

Ableitung und Mittelwertsätze

Definition. Sei $I \subseteq \mathbb{R}$ ein Intervall und $f : I \rightarrow \mathbb{R}$.

1) f heißt **differenzierbar an** $x_0 \in I$, wenn der Grenzwert

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} = f'(x_0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h}$$

existiert.

Ist dabei x_0 linker bzw. rechter Randpunkt von I , dann heißt f an x_0 **rechtsseitig** bzw. **linkseitig differenzierbar**.

2) Die so punktweise definierte Funktion $f' : I \rightarrow \mathbb{R}$ mit $D(f') = \{x_0 \in I : \exists f'(x_0)\}$ heißt **Ableitung** von f .

Ist f' stetig auf $X_0 \subseteq D(f')$, so heißt f **stetig differenzierbar auf** X_0 und man schreibt $f \in C^1(X_0)$.

3) Die **höheren Ableitungen** lassen sich rekursiv definieren :

$$f'' = (f')', \dots, f^{(n)} = (f^{(n-1)})'$$

4) Den Grenzwert des Differenzenquotienten bezeichnet man u.a. auch als **Differentialquotient** und man schreibt $\frac{df}{dx}(x_0) = f'(x_0)$.

Elementare Beispiele.

1) Die **konstante Funktion** $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $f(x) = a \quad \forall x \in \mathbb{R}$ ist für jedes $x_0 \in \mathbb{R}$ differenzierbar und es gilt $f'(x) = 0 \quad \forall x \in \mathbb{R}$.

2) Die Funktion $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $f(x) = x^n \quad \forall x \in \mathbb{R}$ ($n \in \mathbb{N}$) ist auf ganz \mathbb{R} differenzierbar.

Dabei gilt : $f'(x) = nx^{n-1} \quad \forall x \in \mathbb{R}$.

3) Die Funktion $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $f(x) = |x| \quad \forall x \in \mathbb{R}$ ist auf ganz \mathbb{R} stetig und an $x_0 = 0$ **nicht** differenzierbar.

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{f(x) - f(0)}{x - 0} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{x - 0}{x - 0} = 1 \quad \text{und} \quad \lim_{x \rightarrow 0^-} \frac{f(x) - f(0)}{x - 0} = \lim_{x \rightarrow 0^-} \frac{-x - 0}{x - 0} = -1.$$

An jeder Stelle $x_0 \neq 0$ ist f allerdings differenzierbar.

$f'(x_0) = 1$ falls $x_0 > 0$ und $f'(x_0) = -1$ falls $x_0 < 0$.

Satz. $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ differenzierbar an $x_0 \Rightarrow f$ stetig in x_0 .

Beweis. Sei (x_n) eine Folge aus I mit $x_n \neq x_0$ und $x_n \rightarrow x_0$.

Dann gilt $f(x_n) - f(x_0) = \frac{f(x_n) - f(x_0)}{x_n - x_0} (x_n - x_0) \rightarrow f'(x_0)(x_n - x_0) \rightarrow 0$. \square

Bemerkung. Es gibt allerdings stetige Funktionen, die an keinem Punkt ihres Definitionsbereiches differenzierbar sind.

Das eigentliche "Wesen" der Differenzierbarkeit einer Funktion besteht darin, dass die Funktion in einer bestimmten Weise "**linear approximierbar**" ist. Dies zeigt sich später in besonderer Weise bei Funktionen mehrerer Veränderlicher.

Ist f an x_0 differenzierbar, dann betrachten wir die durch $c = f'(x_0)$ definierte Gerade $g(x) = f(x_0) + c(x - x_0)$.

Dann gilt offenbar

$$\frac{f(x) - g(x)}{x - x_0} = \frac{f(x) - f(x_0) - c(x - x_0)}{x - x_0} \rightarrow 0 \quad \text{für } x \rightarrow x_0.$$

Ist umgekehrt $c \in \mathbb{R}$, $g(x) = f(x_0) + c(x - x_0)$ und gilt $\frac{f(x) - g(x)}{x - x_0} \rightarrow 0$ für $x \rightarrow x_0$, dann ist f differenzierbar an x_0 und es gilt $f'(x_0) = c$.

