
Differenzialrechnung
Theorie

Inhaltsverzeichnis

1	Grenzwerte	4
1.1	Grenzwerte von Folgen	4
1.2	Grenzwerte von Funktionen	8
1.3	Stetigkeit	13
2	Der Differenzialquotient	14
3	Die Ableitungsfunktion	18
3.1	Elementare Funktionen	18
3.2	Der Differenzialoperator	24
3.3	Zusammenfassung	24
4	Ableitungsregeln	26
4.1	Summenregel	26
4.2	konstante Faktoren	26
4.3	Produktregel	27
4.4	Ableitung des Kehrwerts	28
4.5	Quotientenregel	28
4.6	Kettenregel	29
4.7	Die Ableitung der Umkehrfunktion	31
4.8	Höhere Ableitungen	32
5	Stetigkeit und Differenzierbarkeit	34
5.1	Definitionslücken	34
5.2	Stetigkeit	35
5.3	Differenzierbarkeit	37
6	Monotonie	38
7	Symmetrie	42
8	Asymptotisches Verhalten	44
8.1	Ganzrationale Funktionen (Polynome)	44
8.2	Gebrochenrationale Funktionen	45
8.3	Exponentialfunktionen	46

8.4	Logarithmusfunktionen	46
8.5	Trigonometrische Funktionen	47
9	Nullstellen	48
9.1	Nullstellen ganzrationaler Funktionen	48
9.2	Nullstellen gebrochenrationaler Funktionen	50
9.3	Nullstellen von Exponential- und Logarithmusfunktionen	50
9.4	Nullstellen trigonometrischer Funktionen	51
9.5	Das Bisektionsverfahren	52
10	Die Taylor-Reihe	54
11	Extrem- und Wendepunkte	58
11.1	Begriffe	58
11.2	Die geometrische Deutung der 2. Ableitung	60
12	Kurvendiskussion ganzrationaler Funktionen	63
13	Bestimmung ganzrationaler Funktionen	68
14	Extremwertaufgaben	70
15	Funktionenscharen	76
16	Gebrochenrationale Funktionen	80
16.1	Polynomdivision	80
16.2	Kurvendiskussion	83
17	Diskussion transzendenter Funktionen	86

1 Grenzwerte

1.1 Grenzwerte von Folgen

Beispiel 1.1

$$a_n = \frac{1}{n}$$

$$1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \dots \rightarrow 0$$

monoton fallend, nach unten beschränkt, ein Häufungspunkt

a_n ist *konvergent*

Beispiel 1.2

$$a_n = n!$$

$$1, 2, 6, 24, 120, \dots \rightarrow \infty$$

monoton wachsend, unbeschränkt, kein Häufungspunkt

(a_n) ist *divergent*

Beispiel 1.3

$$a_n = \frac{2n}{n+1}$$

$$1, \frac{4}{3}, \frac{6}{4}, \frac{8}{5}, \frac{10}{6}, \dots \rightarrow 2$$

monoton wachsend, nach oben beschränkt, ein Häufungspunkt

(a_n) ist *konvergent*

Beispiel 1.4

$$a_n = (-2)^n$$

$$-2, 4, -8, 16, -32, \dots \rightarrow \{-\infty, +\infty\}$$

nicht monoton, unbeschränkt, kein Häufungspunkt

(a_n) ist *divergent*

Beispiel 1.5

$$a_n = (-1)^n \cdot \frac{n}{n+1}$$

$$-\frac{1}{2}, \frac{2}{3}, -\frac{3}{4}, \frac{4}{5}, -\frac{5}{6}, \dots \rightarrow \{-1, +1\}$$

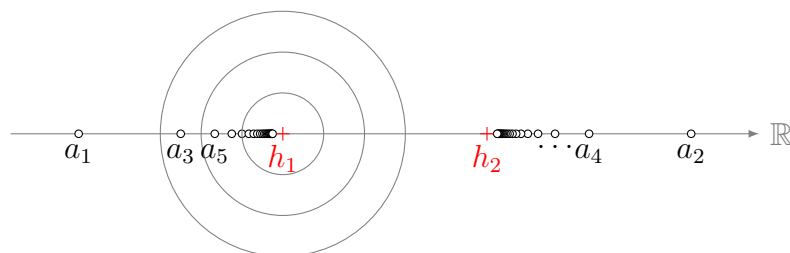
beschränkt, nicht monoton, *zwei* Häufungspunkte

(a_n) ist *divergent*

Häufungsstelle

Eine Häufungsstelle einer Folge (a_n) ist eine Zahl a mit der Eigenschaft, dass in jeder Umgebung von a unendlich viele Glieder der Folge liegen.

Visualisierungsversuch von Häufungspunkten



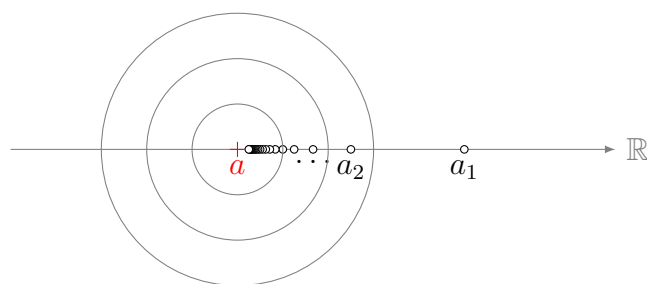
Grenzwert

Ein Grenzwert ist eine Zahl a mit der Eigenschaft, dass in jeder Umgebung von a alle bis auf endlich viele Glieder der Folge liegen.

Eine Folge mit einem Grenzwert wird *konvergent* genannt und man schreibt

$$a = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n$$

Visualisierungsversuch eines Grenzwerts



Formale Definition der Konvergenz

Eine Folge (a_n) ist konvergent mit dem Grenzwert a , wenn es für jede (noch so kleine) Zahl $\varepsilon > 0$ einen Index $n_\varepsilon \in \mathbb{N}$ gibt, so dass die Ungleichung

$$|a - a_n| < \varepsilon$$

für alle $n \geq n_\varepsilon$ erfüllt ist.

Das ε in n_ε zeigt an, dass der Index n_ε in der Regel von ε abhängig ist.

Nullfolge

Eine Folge (a_n) mit dem Grenzwert $a = 0$ heisst *Nullfolge*.

Divergenz

Eine Folge (a_n) , die nicht konvergent ist, wird *divergent* genannt.

Beispiel 1.6

Beweis der Konvergenz von Beispiel 1.1: $a_n = 1/n$

vermuteter Grenzwert: $a = 0$

Sei $\varepsilon > 0$. Jedes $n_\varepsilon \in \mathbb{N}$ mit $n_\varepsilon > 1/\varepsilon$ hat die geforderte Eigenschaft, denn:

$$|a - a_n| = \left| 0 - \frac{1}{n} \right| = \left| \frac{1}{n} \right| = \frac{1}{n} < \frac{1}{n_\varepsilon} < \frac{1}{1/\varepsilon} = \varepsilon \quad \square$$

Beispiel 1.7

Ist die Folge $a_n = 1/2^n$ konvergent?

vermuteter Grenzwert: $a = 0$

Sei $\varepsilon > 0$

Wähle n_ε so, dass $n_\varepsilon > \log_2(1/\varepsilon)$

$$|a - a_n| = \left| 0 - \frac{1}{2^n} \right| = \frac{1}{2^n} < \frac{1}{2^{n_\varepsilon}} < \frac{1}{2^{\log_2(1/\varepsilon)}} = \frac{1}{1/\varepsilon} = \varepsilon \quad \forall n > n_\varepsilon$$

\square

Reihen

Zur Erinnerung: Ist (a_n) eine beliebige Folge, so ist die durch

$$s_n = \sum_{i=1}^n a_n$$

definierte Folge (s_n) die *Teilsummenfolge* oder *Reihe* von (a_n) .

Beispiel 1.8

$$a_n = 3 + 2 \cdot n$$

$$5, 7, 9, 11, \dots \rightarrow \infty$$

Folge (a_n) ist divergent

$$s_n: 5, 12, 21, 32, \dots \rightarrow \infty$$

Reihe (s_n) ist divergent.

Beispiel 1.9

$$a_n = \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

Beispiel 1.7: Folge (a_n) konvergiert gegen 0.

$$s_n: \frac{1}{2}, \frac{3}{4}, \frac{7}{8}, \frac{15}{16}, \dots \xrightarrow{?} 1$$

Summenformel der GF: $a_1 = \frac{1}{2}, q = \frac{1}{2}$

$$s = \lim_{n \rightarrow \infty} s_n = \frac{1/2}{1 - 1/2} = 1$$

GR sind konvergent, wenn $|q| < 1$

Beispiel 1.10

$$a_n = \frac{1}{n}$$

Beispiel 1.1: (a_n) ist eine Nullfolge

$$s_n = \frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} + \frac{1}{6} + \frac{1}{7} + \frac{1}{8} + \frac{1}{9} + \frac{1}{10} + \dots + \frac{1}{n}$$

$$t_n = \frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \underbrace{\frac{1}{4} + \frac{1}{4}}_{1/2} + \underbrace{\frac{1}{8} + \frac{1}{8} + \frac{1}{8} + \frac{1}{8}}_{1/2} + \underbrace{\frac{1}{16} + \dots + \frac{1}{16}}_{1/2} + \dots + \frac{1}{n}$$

(t_n) ist offensichtlich divergent $(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \dots)$.

Nach Konstruktion: $\forall n \in \mathbb{N}$ gilt $s_n \geq t_n$

Also muss auch (s_n) divergent sein.

1.2 Grenzwerte von Funktionen

Gegeben ist eine Funktion f und eine Stelle x_0

Wir untersuchen, wie sich die Funktionswerte $f(x_n) = y_n$ verhalten, wenn x_n gegen x_0 strebt.

Beispiel 1.11

(a) $f(x) = \frac{x^2 - 1}{x - 1}$ und $x_0 = 3$

x_n	$f(x_n)$
2.9	3.9
2.99	3.99
2.999	3.999
2.9999	3.9999
↓	↓
3^-	4

x_n	$f(x_n)$
3.1	4.1
3.01	4.01
3.001	4.001
3.0001	4.0001
↓	↓
3^+	4

Grenzwert $\lim_{x \rightarrow 3} f(x) = 4$ existiert.

Funktionswert $f(x) = \frac{3^2 - 1}{3 - 1} = \frac{8}{2} = 4$ existiert

(b) $f(x) = \frac{x^2 - 1}{x - 1}$ und $x_0 = 1$

x_n	$f(x_n)$
0.9	1.9
0.99	1.99
0.999	1.999
0.9999	1.9999
↓	↓
1^-	2

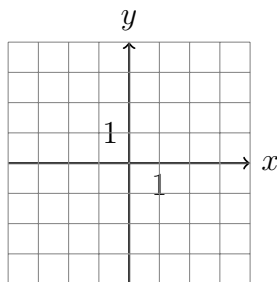
x_n	$f(x_n)$
1.1	2.1
1.01	2.01
1.001	2.001
1.0001	2.0001
↓	↓
1^+	2

Grenzwert $\lim_{x \rightarrow 1} f(x) = 2$ existiert

Funktionswert $f(1) = \frac{1^2 - 1}{1 - 1} = \frac{0}{0}$ existiert nicht!

Graph von f

Für $x \neq 1$ gilt: $f(x) = \frac{x^2 - 1}{x - 1} = \frac{(x - 1)(x + 1)}{x - 1} = x + 1 = g(x)$



Die Ersatzfunktion g ist nur an der Stelle $x = 1$ unbrauchbar.

Definition

Eine Funktion f besitzt an der Stelle x_0 den Grenzwert g , wenn für jede Folge (x_n) mit $x_n \rightarrow x_0$ die Folge (y_n) der Funktionswerte $y_n = f(x_n)$ gegen g konvergiert.

Beispiel 1.12

$$f(x) = \frac{x^3 - 4x^2 + x + 6}{x + 1}$$

$$f(-1) = \frac{-1 - 4 - 1 + 6}{0} = \frac{0}{0}$$

$0/0 \Rightarrow$ kürzen möglich?

$$\text{Horner-Schema: } \begin{array}{r|rr|rrr} & & & -4 & 1 & 6 \\ -1 & 1 & -5 & 6 & 0 & \end{array}$$

$$f(x) = \frac{(x + 1)(x^2 - 5x + 6)}{(x + 1)} = x^2 - 5x + 6 \text{ für } x \neq -1$$

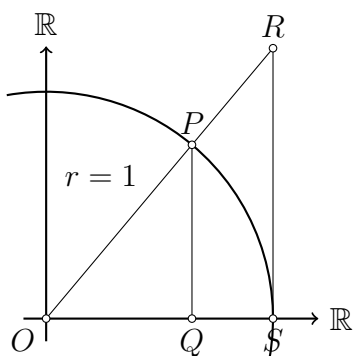
$$\lim_{x \rightarrow -1} f(x) = (-1)^2 - 5(-1) + 6 = 1 + 5 + 6 = 12$$

Beispiel 1.13

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = ?$$

x	$\sin(x)/x$	x	$\sin(x)/x$
0.1	0.998334	-0.1	0.998334
0.01	0.999983	-0.01	0.999983
0.001	0.999999	-0.001	0.999999
↓	↓	↓	↓
0^+	1	0^-	1

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = 1$$



$$A(OQP) < A(OSP) < A(OSR)$$

$$\frac{1}{2} \cos x \cdot \sin x < \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot x < \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot \tan x$$

$$\cos x \cdot \sin x < x < \frac{\sin x}{\cos x}$$

$$\cos x < \frac{x}{\sin x} < \frac{1}{\cos x}$$

$$\frac{1}{\cos x} > \frac{\sin x}{x} > \cos x$$

$x \rightarrow 0$:

$$1 \geq \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} \geq 1 \quad \Rightarrow \quad \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = 1$$

Beispiel 1.14

$$f(x) = \frac{\cos x + 1}{x - \pi}; x_0 = \pi$$

$$\text{Funktionswert: } f(\pi) = \frac{\cos \pi + 1}{\pi - \pi} = \frac{-1 + 1}{0} = \frac{0}{0}$$

Kürze mit Hilfe der Produktformel (Formelsammlung S. 99)

$$\begin{aligned} \frac{\cos x - \cos \pi}{x - \pi} &= \frac{-2 \cdot \sin([x + \pi]/2) \cdot \sin([x - \pi]/2)}{x - \pi} \\ &= \frac{-\sin([x + \pi]/2) \cdot \sin([x - \pi]/2)}{[x - \pi]/2} \\ &= -\sin([x + \pi]/2) \cdot \frac{\sin([x - \pi]/2)}{[x - \pi]/2} \end{aligned}$$

$$\text{Substitution: } \frac{x - \pi}{2} = a \quad \Leftrightarrow \quad x = 2a + \pi$$

$$x \rightarrow \pi \quad \Leftrightarrow \quad a \rightarrow 0$$

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow \pi} \frac{\cos x - \cos \pi}{x - \pi} &= - \lim_{a \rightarrow 0} \sin(2a + \pi) \frac{\sin a}{a} \\ &= -[\sin(\pi) \cdot 1] \quad (\text{Beispiel 1.13}) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Beispiel 1.15

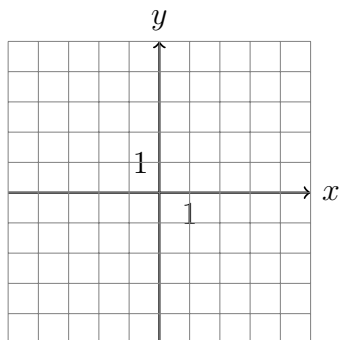
$$f(x) = \frac{x + 1}{x - 1}, x_0 = 1 \quad \Rightarrow \quad f(1) = \frac{2}{0} ?$$

x	$f(x)$	x	$f(x)$
1.1	21	0.9	-19
1.01	201	0.99	-199
1.001	2001	0.999	-1999
↓	↓	↓	↓
1^+	$+\infty$	1^-	$-\infty$

$$\lim_{x \rightarrow 1^-} f(x) = -\infty \quad \lim_{x \rightarrow 1^+} f(x) = +\infty$$

Grenzwert existiert nicht

Graph von f



f hat an der Stelle $x = 1$ einen Pol.

Asymptotisches Verhalten

Wie verhält sich $f(x)$ für grosse $|x|$?

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x+1}{x-1} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(x+1)/x}{(x-1)/x} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1+1/x}{1-1/x} = \frac{1+0}{1-0} = 1$$

$$\text{analog: } \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{x+1}{x-1} = \dots = 1$$

$y = 1$ ist die Gleichung der horizontalen Asymptote.

Beispiel 1.16

$$f(x) = \frac{x^2+1}{x+1}, x_0 = -1 \Rightarrow f(-1) = \frac{2}{0} ?$$

$$\text{Polynomdivision (Horner): } \begin{array}{r|rr} & & 0 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & 2 \end{array}$$

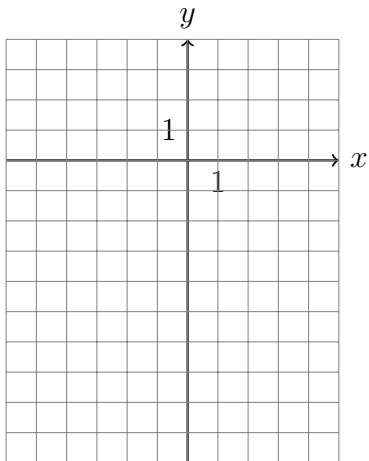
$$\frac{x^2+1}{x+1} = x-1 + \frac{2}{x+1}$$

$$\lim_{x \rightarrow -1^-} f(x) = -\infty \text{ und } \lim_{x \rightarrow -1^+} f(x) = +\infty$$

Für grosse $|x|$ gilt $f(x) \approx x-1$

$g = x-1$ ist eine Ersatzfunktion für f

Graph von f



1.3 Stetigkeit

Eine Funktion f ist an der Stelle x_0 *stetig*, wenn gilt:

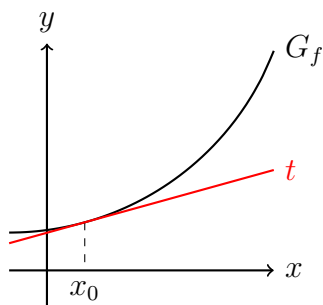
$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = f(x_0)$$

wobei alle Ausdrücke in der Gleichung definiert sein müssen.

