Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

1 Komplexe Zahlen

1.1 Definition

Menge der komplexen Zahlen $\mathbb{C} = \{a + bi : a, b \in \mathbb{R}\}$

$$\begin{aligned} \textit{Addition:} \quad & (a+bi)+(c+di) = (a+c)+(b+d)i \\ \textit{Multiplikation:} \quad & (a+bi)\cdot(c+di) = (ac-bd)+(ad+bc)i \end{aligned}$$ [1]

$\mathbb{R} \subset \mathbb{C}$, $a \in \mathbb{R} : a + 0 \cdot i = a$. Rein imaginäre Zahlen: $b \cdot i, b \in \mathbb{R}$, $(0 + bi)$

i *imaginäre Einheit.* $z = a + bi \in \mathbb{C}$.

$a = \Re(z)$ Realteil von z $(Re(z))$.

$b = \Im(z)$ Imaginärteil von z $(Im(z))$.

$\bar{z} = a - bi$ $(= a + (-b)i)$ Die zu z *konjugiert komplexe Zahl.*

1.2 Veranschaulichung

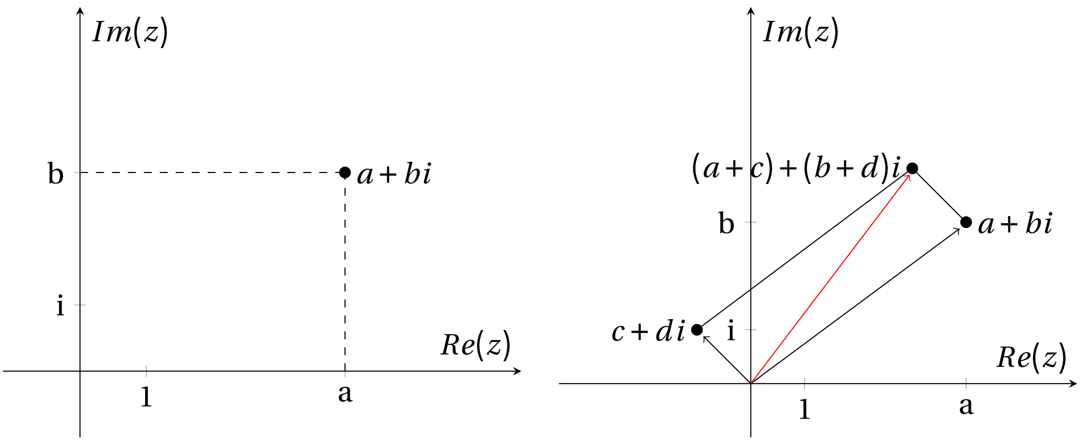


Abbildung 1: Addition entspricht Vektoraddition

1.3 Rechenregeln in $\mathbb{C}$

a) Es gelten alle Rechenregeln wie in $\mathbb{R}$.
(z.B Kommutativität bzgl. $+, \cdot : z_1 + z_2 = z_2 + z_1$ und $z_1 \cdot z_2 = z_2 \cdot z_1$)

[1] Ausmultiplizieren und $i^2 = -1$ beachten

Inversenbildung bzgl. $\cdot$:
$z = a + bi \neq 0$, d.h $a \neq 0$ oder $b \neq 0$:

$$z^{-1} = \frac{1}{z} = \frac{a}{a^2+b^2} - \frac{b}{a^2+b^2} i$$
$$z \cdot z^{-1} = 1$$

Beispiel: $\frac{5-7i}{3+2i}$
$$\begin{aligned} &= (5-7i)\cdot(3+2i)^{-1} \\ &= (5-7i)\cdot(\tfrac{3}{13} - \tfrac{2}{13} i) \\ &= (\tfrac{15}{13} - \tfrac{14}{13}) + (-\tfrac{10}{13} - \tfrac{21}{13}) i \\ &= \tfrac{1}{13} - \tfrac{31}{13} i \end{aligned}$$

Speziell: $(bi)^{-1} = \frac{1}{bi} = -\frac{1}{b} i$
insbesondere: $\frac{1}{i} = -i$

b) $z, z_1, z_2 \in \mathbb{C}$:
$$\begin{aligned} \bar{\bar{z}} &= z \\ \overline{z_1 + z_2} &= \bar{z}_1 + \bar{z}_2 \\ \overline{z_1 \cdot z_2} &= \bar{z}_1 \cdot \bar{z}_2 \end{aligned}$$

1.4 Definition Absolutbetrag

a) *Absolutbetrag* von $z = a + bi \in \mathbb{C}$: $|z| = +\underbrace{\sqrt{a^2+b^2}}_{\in \mathbb{R}, \geq 0}$

$$\boxed{a^2 + b^2 = z \cdot \bar{z}}$$

$|z| = +\sqrt{z \cdot \bar{z}}$

$$(a+bi)\cdot(a-bi) = (a^2+b^2) + 0i = a^2 + b^2$$

$$\begin{aligned} |z| &= \text{Abstand von } z \text{ zu } 0 \\ &= \text{Länge des Vektors, der } z \text{ entspricht} \end{aligned}$$

b) Abstand von $z_1, z_2 \in \mathbb{C}$:

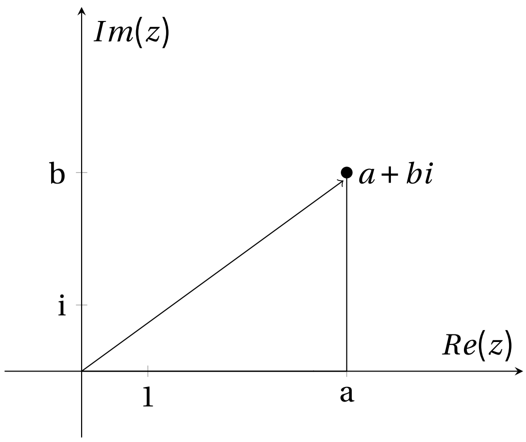


Abbildung 2: Graphische Definition des Absolutbetrages

$$d(z_1, z_2) := |z_1 - z_2|$$

1.5 Rechenregeln für den Absolutbetrag

(a)
$$|z| = 0 \Leftrightarrow z = 0$$

(b)
$$| z_1 \cdot z_2 | = |z_1| \cdot |z_2|$$

(c)
$$|z_1 + z_2| \leq |z_1| + |z_2|$$
$$||z_1| - |z_2|| \leq |z_1 - z_2| \leq |z_1| + |z_2|$$
$$|-z| = |z|$$

1.6 Darstellung durch Polarkoordinaten

a) Jeder Punkt $\neq (0,0)$ lässt sich durch seine Polarkoordinaten (r,φ) beschreiben:
$-r \geq 0, r \in \mathbb{R}$

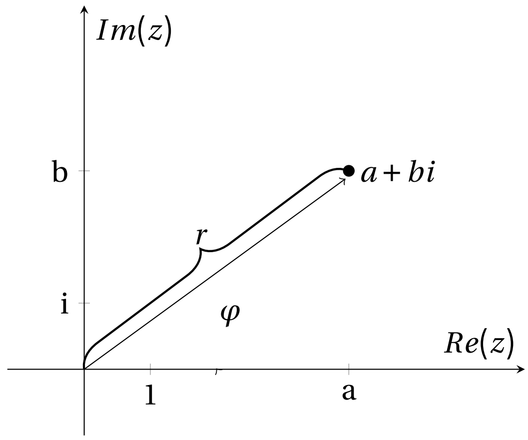
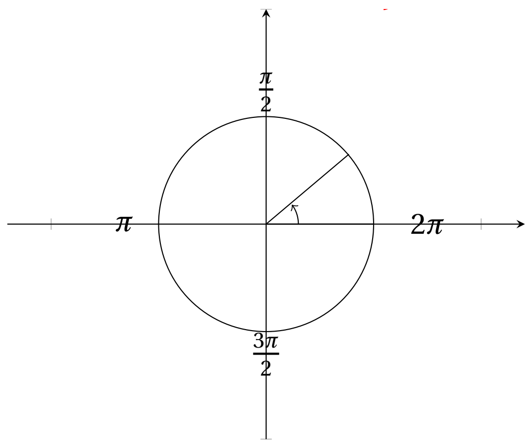


Abbildung 3: Polarkoordinaten

$0 \leq \varphi \leq 2\pi$, wird gemessen von der positiven x-Achse entgegen des Uhrzeigersinnes

Abbildung 4: Umrechnung Grad zu Bogenmaß



Umfang:2π
φ in Grad $\hat{=} \frac{2\pi\cdot\varphi}{360}$ im Bogenmaß
Für Punkte mit kartesischen Koordinaten $\neq$ (0,0) werden als Polarkoordinate (r,φ) verwendet.

b) komplexe Zahl $z = a + ib$

$$\begin{aligned} r &= |z| = +\sqrt{a^2+b^2} \\ a &= |z|\cdot\cos(\varphi) \\ b &= |z|\cdot\sin(\varphi) \\ z &= |z|\cdot\cos(\varphi) + i\cdot|z|\cdot\sin(\varphi) \\ z &= |z|\cdot(\cos(\varphi)+i\cdot\sin(\varphi)) \end{aligned}$$

Darstellung von z durch Polarkoordinate

Beispiel: a) $z_1 = 2\cdot(\cos(\frac{\pi}{4}) + i\cdot\sin(\frac{\pi}{4}))$
$= 2\cdot(0,5\sqrt{2} + i\cdot 0.5\sqrt{2})$

b) $z_2 = 2 + i$
$|z_2| = \sqrt{5}$
$z_2 = \sqrt{5}\cdot(\frac{2}{\sqrt{5}+\frac{1}{\sqrt{5}}}i)$ Suche φ mit $0 \le 2\pi$ mit $\cos(\varphi) = \frac{2}{\sqrt{5}}, \sin(\frac{1}{\sqrt{5}}z_2 \approx \sqrt{5}\cdot(\cos(0,46)+$
$i\cdot\sin(0,46))$

c) Die komplexen Zahlen von Betrag 1 entsprechen den Punkten auf Einheitskreis:
$\cos(\varphi) + i\sin(\varphi), 0 \le \varphi \le 2\pi$

1.7 Additionstheoreme der Trigonometrie

(a) $$\sin(\varphi+\psi) = \sin(\varphi)\cdot\cos(\psi) + \cos(\varphi)\cdot\sin(\psi)$$

(b) $$\cos(\varphi+\psi) = \cos(\varphi)\cdot\cos(\psi) - \sin(\varphi)\cdot\sin(\psi)$$

1.8 geometrische Interpretation der Multiplikation

a) $w = |w|\cdot(\cos(\varphi) + i\cdot\sin(\varphi))$
$z = |z|\cdot(\cos(\psi) + i\cdot\sin(\psi))$
$w\cdot z = |w|\cdot|z|\cdot(\cos(\varphi)\cdot\cos(\psi) - \sin(\varphi)\cdot\sin(\psi)) + i(\sin(\varphi)\cdot\cos(\psi) + \cos(\varphi)\cdot\sin(\psi))$
$w\cdot z = |w\cdot z|(\cos(\varphi+\psi) + i\cdot\sin(\varphi+\psi))$

b) $z = i, w = a + ib$
$i\cdot w = -b\cdot ia$

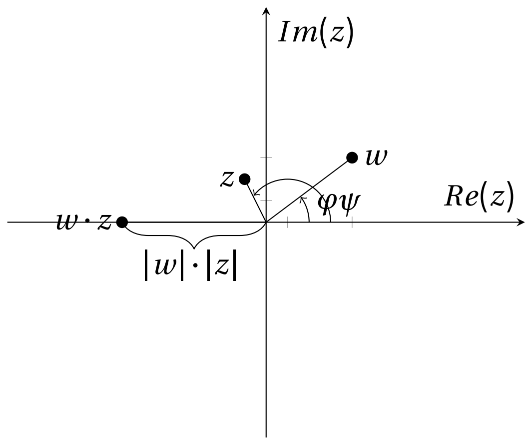


Abbildung 5: Multiplizieren komplexer Zahlen

Multiplikation mit i $\hat{=}$ Drehung um 90°

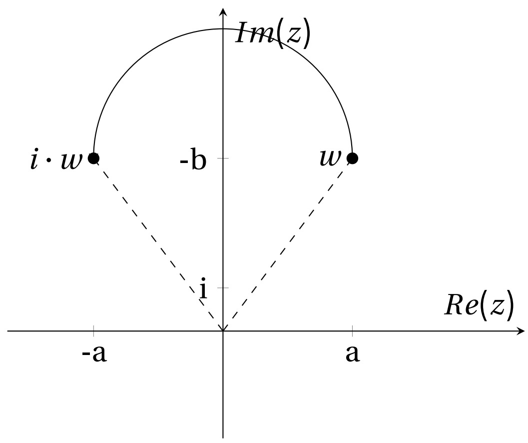


Abbildung 6: Multiplikation mit i

1.9 Bemerkung und Definition

Wir werden später die komplexe Exponentialfunktion einführen.
e^z für alle $z \in \mathbb{C}$ e = Euler'sche Zahl $\approx 2,718718\ldots$
$e^{z_1} \cdot e^{z_2} = e^{z_1+z_2}$ $e^{-z} = \frac{1}{e^z}$
Es gilt: $t \in \mathbb{R} : e^{it} = \cos(t) + i \cdot \sin(t)$
Jede komplexe Zahl lässt sich schreiben $z = r \cdot e^{i \cdot \varphi}$, $r = |z|, \varphi$ Winkel

$r \cdot (\cos(\varphi) + i \sin(\varphi))$ ist Polarform von z.

$z = a + bi$ ist kartesische Form von z. $\bullet(r, \varphi)$ Polarkoordinaten

$|e^{i\varphi}| = +\sqrt{cos^2(\varphi) + \sin^2(\varphi)} = 1$

$e^{i\varphi}, 0 \leq \varphi \leq 2\pi$, Punkte auf dem Einheitskreis.

$e^{i\pi} = -1$

(Euler'sche Gleichung) $\boxed{e^{i\pi} + 1 = 0}$

1.10 Satz

Sei $w = |w| \cdot (\cos(\varphi) + i \cdot \sin(\varphi)) \in \mathbb{C}$

a) Ist $m \in \mathbb{Z}$, so ist $w^m = |w|^m \cdot (\cos(m \cdot \varphi) + i \cdot \sin(m \cdot \varphi))$
   $(m < 0 : w^m = \frac{1}{w^{|m|}}), w \neq 0$

b) Quadratwurzeln

c) Ist $n \in \mathbb{N}, w \neq 0$, so gibt es genau n n-te Wurzeln von w:
   $\sqrt[n]{w} = + \sqrt[n]{|w|} \cdot (\cos(\frac{\varphi}{n} + \frac{2\pi \cdot k}{n}) + i \sin(\frac{\varphi}{n} + \frac{2\pi \cdot k}{n})), n \in \mathbb{N}, k \in \{0, \ldots, n-1\}$

Beweis. a) richtig, wenn $m = 0, 1$

$m \geq 2$. Folgt aus 1.8

$m = -a$:

$w^{-1} = \frac{1}{w} = \frac{1}{|w|^2 \cdot (\cos^2(\varphi) + i \cdot \sin^2(\varphi))} \cdot |w| \cdot \cos(\varphi) - \sin(\varphi)$

$= \frac{1}{w} = \frac{1}{|w| \cdot \underbrace{(\cos^2(\varphi) + i \cdot \sin^2(\varphi))}_{=1}} \cdot |w| \cdot \cos(\varphi) - \sin(\varphi)$

$= \frac{1}{|w|} \cdot (\cos(-\varphi + i \cdot \sin(-\varphi)) = |w|^{-1} \cdot (\cos(-\varphi) + \sin(-\varphi))$

□

1.11 Beispiel

Quadratwurzel aus i:

$|i| = 1$

Nach 1.10 b): $\sqrt{i} = \pm(\cos(\frac{\pi}{4} + i \cdot \sin(\frac{\pi}{4}))$
$= \pm(\frac{1}{2}\sqrt{2} + \frac{1}{2}\sqrt{2}i)$

1.12 Bemerkung

Nach 1.10 hat jedes Polynom
$x^n - w$ $(w \in \mathbb{C})$
eine Nullstelle in $\mathbb{C}$ (sogar n verschiedene wenn $w \neq 0$)
Es gilt sogar : *Fundamentalsatz der Algebra*
(C. F. Gauß 1777-1855)
Jedes Polynom $a_n x^n + \ldots + a_0$
mit irgendwelchen Koeffizienten: $a_n \ldots a_0 \in \mathbb{C}$ hat Nullstelle in $\mathbb{C}$

2 Folgen und Reihen

2.1 Definition

Sei k $\in \mathbb{Z}$, $A_k := \{m \in \mathbb{Z} : m > k\}$
$(k = 0,\ A_0 \in \mathbb{N}_0,\ k = 1,\ A_n \in \mathbb{N})$
Abbildung a : $A \Rightarrow \mathbb{R}(\text{oder } \mathbb{C})$

$$m \Rightarrow a_n$$

heißt *Folge* reeller Zahlen

$$(a_k, a_{k-1} \ldots)$$

Schreibweise:
$(a_m)_{m>k}$ oder einfach (a_m)
a_m heißt *m-tes Glied* der Folge, m *Index*

2.2 Beispiel

a) $a_n = 5$ für alle $n > 1$
$(5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, \ldots)$

b) $a_n = n$ für alle $n > 1$
(1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,...)

c) $a_n = \frac{1}{n}$
$(\frac{1}{1}, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \ldots)$

d) $a_n \frac{(n+1)^2}{2^n}$
$(2, \frac{9}{4}, 2, \frac{25}{16}, \ldots)$

e) $a_n = (-1)^n$
$(-1, 1, -1, 1, -1, 1, \ldots)$

f) $a_n = \frac{1}{2} a_{n_1} = \frac{1}{a_{n-1}}$ für $n \geq 2, a_1 = 1$
$(1, \frac{3}{2}, \frac{17}{12}, \ldots)$

g) $a_n = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{i}$
$(1, \frac{3}{2}, \frac{11}{6}, \ldots)$

h) $a_n = \sum_{i=1}^{n} (-1)^i \cdot \frac{1}{i}$
$(-1, \frac{-1}{2}, -\frac{-5}{6}, \ldots)$

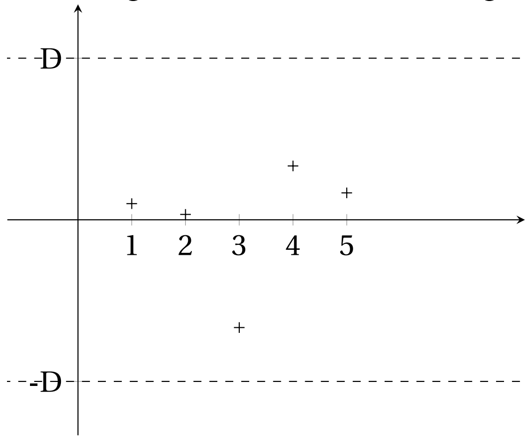
2.3 Definition

Eine Folge $(a_n)_{n>k}$ heißt *beschränkt*, wenn die Menge der Folgenglieder beschränkt ist.
D.h. $\exists D > 0 : -D \leq a_n \leq D$ für alle $n > k$.

2.4 Definition

Eine Folge $(a_n)_{n \geq k}$ heißt *konvergent* gegen $\varepsilon \in \mathbb{R}$ (konvergent gegen ε), falls gilt:
$\forall \varepsilon > 0 \exists n(\varepsilon) \in \mathbb{N} \forall n \geq n(\varepsilon) : |a_n - c| < \varepsilon$
$c = \lim_{n \Rightarrow \infty} a_n$ (oder einfach $c = \lim a_n$)
c heißt *Grenzwert* (oder Limes) der Folge (a_n)
(Grenzwert hängt nicht von endlich vielen Anfangsgliedern ab (der Folge))

Abbildung 7: Beschränktheit von Folgen



Eine Folge die gegen 0 konvertiert, heißt *Nullfolge*

2.5 Beispiele

a) $r \in \mathbb{R} : a_n = r$ für alle $n \geq 1$

$(r, r, \ldots)$

$\lim\limits_{n \Rightarrow \infty} = r$

$|a_n - r| = 0$ für alle n

Für jedes $\varepsilon > 0$ kann man $n(\varepsilon) = 1$ wählen

b) $a_n = n$ für alle $n \ \geq 1$

Folge ist nicht beschränkt, konvergiert nicht.

c) $a_n = \frac{1}{n}$ für alle $n \geq 1$

(a_n) ist Nullfolge.

Sei $\varepsilon > 0$ beliebig. Suche Index $n(\varepsilon)$ mit $|a_n - o| < \varepsilon$ für alle $n \geq n(\varepsilon)$

D.s. es muss gelten.

$\frac{1}{n} < \varepsilon$ für alle $n \geq n(\varepsilon)$

Ich brauche : $\frac{1}{n(\varepsilon)} < \varepsilon$

Ich brauche $n(\varepsilon) > \frac{1}{\varepsilon}$

Aus Mathe I folgt, dass solch ein $n(\varepsilon)$ existiert.

z.B $n(\varepsilon) - \lceil \frac{1}{2} \rceil + 1 > \frac{1}{\varepsilon}$

Dann:
$|a_n - 0| < \frac{1}{n} < \varepsilon$ für alle $n \geq n(\varepsilon)$

d) $a_n = \frac{3n^2+1}{n^2+n+1}$ für alle $n \geq 1$
Behauptung: $\lim\limits_{n \Rightarrow \infty} a_n = 3$

$$\begin{aligned} |a-3| &= \left|\frac{3n^2+1}{n^2+n+1} - 3\right| &= \left|\frac{3n^2+1-3(n^2+n+1)}{n^2+n+1}\right| \\ &= \left|\frac{-3n-2}{n^2+n+1}\right| &= \frac{3n+2}{n^2+n+1} \end{aligned}$$

Sei $\varepsilon > 0$. Benötigt wird $n(\varepsilon) \in \mathbb{N}$ mit $\frac{3n+2}{n^2+n+1} < \varepsilon$ für alle $n > n(\varepsilon)$.
$\frac{3n+2}{n^2+n+1} \leq \frac{5n}{n^2} = \frac{5}{n}$
Wähle $n(\varepsilon)$ so, dass $n(\varepsilon) > \frac{5}{\varepsilon}$
Dann gilt für alle $n \geq n(\varepsilon)$.
$|a_n - 3| = \frac{3n+2}{n^2+n+1} \leq \frac{5}{n} \leq \frac{5}{n(\varepsilon)} < \frac{5\varepsilon}{5} = \varepsilon$
Für alle $n \geq n(\varepsilon)$

e) $a_n = (-1)^n$ beschränkte Folge $-1 \leq a_{\leq} 1$ konvergiert nicht.
Sei $c \in \mathbb{R}$ beliebig, Wähle $\varepsilon = \frac{1}{2}$

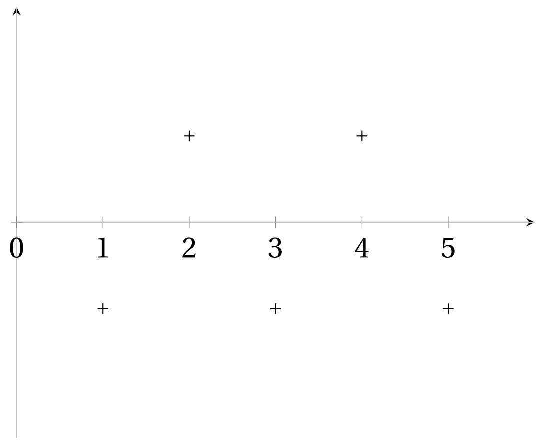


Abbildung 8: $(-1)^n$ ist beschränkt aber konvergiert nicht

$2 = |a_n - a_{n+1}| \leq |a_n - c| + |c - a_{n+1}| < \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$ ↯

2.6 Satz

Jede konvergente Folge ist beschränkt. (Umkehrung nicht: 2.5e))

Beweis. Sei $c = \lim a_n$, wähle $\varepsilon = 1$,
Es existiert $n(1) \in \mathbb{N}$ mit $|a_n - c| < 1$ für alle $n \geq n(1)$
Dann ist
$|a_n| = |a_n - c + c| \leq |a_n - c| + |c| < 1 + |c|$ für alle $n \geq n(1)$
$M = \max\{|a_k|, |a_{k+1}|, \ldots, |a_{n(1)-1}|, 1 + |c|\}$
Dann: $|a_n| \leq M$ für alle $n \geq k$
$-M \leq a_n \leq M$ □

2.7 Bemerkung

a) $(a_n)_{n\geq 1}$ Nullfolge $\Leftrightarrow$ $(|a_n|)_{n\geq 1}$ Nullfolge $(|a_n - 0| = |a_n| - ||a_n| - 0|$

b) $\lim\limits_{n\Rightarrow\infty} a_n = c \Leftrightarrow (a_n - c)_{n\geq k}$ ist Nullfolge $\Leftrightarrow (|a_n - c|)_{n\geq k}$ ist Nullfolge

2.8 Satz (Rechenregeln für konvergente Folgen)

Seien $(a_n)_{n\geq k}$ und $(b_n)_{n\geq k}$ konvergente Folgen, $\lim a_n = c, \lim b_n = d$.

a) $\lim|a_n| = |c|$

b) $\lim(a_n \pm b_n) = c \pm d$

c) $\lim(a_n \cdot b_n) = c \cdot d$
insbesondere $\lim(r \cdot b_N) = r \cdot \lim b_n = r \cdot d$ für jedes $r \in \mathbb{R}$.

d) Ist $b_n \neq 0$ für alle $n \geq k$ und ist $d \neq 0$, so $\lim(\frac{a_n}{k_n}) = \frac{c}{d}$

e) Ist (b_n) Nullfolge, $b_n \neq 0$ für alle $n \geq k$, so konvergiert ($\frac{1}{b_n}$ *nicht*!).

f) Existiert $m \geq k$ mit $a_n \leq b_n$ für alle $n \geq m$, so ist $c \leq d$.

g) Ist $(c_n)_{n\geq k}$ Folge und existiert $m \geq k$ mit $0 \leq c_n \leq a_n$ für alle $n \geq m$ und ist (a_n) eine Nullfolge, so ist auch (c_n) eine Nullfolge.

h) Ist $(c_n)_{n\geq l}$ beschränkte Folge und ist $(a_n)_{n\geq k}$ Nullfolge, so ist auch $(c_n \cdot a_n)_{n\geq k}$ Nullfolge.
$\boxed{c_n \text{ muss nicht konvergieren!}}$

Beweis. Exemplarisch:

b) Sei $\varepsilon > 0$. Dann existiert $n_1(\frac{\varepsilon}{2})$ und $n_2(\frac{\varepsilon}{2})$ und $|a_n - c| < \frac{\varepsilon}{2}$ für alle $n \geq n_1(\frac{\varepsilon}{2})$
$|b_n - d| < \frac{\varepsilon}{2}$ für alle $n \geq n_2(\frac{\varepsilon}{2})$
Suche $n(\varepsilon) = max(n_1(\frac{\varepsilon}{2}, n_2(\frac{\varepsilon}{2}))$
Dann gilt für alle $n > n(\varepsilon)$:
$|a_n + b_n - (c+d)| = |(a_n - c) + (b_n - d)| \leq |a_n - c| + |b_n - d| < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon$

f) Angenommen $c > d$. Setze $\delta = c - d > 0$
Es existiert $\tilde{m} \geq m$ mit $|c - a_n| < \frac{\delta}{2}$
und $|b_n - d| < \frac{\delta}{2}$ für alle $n \geq \tilde{m}$.
Für diese n gilt:
$0 < \delta \leq \delta + b_n - a_n = c - d + b_n - a_n \geq 0$ nach Voraussetzung
$= |c - a_n - d + b_n| \leq |c - a_n| + |d - b_n|$
$\leq \frac{\delta}{2} + \frac{\delta}{2} = \delta$ ↯

□

2.9 Satz

a) $0 \leq q \leq 1$ Dann ist $(q^n)_{n \geq 1}$ Nullfolge

b) Ist $m \in \mathbb{N}$, so ist $(\frac{1}{n^m})_{n \geq 1}$ Nullfolge.

c) Sei $0 \leq q < 1, m \in \mathbb{N}$
Dann ist $(n^m \cdot q^n)_{n \geq 1}$ Nullfolge

d) Ist $r > 1, m \in \mathbb{N}$, so ist $(\frac{n^m}{r^n}{}_{r \geq 1}$ eine Nullfolge)

e) $P(x) = a_m \cdot x^m + \ldots a_0, a_i \in \mathbb{R}, a_m \neq 0$
$Q(x) = b_e \cdot x^e + \ldots b_0, b_i \in \mathbb{R}, b_e \neq 0$
Sei $Q(n) \neq 0$ für alle $n \geq k$.