Definition. $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ heißt an $x_0 \in I$ **Lipschitz-stetig**, wenn eine Umgebung $U(x_0)$ von x_0 und eine Konstante M existiert, sodass

$$|f(x) - f(x_0)| \leq M|x - x_0| \quad \forall x \in U(x_0) \cap I.$$

Man sagt auch, f genüge an der Stelle x_0 einer **Lipschitz-Bedingung** und M heißt dann **Lipschitz-Konstante**.

Satz. Sei $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ an x_0 differenzierbar. Dann ist f an x_0 Lipschitz-stetig.

Beweis. Sei $c = f'(x_0)$. Dann ist die Funktion $h(x) = \frac{f(x) - f(x_0) - c(x - x_0)}{x - x_0}$ stetig an x_0 .

Zu $\varepsilon = 1$ gibt es daher eine Umgebung $U(x_0)$ von x_0 sodass $|h(x)| \leq 1$ für $x \in U(x_0)$. Damit ist

$$\begin{aligned} |f(x) - f(x_0)| &= |h(x)(x - x_0) + c(x - x_0)| = |h(x) + c||x - x_0| \leq \\ &\leq (1 + |c|)|x - x_0| = M|x - x_0|. \quad \square \end{aligned}$$

Satz. (Ableitungsregeln)

Es seien $f, g : I \rightarrow \mathbb{R}$ an $x_0 \in I$ differenzierbar. Dann gilt

1) $f \pm g$ sind an x_0 differenzierbar und

$$(f \pm g)'(x_0) = f'(x_0) \pm g'(x_0)$$

2) $f \cdot g$ ist an x_0 differenzierbar und

$$(f \cdot g)'(x_0) = f'(x_0)g(x_0) + f(x_0)g'(x_0) \quad \dots \text{Produktregel}$$

3) Falls $g(x_0) \neq 0$, ist $\frac{f}{g}$ an x_0 differenzierbar und

$$\left(\frac{f}{g}\right)'(x_0) = \frac{f'(x_0)g(x_0) - f(x_0)g'(x_0)}{g^2(x_0)} \quad \dots \text{Quotientenregel}$$

Beweis. (für die Produktregel)

Gelte $x_n \rightarrow x_0$ mit $x_n \neq x_0$. Dann ist $\frac{f(x_n)g(x_n) - f(x_0)g(x_0)}{x_n - x_0} =$
 $\frac{[f(x_n)g(x_n) - f(x_n)g(x_0)] + [f(x_n)g(x_0) - f(x_0)g(x_0)]}{x_n - x_0} = f(x_n) \frac{g(x_n) - g(x_0)}{x_n - x_0} + \frac{f(x_n) - f(x_0)}{x_n - x_0} g(x_0)$
 $\rightarrow f(x_0)g'(x_0) + f'(x_0)g(x_0). \quad \square$

Folgerungen.

i) Ein Polynom $P(x) = \sum_{k=0}^n a_k x^k$ ist an jedem $x \in \mathbb{R}$ differenzierbar und

es gilt $P'(x) = \sum_{k=1}^n k a_k x^{k-1}$.

Da die Ableitung eines Polynoms wieder ein Polynom ist, ist somit ein Polynom beliebig oft differenzierbar.

ii) Eine rationale Funktion, also der Quotient zweier Polynome, ist auf ihrem Definitionsbereich differenzierbar.

Nun betrachten wir zusammengesetzte Funktionen.