2 Der Differenzialquotient

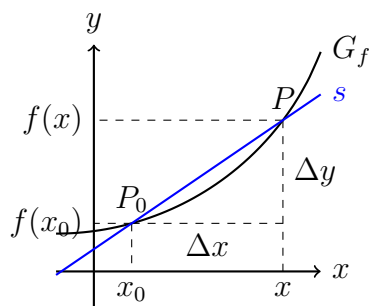
Das Tangentenproblem

Gegeben: eine geeignete Funktion f und eine Stelle x_0



Gesucht: Steigung der Tangente von G_f an der Stelle x_0 .

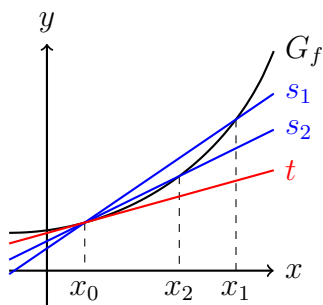
Differenzenquotient



Steigung der Sekante durch P_0 und P :

$$m_s = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \quad (\text{Differenzenquotient})$$

Der Differenzialquotient



Existiert der Grenzwert $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$

so wird dieser *Differenzialquotient* oder *Ableitung* der Funktion f an der Stelle x_0 genannt und mit $f'(x_0)$ abgekürzt.

Geometrische Deutung

Der Grenzwert

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$$

ist gleich der Steigung der Tangente an den Graphen von f an der Stelle x_0 .

Aus praktischen Gründen ersetzen wir in der obigen Formel $x = x_0 + h$ und schreiben

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

Beispiel 2.1

Gesucht: Gleichung der Tangente und Normale von $f(x) = x^2$ an der Stelle $x_0 = 1$.

$$\begin{aligned} f'(1) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(1+h) - f(1)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{(1+h)^2 - 1^2}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1 + 2h + h^2 - 1}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{h(2+h)}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} (2+h) = 2 \end{aligned}$$

Bei $x_0 = 1$ hat G_f eine Tangente mit der Steigung $m = 2$.

Gleichung der Tangente: $t: y = m_t x + q$

Funktionswert: $y = f(1) = 1$

Steigung: $m_t = 2$

$$P(1, 1) \in t: 1 = 2 \cdot 1 + q \quad \Rightarrow \quad q = -1$$

$$\Rightarrow t: y = 2x - 1$$

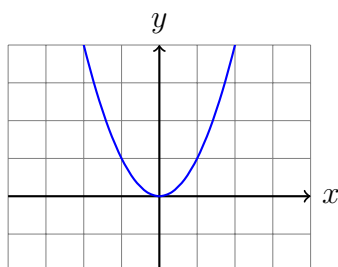
Eine *Normale* ist eine Gerade, die senkrecht zu einer anderen Gerade steht. Hier steht die Normale senkrecht zur Tangente und geht ebenfalls durch den Kurvenpunkt $(x_0, f(x_0))$.

Gleichung der Normalen: $n: y = m_n x + q$

$$\text{Steigung: } m_n = -\frac{1}{m_t} = -\frac{1}{2}$$

$$P(1, 1) \in n: 1 = -\frac{1}{2} \cdot 1 + q \quad \Rightarrow \quad q = \frac{3}{2}$$

$$\Rightarrow n: y = -\frac{1}{2}x + \frac{3}{2}$$



Beispiel 2.2

Gesucht: Gleichung der Tangente und Normale von $f(x) = 1/x$ an der Stelle $x_0 = 2$.

$$\begin{aligned}f'(2) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(2+h) - f(2)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} \left[\frac{1}{2+h} - \frac{1}{2} \right] \\&= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} \left[\frac{2 \cdot 1}{2(2+h)} - \frac{1 \cdot (2+h)}{2(2+h)} \right] = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} \left[\frac{2-2-h}{2(2+h)} \right] \\&= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} \left[\frac{-h}{2(2+h)} \right] = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{-1}{2(2+h)} = -\frac{1}{4}\end{aligned}$$

Gleichung der Tangente: $t: y = m_t x + q$

Funktionswert: $y = f(2) = \frac{1}{2}$

Steigung: $m_t = -\frac{1}{4}$

$$P\left(2, \frac{1}{2}\right) \in t: \frac{1}{2} = -\frac{1}{4} \cdot 2 + q \Rightarrow q = 1$$

$$\Rightarrow t: y = -\frac{1}{4}x + 1$$

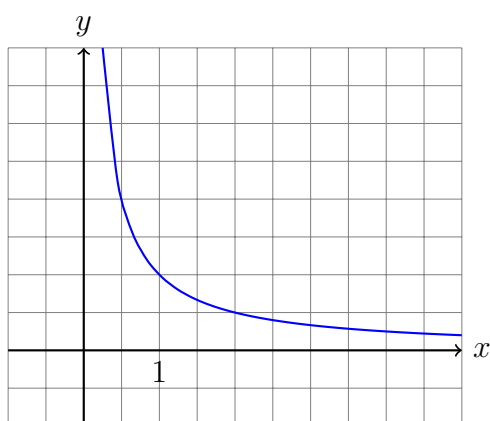
Gleichung der Normalen: $n: y = m_n x + q$

Steigung: $m_n = -\frac{1}{m_t} = 4$

$$P\left(2, \frac{1}{2}\right) \in n: \frac{1}{2} = 4 \cdot 2 + q \Rightarrow q = -7.5$$

$$\Rightarrow n: y = 4x - 7.5$$

Graph:



Beispiel 2.3

Gesucht: Gleichung der Tangente und Normale von $f(x) = \sqrt{x}$ an der Stelle $x_0 = 1$.

$$\begin{aligned} f'(1) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(1+h) - f(1)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sqrt{1+h} - 1}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{(\sqrt{1+h} - 1)(\sqrt{1+h} + 1)}{h(\sqrt{1+h} + 1)} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1+h-1}{h(\sqrt{1+h} + 1)} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{\sqrt{1+h} + 1} \\ &= \frac{1}{2} \end{aligned}$$

Gleichung der Tangente: $t: y = m_t x + q$

Funktionswert: $y = f(1) = \sqrt{1} = 1$

Steigung: $m_t = \frac{1}{2}$

$$P(1, 1) \in t: 1 = \frac{1}{2} \cdot 1 + q \quad \Rightarrow \quad q = \frac{1}{2}$$

$$\Rightarrow t: y = \frac{1}{2}x + \frac{1}{2}$$

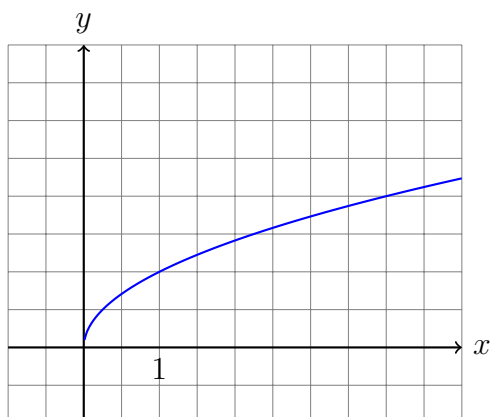
Gleichung der Normalen: $n: y = m_n x + q$

Steigung: $m_n = -\frac{1}{m_t} = -2$

$$P(1, 1) \in n: 1 = -2 \cdot 1 + q \quad \Rightarrow \quad q = 3$$

$$\Rightarrow n: y = -2x + 3$$

Graph:



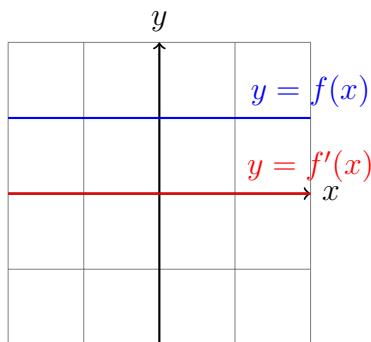
3 Die Ableitungsfunktion

3.1 Elementare Funktionen

Die konstante Funktion $f(x) = c$

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

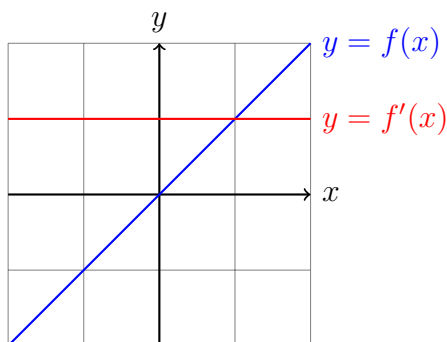
$$[c]' = 0$$



Die Identität $f(x) = x$

$$\begin{aligned} f'(x) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{x+h-x}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{h}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} 1 = 1 \end{aligned}$$

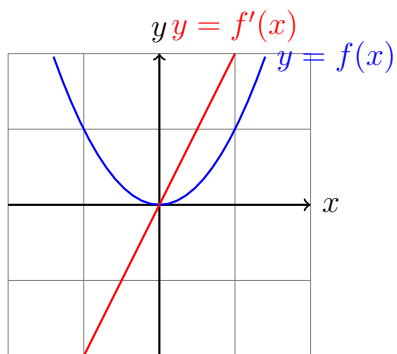
$$[x]' = 1$$



Die quadratische Funktion $f(x) = x^2$

$$\begin{aligned} f'(x) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{(x+h)^2 - x^2}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{x^2 + 2xh + h^2 - x^2}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{2xh + h^2}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{h(2x+h)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} (2x+h) = 2x \end{aligned}$$

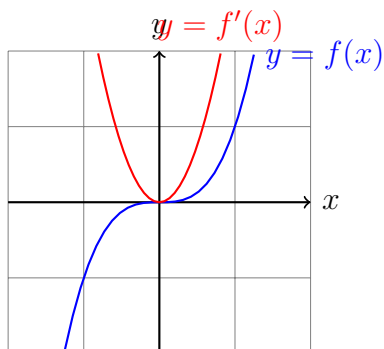
$$[x^2]' = 2x$$



Die kubische Funktion $f(x) = x^3$

$$\begin{aligned} f'(x) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{(x+h)^3 - x^3}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{x^3 + 3x^2h + 3xh^2 + h^3 - x^3}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{3x^2h + 3xh^2 + h^3}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{h(3x^2 + 3xh + h^2)}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} (3x^2 + 3xh + h^2) = 3x^2 \end{aligned}$$

$$[x^3]' = 3x^2$$



Die quartische Funktion $f(x) = x^4$

Vermutung: $[x^4]' = 4x^3$

Die allgemeine Potenzfunktion $f(x) = x^n$

$$[x^n]' = n \cdot x^{n-1}$$

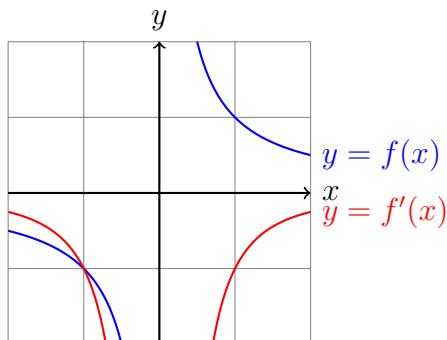
Beweis:

$$\begin{aligned} f'(x) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{(x+h)^n - x^n}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} [(x+h)^n - x^n] \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} \left[\binom{n}{0} x^n + \binom{n}{1} x^{n-1} h + \binom{n}{2} x^{n-2} h^2 + \dots + \binom{n}{n} h^n - x^n \right] \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} \left[n x^{n-1} h + \binom{n}{2} x^{n-2} h^2 + \dots + \binom{n}{n} h^n \right] \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \left[n x^{n-1} + \binom{n}{2} x^{n-2} h + \dots + \binom{n}{n} h^{n-1} \right] \\ &= n x^{n-1} \end{aligned}$$

Die reziproke Funktion $f(x) = 1/x$

$$\begin{aligned} f'(x) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} \left[\frac{1}{x+h} - \frac{1}{x} \right] \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} \left[\frac{x}{x(x+h)} - \frac{x+h}{x(x+h)} \right] = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} \cdot \frac{x - x - h}{x(x+h)} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} \cdot \frac{-h}{x(x+h)} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{-1}{x(x+h)} = \frac{-1}{x^2} \end{aligned}$$

$$\left[\frac{1}{x} \right]' = \frac{-1}{x^2}$$



Die Wurzelfunktion $f(x) = \sqrt{x}$

$$\begin{aligned} f'(x) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sqrt{x+h} - \sqrt{x}}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{(\sqrt{x+h} - \sqrt{x})(\sqrt{x+h} + \sqrt{x})}{h(\sqrt{x+h} + \sqrt{x})} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{x+h-x}{h(\sqrt{x+h} + \sqrt{x})} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{\sqrt{x+h} + \sqrt{x}} = \frac{1}{\sqrt{x} + \sqrt{x}} = \frac{1}{2\sqrt{x}} \end{aligned}$$

$$[\sqrt{x}]' = \frac{1}{2\sqrt{x}}$$

Verallgemeinerung

$$[x^a]' = a \cdot x^{a-1} \text{ (Potenzregel)}$$

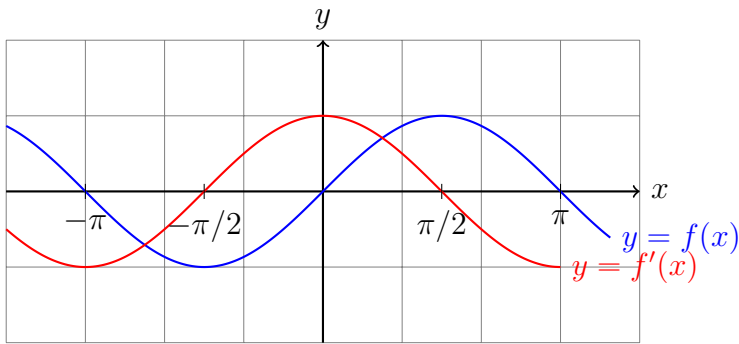
Dadurch lassen sich (b)–(h) verallgemeinern:

- $[x]' = [x^1]' = 1 \cdot x^0 = 1 \cdot 1 = 1$
- $[x^2]' = 2 \cdot x^1 = 2 \cdot x$
- $[x^7]' = 7 \cdot x^6$
- $[1/x]' = [x^{-1}]' = -1 \cdot x^{-2} = -1/x^2$
- $[\sqrt{x}]' = [x^{\frac{1}{2}}]' = \frac{1}{2} \cdot x^{-\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{x^{\frac{1}{2}}} = 1/(2\sqrt{x})$

Die Sinusfunktion $f(x) = \sin x$

$$\begin{aligned} f'(x) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sin(x+h) - \sin x}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sin x \cdot \cos h + \cos x \cdot \sin h - \sin x}{h} \quad (\text{FTB S. 99}) \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sin x \cdot (\cos h - 1)}{h} + \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\cos x \cdot \sin h}{h} \quad (\text{FTB S. 61}) \\ &= \sin x \cdot \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\cos h - 1}{h} + \cos x \cdot \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sin h}{h} \\ &= \sin x \cdot 0 + \cos x \cdot 1 = \cos x \quad (\text{FTB S. 62}) \end{aligned}$$

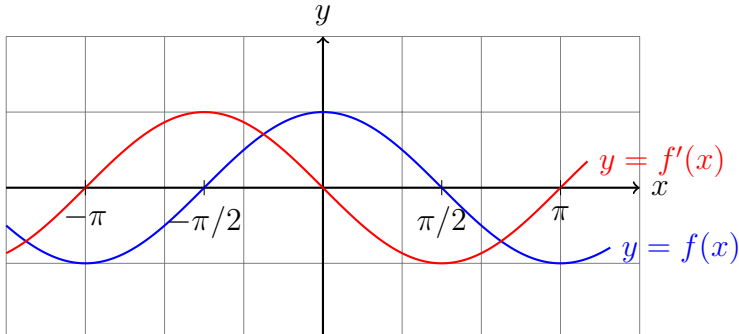
$$[\sin x]' = \cos x$$



Die Cosinusfunktion $f(x) = \cos x$

$$\begin{aligned}
 f'(x) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\cos(x+h) - \cos x}{h} \\
 &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\cos x \cdot \cos h - \sin x \cdot \sin h - \cos x}{h} \quad (\text{FTB S. 99}) \\
 &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\cos x(\cos h - 1)}{h} - \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sin x \cdot \sin h}{h} \quad (\text{FTB S. 61}) \\
 &= \cos x \cdot \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\cos h - 1}{h} - \sin x \cdot \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sin h}{h} \quad (\text{FTB S. 61}) \\
 &= \cos x \cdot 0 - \sin x \cdot 1 = -\sin x \quad (\text{FTB S. 62})
 \end{aligned}$$

$$[\cos x]' = -\sin x$$

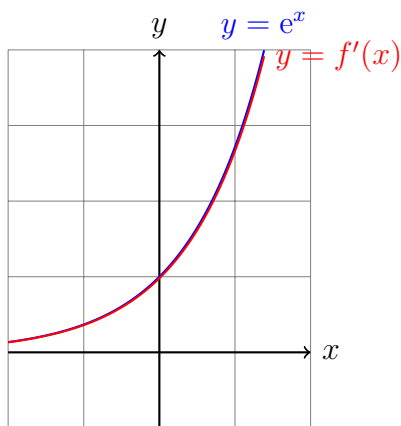


Die Exponentialfunktion $f(x) = e^x$

($e \approx 2.71828$ Eulersche Zahl)

$$\begin{aligned}
 f'(x) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{e^{x+h} - e^x}{h} \\
 &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{e^x \cdot e^h - e^x}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{e^x(e^h - 1)}{h} \\
 &= e^x \cdot \lim_{h \rightarrow 0} \frac{e^h - 1}{h} = e^x \cdot 1 = e^x \quad (\text{FTB S. 62})
 \end{aligned}$$

$$[e^x]' = e^x$$



Die Logarithmusfunktion $f(x) = \ln x$

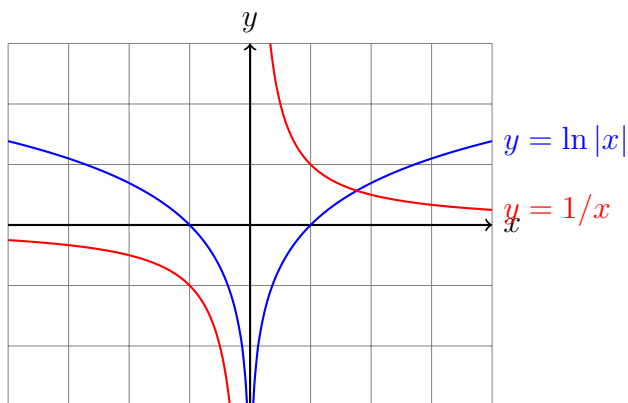
$$f'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\ln(x+h) - \ln x}{h}$$

$$= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\ln \left[\frac{(x+h)}{x} \right]}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\ln(1+h/x)}{h}$$

Substitution: $h = k \cdot x$, wobei $h \rightarrow 0 \Leftrightarrow k \rightarrow 0$

$$= \lim_{k \rightarrow 0} \frac{\ln(1+k)}{kx} = \frac{1}{x} \cdot \underbrace{\lim_{k \rightarrow 0} \frac{\ln(1+k)}{k}}_1 = \frac{1}{x} \quad (\text{FTB S. 62})$$

$$[\ln x]' = 1/x$$



Es gilt sogar: $[\ln|x|]' = 1/x$

3.2 Der Differenzialoperator

Ist eine Funktion f für jedes x aus ihrem Definitionsbereich differenzierbar, so wird durch f' eine neue Funktion definiert:

Funktion	$x \rightarrow f(x)$
Ableitungsfunktion	$x \rightarrow f'(x)$

Diese Tabelle können wir auch so interpretieren, dass der Funktion f , eine Funktion f' zugeordnet wird. Diese „Meta-Funktion“, welche einer Funktion ihre Ableitungsfunktion zuordnet, wird *Differentialoperator* genannt und so dargestellt:

$$\frac{d}{dx} : f \rightarrow f' \quad \text{oder} \quad \frac{d}{dx} f = f'$$

Beispiel: $\frac{d}{dx} \cos x = -\sin x$

3.3 Zusammenfassung

$f(x)$	$f'(x)$
c (const.)	0
x	1
\sqrt{x}	$1/(2\sqrt{x}) \quad (x > 0)$
$1/x$	$-1/x^2 \quad (x \neq 0)$
$x^r \quad (r \in \mathbb{R})$	$r \cdot x^{r-1}$
$\sin x$	$\cos x$
$\cos x$	$-\sin x$
e^x	e^x
$\ln x $	$1/x$

Mehr Ableitungsfunktionen erhalten wir aus den Ableitungsregeln.