- Ist $m > e$, so ist $\frac{P(n)}{Q(n)}$ nicht konvergent
- Ist $m = e$, so ist $\lim_{n \Rightarrow \infty} \frac{P(n)}{Q(n)} = \frac{a_m}{b_e} = \frac{a_m}{b_m}$

- Ist $m < l$, so ist$(\frac{P(n)}{Q(n)})$ ein Nullfolge

a) Sei $0 \leq q \leq 1$ Dann ist $(q^n)_{n\geq}$ eine Nullfolge

Beweis. a) Richtig für $q > 0$. Sei jetzt $q > 0$.
Sei $\varepsilon > 0$. Mathe I: Es gibt ein $n(\varepsilon) \in \mathbb{N}$ mit $q^{n(\varepsilon} < \varepsilon$.
Für alle $n \geq n(\varepsilon)$ gilt: $|q^n - o| = q^n < q^{n(\varepsilon)} < \varepsilon$.

□

b) 2.5c): $\frac{1}{n}_{n\geq 1}$ Nullfolge Beh. folgt mit 2.8.c)

c) Richtig für $q = 0$. Sei jetzt $q > 0$.
1.Fall: m= 1
$\frac{1}{q} = 1 + t, t > 0.$
$(t+1)^n \underbrace{=}_{Binomialsatz} 1 + nt + \frac{n(n+1)}{2}t^2 > \frac{n(n-1)}{2}t^2$ für alle $n \geq 2$
$q^n = \frac{1}{(1+t)^n} < \frac{2}{n(n-1)t^2}$
$0 \leq n \cdot q^n < \frac{2}{(n-1)t^2} \Leftarrow$ Nullfolge 2.5e),2.8e)
Nach 2.8g) ist $(n \cdot q^n)_{n\geq q}$ Nullfolge, also auch $(n \cdot q^n)_{n\geq 1}$.
2.Fall: $m > 1$.
Setze $0 < q' = \sqrt[m]{q} \in \mathbb{R}$

$$\begin{aligned} n^m \cdot q^n &= n^m \cdot (q')^n)^m)^n \\ &= (n \cdot (q')^n)^m)^n)m = 1\text{anwenden} \end{aligned}$$

$0 < q' < 1$
$(n^m + q^n)_{n\geq 1}$ Nullfolge noch Fall $m = 1$ und 2.8e)

d) Folgt aus c) und $q = \frac{1}{r}$

e) Ist $m \leq l$, so ist $\frac{P(n(}{Q(n)} = \frac{n^m(a_m + a_{m-1}\cdot\frac{1}{n} + \ldots + a_1 \cdot \frac{1}{n^{m-1}} + a_0 \cdot \frac{1}{n^m})}{n^l(b_l + b_{l-1}\cdot\frac{1}{n} + \ldots + b_1 \cdot \frac{1}{n^{l-1}} + b_0 \cdot \frac{1}{n^l})} = \frac{1}{n^{l-m}} \cdot \frac{I}{II}$
$(I) \longrightarrow a_m, (II) \longrightarrow b_l \; \frac{(I)}{(II)} \Rightarrow \frac{a_m}{b_l}$
$n < l, \frac{1}{n^{l-m}}$ Nullfolge
$\frac{P(n)}{Q(n)} \Rightarrow 0 \cdot \frac{a_m}{b_l}$
$m > l:$
Beh. folgt aus Fall $m < l$ und 2.8e).

2.10 Bemerkung

Betrachte Bijektionsverfahren, die Zahl $x \in \mathbb{R}$ bestimmt.

$a_0 \leq a_1 \leq a_2 \leq \dots$

$b_0 \geq b_1 \geq b_2 \geq \dots$

$a_n \leq x \leq b_n$

$0 < b_n - a_n = \frac{b_0 - a_0}{2^n}$

$0 \leq |x - a_n| \leq b_n - a_n = \frac{b_0 - a_n}{2} \Leftarrow$ Nullfolge (2.9b)

2.8e)($|x - a_n|$) Nullfolge.

2.7e): $\lim\limits_{n\to\infty} a_n = x$

Analog: $\lim\limits_{n\to\infty} b_n = x$

2.9 d) e) sind Beispiele für asymptotischen Vergleich von Folgen

2.11 Definition

a) Eine Folge $(a_n)_{n\geq k}$ heißt *strikt positiv*, falls $a_n > 0$ für alle $n \geq k$.
Sei im Folgenden $(a_n)_{n\geq k}$ eine strikt positive Folge.

b)
$$\begin{aligned} \mathbb{O}(a_n) &= \{(b_n)_{n\geq k} : \text{ist beschränkt}\} \\ &= \{(b_n)_{n\geq k} \exists C > 0 \text{ mit } |b_n| \leq C \cdot a_n\} \end{aligned}$$

c) $O(a_n) = \{(b_n)_{n\geq k} : (\frac{b_n}{a_n})\text{ist Nullfolge}\}$

$(b_n) \in o(a_n)$ heißt Folge (a_n) wächst wesentlich schneller als die Folge (b_n). Klar:

$o(a_n) \subset O(a_n)$

$O, o($ „groß Oh“, „klein Oh“)

Landau-Symbole

z.B
$$\begin{array}{rcll} (n^2) & \in & o(n^3) & \\ (n^2+n+1) & \in & O(n^2) & n^2+n+1 \leq 3n^2 \\ (n^2) & \in & O(n^2+n+1) & n^2 \leq n^2+n+1 \end{array}$$

$O(1)$ = Menge der beschränkten Folgen

$o(1)$ = Menge aller Nullfolgen

Häufig gewählte Schreibweise:

$n^2 \underbrace{=}_{\text{eig. falsch!}} o(n^2)$ statt $(n^2) \in o(n^3)$

$n^2 + n + 1 = O(n^2)$ statt $(n^2 + n + 1)$

2.12 Satz

Sei $P(x) = a_m \cdot x^m + \ldots + a_1 \cdot x + a_o, m \geq 0, a_m \neq 0$.

a) $(P(n)) \in o(n!)$ für alle $l > m$ und
$(P(n)) \in O(n^l)$ für alle $l \geq m$.

b) ist $r > 1$, so ist $(P(n)) \in o(r^n)$.
$[(r^n)$ wächst deutlich schneller als $(P(n))]$

Beweis. a) folgt aus 2.9e).
$m = l$ (2.6)
b) folgt aus 2.9d) und 2.8 b)c) □

2.13 Bemerkung

Algorithmus:
Sei t_n = maximale Anzahl von Reihenschritten des Algorithmus' bei Input der Länge n (binär codiert).
Worst-Case-Komplexität:
Algorithmus hat polynomielle Zeitkomplexität, falls ein $l \in \mathbb{N}$ existiert mit $(t_n) \in O(n^l)$. (*gutartig*)
Algorithmus hat polynomielle Zeitkomplexität, falls ein $l \in \mathbb{N}$ existiert mindestens exponentielle Zeitkomplexität, falls $r > 1$ exestiert mit $(r^n) \in O(b_n)$ (*bösartig)*

2.14 Definition

a) Eine Folge $(a_n)_{n \geq k}$ heißt *monoton wachsend (steigend)*, wenn $a_n \leq a_{n+1}$ für alle $n \geq k$. Sie heißt *steng monoton wachsend (steigend)*, wenn $a_n < a_{n+1}$ für alle $n \geq k$

b) $(a_n)_{n \geq k}$ heißt *monoton fallend*, falls $a \geq a_{n+1}$ für alle $n \geq k$

2.15 Beispiel

a) $a_n = 1$ für alle $n > 1(a_n)$ ist monoton steigend und monoton fallend.

b) $a_n = \frac{1}{n}$ für alle $n \geq 1$.
(a_n) streng monoton fallend.

c) $a_n = \sqrt{n}$ (positive Wuzel)
$(a_n)n \geq 1$ streng monoton steigend.

d) $a_n = 1 - \frac{1}{n}, n \geq 1$
$(a_n)_{n \geq 1}$ streng monoton steigend.

e) $a_n = (-1)^n, n \geq 1$
(a_n) ist weder monoton steigend noch monoton fallend.

2.16 Satz

a) Ist $(a_n)_{n \geq k}$ monoton steigend und nach oben beschränkt (d.h es existiert $D \in \mathbb{R}$ mit $a_n \leq D$ für alle $n \geq k$), so konvergiert $(a_n)'$ und $\lim\limits_{n \to \infty} a_n = \sup\{a_n : n \geq k\}$

b) $(a_n)_{n \geq k}$ monoton fallend und nach unten beschränkt, so konvergiert $(a_n)_{n \geq k}$ und $\lim\limits_{n \to \infty} a_n = \inf\{a_n : n \geq k\}$.

Beweis. a)
$c = \sup\{a_n : n \geq k\}$. existiert (Mathe I). Zeige: $\lim\limits_{n \to \infty} a_n = c$.
Sei $\varepsilon > 0$. Dann existiert $n(\varepsilon)$ mit $c - \varepsilon < a_{n(\varepsilon)} \leq c$
Denn sonst $a_n \leq c - \varepsilon$ für alle $n \geq k$ und $c - \varepsilon$ wäre obere Schranke für $\{a_n : n \geq k\}$
Widerspruch dazu, dass c kleinste obere Schranke. Für alle $n \geq n(\varepsilon)$
$c - \varepsilon \leq a_{n(\varepsilon)} \leq a_n \leq c$
$|a_n - c| < \varepsilon$ für alle $n \geq n(\varepsilon)$.
b) analog □

2.17 Satz (Cauchy'sches Konvergenzkriterium)

(Cauchy, 1789 - 1859)

Sei $(a_n)_{n \geq k}$ eine Folge. Dann sind äquivalent:

(1) $(a_n)_{n \geq k}$ konvergent

(2) $\forall \varepsilon > 0 \exists\, N - M(\varepsilon) \forall n, m \geq N : |a_n - a_m| < \varepsilon$ (Cauchyfolge)
Grenzwert muss nicht bekannt sein!

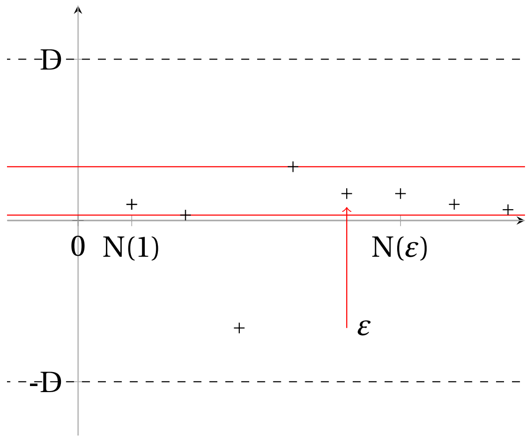


Abbildung 9: Cauchy'sches Konvergenzkriterium

2.18 Definition

a) Sei $(a_i)_{i \geq k}$ eine Folge, $s_n = \sum\limits_{i=k}^{n} a_i, n \geq k$ (Partialsummen der Folge)
Dann heißt $(s_n)_{n \geq k}$ eine *unendliche Reihe*
$(k - 1 : a_1, a_1 + a_2, a_1 + a_2 + a_2, \ldots)$
Schreibweise : $\sum\limits_{i=k}^{\infty} a_i$

b) Ist die Folge $(s_n)_{n \geq k}$ konvergent mit $\lim\limits_{n \to \infty} s_n = c$,
so schreibt man $\sum\limits_{i=k}^{\infty} a_i = c$. Reihe *konvergiert.*
Wenn (s_n) nicht konvergiert, so heißt die Reihe $\sum\limits_{i=k}^{\infty} a_i$ *divergent.*
(Zwei Bedeutungen von $\sum\limits_{i=k}^{\infty} a_i$:

- Folge der Partialsummen
- Grenzwert von (s_n), falls dieser existiert

$\sum\limits_{i=k}^{\infty} a_i = \sum\limits_{n=k}^{\infty} a_n = (s_m)_{m\geq k}$

2.19 Satz

a) Ist die Reihe $\sum\limits_{i=k}^{\infty} a_1$ konvergent, so ist $(a_1)_{i\geq k}$ eine Nullfolge.

b) Ist die Folge der Partialsummen $s_n = \sum\limits_{i=k}^{\infty} a_i$ beschränkt und ist $a_i \geq 0$ für alle i, so ist $\sum\limits_{i=k}^{\infty} a_i$ konvergent.

Beweis. a)
Sei $\sum\limits_{i=k}^{\infty} a_i = c$.
Sei $\varepsilon > 0$ Dann existiert $n(\frac{\varepsilon}{2}) \geq k$ mit $|\sum\limits_{i=k}^{\infty} 2a_i - c| < \frac{\varepsilon}{2}$ für alle $n \geq n(\frac{\varepsilon}{2})$
Dann gilt $|a_{n+1} - o| = |an+1| = |\sum\limits_{i=k}^{n+1} a_i + \sum\limits_{i=k}^{n} a_i| =$
$|\sum\limits_{i=k}^{n+1} a_i + c - \sum\limits_{i=k}^{n} a_i + c| \leq |\sum\limits_{i=k}^{n+1} a_i + c| + |\sum\limits_{i=k}^{n} a_i - c| < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon.$
(a_n) ist Nullfolge
b) folgt aus 2.16 a), denn (s_n) ist monoton steigend □

2.20 Beispiele

a) Sei $q \in \mathbb{R}$.
Ist $q \neq 1$, so ist $\sum\limits_{i=k}^{n} q^i = \frac{q^{n+1}-1}{q-1}$
$[(\sum\limits_{i=k}^{n} q^i) \cdot (q-1)]$
Sei $|q| < 1$, d.h $-1 < q < 1$.
Dann ist $\sum\limits_{i=k}^{\infty} q^i = \frac{1}{1-q}$ (konvergiert)
$s_n = \sum\limits_{i=k}^{n} q^1 = \frac{q^{n+1}-1}{q-1}$
$\lim\limits_{n\to\infty} s_n = \lim\limits_{n\to} \frac{q^{n+1}=1}{q-1}$
(q^n) Nullfolge $(2.9_{a)}$ für $q \geq 0, 2.8_{e}) + 2.9_{a)}$ für $q < 0, q = -|q|)$

Geometrische Reihe
Sei $|q| \geq 1$. Dann ist $\sum\limits_{i=k}^{\infty} q^i$ divergent, da dann (q^i) keine Nullfolge (2.18$_{a)}$)

b) $\sum\limits_{i=k}^{\infty} \frac{1}{i}$ divergiert
harmonische Reihe
$\sum\limits_{i=k}^{n} \frac{1}{n}$

$n = 2^0 = 1 \quad : s_1 = 1$

$n = 2^1 = 2 \quad : s_2 = 1 + \frac{1}{2}$

$\dots$

$n = 2^3 = 8 \quad : s_8 = 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} + \frac{1}{6} + \frac{1}{7} + \frac{1}{8} > s_7 > s_6 \dots$

Per Induktion zu beweisen!

c) $\sum\limits_{i=0}^{\infty} \frac{1}{i^2}$ konvergiert.
Folge der Partialsummen ist monoton steigend.

2.16a) Zeige, dass die Folge der Partialsummen nach aber beschränkt ist.

$$\begin{aligned} s_n \leq s_{2^n-1} &= 1 + (\tfrac{1}{2} + \tfrac{1}{3}) + (\tfrac{1}{4^2} + \tfrac{1}{5^2} + \tfrac{1}{6^2} + \tfrac{1}{7^2}) + \dots + (\tfrac{1}{(2^{n-1})^2} + \dots \tfrac{1}{(2^n-1)^2}) \\ &\leq 1 + 2 \cdot \tfrac{2}{2^2} + 4 \cdot \tfrac{1}{4^4} + \dots + 2^{n-1} \cdot \tfrac{1}{(2^{n-1})^2} \\ &\leq \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{2^i} = \frac{1}{1-\frac{1}{2}} = 2 \end{aligned}$$

2.16a) $\sum\limits_{i=0}^{\infty} \frac{1}{2^i}$ Kgt., Grenzwert≤ 2. (später: Grenzwert ist $\frac{\pi^2}{6}$)
Es gilt allgemeiner:

$s \in \mathbb{N}, s \geq 2 \Rightarrow \sum\limits_{i=0}^{\infty} \frac{1}{i^s}$ konvergiert.

Allgemeiner: $s \in \mathbb{R}, s > 1 \Rightarrow \sum\limits_{i=0}^{\infty} \frac{i}{i^2}$ konvergiert

d) $\sum\limits_{i=0}^{\infty} (-1)^i \cdot \frac{1}{i}$ konvergiert:

$s_{2n} = \underbrace{(-1 + \tfrac{1}{2})}_{<0} + \underbrace{(-\tfrac{1}{3} + \tfrac{1}{4})}_{<0} + \dots \underbrace{(-\tfrac{1}{2n-1} + \tfrac{1}{2n})}_{<0}$

$s_{2n} \leq s2(n+1)$ für alle $n \in \mathbb{N}$

(s_{2n}) ist monoton fallend. $s_{2n-1} = -1 + \underbrace{(\tfrac{1}{2} - \tfrac{1}{3})}_{>0} + \dots + \underbrace{(\tfrac{1}{2n-2} - \tfrac{1}{2n-1})}_{>0}$

(s_{2n-1}) ist monoton wachsend

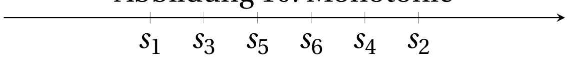
Ist k ungerade, so ist $s_k < s_l$: Wähle n so, dass $2n - a \geq k, 2n \geq l$

$s_k \underset{(2)}{\leq} s_{2n-1} \underset{\uparrow}{<} s_{2n} \underset{(1)}{\leq} s_l$

$s_{2n} = s_{2n-1} + \frac{1}{2n}$

Abstand $s_{2n} - s_{2n-1} = \frac{1}{2n}$ geht gegen 0.

Abbildung 10: Monotonie



$\sup\{s_{2n-1} : n \geq 1\}$

$\inf\{s_{2n} : n \geq 1\}$

$= \lim\limits_{i\to\infty}(-1^i)\frac{1}{i} \in]-1, -\frac{1}{2}[$ (Es gilt $\lim = -\ln 2$)

Bemerkung

Was bedeutet $0.\bar{8} = 0.88888888\ldots$? (Dezimalsystem)

$0.\bar{8} = \frac{8}{10} + \frac{8}{100} + \frac{8}{1000} + \ldots = 8 \cdot \sum\limits_{i=0}^{\infty} \frac{1}{10^i} = 8 \cdot (\frac{10}{9} - 1) = \frac{8}{9}$

$\sum\limits_{i=0}^{\infty} \frac{1}{10^i} = \sum\limits_{i=0}^{\infty} (\frac{1}{10})^i = \frac{1}{1-\frac{1}{10}} = \frac{10}{9}$

2.21 Satz (Leibniz-Kriterium)

Ist $(a_i)_{i\geq k}$ eine monoton fallende Nullfolge (insbesondere $a_i \geq 0$ falls $i \geq k$), so ist $\sum\limits_{i=k}^{\infty}(-1)^i a_i$ konvergent.

2.22 Satz (Majoranten-Kriterium)

Seien $(a_i)_{i\geq k}$, $(b_i)_{i\geq k}$ Folgen, wobei $b_i \geq 0$ für alle $i \geq k$ und $|a_i| \leq b_i$ für alle $i \geq k$. Dann gilt

Ist $\sum\limits_{i=k}^{\infty} b_i$ konvergent, so auch $\sum\limits_{i=k}^{\infty} a_i$ und $\sum\limits_{i=k}^{\infty} |a_i|$. Für die Grenzwerte gilt:

$|\sum\limits_{i=k}^{\infty} a_i| \leq \sum\limits_{i=k}^{\infty} |a_i| \leq \sum\limits_{i=k}^{\infty} b_i$

Beweis. Konvergenz

von $\sum\limits_{i=k}^{\infty} |a_i|$ folgt aus 2.16 a).

$\sum_{i=k}^{\infty} |a_i| \leq \sum_{i=k}^{\infty} b_i$ folgt aus 2.8 f).
Sei $m > n$:
$|\sum_{i=k}^{m} a_i - \sum_{i=k}^{n} b_i| = \sum_{i=n+1}^{m} a_i \leq \sum_{i=n+1}^{m} |a_i| = |\sum_{i=k}^{m} |a_i| - \sum_{i=k}^{n} |a_i||$
Mit Cauchy-Kriterium 2.17 folgt daher aus der Konvergenz von $\sum_{i=k}^{m} |a_i|$ auch die von $\sum_{i=k}^{\infty} a_i$.

□

2.23 Beispiel

$\sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{+\sqrt{i}}$
$\sqrt{i} \leq i$ für alle $i \in \mathbb{N}$
$\frac{1}{\sqrt{i}} \geq \frac{1}{i}$ für alle $i \in \mathbb{N}$
Ang. $\sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{+\sqrt{i}}$ konvergiert. $\Rightarrow \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i}$ konvergiert. ↯
Widerspruch zu 2.20 b)

$a_i = (-1)^i \frac{1}{i}$
2.20d): $\sum_{i=1}^{\infty} a_i$ konvergiert, aber $\sum_{i=1}^{\infty} |a_i|$ konvergiert nicht. $(\star)$

2.24 Definition

$\sum_{i=k}^{\infty} a_i$ heißt *absolut konvergent*, falls $\sum_{i=k}^{\infty} |a_i|$ konvergiert.
(Falls alle $a_i \geq 0$: Konvergent = absolut Konvergent)

2.25 Korollar

Ist $\sum_{i=k}^{\infty} a_i$ absolut konvergent, so auch konvergent. Die Umkehrung gilt im Allgemeinen nicht.
Beweis: 1.Behauptung 2.22 mit $b_i = |a_i|$
Umkehrung siehe $(\star)$

Bemerkung

Was bedeutet $0, a_1, a_2, a_3, a_4 \dots$
$a_i \in \{0 \dots 9\}$ (Dezimalsystem)
$a_1 \cdot \frac{1}{10} a_2 \cdot \frac{1}{100} \dots a_n \cdot \frac{1}{10^n} \leq 9 \cdot \frac{1}{10} 9 \cdot \frac{1}{100} \dots 9 \cdot \cdot \frac{1}{10^n}$
$a_i \frac{1}{10} \leq 9 \frac{1}{10}$
$\sum_{i=k}^{\infty} 9 \frac{1}{10} = 9 \cdot \left(\frac{1}{1-\frac{1}{10}} - 1\right) = 1 \Rightarrow \sum_{i=k}^{\infty} a_i \frac{1}{10}$ konvergiert

2.26 Satz

Sei $\sum_{i=k}^{\infty} a_i$ eine Reihe.

a) *Wurzelkriterium*
Existiert $q < 1$ und ein Index i_0, so dass $\sqrt[i]{|a_i|} \leq q$ für alle $i \geq i_0$.
so konvergiert die Reihe $\sum_{i=k}^{\infty} a_i$ absolut.
Ist $\sqrt[i]{|a_i|} \geq 1$ für unendlich viele i so divergiert $\sum_{i=k}^{\infty} a_i$.

b) *Quotientenkriterium*
Existiert $q > 1$ und ein Index i_0, so dass $|\frac{a_{i+1}}{a_i}| \leq$ für alle $i \geq i_0$,
so konvergiert $\sum_{i=k}^{\infty} a_i$ absolut.

Beweis. a) $|a_i| \leq q^i$ für alle $i \geq i_0$

$\sum_{i=i_0}^{\infty} q^i$ konvergiert (2.20 a))

$\underset{2.22}{\Rightarrow} \sum_{i=i_0}^{\infty} |a_i|$ konvergiert

$\Rightarrow \sum_{i=k}^{\infty} |a_i|$ konvergiert.

$\sqrt[i]{|a_i|} \geq 1$ für unendlich viele i

$\Rightarrow$ $|a_i| \geq 1$ für unendlich viele i

$\Rightarrow$ (a_i) sind keine Nullfolge

$\Rightarrow$ $\sum\limits_{i=k}^{\infty} a_i$ divergiert.

b) Sei $i \geq i_0$.

$$|\frac{a_i}{a_{i0}}| = |\frac{a_i}{a_{i-1}}| \cdot |\frac{a_i}{a_{i-2}}| \cdot \ldots \cdot |\frac{a_{io+1}}{a_{i0}}| \leq q \cdot q \cdot \ldots \leq= q^{i-i0} = \frac{q^i}{q^{i0}}$$

$\uparrow$ Voraussetzung:

jeder dieser Quotienten ist $\leq q$

$$|a_i| \leq \underbrace{\frac{|a_i 0|}{q^{i0}}}_{=:c} \cdot q^i \qquad \sum_{i=i_0}^{\infty} c \cdot q^i \text{ konvergent}$$

$\underset{2.22}{\Rightarrow}$ $\sum\limits_{i=i_0}^{\infty} |a_i|$ konvergiert.

$\Rightarrow$ $\sum\limits_{i=k}^{\infty} |a_i|$ konvergiert

$\square$

2.27 Bemerkung

a) Es reicht *nicht* in 2.26 nur vorauszusetzen, dass $\sqrt[i]{|a_i|} > 1$ für alle $i \geq i_o$ bzw. $\frac{a_{i+1}}{a_i} < 1$ für alle $i \geq i_0$.

z.B. harmonische Reihen : $\sum\limits_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i}$ divergiert.

Aber: $\sqrt[i]{\frac{1}{i}} > 1$ für alle i.

$\frac{i}{i+1} < 1$ für alle i

b) Es gibt Beispiele von absolut konvergenten Reihen mit $|\frac{a_{i+1}}{a_i}|$ für unendlich viele i.

2.28 Beispiel

Sei $x \in \mathbb{R}$. Dann konvergiert $\sum\limits_{i=0}^{\infty} \frac{x^i}{i!}$ absolut $(0^0 = 1, 0! = 1)$:

Quotientenkriterium:

$|\frac{x^{i+1}\cdot i!}{(i+1)!\cdot x^i}| = |\frac{x}{i+1}| = \frac{|x|}{i+1}$ Wähle i_o, so dass $i_0 + 1 > 2 \cdot |x|$
Für alle $i \geq i_0$:
$\frac{|x|}{(i+1)} \leq \frac{|x|}{(i_0+1)} < \frac{|x|}{2\cdot|x|} = \frac{1}{2} = q.$

2.29 Bemerkung

Gegeben seien zwei endliche Summen
$\sum_{n=0}^{k} a_n, \sum_{n=0}^{l} b_n.$
$(\sum_{n=0}^{k} a_n)(\sum_{n=0}^{l} b_n)$ $(\bigstar)$
Distributivgesetz: Multipliziere a_i mit jedem b_i und addiere diese Produkte.

$$(\bigstar) = \underbrace{a_0 b_0}_{\text{Indexsumme 0}} + \underbrace{(a_0 b_1 + a_1 b_0)}_{\text{Indexsumme 2}} + \ldots + \underbrace{a_k b_l}_{\text{Indexsumme k+l}}$$

2.30 Definition

Seien $\sum_{i=0}^{\infty} a_n, \sum_{n=0}^{\infty} b_n$ unendliche Reihen.

Das *Cauchy-Produkt*(*Faltungsprodukt*) der beiden Reihen ist die Reihe $\sum_{n=0}^{\infty} c_n$, wobei

$c_n = \sum_{n=0}^{\infty} a_i \cdot b_{n-1} = a_0 b_n + a b_{n-1} + \ldots a_n b_0$

2.31 Satz

Sind $\sum_{n=0}^{\infty} a_n, \sum_{n=0}^{\infty} b_n$ absolut konvergent Reihen mit Grenzwert c, d, so ist das Cauchy Produkt auch absolut konvergent mit Grenzwert $c \cdot d$. Beweis: [1]

3 Potenzreihen

3.1 Definition

Sei (b_n) eine reelle Zahlenfolge, $a \in \mathbb{R}$

Dann heißt $\sum_{n=0}^{\infty} b_n \cdot (x-a)^n$ eine *Potenzreihe* (mit *Entwicklungspunkt* a)) Speziell: $a = 0$

$\sum\limits_{n=0}^{\infty} b_n \cdot x^n$
(Potenzreihe im engeren Sinne)

Hauptfolge: Für welche $x \in \mathbb{R}$ konv. die Potenzreihe (absolut)?

Suche für $x = a$

Dann Grenzwert b_0 (da $0^0 = 1$)

Ob Potenzreihe für andere x konvergiert, hängt von b_n ab!

3.2 Beispiel

a) $\sum\limits_{n=0}^{\infty} x^n (b_n = 1 \text{ für alle } n)$
geometrische Reihe, konvergiert für alle $x \in \,]-1,1[$

b) $\sum\limits_{n=0}^{\infty} 2^n \cdot x^n (b_n = 2^n) = \sum\limits_{n=0}^{\infty} (2 \cdot x)^n$ konvergiert genau dann nach a), wenn $|2x| < 1$, d.h $|x| < \frac{1}{2}$ d.h. $x \in]-0.5, 0.5[$

c) $\sum\limits_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} (b_n = \frac{1}{n})$
konvergiert für alle x, $x \in]-\infty, \infty[= \mathbb{R}$

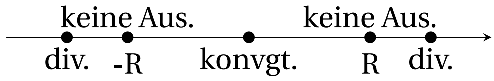
3.3 Satz

Sei $\sum\limits_{i=0}^{\infty} b_n \cdot x^n$ eine Potenzreihe (um 0). Dann gibt es $R \in \mathbb{R} \cup \{\infty\}, R \geq 0$, so dass gilt.