Satz. (Kettenregel)

Sei $h = g \circ f$ auf I definiert. Ist f an x_0 differenzierbar und g an $y_0 = f(x_0)$ differenzierbar, dann ist $h = g \circ f$ an x_0 differenzierbar und es gilt

$$h'(x_0) = (g \circ f)'(x_0) = g'(y_0)f'(x_0) \quad \text{bzw.}$$

$$\frac{dh}{dx}(x_0) = \frac{d(g \circ f)}{dx}(x_0) = \frac{dg}{dy}(y_0) \frac{df}{dx}(x_0)$$

Beweis. Sei $x_n \rightarrow x_0$ mit $x_n \neq x_0$.

Fall 1 : $\exists \delta > 0$ mit $f(x) \neq f(x_0)$ für alle $x \in K(x_0, \delta) \cap I$, $x \neq x_0$.

Dann ist $\frac{h(x_n)-h(x_0)}{x_n-x_0} = \frac{g(f(x_n))-g(f(x_0))}{f(x_n)-f(x_0)} \cdot \frac{f(x_n)-f(x_0)}{x_n-x_0} = \frac{g(y_n)-g(y_0)}{y_n-y_0} \cdot \frac{f(x_n)-f(x_0)}{x_n-x_0} \rightarrow g'(y_0)f'(x_0)$.

Fall 2 : Es gibt eine Folge (\tilde{x}_n) aus I mit $\tilde{x}_n \rightarrow x_0$, $\tilde{x}_n \neq x_0$ und $f(\tilde{x}_n) = f(x_0)$. Dann gilt allerdings $f'(\tilde{x}_n) = 0$.

(x_n) zerfällt dann möglicherweise in zwei Teilfolgen (x'_n) und (x''_n) mit $f(x'_n) \neq f(x_0)$ und $f(x''_n) = f(x_0)$.

$$\frac{h(x'_n)-h(x_0)}{x'_n-x_0} = \frac{g(f(x'_n))-g(f(x_0))}{f(x'_n)-f(x_0)} = 0 \rightarrow 0$$

$$\frac{h(x''_n)-h(x_0)}{x''_n-x_0} = \frac{g(f(x''_n))-g(f(x_0))}{f(x''_n)-f(x_0)} \cdot \frac{f(x''_n)-f(x_0)}{x''_n-x_0} \rightarrow g'(f(x_0))f'(x_0) = g'(f(x_0)) \cdot 0 = 0$$

Also ist $h'(x_0) = 0$. \square

Beispiel. Sei $h(x) = e^{x^2}$. Dann kann h als zusammengesetzte Funktion

$h = g \circ f$ geschrieben werden mit $f(x) = x^2$ und $g(y) = e^y$.

Es sei bekannt (siehe später) dass $(e^y)' = e^y$. Dann ist

$$h'(x_0) = g'(y)|_{y=f(x_0)} f'(x)|_{x=x_0} = e^{x^2} \cdot 2x = 2xe^{x^2}.$$

Satz. (Ableitung der Umkehrfunktion)

Sei $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ stetig auf dem offenen Intervall I , dort streng monoton und an $x_0 \in I$ differenzierbar.

Gilt $f'(x_0) \neq 0$, dann ist die Umkehrfunktion f^{-1} an der Stelle $y_0 = f(x_0)$ differenzierbar und es gilt

$$(f^{-1})'(y_0) = \frac{1}{f'(x_0)}.$$

Beweis. Sei (y_n) eine Folge aus $D(f^{-1})$ mit $y_n \neq y_0$ und $y_n \rightarrow y_0$. Dann existiert eine Folge (x_n) mit $f(x_n) = y_n$ und $x_n \neq x_0 \forall n$.

Wegen der Stetigkeit von f^{-1} (siehe vorher) gilt

$$x_n = f^{-1}(y_n) \rightarrow f^{-1}(y_0) = x_0.$$

$$\text{Damit } \frac{f^{-1}(y_n) - f^{-1}(y_0)}{y_n - y_0} = \frac{x_n - x_0}{f(x_n) - f(x_0)} = \frac{1}{\frac{f(x_n) - f(x_0)}{x_n - x_0}} \rightarrow \frac{1}{f'(x_0)}. \quad \square$$

Beispiel.