4 Ableitungsregeln

Wie werden Summen, Produkte, Quotienten, und Verkettungen von Funktionen differenziert?

4.1 Summenregel

Sind die Funktionen f und g an der Stelle x differenzierbar, dann gilt:

$$[f(x) + g(x)]' = f'(x) + g'(x).$$

Beweis

$$\begin{aligned} [f(x) + g(x)]' &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{[f(x+h) + g(x+h)] - [f(x) + g(x)]}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x) + g(x+h) - g(x)}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} + \lim_{h \rightarrow 0} \frac{g(x+h) - g(x)}{h} \\ &= f'(x) + g'(x) \end{aligned}$$

Beispiel 4.1

$$[x^5 + \sin x]' = [x^5]' + [\sin x]' = 5x^4 + \cos x$$

4.2 konstante Faktoren

Ist c eine reelle Zahl und die Funktion f an der Stelle x differenzierbar, dann gilt:

$$[c \cdot f(x)]' = c \cdot f'(x).$$

Beweis

$$\begin{aligned} [c \cdot f(x)]' &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{c \cdot f(x+h) - c \cdot f(x)}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{c \cdot [f(x+h) - f(x)]}{h} \\ &= c \cdot \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} \\ &= c \cdot f'(x) \end{aligned}$$

Beispiel 4.2

$$[5 \cdot x^3]' = 5 \cdot [x^3]' = 5 \cdot 3x^2 = 15x^2$$

Beispiel 4.3

$$[\log_a x]' = \left[\frac{\ln x}{\ln a} \right]' = \left[\frac{1}{\ln a} \cdot \ln x \right]' = \frac{1}{\ln a} \cdot [\ln x]' = \frac{1}{\ln a} \cdot \frac{1}{x}$$

4.3 Produktregel

Sind die Funktionen f und g an der Stelle x differenzierbar, dann gilt

$$[f(x) \cdot g(x)]' = f'(x) \cdot g(x) + f(x) \cdot g'(x).$$

Beweis

$$\begin{aligned} [f(x) \cdot g(x)]' &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h)g(x+h) - f(x)g(x)}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h)g(x+h) - f(x)g(x+h) + f(x)g(x+h) - f(x)g(x)}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{[f(x+h) - f(x)] \cdot g(x+h) + f(x) \cdot [g(x+h) - g(x)]}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \left[\frac{f(x+h) - f(x)}{h} \cdot g(x+h) \right] + \lim_{h \rightarrow 0} \left[f(x) \cdot \frac{g(x+h) - g(x)}{h} \right] \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} \cdot \lim_{h \rightarrow 0} g(x+h) + f(x) \cdot \lim_{h \rightarrow 0} \frac{g(x+h) - g(x)}{h} \\ &= f'(x) \cdot g(x) + f(x) \cdot g'(x) \end{aligned}$$

Beispiel 4.4

$$\begin{aligned} [x^2 \cdot \cos x]' &= [x^2]' \cdot \cos x + x^2 \cdot [\cos x]' \\ &= 2x \cos x + x^2(-\sin x) = 2x \cos x - x^2 \sin x \end{aligned}$$

Beispiel 4.5

clever:

$$[x^3 \cdot x^5]' = [x^8]' = 8x^7$$

naiv und falsch:

$$[x^3 \cdot x^5]' \neq [x^3]' \cdot [x^5]' = 3x^2 \cdot 5x^4 = 15x^6 \quad \text{falsch!}$$

umständlich aber korrekt:

$$\begin{aligned} [x^3 \cdot x^5]' &= [x^3]' \cdot x^5 + x^3 \cdot [x^5]' = 3x^2 \cdot x^5 + x^3 \cdot 5x^4 \\ &= 3x^7 + 5x^7 = 8x^7 \end{aligned}$$

4.4 Ableitung des Kehrwerts

Ist die Funktion g an der Stelle x differenzierbar und $g(x) \neq 0$, dann gilt

$$\left[\frac{1}{g(x)} \right]' = -\frac{g'(x)}{g^2(x)}.$$

Beweis

$$\begin{aligned} \left[\frac{1}{g(x)} \right]' &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} \left[\frac{1}{g(x+h)} - \frac{1}{g(x)} \right] \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \left[\frac{1}{h} \cdot \frac{g(x) - g(x+h)}{g(x+h) \cdot g(x)} \right] \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \left[\frac{-[g(x+h) - g(x)]}{h} \cdot \frac{1}{g(x+h) \cdot g(x)} \right] \\ &= -\lim_{h \rightarrow 0} \frac{g(x+h) - g(x)}{h} \cdot \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{g(x+h) \cdot g(x)} \\ &= -g'(x) \cdot \frac{1}{g(x)^2} = -\frac{g'(x)}{g(x)^2} \end{aligned}$$

4.5 Quotientenregel

Sind die Funktionen f und g an der Stelle x differenzierbar und ist $g(x) \neq 0$, dann gilt

$$\left[\frac{f(x)}{g(x)} \right]' = \frac{f'(x) \cdot g(x) - f(x) \cdot g'(x)}{g(x)^2}$$

Beweis

$$\begin{aligned} \left[\frac{f(x)}{g(x)} \right]' &= \left[f(x) \cdot \frac{1}{g(x)} \right]' \\ &= f'(x) \cdot \frac{1}{g(x)} + f(x) \cdot \left[\frac{1}{g(x)} \right]' \quad (\text{Produktregel}) \\ &= f'(x) \cdot \frac{1}{g(x)} + f(x) \cdot \left(-\frac{g'(x)}{g(x)^2} \right) \quad (\text{Kehrwert-Regel}) \\ &= f'(x) \cdot \frac{g(x)}{g(x)^2} - f(x) \cdot \frac{g'(x)}{g(x)^2} \\ &= \frac{f'(x) \cdot g(x) - f(x) \cdot g'(x)}{g(x)^2} \end{aligned}$$

„direkter“ Beweis

$$\begin{aligned} \left[\frac{f(x)}{g(x)} \right]' &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\frac{f(x+h)}{g(x+h)} - \frac{f(x)}{g(x)}}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) \cdot g(x) - f(x) \cdot g(x+h)}{g(x+h) \cdot g(x) \cdot h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) \cdot g(x) - f(x) \cdot g(x) + f(x) \cdot g(x) - f(x) \cdot g(x+h)}{g(x+h) \cdot g(x) \cdot h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{[f(x+h) - f(x)] \cdot g(x) - f(x) \cdot [g(x+h) - g(x)]}{g(x+h) \cdot g(x) \cdot h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \left(\frac{f(x+h) - f(x)}{h} \cdot \frac{g(x)}{g(x+h) \cdot g(x)} \right) \\ &\quad - \lim_{h \rightarrow 0} \left(\frac{f(x)}{g(x+h) \cdot g(x)} \cdot \frac{g(x+h) - g(x)}{h} \right) \\ &= \frac{f'(x) \cdot g(x) - f(x) \cdot g'(x)}{g(x)^2} \end{aligned}$$

Beispiel 4.6

$$\begin{aligned} [\tan x]' &= \left[\frac{\sin x}{\cos x} \right]' = \frac{\cos x \cos x - \sin x(-\sin x)}{\cos^2 x} \\ &= \frac{\cos^2 x + \sin^2 x}{\cos^2 x} = \frac{1}{\cos^2 x} \end{aligned}$$

oder

$$[\tan x]' = \dots = \frac{\cos^2 x + \sin^2 x}{\cos^2 x} = \frac{\cos^2 x}{\cos^2 x} + \frac{\sin^2 x}{\cos^2 x} = 1 + \tan^2 x$$

4.6 Kettenregel

Ist die Funktion g an der Stelle x differenzierbar und ist die Funktion f an der Stelle $y = g(x)$ differenzierbar, so gilt:

$$[f(g(x))]' = f'(g(x)) \cdot g'(x)$$

Beweis

Vorbereitungen:

$$\text{Setze } k \stackrel{(*)}{=} g(x+h) - g(x) \Leftrightarrow g(x+h) \stackrel{(**)}{=} g(x) + k$$

Da g an der Stelle x differenzierbar ist, gilt

$$\lim_{h \rightarrow 0} k = \lim_{h \rightarrow 0} [g(x+h) - g(x)] = 0$$

Wenn h gegen 0 konvergiert, dann konvergiert k gegen 0. (***)

$$\begin{aligned}
[f(g(x))]' &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(g(x+h)) - f(g(x))}{h} \\
&= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(g(x)+k) - f(g(x))}{h} \quad \text{mit (**)} \\
&= \lim_{h \rightarrow 0} \left[\frac{f(g(x)+k) - f(g(x))}{k} \cdot \frac{k}{h} \right] \quad \text{multipliziere mit } 1 = \frac{k}{k} \\
&= \lim_{h \rightarrow 0} \left[\frac{f(g(x)+k) - f(g(x))}{k} \cdot \frac{g(x+h) - g(x)}{h} \right] \quad \text{mit (*)} \\
&= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(g(x)+k) - f(g(x))}{k} \cdot \lim_{h \rightarrow 0} \frac{g(x+h) - g(x)}{h} \\
&= \lim_{k \rightarrow 0} \frac{f(g(x)+k) - f(g(x))}{k} \cdot \lim_{h \rightarrow 0} \frac{g(x+h) - g(x)}{h} \quad \text{mit (***)} \\
&= f'(g(x)) \cdot g'(x)
\end{aligned}$$

Beispiel 4.7

$$[\sin(x^2)]' = \dots$$

innere Funktion: $g(x) = x^2$
 $g'(x) = 2x$

äussere Funktion: $f(y) = \sin(y)$ mit $y = g(x) = x^2$
 $f'(y) = \cos(y)$

$$\dots = \cos(y) \cdot 2x = 2x \cos(x^2)$$

Beispiel 4.8

$$[\sin^2 x]' = \dots$$

Zur Erinnerung: $\sin^2 x$ ist eine Kurzschreibweise für $(\sin(x))^2$.

innere Funktion: $g(x) = \sin x$
 $g'(x) = \cos x$

äussere Funktion: $f(y) = y^2$ mit $y = \sin x$
 $f'(y) = 2y$

$$\dots = 2y \cdot \cos x = 2 \sin x \cdot \cos x$$

Beispiel 4.9

$$[a^x]' = [(e^{\ln a})^x]' = [e^{\ln a \cdot x}]' = \dots$$

innere Funktion: $g(x) = \ln a \cdot x$
 $g'(x) = \ln a$

äußere Funktion: $f(y) = e^y$ mit $y = \ln a \cdot x$
 $f'(y) = e^y$

$$\dots = e^y \cdot \ln a = e^{\ln a \cdot x} \cdot \ln a = (e^{\ln a})^x \cdot \ln a = \ln a \cdot a^x$$

Beispiel 4.10

$$[\ln(\ln(x))]' = \dots$$

innere Funktion: $g(x) = \ln x$
 $g'(x) = 1/x$

äußere Funktion: $f(y) = \ln y$ mit $y = \ln x$
 $f'(y) = 1/y$

$$\dots = \frac{1}{x} \cdot \frac{1}{y} = \frac{1}{x} \cdot \frac{1}{\ln x} = \frac{1}{x \ln x}$$

4.7 Die Ableitung der Umkehrfunktion

Ist f^{-1} die Umkehrfunktion von f , so gilt:

$$f(f^{-1}(x)) = x.$$

Nun leitet man die linke Seite (Kettenregel) und die rechte Seite der Gleichung ab:

$$f'(f^{-1}(x)) \cdot (f^{-1})'(x) = 1$$

und löst die Gleichung algebraisch nach $(f^{-1})'(x)$ auf:

$$(f^{-1})'(x) = \frac{1}{f'(f^{-1}(x))}$$

Beispiel 4.11

$$f(x) = y = \ln x$$

Umkehrfunktion: $f^{-1}(y) = e^y$
 $(f^{-1})'(y) = e^y$

$$[\ln x]' = \frac{1}{e^y} = \frac{1}{e^{\ln x}} = \frac{1}{x} \quad (x > 0)$$

Beispiel 4.12

$$f(x) = y = \sqrt[n]{x} = x^{1/n}$$

$$\begin{aligned} \text{Umkehrfunktion: } f^{-1}(y) &= y^n \\ (f^{-1})'(y) &= n \cdot y^{n-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [\sqrt[n]{x}]' &= \frac{1}{n \cdot y^{n-1}} = \frac{1}{n \cdot (x^{1/n})^{n-1}} \\ &= \frac{1}{n \cdot x^{(n-1)/n}} = \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{x^{1-1/n}} = \frac{1}{n} \cdot x^{1/n-1} \quad (x \neq 0) \end{aligned}$$

Die Potenzregel gilt also definitiv auch für rationale Exponenten.

Beispiel 4.13

$$f(x) = y = \arcsin x$$

$$\begin{aligned} \text{Umkehrfunktion: } f^{-1}(y) &= \sin y \\ (f^{-1})'(y) &= \cos y \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [\arcsin(x)]' &= \frac{1}{\cos y} = \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2(y)}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2(\arcsin(x))}} = \frac{1}{\sqrt{1 - x^2}} \quad (-1 < x < 1) \end{aligned}$$

4.8 Höhere Ableitungen

Leitet man die Ableitung einer Funktion ein zweites Mal ab, so spricht man von der zweiten Ableitung. Analog wird die dritte, vierte, ..., n -te Ableitung definiert.

- Statt $(f')'$ schreibt man f'' oder $\frac{d^2 f}{dx^2}$
- Statt $((f')')'$ schreibt man f''' oder $\frac{d^3 f}{dx^3}$
- Statt $((((f')')')')$ schreibt man $f^{(4)}$ oder $\frac{d^4 f}{dx^4}$
- Statt $(((((f')')')')')$ schreibt man $f^{(5)}$ oder $\frac{d^5 f}{dx^5}$
- usw.

Beispiel 4.14

$$\frac{d^3}{dx^3}(e^{2x}) = \frac{d^2}{dx^2}(2e^{2x}) = \frac{d}{dx}(4e^{2x}) = 8e^{2x}$$

Beispiel 4.15

$$\begin{aligned}(\sin x)^{(9)} &= (\cos x)^{(8)} = (-\sin x)^{(7)} = (-\cos x)^{(6)} = (\sin x)^{(5)} \\ &= (\cos x)^{(4)} = (-\sin x)^{(3)} = (-\cos x)^{(2)} = (\sin x)' \\ &= \cos x\end{aligned}$$

5 Stetigkeit und Differenzierbarkeit

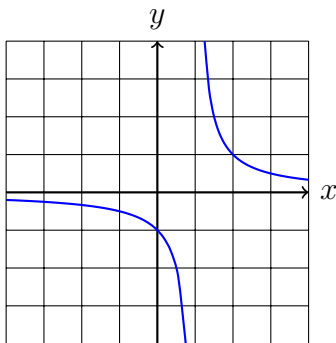
5.1 Definitionslücken

Ist eine Funktion f an einer einzelnen Stelle x_0 nicht definiert, so spricht man von einer *Definitionslücke*.

Im „Schulalltag“ entstehen Definitionslücken an den Stellen, wo man durch Null dividiert.

Beispiel 5.1

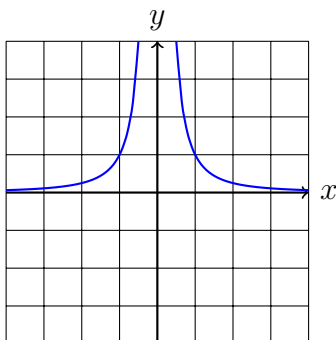
$$f(x) = \frac{1}{x-1}$$



$x = 1$ ist Polstelle mit Vorzeichenwechsel

Beispiel 5.2

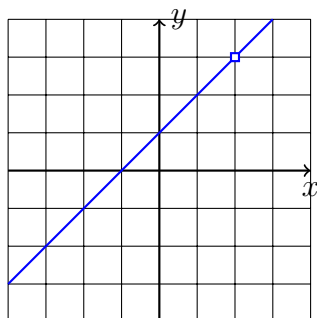
$$f(x) = \frac{1}{x^2}$$



$x = 0$ ist Polstelle ohne Vorzeichenwechsel

Beispiel 5.3

$$f(x) = \frac{(x-2)(x+1)}{x-2} \stackrel{*}{=} x+1 \quad [* \text{ nur erlaubt, wenn } x \neq 2]$$



$x = 2$ ist eine stetig behebbare Definitionslücke.