1. Für alle $x \in \mathbb{R}$ und $|x| < R$ konvergiert Potenzreihe absolut (d.h. $\sum\limits_{i=0}^{\infty} b_n \cdot x^n$ konvergiert, dann auch $\sum\limits_{i=0}^{\infty} b_n \cdot x^n$)
   Falls $R = \infty$, so heißt das, dass Potenzreihe für alle $x \in \mathbb{R}$ absolut konvergiert.

2. Für alle $x \in \mathbb{R}$ mit $|x| > R$ divergiert $\sum\limits_{n=0}^{\infty} b_n \cdot x^n$ $\left(\lim\limits_{n \to \infty} \sqrt[n]{|b_n|} = 0 \Rightarrow R = \infty\right)$ (Für $|x| = R$ lassen sich keine allgemeine Aussagen treffen).
   R heißt der *Konvergenzradius* der Potenzreihe $\sum\limits_{n=0}^{\infty} b_n \cdot x^n$

Abbildung 11: Konvergenzradien und ihre Aussagen



Konvergenzintervall $<-R, R>$
besteht aus allen x für die $\sum_{n=0}^{\infty} b_n \cdot x^n$ konvergiert.
$<$ kann [oder] bedeuten.
$>$ kann] oder [bedeuten.

Beweis. $|x_1, x_2|\mathbb{R}, |x_1| \leq |x_2|$
Dann: Falls $\sum_{n=0}^{\infty} |b_n| \cdot |x_n|^n$ konvergiert, so auch $\sum_{n=0}^{\infty} |b_n| \cdot |x_n|^n$ (2.22) $(\star)$
Falls $\sum b_n \cdot x_n$ für alle x absolut konvergiert, so setze $R = \infty$
Wenn nicht, so setze $R = \sup\{|x| : x \in \mathbb{R}, \sum_{n=0}^{\infty} |b_n| \cdot |x_n| \text{ konvergiert}\} < \infty$ Nach $(\star)$ gilt:
$|x| < R \Rightarrow \sum b_n x^n$ konvergiert absolut.
Für $|x| > R$ konvergiert $\sum b_n x^n$ nicht absolut.
Sie konvergiert sogar selbst nicht.

$$\sqrt[n]{|b_n| \cdot |x|^n} \leq q < 1 \text{ für alle } n \geq n_0$$

$$\Leftrightarrow \ |x| \cdot \sqrt[n]{|b_n|} \leq 1 < 1 \text{ für alle } n \geq n_0$$

$$\Leftrightarrow \ \lim_{n\to\infty} |x_n| \cdot \sqrt[n]{|b_n|} < 1$$

$$\uparrow \ (\text{setze } \varepsilon = 1 - \lim_{n\to\infty} |x| \cdot \sqrt[n]{|b_n|} > 0)$$

$$\Leftrightarrow \ |x| < \frac{1}{\lim_{x\to\infty} \sqrt[n]{|b_n|}}$$

$$\exists n_0 \forall n \geq n_0 : s - \tfrac{\varepsilon}{2} < |x| \cdot \sqrt[n]{b_n} \leq s + \tfrac{\varepsilon}{2} =: q < 1$$

$\square$

3.4 Bemerkung

Konvergenz von Potenzreihen der Form $\sum\limits_{n=0}^{\infty} b_n \cdot (x-a)^n$:

gleichen Konvergenzradius R wie $\sum\limits_{n=0}^{\infty} b_n \cdot x^n$

konvergiert absolut für $|x-a| < R$, d.h $x \in]a-R, a+R[$ Divergiert für $|x-a| > R$.

Keine Aussage für $|x-a| = R$, d.h $x = a-R$ oder $x = a+R$

Konvergenzintervall $< a-R, a+R >$

3.5 Die Exponentialreihe

a) Exponentialreihe

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} (b_n = \frac{1}{n!})$$

2.28 Reihe konvergiert für alle $x \in \mathbb{R}$.

Setze für $x \in \mathbb{R} : \exp(x) := \sum\limits_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}$

Exponentialfunktion $\exp(0) = \frac{0^n}{0!} = 1$

b) Serien $x, y \in \mathbb{R}$

$\exp(x) \cdot \exp(y) \underset{2.31}{=}$ Limes des Cauchy Produkts der beiden Reihen.

$$= \sum_{n=0}^{\infty} (\sum_{i=0}^{\infty} \frac{x^i}{i!} \cdot \frac{y^{n-i}}{(n-i)!})$$

$$= \sum_{n=0}^{\infty} (\sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \cdot \frac{n!}{i! \cdot (n-i)!} \cdot x^i \cdot y^{n-i})$$

$$= \sum_{n=0}^{\infty} (\sum_{i=0}^{\infty} \binom{n}{i} \cdot x \cdot y^{n-i})$$

$$= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n}! \cdot (x+y)^n = \exp(\text{x+y})$$

$\boxed{\exp(x+y) = \exp(x) \cdot \exp(y) \text{ für alle x,y} \in \mathbb{R}}$

Daraus folgt: $1 = \exp(0) = \exp(x + (-x)) = \exp(x) \cdot \exp(-x)$

$\boxed{\exp(-x) = \frac{1}{\exp(x)} \text{ für alle } x \in \mathbb{R}}$ $(\star)$

Für alle $x \geq 0 : \exp(x) > 0$. Dann auch wegen $(\star)$

$\boxed{\exp(x) > 0 \text{ für alle } x \in \mathbb{R}}$

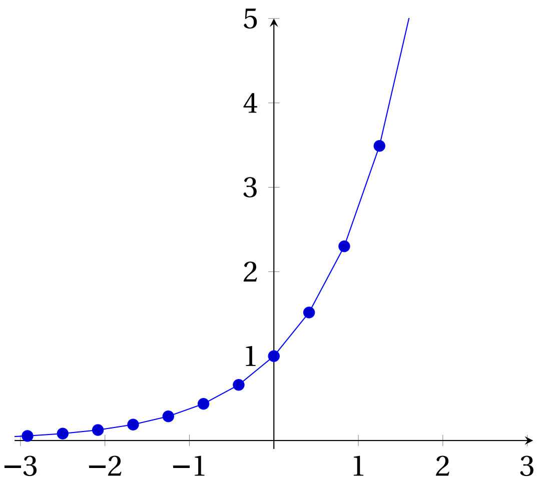


Abbildung 12: Die Exponentialreihe

c) $\exp(1) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{n!} = e$

Euler'sche Zahl

Approximation e durch $\sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{n!}$

$m = 2$	$1 + 1 + \frac{1}{2}$	$= 2,5$
$m = 3$	$2,5 + \frac{1}{6}$	$= 2,\bar{6}$
$\ldots m = 6$	$\frac{326}{126} + \frac{1}{720}$	$= 2,7180\bar{5}$

Es ist: $e \approx 2,71828\ldots$ (irrationale Zahl)

$\sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{n!}$ konvergiert schnell

$m \in \mathbb{N}$

$\exp(m) = \exp(\underbrace{1 + \ldots + 1}_{\leftarrow m \rightarrow})$

$\exp(1)^m = e^m$

$e^0 = 1 \; \exp(-m) = \frac{1}{\exp(m)} = e^{-m}$

$n \neq 0, n \in \mathbb{N}:$

$e = \exp(1) = \exp(\frac{n}{n}) = \exp(\frac{1}{n}^{n})$

$\exp(\frac{1}{n}) = +\sqrt[n]{e} = e^{\frac{1}{n}}$

$\exp(\frac{m}{n}) = e^{\frac{m}{n}}$.

Für alle $x \in \mathbb{Q}$ stimmt $\exp(x)$ mit der 'normalen' Potenz e^x überein.

Dann definiert man für beliebige $x \in R$:

$\boxed{e^x := \exp(x) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}}$

In kürze: Definition a^x für $a > 0, x \in \mathbb{R}$

d) Bei komplexen Zahlen kam e^{it} $(i^2 = -1, t \in \mathbb{R})$ vor als Abkürzung für $\cos(t) + i\sin(t)$

Tatsächlich kann auch für jedes $z \in \mathbb{C}$ definieren $e^z = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{z^n}{n!}$

Dabei: Konvergenz von Folgen/Reihen in $\mathbb{C}$ wie in $\mathbb{R}$ mit komplexem Absolutbetrag.

Man kann dann zeigen:

$\sum_{i=0}^{\infty} \frac{z^n}{n!}$ konvergiert für alle $z \in \mathbb{C}$.

Dass tatsächlich dann gilt:

$e^{it} = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(it)^n}{n!} = \cos(t) + \sin(t)$. zeigen wir später

2.718...) Man kann zeigen.

$e = \lim_{n\to\infty}(1 + (\frac{1}{n})^n)$

Bedeutung:

- Angelegtes Guthaben G wird in einem Jahr mit 100% verzinst. Guthaben am Ende eines Jahres $2G(= G(1+1)$

- Angelegtes Geld wird jedes halbe Jahr mit 50% verzinst. Am Ende eines Jahres (mit Zinsenzinsen)

  $G(1+\frac{1}{2})(1+\frac{1}{2}) = 2,25G$

  n- mal pro Jahr mit $\frac{100}{n}$% verzinsen. Am Ende desx Jahres $G(1+\frac{1}{n})^n$.

  $\lim_{n\to\infty} G(1+\frac{1}{n})^n = e \cdot G \approx 2.718\ldots \cdot G$ (stetige Verzinsung)

  a% statt 100% $\cdot Ge^{\frac{a}{100}}$

4 Reelle Funktionen und Grenzwerte von Funktionen

4.1 Definition

Reelle Funktionen f in einer Variable ist Abbildung
$f : D \to \mathbb{R}$, wobei $D \subseteq \mathbb{R}$ (D = Definitionsbereich).
Typisch: $D = \mathbb{R}$, Intervall, Verschachtlung von Intervallen

4.2 Beispiel

a) *Polynomfunktionen* (ganzrationale Funktion, Polynome)

$$\begin{cases} \mathbb{R} \to \mathbb{R} \\ x \to a_n \cdot x^n + \ldots a_1 x + a_0 \end{cases}$$

$f(x) = a_n \cdot x^n + \ldots a_1 \cdot x + q$

$a_n \neq 0 : n =$ Grad (f) f = 0 (Nullfunktion), Grad$(f) = \infty$

Grad 0: konstante Funktionen $\neq 0$

Graph von f:

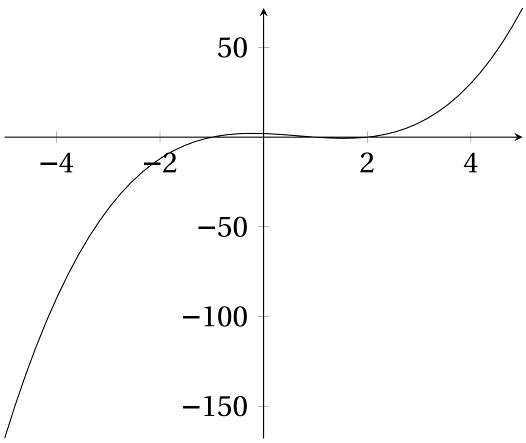


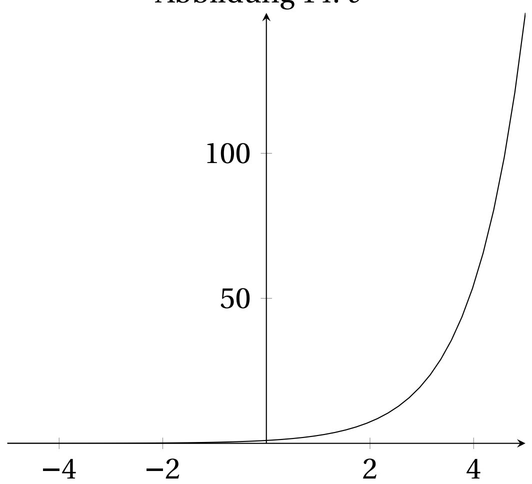
Abbildung 13: $f(x) = x^3 - 2x^2 - x + 2$

b) $f, g : D \to R$ $(f \pm g)(x) := f(x) \pm g(x)$ für alle $x \in D$
Summe: Differenz, Produkt von f und g.

Ist $g(x) \neq 0$ für $x \in D$, so *Quotient.* $\frac{f}{g}(x) := \frac{f(x)}{g(x)}$ für alle $x \in D$,
Quotient von Polynomen = (gebrochen-)rationalen Funktionen
$|f|(x) := |f(x)|$ Betrag von f.

c) Potenzreihe definiert Funktion auf ihrem Konvergenzintervall.
z.B : $e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}$
Fkt. $\mathbb{R} \to \mathbb{R}$

Abbildung 14: e^x



d) Hintereinanderausführung von Funktionen:
$f : D_1 \to \mathbb{R}, g : D_2 \to \mathbb{R} f(D_1) \subseteq f(D_2)$, dann $g \circ f$:

$$\begin{cases} D_1 \Rightarrow & \mathbb{R} \\ x \to & g(f(x)) \end{cases}$$

e) $f(x) = e^x, g(x) = x^2 + 1$
$f, g : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$
$(g \circ f)(x) = g(e^x) = (e^x)^2 + 1 = e^2 x + 1$
$(f \circ g)(x) = f(x^2 + 1) = e^{x^2+1}$

f) *Trigonometrische Funktionen: Sinus- und Cosinusfunktion (vgl.* $\mathbb{C}$*)*
$0 \geq x \geq 2\pi$ x = Bogenmaß von φ in Grad, so $x = \frac{\varphi}{360} \cdot \pi$
$\sin(x) = s, \cos(x) = c$ Für beliebig $x \in \mathbb{R}$:

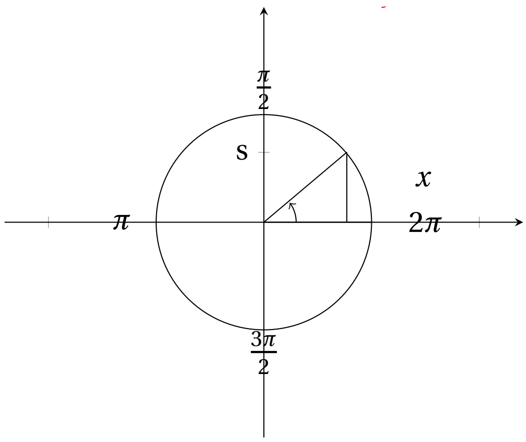


Abbildung 15: Bogenmaß

Periodische Fortsetzung, d.h. $x \in \mathbb{R}. x = x' + k \cdot 2\pi, k \in \mathbb{Z}, x' \in [0, 2\pi[$
$\sin(x) := \sin(x')$
$\cos(x) := \cos(x')$
$|\cos(x)|, |\sin(x)| \leq 1$

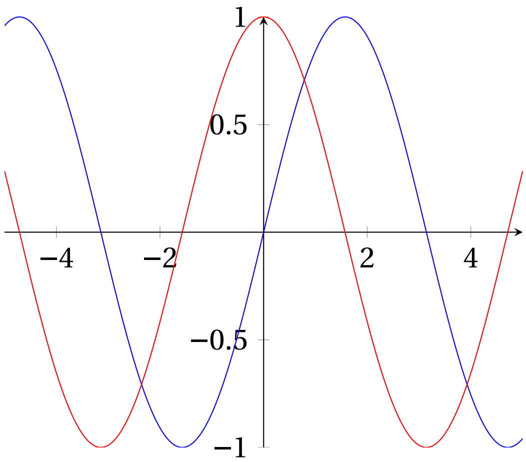


Abbildung 16: sin(x) und cos(x)

$\cos^2(x) + \sin^2(x) = 1$
$\cos(x) = \sin(x + \frac{\pi}{2})$
$\sin(x) = 0 \Leftrightarrow x = k\pi, k \in \mathbb{Z}$
$\cos(x) = 0 \Leftrightarrow x = \frac{\pi}{2} + k\pi, k \in \mathbb{Z}$
Tangens und Cotangensfunktion

$$\tan(x) = \frac{\sin(x)}{\cos(x)} \text{ für alle } x \in \mathbb{R} \text{ mit } \cos(x) \neq 0$$
$$\cot(x) = \frac{\cos(x)}{\sin(x)} \text{ für alle } x \in \mathbb{R} \text{ mit } \sin(x) \neq 0$$

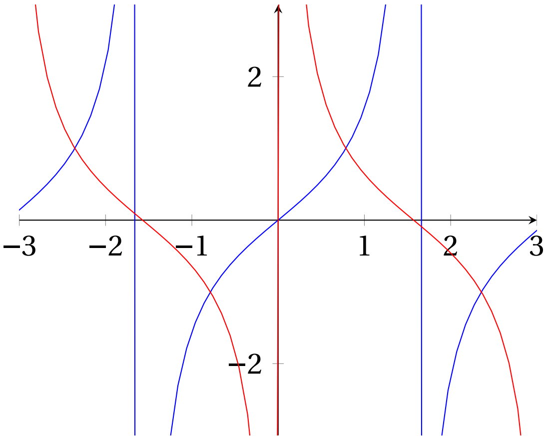


Abbildung 17: tan(x) and cot(x)

4.3 Definition

Sei $D \subseteq \mathbb{R}, c \in \mathbb{R}$ heißt *Adharenzpunkt* von D, falls es eine Folge $(a_n)_n, a_n \in D$, mit $\lim\limits_{n\to\infty} a_n = c$ gibt.

$\bar{D}$ = Menge der Adharenzpunkte von D

= *Abschluss* von D

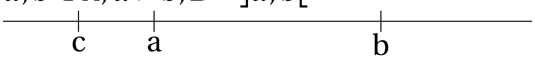
klar: $D \subset \bar{D}$.

$d \in D$. konstante Folge $(a_n)_{n\geq 1}$ mit $a_n = d$. $\lim\limits_{n\to\infty} a_n = \lim\limits_{n\to\infty} d = d$.

Also: $d \in \bar{D}$.

4.4 Beispiel:

a) $a, b \in \mathbb{R}, a > b, D =]a, b[$



$\bar{D} = [a, b] D \in \bar{D}$

$a \in \bar{D}$

$a_n = a + \frac{b-a}{n} \in D, n \geq 2$

$\lim\limits_{n\to\infty} a_n = a$
Also $[a,b] \subset \bar{D}$.
Ist $c \ni [a,b]$,etwa $c < a$, dann ist $|a_n - c| \geq a - c > 0$ für alle $a_n \in]a,b[$ Also: $\lim\limits_{a_n} \neq c$

b) $\mathscr{I}$ Intervall in $\mathbb{R}$, $x_1, \dots, x_r \in \mathscr{I}$,
$D = \mathscr{I} \{x_1, \dots, x_r\}$

a x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 $\cdots$ x_r b

$\bar{D} = \bar{\mathscr{I}} = [a,b]$,
falls $\mathscr{I} =< a, b >$.

c) $\mathbb{Q} \subset \mathbb{R}$
$\bar{\mathbb{Q}} = \mathbb{R}$

4.5 Definition

$f : D \to, c \in \bar{D}$.
$d \in \mathbb{R}$ heißt *Grenzwert von f(x) für x gegen c*,$d = \lim\limits_{x\to c}$, wenn für *jede* Folge $(a_n) \in D$, die gegen c konvergiert, die Bildfolge $(f(a_n))_n$ gegen d konvergiert.

Bemerkung

$\lim\limits_{x\to c} f(x) = d \Leftrightarrow$ Für alle Folgen $(a_n), a_n \in D$, mit $\lim\limits_{n\to\infty} a_n = c$ gilt $\lim\limits_{n\to\infty} f(a_n) = e$ Wenn man zeigen will, dass $\lim\limits_{x\to c} f(x)$ nicht existiert, gibt es 2 Möglichkeiten:

- Suche *eine bestimmte* Folge (a_n), $\lim\limits_{n\Rightarrow\infty} a_n = c$, so dass $\lim\limits_{x\to\infty} f(a_n)$ nicht existiert.

- Suche zwei Folgen $(a_n), (b_n)$, $\lim\limits_{x\to\infty} a_n = c$, $\lim\limits_{x\to\infty} b_n = c$ und $\lim\limits_{x\to\infty} f(a_n) \neq \lim\limits_{x\to\infty} f(b_n)$

$a_n = (-1)^n \cdot \frac{1}{n}$
$\lim\limits_{n\to\infty} a_n = 0$
$f(a_n) = (101010\dots)$
$\lim\limits_{n\to\infty} f(a_n)$ existiert nicht.
Oder:

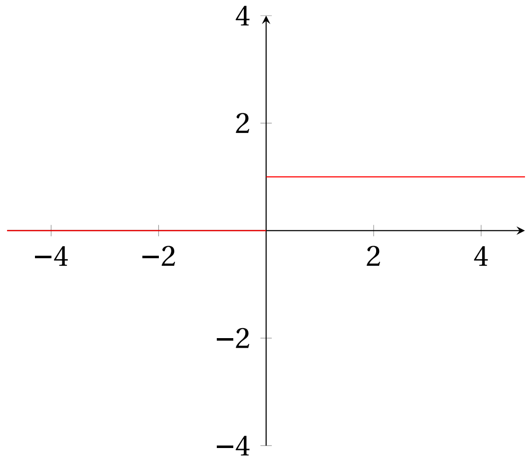


Abbildung 18: Abschnittsweise definierte Funktion

$a_n = \frac{1}{n} \lim\limits_{n\to\infty} a_n = 0$
$b_n = -\frac{1}{n} \lim\limits_{n\to\infty} b_n = 0$
Aber: $\lim\limits_{x\to\infty} f(a_n) \neq \lim\limits_{x\to\infty} f(b_n)$

4.6 Beispiel:

a) Sei $f(x) = b_k x^k + \ldots + b_1 x + b_0$, eine Polynomfunktion, $c \in \mathbb{R}$. Sei (a_n) Folge mit $\lim\limits_{n\to\infty} a_n = c$

$$\begin{aligned}\lim_{n\to\infty} f(a_n) &= \lim_{n\to\infty} b_k x^k + \ldots + b_1 x + b_0 \\ &= b_k(\lim_{n\to\infty} a_n)^k + b_{k-1} \cdot (\lim_{n\to\infty} a_n)^{k-1} + \ldots + b_0 \quad \text{Rechenregeln für Folgen, 2.8} \\ &= b_k \cdot c^k + b_{k-1} \cdot c^{k-1} + \ldots + b_1 \cdot c + b_0 = f(c).\end{aligned}$$

b) Sei $f(x) = \frac{x^2-1}{x-1}$,
$D = R\backslash\{1\}$
Auf D ist $f(x) = \frac{(x+1)(x-1)}{(x-1)} = (x+1)$ $\bar{D} = \mathbb{R}$
$\lim\limits_{x\to 1} f(x) = ?$
Sei (a_n) Folge mit $D = \mathbb{R}\backslash\{1\}$ mit $\lim\limits_{n\to\infty} a_n = 1$
$f(a_n) = a_n + 1$
$\lim\limits_{n\to\infty} f(a_n) = \lim\limits_{n\to\infty}(a_n + 1) = 1 + 1 + 2. \lim\limits_{x\to 1} = 2.$

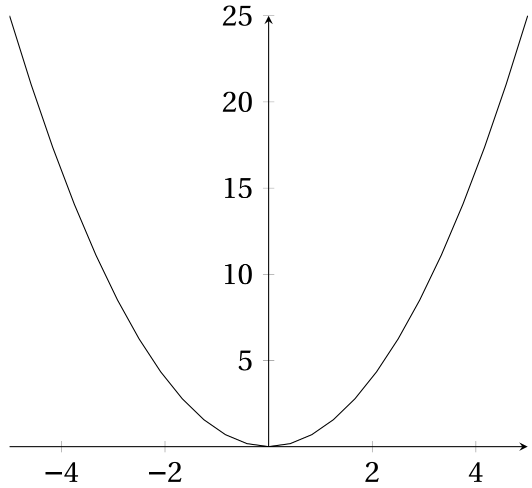


Abbildung 19: x^2

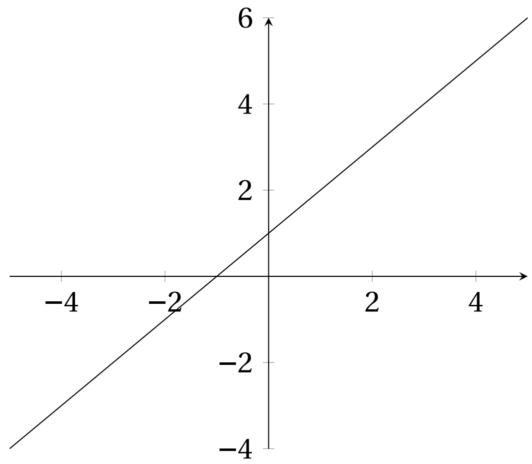


Abbildung 20: x+1

c) $f(x) = \begin{cases} 1 & \text{für } x > 0 \\ 0 & \text{für } x < 0 \end{cases} \quad D = \mathbb{R}$

$\lim\limits_{x \to 0} f(x)$?

$a_n = \frac{1}{n}. \lim a_n = 0.$

$\lim\limits_{x \to \infty} f(a_n) = \lim\limits_{n \to \infty} 1 = \mathit{1}$

$a_n = -\frac{1}{n}, \lim a_n = 0$

$\lim\limits_{n \to \infty} f(a_n) = \lim\limits_{n \to \infty} 0 = \mathit{0}.$

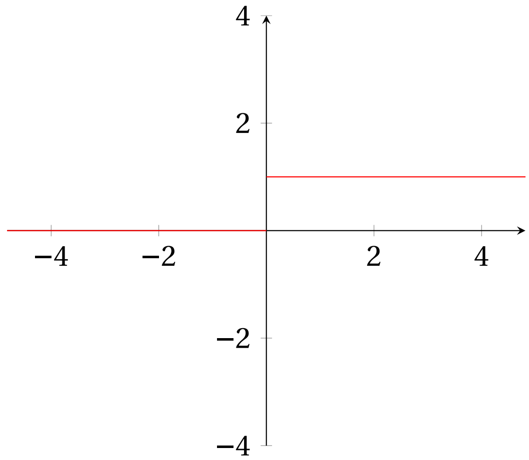


Abbildung 21: Abschnittsweise definierte Funktion

$\lim\limits_{x\to 0}$ existiert nicht.

d) $f(x) = \sin(\frac{1}{x}), D = \mathbb{R}\backslash\{0\}$ $a_n = \frac{1}{n\pi}, f(a_n) = \sin(n\pi) = 0$

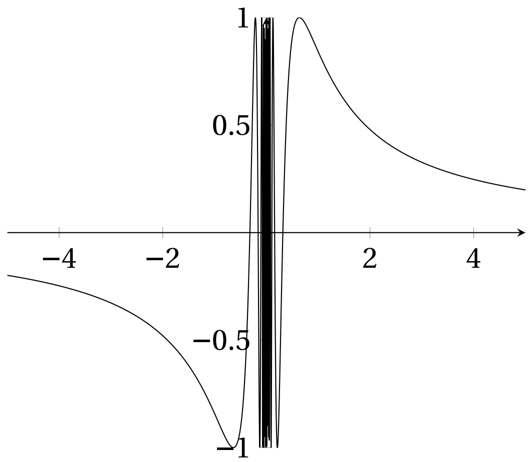


Abbildung 22: $\sin(\frac{1}{x})$

$a_n' = \frac{1}{(2n+\frac{1}{2}\pi)} \to 0, f(a'n) = \sin(2\pi n + \frac{\pi}{2}) = 1$
$\lim(a_n) = 0$
$\lim(f(a_n)) = \lim 0 = 0 \lim(f(a_n')) = \lim 1 = 1$
$\lim(f(x))_{x\to 0}$ existiert nicht

e) $f(x) = x \cdot \sin(\frac{1}{x}), D = \mathbb{R}\backslash\{0\}$ $\lim\limits_{x\to 0} f(x) = 0$ dann:

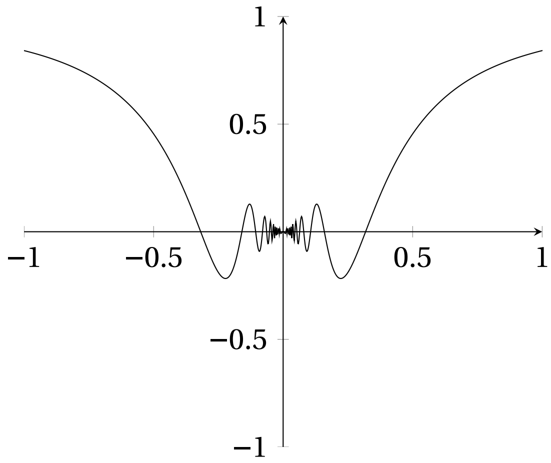


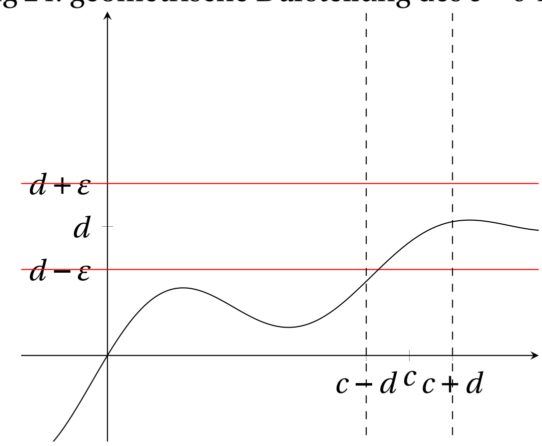
Abbildung 23: $x \cdot \sin(\frac{1}{x})$

$(a_n) \to 0, a_n \in \mathbb{R}\backslash\{0\}$
$\lim\limits_{n\to\infty} f(a_n) = \lim\limits_{n\to\infty} a_n \cdot \sin(\frac{1}{a_n}) \underset{2.8g)}{=} 0$

4.7 Satz ($\varepsilon - \delta$)-Kriterium

$f: D \to \mathbb{R}, c \in \bar{D}$. Dann gilt: $\lim\limits_{x\to c} f(x) = d \Leftrightarrow \forall \varepsilon > 0 \exists \delta \forall x \in D: |x-c| \leq \delta \to |f(x)-d| \leq \varepsilon$

Abbildung 24: geometrische Darstellung des $\varepsilon - \delta$ Kriteriums



Beweis. $\to$: Angenommen falsch.
Dass heißt $\exists \varepsilon > 0$, so dass für alle $\delta > 0$ (z.B $\delta = \frac{1}{n}$) ein $x_n \in D$ existiert mit $|x_n - c| \leq \frac{1}{n}$ und $|f(x_n) - d| > \varepsilon$
$\lim\limits_{n\to\infty} x_n = c$. Aber:
$\lim\limits_{n\to\infty} f(x_n) \neq d$ ↯
$\Leftarrow$: Sei (a_n) Folge, $a_n \in D$
$\lim\limits_{n\to\infty} a_n = c$.
Zu zeigen : $\lim\limits_{n\to\infty} f(a_n) = d$, d.h $\forall \varepsilon > 0 \exists n(\varepsilon) \forall n \geq n(\varepsilon) : |f(a_n) - d| < \varepsilon$.
Sei $\varepsilon > 0$ beliebig, ex. $d > 0$:

$$(\star)$$

Für alle $x \in D$ mit $|x - c| \leq \delta$ gilt $|f(x) - d| < \varepsilon$.
Da $\lim\limits_{n\to\infty} a_n = c$, existiert n_0 mit $|a_n - c| \geq \delta$ für alle $n \geq n_0$
Nach $(\star)$ gilt: $|f(a_n) - d| < \varepsilon \forall n \geq n_0$.✓ □

4.8 Satz (Rechenregeln für Grenzwerte)

$f, g, D \to \mathbb{R}$, $c \in \bar{D}$, Existieren die Grenzwerte auf der rechten Seite der folgenden Gleichungen, so auch die auf der linken (und es gilt Gleichheit)

a) $\lim\limits_{x\to c}(f \pm / \cdot g) = \lim\limits_{x\to c} f(x) \pm / \cdot \lim\limits_{x\to c} g(x)$.

b) Ist $g(x) \neq 0$ für alle $x \in D$ und $\lim\limits_{x\to c} g(x) \neq 0$, so

$$\lim_{x\to c}\left(\frac{f(x)}{g(x)}\right) = \frac{\lim\limits_{x\to c} f(x)}{\lim\limits_{x\to c} g(x)}$$

c) $\lim\limits_{x\to c}|f(x)| = |\lim\limits_{x\to c} f(x)|$

Beweis. Folgt aus den entsprechenden Regeln für Folgen. □

4.9 Beispiel:

$f(x) = \frac{x^3+3x+1}{2x^2+1}, D = \mathbb{R}$

$\lim\limits_{x\to 2} \underset{4.2b)}{=} \frac{\lim\limits_{x\to 2}(x^3+3x+1)}{\lim\limits_{x\to 2}(2x^2+1)}$

$\underset{4.6a)}{=} \frac{4+6+1}{8+1} = \frac{11}{9}$

4.10 Bemerkung

Rechts- und linksseitige Grenzwerte:

Rechtsseitiger Grenzwert:

$\lim\limits_{x\to c^+} f(x) = d \Rightarrow \forall (a_n)_n, a_n \in D, a_n \geq c$ und $\lim\limits_{n\to\infty} a_n = c$ gilt: $\lim\limits_{n\to\infty} f(a_n) = d$. Analog: linksseitiger Grenzwert: $\lim\limits_{x\to c^-} f(x) = d$

$(a_n \leq c)$.