$f(x) = x^2$ ist stetig und streng monoton wachsend auf $(0, \infty)$. Die Umkehrfunktion f^{-1} ist durch $f^{-1}(y) = +\sqrt{y}$ gegeben.

$$\text{Ist } y_0 = x_0^2, \text{ dann ist } (f^{-1})'(y_0) = \frac{1}{f'(x_0)} = \frac{1}{2x_0} = \frac{1}{2\sqrt{y_0}}.$$

Wir befassen uns nun mit den Ableitungen der elementaren Funktionen.

1) Logarithmus

Sei $x > 0$ fest und $x_n \rightarrow x$ mit $x_n > 0$. Setze $h_n = x_n - x$. Dann gilt $h_n \rightarrow 0$ und

$$\frac{\log_b(x_n) - \log_b x}{x_n - x} = \frac{\log_b(x+h_n) - \log_b x}{h_n} = \frac{1}{h_n} \log_b\left(1 + \frac{h_n}{x}\right) = \frac{1}{x} \log_b\left(1 + \frac{h_n}{x}\right)^{\frac{x}{h_n}} \rightarrow \frac{1}{x} \log_b e$$

Also $(\log_b x)' = \frac{1}{x} \log_b e \quad (x > 0)$

Im speziellen, für $b = e$, erhalten wir $(\ln x)' = \frac{1}{x}$, $x > 0$.

Man beachte auch, dass $(\ln |x|)' = \frac{1}{x} \quad \forall x \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$.

2) Exponentialfunktion

Für $y = e^x$ ist $x = \ln y$ die Umkehrfunktion. Daher ist wegen vorher $y'(x) = \frac{1}{x'(y)} = \frac{1}{\frac{1}{y}} = y = e^x$. Also $(e^x)' = e^x$.

Für $y = b^x = e^{x \ln b}$ gilt wegen der Kettenregel

$(b^x)' = (e^{x \ln b})' = \ln b e^{x \ln b} = b^x \ln b$. Also $(b^x)' = b^x \ln b$, $x \in \mathbb{R}$.

3) Potenzfunktion

Wegen $x^a = e^{a \ln x}$ folgt mit der Kettenregel

$(x^a)' = (e^{a \ln x})' = \frac{a}{x} e^{a \ln x} = \frac{a}{x} x^a$ und damit $(x^a)' = a x^{a-1}$, $(x > 0)$.

4) Hyperbolische Funktionen

Mit Hilfe der Differentiationsregeln über zusammengesetzte Funktionen erhalten wir

$(\sinh x)' = \cosh x$, $(\cosh x)' = \sinh x$, $(\tanh x)' = \frac{1}{(\cosh x)^2}$ und

$(\coth x)' = -\frac{1}{(\sinh x)^2}$, $x \neq 0$.

Mit dem Satz über die Ableitung der Umkehrfunktion erhalten wir

$(\operatorname{arsinh} x)' = \frac{1}{\sqrt{1+x^2}}$, $(\operatorname{arcosh} x)' = \frac{1}{\sqrt{x^2-1}}$, $(\operatorname{artanh} x)' = \frac{1}{1-x^2}$ ($|x| < 1$),

$(\operatorname{arcoth} x)' = \frac{1}{1-x^2}$ ($|x| > 1$).

4) Trigonometrische Funktionen

Satz. Für $x \in \mathbb{R}$ gilt

$$(\sin x)' = \cos x, \quad (\cos x)' = -\sin x, \quad (\tan x)' = \frac{1}{(\cos x)^2} \quad (x \neq (2k+1)\frac{\pi}{2}),$$

$$(\cot x)' = -\frac{1}{(\sin x)^2} \quad (x \neq k\pi)$$

Beweis. (für $\sin x$)