5.2 Stetigkeit

Anschaulich

Eine Funktion f ist an einer Stelle x_0 *stetig*, wenn der Graph von f in einer Umgebung von x_0 ohne Unterbruch gezeichnet werden kann.

Achtung: Diese Beschreibung kann in einigen Fällen irreführend sein (siehe Beispiel 5.5).

Formal (Limeskriterium)

Eine Funktion f ist an der Stelle x_0 stetig, wenn der Funktionswert und der Grenzwert an der Stelle x_0 existieren und übereinstimmen; d. h. wenn

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = f(x_0)$$

Eine Funktion ist auf einem Intervall I stetig, wenn sie an jeder Stelle des Intervalls I stetig ist.

Bemerkung

Fordert man nur, dass an der Stelle x_0 der links- oder der rechtsseitige Grenzwert

$$\lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x) = f(x_0) \quad \text{bzw.} \quad \lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x) = f(x_0)$$

existiert, so spricht man von *links-* bzw. *rechtsseitiger* Stetigkeit.

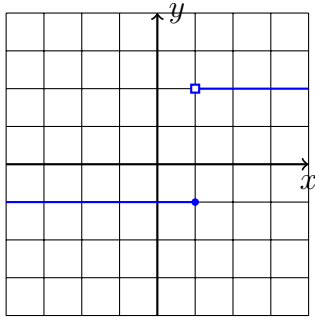
Beispiel:

$f(x) = \sqrt{x}$ ist an der Stelle $x_0 = 0$ rechtsseitig stetig, denn:

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) = \lim_{x \rightarrow 0^+} \sqrt{x} = 0 = f(0).$$

Beispiel 5.4

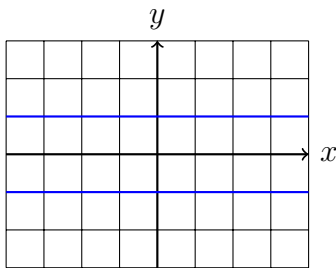
$$f(x) = \begin{cases} -1 & \text{wenn } x \leq 1 \\ 2 & \text{sonst} \end{cases}$$



f ist an der Stelle $x = 1$ nicht stetig. ($x = 1$ ist *Sprungstelle*)

Beispiel 5.5

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } x \in \mathbb{Q} \\ -1 & \text{wenn } x \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q} \end{cases}$$



f ist an keiner Stelle stetig!

Vorsicht

Die Funktion $f(x) = 1/x$ ist für jedes $x \in D$ stetig!

f ist für $x = 0$ bloss nicht definiert.

Eine Auswahl stetiger Funktionen

- Potenzfunktionen: x^k , $k \in \mathbb{Z}$
- Trigonometrische Funktionen: $\sin(x)$, $\cos(x)$, $\tan(x)$
- Exponentialfunktionen: a^x
- Logarithmusfunktionen: $\log_a x$

Eigenschaften

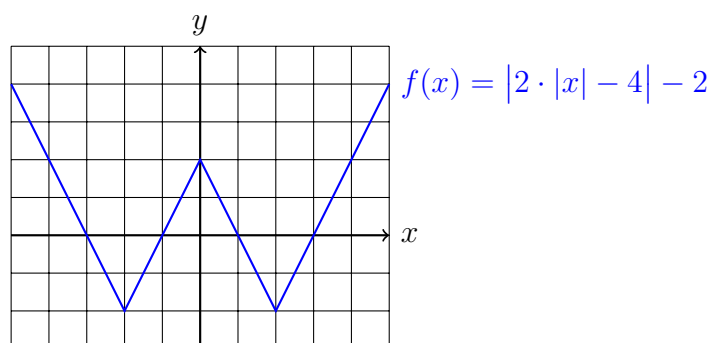
Sind die Funktionen f und g auf einem gemeinsamen Definitionsbereich stetig, dann gilt:

- $f + g$ ist stetig
- $f - g$ ist stetig
- $f \cdot g$ ist stetig
- f/g ist stetig
- $f \circ g$ ist stetig

5.3 Differenzierbarkeit

Anschaulich

Eine Funktion f ist an der Stelle x_0 differenzierbar, wenn dort (eindeutig) die Tangente an den Graphen gezeichnet werden kann.



f ist an den Stellen $x = -2$, $x = 0$ und $x = 2$ nicht differenzierbar.

Formal

Eine Funktion f ist an der Stelle x_0 differenzierbar, wenn der Grenzwert

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

existiert.

Eine Funktion ist auf dem Intervall $I = (a, b)$ differenzierbar, wenn sie an *jeder* Stelle $x \in I$ differenzierbar ist.

Analog zur links- und rechtssetigen Stetigkeit werden links- und rechtssetige Differenzierbarkeit definiert.

Differenzierbarkeit und Stetigkeit

Wenn eine Funktion f an der Stelle x_0 differenzierbar ist, dann ist sie dort auch immer stetig. Die Umkehrung gilt nicht, wie das Beispiel der Funktion $f(x) = |x|$ an der Stelle $x = 0$ zeigt.

6 Monotonie

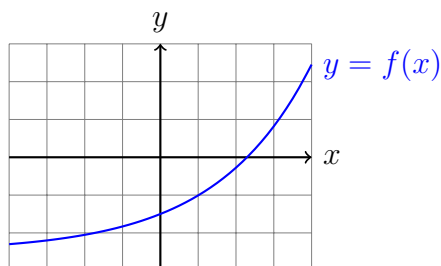
Definitionen

Ist die Funktion f auf einem Intervall I definiert, so heisst f

- *monoton wachsend*, wenn $\forall x_1, x_2 \in I$ mit $x_1 < x_2$ die Ungleichung $f(x_1) \leq f(x_2)$ erfüllt ist.
- *monoton fallend*, wenn $\forall x_1, x_2 \in I$ mit $x_1 < x_2$ die Ungleichung $f(x_1) \geq f(x_2)$ erfüllt ist.
- *monoton*, wenn f auf dem Intervall I entweder *monoton wachsend* oder *monoton fallend* auf I ist.
- *nicht monoton*, wenn f auf dem Intervall I weder *monoton wachsend* noch *monoton fallend* ist.

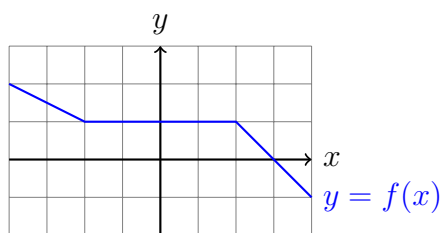
Gilt statt $f(x_1) \leq f(x_2)$ bzw. $f(x_1) \geq f(x_2)$ sogar $f(x_1) < f(x_2)$ bzw. $f(x_1) > f(x_2)$, so ist f *streng monoton wachsend* bzw. *streng monoton fallend*.

Beispiel 6.1



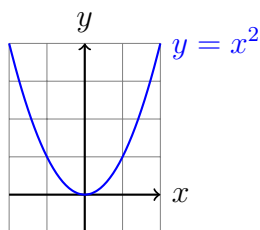
f ist streng monoton wachsend auf $I = [-4, 4]$

Beispiel 6.2



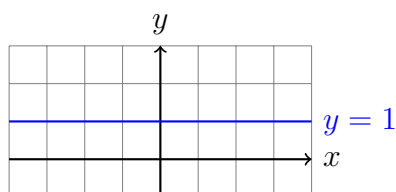
f ist monoton fallend auf $I = [-4, 4]$

Beispiel 6.3



$f(x) = x^2$ ist auf $I = [-2, 2]$ nicht monoton.

Beispiel 6.4



$f(x) = 1$ ist auf

- jedem Intervall $I \subset \mathbb{R}$ monoton.
- auf keinem Intervall $I \subset \mathbb{R}$ streng monoton.

Satz 6.1

- Ist f im Intervall I differenzierbar und monoton steigend, so gilt $f'(x) \geq 0$ für alle $x \in I$.
- Ist f im Intervall I differenzierbar und monoton fallend, so gilt $f'(x) \leq 0$ für alle $x \in I$.

Beweis

Es sei f auf I monoton steigend und $x_0 \in I$. Wegen der Monotonie gilt für alle $x_1 \in I$ mit $x_0 < x_1$:

$$\frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} \geq 0$$
$$\lim_{x_1 \rightarrow x_0} \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} \geq 0$$
$$f'(x_0) \geq 0$$

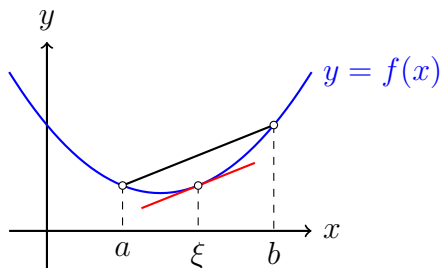
Analog für monoton fallende Funktionen. □

Die Umkehrung dieses Satzes gilt auch; ist aber etwas schwieriger zu beweisen. Dazu benötigt man den ...

Satz 6.2 (Mittelwertsatz)

Ist die Funktion f im Intervall $[a, b]$ stetig und differenzierbar in (a, b) , dann gibt es eine Stelle ξ mit $a < \xi < b$, so dass

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



(der Beweis folgt später)

Satz 6.3 (Monotoniesatz)

Ist die Funktion f auf dem Intervall I differenzierbar und gilt $f'(x) > 0$ [$f'(x) < 0$] für alle $x \in I$, dann ist f in I streng monoton wachsend [fallend].

Beweis

Es sind $x_1, x_2 \in I$ mit $x_1 < x_2$. Gemäss Mittelwertsatz gibt es eine Stelle $\xi \in I$ mit $x_1 < \xi < x_2$, so dass

$$\frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} = f'(\xi)$$

Da nach Voraussetzung $f'(\xi) > 0$ und $x_2 - x_1 > 0$ sind, gilt $f(x_2) - f(x_1) > 0$. Daraus folgt $f(x_2) > f(x_1)$.

Also ist f monoton wachsend. □

Die Standardaufgabe

Auf welchen Intervallen, ist die Funktion mit der Gleichung

$$f(x) = \frac{1}{4}x^4 + 2x^3 + \frac{5}{2}x^2 - 12x + 1$$

monoton wachsend bzw. fallend?

Schritt 1

Erste Ableitung berechnen:

$$f'(x) = x^3 + 6x^2 + 5x - 12$$

Schritt 2

Bestimme die Stellen mit horizontaler Tangente ($f'(x) = 0$):

$$f'(x) = x^3 + 6x^2 + 5x - 12 = 0 \quad \xrightarrow{\text{TR}} \quad x_1 = -4, x_2 = -3, x_3 = 1$$

Schritt 3

Zerlege f' aufgrund der Nullstellen in Linearfaktoren und erstelle damit eine Vorzeichen-tabelle:

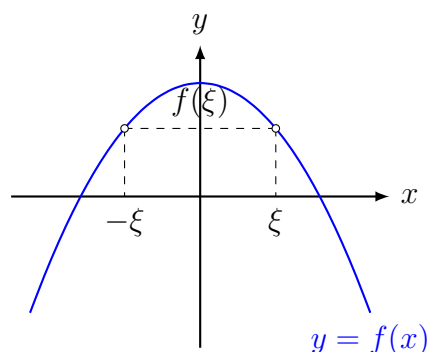
$$f'(x) = x^3 + 6x^2 + 5x - 12 = (x + 4)(x + 3)(x - 1)$$

Bereich	$x < -4$	$-4 < x < -3$	$-3 < x < 1$	$1 < x$
$x + 4$	-	+	+	+
$x + 3$	-	-	+	+
$x - 1$	-	-	-	+
$f'(x)$	-	+	-	+
$f(x)$	fallend	wachsend	fallend	wachsend

Der Eintrag in Zeile „ $x + 3$ “ und Kolonne „ $-4 < x < -3$ “ ist so zu ermitteln: Wenn x im Intervall $-4 < x < -3$ liegt, dann ist der Faktor $x + 3$ negativ. Das Gesamtvorzeichen eines Intervalls erhält man durch „Multiplizieren“ der Vorzeichen innerhalb der Kolonne.

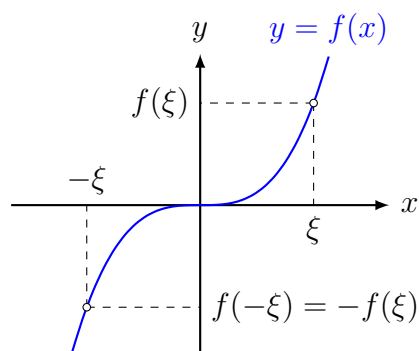
7 Symmetrie

Achsensymmetrie bezüglich $x = 0$



$$f(\xi) = f(-\xi) \text{ f\u00fcr alle } \xi \in D_f \quad (f \text{ ist „gerade“})$$

Punktsymmetrie bezüglich $(0, 0)$



$$f(-\xi) = -f(\xi) \text{ f\u00fcr alle } \xi \in D_f \quad (f \text{ ist „ungerade“})$$

Bemerkung

Jede Funktion f kann als Summe einer geraden Funktion g und einer ungeraden Funktion u dargestellt werden.

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{1}{2}f(x) + \frac{1}{2}f(x) = \frac{1}{2}f(x) + \frac{1}{2}f(-x) + \frac{1}{2}f(x) - \frac{1}{2}f(-x) \\ &= \underbrace{\frac{1}{2}[f(x) + f(-x)]}_{g(x)} + \underbrace{\frac{1}{2}[f(x) - f(-x)]}_{u(x)} \end{aligned}$$

g ist gerade, denn:

$$g(-x) = \frac{1}{2}[f(-x) + f(x)] = \frac{1}{2}[f(x) + f(-x)] = g(x)$$

u ist ungerade, denn:

$$u(-x) = \frac{1}{2}[f(-x) - f(x)] = -\frac{1}{2}[f(x) - f(-x)] = -u(x)$$

8 Asymptotisches Verhalten

Wie verhält sich eine Funktion f für grosse $|x|$?

konkret: $\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = ?$

$\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = ?$

8.1 Ganzrationale Funktionen (Polynome)

$$f(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0 \quad (a_i \in \mathbb{R}, a_n \neq 0)$$

x^n ausklammern:

$$f(x) = x^n \left(a_n + \frac{a_{n-1}}{x} + \frac{a_{n-2}}{x^2} + \dots + \frac{a_1}{x^{n-1}} + \frac{a_0}{x^n} \right)$$

$$f(x) \approx a_n x^n \text{ für grosse } |x|$$

Das Monom mit dem grössten Exponenten bestimmt das asymptotische Verhalten von f .

Beispiel 8.1

$$f(x) = -2x^3 + 5x^2 - 7x + 1$$

$$f(x) = x^3 \left(-2 + \frac{5x^2}{x^3} - \frac{7x}{x^3} + \frac{1}{x^3} \right)$$

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow +\infty} (-2x^3) = -\infty$$

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow -\infty} (-2x^3) = +\infty$$

Beispiel 8.2

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

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \left(-\frac{1}{2}x^4 \right) = -\infty$$

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow -\infty} \left(-\frac{1}{2}x^4 \right) = -\infty$$

Beispiel 8.3

$$f(x) = (1 - 3x)(2 - 4x^2)$$

$$f(x) = 12x^3 + \dots \text{ (Monome mit kleinerem Grad)}$$

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow +\infty} 12x^3 = +\infty$$

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow -\infty} 12x^3 = -\infty$$

8.2 Gebrochenrationale Funktionen

$$f(x) = \frac{a_m x^m + a_{m-1} x^{m-1} + \dots + a_1 x + a_0}{b_n x^n + b_{n-1} x^{n-1} + \dots + b_1 x + b_0}$$

$$(a_i, b_j \in \mathbb{R}, a_m \neq 0, b_n \neq 0)$$

Falls $m \geq n$, so lässt sich f durch eine Polynomdivision als Summe einer ganzrationalen Funktion $q(x)$ und einer *echt* gebrochenrationalen Funktion $r(x)$ darstellen:

$$f(x) = \frac{a(x)}{b(x)} = q(x) + r(x)$$

Beispiel 8.4

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

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = 0$$

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 0$$

Beispiel 8.5

$$f(x) = \frac{3x^2 + 2x + 1}{2x^2 + x - 1}$$

Polynomdivision:

$$(3x^2 + 2x + 1) : (2x^2 + x - 1) = \frac{3}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{x + 5}{2x^2 + x - 1}$$

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = \frac{3}{2}$$

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = \frac{3}{2}$$

Beispiel 8.6

$$f(x) = \frac{x^3 - 2x^2 - 2x - 1}{x^2 - 3x - 1}$$

Polynomdivision:

$$(x^3 - 2x^2 - 2x - 1) : (x^2 - 3x - 1) = x + 1 + \frac{2x}{2x^2 + x - 1}$$

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = -\infty$$

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = +\infty$$

Darüber hinaus: $f(x) \approx x + 1$ für grosse $|x|$

8.3 Exponentialfunktionen

Für $a > 1$ gilt: $\lim_{x \rightarrow -\infty} a^x = 0$

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} a^x = \infty$$

Exponentialfunktionen verändern sich schneller als Potenzfunktionen!

Für einen fest gewählten Exponenten r gilt:

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x^r}{a^x} = 0$$

Beispiel 8.7

$$f(x) = (1 - x^2)e^x$$

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = 0$$

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = -\infty$$

8.4 Logarithmusfunktionen

Für $a > 1$ gilt: $\lim_{x \rightarrow 0^+} \log_a(x) = -\infty$

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \log_a(x) = +\infty$$

Logarithmusfunktionen verändern sich langsamer als Potenzfunktionen!

Für einen fest gewählten Exponenten r gilt:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\log_a(x)}{x^r} = 0$$

$$\lim_{x \rightarrow 0} x^r \log_a(x) = 0$$

Beispiel 8.8

$$f(x) = (1 - x^2) \ln x$$

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) = -\infty$$

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = -\infty$$

8.5 Trigonometrische Funktionen

Die Funktionen $\sin(x)$, $\cos(x)$ und $\tan(x)$ besitzen keine Grenzwerte für $x \rightarrow -\infty$ bzw. $x \rightarrow +\infty$.