4.11 Beispiel:

$f(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad D = \mathbb{R} \setminus \{0\}, c = 0 \in \bar{D}$

$\lim\limits_{x\to 0^+} f(x) = 1, \lim\limits_{x\to 0^-} f(x) = 0.$

$\lim\limits_{x\to 0} f(x)$ existiert nicht.

Falls $\lim\limits_{x\to c^+}$ und $\lim\limits_{x\to c^-}$ existieren

und $\lim\limits_{x\to c^+} f(x) = \lim\limits_{x\to c^-} = d$

so exisitiert $\lim\limits_{x\to c} f(x) = d$. Grenzwert: $d \in \mathbb{R}$

4.12 Definition

$D = \langle b, \infty[, f : D \to \mathbb{R}$ (z.B $D = \mathbb{R}$)

f konvergiert gegen d ∈ ℝ für x gegen unendlich,

$\lim\limits_{f(x)} = d$,falls gilt:

$\forall \varepsilon > 0 \exists M = M(\varepsilon) \forall x \geq M : |f(x) - d| < \varepsilon.$

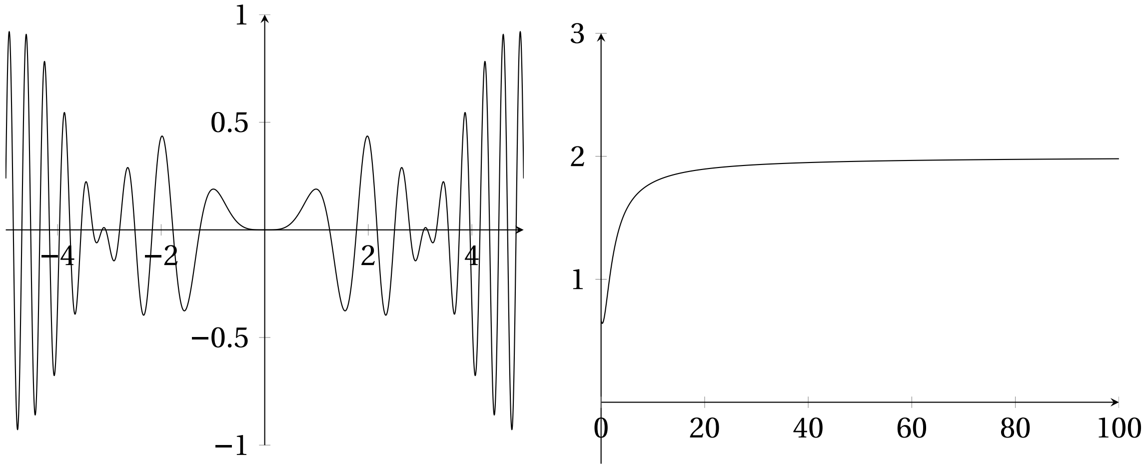
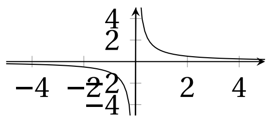


Abbildung 25: Grenzwerte gegen einen Festen Wert

(Analog : $\lim\limits_{x\to-\infty} f(x) = d$)

4.13 Beispiel

a) $\lim\limits_{x\to\infty} \frac{1}{x} = 0$



Sei $\varepsilon > 0$. Wähle $M = \frac{1}{\varepsilon}$. Dann gilt für alle $x \geq M$:
$|f(x) - 0| = |\frac{1}{x}| \leq \frac{1}{m} = \varepsilon$.

b) Allgemein gilt:
P, Q Polynome vom Grad k bzw. l $l \geq k$
$P(x) = a_k \cdot x^k + \ldots, Q(x) = b_i \cdot x^i + \ldots, a_k \neq 0, b_i \neq 0$ $\lim\limits_{x\to\infty} \frac{P(x)}{Q(x)} = \begin{cases} 0 & \text{für } l \geq k \\ \frac{a_k}{b_k} & \text{für } l = k \end{cases}$
(Beweis wie für Folgen $\lim\limits_{x\to\infty} \frac{P(n)}{Q(n)}$)
$\lim\limits_{x\to\infty} \frac{7x^5+205x^3+x^2+17}{14x^5+0{,}5} = \frac{1}{2}$

4.14 Bemerkung

Die Rechenregeln aus 4.8 gelten auch für $x \to \infty / -\infty$

4.15 Definition

a) $f : D \to \mathbb{R}, c \in \bar{D}$

f geht gegen ∞ *für x gegen c,*

$\lim\limits_{x \to c} f(x) = \infty$, falls gilt:

$\forall L > 0 \exists \underbrace{\delta}_{=\delta(L)} > 0 \forall x \in D : |x - c| \leq \delta \Rightarrow f(x) \geq L.$

b) $< b, \infty[\supset D, f : D \to \mathbb{R}$, *f geht gegen* ∞, *für x gegen* ∞: $\lim\limits_{x \to \infty} f(x) = \infty$,

falls gilt:

$\forall L > 0 \exists M > 0 \forall x \in D, x \geq M, f(x) \geq L.$

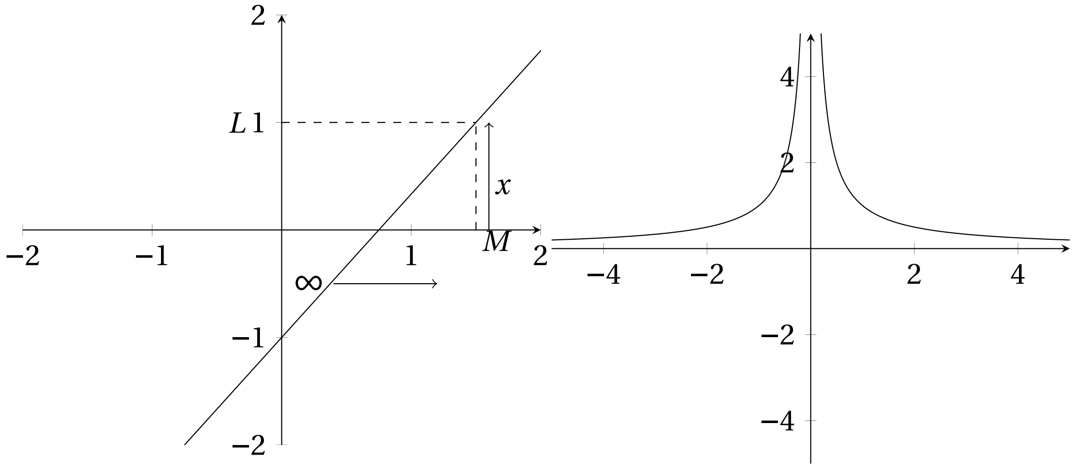
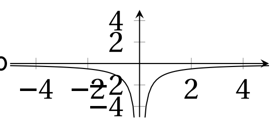
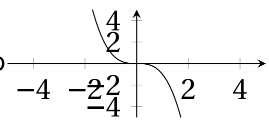
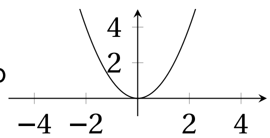
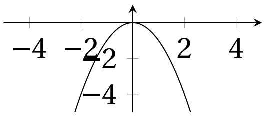


Abbildung 26: Funktionen $\lim\limits_{x \to \infty} = \infty$

(Entsprechend: $\lim\limits_{x \to c} f(x) = -\infty$ 

$\lim\limits_{x \to \infty} f(x) = -\infty$ 

$\lim\limits_{x \to -\infty} f(x) = \infty$ 

$\lim\limits_{x\to-\infty} f(x) = -\infty$ 

4.16 Satz

$f : D \to \mathbb{R}$.

a) Sei $c \in \bar{D}$, oder c = $\infty, -\infty$
falls $\lim\limits_{x\to c} f(x) = \infty$ oder $-\infty$, so ist $\lim\limits_{x\to c} \frac{1}{f(x)} = 0$.

b) $c \in \bar{D} \supset \mathbb{R}$.
Falls $\lim\limits_{x\to c} f(x) = 0$ und falls $s > 0$
existiert mit $f(x) > 0$ für alle $x \in [c-s, c+s], (f(x) < 0)$
dann ist $\lim\limits_{x\to c} \frac{1}{f(x)} = \infty(-\infty)$

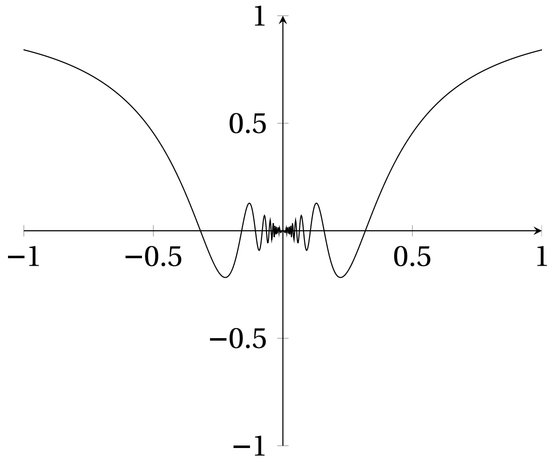
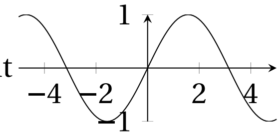


Abbildung 27: $sin(\frac{1}{x})$

c) Falls $\lim\limits_{x\to\infty} = 0$ und falls $T > 0$ existiert mit $f(x) > 0$ für alle $x \geq T$, so $(f(x) < 0)$
ist $\lim\limits_{x\to\infty} \frac{1}{f(x)} = \infty(-\infty)$
(Entsprechend für $\lim\limits_{x\to-\infty}$)

4.17 Beispiel

a)
- $f(x) = \frac{1}{x}, D =]0, \infty[$
  $\lim\limits_{x\to 0} f(x) = \infty$
- $f(x) = \frac{1}{x}, D =]-\infty, 0[$
  $\lim\limits_{x\to 0} f(x) = -\infty$
- $f(x) = \frac{1}{x}, D =]0, \infty[$
  $\lim\limits_{x\to 0} f(x) = \infty$

b) $\lim\limits_{x\to\infty} \sin(x)$ existiert nicht 

c) $P(x) = ak_x^k + \ldots + a_0$.

$$\lim_{x\to\infty} P(x) = \begin{cases} \infty, \text{falls} & a_k > 0 \\ -\infty, \text{falls} & a_k < 0 \end{cases}$$

$$\lim_{x\to-\infty} P(x) = \begin{cases} \infty, \text{falls} & a_k > 0 \text{k gerade oder } a_k < 0 \text{ k ungerade} \\ -\infty, \text{falls} & a_k < 0 \text{k gerade oder } a_k > 0 \text{ k ungerade} \end{cases}$$

d) $P(x)$ wie in c)
$Q(x) = b_l^l + \ldots + b_0$

$$\lim_{x\to\infty} \frac{P(x)}{Q(x)} = \begin{cases} \infty, & \text{falls } a_k \text{ und } b_k \text{ gleiche Vorzeichen} \\ -\infty, & \text{falls } a_k \text{ und } b_k \text{ verschiedene Vorzeichen} \end{cases}$$

e) $\lim\limits_{x\to\infty} \frac{e^x}{x^n} = \infty \ \forall L > 0 \exists\ M \forall\ x \geq M : f(x) \geq L$
Sei L $\geq 0, x > 0$.
$e^x = \sum\limits_{k=0}^{\infty} \frac{x^k}{k!} > \frac{x^{n+1}}{(n+1)!}$
$\frac{e^x}{x^n} > \frac{x}{(n+1)!}$
Ist $x \geq (n+1)!L =: M$, so ist $\frac{e^x}{x^n} > L$.

f) $\lim\limits_{x\to\infty} \frac{x^n}{e^x} = 0$. Folgt aus e) und 4.16a)

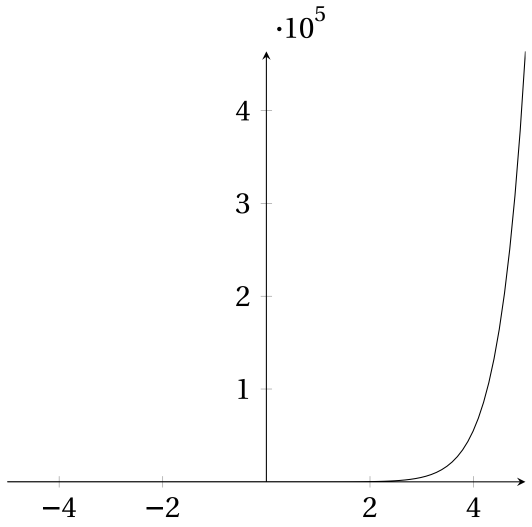


Abbildung 28: $\frac{e^x}{x^n}$

5 Stetigkeit

5.1 Definition

$f : D \to \mathbb{R}$.

a) f ist *stetig* an $c \in D$, falls $\lim\limits_{x \to c} f(x) = f(c)$.

b) f heißt (absolut) stetig, falls f an allen $c \in D$ stetig ist.

5.2 Satz

$f : D \to \mathbb{R}, c \in D$.
Existiert Konstante $\mathbf{K} > 0$ mit $|f(x) - f(c)| \leq \mathbf{K} \cdot |x - c|$ für alle $x \in D$, dann ist f stetig in c.

Beweis.
Sei $\varepsilon > 0$.
Wähle $\delta = \frac{\varepsilon}{\mathbf{K}}$. Ist $|x - c| \leq \delta$, so ist $|f(x) - f(c)| \leq \mathbf{K} \cdot |x - c| \leq \mathbf{K} \cdot \delta - \varepsilon$.
4.7 $\lim\limits_{x \to c} f(x) = f(c)$. □

5.3 Beispiel

a) Polynome sind auf ganz $\mathbb{R}$ stetig

b) $f(x) = \begin{cases} 0, \text{falls} & , x \neq 0 \\ 1, \text{falls} & , x = 0 \end{cases}$

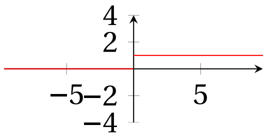
f ist nicht steig in 0.

$a_n = \frac{1}{n}, a_n \to 0$

$f(a_n) = 0$

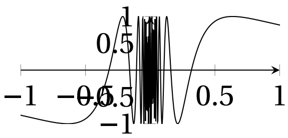
$(f(f(a_n)) \to 0 \neq f(0)$

c) $f(x) = \begin{cases} 0, \text{falls} & , x > 0 \\ 1, \text{falls} & , x < 0 \end{cases}$

f ist nicht stetig in 0. 

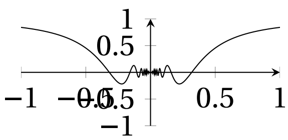
d) $f(x) = \begin{cases} \sin(\frac{1}{x}), \text{falls} & , x \neq 0 \\ 0, \text{falls} & , x = 0 \end{cases}$

$\lim_{x} \to 0 \sin(\frac{1}{x})$ ex. nicht.

f ist nicht stetig in 0. 

e) $f(x) = \begin{cases} x \cdot \sin(\frac{1}{x}), \text{falls} & , x \neq 0 \\ 0, \text{falls} & , x = 0 \end{cases}$

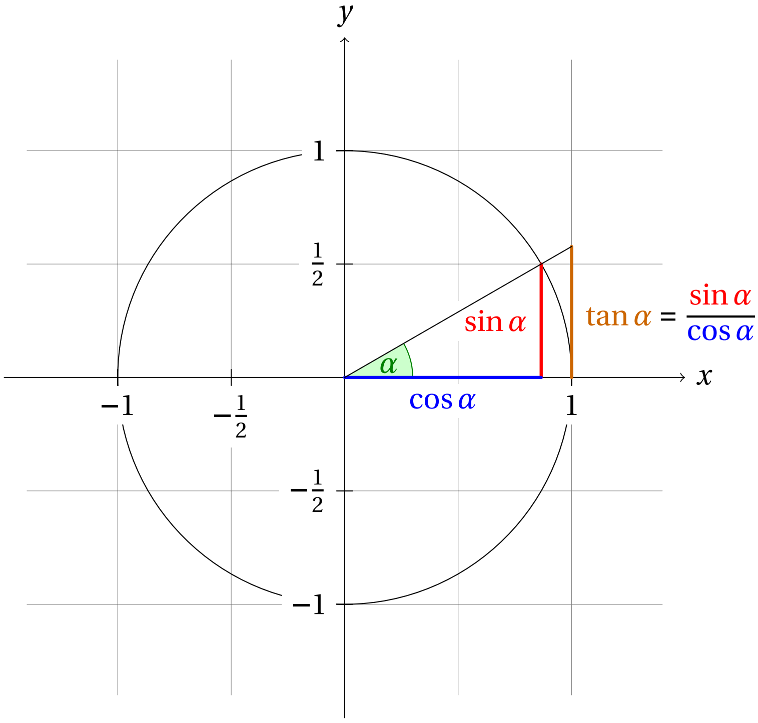
$\lim_{x \to 0} x \cdot \sin(\frac{1}{x}) = 0 = f(0)$

f ist stetig in 0. 

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

$g(x) = \cos(x)$ Sind stetig auf $\mathbb{R}$: Fúr alle $x, c \in \mathbb{R}$ gilt:

Abbildung 29: Sinus und Cosinus am Einheitskreis



$|\sin(x) - \sin(c)| \leq |x - c|$.
$\sin(x)$ ist stetig auf $\mathbb{R}$ (5.2, $\mathbf{K} = 1$)

5.4 Satz (Rechenregeln für Stetigkeit)

$f, g : D \to \mathbb{R}, c \in D$,
sind f und g stetig in c, dann auch $f \pm / \cdot$ und $|f|$. Ist $g(x) \neq 0$ für alle $x \in D$, so ist auch $\frac{f}{g}$ stetig in c.

Beweis. Folgt aus 4.8 □

5.5 Satz

$D, D' \subseteq \mathbb{R}, f : D \to \mathbb{R}$,
$g : D' \to \mathbb{R}, f(D) \subseteq D'$.
Ist f stetig in $c \in D$ und ist g stetig in $f(c) \in D'$, so ist $g \circ f$ stetig in c,

Beweis. $(a_n) \to c, a_n \in D$.
f stetig: $f(a_n) \to f(c)$
g stetig in f(c): $(g \circ f)(a_n)(a_n)\ (g \circ f)(c)$ □

5.6 Beispiel

a) $f(x) = \sin(\frac{1}{|x^2-1|}), D = \mathbb{R} \setminus \{1, -1\}. f$ ist stetig auf D. Folgt aus $5.3_{\text{a),f) und 5.4,5.5}}$.

b) $f(x) = \begin{cases} x \cdot \sin(\frac{1}{x}) & \text{falls } x \neq 0 \\ 0 & \text{falls } x = 0 \end{cases}$
stetig auf $\mathbb{R}$, 5.3e) für $c = 0$ für $c \neq 0$. 5.3,5.4,5.5

c) $f(x) = \tan(x)(= \frac{\sin(x)}{\cos(x)})$
$D = \mathbb{R} \setminus \{\frac{\pi}{2} + k\pi : k \in \mathbb{Z}\} f$ stetig auf D

5.7 Satz

Sei $f(x) = \sum_{i=0}^{\infty} a_i(x-a)^i$
eine Potenzreihe mit Konvergenzradius R. Dann ist f stetig $m]a - R[=: D$
$c \in D \lim_{x \to c} f(x)$

$$= \lim_{x \to c} f(x) \lim_{n \to \infty} \sum_{i=0}^{\infty} a_i(x-a)^i$$

$$\underset{=}{?} \lim_{n \to \infty} \lim_{x \to c} \sum_{i=0}^{\infty} a_i(x-a)^i \qquad [3]$$

$$= \lim_{n \to \infty} \sum_{i=0}^{\infty} a_i(x-a)^i = f(c)$$

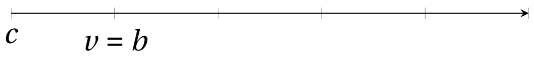
5.8 Korollar

$f(x) = \exp(x) = e^x$ ist stetig auf $\mathbb{R}$

5.9 Satz (Nullstellensatz für stetige Funktionen)

$f : D \to$ stetig, $[u, v] \subseteq D, u < v$
Es gelte $f(v) \cdot f(v) < 0$
(d.h $f(u) > 0, f(v) > 0$, oder $f(u) > 0, f(v) < 0$) Dann existiert $w \in]u, v[$ mit $f(v) = 0$

Beweis. O.B.d.A., $f(n) < 0 < f(v)$.
Bijektionsverfahren:



Falls $f(c) < 0$, so $a = c$, sonst $b = c$. Liefert Folgen $(a_n), (b_n)$ und eindeutig bestimmte $w \in [u, v]$ mit $a_n \leq a_{n+1} w \leq b_{n+1} \leq b_n$ für alle n
$f(a_n) < 0$
$f(b_n) \geq 0$
für alle n. $\lim\limits_{n\to\infty} a_n = \lim\limits_{n\to\infty} b_n = w f$ ist stetig in w $\Rightarrow \lim\limits_{n\to\infty} f(a_n) = \lim\limits_{n\to\infty} f(b_n) = f(b_n) = f(w)$.
$f(a_n) < 0 \forall n \to \lim\limits_{n\to\infty} f(a_n) \leq 0$.
$f(b_n) \geq 0 \forall n \to \lim\limits_{n\to\infty} f(b_n) \geq 0$.
$\Rightarrow 0 = \lim(a_n) = \lim(b_n) = f(w)$. □

5.10 Korollar (Zwischenwertsatz)

$f : D \to \mathbb{R}$ stetig, $[u, v] \subseteq D$
Dann nimmt f in $[u, v]$ jeden Wert zwischen $f(u)$ und $f(v)$ an (und evtl. weitere)

Beweis. O.B.d.A $f(u) < f(v)$
Sei $f(u) < b < f(w) b$ beliebig, aber dann fest.
Definiere $g(x) = f(x) - b$ stetig
$g(u) = f(u) - b < 0$
$g(v) = f(v) - b > 0$
5.9 (angewandt auf g): Ex. $w \in]u, v[$ mit $g(w) = 0$,d.h $f(w) = b$. □

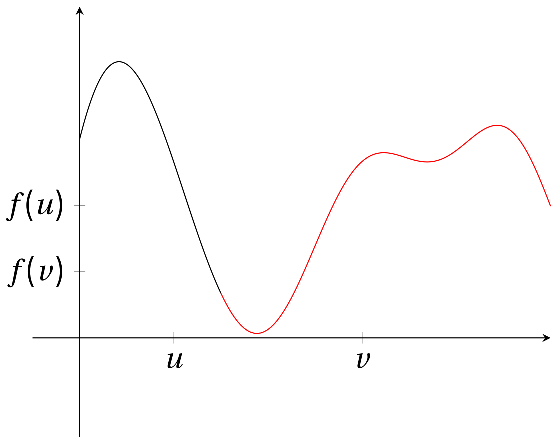


Abbildung 30: Zwischenwerte

5.11 Satz (Min-Max-Theorem)

$a, b \in \mathbb{R}, a < b, f : [a, b] \to \mathbb{R}$ stetig
(Wichtig: *abgeschlossenes* Intervall)
Dann hat f ein Maximum und ein Minimum auf $[a, b]$, d.h es existieren
$x_{min},\ x_{max} \in [a, b]$ mit $f(x_{max}) \leq f(x) \leq f(x_max)$ für alle $x \in [a, b]$ (Beweis mit Bisektionsverfahren, [4])

Zur Erinnerung

$f : D \to D'$ bijektiv, dann existiert Umkehrfunktion $f^{-1} D' \to D$ mit
$f \circ f^{-1} = id_{D'}$ und
$f^{-1} \circ f = id_D$
zum Beispiel $f(x) = x^2$
$f : [0, \infty[\to [0, \infty[$
bijektiv
$f^{-1} : [0, \infty[\to [0, \infty[$
$f^{-1}(x) = +\sqrt{x}$

5.12 Definition

$f : D \to \mathbb{R}$ heißt *(streng) monoton wachsend (oder steigend)*, falls gilt:
Sind $x, y \in D, x < y$, so ist $f(x) \leq f(y) (f(x) < f(y))$
Entsprechend: *streng monoton fallend*. f heißt *(streng) monoton*, dalls sie entweder (streng) monoton wachsend oder (steng) monoton fallend ist.

5.13 Satz

D Intervall (rechte/linke Grenze) $\infty, -\infty$ möglich), $fD \to \mathbb{R}$ stetig. Dann gilt: f ist injektiv auf D $\Leftrightarrow$ f ist streng monoton auf D.