Subtraktion der Additionstheoreme $\sin(x_1+x_2) = \sin x_1 \cos x_2 + \cos x_1 \sin x_2$ und $\sin(x_1 - x_2) = \sin x_1 \cos x_2 - \cos x_1 \sin x_2$ liefert

$$\sin(x_1 + x_2) - \sin(x_1 - x_2) = 2 \cos x_1 \sin x_2 .$$

Mit $x_1 = x + \frac{h}{2}$ und $x_2 = \frac{h}{2}$ ergibt sich

$$\sin(x+h) - \sin x = 2 \cos(x + \frac{h}{2}) \sin \frac{h}{2}, \quad \text{also} \quad \frac{\sin(x+h) - \sin x}{h} = \cos(x + \frac{h}{2}) \frac{\sin \frac{h}{2}}{\frac{h}{2}}$$

Für $h \rightarrow 0$ erhalten wir $(\sin x)' = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sin(x+h) - \sin x}{h} =$

$$\lim_{h \rightarrow 0} \left(\cos(x + \frac{h}{2}) \frac{\sin \frac{h}{2}}{\frac{h}{2}} \right) = \lim_{h \rightarrow 0} \cos(x + \frac{h}{2}) \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sin \frac{h}{2}}{\frac{h}{2}} = \cos x .$$

Unter Verwendung des Satzes für die Ableitung der Umkehrabbildung erhalten wir

$$(\arcsin x)' = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} \quad (|x| < 1), \quad (\arccos x)' = -\frac{1}{\sqrt{1-x^2}} \quad (|x| < 1)$$

$$(\arctan x)' = \frac{1}{1+x^2} \quad (x \in \mathbb{R}), \quad (\operatorname{arc cot} x)' = -\frac{1}{1+x^2} \quad (x \in \mathbb{R}).$$

Die Ableitung $f'(x_0)$ kann offenbar auch als Steigungsmaß des Graphen einer Funktion $f(x)$ an der Stelle x_0 aufgefaßt werden. Deshalb liegt es nahe, dass in einem Extrempunkt (Maximum oder Minimum) die Ableitung f' den Wert Null annimmt.

Satz. (Fermat)

Sei $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ an $x_0 \in (a, b)$ differenzierbar. Hat f an der Stelle x_0

ein lokales Maximum oder Minimum, gilt notwendigerweise $f'(x_0) = 0$.

Beweis. (für ein lokales Maximum)

Betrachte Folgen (x_n) und (x'_n) mit $x_n = x_0 + \frac{1}{n}$ bzw. $x'_n = x_0 - \frac{1}{n}$.
Hat f an x_0 ein lokales Maximum, dann gilt

$$f'(x_0) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f(x_0 + \frac{1}{n}) - f(x_0)}{\frac{1}{n}} \leq 0 \quad \text{bzw.} \quad f'(x_0) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f(x_0 - \frac{1}{n}) - f(x_0)}{-\frac{1}{n}} \geq 0 .$$

Damit ist $f'(x_0) = 0$. \square

Satz. (Satz von Rolle)

Sei $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ stetig und differenzierbar auf (a, b) und es gelte $f(a) = f(b)$.

Dann gibt es (mindestens) eine Stelle $\xi \in (a, b)$ mit $f'(\xi) = 0$.

Beweis. Der Fall einer konstanten Funktion ist trivial. Sei also f nicht konstant. Weil f stetig und $[a, b]$ kompakt ist, gibt es ein Maximum und ein Minimum, wobei eines der beiden von $f(a)$ (und damit auch von $f(b)$) verschieden sein muß. Sei $\xi \in (a, b)$ diese Stelle.

Nach dem Kriterium von Fermat ist dann $f'(\xi) = 0$. \square

Der Satz von Rolle kann nun verallgemeinert werden zum wichtigen

Satz. (1. Mittelwertsatz der Differentialrechnung)

Sei $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ stetig und differenzierbar auf (a, b) . Dann gibt es eine Stelle $\xi \in (a, b)$ mit

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

(Dies bedeutet: Der Graph von f hat an der Stelle ξ eine Tangente, die parallel zur Sekante durch $(a, f(a))$ und $(b, f(b))$ ist.)