Aufgrund der Beschränktheit von $\sin(x)$ und $\cos(x)$ kann im Verbund mit anderen Funktionen das asymptotische Verhalten jedoch definiert sein.

Beispiel 8.9

$$f(x) = \cos\left(\frac{1}{x}\right)$$

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = 1$$

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 1$$

Beispiel 8.10

$$f(x) = \frac{\sin x}{x}$$

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = 0$$

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 0$$

9 Nullstellen

Ist f eine reelle Funktion mit dem Definitionsbereich D , so ist $x_0 \in D$ eine *Nullstelle* von f , wenn gilt $f(x_0) = 0$.

9.1 Nullstellen ganzrationaler Funktionen

Für ganzrationale Funktionen (Polynome) bis zum Grad 4 gibt es Lösungsformeln zur Nullstellenbestimmung.

Die Formeln zum Lösen linearer und quadratischer Funktionen sollten bekannt sein. Kubische und quartische Gleichungen werden (teilweise) im PAM-Unterricht behandelt.

Für Polynomfunktionfunktionen vom Grad 5 und höher ist man auf numerische Näherungsverfahren angewiesen.

Beispiel 9.1

$$f(x) = 3x + 7$$

$$x = -7/3$$

Beispiel 9.2

$$f(x) = x^2 - 7x + 12$$

$$f(x) = (x - 3)(x - 4); x_1 = 3, x_2 = 4$$

Beispiel 9.3

$$f(x) = x^3 - 3x$$

$$f(x) = x(x^2 - 3); x_1 = 0, x_2 = -\sqrt{3}, x_3 = \sqrt{3}$$

Abspalten von Linearfaktoren

Wenn von der Polynomfunktion f vom Grad n eine Nullstelle x_0 bekannt ist, lässt sie sich durch Polynomdivision der Linearfaktor $(x - x_0)$ abspalten.

$$f(x) = g(x) \cdot (x - x_0)$$

wobei $g(x)$ ein Polynom vom Grad $n - 1$ ist.

Beispiel 9.4

Die Polynomdivision zeigt, dass $x = 3$ eine Nullstelle von $f(x) = x^3 - 5x^2 + 7x - 3$ ist.

$$\begin{array}{r}
 (x^3 - 5x^2 + 7x - 3) : (x - 3) = x^2 - 2x + 1 \\
 -(x^3 - 3x^2) \\
 \hline
 -2x^2 + 7x \\
 -(-2x^2 + 6x) \\
 \hline
 x - 3 \\
 -(x - 3) \\
 \hline
 0
 \end{array}$$

Das Horner-Schema

Durch Ausklammern kann die Auswertung des Polynoms auf eine Folge von Multiplikationen und Additionen reduziert werden:

$$f(x) = a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0$$

$$f(x) = x(a_3x^2 + a_2x + a_1) + a_0$$

$$f(x) = x(x(\underbrace{a_3x + a_2}_{\alpha}) + a_1) + a_0 = x(\underbrace{x\alpha + a_1}_{\beta}) + a_0 = \underbrace{x\beta + a_0}_{\gamma}$$

Die geschickte tabellarische Anordnung dieser Operationen ergibt das *Horner-Schema*:

		a_2	a_1	a_0
x	a_3	α	β	γ

Beispiel 9.5

x		-5	7	-3
3	1	-2	1	0

Ist $x = x_0$ Nullstelle des Polynoms $f(x)$ vom Grad n , so sind die ersten $n - 1$ Zwischenergebnisse im Horner-Schema die Koeffizienten des Quotienten $g(x) = f(x) : (x - x_0)$.

Beispiel 9.6

$$f(x) = x^4 + 4x^3 + 3x^2 - 4x - 4$$

x		4	3	-4	-4
1	1	5	8	4	0
1	1	6	14	18	
-1	1	4	4	0	
-2	1	2	0		
-2	1	0			

Nullstellen: $x_1 = 1$, $x_2 = -1$ und $x_3 = x_4 = -2$

9.2 Nullstellen gebrochenrationaler Funktionen

Eine gebrochenrationale Funktion ist ein Quotient aus zwei ganzrationalen Funktionen.

$$f(x) = \frac{p(x)}{q(x)}$$

x_0 ist genau dann Nullstelle von f , wenn x_0 Nullstelle von p aber nicht von q ist.

Beispiel 9.7

$$f(x) = \frac{x+1}{x-1}$$

$$x = -1$$

Beispiel 9.8

$$f(x) = \frac{x^2 - 7x + 12}{x - 3}$$

$$\frac{x^2 - 7x + 12}{x - 3} = \frac{(x - 3)(x - 4)}{x - 3}$$

$x = 4$ ist Nullstelle

($x = 3$ ist eine (be)hebbare Singularität)

9.3 Nullstellen von Exponential- und Logarithmusfunktionen

Beispiel 9.9

$$f(x) = e^x$$

$e^x > 0$ für alle $x \in \mathbb{R}$

f hat keine Nullstellen

Beispiel 9.10

$$f(x) = (x^2 - 9) \cdot e^x$$

Ein Produkt reeller Zahlen ist null, wenn *mindestens* ein Faktor null ist.

Nullstellen: $x_1 = 3$, $x_2 = -3$

Beispiel 9.11

$$f(x) = \log_{10} x$$

Die Graphen aller Logarithmusfunktionen gehen durch $(1, 0)$.

$$x_0 = 1$$

Beispiel 9.12

$$f(x) = \ln(x^2 - 5x + 7)$$

$$x^2 - 5x + 7 = 1$$

$$x^2 - 5x + 6 = 0$$

$$(x - 2)(x - 3) = 0$$

$$x_1 = 2$$

$$x_2 = 3$$

9.4 Nullstellen trigonometrischer Funktionen

Beispiel 9.13

$$f(x) = \sin(ax + b)$$

$$\sin(ax + b) = 0$$

$$\sin(ax + b) = \sin(k \cdot \pi) \quad (k \in \mathbb{Z})$$

$$ax_k + b = k \cdot \pi \quad (k \in \mathbb{Z})$$

$$x_k = \frac{k \cdot \pi}{a} - \frac{b}{a} \quad (k \in \mathbb{Z})$$

Beispiel 9.14

$$f(x) = \cos(ax + b)$$

$$\cos(ax + b) = 0$$

$$\cos(ax + b) = \cos\left(\frac{\pi}{2} + k \cdot \pi\right) \quad (k \in \mathbb{Z})$$

$$ax_k + b = \frac{\pi}{2} + k \cdot \pi \quad (k \in \mathbb{Z})$$

$$x_k = \frac{k}{a} \cdot \pi + \frac{\pi}{2a} - \frac{b}{a} \quad (k \in \mathbb{Z})$$

Beispiel 9.15

$$f(x) = \tan(ax + b)$$

$$\tan(ax + b) = 0$$

$$\tan(ax + b) = \tan(k \cdot \pi) \quad (k \in \mathbb{Z})$$

$$ax_k + b = k \cdot \pi \quad (k \in \mathbb{Z})$$

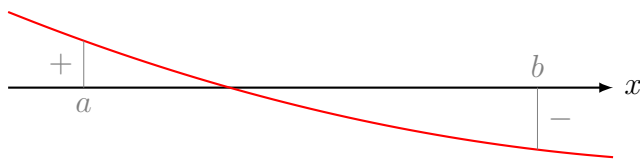
$$x_k = \frac{k \cdot \pi}{a} - \frac{b}{a} \quad (k \in \mathbb{Z})$$

9.5 Das Bisektionsverfahren

Das folgende Verfahren erlaubt es, eine Nullstelle ξ einer stetigen Funktion f im Intervall $a \leq \xi \leq b$ näherungsweise zu berechnen, wenn $f(a)$ und $f(b)$ unterschiedliches Vorzeichen haben.

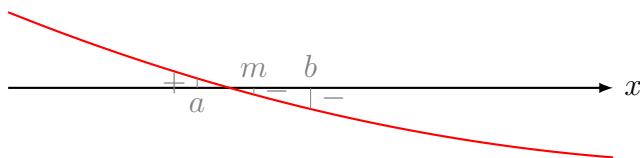
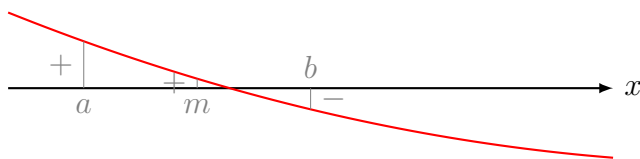
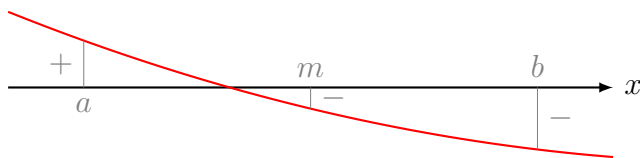
Vorbereitung

- Gebe die Genauigkeit ε der Lösung vor (z. B. $\varepsilon = 10^{-6}$).
- Wähle $a < b$ mit $f(a) \cdot f(b) < 0$.



Iterationsschritt

- Berechne $(a + b)/2 \rightarrow m$
- Wenn $f(a) \cdot f(m) < 0$: $m \rightarrow b$
sonst: $m \rightarrow a$
- Wenn $|b - a| < \varepsilon$: gib m aus und beende das Verfahren
sonst: wiederhole den Schritt



```

PROGRAM:BISECT
1  :Prompt A,B,E
2  :Repeat abs(B-A)<E
3  :(A+B)/2→M
4  :A→X:prgmF:Y→S
5  :M→X:prgmF:Y→T
6  :If S*T<0
7  :Then
8  :M→B
9  :Else
10 :M→A
11 :End
12 :Disp M
13 :End

```

Das Programm setzt voraus, dass sich die Funktionsgleichung von f in der Form $f(X) \rightarrow Y$ im Programm prgmF befindet.

10 Die Taylor-Reihe

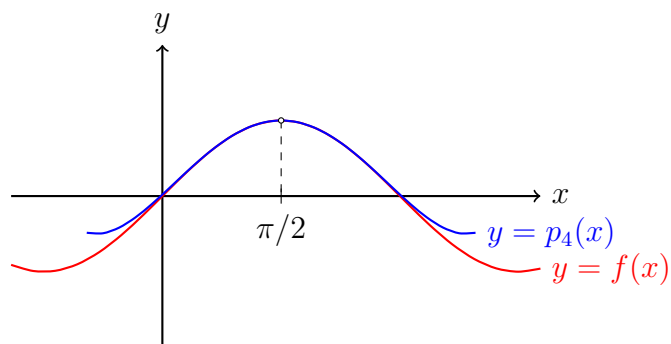
Gegeben: Eine Funktion $y = f(x)$, die an einer Stelle $x_0 \in D_f$ „genügend oft“ stetig differenzierbar ist.

Gesucht: Die Koeffizienten einer Polynomfunktion

$$p_n(x) = a_0 + a_1(x - x_0) + a_2(x - x_0)^2 + \dots + a_n(x - x_0)^n,$$

welche die Funktion f in einer Umgebung von x_0 möglichst gut approximiert (annähert).

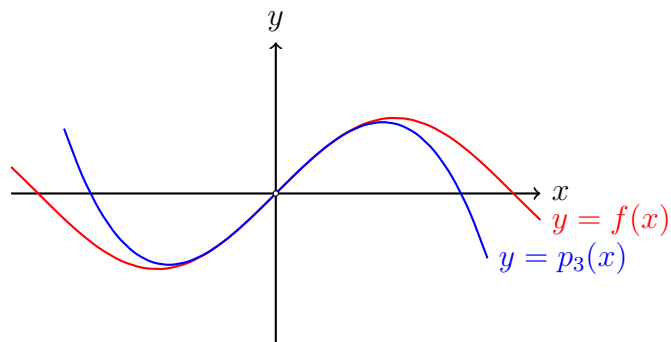
Beispiel 10.1



$$f(x) = \sin x; x_0 = \frac{\pi}{2}$$

$$p_4(x) = 1 - \frac{1}{2} \left(x - \frac{\pi}{2}\right)^2 + \frac{1}{24} \left(x - \frac{\pi}{2}\right)^4$$

Beispiel 10.2



$$f(x) = \sin x; x_0 = 0$$

$$p_3(x) = x - \frac{1}{6}x^3$$

Bestimmung der Koeffizienten

Alle Ableitungen von $f(x) = a_0 + a_1(x - x_0) + a_2(x - x_0)^2 + \dots$

$$f'(x) = a_1 + 2a_2(x - x_0) + 3a_3(x - x_0)^2 + \dots$$

$$f''(x) = 2a_2 + 6a_3(x - x_0) + 12a_4(x - x_0)^2 + \dots$$

$$f'''(x) = 6a_3 + 24a_4(x - x_0) + 60a_5(x - x_0)^2 + \dots$$

$x = x_0$ einsetzen und nach a_n auflösen:

$$f(x_0) = a_0 \quad \Rightarrow \quad a_0 = f(x_0)$$

$$f'(x_0) = a_1 \quad \Rightarrow \quad a_1 = f'(x_0)$$

$$f''(x_0) = 2a_2 \quad \Rightarrow \quad a_2 = \frac{1}{2}f''(x_0)$$

$$f'''(x_0) = 6a_3 \quad \Rightarrow \quad a_3 = \frac{1}{6}f'''(x_0)$$

Was geschieht mit $a_n(x - x_0)^n$?

- $f^{(0)}(x) = f(x): a_n(x - x_0)^n$
- $f^{(1)}(x) = f'(x): n \cdot a_n(x - x_0)^{n-1}$
- $f^{(2)}(x): n \cdot (n - 1) \cdot a_n(x - x_0)^{n-2}$
- ...
- $f^{(n-2)}(x): n \cdot (n - 1) \cdot \dots \cdot 3 \cdot a_n(x - x_0)^2$
- $f^{(n-1)}(x): n \cdot (n - 1) \cdot \dots \cdot 2 \cdot a_n(x - x_0)$
- $f^{(n)}(x): n \cdot (n - 1) \cdot \dots \cdot 2 \cdot 1 \cdot a_n$
- $f^{(n+1)}(x): 0$
- ...

Setzt man in $f^{(n)}(x)$ für x die Stelle x_0 ein, so erhält man $f^{(n)}(x_0) = n! \cdot a_n$, da alle übrigen Monome verschwinden. So gewinnt man den n -ten Koeffizienten der Polynomfunktion:

$$a_n = \frac{1}{n!} \cdot f^{(n)}(x_0)$$

Das Taylor-Polynom in der Summenschreibweise

Das erste Glied der Summe

$$f(x) = f(x_0) + \frac{f'(x_0)}{1!}(x - x_0) + \frac{f''(x_0)}{2!}(x - x_0)^2 + \dots$$

lässt sich in die Form der übrigen Summanden bringen:

$$f(x) = \frac{f(x_0)}{0!}(x-x_0)^0 + \frac{f'(x_0)}{1!}(x-x_0) + \frac{f''(x_0)}{2!}(x-x_0)^2 + \dots$$

Somit können wir die Taylor-Reihe kompakter darstellen:

$$f(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{f^{(k)}(x_0)}{k!}(x-x_0)^k$$

... natürlich nur dann, wenn der Grenzwert rechts existiert.

Der Satz von Taylor

Sei $I \subset \mathbb{R}$ ein Intervall und $f: I \rightarrow \mathbb{R}$ eine $(n+1)$ -mal stetig differenzierbare Funktion, dann gilt für $x_0 \in I$ und $x \in I$:

$$f(x) = f(x_0) + \frac{f'(x_0)}{1!}(x-x_0) + \frac{f''(x_0)}{2!}(x-x_0)^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!}(x-x_0)^n + R_n(x)$$

wobei

$$R_n(x) = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}(x-x_0)^{n+1} \quad \text{mit } x < \xi < x_0$$

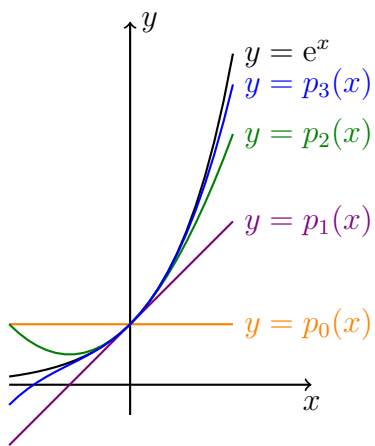
Restglied genannt wird und den „Abbruchfehler“ darstellt.

Beispiel 10.3

Approximiere $f(x) = e^x$ an der Stelle $x_0 = 0$ mit einem Taylor-Polynom vom Grad 3.

- $a_0 = \frac{f(0)}{0!} = \frac{1}{1} = 1$
- $a_1 = \frac{f'(0)}{1!} = \frac{1}{1} = 1$
- $a_2 = \frac{f''(0)}{2!} = \frac{1}{2}$
- $a_3 = \frac{f'''(0)}{3!} = \frac{1}{6}$

$$f(x) = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$$

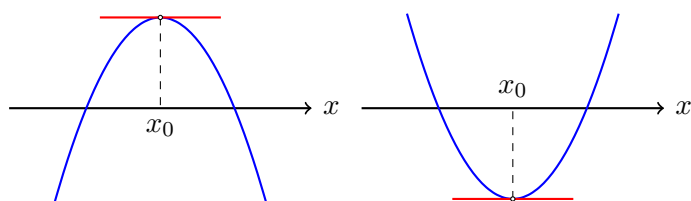


Der Mittelwertsatz der Differenzialrechnung

11 Extrem- und Wendepunkte

11.1 Begriffe

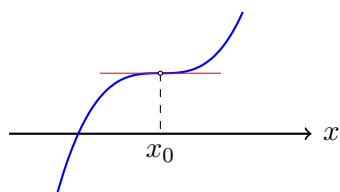
Ein notwendiges Kriterium für Extremstellen



x_0 ist eine Extremstelle $\Rightarrow f'(x_0) = 0$

Der Spielverderber

$f'(x_0) = 0 \not\Rightarrow x_0$ ist Extremstelle



x_0 ist *Terrassenstelle* (Synonym: *Sattelstelle*)

Hinreichende Kriterien für Extremstellen

Gilt $f'(x_0) = 0$, dann ist x_0 entweder ...

