MaximumCounterexample.png</a>                               | 17 |
| 11 | Quelle: Wikipedia: <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Saddle_point.svg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Saddle_point.svg</a>                                       | 19 |
| 12 | Quelle: Wikipedia: <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gradient_descent.svg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gradient_descent.svg</a>                               | 19 |
| 13 | Quelle: Wikipedia . . . . .  | 20 |