Beweis.

Betrachte die Hilfsfunktion $F(x) = f(x) - f(a) - \frac{f(b) - f(a)}{b - a}(x - a)$.

Dann ist $F(x)$ stetig auf $[a, b]$ und auf (a, b) differenzierbar und es gilt $F(a) = F(b) = 0$. Nach dem Satz von Rolle $\exists \xi \in (a, b)$ mit $F'(\xi) = 0$, d.h. aber $f'(\xi) - \frac{f(b)-f(a)}{b-a} = 0$. \square

Folgerungen. Sei $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ stetig und differenzierbar auf (a, b) .

1) $f'(x) = 0 \quad \forall x \in (a, b) \Rightarrow f$ ist konstant.

Beweis. Wende den 1. MWS auf f im Intervall $[a, x]$ mit $a < x \leq b$ an. \square

2) $f'(x) = g'(x) \quad \forall x \in (a, b) \Rightarrow f(x) = g(x) + \text{const.}$

Beweis. Folgt aus 1) mit $F(x) = f(x) - g(x)$. \square

3) i) $f'(x) > 0 \quad \forall x \in (a, b) \Rightarrow f$ ist streng monoton wachsend,

ii) $f'(x) < 0 \quad \forall x \in (a, b) \Rightarrow f$ ist streng monoton fallend.

Beweis.

Für i) : Gelte $f'(x) > 0 \quad \forall x \in (a, b)$ und sei $a \leq x_1 < x_2 \leq b$. Anwendung des 1. MWS auf f im Intervall $[x_1, x_2]$ liefert :

$\exists \xi \in (x_1, x_2)$ mit $f(x_2) - f(x_1) = f'(\xi)(x_2 - x_1)$. Weil $f'(\xi) > 0$ und $x_2 - x_1 > 0$ ist, gilt $f(x_2) > f(x_1)$. \square

Mit Hilfe des 1. MWS lassen sich zahlreiche interessante und wichtige Abschätzungen gewinnen.

Beispiel. $1 + x < e^x < \frac{1}{1-x}$ für $x \in (0, 1)$.

Anwendung des 1. MWS auf $f(t) = e^t$ in $[0, x]$ liefert $\frac{e^x - e^0}{x} = e^\xi$ mit $0 < \xi < x$.

Weil e^ξ monoton wächst, gilt $1 = e^0 < e^\xi < e^x$ und damit

$1 < \frac{e^x - 1}{x} < e^x$ bzw. $1 + x < e^x < \frac{1}{1-x}$, weil $x \in (0, 1)$.

Beispiel. $\frac{x}{1+x} < \ln(1+x) < x$ für $x > 0$.

Anwendung des 1. MWS auf $f(t) = \ln(1+t)$ in $[0, x]$ liefert

$$\frac{\ln(1+x) - \ln 1}{x} = \frac{1}{1+\xi} \quad \text{mit } 0 < \xi < x.$$

Weil $\frac{1}{1+\xi}$ monoton fällt, gilt $1 > \frac{1}{1+\xi} > \frac{1}{1+x}$ und damit

$$\frac{1}{1+x} < \frac{\ln(1+x)}{x} < 1 \quad \text{bzw.} \quad \frac{x}{1+x} < \ln(1+x) < x, \quad \text{weil } x > 0.$$

Ohne Beweis sei folgende Erweiterung des 1. Mittelwertsatzes erwähnt

Satz. (2. Mittelwertsatz der Differentialrechnung)

Seien f und g stetig auf $[a, b]$ und differenzierbar auf (a, b) . Dann $\exists \xi \in (a, b)$ sodass

$$[f(b) - f(a)]g'(\xi) = [g(b) - g(a)]f'(\xi).$$

Ist $g'(x) \neq 0$ auf (a, b) , gilt weiters

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

.