- eine Hochstelle,
- eine Tiefstelle oder
- eine Terrassenstelle.

Wie findet man heraus, welcher Fall vorliegt?

Entwickle f an der Stelle x_0 in eine Taylorreihe:

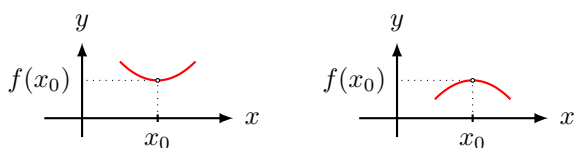
$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + \frac{1}{2!}f''(x_0)(x - x_0)^2 + \dots$$

Wegen $f'(x_0) = 0$ folgt:

$$f(x) = f(x_0) + \frac{1}{2!}f''(x_0)(x - x_0)^2 + \frac{1}{3!}f'''(x_0)(x - x_0)^3 + \dots$$

Liegt x nahe bei x_0 , so sind die Monome mit dritter und höherer Ableitung vernachlässigbar gegenüber $\frac{1}{2!}f''(x_0)(x - x_0)^2$:

$$f(x) \approx f(x_0) + \underbrace{\frac{1}{2!}f''(x_0)(x - x_0)^2}_{(*) \text{ Parabel}}$$



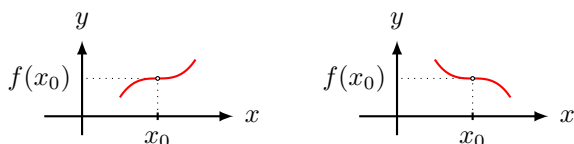
$f''(x_0) > 0$: (*) ist nach oben geöffnet; x_0 ist Minimalstelle

$f''(x_0) < 0$: (*) ist nach unten geöffnet; x_0 ist Maximalstelle

$f''(x_0) = 0$: $\frac{1}{2!}f''(x_0)(x - x_0)^2 = 0$
 $\frac{1}{3!}f'''(x_0)(x - x_0)^3$ rückt nach ...

Liegt x nahe bei x_0 , so sind die Monome mit vierter und höherer Ableitung vernachlässigbar gegenüber $\frac{1}{3!}f'''(x_0)(x - x_0)^3$:

$$f(x) \approx f(x_0) + \underbrace{\frac{1}{3!}f'''(x_0)(x - x_0)^3}_{(*) \text{ Parabel 3. Ordnung}}$$



$f'''(x_0) > 0$: (*) ändert Krümmung (-/+); x_0 ist Terrassenstelle

$f'''(x_0) < 0$: (*) ändert Krümmung (+/-); x_0 ist Terrassenstelle

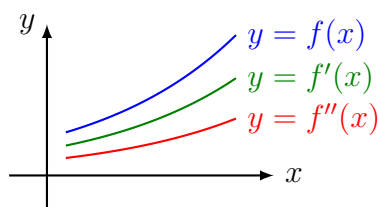
$f'''(x_0) = 0$: $\frac{1}{3!}f'''(x_0)(x - x_0)^3 = 0$
 $\frac{1}{4!}f^{(4)}(x_0)(x - x_0)^4$ rückt nach ...

Bemerkung

Eine ganzrationale Funktion von Grad n hat nach einmaligem Ableiten den Grad $n - 1$. Nach dem Hauptsatz der Algebra hat eine solche Funktion höchstens $n - 1$ Nullstellen und somit auch höchstens $n - 1$ Extremstellen.

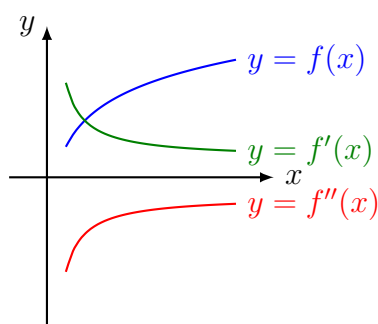
11.2 Die geometrische Deutung der 2. Ableitung

Beispiel 11.1 (zunehmende Steigung)



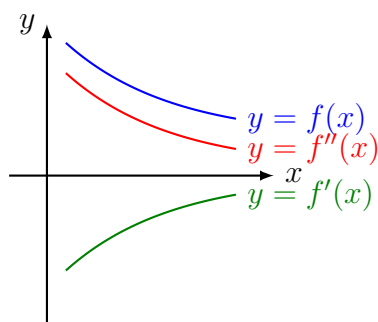
- $f'(x) > 0$: Der Graph von f ist monoton wachsend.
- $f''(x) > 0$: Der Graph von f ist linksgekrümmt (*konvex*).

Beispiel 11.2 (abnehmende Steigung)



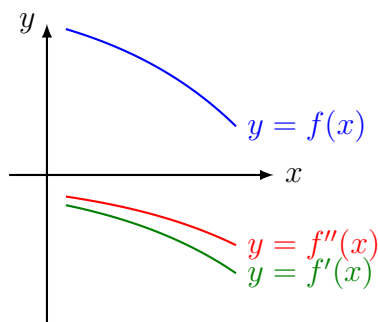
- $f'(x) > 0$: Der Graph von f ist monoton wachsend.
- $f''(x) < 0$: Der Graph von f ist rechtsgekrümmt (*konkav*).

Beispiel 11.3 (abnehmendes Gefälle)



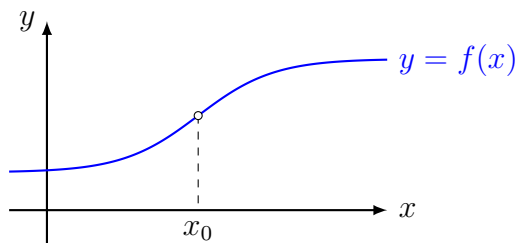
- $f'(x) < 0$: Der Graph von f ist monoton fallend.
- $f''(x) > 0$: Der Graph von f ist linksgekrümmt (*konvex*).

Beispiel 11.4 (zunehmendes Gefälle)



- $f'(x) < 0$: Der Graph von f ist monoton fallend.
- $f''(x) < 0$: Der Graph von f ist rechtsgekrümmt (*konkav*).

Wechselt der Graph von f an einer Stelle x_0 von einer Links- in eine Rechtskurve oder von einer Rechts- in eine Linkskurve, so wird x_0 *Wendestelle* und $P(x_0|y_0)$ *Wendepunkt* genannt.



Notwendige Bedingung für Wendestellen

$$x_0 \text{ Wendestelle} \Rightarrow f''(x_0) = 0$$

Da die Wendestellen die Extremstellen der 1. Ableitung sind, können wir die Wendestellen analog zu den Extremstellen berechnen, indem wir in der Theorie der Extremstellen f' durch f'' , f'' durch f''' usw. ersetzen.

Hinreichende Bedingung für Wendestellen

f sei eine auf dem offenen Intervall I n -mal differenzierbare Funktion und für $x_0 \in I$ gelte

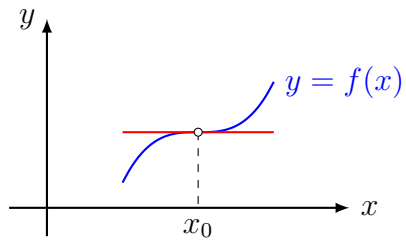
$$f''(x_0) = f'''(x_0) = \dots = f^{(n-1)}(x_0) = 0 \quad \text{aber } f^{(n)}(x_0) \neq 0.$$

Falls n ungerade ist, so ist x_0 eine Wendestelle und es gilt:

- $f^{(n)}(x_0) < 0$: Graph wechselt von Links- zur Rechtskrümmung
- $f^{(n)}(x_0) > 0$: Graph wechselt von Rechts- zur Linkskrümmung

Terrassenpunkte

Eine *Wendetangente* ist eine Tangente in einem Wendepunkt. Ein *Terrassenpunkt* ist ein Wendepunkt mit horizontaler Tangente.



Bemerkung

Eine ganzrationale Funktion von Grad n hat nach zweimaligem Ableiten den Grad $n - 2$. Nach dem Hauptsatz der Algebra hat eine solche Funktion höchstens $n - 2$ Nullstellen und somit auch höchstens $n - 2$ Wendestellen.

12 Kurvendiskussion ganzrationaler Funktionen

Beispiel 12.1

Untersuche die Funktion mit der Gleichung $f(x) = x^4 - 2x^2$.

(a) Definitionsbereich

$$D = \mathbb{R}$$

(b) Symmetrie

Vermutung: f ist gerade (symmetrisch zur y -Achse)

Beweis: $f(x) = f(-x)$ für alle $x \in D$ [nur gerade Exponenten]

(c) Asymptotisches Verhalten

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow -\infty} (x^4) = +\infty$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow \infty} (x^4) = +\infty \quad \text{oder via Symmetrie}$$

(d) Nullstellen und Ordinatenabschnitt

$$x^2(x^2 - 2) = 0 \quad \Rightarrow \quad x_1 = 0, x_2 = \sqrt{2}, x_3 = -\sqrt{2}$$

$$y_0 = f(0) = 0$$

(e) Ableitungen

$$f'(x) = 4x^3 - 4x$$

$$f''(x) = 12x^2 - 4$$

$$f'''(x) = 24x$$

(f) Extrempunkte

$$f'(x) = 4x^3 - 4x = 0 \Rightarrow 4x(x^2 - 1) = 0$$

$$\text{Kandidaten: } x_1 = 0, x_2 = 1, x_3 = -1$$

$$f''(0) = -4 < 0 \Rightarrow \text{HoP}(0, 0)$$

$$f''(1) = 8 > 0 \Rightarrow \text{TiP}_1(1, -1)$$

$$\text{TiP}_2(-1, -1) \text{ [Symmetrie]}$$

(g) Wendepunkte

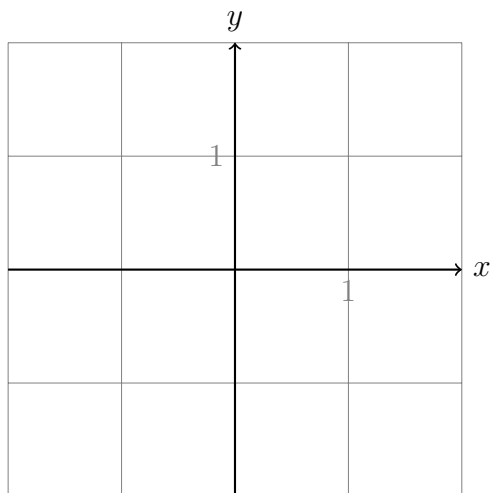
$$f''(x) = 12x^2 - 4 = 0 \Rightarrow x^2 = \frac{1}{3}$$

$$\text{Kandidaten: } x_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{3}}{3}, x_2 = -\frac{1}{\sqrt{3}} = -\frac{\sqrt{3}}{3}$$

$$f'''(\frac{\sqrt{3}}{3}) > 0 \Rightarrow \text{WeP}_1(\frac{\sqrt{3}}{3}, -\frac{5}{9}) \text{ (RKLK)}$$

$$\text{Symmetrie: WeP}_2(-\frac{\sqrt{3}}{3}, -\frac{5}{9}) \text{ (LKRK)}$$

(h) Graph



Beispiel 12.2

Untersuche die Funktion mit der Gleichung $f(x) = 3x^2 - x^3$.

(a) Definitionsbereich

$$D = \mathbb{R}$$

(b) Symmetrie

G_f ist weder symmetrisch zur y -Achse noch symmetrisch zum Ursprung, da weder $f(-x) = f(x)$ noch $f(-x) = -f(x)$

(c) Asymptotisches Verhalten

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow -\infty} (-x^3) = +\infty$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow \infty} (-x^3) = -\infty$$

(d) Nullstellen und Ordinatenabschnitt

$$f(x) = 0 \Rightarrow x^2(3 - x) = 0 \Rightarrow x_1 = 0, x_2 = 3$$

$$f(0) = 3 \cdot 0^2 - 0^3 = 0$$

(e) Ableitungen

$$f'(x) = 6x - 3x^2$$

$$f''(x) = 6 - 6x$$

$$f'''(x) = -6$$

(f) Extrempunkte

$$f'(x) = 6x - 3x^2 = 0 \Rightarrow 3x(2 - x) = 0$$

Kandidaten: $x_1 = 0, x_2 = 2$

$$f''(0) = 6 > 0 \Rightarrow \text{TiP}(0, 0)$$

$$f''(2) = -6 < 0 \Rightarrow \text{HoP}(2, 4)$$

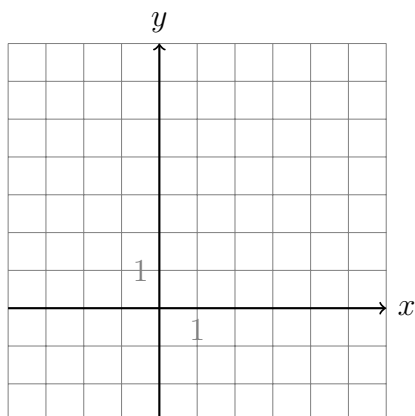
(g) Wendepunkt

$$f''(x) = 6 - 6x = 0$$

Kandidat: $x = 1$

$$f'''(1) = -6 < 0 \Rightarrow \text{WeP}(1, 2) \text{ (LKRK)}$$

(h) Graph



Beispiel 12.3

Diskutiere die Funktion $f(x) = \frac{3}{8}x^5 - \frac{15}{8}x^4 + \frac{5}{2}x^3 + 1$.

(a) Definitionsbereich

$$D = \mathbb{R}$$

(b) Symmetrie

weder gerade noch ungerade

(c) Asymptotisches Verhalten

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{3}{8}x^5 = -\infty$$

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{3}{8}x^5 = +\infty$$

(d) Nullstellen und Ordinatenabschnitt

$$f(x) = 0 \stackrel{\text{TR}}{\Rightarrow} x \approx -0.64$$

$$f(0) = 1$$

(e) Ableitungen

$$f'(x) = \frac{15}{8}x^4 - \frac{15}{2}x^3 + \frac{15}{2}x^2$$

$$f''(x) = \frac{15}{2}x^3 - \frac{45}{2}x^2 + 15x$$

$$f'''(x) = \frac{45}{2}x^2 - 45x + 15$$

(f) Extrempunkte

$$f'(x) = \frac{15}{8}x^4 - \frac{15}{2}x^3 + \frac{15}{2}x^2 = 0$$

$$\frac{15}{8}x^2(x^2 - 4x + 4) = \frac{15}{8}x^2(x - 2)^2 = 0$$

Kandidaten: $x_1 = 0$, $x_2 = 2$

$$f''(0) = 0 \text{ (weiter testen)}$$

$$f''(0) = 15 > 0 \text{ (} \rightarrow \text{ Wendepunkte)}$$

$$f''(2) = 0 \text{ (weiter testen)}$$

$$f''(2) = 15 > 0 \text{ (} \rightarrow \text{ Wendepunkte)}$$

(g) Wendepunkte

$$f'''(x) = \frac{15}{2}x^3 - \frac{45}{2}x^2 + 15x = 0$$

$$\frac{15}{2}x(x^2 - 3x + 2) = \frac{15}{2}x(x-1)(x-2) = 0$$

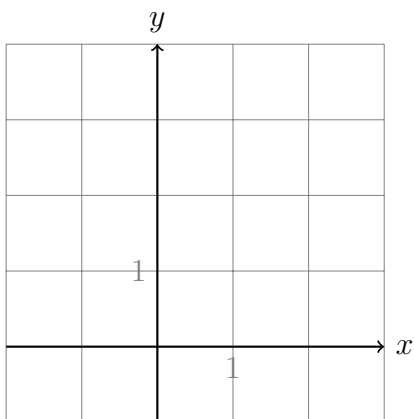
Kandidaten: $x_1 = 0$, $x_2 = 1$, $x_3 = 2$

TeP(0, 1) (siehe oben, RKLK)

$f'''(1) = -7.5 < 0 \Rightarrow$ WeP(1, 2) (LKRK)

TeP(2, 3) (siehe oben, RKLK)

(h) Graph



13 Bestimmung ganzrationaler Funktionen

Beispiel 13.1

f ist eine ganzrationale Funktion vom Grad 4 und besitzt ...

- bei $x = -2$ eine Nullstelle,
- bei $x = 1$ eine Extremstelle,
- im Punkt $P(0, -8)$ eine Wendetangente mit der Steigung 2.

Bestimme die Gleichung dieser Funktion.

Ansatz: $f(x) = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e$

$$f'(x) = 4ax^3 + 3bx^2 + 2cx + d$$

$$f''(x) = 12ax^2 + 6bx + 2c$$

$$\text{Nullstelle: } f(-2) = 0 \qquad 16a - 8b + 4c - 2d + e = 0$$

$$\text{Extremstelle: } f'(1) = 0 \qquad 4a + 3b + 2c + d = 0$$

$$\text{Punkt } P: f(0) = -8 \qquad e = -8$$

$$\text{WP: } f''(0) = 0 \qquad 2c = 0$$

$$\text{WP: } f'(0) = 2 \qquad d = 2$$

$$\text{PlySmlt2/SimultEqnSolver: } f(x) = \frac{1}{4}x^4 - x^3 + 2x - 8$$

Beispiel 13.2

Welches zur y -Achse symmetrische Polynom 4. Grades geht durch $A(0, 2)$ und hat in $B(1, 0)$ ein Minimum?