Beweis. $\Leftarrow \checkmark$
$\Rightarrow$: Angenommen f ist nicht streng monoton auf D.
Dann existieren $x_1, x_2, x_3, x_4 \in D$. mit $x_1 < x_2$ und $f(x_1) < f(x_2)$ und $x_3 < x_4$ und $f(x_3) > f(x_4)$
$(f(x_1) = f(x_2)$ bzw. $f(x_3) = f(x_4)$ nicht möglich, da f injektiv) Jetzt muss man Fallunterscheidungen machen.
z.B
$x_1 < x_2 < x_3 < x_4,\ f(x_1) < f(x_3) < f(x_2)$ □

5.14 Satz (Stetigkeit der Umkehrfunktion)

D Intervall, $f : D \to f(D) =: D'$
eine stetige, streng monotone (also bijektive) Funktion. Dann ist die Umkehrfunktion $f^{-1} D' \to D$ stetig.
Beweis: [5] f streng monoton wachsend (fallend) $\Rightarrow$ $f{-1}$ streng monoton wachsend (fallend)

5.15 Korollar

Ist $n \in \mathbb{N} \begin{cases} \text{gerade} \\ \text{ungerade} \end{cases}$, so

ist $f(x) = x^n$ stetig und bijektiv $\begin{cases} [0, \infty[\to [0, \infty[\\ \mathbb{R} \to \mathbb{R} \end{cases}$

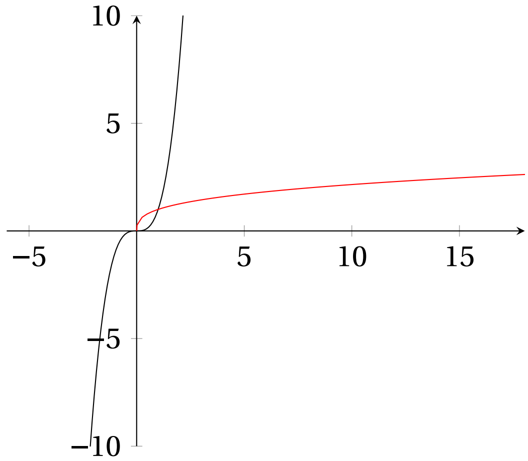


Abbildung 31: Eine Funktion und ihre Umkehrfunktion

Die Umkehrfunktion $f^{-1} = \sqrt[n]{x}$ ist stetig und bijektiv $\begin{cases} [0,\infty[\to [0,\infty[\\ \mathbb{R} \to \mathbb{R} \end{cases}$ Nach 5.8 ist $\exp(x)$ stetig auf $\mathbb{R}$. Nach 3.5b) ist $\exp(x) > 0$ für alle $x \in \mathbb{R}$. Für $x > 0$, so ist $\exp(x) = 1 + x + \frac{x^2}{2} + \frac{x^2}{3!} + \ldots \geq 1$, Ist $x > y$ so ist $\exp(y) = \exp(x+(y-x)) \underset{3.5b)}{=} \exp(x) \cdot \underbrace{\exp(\underset{<0}{y-x})}_{>1} > \exp(x)$

5.16 Satz

$\exp : \mathbb{R} \to]0,\infty[$ ist streng monoton wachsend und bijektiv. Die Umkehrfunktion heißt $\ln(x) :]0,\infty[\to \mathbb{R}$ ist stetig und streng monoton wachsend und bijektiv.
Es gilt: $\ln(x \cdot y) = \ln(x) + \ln(y)$ für alle $x, y > 0$, $\ln(1) = 0$

Beweis. exp streng monoton steigen s.V,

$\lim\limits_{x\to\infty} \exp(x) = \infty$ (4.17e))

$\lim\limits_{x\to\infty} \exp(x) = \lim\limits_{x\to\infty} \exp(-x) = \lim\limits_{x\to\infty} \frac{1}{\exp(x)} \underset{4.16}{=} 0$ Also: $\exp\colon \mathbb{R} \to]0,\infty[$ bijektiv

$\ln :]0,\infty[\to \mathbb{R}$, streng monoton wachsend, stetig, bijektiv (5.14).

$x, y > 0. \exists a, b \in \mathbb{R}$ mit $x \in \exp(a), y = \exp(b)$.

$$\begin{aligned} \ln(xy) &= \ln(\exp(a) \cdot \exp(b)) \\ &= \ln(\exp(a+b)) = a+b \\ &= \ln(x) + \ln(y) \end{aligned}$$

$\square$

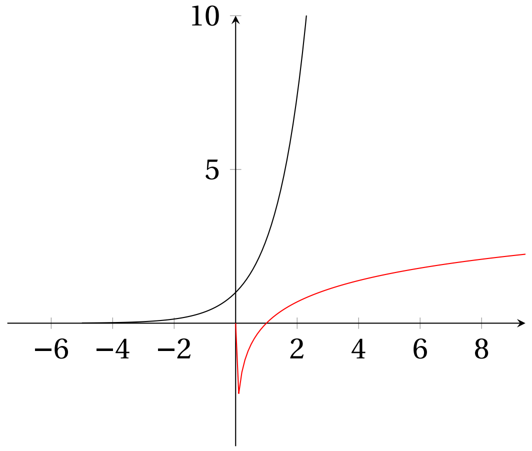


Abbildung 32: $\exp(x)$ und $\ln(x)$

5.17 Satz

$\lim\limits_{x\to\infty} \frac{\ln(x)}{x^n} = 0$ (für jedes $k \in \mathbb{N}$)
(D.h. $(\ln(n) \in o(n))$

Beweis. $x = \exp(y), x \leq 1$, d.h $y \leq 0$.
$\frac{\ln(x)}{x^k} = \frac{y}{(\exp(y)^k)} \leq \frac{y}{\exp(y)} \to 04.17e)$ □

5.18 Definition

Für $a > 0$ setze $a^x = \exp(x \cdot \ln(a)) \underbrace{(\exp(\ln(a)))}_{0}$ $a \leq e : e^x = \exp(x), a^x$, falls $a > 0$

5.19 Satz

Sei $a > 0$

a) $a^x : \mathbb{R} \to]0, \infty[$ ist streng monoton wachsend für alle $a > 1$ und streng monoton fallend für $0 < a < 1$.

b) $a^x, a^y = a^{x+y}$
$(a^{x^y} = a^{xy})$ für alle $x, y \in \mathbb{R}$

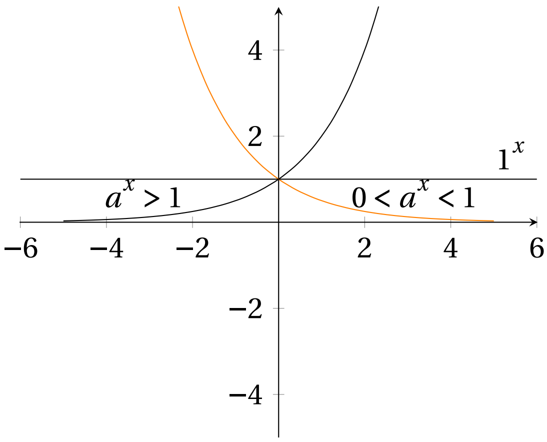


Abbildung 33: Verschiedene Arten Exponentialfunktionen

c) Für $x = \frac{p}{q} \in Q(p \in \mathbb{Z}, q > 0)$ stimmt Def. von a^x entsprechend. 5.18 mit der der üblichen Definition $a^{\frac{p}{q}} = \sqrt[q]{a^p}$ überein.

Beweis. Folgt aus Definition mit 3.5 □

5.20 Bemerkung

Ist $x \in \mathbb{R}$ und (x_n) Folge mit $x_n \in \mathbb{Q}$, $\lim\limits_{n\to\infty} x_n = x$,
so $\lim\limits_{n\to\infty} a^{x_n} = a^x$ (Stetigkeit)
D.h a^x lässt sich durch a^{x_n}, $x_n \in \mathbb{Q}$, beliebig gut approximieren

5.21 Definition

Für $a > 0, a \neq 1$, heißt die Umkehrfunktion von a^x *Logarithmus zur Basis a*
$\log_a(x)$ $(a = 2, a = e, a = 10$ wichtig$)$
$\log_e(x) = \ln(x)$

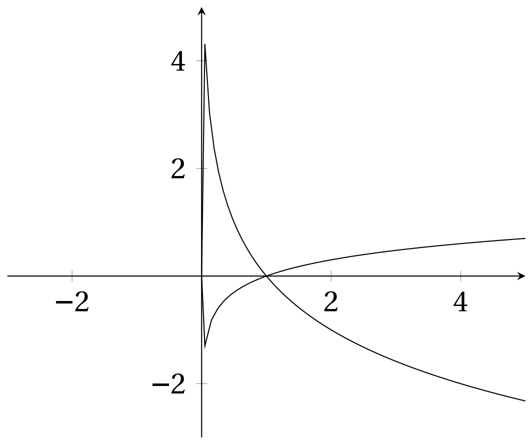


Abbildung 34: Logithmen mit Basen > 1 und < 1

5.22 Satz

Seien $a, b > 0, a \neq 1 \neq b, x, y > 0$

(a) $$\log_a(x \cdot y) = \log(x) + \log(y)$$

(b) $$\log_a(x^y) = y \cdot \log(x)$$

(c) $$\log_a(x) = \log_a(b) \cdot \log_b(x)$$

(d) $$\text{Sind a,b} > 1 \text{ , so } O(\log_a(n)) = O(\log_b(n))$$

Beweis. $a)$ wie 5.10

b) $a^{y \cdot \log_a(a^y)} \underset{5.19b)}{=} (a^{\log_a(x)})^y = x^y$

$\Rightarrow \log_a(x^y) = \log_a(a^{y \cdot \log_a(x)}) = y \cdot \log_a(x)$

c) $\log_a(x) = \log_a(b^{\log_a(x)}) \overset{b)}{=} \log_b(x) \cdot \log_a(b)$

d) Folgt aus c), da $\log_a(b) > 0$ □

6 Differenzierbare Funktionen

Sekante durch (c,f(c)), (x,f(x))

Steigung der Sekante:

$x \neq c : \underbrace{\frac{f(x)-f(c)}{x-c}}_{\text{Differenzenquotient}} = s(x)$ definiert auf $\mathbb{R} \setminus \{c\}$

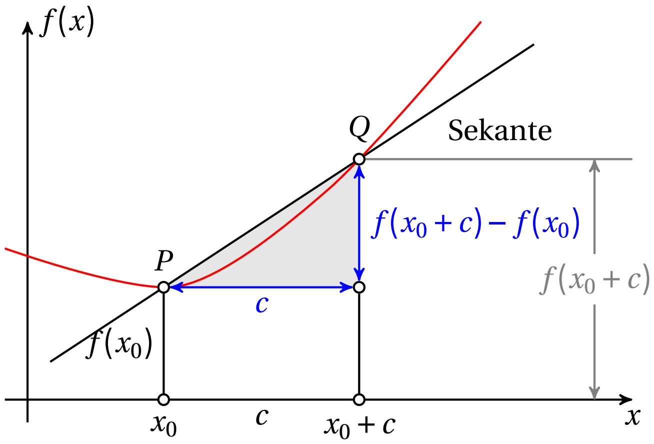


Abbildung 35: Steigung am Steigungsdreieck

Falls $\lim\limits_{x\to c} \dfrac{f(x)-f(c)}{x-c}$ existiert: Steigung der Tangente an Graph von f in $(c, f(c)))$
(Änderungsrate von f in $(c, f(c))$

6.1 Definition

$\mathscr{I}$ Intervall, $f: \mathscr{I} \to \mathbb{R}$, $c \in \mathscr{I}$

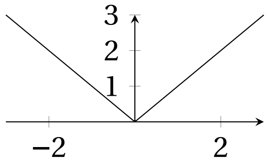
a) f heßt *differenzierbar* (diffbar) an der Stelle c, falls $\lim\limits_{x\to c} \dfrac{f(x)-f(c)}{x-c}$ existiert.
Grenzwert heißt *Ableitung* oder *Differentialquotient* von f an der Stelle c.
$f'(c) = \left(\frac{df}{dx}(\mathrm{c})\right) \quad \left[f'(c) = \lim\limits_{n\to 0} \frac{f(c+h)-f(c)}{h},\ h := x - c\right]$

b) f heißt *differenzierbar* auf $\mathscr{I}$, falls f in jedem Punkt von $\mathscr{I}$ differenzierbar ist.
$$f': \begin{cases} \mathscr{I} \to R \\ x \to f(x) \end{cases}$$

6.2 Beispiel

a) $f(x) = a \cdot x^n, n \in \mathbb{N} a \in \mathbb{R}$.
$x \neq c: \frac{ax^n - ac^n}{x-c} = \frac{a(x-c)(x^{n-1}\ldots)}{x-c}$
$\lim\limits_{x\to c} \dfrac{ax^n - ac^n}{x-c} = \lim\limits_{x\to c} = \dfrac{a(x-c)(x^{n-1}\ldots)}{x-c} = a \cdot n \cdot c^{n-1} = f(x)$.
$f'(x) = a \cdot n \cdot x^{n-1}$ Gilt auch für $n = 0$. (f konstant auf $f' = 0$)

b) $f(x) = |x|$



f ist diffbar in 0?

Zu zeigen $\lim\limits_{x\to 0} \frac{|x|-0}{x-0}$ existiert nicht.

Sei (a_n) Folge, $a_n < 0$, $\lim\limits_{n\to\infty} a_n = 0$ (z.B $a_n = -\frac{1}{n}$)

$\lim\limits_{n\to\infty} \frac{|a_n|}{a_n} = -1$

$b_n > 0, \lim b_n = 0$(z.B $b_n = \frac{1}{n}$)

$\lim\limits_{n\to\infty} \frac{|b_n|}{b_n} = \lim\limits_{n\to\infty} \frac{b_n}{b_n} = 1$

$f'(0)$ *existiert nicht!*

6.3 Satz

$f : \mathscr{I} \to \mathbb{R}$ in $c \in \mathscr{I}$ diffbar. Dann gilt für alle $x \in \mathscr{I}$:

$f(x) = f(c) + f'(c) \cdot (x-c) + \mathscr{R}(x) \cdot (x-c)$,

wobei $\mathscr{R}, \mathscr{I} \to \mathbb{R}$ stetig in c, $\lim\limits_{x\to c} \mathscr{R}(c) = 0$

D.h. : f lässt sich in der Nähe von c sehr gut durch eine lineare Funktion (d.h Graph

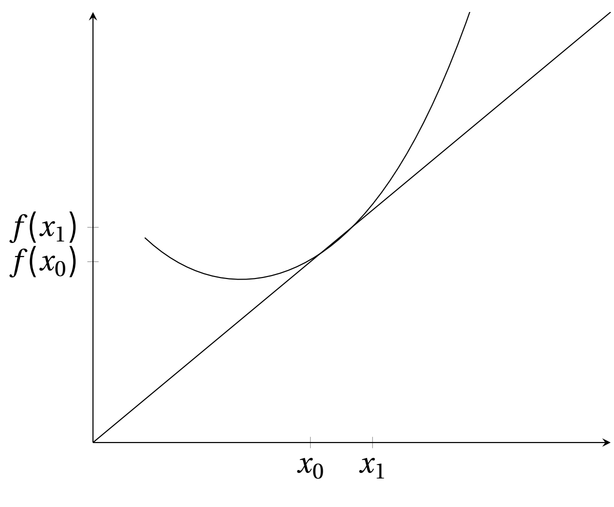


Abbildung 36: Sekante an Funktion

ist Gerade) approximieren.

6.4 Korollar

$f : \mathscr{I} \to \mathbb{R}$ diffbar in $c \Rightarrow f$ ist steig in c. Beweis folgt aus 6.3
Beachte: Umkehrung von 6.4 gilt im Allgemeinen nicht. 6.2b).
Diffbare Funktionen sind stetig, aber sie haben keine Knicke im Graphen.

6.5 Satz (Ableitungsregeln)

$\mathscr{I}$ Intervall, $c \in \mathscr{I}$. Für a)-c)
seien $f, g : \mathscr{I} \to \mathbb{R}$ diffbar in c

a) $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$, so $\alpha f + \beta g$ diffbar in c,

$$(\alpha f + \beta g)'(c) = \alpha \cdot f'(c) + \beta \cdot g'(c)$$

b) (Produktregel) $f \cdot g$ diffbar in c,

$$(f \cdot g)'(c) = f(c) \cdot g'(c) + f'(c) \cdot g(c)$$

c) (Quotientenregel) Ist $g(x) \neq 0$ auf $\mathscr{I}$, so

$$\frac{f}{g}'(c) = \frac{f'(c) \cdot g(c) - f(c) \cdot g'(c)}{g(c)^2}$$

d) (Kettenregel) $\mathscr{I}_1$ Intervall, $f : \mathscr{I} \to \mathscr{I}_1$, diffbar in c, $g : \mathscr{I} \to \mathbb{R}$ diffbar in $f(c)$, so $g \circ f$ diffbar in c, und

$$(g \circ f)' = g'(f(c)) \cdot f'(c)$$

Beweis. Nur b):
$$\lim_{x \to c} \frac{f(x) \cdot g(x) - f(c) \cdot g(c)}{x - c} = \lim_{x \to c} \frac{f(x)(g(x) - g(c)) + g(c)(f(x) - f(c)}{x - c} = \lim_{x \to c} f(x) \cdot \lim_{x \to c} \frac{g(x) - g(c)}{x - c} +$$

$$g(c)\cdot\lim_{x\to c}\frac{f(x)-f(c)}{x-c} \underset{6.4}{=} f(c)g'(c)+g(c)f'(c).$$

□

6.6 Beispiel

a) $f(x) = a_n \cdot x^n + a_{n-1}\cdot x^{n-1} + \ldots + a_0$

$f'(x) \underset{\substack{6.5a)\\6.2a)}}{=} a_n \cdot n \cdot x^{n-1} \cdot x^{n-2} + \ldots + a_1$

b) $f(x) = \frac{1}{x^n} = x^{-n}\,(n \in \mathbb{N})$

$\mathscr{I} =]0,\infty[$

$f'(x) \underset{\substack{6.2a)\\6.5c)}}{=} \frac{0\cdot x^n - 1\cdot x^{n-1}}{x^{2n}} = \frac{-n}{x^{n+1}} = (-n)\cdot x^{-n-1}$ gilt auch auf $]-\infty,0[$

c) $h(x) = (x^2+x+1)^2$

(6.5d): $f(x) = x^2+x+1)$

$g(x) = x^2$

$h'(x) = 2\cdot(x^2+x+1)\cdot(2x+1)$

6.7 Satz

a) $\lim\limits_{x\to 0}\frac{\sin(x)}{1}$

b) $\lim\limits_{x\to 0}\frac{1-\cos(x)}{x} = 0$

Beweis.

a) Elementargeometrisch + Additionstheoreme 1.7 (Man zeigt: $\cos(x) < \frac{\sin(x)}{x} < 1$ für $0 < x < \frac{\pi}{2}$

b) $\frac{1-\cos(x)}{x} = \frac{(1-\cos(x))}{x(1+\cos(x))} = \frac{1-\cos(x)}{x(1+\cos(x))} = \frac{sin^2(x)}{x}\cdot\frac{x}{1+\cos(x)} \to 0$

□

6.8 Satz

a) $f(x) = \sin(x)$, so $f'(x) = \cos(x)$

b) $f(x) = \cos(x)$, so $f'(x) = -\sin(x)$

c) $f(x) = \tan(x)$, so $f'(x) = 1 + \tan^2(x)$

Beweis. a), $c \in \mathbb{R}$
$\sin'(c) = \lim\limits_{h\to 0} \frac{\sin(h+c)+\sin(c)}{h}$
$\lim\limits_{h\to 0} \frac{\sin(c)\cdot\cos(h)+\cos(c)\cdot\sin(h)-\sin(c)}{h}$
$= \frac{\sin(c)\cdot\cos(h)-1}{h} + \lim\limits_{h\to 0} \frac{\cos(c)\sin(h)}{h} = \sin(c)\cdot 0 + \cos(c)\cdot 1 = \cos(c)$ b) analog
c) $f(x) = \frac{\sin(x)}{\cos(x)}$ Quotientenregel + a)b) + $\sin^2(x) + \cos^2(x) = 1$.

□

6.9 Beispiel

a) $f(x) = \begin{cases} 1 & \text{für } x < 0 \\ \cos(x) & \text{für } x > 0 \end{cases}$

f ist diffbar für alle $x \neq 0$

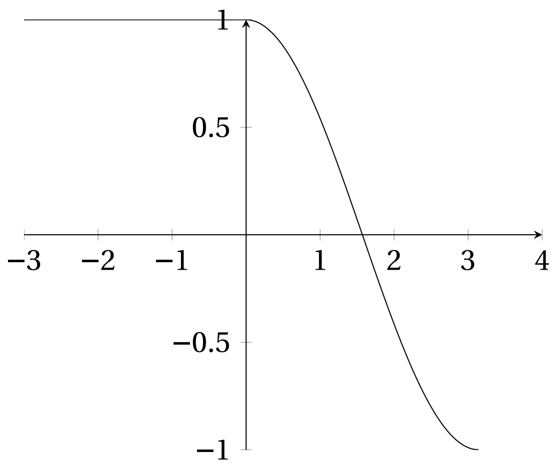


Abbildung 37: Abschnittsweise definierte cosinus Funktion

$\lim\limits_{x\to 0} \frac{f(x)-f(0)}{x}$

$\lim\limits_{x\to 0^+} \frac{\cos(x)-1}{x} \underset{6.7b)}{=} 0$
$\lim\limits_{x\to 0^-} \frac{1-1}{x} = 0$
$\lim\limits_{x\to 0} \frac{f(x)-f(0)}{x} = 0 = f'(0)$

b) $f(x) = \sin^2(x^3) = (\sin(x^3))^2$
$f'(x) = 2\cdot\sin(x^3)\cdot(\sin(x^3))' = 6\cdot\sin(x^3)\cdot\cos(x^3)\cdot x^2$

6.10 Satz

Im Inneren ihres Konvergenzintervalls definieren Potenzreihen eine Funktion
Sei $f(x) = \sum\limits_{k=0}^{\infty} a_k(x-a)^k$
eine Potenzreihe um a mit Konvergenzradius $\mathbf{R} > 0$.
Dann ist f in $]a-R, a+R[$ diffbar und es gilt : $\sum\limits_{k=1}^{\infty} k\cdot a_k\cdot(x-a)^{k-1} = f'(x)$.
(gliedweise Ableitung)
(Beweis [7])

6.11 Korollar

$(\exp(x))' = \exp(x)$

Beweis. $\exp(x) = \sum\limits_{k=0}^{\infty} \frac{x^k}{k!}$ für alle $x \in \mathbb{R}$
$(\frac{x^k}{k!}) = \frac{k\cdot x^{k-1}}{k!} = \frac{x^{k-1}}{(k-1)!}$
$k = 1, \ldots$
Behauptung folgt. □

6.12 Satz (Ableitung der Umkehrfunktion)

$f : \mathscr{I} \to \mathscr{I}_1$ bijektiv, $\mathscr{I}, \mathscr{I}_1$ Intervall (linke und rechte Grenze darf nicht $-\infty/\infty$ sein)
Sei f in $c \in \mathscr{I}$ diffbar und $f'(c) \neq 0$.
Dann ist $f' : \mathscr{I}_1 \to \mathscr{I}$ in $f(c) \in \mathscr{I}_1$ diffbar, und es gilt: $(f^{-1})'(f(c)) = \frac{1}{f(c)}$
Ist f überall auf $\mathscr{I}$ diffbar und $f'(y) \neq 0$ für alle $y \in \mathscr{I}$, so ist f^{-1} auf $\mathscr{I}_1$ diffbar und es

gilt:

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

für alle $x \in \mathscr{I}$.
Beweisidee: f^{-1} diffbar an Stelle $f(c)$, falls $f'(c) \neq 0$. Grund: Graph von f' = Graph von f gespiegelt an Winkelhalbierende $s(x) = x$.
$(f^{-1} \circ f)(x) = x$

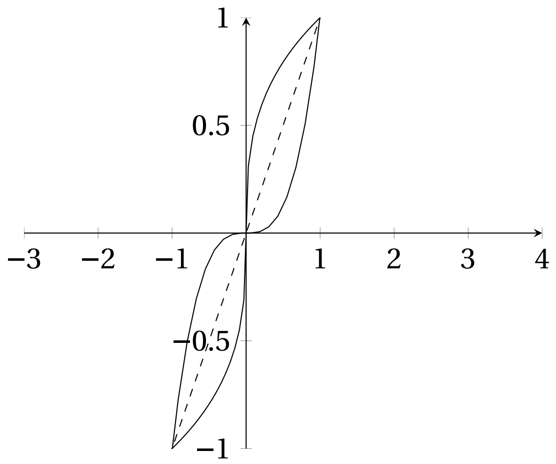


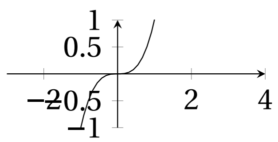
Abbildung 38: Zwei Funktionen an der Winkelhalbierenden

Ableiten mit Kettenregel.
$f^{-1}(f(x)) \cdot f'(x) = 1$. Behauptung folgt.

6.13 Bemerkung

Bedingung $f'(c) \neq 0$ in 6.12 ist notwendig.

$$f: \begin{cases} \mathbb{R} \to R \\ x \to x^3 \end{cases} \quad \text{bijektiv}$$



$f'(0) = 0$. $\quad (f'(x) = 3x^2)$
$f^{-1}(x) = \sqrt[3]{x} = x^{\frac{1}{3}}$

$\lim\limits_{x\to 0} \frac{x^{\frac{1}{3}}-0}{x-0} = \lim\limits_{x\to 0} \frac{1}{x^{\frac{2}{3}}} = \infty$
$(f^{-1})'(0)$ existiert nicht. (jedenfalls nicht als reelle Zahl!)

6.14 Satz

	$f(x)$		$f'(x)$
a)	a^x	$(a \in \mathbb{R}, a > 0), x \in \mathbb{R}$	$\ln(a) \cdot a^x$
b)	$\ln(x)$	auf $]0, \infty[$	$\frac{1}{x}$
c)	$\log_{10}(x)$	(konst. $a > 0,\ a \neq 1$) auf $]0, \infty[$	$\frac{1}{\ln(a)\cdot x}$
d)	$x \cdot (\ln(x) - 1)$	auf $]0, \infty[$	$\ln(x)$
e)	$x^b \cdot (b \in \mathbb{R})$	auf $]0, \infty[$	$b \cdot x^{b-1}$

Beweis. a)
$f(x) = \exp(x \cdot \ln(a))$
$f'(x) \underset{\substack{6.12\\ \text{Kettenregel}}}{=} \exp(x \cdot \ln(a)) \cdot \ln(a) = a^x \cdot \ln(a)$
b) $\ln(x)' \underset{6.12}{=} \frac{1}{\exp'(\ln(x))} \underset{6.11}{=} \frac{1}{x}$
c)$\log'_a(x) \underset{6.12}{=} \frac{1}{\ln(a)\cdot a^{\log_a(x)}} = \frac{1}{\ln(a)\cdot x}$ □

6.15 Satz (logarithmische Abbildung)

$f : \mathscr{I} \to]0, \infty[$ diffbar.
$(\ln(f(x)))' = \frac{f'(x)}{f(x)}$
Beweis : Kettenregel und 6.14b)

6.16 Beispiel

$f(x) = e^x \cdot (\sin(x) + 2) \cdot x^6$ für $x \neq 0$
$\ln(f(x)) = x + \ln(\sin(x) + 2) + 6 \cdot \ln(x)$
$\ln(f(x))' = 1 + \frac{\cos(x)}{\sin(x)} + \frac{6}{x}$
$f'(x) = (1 + \frac{\cos(x)}{\sin(x)+2} + \frac{6}{x}) \cdot e^x \cdot (\sin(x) + 2) \cdot x^6$

6.17 Definition

$f : D \to \mathbb{R}$ hat *lokales Maximum*

6.18 Satz

$f : D \to \mathbb{R}$ diffbar.
Hat f in $c \in D$ lokales Minimum/Maximum, so $f'(c) = 0$

Beweis.
c lokale Max.stelle.
$f'(c)$ existiert nach Voraussetzung.
$f'(c) = \lim\limits_{x \to c^+} \frac{f(x)-f(c)}{x-c} \leq 0.$
$f'(c) = \lim\limits_{x \to c^-} \frac{f(x)-f(c)}{x-c} \geq 0.$
$\Rightarrow f'(c) = 0.$ □

Vorsicht: $f'(c) = 0$ ist nicht hinreichend für lokale Maxima/Minima.
z.B $f(x) = x^3 \quad f'(x) = 3x^2 \quad f'(0) = 0$
f hat kein Maximum oder Minimum in 0
Globale Max/Min von f auf $[a, b]$:

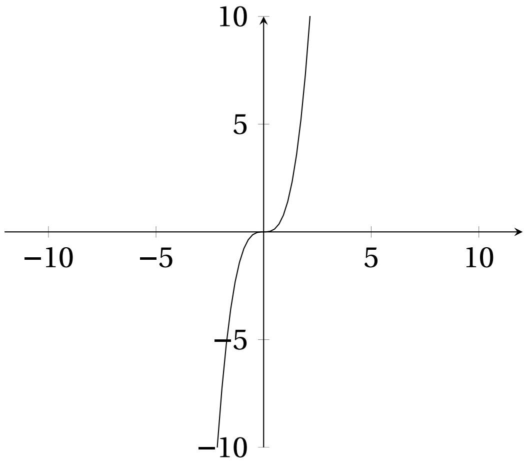


Abbildung 39: Ableitung keine Hinreichende Bedingung für Minima/Maxima

- Bestimme $c \in]a, b[$ mit $f'(c) = 0$ Teste, ob lokale Max/Min.

- Teste Intervallgrenzen a und b.

6.19 Satz (Mittelwertsatz)

Speziell: $f(a) = f(b) \Rightarrow \exists c \in]a,b[$ mit $f'(c) = 0$ Satz von Rolle

$\mathscr{I} = [a,b], a < b, a,b \in \mathbb{R}$
$f : \mathscr{I} \to \mathbb{R}$ stetig und diffbar auf $]a,b[$.
Dann existiert $c \in]a,b[$ mit $f'(c) = \frac{f(b)-f(a)}{b-a}$

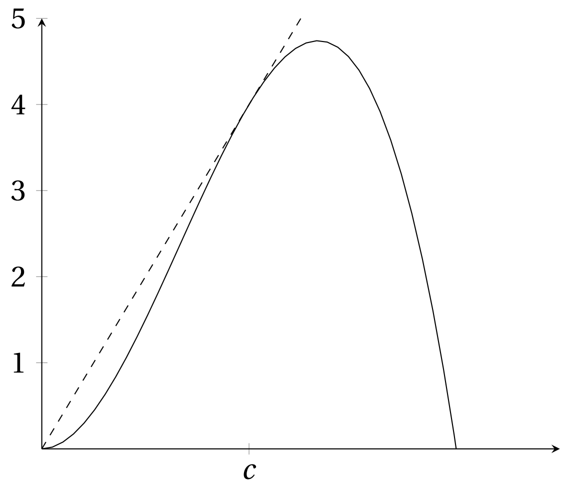


Abbildung 40: Eine Funktion und ihrer Steigung an der Stelle c

Beweis. Setze $s(x) = f(a) + \frac{f(b)-f(a)}{b-a} \cdot (x-a)$
(Sekante durch $(a, f(a)), (b, f(b))$)
Def. $h(x) = f(x) - s(x)$. $h(a) = h(b) = 0$.
Zeige: $\exists c \in]a,b[$ mit $h'(c) = 0$.
Fertig, denn

$$h'(x) = f'(x) - s'(x) = f'(x) - \frac{f(b)-f(a)}{b-a}$$
$$h'(c) = 0 \Rightarrow f'(c) = \frac{f(b)-f(a)}{b-a}$$

Ist h konstant, so kann man jedes $c \in]a,b[$ wählen. Also sei h nicht konstant. h ist stetig auf $[a.b]$. 5.11. h nimmt auf $[a,b]]$ globales Max. und Min. an: $x_{max}, x_{min}, x_{max} \neq$

x_{min}, da h nicht konstant $h(a) = h(b)$ O.B.d.A
$x_{max} \in]a, b[$. 6.18 : $h'(x_{max}) = 0$ □

6.20 Korollar

$\mathscr{I} = [a, b].a < b, f : I \to \mathbb{R}$ stetig, diffbar in $]a, b[$. (auch $\mathscr{I} = \mathbb{R}$ oder $[a, \infty],]-\infty, b]$ erlaubt)

a) Ist $f'(x) = 0$ für alle $x \in]a, b[$, so ist f konstant auf $[a, b]$,

b) Ist $f'(x) \geq 0$ für alle $x \in]a, b[$, so ist f (streng) monoton wachsend auf $\mathscr{I}$

c) Ist $f(x) \leq 0$ für alle $x \in]a, b[$ so ist f (streng) monoton fallend auf $\mathscr{I}$.

Beweis.
Wähle $u < v$, $u, v \in [a, b]$ beliebig.
Wende 6.19 auf $[u, v]$ an. $\exists c \in]u, v[$ mit
$f'(c) = \frac{f(v)-f(u)}{v-u}$
Daraus folgt im Fall
a) $f(v) = f(u)$
b) $f(v) \geq f(u)$
c) $f(v) \leq f(u)$ □

Bedingung für strenge Montonie nur hinreichend, nicht notwendig $f(x) = x^3$ streng monoton steigend $f'(0) = 0$

6.21 Korollar

$\mathscr{I} = [a, b]$, $a < b$ wie in 6.20.
$c \in]a, b[.f : \mathscr{I} \to \mathbb{R}$ sei stetig in $\mathscr{I}$.
f auf $\mathscr{I}_0 =]a, b[\setminus \{c\}$ diffbar
Existiert $\lim\limits_{x\to c} f'(x)$ auf $\mathscr{I}_0$, so existiert $f'(c)$ und $f'(c) = \lim\limits_{x\to c} f'(x)$.

6.22 Satz (Regeln von L'Hôpital)

a) $\mathscr{I}$ Intervall, c $\in \mathscr{I}$, $f, g : \mathscr{I} \setminus \{c\} \to \mathbb{R}$ diffbar.
   Es gelte $g'(x) > 0$ für alle $x \in \mathscr{I} \setminus \{c\}$
   Oder : $g'(x) > 0$ für alle $x \in \mathscr{I} \setminus \{c\}$
   Es gelte $\lim\limits_{x\to c} f(x) = \lim\limits_{x\to c} g(x) = 0$ oder ∞
   Existiert $\lim\limits_{x\to c} \frac{f'(x)}{g'(x)} = L$, so ist $\lim\limits_{x\to c} \frac{f(x)}{g(x)} = L$

b) $f, g : [a, \infty[\to \mathbb{R}$ diffbar.
Es gelte $g'(x) > 0$ für alle $x \in [a, \infty[$
oder $g'(x) < 0$ für alle $x \in [a, \infty[$ und $\lim\limits_{x\to\infty} f(x) = \lim\limits_{x\to\infty} g(x) = 0$ oder ∞
Existiert $\lim\limits_{x\to\infty} \frac{f'(x)}{g'(x)} = L$, so ist
a $\lim\limits_{x\to\infty} \frac{f(x)}{g(x)} = L$.

6.23 Beispiel

a) $\lim\limits_{x\to\infty} \frac{\ln(1+ax)}{x} =?(a \in \mathbb{R})$ Zähler definiert für alle $x \in \mathbb{R}$ mit $1 + ax > 0$ 6.22a):
$\lim\limits_{x\to 0} \frac{\ln(1+ax)}{x}$
$\lim\limits_{x\to 0} \frac{\frac{a}{1+ax}}{1} = a$

b) $\lim\limits_{x \cdot \ln(x)}$
$\lim\limits_{x\to 0^+} -\frac{-ln(x)}{\frac{1}{x}} \underset{6.22}{=} \lim\limits_{x\to 0^0} \frac{\frac{1}{x}}{-\frac{1}{x^2}} =$
$\lim\limits_{x\to 0} -\frac{-x^2}{x} = \lim\limits_{x\to 0^+} -x = 0$

c) $\lim\limits_{x\to 0} x^x = \lim\limits_{x\to 0} \exp(x \cdot \ln(x))$
$\underset{\text{exp stetig}}{=} \exp(\lim\limits_{x\to 0} x \cdot \ln(x)) \underset{\text{b)}}{=} \exp(0) = 1.$
(Deshalb definiert man $0^0 = 1$)

d) $\lim\limits_{x\to\infty} = \frac{\ln(x)}{x} \underset{6.22}{=}$
$\lim\limits_{x\to\infty} \frac{\frac{1}{x}}{1} =$
$\lim\limits_{x\to\infty} = \frac{1}{x} = 0$ (schon in 5.17)

7 Das bestimmte Integral

Ziel: Bestimmung des Flächeninhalts zwischen Graph einer Funktion und x-Achse zwischen zwei Grenzen a und b (sofern möglich).

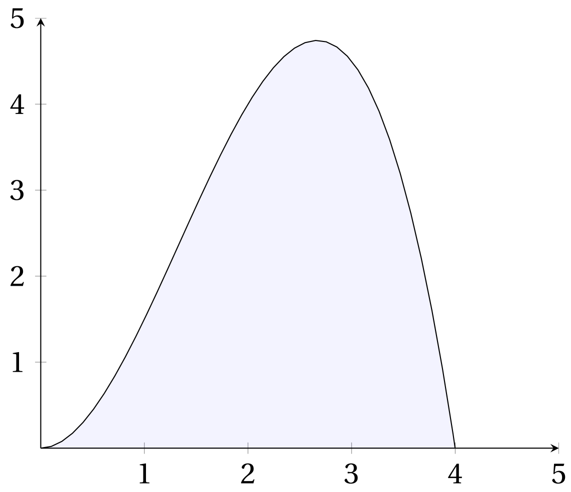


Abbildung 41: Flächeninhalt unter einer Funktion f

7.1 Definition

a) $a, b \in \mathbb{R}, a < b. f : [a, b] \to \mathbb{R}$ heißt *Treppenfunktion*, falls es $a = a_0 < a_1 < \ldots < a_n = b$ gibt, so dass f auf jedem offenem Intervall $]a_i, a_{i+1}[/, , i = 0 \ldots, n-1$, konstant ist. (Wert an den a_i beliebig.)

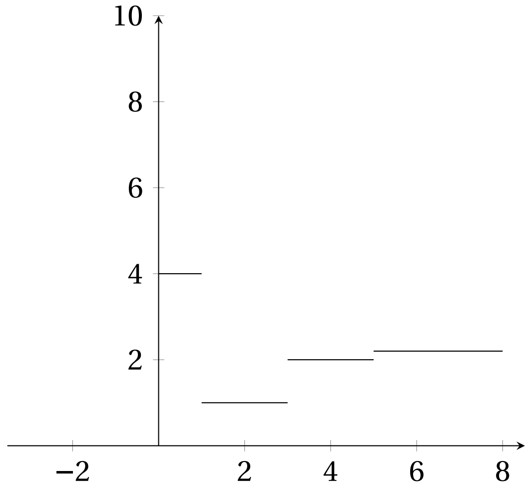


Abbildung 42: Treppenfunktion

b) f wie in a).

$$\int_a^b f\,dx = \int_a^b f(x)dx := \sum_{i=0}^{n-1} c_i(a_{i+1} - a_i)$$

wobei $f(x) = c_i$ auf $]a_i, a_{i+1}[$.
Integral von f über $[a, b]$ (Integral kann negativ sein)

7.2 Definition

$a, b \in \mathbb{R}. a < b$.
$f : [a, b] \to \mathbb{R}$ heißt *Regelfunktion* (oder integrierbare Funktion) $\Leftrightarrow$
$\forall \varepsilon > 0 \exists$ Treppenfunktion $g : [a, b] \to \mathbb{R}$ (abh. von ε): $|f(x) - g(x)| \geq \epsilon$ für alle $x \in [a, b]$.
Bedeutung:
Gleichmäßige Approximierbarkeit durch Treppenfunktion.

7.3 Satz

$\mathscr{I} = [a, b]$, $a, b \in \mathbb{R}$, $a < b$.

a) Jede Regelfunktion f auf $\mathscr{I}$ ist beschränkt d.h. $\exists m, M \in \mathbb{R}: m \leq f(x) \leq M$ für alle $x \in [a, b]$.

b) Summe, Produkt und Betrag von Regelfunktionen ist wieder eine Regelfunktion

Beweisidee für a),b):
Man beweist 7.3 zunächst für Treppenfunktionen. Für b): Bestimme gemeinsame Verfeinerung der Intervallunterteilung der beiden Treppenfunktionen Dann auf Regelfunktionen übertragen.

7.4 Satz

Jede stetige Funktion auf $[a, b]$ ist Regelfunktion *Beweis*: [8] 7.4 gilt auch für soge-

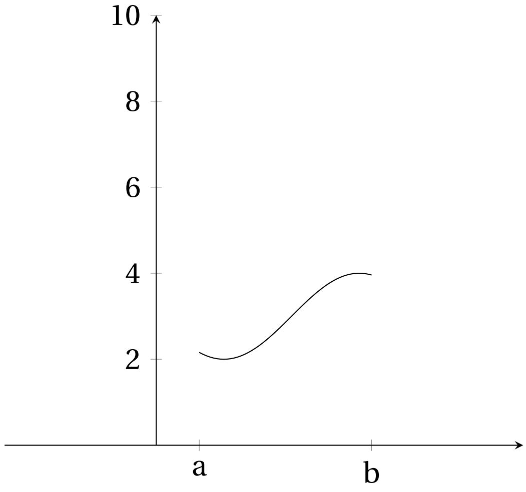


Abbildung 43: Treppenfunktion

nannte *stückweise stetige* Funktionen auf $[a, b]$ $[a, b]$ ist Vereinigung *endlicher* Teilintervalle, auf denen Funktion stetig ist.

7.5 Beispiel

a) $f(x) = x^2, \mathscr{I} = [0, t]$
Definition für $x \in \mathbb{N}$ Treppenfunktion.
$f_n : [0, t] \to \mathbb{R}$

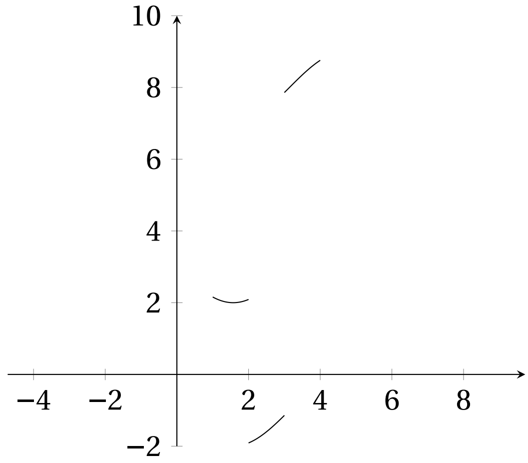


Abbildung 44: Abschnittsweise stetige Funktion

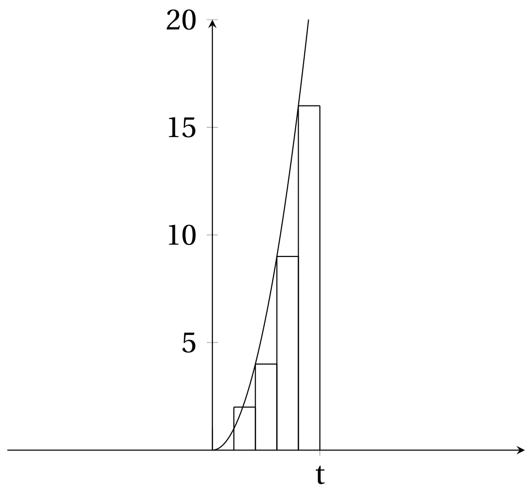


Abbildung 45: Treppenfunktion (Untersumme) von x^2

$$f_n(x) = \begin{cases} (\frac{it^2}{n}) & \text{falls } x \in [\frac{it}{n}, \frac{(i+1)t}{n}] \text{für ein } i \in \{0, \ldots, n-1\} \\ t^2 & \text{falls } x = t \end{cases}$$

$x \in [0, t] : |f(x) - f_n(x)| = ?$

$x = t : |f(t) - f_n(x)| = 0.$

$0 \leq x < t :$ Dann $x \in [\frac{it}{n}, \frac{(i+1)t}{n}]$ für alle $i \in \{0, \ldots, n-1\}$.

$$|f(x) - f_n(x)| = |x^2 - (\frac{it}{n})^2| \leq (\frac{(i+1)t}{n})^2 - (\frac{it}{n})^2 = \frac{2it + t^2}{n^2} \leq \frac{2t}{n} + \frac{t^2}{n^2} \xrightarrow[n\to\infty]{} 0$$

b) $f(x) = \begin{cases} 0 & x \in \mathbb{Q} \\ 1 & x \notin \mathbb{Q} \end{cases}$
$f : [0,1] \to \mathbb{R}$

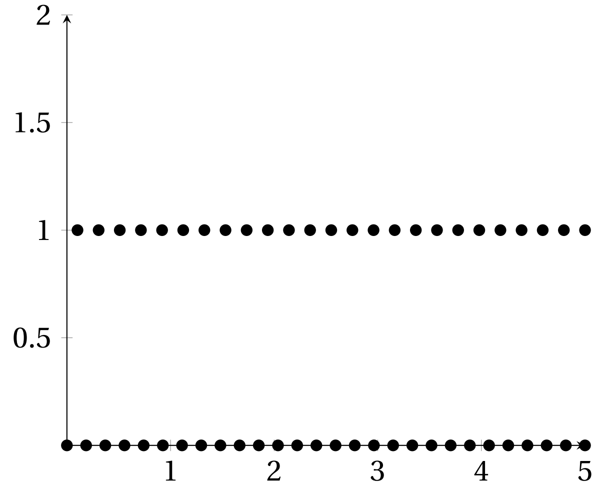


Abbildung 46: Nicht integrierbare Funktion

7.6 Lemma

f Regelfunktion auf $[a,b]$

a) $(f_n)_n$ Folge von Treppenfunktion, die *gleichmäßig* gegen f konvergiert, dass heißt es existiert Nullfolge $(a_n)_n$, $a \geq 0$, und $|f_n(x) - f(x)| \leq a_n$ für alle $x \in [a,b]$.
Dann konvergiert die Folge

$$\underbrace{\left(\int_a^b f_n(x)dx\right)_n}_{\in\mathbb{R}}$$

b) Sind $(f_n)_n$ und $(g_n)_n$ zwei Folgen von Treppenfunktionen die gegen f gleichmäßig konvergieren, so :

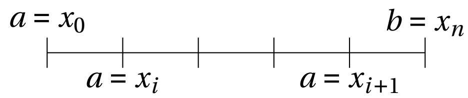
(WHK, 7.20)
$$\lim_{n\to\infty} \int_a^b f_n(x)dx = \lim_{n\to\infty} \int_a^b g_n(x)dx$$

7.7 Definition

$f : [a,b] \to \mathbb{R}$ Regelfunktion, $(f_n)_n$ Folge von Treppenfunktionen, die gleichmäßif gegen f konvergiert (wie in 7.6 a).
Definition *(bestimmtes) Integral*:

$$\int_a^b f(x)dx = \lim_{n\to\infty} \int_a^b f_n(x)dx$$

Treppenfunktion:
$\sum\limits_{i=0}^{n-1} c_i(x_m - x_i)$



7.8 Beispiel

$f(x) = x^2$ auf $[0,t]$
f_n wie in 7.5.

$$\int\limits_a^b f_n(x)dx = \sum_{i=0}^{n-1} (\frac{it}{n})^2 \cdot \frac{t}{n} = \sum_{i=0}^{n+1} i^2 \cdot \frac{t^2}{n^3} = \frac{t^3}{n^3} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} i^2$$

Per Induktion nach n kann man zeigen : $\sum\limits_{i=0}^{n-1} i^2 = \frac{(n-1)n(2n-1)}{6}$
Also : $\int_0^t f_n(x)dx = \frac{t^3}{n^3} \cdot \frac{(n-1)n(2n-1)}{6}$
$\lim\limits_{n\to\infty} \int_0^t f_n(x)dx = \frac{t^3}{6} \cdot 2 = \frac{t^3}{3}$ Falls $t > 0 - \frac{t^3}{3}$

7.9 Satz (Rechenregeln für Integrale)

f, g Regelfunktionen auf $[a, b]$.

$$\int_a^b (f+g)(x)dx = \int_a^b f(x)dx + \int_a^b g(x)dx$$

(a) $$\int_a^b a \cdot f(x)dx = a \cdot \int_a^b f(x)dx$$

(b) $$f(x) \leq g(x) \text{ für alle } x \in [a, b] \Rightarrow \int_a^b f(x)dx \leq \int_a^b g(x)dx$$

(c) $$\left| \int_a^b f(x)dx \right| \leq \int_a^b |f(x)|dx$$

Sei m $\leq f(x) \leq M$ für alle $x \in [a, b]$:

(d) $$m(b-a) \leq \int_a^b f(x)dx \leq M(b-a)$$

(e) $$a < c < b, \text{ so } \int_a^c f(x)dx = \int_c^b f(x)dx$$

7.10 Beispiel

$a < b. \int_a^b x^2 dx = \frac{b^3}{3} - \frac{a^3}{3}$

$(o < a < b:)$ 7.9e $\int_a^b x^2 dx = \int_0^b x^2 dx - \int_0^a x^2 dx = \frac{b^3}{3} - \frac{a^3}{3})$

Analog für die Fälle $a \leq 0 < b$ und $a < b \leq 0$

7.11 Satz (Mittelwertsatz der Integralrechnung)

$f : [a.b] \to \mathbb{R}$ stetig.

Dann existiert $c \in [a, b]$ mit $\int_b^a f(x)dx = f(c) \cdot (b-a)$

Beweis. f ist stetig nimmt also das Maximum von m an Stelle x_{min} und Maximum M an der Stelle x_{max} an. (5.11)

7.9d) : $m(b-a) \leq \int_a^b f(x)dx$

$f(x_{min}) = m \leq \frac{1}{b-a} \cdot \int_a^b f(x)dx \leq M = f(x_{max})$

Zwischenwertsatz für stetige Funktionen 5.10: $\exists c$ zwischen x_{min} und x_{max} (d.h $c \in$

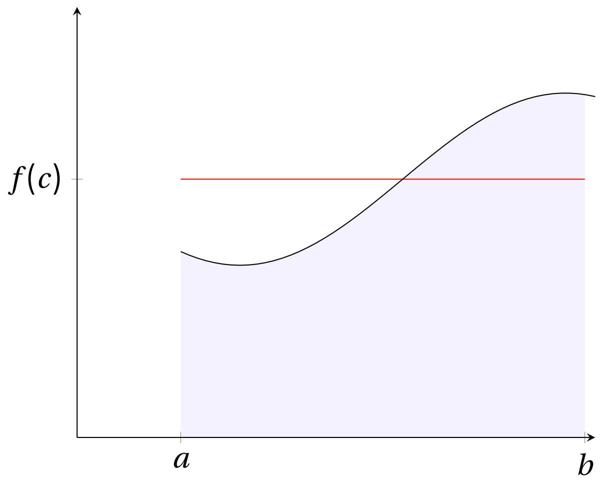


Abbildung 47: Mittelwertsatz der Integralrechnung

$[a,b]$) mit $f(c) = \frac{1}{b-a}\int_a^b f(x)dx$

□

8 Der Hauptsatz der Differential- und Integralrechnung

8.1 Definition

a) Sei $[a,b]$ abgeschlossenes, beschränktes (d.h $a,b \in \mathbb{R}$, $a < b$) Intervall.
$f : [a,b] \to \mathbb{R}$ integrierbar,

$$\int_a^b f(t)dt = -\int_b^a f(t)dt$$

b)

$$\int_a^a f(t)dt = 0$$

8.2 Definition

Sei $\mathscr{I}$ beliebiges Intervall ($-\infty$ bzw. ∞ als linke/rechte Grenze erlaubt).

7.8 $x > 0$

$x > 0 \int_0^x t^2 dt = \boxed{\frac{x^3}{3}}$

$\left(\frac{x^3}{3}\right)' = x^2$

Kein Zufall

$x \leq 0$

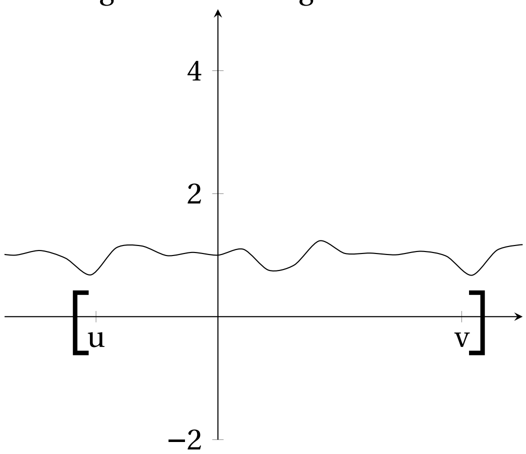
$\int\limits_0^x t^2 dt = -\int\limits_x^0 = -(-\frac{x^3}{3}) = \frac{x^3}{3}$

$\int\limits_a^b t^2 = \frac{b^3}{3} - \frac{a^3}{3}$ gilt für alle $a, b \in \mathbb{R}$

a) $f : \mathscr{I} \to \mathbb{R}$ heißt *lokal integrierbar*,wenn f auf jedem ageschlossenem beschränktem Teilintervall $[u, v]$ von $\mathscr{I}$ integrierbar ist.

(Ist $\mathscr{I}$ selbst abgeschlossen und beschränkt, so „lokal integrierbar „= „integrier-

Abbildung 48: Lokal Integrierbar von u bis v



bar „)

b) $F : \mathscr{I} \to \mathbb{R}$ heißt *Stammfunktion* der lokal Integrierbaren Funktion $f : \mathscr{I} \to \mathbb{R}$, wenn gilt

$$\int_a^V f(t)dt = F(v) - F(u)$$

für alle $u, v \in \mathscr{I}$.

Eine Stammfunktion von f wird auch als *unbestimmtes Integral* von f bezeichnet

$F = \int f(t)dt$

8.3 Bemerkung

Ist f lokal integrierbar auf $\mathscr{I}$, so gilt

$$\int_u^v f(t)dt + \int_v^w f(t)dt = \int_u^w f(t)dt$$

Folgt aus 7.9 + 8.1

für alle $u, v, w \in \mathscr{I}$ (nicht notwendig $u < v < w$)

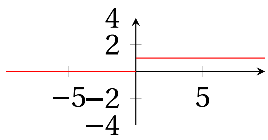
8.4 Beispiel

a) $f(x) = x^2$ lokal integrierbar auf $\mathbb{R}$.
Stammfunktion von f.
$F(x) = \frac{x^3}{3}$

$$\int_a^b F(b) - F(a)$$

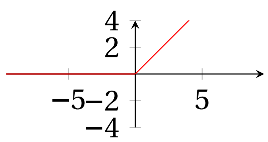
b) $f(x) = \begin{cases} 0 & \text{für } x < 0 \\ 1 & \text{für } x \geq 0 \end{cases}$
Heaviside - Funktion

f ist lokal integrierbar auf $\mathbb{R}$



Stammfunktion von f:

$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{für } x < 0 \\ x & \text{für } x \geq 0 \end{cases}$



Zeige: $\forall u, v \in \mathbb{R}:$

$$\int_u^v f(t)dt = F(v) - F(u)$$

(u < v < 0) $$\int_u^v f(t)dt = 0F(v) - F(u)$$

(u < 0 < v) $$\int_u^v f(t)dt = 0 = \int_0^v f(t)dt = 1 \cdot v = F(v) - F(u)$$

(0 < u < v) $$\int_u^v f(t)dt = 1 \cdot (v-u)F(v) - F(u)$$

(u ≥0) $$\int_u^v f(t)dt = -(F(u) - F(v)) = F(v) - F(u)$$

8.5 Satz

Sei $\mathscr{I} \neq \varnothing$ Intervall, $f : \mathscr{I} \to \mathbb{R}$ lokal „Integrierbar "

a) Ist F Stammfunktion von f, so auch $G(x) = F(x) + c$ für jedes $c \in \mathbb{R}$.

b) Sind F und G Stammfunktionen von f, so ist $F(x) = G(x) + c$ für ein $c \in \mathbb{R}$

c) Sei $x_0 \in \mathscr{I}$ beliebig, aber fest gewählt. Dann ist F(x) = $\int_{x_0}^x f(t)dt$ eine Stammfunktion von f.
(Beachte
$$\int_{x_0}^x f(t)dt = \int_{x_0'}^x f(t)dt + \int_{x_0'}^x f(t)dt$$
)

Beweis. a),b)
F Stammfunktion, $c \in \mathbb{R} G(x) = F(x) + c$ ist Stammfunktion von f:
$G(v) - G(u) = F(v) = F(u) = \int_u^v f(t)dt$
Umgekehrt: Seien F, G zwei Stammfunktionen von f. Sei $x_0 \in \mathscr{J}$ halte es fest.
$G(x) - G(x_0) = \int\limits_{x_0}^{x} f(t)dt = F(x) - F(x_0)$ für alle $x \in \mathscr{J}$
$G(x) = F(x) + \underbrace{G(x_0) - F(x_0)}_{=:c}$ für alle $x \in \mathscr{J}$ c) $u, v \in \mathscr{J}$
$$F(v) - F(u) = \int\limits_{x_0}^{v} f(t)dt = \int\limits_{x_0}^{u} f(t)dt = +\int\limits_{u}^{x_0} f(t)dt + \int\limits_{x_0}^{v} f(t)dt = \int\limits_{u}^{x_0} f(t)dt$$ □

8.6 Satz

Jede Stammfunktion einer lokal integrierbaren Funktion ist stetig.

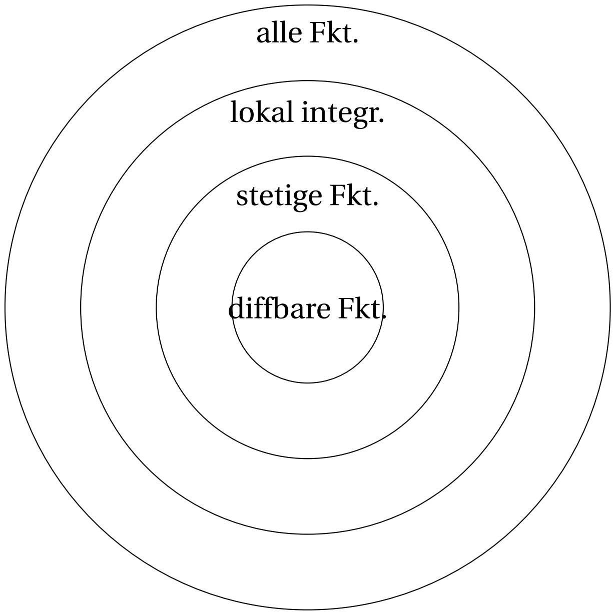


Abbildung 49: Die Welt der Funktionen

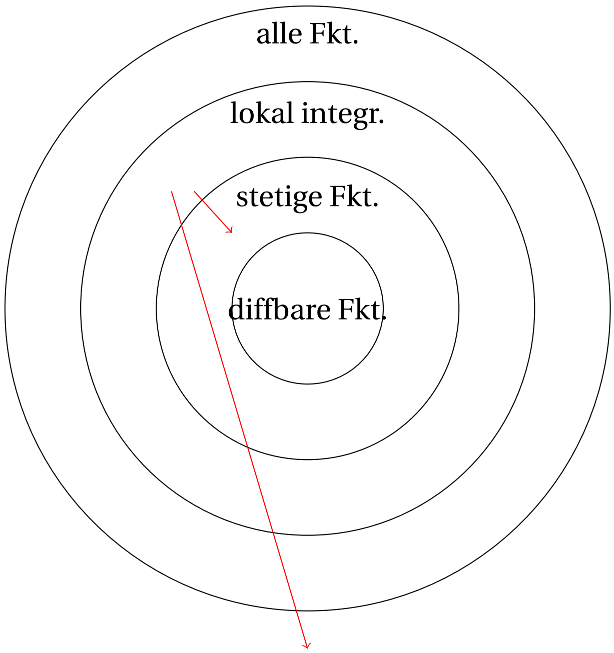


Abbildung 50: Stammfunktionbildung

Beweis. $f : \mathscr{J} \to \mathbb{R}$ lokal integrierbar
$x_0 \in \mathscr{J}$. Zeige: F ist stetig in x_0 (Stammfunktion von f).

Betrachte f auf $[x_0-1, x_0+1] \cap \mathscr{J}$
Sei $|f(x)| \leq M$ für alle $\in \mathscr{J}_0.(7.3a)$
$|F(x)-F(x_0)| = |\int_{x_0}^{x} f(t)dt| \underset{7.9c)}{\geq} \int_{x_0}^{x} |f(t)dt| \underset{7.9d)}{\geq} M \cdot |x-x_0|$ für alle $x \in \mathscr{J}_0$.
F stetig in x_0 nach 5.2 □

8.7 Definiton

$f : \mathscr{J} \to \mathbb{R}$ heißt *stetig differenzierbar*, falls f differenzierbar ist und die Ableitung f' stetig ist.
[Beachte : Nicht jede differenzierbare Funktion ist stetig diffbar

$$\text{Bsp: } f(x) = \begin{cases} x^2 \cdot \sin(\frac{1}{x}) & \text{für } x \neq 0 \\ 0 & \text{für } x = 0 \end{cases}$$

f' nicht stetig in 0

8.8 Satz (Hauptsatz der Differential- und Integralrechnung)

$\mathscr{J}$ beliebiges Intervall, $f : \mathscr{J} \to \mathbb{R}$.

a) Ist f stetig, so ist jede Stammfunktion F von f differejzierbar auf $\mathscr{J}$ und es gilt $F' = f$.

$$\Big(\int f(t)dt\Big)' = f \tag{a}$$

Dass heißt $F(x) = \int_{x_0}^{x} f(t)dt \Rightarrow F'(x) = f(x)$

b) Ist f stetig diffbar auf $\mathscr{J}$, so ist f Stammfunktion von f', dass heißt.

$$\int_{x_0}^{x} f'(dt) = f + c \tag{b}$$

$\forall u, v \in \mathscr{J}$:

$$\int_u^v f'(t)dt = f(v) - f(u) = f(x)\Big|_u^v$$

$$\begin{array}{ccc} f & \longrightarrow & F = \int f(t)dt \\ F' = f & \longleftarrow & \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc} f' & \longleftarrow & f \text{ stetig diffbar} \\ & \longrightarrow & F = \int f'(t)dt = f + c \end{array}$$

Beweis. a) Sei $c \in \mathscr{I}$.
Zu zeigen: $\lim\limits_{x\to c} \frac{F(x)-F(c)}{x-c} = f(c), x \neq c,\ x \in \mathscr{I}$:
$\frac{F(x)-F(c)}{x-c} \underset{\text{F. St.fkt. von f}}{=} \frac{1}{x-c} \int_c^x f(t)dt$
Mittelwertsatz der Integralrechnung (7.11). Es existiert $\Theta(x)$ zwischen x und c mit

$$\int_x^c f(t)dt = f(\Theta(x)) \cdot (x-c)$$

$$\begin{aligned} \frac{F(x)-F(c)}{x-c} &= \frac{1}{x-c} \cdot f(\Theta(x)) \cdot (x-c) \\ &= f(\Theta(x)) \xrightarrow[\substack{x\to c,\text{ so} \\ \Theta(x)\to c}]{} f(c), \text{ da } f \text{ stetig} \end{aligned}$$

b) f' ist stetig.

Sei F eine Stammfunktion von f'. Nach a): $F' = f'$.
$(F - f)' = 0$.
6.20a) $F - f = c$ konstant, dass heißt $F = f + c$ □

8.9 Beispiele

Zu. 8.8a):

a) $g(x) = \int_1^x \underbrace{e^{t^2} \cdot (\sin(t) + \cos(\tfrac{t}{2})}_{\text{stetig}} dt$ 8.8a) : $g'(x) = e^{x^2} \cdot (\sin(x) + \cos(\frac{x}{2})$

b) $g(x) = \int_0^{x^2} e^t \cdot \sin(t)dt$
$F(x) = \int\limits_0^x e^t \cdot \sin(t)dt$
$h(x) = x^2$
$g = F(h(x)) = (F \circ h)(x)$
$g'(x) = F'(h(x)) \cdot h'(x) = e^{x^2} \cdot \sin(x^2) \cdot 2x$

8.10 Beispiel

zu 8.8b)

a) $n \in \mathbb{N}_0$:
$\int ax^n dx = a \cdot \frac{x^{n+1}}{n+1} + c$ denn $\left(a\frac{x^{n+1}}{n+1}\right)' = ax^n$
d.h : $\int_u^v a \cdot x^n dx = \frac{a}{n+1}(v^{n+1} - u^{n+1})$
Damit : $\int \sum_{i=0}^{n} a_i \cdot x^i = \sum_{i=0}^{n} a_i \frac{xi+1}{(i+1)}$

b) $n \geq -2$,so

$$\int \frac{1}{x^n} dx = \frac{1}{n+1} \cdot \frac{1}{x^{1-n}} + c$$

c) Für $x > 0$ ist $\ln(x)' \frac{1}{x}$ (6.14b)
Also $\int \frac{1}{x} dx = \ln(x) + c$ auf $]0, \infty[$
Auf $]-\infty, 0[$ gilt $\int \frac{1}{x} dx = \ln(|x|) + c$

d) $\int \ln(x) dx = x \cdot \ln(x) - x + c$ auf $]0, \infty[$ (6.14d)

e) $\int e^x dx = e^x + c$

f) $\int \sin(x) dx = -\cos(x) + c \int \cos(x) dx = \sin(x) + c$

8.11 Satz (Partielle Integration)

Seien f und g stetig diffbare Funktionen auf Intervall $\mathscr{J}$. Dann:

$$fg' dx = f \cdot g - \int f' \cdot g dx$$

Für bestimmte Integrale heißt das:

$$\int_u^v f(x) \cdot g'(x) dx = \underbrace{f \cdot g}_{f(v)\cdot g(v) - f(u)\cdot g(u)} \Big| - \int_y^u f'(x) g(x) dx$$

Für alle $u, v \in \mathscr{J}$

Beweis. 8.8b)
$(f \cdot g)' = f \cdot g' + f' \cdot g$
$\int (f \cdot g' + f' \cdot g) dx = f \cdot g + c$
$\int f \cdot g' + \int f' g \cdot g = f \cdot g$ □

8.12 Beispiele

a) $\int \underbrace{x}_{f} \cdot \underbrace{\cos(x)}_{g'} dx \underset{8.11}{=} x \cdot \sin(x) - \int \sin(x) dx = x \cdot \sin(x) + \cos(x) + c$

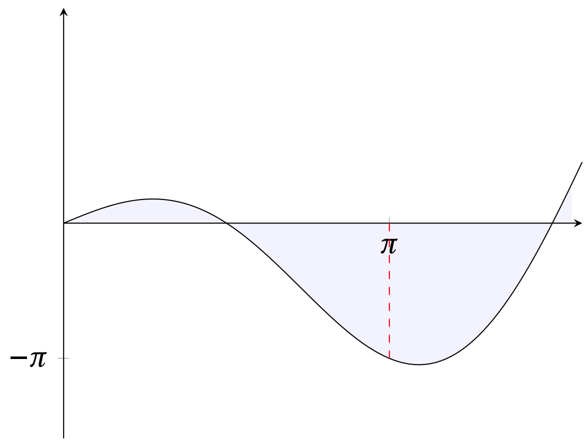


Abbildung 51: $\int_0^\pi x \cdot \cos(x) dx = 2$

b) $\int \ln(x) dx = \int \underset{f'}{\underset{\uparrow}{1}} \cdot \underset{g}{\underset{\uparrow}{\ln(x)}} dx = x \cdot \ln(x) - \int x \cdot \frac{1}{x} dx = x \ln(x) - x + c$ (vgl. 8.10d)

c) $\int \cos^2(x) dx \underset{8.11}{=} \underset{f'}{\underset{\uparrow}{\cos(x)}} \cdot \underset{g}{\underset{\uparrow}{\sin(x)}} + \int \sin(x) dx$ (★)

$$\begin{aligned}\int \cos^2(x) dx &= \cos(x) \cdot \sin(x) + \int 1 - \cos^2(x) dx \\ &= \cos(x) \cdot \sin(x) + x - \int \cos^x(x) dx \\ &\Rightarrow 2 \cdot \int \cos^2(x) dx = \cos^2(x) dx = \cos(x) \cdot \sin(x) + x + c\end{aligned}$$

8.13 Satz (Integration durch Substitution)

$\mathscr{I}, \mathscr{J}$ Intervalle $f : \mathscr{I} \to \mathscr{J}$ stetig diffbar, $g : \mathscr{J} \to \mathbb{R}$ stetig mit Stammfunktion G. Dann ist:

$$\int g(f(x)) \cdot f'(x) dx = G(f(x)) + c$$

Für das bestimmte Integral heißt das:

$$\int_u^v g(f(x)) \cdot f'(x) dx = G(f(v)) - G(f(u)) = \int_{f(u)}^{f(v)} g(t) dt$$

für alle $u, v \in \mathscr{I}$

Beweis. $G \circ f$ diffbar: 8.8a)

Kettenregel:

$$\begin{aligned} (G \circ f)'(x) &= G'(f(x)) - f'(x) \\ &\underset{8.8a}{=} \underbrace{g(f(x)) \cdot f'(x)}_{\text{stetig}} \end{aligned}$$

Hauptsatz $G \circ f$ ist Stammfunktion von $g(f(x)) \cdot f'(x)$ □

Bemerkung: 8.13 kann in 2 Arten angewandt werden:

1.Art: Mann hat ein Integral der Form

$$\int g(f(x)) \cdot f'(x) dx$$

Berechne

$$\int g(t) dt = \int_{x_0}^{x} g(t) dt = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{und ersetze} \\ \text{x durch f(x)}}}{G(x)}$$

2.Art:

Man will $\int g(t) dt$ berechnen

Ersetze t durch $f(x)$ (Substitution)

$\left[\frac{dt}{dx} = f'(x) \to dt = f'(x) dx\right]$

und dt durch $f'(x) dx$ ersetzen.

$\to \int g(f(x)) \cdot f'(x) dy$

Hoffnung: ↑ ist einfacher zu berechnen.

8.14 Satz

f ist stetig diffbar auf $\mathscr{I}$, f stetig auf $\mathscr{I}$.

a) Ist $f(x) \neq 0$ auf $\mathscr{I}$,
so $\int \frac{f'(x)}{f(x)} dx = \ln(|f(x)|) + c$
dass heißt $\int_a^b \frac{f'(x)}{f(x)} = \ln(|f(b)|) - \ln(|f(a)|)$
für alle $a, b \in \mathscr{I}$

b) $\displaystyle\int_a^b g(x+c)dx = \int_{a+c}^{b+c} g(x)dx$
für alle c mit $a+c, b+c \in \mathscr{I}$.

c) $\displaystyle\int_a^b g(c\cdot x)dx = \frac{1}{c}\int_{a\cdot c}^{b\cdot c} g(x)dx$ für alle $c \neq 0$ mit $a\cdot c, b\cdot c \in \mathscr{I}$

Beweis. a) Setze $g(x) = \frac{1}{x}$.
Also : $G(x) = \ln(|x|) + c$ für alle x $\neq 0$.
8.13 $\displaystyle\int \frac{f'(x)}{f(x)} dx = \ln(|f(x)|) + c$ b) Setze $f(x) = x + c$, 8.13
c) Setze $f(x) = x \cdot c$, 8.13[2]

□

8.15 Beispiel

a) $\displaystyle\int \tan(x)dx = \int \frac{\sin(x)}{\cos(x)} = -\int \frac{-(\cos(x))'}{\cos(x)} dx \underset{8.14a)}{=} -\ln(|cos(x)|) + c$[3]

b) $\displaystyle x\cdot\sin(x^2)dx = \frac{1}{2}\int 2x\sin(x^2)dx \underset{8.13}{=} -\frac{1}{2}\cos(x^2) + c$

c) $\displaystyle\int \frac{x}{x^2+a^2}dx = \frac{1}{2}\int\frac{2x}{x^2+a^2}dx \underset{8.14a)}{=} \ln(x^2+a^2) + c$ auf $\mathbb{R}$ $(a \neq 0)$

d) $\displaystyle\int_{-1}^{1} \sqrt{1-t^2}dt$
Fläche des Halbkreises vom Radius 1.

[2] Beachte $f'(x) = c$
[3] Gilt auf jedem Intervall $]k\pi + \frac{\pi}{2}, (k+1)\pi + \frac{\pi}{2}[$

Substitution $t = \sin(x)$

$\frac{dt}{dx} = \cos(x), dt = \cos(x)dx$

$\int_{-1=\sin(-\frac{\pi}{2})}^{1=\sin(\frac{\pi}{2})} \sqrt{1-t^2} \overset{8.13}{=} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1-\sin(x)^2} \cdot \cos(x)dx = \int \cos^2(x)dx \overset{8.11c}{=} \frac{\cos(x)\cdot\sin(x)}{2} = \frac{\frac{\pi}{2}}{2} -$
$(\frac{\frac{\pi}{2}}{2}) - (\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{4} = \frac{\pi}{2})$

Lineare Algebra

lineare Gleichungssysteme $\nearrow$ Geometrie $\nwarrow$

9 Matrizen und lineare Gleichungssysteme

9.1 Definition

$K = \mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}$

a) Eine $m \times n$ *Matrix* A über k ist rechteckiges Schema .

$$\text{Spalten}\Big\downarrow A = \left\{\begin{matrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{matrix}\right\} \xrightarrow{\text{Zeilen}}$$

mit m *Zeilen* und n *Spalten*, $a_{ij} \in K$.

(Bezeichnung der Indizes ist Standard! 1.Index : Zeile, 2.Index : Spalte)

(m,n) heißt *Typ* der Matrix.

Schreibweise:

$A = (a_{ij})_{\substack{i=1...m \\ j=1...n}}, A = (a_{ij})$

b) $\mathcal{M}_{m,n}(K)$ =Menge aller $m \times n$-Matrizen über K (*quadratische Matrizen*)

c) $A = (a_{ij}) \in \mathcal{M}_{n,m}(K)$..

Definiere $A^t = (b_{ij}) \in M_{n,m}(k)$ mit $b_{ij} = a_{ij}$ für $i = 1 \dots m,\ j = 1 \dots n$

A^t ist die zu A *transponierte* Matrix.

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & \dots & a_{3n} \\ \vdots & \ddots & \ddots \dots & \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \to \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & \dots & a_{m1} \\ a_{12} & a_{22} & \dots & a_{m2} \\ a_{13} & a_{23} & \dots & a_{m3} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \dots \\ a_{1n} & a_{2n} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}$$

(Manchmal A^T statt A^t oder andere Schreibweise)

$1 \times n$–Matrix $(a_1 1, \dots 1_1 n)$ *Zeilenvektor*

$m \times 1$–-Matrix *Spaltenvektor* $\begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ \vdots \\ a_{m1} \end{pmatrix}$

Alle $a_{ij} = 0 : A = \begin{Bmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 \end{Bmatrix} =: 0$ *Nullmatrix* (vom Typ (m,n))

$n \times n$-Matrix $E_n = \begin{Bmatrix} 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & 1 & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 \end{Bmatrix}$ $n \times n$–Einheitsmatrix

$E_n = (\delta_{ij})_{i,j=1\dots n}$

$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{, falls } i = j, \\ 0 & \text{, falls } i \neq j \end{cases}$ *Kronecker Symbol*

9.2 Definition

$A = (a_{ij}), B(b_{ij}) \in \mathscr{M}_{m,n}(K)$ (beide vom gleichen Typ!) $a \in K$.

a) $A + B := (a_{ij} + b_{ij})_{\substack{i=1\dots m \\ j=1\dots n}}$
Summe von Matrizen

b) $a \cdot A = (a \cdot a_{ij})_{\substack{i=1\dots m \\ j=1\dots n}}$
(skalares) Vielfaches von A.
Für Matrizen unterschiedlichen Typs ist keine Summe definiert.

Beispiel: $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \end{pmatrix} B = \begin{pmatrix} -2 & 5 & 3 \\ \frac{1}{2} & 0 & 0 \end{pmatrix}$

$A + B = \begin{pmatrix} -1 & 7 & 6 \\ \frac{9}{2} & 5 & 6 \end{pmatrix}$

$A + B^t$ nicht definiert

$B^t = \begin{pmatrix} -2 & \frac{1}{2} \\ 5 & 0 \\ 3 & 0 \end{pmatrix}$

$A + A = 2A = \begin{pmatrix} 2 & 4 & 6 \\ 8 & 10 & 12 \end{pmatrix}$ Produkt:

- Produkt von Matrizen gleichen Typs durch komponentenweise Multiplikation (kaum Anwendungen)

- wichtig ist Produkt von $m \times n$-Matrizen mit $n \times p$ Matrizen:

9.3 Definition

$m, n, p \in \mathbb{N}$.
$A = (a_{ij}) \in \mathcal{M}_{m,n}(K)$
$B = (b_{ij}) \in \mathcal{M}_{n,p}(K)$

Das *Produkt* $A \cdot B$ von A und $B = (d_{ik})_{\substack{i=\dots m \\ k=1\dots p}}$
mit $d_{ik} = a_{i1} \cdot b_{1k} + a_{i2} \cdot b_{2k} + \ldots + a_i n \cdot b_{nk} = \sum\limits_{j=1}^{n} a_{ij} \cdot b_{jk}$
($m \times n$ multiplizieren mit $n \times p \to m \times p$)
Beachte : Produkt von $m \times n$- mit $r \times p$-Matrix ist nicht definiert falls $n \neq r$

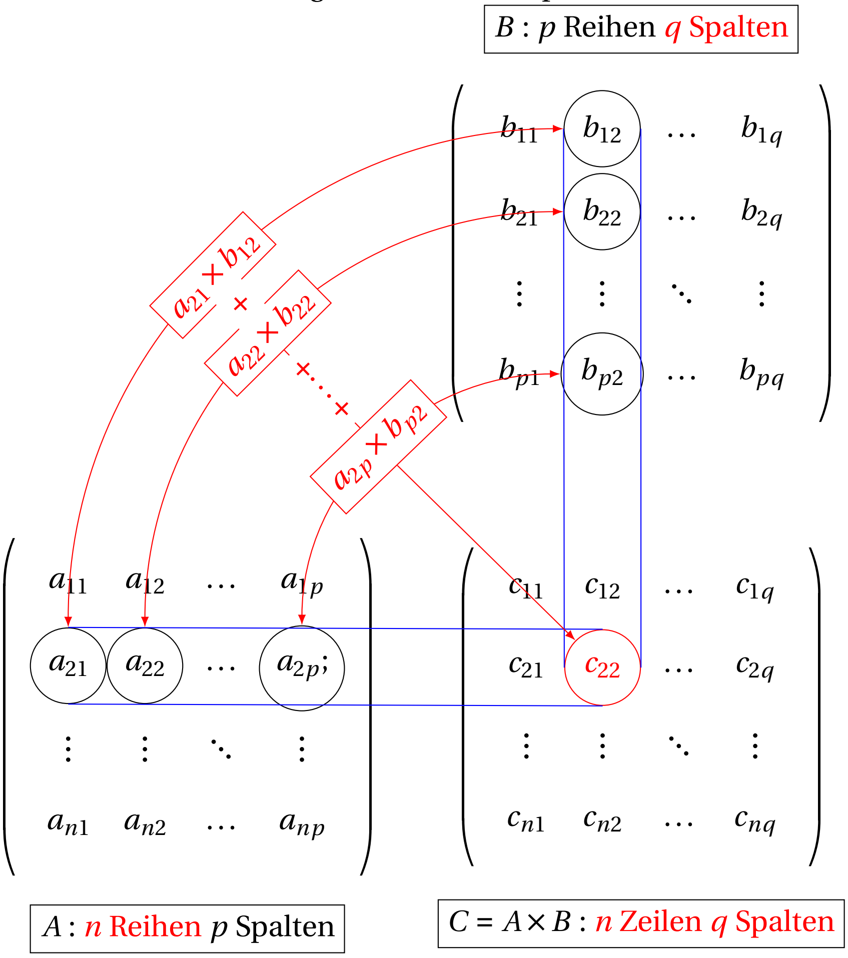
9.4 Beispiel

a) $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ -1 & 0 & 2 \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_3(\mathbb{R})$, $B = \begin{pmatrix} 2 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_{2,3}(\mathbb{R})$

$A \cdot B = \begin{pmatrix} 5 & 6 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_{2,3}(\mathbb{R})$

b) $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_2(\mathbb{R})$, $B = \begin{pmatrix} 2 & 3 \\ 4 & 5 \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_2(\mathbb{R})$

Abbildung 52: Matrix Multiplikation



$$A \cdot B = \begin{pmatrix} 10 & 13 \\ 22 & 29 \end{pmatrix}, B \cdot A = \begin{pmatrix} 11 & 16 \\ 19 & 28 \end{pmatrix}, AB \neq BA!,$$

$$A^2 = A \cdot A = \begin{pmatrix} 7 & 10 \\ 15 & 22 \end{pmatrix}$$

c) $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \end{pmatrix} \in \mathscr{M}1,3(\mathbb{R})$, $B \in \mathscr{M}_{1,2}(\mathbb{R})$ wie in a)

$$A \cdot B = \begin{pmatrix} 5 & 6 & 0 \end{pmatrix}$$

$$B \cdot A^t = B \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 8 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix}$$

d) $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}$, $B = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_{\infty,\ni}(\mathbb{R})$

$A \cdot B = (5) \in \mathcal{M}_1(\mathbb{R})(= \mathbb{R})$

$$B \cdot A = \begin{pmatrix} 2 & 4 & 5 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}$$

e) $A \in \mathcal{M}_{m,n}(K)$

$E_m \cdot A = A$

$$A \cdot E_n = A. \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 2 & 3 & 1 \\ -1 & 2 & 5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & 3 & 1 \\ -1 & 2 & 5 \end{pmatrix}$$

$A \in \mathcal{M}_n(K)$

$E_n \cdot A = A \cdot E_n = A.$

$$a \cdot A = \begin{pmatrix} a & \cdots & 0 \\ \vdots & a & \vdots \\ 0 & \cdots & a \end{pmatrix} \cdot A$$

9.5 Satz (Rechenregeln von Matrizen)

$A, A_1, A_2 \in \mathcal{M}_{m,n}(K)$,
$B, B_1, B_2 \in \mathcal{M}_{n,r}(K)$,
$C \in \mathcal{M}_{r,s}(K)$, $a \in K$.

(a) $$(A_1 + A_2) \cdot B = A_1 \cdot B + A_2 \cdot B$$

(b) $$A \cdot (B_1 + B_2) = A \cdot B_1 + A \cdot B_2$$

(c) $$(a \cdot A) \cdot B = A \cdot (aB) = a(A \cdot B)$$

(d) $$\underbrace{\underbrace{(A \cdot B)}_{m\times r} \cdot \underset{\substack{\downarrow \\ r\times s}}{C}}_{m\times s} = \underbrace{\underset{\substack{\downarrow \\ m\times n}}{A} \cdot \underbrace{(B \cdot C)}_{n\times s}}_{m\times s}$$

(e) $$(A \cdot B)^t = B^t \cdot A^t$$

Beweis. Nur d) $A = (a_i\, j)_{\substack{i=1\ldots m \\ j=1\ldots n}}$
$B = (b_i\, j)_{\substack{i=1\ldots n \\ j=1\ldots r}}$

$C = (c_i j)_{\substack{k=1\dots r\\ j=1\dots s}}$
$A \cdot B = (d_{ik})_{\substack{i=1\dots m\\ k=1\dots r}}$
$d_{ik} = \sum_{j=1}^{n} a_{ij} b_{jk}$
$B \cdot C = (e_{jl})_{\substack{j=1\dots n\\ l=1\dots s}}$
$e_{jl} = \sum_{k=1}^{r} b_{ij} c_{jk}$
$(A \cdot B) \cdot C$
Eintrag an der Stelle (i, l):
$\sum_{k=1}^{r} d_{ik} \cdot c_{kl} = \sum_{k=1}^{r} (\sum_{j=1}^{n} a_{ij} \cdot b_{jk}) \cdot c_{kl} = \sum_{k=1}^{r} \sum_{j=1}^{n} a_{ij} \cdot bjk \cdot c_{kl}$
$A \cdot (B \cdot C)$ Eintrag an Stelle (i, l):
$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} \cdot e_{jl} = \sum_{j=1}^{n} a_{ij} \cdot (\sum_{k=1}^{r} b_{ij} \cdot c_{kl}) = \sum_{j=1}^{n} (\sum_{k=1}^{r} a_{ij} b_{ij} \cdot c_{kl}) = \sum_{k=1}^{r} \sum_{j=1}^{n} a_{ij} b_{ij} \cdot c_{kl}$ □

9.6 Definition

Allgemeine Form eines *lineares Gleichungssystem* (LGS) über K:

$$(*) \quad \begin{array}{cccc} a_{11}x_1 + & \dots & +a_{1n}x_n & = b_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} + & \dots & +a_{mn}x_n & = b_m \end{array}$$

m Gleichungen, n unbekannte $x_1, \dots, x_n$
$(n = 2||3 : x, y||z)$
Koeffizienten $a_{ij} \in K$, rechte Seite $b_1 \dots n_m \in K$ (fest).

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \in M_n 1(K) = K^n$$

(Elemente der $K^n = K \times K \dots \times K$ werden als Spalten geschrieben) heißt Lösung von $(*)$ wenn $x_1 \dots x_n$ sämtliche Gleichungen erfüllen.
Ist $b_1 = \dots b_m = 0$, so heißt $(*)$ *homogenes* LGS, sonst *inhomogenes* LGS.

$$A = \begin{pmatrix} a_1 1 & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \in \mathscr{M}_{m,n}(K)$$

Koeffizientenmatrix des LGS $b = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_{m,1} = K^m$ (rechte Seite)

$(*)$, lässt sich schreiben in *Matrizenform*: $A \cdot x = b$:

$$\begin{pmatrix} a_{11}x_1 + \ldots + a_{1n}x_n \\ \vdots \\ a_{m1}x_n + \ldots + a_{mn}x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix}$$

Sins $s_1, \ldots, s_n$ die Spaltenvektoren von A, d.h. $s_i = \begin{pmatrix} a_{1i} \\ a_{2i} \\ \vdots \\ a_{mi} \end{pmatrix}$, so lässt sich $(*)$ schreiben

als $x_1 \cdot s_1 + \ldots x_n \cdot s_n = b$

$$\begin{pmatrix} x_1 a_{11} \\ \vdots \\ x_1 a_{m1} \end{pmatrix} + \ldots + \begin{pmatrix} x_1 a_{mn} \\ \vdots \\ x_n a_{mn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}$$

Spaltenform des LGS Beachte: Homogenes LGS hat immer *mindestens* eine Lösung

$x = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$ *Null-Lösung* (triviale Lösung)

Fragen:

(1) Wann hat LGS mindestens eine Lösung?

(2) Wenn es Lösungen gibt, wie bestimmt man alle?

Antwort: Gauß Algorithmus (C.F.Gauß 1777-1855)

Lösungsmenge eines LGS ändert sich nicht bei :

- Addition der Vielfachen einer Gleichung zu einer anderen Gleichung
- Multiplikation einer Gleichung mit Zahl $\neq 0$.
- Vertauschen zweier Gleichungen

Was passiert dann:
Aus $Ax = b$ wird

$A'x = b'$

Die Menge der x, die $ax = b$ erfüllen, stimmt mit der überein, die $A'x = b'$ erfüllen.
Ziel des Gauß Algorithmus: Mit obigen Umformungen einfache Form A' zu finden.

Beispiel:

$$\begin{array}{ccccc} 2x & + & 3y & = & 4 \\ x & + & y & = & -2 \end{array} \quad \to \quad \begin{array}{ccccc} x & + & y & = & -2 \\ 2x & + & 3y & = & 4 \end{array} (-2)\text{fache 1.Gl. zu 2.Gl. addieren}$$

$$\begin{array}{ccccc} x & + & y & = & -2 \\ & & y & = & 8 \end{array} \quad y = 8, \qquad x + 8 = -2 \qquad x = -10, \text{ eindeutige Lösung}$$

9.7 Definition

Unter *elementaren Zeilenumformungen* an einer Matrix versteht man folgende Operationen:

- Addition des skalaren vielfachem einer Zeile zu anderen
- Multiplikation einer Zeile mit Zahl $\neq 0$
- Vertauschen von zwei Zeilen

Analog: *Elementare Spaltenumformungen*
(wird nicht für :GS benötigt — außer ggf. Spaltenvertauschung)

9.8 Definition

Ist $Ax = b$ ein LGS, so nennt man $(A, b) \in \mathcal{M}_{m,n+1}(K)$ die *erweiterte Koeffizientenmatrix*. b als letzte Spalte an A anhängen.

9.9 Bemerkung

Führt man an (A, b) elementare Zeilenumformungen durch und erhält man dabei Matrix (A', b'), so ist $x \in k^n$ ist Lösung von $A \cdot x = b$ genau dann wenn x Lösung von $A'x = b'$.

Beispiel 9.6:

$$(A, b) = \begin{pmatrix} 2 & 3 & 4 \\ 1 & 1 & -2 \end{pmatrix} \rightsquigarrow (A'b') = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -2 \\ 0 & 1 & 8 \end{pmatrix}$$

Kernstück des Gauß-Algorithmus:
Jede Matrix B lässt sich durch elementare Zeilenumformungen auf *Zeilenstufenform*

(Treppenform) bringen $$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & & & \\ & & 0 & 0\,0 & & \\ & & & & 0 & \\ & & & & & \\ & & & & & \end{pmatrix}$$

Beispiel : $\begin{pmatrix} \mathit{1}\,\mathit{2} & 3\,4 & 5 \\ 0\,0 & |\mathit{1}\,\mathit{0} & 0 \\ 0\,0 & 0\,0 & |\mathit{1} \end{pmatrix}$

9.10 Gauß Algorithmus

Sei B eine (m,n)-Matrix über K, Ist B Nullmatrix, so fertig.
Sei also im Folgenden B nicht Nullmatrix.

(1) Suche erste Spalte j_1, die nicht nur Nullen enthält.

(2) Eventuell durch Zeilenvertauschung:
Eintrag a am der Stelle (i, j_1) ist $\neq 0$

(3) Multipliziere die 1.Zeile mit $\frac{1}{a}$, Jetzt: Eintrag 1 an der Stelle (i, j_1).

(4) Durch Addition geeigneter Vielfacher der ersten Zeilen zu den übrigen Zeilen alle Einträge in der Spalte j_1 unterhalb der ersten Zeile gleich 0 sind. Ab jetzt wird Zeile 1 nicht mehr benutzt. Sie bleibt unverändert.

(5) Suche erste Spalte $j_2 (> j_1)$,der unterhalb der ersten Zeile einen Eintrag $\neq 0$ enthält.

(6) Wie in (2) imd (3) Eintrag 1 an Stelle $(2, j_2)$

(7) Wie in (4) alle Einträge in Spalte j_2 unterhalb der 2. Zeile zu Null machen.
Ab jetzt wird Zeile 2 nie mehr benutzt.

So fortfahrend erhält man Zeilenstufenform.

9.11 Beispiel

$$B=\begin{pmatrix}0&0&6&1\\0&2&2&3\\0&3&1&0\\0&0&2&1/3\end{pmatrix}\xrightarrow{\text{Vert. 1Z./2.Z.}}\begin{pmatrix}0&2&-2&3\\0&0&6&1\\0&3&1&0\\0&0&2&1/3\end{pmatrix}\xrightarrow{1Z.x\cdot 1/2}\begin{pmatrix}0&1&-1&3/2\\0&0&6&1\\0&3&1&0\\0&0&2&1/3\end{pmatrix}\xrightarrow{3Z.+(-3)\cdot 1.Z.}$$

$$B=\begin{pmatrix}0&1&-1&3/2\\0&0&6&1\\0&0&4&-9/2\\0&0&2&1/3\end{pmatrix}\xrightarrow{1/6\cdot 2.\ Z.}\begin{pmatrix}0&1&-1&3/2\\0&0&1&1/6\\0&0&4&-9/2\\0&0&2&1/3\end{pmatrix}\xrightarrow{1/6\cdot 2.\ Z.}\begin{pmatrix}0&1&-1&3/2\\0&0&1&1/6\\0&0&0&-1/6\\0&0&0&0\end{pmatrix}$$

9.12 Gauß-Algorithmus

Gegeben sei LGS $\underset{m\times n}{A}\underset{n\times 1}{x}=\underset{m\times 1}{b}$

Wende Algorithmus 9.10 auf (A,b) an, bis man Matrix $(\tilde{A},b')$ erhält, so dem $\tilde{A}$ Zeilenstufenform hat (letzte Spalte b' muss nicht mehr bearbeitet werden).

Man kann noch Spaltenvertauschung am $\tilde{A}$ vornehmen,

Beachte: Vertauschung von Spalte i und k bedeutet vertauschung von x_i und x_k (Buch führen). Dann kann Matrix (A',b') erhalten werden wobei

$$(A',b')=\begin{pmatrix}1&a'_{12}&\dots&\dots&\dots&a'_{1n}&b'_1\\0&1&a'_{23}&\dots&\dots&a'_{2n}&b'_2\\0&0&1&\dots&\dots&a'_{3n}&b'_3\\\vdots&\vdots&\vdots&\vdots&\vdots&\vdots&\vdots\\0&0&0&0&0&1&b'_m\end{pmatrix}$$

Neues LGS $A'x'=b'$

$x=\begin{pmatrix}x'_1\\\vdots\\x'_n\end{pmatrix}$ entsteht aus x. durch Permutation der Einträge entsprechend der durchgeführten Spaltenvertauschungen.

Lösungsmenge des LGS $A'x'=b'$ ist leicht zu ermitteln:

(1) Ist $r<m$ und einer der Einträge b'_r+a,b'_m ungleich 0 ist, so ist LGS nicht lösbar.

(2) Ist $r = m \begin{pmatrix} 1 & * & * & * & b'_1 \\ 0 & 1 & * & * & \vdots \\ 0 & 0 & 1 & * & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 1 & b'_m \end{pmatrix}$

oder $r < m$ und $b'_{r+1} = \ldots = b'_m = 0$

$\begin{pmatrix} 1 & * & * & * & b'_1 \\ 0 & 1 & * & * & \vdots \\ 0 & 0 & 1 & * & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b'_m \end{pmatrix}$

(betrachte dann nur die ersten r Gleichungen),so gibt es mindestens eine Lösung:

(2a) $r < n$:

Wähle $x_{r+1}, \ldots, x'_n$ beliebig uas K. Dann:

$x'_r = b'_r - \sum\limits_{j=r+1}^{n} a'_{rj} x'_j$

$\vdots$

$x'_1 = b'_1 - \sum\limits_{j=2}^{n} a'_{1j} x'_j$

(rekursive Bestimmung der Lösungsmenge).

(2b) $r = n$

$\begin{pmatrix} 1 & * & \cdots & \cdots & * & \vdots \\ 0 & 1 & \cdots & \cdots & * & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$

Dann sind $x'_1, \ldots, x'_r$ eindeutig bestimmt.

$$\begin{aligned} x'_n &= b'_n \\ x'_{n-1} &= b'_{n-1} - a_{n-1} x'_n \\ \vdots &= \vdots \\ x'_1 &= b'_1 - \sum_{j=2}^{n} a'_{ij} \cdot x'_j \end{aligned}$$

9.13 Beispiel

a)
$$\begin{array}{llll} x_1 & +2x_2 & -3x_3 & =5 \\ 2x_1 & -x_2 & +4x_3 & =0 \\ x_1 & +x_2 & +2x_3 & =1 \end{array}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & -3 & 5 \\ 2 & -1 & 4 & 0 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \end{pmatrix} \xrightarrow[\substack{2Z.+(-2)\cdot 1.Z \\ 3Z.+(-1)\cdot 1.Z}]{} \begin{pmatrix} 1 & 2 & -3 & 5 \\ 0 & -5 & 10 & -10 \\ 0 & -1 & 5 & -4 \end{pmatrix} \xrightarrow[-\frac{1}{5}\cdot 2.Z]{} \begin{pmatrix} 1 & 2 & -3 & 5 \\ 0 & 1 & -2 & 2 \\ 0 & -1 & 5 & -4 \end{pmatrix}$$

$$\xrightarrow[3.Z+2.Z]{} \begin{pmatrix} 1 & 2 & -3 & 5 \\ 0 & 1 & -2 & 2 \\ 0 & 0 & 3 & -2 \end{pmatrix} \xrightarrow[\frac{1}{3}\cdot 3.Z]{} \begin{pmatrix} 1 & 2 & -3 & 5 \\ 0 & 1 & -2 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & -\frac{2}{3} \end{pmatrix}$$

$x_3 = -\frac{2}{3}$

$x_2 = 2 + 2x_3 = 2 - \frac{4}{3} = \frac{2}{3}$

$x_1 = 5 - \frac{4}{3} - 2 = \frac{5}{3}$ eindeutige Lösung: Lösungsmenge $\mathbb{L} = \left\{ \begin{pmatrix} -\frac{2}{3} \\ \frac{2}{3} \\ \frac{5}{3} \end{pmatrix} \right\}$

b)
$$\begin{array}{lllll} x_1 & +2x_2 & x_3 & +x_4 & =0 \\ x_1 & -x_2 & +2x_3 & -x_4 & =6 \end{array}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & +2 & 1 & +1 & 0 \\ 1 & -1 & +2 & -1 & 6 \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} 1 & +2 & 1 & +1 & 0 \\ 0 & 1 & -\frac{1}{3} & +\frac{2}{3} & -2 \end{pmatrix}$$

(Fall 2a)

x_4, x_3 frei wählbar

$$\begin{aligned} x_2 &= -2 + \tfrac{1}{3}x_3 - \tfrac{2}{3}x_4 \\ x_1 &= -2x_2 - x_3 - x_4 \\ &= -2\cdot\left(-2 + \tfrac{1}{3}x_3 - \tfrac{2}{3}x_4\right) - x_3 - x_4 \\ &= 4 - \tfrac{5}{3} + \tfrac{1}{3}x_4 \end{aligned}$$

$$\mathbb{L} = \left\{ \begin{pmatrix} 4 - \frac{5}{3}x_3 + \frac{1}{3}x_4 \\ -2 + \frac{1}{3}x_3 - \frac{2}{3}x_4 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} : x_3, x_4 \in K \right\}$$

c) $\begin{matrix} x_1 & +x_2 & = 1 \\ 2x_1 & +x_2 & = 2 \\ x_1 & -x_2 & = -1 \end{matrix}$

$$\begin{pmatrix} 1 & +1 & 1 \\ 2 & 1 & 2 \\ 1 & -1 & -1 \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} 1 & +1 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & -2 & -2 \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} 1 & +1 & 1 \\ 0 & - & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix}$$

LGS nicht lösbar (Fall 1)

d) $\begin{matrix} x_1 & +x_2 & = 1 \\ 2x_1 & +x_2 & = 2 \\ x_1 & -x_2 & = 1 \end{matrix}$

$$\begin{pmatrix} 1 & +1 & 1 \\ 2 & 1 & 2 \\ 1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} 1 & +1 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & -2 & -0 \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} 1 & +1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -0 \end{pmatrix}$$

LGS eindeutig lösbar

$x_2 = 0$

$x_1 = 1 - x_2 = 1$

$\mathbb{L} = \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right\}$ (Fall 2b)

e) $\begin{matrix} x_1 & -x_2 & +x_3 & = 1 \\ -2x_1 & +2x_2 & -2x_3 & = 3 \end{matrix}$

$$\begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 & = 1 \\ -2 & 2 & -2 & = 3 \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 & = 1 \\ 0 & 0 & 0 & = 5 \end{pmatrix}$$

LGS ist nicht lösbar

f) $\begin{matrix} x_1 & +x_2 & +x_3 & = 0 \\ x_1 & +x_2 & -2x_3 & = 1 \end{matrix}$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & -2 & 1 \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -3 & 1 \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -\frac{1}{3} \end{pmatrix} \text{ Vert. 2./3.Sp.}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{1}{3} \end{pmatrix}$$

$x'3$ frei wählbar

$x'_2 = -\frac{1}{3} - 0 \cdot x'_3 = -\frac{1}{3}$

$x'_1 = 9 - x'_2 - x'_3 = \frac{1}{3} - x'_3$

x_2 frei wählbar
$x_3 = -\frac{1}{3}$
$x_1 = \frac{1}{3} - x_2$
$\mathbb{L} = \left\{ \begin{pmatrix} \frac{1}{3} - x_2 \\ x_2 \\ -\frac{1}{3} \end{pmatrix} : x_2 \in K \right\}$

g) LGS über $\mathbb{C}$

$$\begin{array}{lll} (1+i)x_1 & +2x_2 & = 3-i \\ ix_1 & +(-2+2i)x_2 & = 4 \end{array}$$

$$\begin{pmatrix} (1+i) & 2 & 3-i \\ i & (-2+2i) & 4 \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} 1 & 1-i & 1-2i \\ i & (-2+2i) & 4 \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} 1 & 1-i & 1-2i \\ 0 & -3+i & 2-i \end{pmatrix}$$

$$\longrightarrow \begin{pmatrix} 1 & 1-i & 1-2i \\ 0 & 1 & -\frac{7}{10} + \frac{1}{10}i \end{pmatrix}$$

$x_2 = -\frac{7}{10} + \frac{1}{10}i$
$x_1 = 1 - 2i - (1-i)x_2 = \frac{8}{5} - \frac{14}{5}i$
$\mathbb{L} = \left\{ \begin{pmatrix} \frac{8}{5} - \frac{14}{5}i \\ -\frac{7}{10} + \frac{1}{10}i \end{pmatrix} \right\}$

Nicht mehr Klausurrelevant

10 Der Vektorraum $\mathbb{R}^+$ (Nicht mehr Klausurrelevant)

$n \in \mathbb{N} \quad \mathbb{R}^n = \left\{ \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} : a_1 \in \mathbb{R} \right\}$

Spaltenvektoren der Länge n : $\begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} = (a_1, \dots, a_n)^t$

$a_1, \dots, a_n$ *Komponente* der Spaltenvektoren.
Wie bei Matrizen:

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 + b_1 \\ \vdots \\ a_n + b_n \end{pmatrix}$$

(Multiplikation entspricht der Matrixmultiplikation und ist nicht möglich falls $n > 1$)

Multiplikation eines Spaltenvektors mit einer Zahl (*Skalar*)

$$a \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} aa_1 \\ \vdots \\ aa_n \end{pmatrix}$$

Addition+Abbildung : $\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^n$
$\mathbb{R}^n$ mit Addition und Multiplikation mit Skalaren : $\mathbb{R}$-*Vektorraum*
Die Vektoren im $\mathbb{R}^1 (= \mathbb{R}), \mathbb{R}^2$ und $\mathbb{R}^3$ entsprechen Punkten auf der Zahlengerade, Ebene, dreidimensionalen Raums. Punkte des $\mathbb{R}^2, \mathbb{R}^3$ lassen sich identifizieren mit, *Ortsvektoren* Pfeile mit Beginn in 0 (Komp = 0) und Ende im entsprechenden Punkt
Addition von Spaltenvektoren entspricht der Addition von Ortsvektoren entsprechend der Parallelogrammregel. Multiplikation mit Skalaren a :
Streckung (falls $|a| > 1$)
Stauchung (falls $0 \geq |a| \geq 1$)
Richtungspunkt, falls $a < 0$ TODO: Steckung und Stauchung

Abbildung 53: Ein Vektor dargestellt durch seinen Ortsvektor

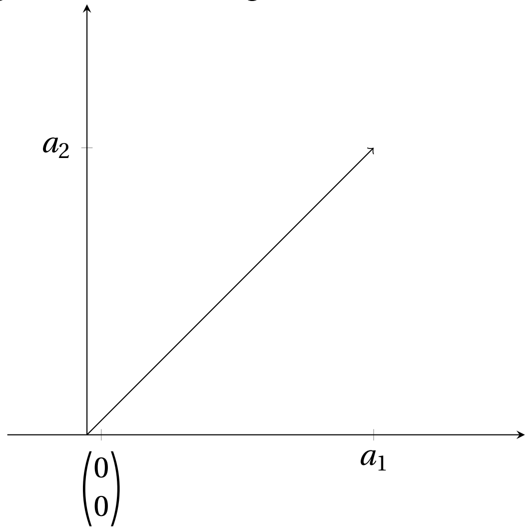
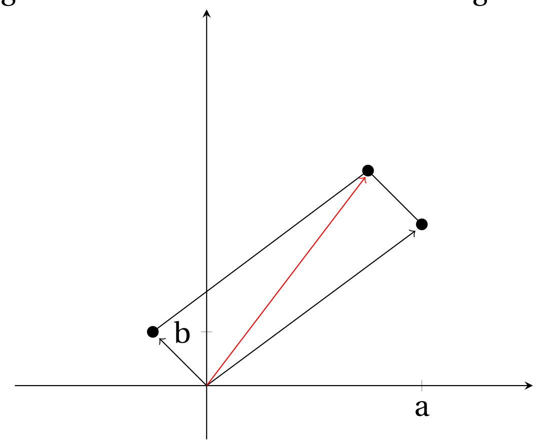


Abbildung 54: Vektoraddition durch Parallelogrammbildung



10.1 Satz (Rechenregeln in $\mathbb{R}^n$)

Seien $u, v, w \in \mathbb{R}^n, a, b \in \mathbb{R}$ Dann gilt:

a)

(1.1)	$u+(v+w)=(u+v)+w$	
(1.2)	$v+0=0+v=v$, wobei 0 *Nullvektor*	
(1.3)	$v+-v=0$	$\mathbb{R}^n$ kommutative
(1.4)	$u+v=v+u$	Gruppe
(2.1)	$(a+b)v=av+bv$	
(2.2)	$a(u+v)=au+av$	
(2.3)	$(a\cdot b)v=a(bv)$	
(2.4)	$1v=v$	

b) $0\cdot v=0$ und $a\cdot 0=0$
Beweis folgt aus entsprechenden Rechenregeln in 0

10.2 Definition

Eine nicht-leere Teilmenge $\mathscr{U}\supset\mathbb{R}^n$ heißt *Unterraum* (oder *Teilraum* von $\mathbb{R}^n$), falls gilt:

(1) $\forall u_1, u_2\in\mathscr{U}: u_1+u_2\in\mathscr{U}$ (Abgeschlossenheit bezüglich +)

(2) $\forall u\in\mathscr{U}\,\forall a\in\mathbb{R}: au\in\mathscr{U}$ (Abgeschlossenheit bezüglich Mult. mit Skalaren)

$\mathscr{U}$ enthält Nullvektor {0} Unterraum von $\mathbb{R}^n$ (Nullraum)
$\mathbb{R}^n$ ist Unterraum von $\mathbb{R}$

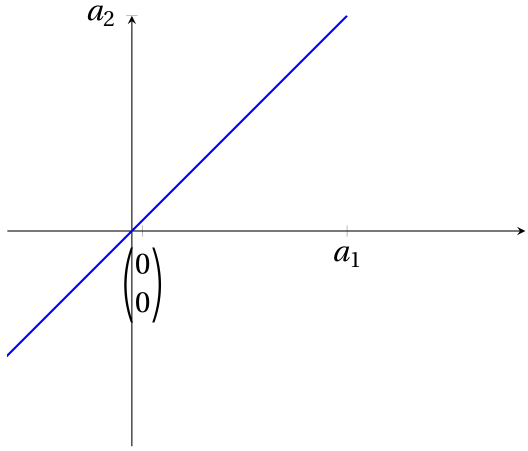
10.3 Beispiele

a) $0\neq v\in\mathbb{R}^2$ $\quad G=\{av: a\in\mathbb{R}\}$ ist Unterraum von $\mathbb{R}^n G$ $\quad$ $(a_1v, a_2v\in G, (a_1+a_2)v\in$ 2.1 in 10.2 $av\in G, b\in\mathbb{R}(ba)v\in G)$

G = Ursprungsgerade durch $\begin{pmatrix}0\\0\end{pmatrix}$ und v = $\begin{pmatrix}a_1\\a_2\end{pmatrix}$ $n=2$:

b) $v,w\in\mathbb{R}^n$
$E=\{av+bw: a,b\in\mathbb{R}\}$ ist Unterraum von $\mathbb{R}^n$

Abbildung 55: Gerade dargestellt durch Vektoren



$v = o, w = o:\ E = \{o\}$

$v \neq o \quad w \notin \{av:\ a \in \mathbb{R}\}$

$E = \mathbb{R}^2$ $n = 3:$ Ebene durch $\begin{pmatrix}0\\0\\0\end{pmatrix}$ und durch v, w

Ist $w \in \{av : a \in \mathbb{R}\}$, so ist $E = G$ (aus a))

c) $v, w \neq o$

$G' = \{w + av : a \in \mathbb{R}\}$

$[v \in G' \Leftrightarrow \exists a \in \mathbb{R} : w + av \in o \Leftrightarrow \exists a \in \mathbb{R} :\ w = (-a)v \in G]$

10.4 Satz

Seien $\mathcal{U}_1, \mathcal{U}_2$ Unterräume von $\mathbb{R}^n$

a) $\mathcal{U}_1 \cap \mathcal{U}_2$ ist Unterraum von $\mathbb{R}^n$

b) $\mathcal{U}_1 \cup \mathcal{U}_2$ ist im Allgemeinen KEIN Unterraum von $\mathbb{R}^n$

c) $\mathcal{U}_1 + \mathcal{U}_2 := \{u_1 + u_2 : u_1 : \mathcal{U}_1, u_2 : \mathcal{U}_2\}$ (Summe von $\mathcal{U}_1$ und $\mathcal{U}_2$) ist Unterraum von $\mathbb{R}^n$.

d) $\mathcal{U}_1 \subseteq \mathcal{U}_1 + \mathcal{U}_2 \quad \mathcal{U}_2 \subseteq \mathcal{U}_1 + \mathcal{U}_2$ und $\mathcal{U}_1 + \mathcal{U}_2$ ist der kleinste Unterraum von $\mathbb{R}^n$, der $\mathcal{U}_1$ und $\mathcal{U}_2$ enthält. (d.h ist w Unterraum von $\mathbb{R}^n$ mit $\mathcal{U}_1, \mathcal{U}_2 \in w$, so $\mathcal{U}_1 + \mathcal{U}_2 \subseteq W$)

Beweis. a) ✓
b) TODO
c) TODO □

10.5 Beispiel

a) **??**b) $G_1 = \{av : a \in \mathbb{R}\}$
$G_2 = \{aw : a\}$
$G_1 + G_2 = E$

b) $\mathbb{R}^3$

$$E_1 = \left\{ r \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} : r, s \in \mathbb{R} \right\}$$

$$= \left\{ \begin{pmatrix} r \\ 0 \\ s \end{pmatrix} : r, s \in \mathbb{R} \right\}$$

$$E_2 = \left\{ t \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + u \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$$

$$= \left\{ \begin{pmatrix} u \\ t+u \\ u \end{pmatrix} \right\}$$

$E_1 + E_2$ Unterräume von $\mathbb{R}^3$ (10.3.b)
$E_1 \cap E_2 =?$

$$v \in E_1 \cap E_2 \Leftrightarrow v = \begin{pmatrix} r \\ 0 \\ s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u \\ t+u \\ u \end{pmatrix} \Leftrightarrow r = u, t+u = 0, s = u$$

$$E_1 \cap E_2 = \left\{ \begin{pmatrix} u \\ 0 \\ u \end{pmatrix} : u \in \mathbb{R} \right\}$$

$$= \left\{ u \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} : u \in \mathbb{R} \right\}$$

$E_1 + E_2 = ?$
$E_1 + E_2 = \mathbb{R}^3$, denn :
Es gilt sogar:
$\mathbb{R}^3 = E_1 + G_2$, wobei

$$G_2 = \left\{ t \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} : t \in \mathbb{R} \right\} \subseteq E_@$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = x \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} z \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + y \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ 0 \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ y \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = (x-y) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + (z-y) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + y \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} x-y \\ 0 \\ z-y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} y \\ y \\ y \end{pmatrix}$$

10.6 Definition

a) $v_1, \ldots, v_m \in \mathbb{R}^n, a_1, \ldots a_m \in \mathbb{R}$
Dann heißt $a_1 v_1 + \ldots + a_m v_m = \sum_{i=1}^m a_i v_i$
Linearkombination von $v_1, \ldots, v_m$ (mit Koeffizienten $a_1, \ldots, a_m$).
[Zwei formal verschiedene Linearkombinationen der gleichen $v_1, \ldots, v_m$ können den gleichen Vektor darstellen
$1 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + 2 \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} + 3 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = 2 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + 3 \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} + 2 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 \\ 5 \end{pmatrix}$]

b) Ist $M \subseteq R^n$, so ist der von M *erzeugte* (oder *aufgespannte*) Unterraum $\langle M \rangle_{\mathbb{R}}$ (oder $\langle M \rangle$) die Menge aller (endlichen) Linearkombinationen, die man mit Vektoren aus M bilden kann.
$\langle M \rangle_{\mathbb{R}} = \left\{ \sum\limits_{i=1}^{n} a_i v_i : n \in \mathbb{N}, a_i \in \mathbb{R}, v_i \in M \right\}$ falls $M \neq \emptyset$
$\langle \emptyset \rangle_{\mathbb{R}} := \{\emptyset\}$
$M = \{v_1, \ldots v_m\}$, so TODO...

10.7 Beispiel

a) $e_i = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n$

$\langle e_1, \dots e_n \rangle = \mathbb{R}^n$

$\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = x_1 e_1 + x_2 e_2 + \ldots + x_n e_n$

b) $\mathcal{U} = \langle \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix} \rangle_{\mathbb{R}}$

Ist $\mathcal{U} = \mathbb{R}^3$?

Für welche $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3$ gibt es geeignete Skalare $a, b, c \in \mathbb{R}$ mit $a \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} + b \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} + c \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix}$?

$$\begin{array}{cccc} a & +3b & +2c & = x \\ 2a & +2b & +3c & = y \\ 3a & +b & +4c & = z \end{array}$$

LGS für die Unbekannten a, b, c mit variabler rechter Seite : Gauß

$$\begin{pmatrix} 1 & 3 & 2 & x \\ 2 & 2 & 3 & y \\ 3 & 1 & 4 & z \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 3 & 2 & x \\ 2 & -4 & -1 & y-2x \\ 0 & -8 & -2 & z-3x \end{pmatrix}$$

$$\rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 3 & 2 & x \\ 0 & 1 & \frac{1}{4} & \frac{2x-y}{4} \\ 0 & 0 & 0 & x-2y+z \end{pmatrix}$$

LGS ist lösbar $\Leftrightarrow x - 2y + z = 0$.

Dass heißt $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \in \mathcal{U} \Leftrightarrow x - 2y = z = 0$

$$\mathcal{U} = \left\{ \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} : x - 2y + z = 0, x, y, z \in \mathbb{R} \right\}$$

$$= \left\{ \begin{pmatrix} x \\ y \\ -x + 2y \end{pmatrix} : x, y \in \mathbb{R} \right\}$$

$$\begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix} \in \mathcal{U}$$

Lösungen des LGS: c frei wählen, b, a ergeben sich, (falls $x - 2y + z = 0$) z.B $c = 0, b = \frac{1}{2}x - \frac{1}{4}y, a = x - 3b = -\frac{1}{2}x + \frac{3}{4}y$
Ist $x - 2y + z = 0$, so ist

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = (-\tfrac{1}{2}x + \tfrac{3}{4}y) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + (\tfrac{1}{2}x - \tfrac{1}{4}y) \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix} \tfrac{5}{4} \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} + \tfrac{1}{4} \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\mathcal{U} = \left\langle \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} \right\rangle_{\mathbb{R}}$$

$$\begin{array}{llll} 6x^2 & -3xy & \cancel{+y^3} & = 5 \\ \cancel{7x^3} & \cancel{+3x^2y^2} & -xy & = 7 \end{array}$$

Literatur

[1] Kreußler, Phister Satz 33.16

[2] WHK 5.37

[3] WHK 6.21

[4] WHK 6.24

[5] WHK 6.25

[6] WHK 6.25

[7] WHK 7.32

[8] WHK 7.19