Ansatz: $f(x) = ax^4 + bx^2 + c$

$$f'(x) = 4ax^3 + 2bx$$

$$A(0, 2) \in G_f:$$

$$f(0) = 2 \qquad c = 2$$

$$B(1, 0) \in G_f:$$

$$f(1) = 0 \qquad a + b + c = 0$$

$x = 1$ ist Extremstelle:

$$f'(1) = 0 \qquad 4a + 2b = 0$$

$$\text{PlySmlt2/SimultEqnSolver: } f(x) = 2x^4 - 4x^2 + 2$$

Beispiel 13.3

Ein Polynom 3. Grades hat dieselben Nullstellen wie $g(x) = 2x - 12x^3$. Beide Graphen stehen im Ursprung senkrecht aufeinander. Bestimme die Funktionsgleichung des unbekanntes Polynoms.

$$\text{Ansatz: } f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d$$

$$f'(x) = 3ax^2 + 2bx + c$$

$$g: 2x(1 - 6x^2) = 0 \Rightarrow x_1 = 0, x_2 = \frac{1}{\sqrt{6}}, x_3 = -\frac{1}{\sqrt{6}}$$

$$f(0) = 0 \qquad \qquad \qquad d = 0$$

$$f\left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right) = 0 \qquad \qquad \qquad \frac{1}{6\sqrt{6}}a + \frac{1}{6}b + \frac{1}{\sqrt{6}}c + d = 0$$

$$f\left(-\frac{1}{\sqrt{6}}\right) = 0 \qquad \qquad \qquad -\frac{1}{6\sqrt{6}}a + \frac{1}{6}b - \frac{1}{\sqrt{6}}c + d = 0$$

$$g'(x) = 2 - 36x^2$$

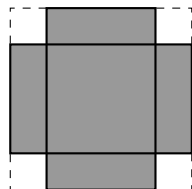
$$f'(0) \cdot g'(0) = -1 \qquad \qquad \qquad c \cdot 2 = -1 \qquad \qquad \qquad c = -\frac{1}{2}$$

$$\text{PlySmlt2/SimultEqnSolver:} \qquad \qquad \qquad f(x) = 3x^3 - \frac{1}{2}x$$

14 Extremwertaufgaben

Beispiel 14.1 (Offene Schachtel)

Von einem quadratischen Stück Karton mit der Seitenlänge $l = 10$ cm werden an allen Ecken Quadrate mit gleicher Seitenlänge ausgeschnitten.



Wie gross ist die Seitenlänge dieser Quadrate zu wählen, damit der Rest eine oben offene Schachtel mit maximalem Volumen ergibt? Wie gross ist dieses Volumen?

Zielfunktion

$$V(l, b, h) = l \cdot b \cdot h$$

Nebenbedingung(en)

- $l = b = 10 - 2x$
- $h = x$
- $0 \text{ cm} < x < 5 \text{ cm}$

Nebenbedingung in die Zielfunktion einsetzen

$$V(x) = (10 - 2x) \cdot (10 - 2x) \cdot x = 4x^3 - 40x^2 + 100x$$

Extremum bestimmen

$$V'(x) = 12x^2 - 80x + 100 = 0$$

$$V''(x) = 24x - 80$$

$$12x^2 - 80x + 100 = 0$$

$$x_1 = \frac{5}{3}$$

$$x_2 = 5 \quad (\text{sinnlos})$$

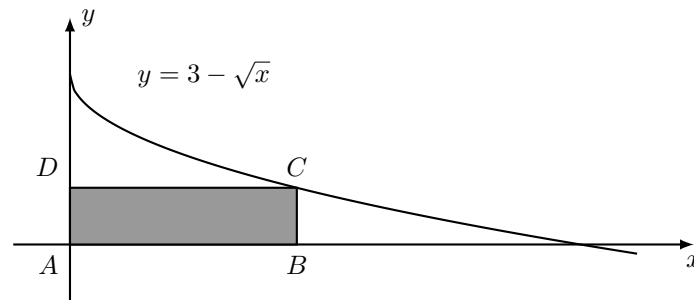
$$V''\left(\frac{5}{3}\right) = 24 \cdot \frac{5}{3} - 80 = -40 < 0 \quad \Rightarrow \quad x = \frac{5}{3} \text{ ist Maximalstelle}$$

Lösung

$$V_{\max} = V\left(\frac{5}{3}\right) = \frac{2000}{27} \approx 74.07 \text{ cm}^3$$

Beispiel 14.2

Ein Rechteck, dessen Seiten parallel zu den Koordinatenachsen sind, hat eine Ecke in $A(0,0)$. Die Ecke $C(x,y)$ liegt im I. Quadranten auf der Kurve $f(x) = 3 - \sqrt{x}$ und soll so bestimmt werden, dass der Inhalt des Rechtecks maximal wird.



Zielfunktion

$$A(x, y) = x y$$

Nebenbedingung

$$y = 3 - \sqrt{x}, \text{ wobei } 0 < x < 9$$

Nebenbedingung in die Zielfunktion einsetzen

$$A(x) = x(3 - \sqrt{x}) = 3x - x\sqrt{x} = 3x - x^{3/2}$$

Extremum bestimmen

$$\bullet A'(x) = 3 - \frac{3}{2}x^{1/2}$$

$$\bullet A''(x) = -\frac{3}{4}x^{-1/2}$$

$$0 = 3 - \frac{3}{2}x^{1/2}$$

$$\frac{3}{2}x^{1/2} = 3$$

$$x^{1/2} = 2$$

$$x = 4$$

$$A''(4) = -\frac{3}{4} \cdot 4^{-1/2} = -\frac{3}{8} < 0 \quad \Rightarrow \quad x = 4 \text{ ist ein lokales Maximum}$$

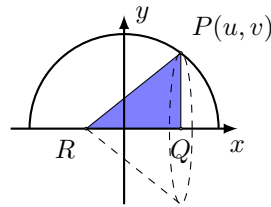
Lösung

$$y = 3 - \sqrt{4} = 1$$

$$A(4) = 3 \cdot 4 - 4^{3/2} = 12 - 8 = 4 \text{ FE}$$

Beispiel 14.3

Auf dem Halbkreis mit der Gleichung $f(x) = \sqrt{8-x^2}$ wird ein Punkt $P(u, v)$ gewählt. Lässt man das rechtwinklige Dreieck $P(u, v)$, $Q(u, 0)$, $R(-1, 0)$ um die x -Achse drehen, entsteht ein gerader Kreiskegel.



Bei welcher x -Koordinate u hat der Kreiskegel maximales Volumen und wie gross ist dieses?

Zielfunktion

$$V(x, y) = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot y^2 \cdot 2 \cdot x$$

Nebenbedingung

$$y = \sqrt{8-x^2} \text{ wobei } -\sqrt{8} < x < \sqrt{8}$$

Nebenbedingung in die Zielfunktion einsetzen

$$V(x) = \frac{\pi}{3}(8-x^2) \cdot (x+1) = \frac{\pi}{3}(-x^3 - x^2 + 8x + 1)$$

Extrema bestimmen

$$V'(x) = \frac{\pi}{3}(-3x^2 - 2x + 8)$$

$$V''(x) = \frac{\pi}{3}(-6x - 2)$$

$$-3x^2 - 2x + 8 = 0$$

$$x_1 = -2$$

$$x_2 = \frac{4}{3}$$

$$x_1 = -2 \Rightarrow f''(-2) = \frac{10\pi}{3} > 0 \text{ Tiefstelle}$$

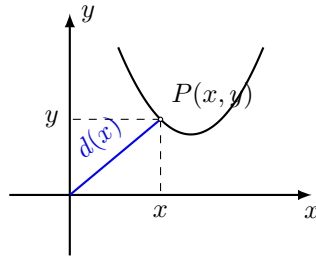
$$x_2 = \frac{4}{3} \Rightarrow f''\left(\frac{4}{3}\right) = -\frac{10\pi}{3} < 0 \text{ Hochstelle}$$

Lösung

$$V\left(\frac{4}{3}\right) = \frac{392}{81}\pi \text{ VE} \approx 15.20 \text{ VE}$$

Beispiel 14.4

Welcher Punkt $P(x, y)$ der Kurve $k: y = x^2 - 4x + 5$ hat die kürzeste Entfernung vom Ursprung?



Zielfunktion

$$d(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (\text{Distanz vom Ursprung})$$

Nebenbedingung

$$y = x^2 - 4x + 5$$

Nebenbedingung in die Zielfunktion einsetzen

$$d(x) = \sqrt{x^2 + (x^2 - 4x + 5)^2}$$

$$d(x) = \sqrt{x^2 + (x^2 - 4x + 5)(x^2 - 4x + 5)}$$

$$d(x) = \sqrt{x^2 + x^4 - 8x^3 + 10x^2 + 16x^2 - 40x + 25}$$

$$d(x) = \sqrt{x^4 - 8x^3 + 27x^2 - 40x + 25}$$

Extrema bestimmen

Wegen $d(x) > 0$ und der Monotonie von $d^2(x)$ können wir

$$d^2(x) = D(x) = x^4 - 8x^3 + 27x^2 - 40x + 25$$

statt $d(x)$ differenzieren:

$$D'(x) = 4x^3 - 24x^2 + 54x - 40$$

$$D''(x) = 12x^2 - 48x + 54$$

$$4x^3 - 24x^2 + 54x - 40 = 0$$

TI-84+: PolySmlt2/Poly Root Finder/3/... /SOLVE/STOx/L1

$$x_1 = 1.4464$$

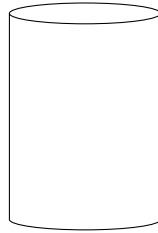
$$D(1.4464)'' = 9.67 > 0 \quad (x_1 \text{ ist Minimalstelle})$$

Lösung

$$f(x_1) = 1.31 \quad \Rightarrow \quad P(1.45, 1.31)$$

Beispiel 14.5

Für die Oberfläche einer zylinderförmige Büchse mit einem Volumen von 1ℓ soll möglichst wenig Material verbraucht werden. Wie gross müssen Höhe h und Radius r gewählt werden?



Zielfunktion

$$S(r, h) = 2\pi r^2 + 2\pi r h$$

Nebenbedingung

$$V = 1 \ell = 1 \text{ dm}^3 = \pi r^2 h \quad \Rightarrow \quad h = \frac{1}{\pi r^2}$$

Nebenbedingung in die Zielfunktion einsetzen

$$S(r) = 2\pi r^2 + 2\pi r \frac{1}{\pi r^2} = 2\pi r^2 + \frac{2}{r}$$

Extrema bestimmen

$$S'(r) = 4\pi r - \frac{2}{r^2}$$

$$S''(r) = 4\pi + \frac{4}{r^3}$$

$$4\pi r - \frac{2}{r^2} = 0$$

$$4\pi r^3 - 2 = 0$$

$$r^3 = \frac{1}{2\pi}$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{1}{2\pi}}$$

$$r \approx 0.542 \text{ dm}$$

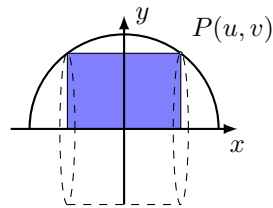
$$S''\left(\sqrt[3]{\frac{1}{2\pi}}\right) = 4\pi + \frac{4}{1/2\pi} = 12\pi > 0 \quad \Rightarrow \quad r = \sqrt[3]{\frac{1}{2\pi}} \text{ ist lokales Minimum}$$

Lösung

$$h = \frac{1}{\pi r^2} \approx 1.084$$

Beispiel 14.6

Dem Halbkreis mit der Gleichung $y = \sqrt{12 - x^2}$ wird, wie in der Abbildung dargestellt, ein Rechteck einbeschrieben.



Dreht man dieses Rechteck um die x -Achse, so entsteht ein Zylinder. Wie gross kann das Volumen dieses Zylinders maximal werden?

Zielfunktion

$$V(x, y) = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot y^2 \cdot 2 \cdot x$$

Nebenbedingung

$$y = \sqrt{12 - x^2} \Rightarrow y^2 = (12 - x^2)$$

$$\text{mit } -\sqrt{12} < x < \sqrt{12}$$

Nebenbedingung in die Zielfunktion einsetzen

$$V(x) = \pi(12 - x^2) \cdot 2x = 24\pi x - 2\pi x^3$$

Extrema bestimmen

$$V'(x) = 24\pi - 6\pi x^2 = 6\pi(4 - x^2)$$

$$V''(x) = -12\pi x$$

$$x_1 = 2 \Rightarrow f''(2) = -24\pi < 0 \Rightarrow x_1 = 2 \text{ ist Hochstelle}$$

$$x_2 = -2 \Rightarrow f''(-2) = 24\pi > 0 \Rightarrow x_2 = -2 \text{ ist Tiefstelle (Symmetrie!)}$$

Lösung

$$V(2) = 48\pi - 16\pi = 32\pi \text{ VE}$$

15 Funktionenschar

Die Beispielfunktion

Gegeben: $f_t(x) = x^2 + tx + t$ ($t \in \mathbb{R}$ Parameter)

Fragestellung (a)

Bestimme $f_t(x)$ für $t = -1, 0, 1, 2$

$$f_{-1}(x) = x^2 - x - 1$$

$$f_0(x) = x^2$$

$$f_1(x) = x^2 + x + 1$$

$$f_2(x) = x^2 + 2x + 2$$

Graphen mit dem TI-84+ zeichnen:

$\{-1, 0, 1, 2\} \rightarrow L_1$

$Y=$

$$Y_1 = X^2 + L_1X + L_1$$

$WINDOW$

Xmin=-3

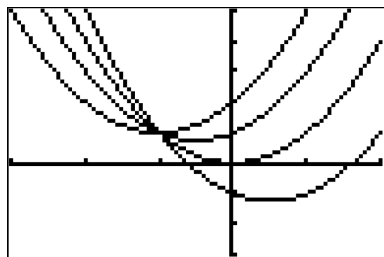
Xmax=2

Xscl=1

Ymin=-3

Ymax=5

Graphen von $f_t(x) = x^2 + tx + t$ für $t = -1, 0, 1, 2$:



Fragestellung (b)

Bestimme $f'_t(x)$ für $t = -1, 0, 1, 2$

$$f'_t(x) = 2x + t$$

$$f'_{-1}(x) = 2x - 1$$

$$f'_0(x) = 2x$$

$$f'_1(x) = 2x + 1$$

$$f'_2(x) = 2x + 2$$

Fragestellung (c)

Für welches t gilt $f_t(2) = 1$?

$$f_t(2) = 1$$

$$2^2 + t \cdot 2 + t = 1$$

$$4 + t \cdot 2 + t = 1$$

$$4 + 3t = 1$$

$$3t = -3$$

$$t = -1$$

Fragestellung (d)

Für welches t gilt $f'_t(2) = 1$?

$$f'_t(2) = 1$$

$$2 \cdot 2 + t = 1$$

$$4 + t = 1$$

$$t = -3$$

Fragestellung (e)

Bestimme formal die Nullstellen von $f_t(x)$

$$f_t(x) = 0$$

$$x^2 + tx + t = 0$$

$$D = b^2 - 4ac = t^2 - 4t$$

$$x_1 = \frac{-b + \sqrt{D}}{2a} = \frac{-t + \sqrt{t^2 - 4t}}{2}$$

$$x_2 = \frac{-b - \sqrt{D}}{2a} = \frac{-t - \sqrt{t^2 - 4t}}{2}$$

Fragestellung (f)

Auf welcher Kurve k liegen die Extrempunkte von f_t ?

$$f'_t(x) = 0 \Rightarrow 2x + t = 0 \Rightarrow x_e = -\frac{t}{2}$$

Test: $f''_t(x) = 2 > 0 \Rightarrow$ Tiefpunkte

x_e in $f_t(x)$ einsetzen:

$$y = f_t\left(-\frac{t}{2}\right) = \left(-\frac{t}{2}\right)^2 + t\left(-\frac{t}{2}\right) + t = \frac{t^2}{4} - \frac{t^2}{2} + t = -\frac{t^2}{4} + t$$

$$\Rightarrow T\left(-\frac{t}{2}, -\frac{t^2}{4} + t\right)$$

Wir sind noch nicht ganz fertig.

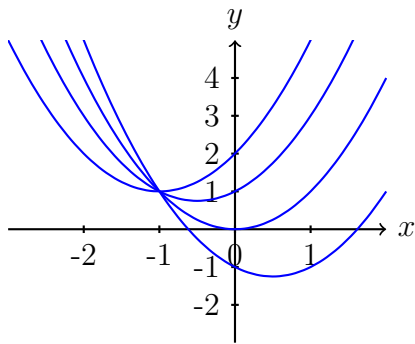
t aus den Koordinaten von

$$T\left(\underbrace{-\frac{t}{2}}_x, \underbrace{-\frac{t^2}{4} + t}_y\right)$$

eliminieren:

$$-\frac{t}{2} = x \Rightarrow t = -2x \Rightarrow y = -\frac{4x^2}{4} - 2x = -x^2 - 2x$$

Kurve, auf der alle Extrempunkte liegen: $k: y = -x^2 - 2x$



Fragestellung (g)

Welche Punkte haben alle Graphen G_t gemeinsam?

Suche x , so dass $f_t(x) = f_s(x)$ für $s \neq t$

$$f_t(x) = f_s(x)$$

$$x^2 + tx + t = x^2 + sx + s \quad || -x^2$$

$$tx + t = sx + s \quad || -sx - s$$

$$tx - sx + t - s = 0 \quad x \text{ ausklammern}$$

$$(t - s)x + (t - s) = 0 \quad || : (t - s)$$

$$x + 1 = 0$$

$$x = -1$$

Einsetzen: $y = f_t(-1) = (-1)^2 + t \cdot (-1) + t = 1 - t + t = 1$

gemeinsamer Punkt: $P(-1, 1)$

16 Gebrochenrationale Funktionen

Begriffe

Eine *gebrochenrationale Funktion* ist ein Quotient aus zwei ganzrationalen Funktionen

$$f(x) = \frac{a_m x^n + a_{m-1} x^{m-1} + \dots + a_1 x + a_0}{b_n x^n + b_{n-1} x^{n-1} + \dots + b_1 x + b_0} = \frac{p(x)}{q(x)}$$

wobei

- $p(x)$ ein *Zählerpolynom* vom Grad m ist,
- $q(x)$ ein *Nennerpolynom* vom Grad n ist.

Weitere Bezeichnungen und Sonderfälle:

$n = 0$: Der Nenner $q_0(x) = b_0$ ist konstant und $f(x)$ ist eine *ganzrationale Funktion*.

$m \geq n$: f ist eine *unecht gebrochenrationale Funktion*.

$m < n$: f ist eine *echt gebrochenrationale Funktion*.

16.1 Polynomdivision

Ein Verfahren, um eine unecht gebrochenrationale Funktion als Summe aus einer ganzrationalen- und einer echt gebrochenrationalen Funktion darzustellen. (vgl. $\frac{7}{3} = 2 + \frac{1}{3}$)

$$\begin{array}{r} (2x^2 + x + 1) : (2x - 1) = x + 1 + \frac{2}{2x - 1} \\ -(2x^2 - x) \\ \hline 2x + 1 \\ -(2x - 1) \\ \hline 2 \end{array}$$

Definitionsbereich

$$D = \mathbb{R} \setminus \{x : q(x) = 0\}$$

Menge aller reellen Zahlen, die *nicht* Nullstellen des Nennerpolynoms sind.

Beispiel 16.1

$$f(x) = \frac{x - 5}{x^2 - 7x + 12} = \frac{x - 5}{(x - 3)(x - 4)} \Rightarrow D = \mathbb{R} \setminus \{3, 4\} \text{ (Definitionslücken)}$$

Nullstellen

Eine *Nullstelle* von f ist eine Nullstelle von $p(x)$, die nicht auch Nullstelle von $q(x)$ ist.

Beispiel 16.2

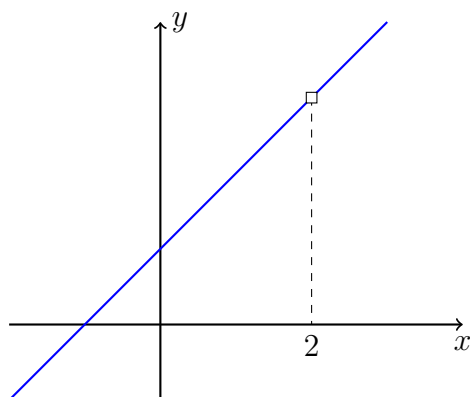
$$f(x) = \frac{x^2 - 2x - 3}{x^2 - 6x - 9} = \frac{(x+1)(x-3)}{(x-3)^2} \Rightarrow N = \{-1\}$$

Hebbare Definitionslücken

Eine Definitionslücke, die sich als Faktor aus dem Nenner wegkürzen lässt, wird *hebbar* genannt.

Beispiel 16.3

$$f(x) = \frac{(x+1)(x-2)}{x-2} = x+1, \text{ falls } x \neq 2 \Rightarrow x=2 \text{ ist hebbare Definitionslücke.}$$



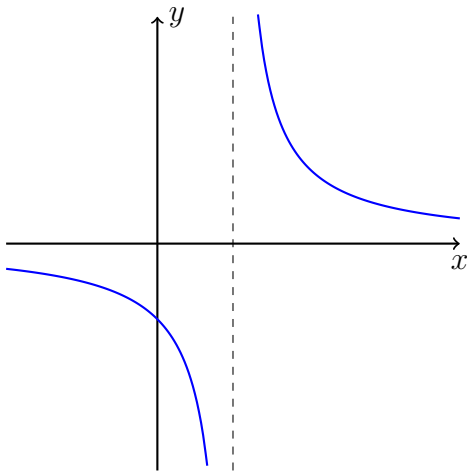
Polstelle

Eine Definitionslücke, die sich als Faktor nicht aus dem Nenner wegkürzen lässt, wird *Polstelle* genannt.

Ist der Grad des gekürzten Linearfaktors ungerade, so ist es eine Polstelle *mit Vorzeichenwechsel* (*mVzw*), sonst eine Polstelle *ohne Vorzeichenwechsel* (*oVzw*).

Beispiel 16.4

$$f(x) = \frac{1}{x-1}$$

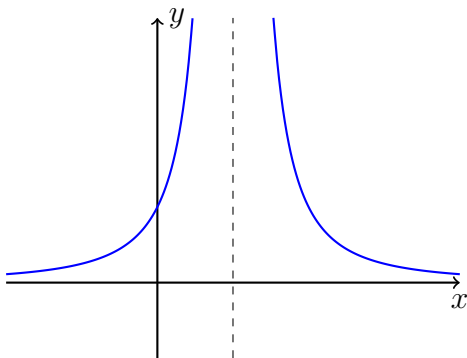


$$\lim_{x \rightarrow 1^-} \frac{1}{x-1} = -\infty \quad \text{und} \quad \lim_{x \rightarrow 1^+} \frac{1}{x-1} = +\infty$$

$f(x)$ besitzt bei $x_0 = 1$ einen *Pol mit Vorzeichenwechsel*.

Beispiel 16.5

$$f(x) = \frac{1}{(x-1)^2}$$



$$\lim_{x \rightarrow 1^-} \frac{1}{(x-1)^2} = +\infty \quad \text{und} \quad \lim_{x \rightarrow 1^+} \frac{1}{(x-1)^2} = +\infty$$

$f(x)$ hat bei $x_0 = 1$ einen *Pol ohne Vorzeichenwechsel*.

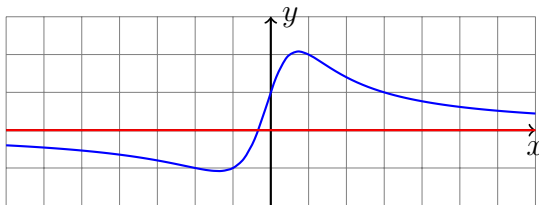
Asymptotisches Verhalten

Welchen Grenzwert haben $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x)$ und $\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x)$?

Beispiel 16.6

$$f(x) = \frac{3x+1}{x^2+1}$$

$$\left. \begin{array}{l} \lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 0 \\ \lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \lim_{|x| \rightarrow \infty} f(x) = 0 \quad (\text{Kurzschreibweise})$$

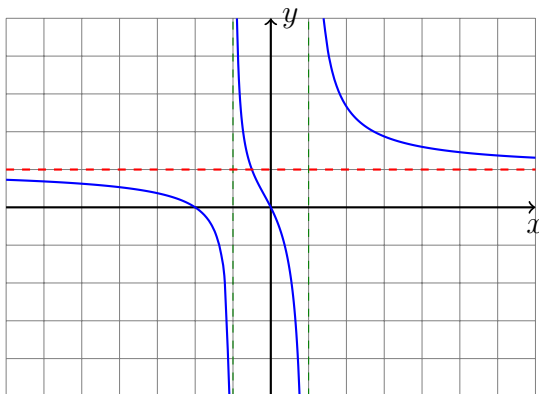


(horizontale) Asymptote: $y = 0$ (x -Achse)

Beispiel 16.7

$$f(x) = \frac{x^2 + 2x}{x^2 - 1} = 1 + \frac{2x + 1}{x^2 - 1} \text{ (Polynomdivision)}$$

$$\lim_{|x| \rightarrow \infty} f(x) = 1 \quad \text{Asymptote: } y = 1$$

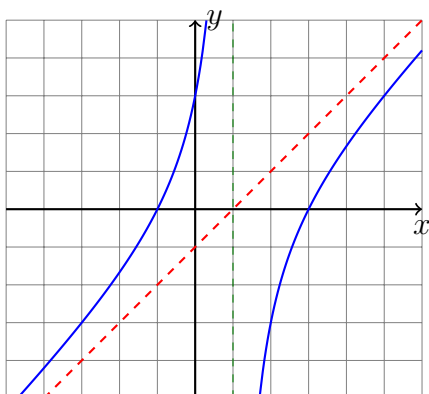


Beispiel 16.8

$$f(x) = \frac{x^2 - 2x - 3}{x - 1} = x - 1 - \frac{4}{x - 1} \text{ (Polynomdivision)}$$

$$\text{Asymptote: } a(x) = x - 1$$

Für grosse $|x|$ gilt: $f(x) \approx a(x)$ bzw. $\lim_{|x| \rightarrow \infty} [f(x) - a(x)] = 0$



16.2 Kurvendiskussion

Beispiel 16.9

$$f(x) = \frac{x-2}{x^2-1} = \frac{x-2}{(x-1)(x+1)}$$

- *Definitionsbereich:*

$$D = \mathbb{R} \setminus \{-1, 1\}$$

- *Symmetrie:*

Weder ordinaten- noch ursprungssymmetrisch

- *Nullstelle(n):*

$$f(x) = 0 \Leftrightarrow x = 2$$

- *Ordinatenabschnitt:*

$$f(0) = \frac{0-2}{0-1} = 2$$

- *Verhalten an den Definitionslücken:*

$x = 1$ (Pol mit Vorzeichenwechsel):

$$\lim_{x \rightarrow -1^-} f(x) = -\infty \quad \lim_{x \rightarrow -1^+} f(x) = +\infty$$

$x = -1$ (Pol mit Vorzeichenwechsel):

$$\lim_{x \rightarrow 1^-} f(x) = +\infty \quad \lim_{x \rightarrow 1^+} f(x) = -\infty$$

- *Verhalten im Unendlichen (asymptotisches Verhalten)*

$$\lim_{|x| \rightarrow \infty} \frac{x-2}{x^2-1} = 0$$

- *Ableitungen:*

$$f'(x) = \frac{1 \cdot (x^2 - 1) - (x - 2) \cdot 2x}{(x^2 - 1)^2}$$

$$= \frac{x^2 - (2x^2 + 4x)}{(x^2 - 1)^2}$$

$$= \frac{-x^2 + 4x - 1}{(x^2 - 1)^2}$$

$$f''(x) = \frac{(-2x + 4)(x^2 - 1)^2 - (-x^2 + 4x - 1)2(x^2 - 1)2x}{(x^2 - 1)^4} \quad \text{(Kettenregel)}$$

$$= \frac{(-2x + 4)(x^2 - 1) - (-x^2 + 4x - 1)4x}{(x^2 - 1)^3}$$

$$= \frac{-2x^3 + 2x + 4x^2 - 4 + 4x^3 - 16x^2 + 4x}{(x^2 - 1)^2}$$

$$= \frac{2x^3 - 12x^2 + 6x - 4}{(x^2 - 1)^2}$$

- *Extrempunkte:*

$$f'(x) = -x^2 + 4x - 1 = 0 \quad \Rightarrow \quad x_1 \approx 3.73 \quad x_2 \approx 0.27,$$

Test:

$$f''(3.73) \approx -0.02 \quad \Rightarrow \quad \text{HoP}(3.73, 0.13)$$

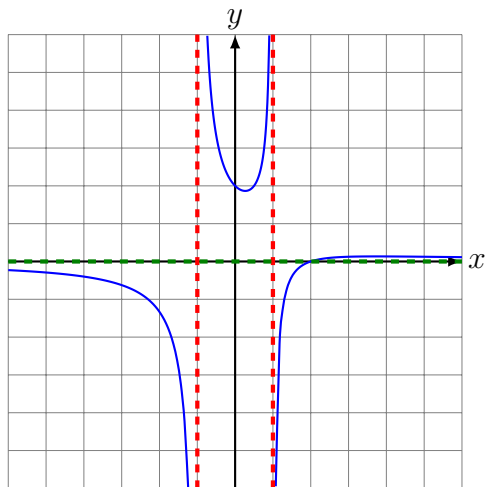
$$f''(0.27) \approx 4.02 > 0 \quad \Rightarrow \quad \text{TiP}(0.27, 1.87)$$

- *Wendepunkte:*

$$\text{Kandidaten } f''(x) = 2x^3 - 12x^2 + 6x - 4 = 0 \quad \Rightarrow \quad x_1 \approx 5.52$$

$W(5.52, 0.12)$?

- *Graph:*



17 Diskussion transzendenter Funktionen

Beispiel 17.1

Diskutiere die Funktion mit der Gleichung $f(x) = (x - 2) \cdot e^{\frac{1}{2}x^2}$.

(a) *Definitionsbereich:* $D = \mathbb{R}$

(b) *Symmetrie:*

$$f(-x) = (-x - 2) \cdot e^{\frac{1}{2}x^2} \neq f(x) \text{ f\u00fcr alle } x \in \mathbb{R} \Rightarrow \text{nicht ordinatensymmetrisch}$$

$$-f(x) = (-x + 2) \cdot e^{\frac{1}{2}x^2} \neq f(-x) \text{ f\u00fcr alle } x \in \mathbb{R} \Rightarrow \text{nicht ursprungssymmetrisch}$$

(c) *Asymptotisches Verhalten:*

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = -\infty \text{ und } \lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = +\infty$$

(d) *Ordinatenabschnitt und Nullstellen:*

$$(x - 2) \cdot e^{x^2/2} = 0$$

$$x = 2$$

$$f(0) = (0 - 2) \cdot e^0 = -2$$

(e) *Ableitungen:*

$$f'(x) = 1 \cdot e^{\frac{1}{2}x^2} + (x - 2) \cdot x \cdot e^{\frac{1}{2}x^2} = (x^2 - 2x + 1) \cdot e^{\frac{1}{2}x^2}$$

$$f''(x) = (2x - 2) \cdot e^{\frac{1}{2}x^2} + (x^2 - 2x + 1) \cdot x \cdot e^{\frac{1}{2}x^2} = (x^3 - 2x^2 + 3x - 2) \cdot e^{\frac{1}{2}x^2}$$

$$\begin{aligned} f'''(x) &= (3x^2 - 4x + 3) \cdot e^{\frac{1}{2}x^2} + (x^3 - 2x^2 + 3x - 2) \cdot x \cdot e^{\frac{1}{2}x^2} \\ &= (x^4 - 2x^3 + 6x^2 - 6x + 3)e^{\frac{1}{2}x^2} \end{aligned}$$

(f) *Extrempunkte:*

- Kandidaten: $f'(x) = 0$

$$(x^2 - 2x + 1) \cdot e^{\frac{1}{2}x^2} = 0$$

$$x_1 = x_2 = 1$$

- Test: $f''(1) = (x^3 - 2x^2 + 3x - 2) \cdot e^{\frac{1}{2} \cdot 1} = 0 \cdot e^{\frac{1}{2}} = 0 \Rightarrow$ unklar

(g) *Wendepunkte:*

- Kandidaten: $f''(x) = 0$

$$(x^3 - 2x^2 + 3x - 2) \cdot e^{\frac{1}{2}x^2} = 0$$

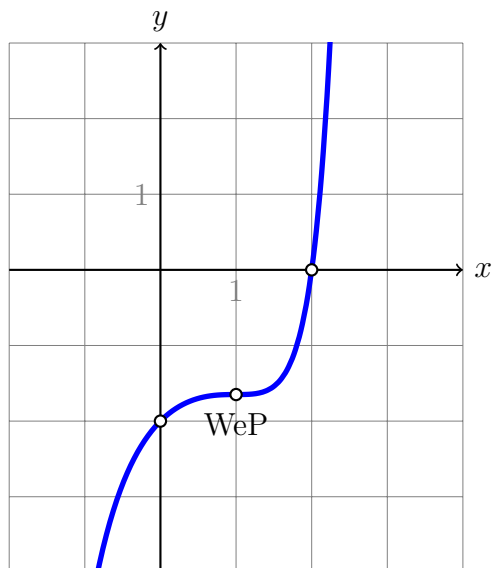
$$x = 1$$

- Test: $f'''(1) = (x^4 - 2x^3 + 6x^2 - 6x + 3) \cdot e^{\frac{1}{2} \cdot 1}$

$$= (1 - 2 + 6 - 6 + 3) \cdot e^{\frac{1}{2}} = 2 \cdot e^{\frac{1}{2}} > 0$$

- *y*-Koordinate: $f(1) = (1 - 2) \cdot e^{\frac{1}{2}} \approx -e^{\frac{1}{2}} = -1.65 \Rightarrow \text{WeP}(1|-1.65)$

(h) Graph:



Beispiel 17.2

Diskutiere die Funktion mit der Gleichung $f(x) = \ln(2x - x^2)$.

(a) *Definitionsbereich:*

$$2x - x^2 > 0$$

$$x(2 - x) > 0$$

$$D = (0, 2) \text{ [Das ist ein offenes Intervall; kein Punkt.]}$$

(b) *Symmetrie:*

Die innere Funktion $2x - x^2$ ist weder gerade noch ungerade also auch $f(x)$ nicht.

(c) *Asymptoten:*

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) = -\infty \text{ und } \lim_{x \rightarrow 2^-} f(x) = -\infty$$

(d) *Nullstellen und Ordinatenabschnitt:*

$$f(x) = 0$$

$$\ln(2x - x^2) = 0$$

$$2x - x^2 = 1$$

$$0 = x^2 - 2x + 1$$

$$x = 1$$

Der Ordinatenabschnitt $f(0)$ ist nicht definiert

(e) *Ableitungen:*

$$\begin{aligned}
f'(x) &= \frac{1}{2x - x^2} \cdot (2 - 2x) = \frac{2x - 2}{x^2 - 2x} = \frac{2x - 2}{x^2 - 2x} \\
f''(x) &= \frac{2(x^2 - 2x) - (2x - 2)(2x - 2)}{(x^2 - 2x)^2} = \frac{2x^2 - 4x - (4x^2 - 8x + 4)}{(x^2 - 2x)^2} \\
&= \frac{-2x^2 + 4x - 4}{(x^2 - 2x)^2} = -\frac{2x^2 - 4x + 4}{(x^2 - 2x)^2} \\
f'''(x) &= -\frac{(4x - 4) \cdot (x^2 - 2x)^2 - (2x^2 - 4x + 4) \cdot 2(x^2 - 2x)^1(2x - 2)}{(x^2 - 2x)^4} \\
&= -\frac{(4x - 4) \cdot (x^2 - 2x) - (2x^2 - 4x + 4) \cdot 2(2x - 2)}{(x^2 - 2x)^3} \\
&= -\frac{4(x - 1) \cdot (x^2 - 2x) - (2x^2 - 4x + 4) \cdot 4(x - 1)}{(x^2 - 2x)^3} \\
&= -\frac{4(x - 1)[(x^2 - 2x) - (2x^2 - 4x + 4)]}{(x^2 - 2x)^3} \\
&= -\frac{4(x - 1)[-x^2 + 2x - 4]}{(x^2 - 2x)^3} = \frac{4(x - 1)(x^2 - 2x + 4)}{(x^2 - 2x)^3}
\end{aligned}$$

(f) Extrempunkte:

- Kandidaten: $f'(x) = 0$
 $\frac{2x - 2}{x^2 - 2x} = 0$
 $2x - 2 = 0$
 $x = 1$
- Test: $f''(1) = -\frac{2 - 4 + 4}{(1 - 2)^2} = -\frac{2}{1} = -2 < 0 \Rightarrow x = 1$ ist Hochstelle
- y -Koordinate:
 $y = f(1) = \ln(2 \cdot 1 - 1) = \ln(1) = 0 \Rightarrow \text{HoP}(1|0)$

(g) Wendepunkte:

- Kandidaten: $f''(x) = 0$
 $-2x^2 + 4x - 4 = 0$
keine Lösung \Rightarrow keine Wendepunkte

(h) Graph:

