

Mathematik I für Naturwissenschaftler*

Stefan Keppeler Universität Tübingen, Mathematisches Institut
 Auf der Morgenstelle 10
 72076 Tübingen, Germany

Büro: C6P43
 Email-Adresse: stefan.keppeler@uni-tuebingen.de

Inhaltsverzeichnis

1	Prolog: $e^{i\pi} = -1$	3
1.1	π	3
1.2	e	3
1.3	i	4
1.4	Bemerkungen zur Notation	6
2	Vollständige Induktion	7
2.1	Geometrische Summe	7
2.2	Kleiner Gauß	8
2.3	Prinzip der vollständigen Induktion	9
3	Binomische Formel	11
4	Funktionen einer reellen Variablen	15
4.1	Folngrenzwerzte	16
4.2	Funktionsgrenzwerte	17
4.3	Stetigkeit	19
4.4	Asymptoten	21
4.5	Differentiation	22
	4.5.1 Alternative Definition mit Klein-o	25
4.6	Die Exponentialfunktion	27
4.7	Umkehrfunktionen	31

*Dies ist **kein** Vorlesungs-Skript sondern das Vorbereitungsmaterial des Dozenten. Es kann daher höchstens als ausführliche Formelsammlung betrachtet werden. Die Ausgabe an die Studierenden erfolgt auf deren ausdrücklichen Wunsch. Ich weise darauf hin, dass es nicht möglich ist, den Stoff aus diesem Text ohne Besuch der Vorlesung zu lernen – ob der Text zum Nachbereiten der Vorlesung geeignet ist, mögen die Studierenden selbst entscheiden. Für ein ernsthaftes Selbststudium ist in jedem Fall ein gutes Lehrbuch notwendig, wie z.B. K. Meyberg & P. Vachenauer *Höhere Mathematik 1 & 2*, Springer-Verlag.

Ich danke Herrn Hans-Michael Stiepan für die sorgfältige Durchsicht einer früheren Version dieser Notizen. Für Hinweise auf (sicherlich vorhandene) Fehler jeglicher Art sowie für sonstige Anregungen bin ich dankbar.

Stefan Keppeler

4.8	Der Logarithmus	34
4.9	Weitere elementare Funktionen	35
4.10	Trigonometrische Funktionen	36
4.11	Potenzreihen	39
4.12	Kurvendiskussion	45
5	Vektorrechnung	50
5.1	Vektorräume	50
5.2	Lineare Unabhängigkeit	53
5.3	Lineare Gleichungssysteme und allgemeiner Gauß-Algorithmus	57
5.4	Unterräume, Dimension und Basis	59
5.5	Skalarprodukt und Norm	61
5.6	Kreuzprodukt und Spatprodukt im \mathbb{R}^3	67
5.7	Geraden und Ebenen	69
5.8	Kurven und Spezielle Koordinatensysteme	71
6	Matrizen und Determinanten	74
6.1	Matrizen	74
6.2	Determinanten	79
7	Komplexe Zahlen	83
7.1	Komplexe e-Funktion	84
7.2	\mathbb{C}^n , $\mathbb{C}^{m \times n}$ und Verwandtes	87
8	Integration	89
8.1	Riemannsches Zwischensummen	91
8.2	Integrationstechniken	95
8.2.1	Partialbruchzerlegung	98

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

In diesem Vorspann werden wir – zunächst noch nicht mit der mathematischen Strenge, die wir uns später zu eigen machen wollen – den Beweis der Gleichung $e^{i\pi} = -1$ skizzieren. In der ZEIT vom 6. Juni 2007 (www.zeit.de/2007/24/N-Eulersche-Zahl) wurde diese Gleichung, umgestellt zu $e^{i\pi} + 1 = 0$, zur *schönsten mathematischen Gleichung schlechthin* gekürt.

1.1 π

Definiert am Kreis durch

$$\pi := \frac{\text{Umfang}}{\text{Durchmesser}} \approx 3,141\dots \quad (1.1)$$

damit auch

$$\pi = \text{Halber Umfang Einheitskreises (EK)},$$

und als Winkel $\pi \hat{=} 180^\circ$.

1.2 e

Wir verzinsen ein Guthaben, sagen wir 100 €, jährlich mit einem Zinssatz z , z.B. $z = 2,5\% = 0,025$.

Das Vermögen nach einem Jahr erhalten wir durch Multiplikation mit dem Faktor $1 + z$, z.B. $100 \text{ €} \cdot 1,025 = 102,50 \text{ €}$.

Bei halbjährlicher Verzinsung mit Zinssatz $\frac{z}{2}$ ist Faktor nach einem Jahr

$$\left(1 + \frac{z}{2}\right) \left(1 + \frac{z}{2}\right) = \left(1 + \frac{z}{2}\right)^2 = 1 + z + \left(\frac{z}{2}\right)^2 > 1 + z, \quad (1.2)$$

also attraktiver, wegen des Zinseszins'.

Analog:

- Monatliche Verzinsung mit Zinssatz $\frac{z}{12}$, Faktor: $\left(1 + \frac{z}{12}\right)^{12}$
- Tägliche Verzinsung mit Zinssatz $\frac{z}{365}$, Faktor: $\left(1 + \frac{z}{365}\right)^{365}$
- ... wird immer mehr. Wie groß maximal?

Stetige Verzinsung: Kapital wächst innerhalb eines Jahres um den Faktor

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{z}{n}\right)^n \quad (1.3)$$

Man zeigt (haben Sie in bereits der Schule gesehen, analysieren wir aber auch später nochmals genau)

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{z}{n}\right)^n = \exp(z) = e^z \quad \text{und insbesondere} \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = e \approx 2,718\dots \quad (1.4)$$

1.3 i

Man definiert: $i := \sqrt{-1}$.

Behauptung: $(2,718\dots)^{3,141\dots\sqrt{-1}} = -1$

1. Wie rechnet man mit i?

- Bilde Zahlen $x + iy$ mit $x, y \in \mathbb{R}$,
- schlepe i überall mit,
- und ersetze i^2 durch -1 ,

z.B. Multiplikation: $(1 + 2i) \cdot (3 - i) = 3 - i + 6i - 2i^2 = 5 + 5i$.

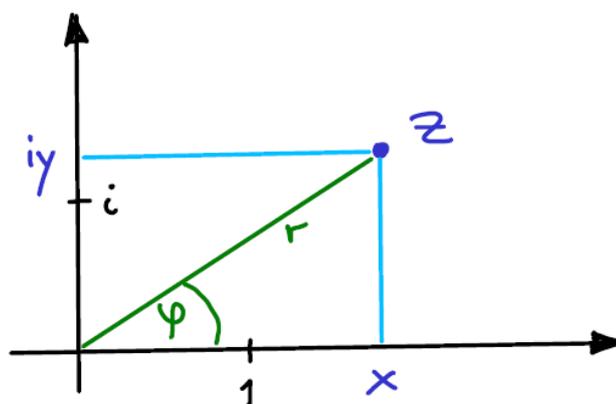
2. Was bedeutet das anschaulich?

Betrachte $z = x + iy$ als Punkt in der (komplexen) Ebene.
In Polardarstellung:²

$$\begin{aligned} r &:= \sqrt{x^2 + y^2} \quad (\text{Abstand zum Ursprung}) \\ \varphi &:= \sphericalangle \text{ zur } x\text{-Achse} \end{aligned} \quad (1.5)$$

und umgekehrt

$$\begin{aligned} x &= r \cos \varphi \\ y &= r \sin \varphi \end{aligned} \quad (1.6)$$



Nochmal Multiplikation,

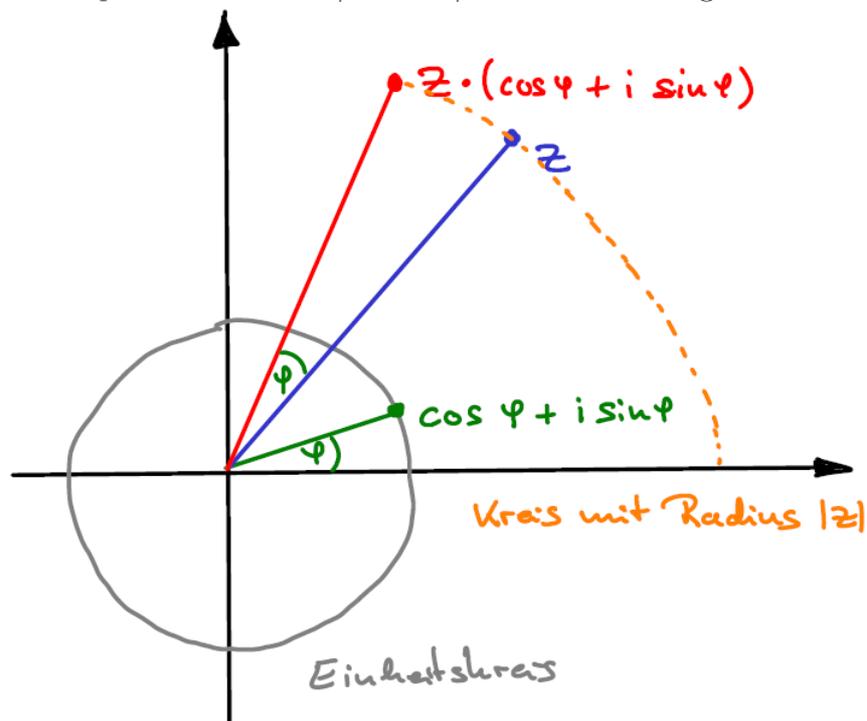
$$\begin{aligned} z_1 \cdot z_2 &= r_1(\cos \varphi_1 + i \sin \varphi_1) \cdot r_2(\cos \varphi_2 + i \sin \varphi_2) \\ &= r_1 r_2 (\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 - \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + i(\cos \varphi_1 \sin \varphi_2 + \sin \varphi_1 \cos \varphi_2)), \end{aligned} \quad (1.7)$$

mit Additionsthereomen (Trigonometrie, bekannt aus der Schule, kommt aber auch nochmal später),

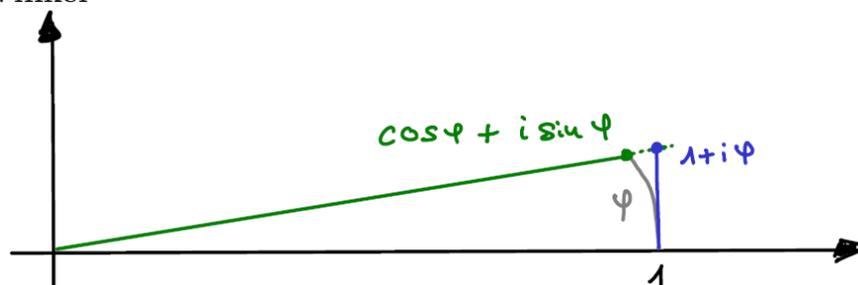
$$z_1 \cdot z_2 = r_1 r_2 (\cos(\varphi_1 + \varphi_2) + i \sin(\varphi_1 + \varphi_2)). \quad (1.8)$$

²Man nennt r den Betrag und φ das Argument von z und schreibt dafür: $r = |z|$ und $\varphi = \arg(z)$.

Speziell $r = 1$: Multiplikation mit $\cos \varphi + i \sin \varphi$ bewirkt Drehung um Winkel φ .



3. Kleine Winkel



$$\cos \varphi + i \sin \varphi \approx 1 + i\varphi \quad \text{für kleine } \varphi \text{ (siehe Skizze)} \quad (1.9)$$

Je kleiner φ , desto besser ist diese Näherung.

4. Setze endliche Drehung zusammen

$$\cos \varphi + i \sin \varphi = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\underbrace{\cos \frac{\varphi}{n} + i \sin \frac{\varphi}{n}}_{\approx 1 + i \frac{\varphi}{n}, \text{ wenn } n \text{ groß}} \right)^n = \lim_{(*)} \left(1 + \frac{i\varphi}{n} \right)^n = e^{i\varphi} \quad (1.10)$$

(*) Hier sind eine Näherung und ein Limes involviert, d.h. man muss genauer untersuchen, ob es erlaubt war, in der Klammer die Näherung zu verwenden. Dazu muss man zunächst den bei der Näherung gemachten Fehler abschätzen – das wird später ein wichtiges Thema.

Mit $\varphi = \pi$ ($\cos \pi = -1$, $\sin \pi = 0$) folgt die Behauptung. ☺

1.4 Bemerkungen zur Notation

Zahlenmengen

- \mathbb{N} die natürlichen Zahlen $\{1, 2, 3, \dots\}$,
- $\mathbb{N}_0 = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ die natürlichen Zahlen inkl. der Null,
- $\mathbb{Z} = \{\dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots\}$ die ganzen Zahlen,
- $\mathbb{Q} = \{\frac{p}{q} \mid p, q \in \mathbb{Z}, q \neq 0\}$ die rationalen Zahlen – Brüche bzw. Zahlen mit endlicher oder periodischer Dezimalbruchentwicklung,
- \mathbb{R} die reellen Zahlen – enthalten zusätzlich zu \mathbb{Q} Zahlen wie $\sqrt{2} \approx 1,414\dots$, $\pi \approx 3,141\dots$ oder $e \approx 2,718\dots$, die nicht als Bruch geschrieben werden können.
- \mathbb{C} die komplexen Zahlen, sind von der Form $\mathbb{C} \ni z = x + iy$ mit $x, y \in \mathbb{R}$.

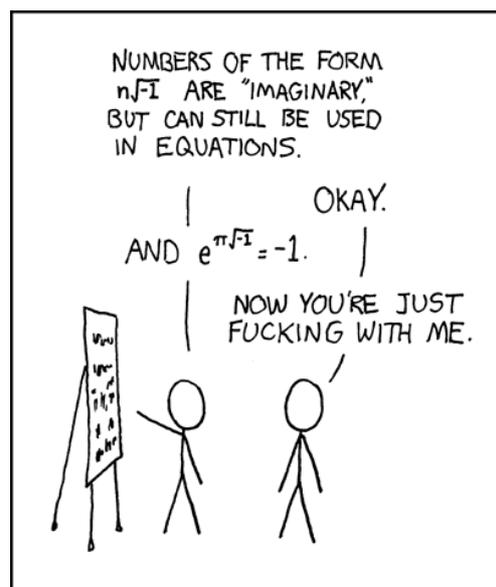
Bemerkung: $\mathbb{N} \subset \mathbb{N}_0 \subset \mathbb{Z} \subset \mathbb{Q} \subset \mathbb{R} \subset \mathbb{C}$

Griechische Buchstaben

A	α	Alpha
B	β	Beta
Γ	γ	Gamma
Δ	δ	Delta
E	ϵ, ε	Epsilon
Z	ζ	Zeta
H	η	Eta
Θ	θ, ϑ	Theta

I	ι	Iota
K	κ, \varkappa	Kappa
Λ	λ	Lambda
M	μ	My
N	ν	Ny
Ξ	ξ	Xi
O	o	Omikron
Π	π	Pi

P	ρ, ϱ	Rho
Σ	σ	Sigma
T	τ	Tau
Υ	υ	Ypsilon
Φ	ϕ, φ	Phi
X	χ	Chi
Ψ	ψ	Psi
Ω	ω	Omega



<http://xkcd.com/179/>

2 Vollständige Induktion

2.1 Geometrische Summe

$$s_n := 1 + x + x^2 + \dots + x^n \quad (x \in \mathbb{R}) \quad (2.1)$$

$$= \sum_{k=0}^n x^k \quad (x^0 = 1) \quad (2.2)$$

Behauptung: ($n \in \mathbb{N}_0$)

$$s_n = \begin{cases} \frac{x^{n+1} - 1}{x - 1} & , \quad x \neq 1 \\ n + 1 & , \quad x = 1 \end{cases} \quad (2.3)$$

1. Beweis: (durch Induktion)

(i) Induktionsanfang: $n = 0$

$$s_0 = \sum_{k=0}^0 x^0 = 1 \quad (\text{wie in Definition}) \quad (2.4)$$

$$= \begin{cases} \frac{x^{0+1} - 1}{x - 1} = 1 & , \quad x \neq 1 \\ 0 + 1 = 1 & , \quad x = 1 \end{cases} \quad (\text{wie in Behauptung}) \quad (2.5)$$

(ii) Induktionsschritt / $n \rightarrow n + 1$:

Behauptung sei für (ein festens) n bewiesen;

zu zeigen: Behauptung gilt auch für $n + 1$

$$\begin{aligned} s_{n+1} &= 1 + x + \dots + x^n + x^{n+1} \\ &= s_n + x^{n+1} \\ &\stackrel{\text{i.V.}}{=} \begin{cases} \frac{x^{n+1} - 1}{x - 1} + x^{n+1} & , \quad x \neq 1 \\ n + 1 + 1 & , \quad x = 1 \end{cases} \\ &= \begin{cases} \frac{x^{n+2} - 1}{x - 1} & , \quad x \neq 1 \\ n + 2 & , \quad x = 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (2.6)$$

□

2. Beweis: (konstruktiv)

für $x = 1$: $s_n = \sum_{k=0}^n 1 = n + 1$

für $x \neq 1$:

$$s_n = 1 + x + \dots + x^n \quad | \cdot x \quad (2.7)$$

$$x s_n = x + x^2 + \dots + x^{n+1} \quad (2.8)$$

subtrahiere erste Zeile von der zweiten

$$s_n(x - 1) = x^{n+1} - 1 \quad \Leftrightarrow_{x \neq 1} \frac{x^{n+1} - 1}{x - 1} \quad (2.9)$$

Nochmal mit Summenzeichen:

□

$$\begin{aligned} (x - 1)s_n &= x s_n - s_n = x \sum_{\nu=0}^n x^\nu - \sum_{\nu=0}^n x^\nu = \sum_{\nu=0}^n x^{\nu+1} - \sum_{\nu=0}^n x^\nu = \sum_{\nu=1}^{n+1} x^\nu - \sum_{\nu=0}^n x^\nu \\ &= x^{n+1} + \sum_{\nu=1}^n x^\nu - \left(x^0 + \sum_{\nu=1}^n x^\nu \right) = x^{n+1} - 1 \end{aligned} \quad (2.10)$$

2.2 Kleiner Gauß

Summe der ersten n ganzen Zahlen

$$\begin{aligned} s_n &:= 1 + 2 + \dots + n \\ &= \sum_{k=1}^n k \quad \left(= \sum_{k=0}^n k \right) \end{aligned} \quad (2.11)$$

Behauptung:

$$s_n = \frac{n(n+1)}{2} \quad (2.12)$$

1. Beweis: (konstruktiv)

$$\begin{array}{r} s_n = 1 + 2 + \dots + n \\ s_n = n + (n-1) + \dots + 1 \\ \hline 2s_n = n(n+1) \end{array} \quad (2.13)$$

$$\Rightarrow s_n = \frac{n(n+1)}{2}$$

□

2. Beweis: (durch vollständige Induktion)

(i) Induktionsanfang: $n = 1$

$$s_1 = \sum_{k=1}^1 k = 1 \quad (\text{Definition}) \quad (2.14)$$

$$= \frac{1 \cdot 2}{2} = 1 \quad (\text{Behauptung}) \quad (2.15)$$

(ii) $n \rightarrow n + 1$:

$$s_{n+1} = s_n + (n + 1) = \frac{n(n + 1)}{2} + (n + 1) = \frac{(n + 2)(n + 1)}{2} \quad (2.16)$$

□

2.3 Prinzip der vollständigen Induktion

Sei $A(n)$ eine Aussage für ganze Zahlen ($n \in \mathbb{Z}$).

Gilt:

(i) $A(n_0)$ ist wahr, für ein $n_0 \in \mathbb{Z}$ (Induktionsanfang), und

(ii) aus $A(n)$ wahr folgt $A(n + 1)$ wahr $\forall n \geq n_0$

so folgt: $A(n)$ ist wahr $\forall n \geq n_0$.

Vorsicht: Nie den Induktionsanfang vergessen!

Sonst lassen sich viele falsche Dinge beweisen, z.B.

Behauptung (falsch!): $x^n < \frac{1}{2} \forall 0 < x < 1$

$n \rightarrow n + 1$:

$$x^{n+1} = x \cdot x^n \underset{\text{I.V.}}{<} x \cdot \frac{1}{2} \underset{0 < x < 1}{<} \frac{1}{2} \quad (2.17)$$

Aber wir haben keinen Induktionsanfang!

Beispiel: Für $n \geq 4$ gilt: $n^2 \leq 2^n$

Induktionsanfang, $n = 4$:

$$16 = 4^2 \leq 2^4 = 16 \quad (2.18)$$

$n \rightarrow n + 1$:

$$2^{n+1} = 2 \cdot 2^n \underset{\text{I.V.}}{\geq} 2n^2 = n^2 + n^2 \underset{n \geq 4}{\geq} n^2 + 4n = n^2 + 2n + 2n \geq n^2 + 2n + 1 = (n + 1)^2 \quad (2.19)$$

□

Notation: Summenzeichen

$a_n \in \mathbb{R}$ (oder $\in \mathbb{C}$)

$$\sum_{k=n}^m a_k := \begin{cases} a_n + a_{n+1} + \dots + a_m & , \quad m \geq n \\ 0 & , \quad m < n \end{cases} \quad (2.20)$$

Indexverschiebung:

$$\begin{aligned} \sum_{k=n}^m a_k &= \sum_{k=0}^{m-n} a_{k+n} \\ &= \sum_{l=n+1}^{m+1} a_{l-1} \end{aligned} \tag{2.21}$$

Merke: *Was man an den Grenzen abzieht, muss man am Index der Summanden addieren (und umgekehrt).*

Rechenregeln:

$$\sum_{k=0}^n a_k + \sum_{l=0}^n b_l = \sum_{k=0}^n (a_k + b_k) \tag{2.22}$$

$$c \sum_{k=0}^n a_k = \sum_{k=0}^n (ca_k) \tag{2.23}$$

$$\sum_{k=0}^n \left(\sum_{l=0}^m a_{kl} \right) = \sum_{l=0}^m \left(\sum_{k=0}^n a_{kl} \right) \quad \left(=: \sum_{k=0}^n \sum_{l=0}^m a_{kl} \right) \tag{2.24}$$

Was ist hier falsch?

Behauptung: Alle einfarbigen Pferde haben die gleiche Farbe.

Beweis durch vollständige Induktion:

Induktionsanfang:

Ein einfarbiges Pferd hat offensichtlich die gleiche Farbe (wie es selbst)

$n \rightarrow n + 1$:

Wir betrachten eine Menge von $n + 1$ Pferden. Nehmen wir ein Pferd weg, so verbleiben n Pferde. Nach Induktionsvoraussetzung haben diese alle die gleiche Farbe. Nun nehmen wir ein anderes Pferd weg und stellen das zuvor weggenommene wieder dazu. Wieder haben die verbliebenen n Pferde nach Induktionsvoraussetzung die gleiche Farbe. Den beiden jeweils weggenommenen Pferden bleibt nichts anderes übrig, als auch die gleiche Farbe zu haben.

□ (bzw. eben nicht!)

3 Binomische Formel

Ziel:

$$(a + b)^n = \sum_{\nu=0}^n c_{n\nu} a^\nu b^{n-\nu} \quad (3.1)$$

Hintergrund: Ausmultiplizieren

$$(a + b)^n = \underbrace{(a + b)(a + b) \cdots (a + b)}_{n \text{ mal}} \quad (3.2)$$

Was sind die Koeffizienten $c_{n\nu}$?

Definition: (Fakultät)

Für $n \in \mathbb{N}_0$ sei

$$n! := \begin{cases} 1 & , \quad n = 0 \\ 1 \cdot 2 \cdots n = \prod_{\nu=1}^n \nu & , \quad n \in \mathbb{N} \end{cases} \quad (3.3)$$

Notation: Produktzeichen

$$\prod_{\nu=n}^m a_\nu = \begin{cases} a_n \cdot a_{n+1} \cdots a_m & , \quad m \geq n \\ 1 & , \quad m < n \end{cases} \quad (3.4)$$

Definition: (Binomialkoeffizient)

Für $\alpha \in \mathbb{R}$ und $k \in \mathbb{N}$ sei

$$\binom{\alpha}{k} := \frac{\alpha(\alpha - 1) \cdots (\alpha - k + 1)}{k!} \quad \text{sowie} \quad \binom{\alpha}{0} := 1. \quad (3.5)$$

Mit Produktzeichen:

$$\binom{\alpha}{k} = \frac{1}{k!} \prod_{\nu=0}^{k-1} (\alpha - \nu). \quad (3.6)$$

Besonders wichtig für ganze Zahlen, also $n, k \in \mathbb{N}_0$,

$$\binom{n}{k} := \frac{n(n-1) \cdots (n-k+1)}{k!} \quad \text{sowie} \quad \binom{n}{0} := 1. \quad (3.7)$$

Eigenschaften: $n, k \in \mathbb{N}_0$

(i)

$$\binom{n}{n} = 1 = \binom{n}{0} \quad (3.8)$$

(ii)

$$\binom{n}{k} = 0, \quad \text{für } k > n \quad (3.9)$$

(iii)

$$\begin{aligned}\binom{n}{k} &= \frac{n(n-1)\cdots(n-k+1)}{k!} \cdot \frac{(n-k)(n-k-1)\cdots 1}{(n-k)(n-k-1)\cdots 1} \\ &= \frac{n!}{k!(n-k)!} \\ &= \binom{n}{n-k}\end{aligned}\tag{3.10}$$

(iv) Funktionalgleichung

$$\binom{n}{k-1} + \binom{n}{k} = \binom{n+1}{k}\tag{3.11}$$

Beweis:

$$\begin{aligned}\binom{n}{k-1} + \binom{n}{k} &= \frac{k}{k} \frac{n!}{(k-1)!(n-k+1)!} + \frac{n!}{k!(n-k)!} \frac{(n-k+1)}{(n-k+1)} \\ &= \frac{n!}{k!(n-k+1)!} \underbrace{(k + (n-k+1))}_{=n+1} \\ &= \frac{(n+1)!}{k!(n+1-k)!} \\ &= \binom{n+1}{k}\end{aligned}\tag{3.12}$$

□

Bemerkung: Aufbau des Pascalschen Dreiecks aus (i) und (iv).

Satz 1. (Binomi)

$\forall a, b \in \mathbb{R}$ (oder $\in \mathbb{C}$) und $\forall n \in \mathbb{N}_0$ gilt

$$(a+b)^n = \sum_{\nu=0}^n \binom{n}{\nu} a^\nu b^{n-\nu}.\tag{3.13}$$

Beweis: (mit vollständiger Induktion)

(i) Induktionsanfang, $n = 0$:

links:

$$(a+b)^0 = 1\tag{3.14}$$

rechts:

$$\sum_{\nu=0}^0 \binom{0}{\nu} a^\nu b^{0-\nu} = \binom{0}{0} a^0 b^0 = 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1\tag{3.15}$$

...oder auch $n = 1$:

linke Seite:

$$(a+b)^1 = a+b\tag{3.16}$$

rechte Seite:

$$\sum_{\nu=0}^1 \binom{1}{\nu} a^\nu b^{1-\nu} = \binom{1}{0} a^0 b^{1-0} + \binom{1}{1} a^1 b^{1-1} = b + a \quad (3.17)$$

(ii) $n \rightarrow n + 1$:

$$\begin{aligned} (a+b)^{n+1} &= (a+b)(a+b)^n \\ &\stackrel{\text{I.V.}}{=} (a+b) \sum_{\nu=0}^n \binom{n}{\nu} a^\nu b^{n-\nu} \\ &= \sum_{\nu=0}^n \binom{n}{\nu} a^{\nu+1} b^{n-\nu} + \sum_{\nu=0}^n \binom{n}{\nu} a^\nu b^{n+1-\nu} \\ &= \sum_{\nu=1}^{n+1} \binom{n}{\nu-1} a^\nu b^{n-(\nu-1)} + \sum_{\nu=0}^n \binom{n}{\nu} a^\nu b^{n+1-\nu} \\ &= a^{n+1} + \sum_{\nu=1}^n \binom{n}{\nu-1} a^\nu b^{n+1-\nu} + \sum_{\nu=1}^n \binom{n}{\nu} a^\nu b^{n+1-\nu} + b^{n+1} \\ &= a^{n+1} + \sum_{\nu=1}^n \underbrace{\left[\binom{n}{\nu-1} + \binom{n}{\nu} \right]}_{=\binom{n+1}{\nu}} a^\nu b^{n+1-\nu} + b^{n+1} \\ &= \sum_{\nu=0}^{n+1} \binom{n+1}{\nu} a^\nu b^{n+1-\nu} \end{aligned} \quad (3.18)$$

□

Beispiele:

1.

$$(a+b)^2 = a^2 + 2ab + b^2 \quad (3.19)$$

2.

$$(x-y)^3 = x^3 - 3x^2y + 3xy^2 - y^3 \quad (3.20)$$

3.

$$(1+1)^n = 2^n = \sum_{\nu=0}^n \binom{n}{\nu} \quad (3.21)$$

Bemerkung: Stirlingsche Formel (ohne Beweis)

$$n! \sim \sqrt{2\pi n} \left(\frac{n}{e}\right)^n, \quad n \rightarrow \infty \quad (3.22)$$

Asymptotisches Verhalten für große n , d.h.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n!}{\sqrt{2\pi n} \left(\frac{n}{e}\right)^n} = 1 \quad (3.23)$$

Merke: Die Fakultät wächst also im Wesentlichen wie n^n .

Satz 2. (Bernoullische Ungleichung)

$\forall n \in \mathbb{N}_0$ und $\forall x \in \mathbb{R}, x \geq -1$, gilt

$$(1+x)^n \geq 1+nx \tag{3.24}$$

Beweis: (vollständige Induktion)

(i) $n = 0, n = 1$ klar

(ii) $n \rightarrow n+1$:

$$\begin{aligned} (1+x)^{n+1} &= (1+x)(1+x)^n \\ &\stackrel{\text{i.V.}}{\geq} (1+x)(1+nx) = 1+nx+x+\underbrace{nx^2}_{\geq 0} \\ &\geq 1+(n+1)x \end{aligned} \tag{3.25}$$

(In der ersten Zeile sind beide Faktoren ≥ 0 , da $x \geq -1$.)

□

4 Funktionen einer reellen Variablen

Intervalle $I \subset \mathbb{R}$

abgeschlossenes Intervall: $I = [a, b] = \{x \in \mathbb{R} \mid a \leq x \leq b\}$

offenes Intervall: $I = (a, b) = \{x \in \mathbb{R} \mid a < x < b\}$

oder gemischt, z.B. $1 \in (0, 1]$ aber $0 \notin (0, 1]$.

Bemerkungen: $\mathbb{R} = (-\infty, \infty)$, $\mathbb{R} \setminus \{0\} = (-\infty, 0) \cup (0, \infty)$

Funktionen

$D \subseteq \mathbb{R}$ (d.h. Teilmenge oder gleich \mathbb{R} , z.B. ein Intervall)

$$\begin{aligned} f : D &\rightarrow \mathbb{R} \\ x &\mapsto f(x) \end{aligned} \tag{4.1}$$

Jedem $x \in D$ wird genau ein $f(x) \in \mathbb{R}$ zugeordnet.

D heißt Definitionsbereich oder Urbild von f .

Der Wertebereich oder das Bild von f ist die Menge

$$f(D) = \{y \in \mathbb{R} \mid \exists x \in D, \text{ so dass } f(x) = y\}. \tag{4.2}$$

Komposition von Funktionen

$$\begin{aligned} f : D &\rightarrow W \subset \mathbb{R} \\ x &\mapsto f(x) \end{aligned} \tag{4.3}$$

$$\begin{aligned} g : W &\rightarrow \mathbb{R} \\ y &\mapsto g(y) \end{aligned}$$

Dann existiert auch eine Abbildung

$$\begin{aligned} g \circ f : D &\rightarrow \mathbb{R} \\ x &\mapsto g(f(x)) \end{aligned} \tag{4.4}$$

Beispiele:

1.

$$f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \tag{4.5}$$

$$x \mapsto x^5 + 1$$

$$g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \tag{4.6}$$

$$x \mapsto x^3 - 2$$

(oder kurz: $f(x) = x^5 + 1$ und $g(x) = x^3 - 2$.)

Sowohl $f \circ g$ als auch $g \circ f$ existieren.

$$\begin{aligned} f \circ g : x &\mapsto f(x^3 - 2) = (x^3 - 2)^5 + 1 \\ g \circ f : x &\mapsto g(x^5 + 1) = (x^5 + 1)^3 - 2 \end{aligned} \tag{4.7}$$

Bemerkung: I.A. ist $f \circ g \neq g \circ f$ (hier z.B. Ausrechnen mit Binomi)

2.

$$f : \mathbb{R}_0^+ \rightarrow \mathbb{R}_0^+ \qquad g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \qquad (4.8)$$

$$x \mapsto \sqrt{x} \qquad x \mapsto x^2 - 1 \qquad (4.9)$$

$g \circ f$ existiert und ist definiert durch³

$$\mathbb{R}_0^+ \ni x \mapsto g(\sqrt{x}) = x - 1 \qquad (4.10)$$

$f \circ g$ existiert dagegen nicht (zumindest nicht für alle x im Definitionsbereich von g).

4.1 Folgengrenzwerte

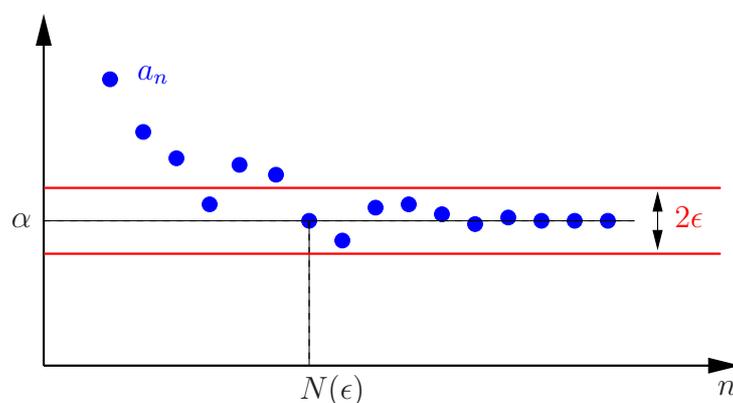
Eine (unendliche) **Folge** (a_n) reeller (oder auch komplexer) Zahlen ist eine Abbildung von \mathbb{N} (oder \mathbb{N}_0) nach \mathbb{R} , d.h. wir ordnen jedem $n \in \mathbb{N}$ ein $a_n \in \mathbb{R}$ (oder \mathbb{C}) zu.

Definition: (Grenzwert)

Eine (unendliche) Folge (a_n) konvergiert gegen den Grenzwert α , wenn gilt:

Für jedes $\epsilon > 0 \exists$ ein $N(\epsilon)$, so dass $|a_n - \alpha| < \epsilon \forall n > N(\epsilon)$. Man schreibt dann

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \alpha. \qquad (4.11)$$



Beispiele:

1. $(a_n) = 1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots$ d.h. $a_n = \frac{1}{n}$, $n \in \mathbb{N}$ konvergiert gegen Null,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} = 0. \qquad (4.12)$$

Bemerkung: Ist der Grenzwert 0, so spricht man von einer **Nullfolge**.

³ $\mathbb{R}^+ := \{x \in \mathbb{R} \mid x > 0\} = (0, \infty)$, $\mathbb{R}_0^+ := \{x \in \mathbb{R} \mid x \geq 0\} = [0, \infty)$, analog \mathbb{R}^- , \mathbb{R}_0^-

2. Die Folge $1, -1, 1, -1, 1, \dots$, d.h. $a_n = (-1)^n$, $n \in \mathbb{N}_0$ konvergiert nicht.

3. Die Folge (a_n) mit $a_n = n^2$ konvergiert nicht (divergiert). Hier sagt man die Folge strebt nach Unendlich und schreibt

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n^2 = \infty. \quad (4.13)$$

4. $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{n} = 1$ (später)

5. $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = e \approx 2,718$ (später)

Rechenregeln: Sei $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \alpha$ und $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = \beta$ (" $\neq \infty$ ", also konvergent) dann gilt:

1. $\lim_{n \rightarrow \infty} (a_n + b_n) = \alpha + \beta$

2. $\lim_{n \rightarrow \infty} (a_n b_n) = \alpha \beta$

3. $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{a_n} = \frac{1}{\alpha}$ falls $\alpha \neq 0$

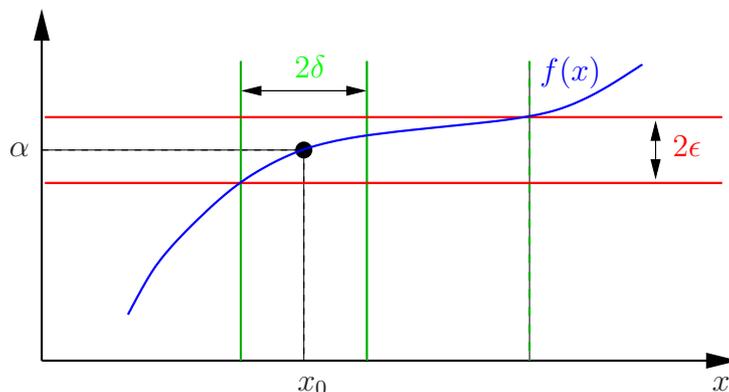
Merke: Auseinanderziehen erlaubt, falls alles konvergent

4.2 Funktionsgrenzwerte

Definition: (Grenzwert)

Eine Funktion f hat an der Stelle x_0 den Grenzwert α , wenn gilt: Für jedes $\epsilon > 0 \exists$ ein $\delta(\epsilon) > 0$, so dass $|f(x) - \alpha| < \epsilon \forall x \neq x_0$ mit $|x - x_0| < \delta(\epsilon)$. Man schreibt dann

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \alpha. \quad (4.14)$$



Bemerkung: Ähnlich schreiben wir $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \infty$ wenn gilt:

Für jedes $K < \infty \exists$ ein $\delta(K)$, so dass $f(x) > K \forall x \neq x_0$ mit $|x - x_0| < \delta(K)$.

Beispiele:

1. $\lim_{x \rightarrow 2} x^2 = 4$

2. $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^2} = \infty$, denn

$$\frac{1}{x^2} > K \Leftrightarrow x^2 < \frac{1}{K} \Leftrightarrow |x| < \frac{1}{\sqrt{K}} \quad (4.15)$$

d.h. $\delta(K) = \frac{1}{\sqrt{K}}$ tut's.

3. $\lim_{x \rightarrow 1} \frac{x^2 - 1}{x - 1} = 2$, denn $\frac{x^2 - 1}{x - 1} = \frac{(x-1)(x+1)}{x-1}$ (für $x \neq 1$)

4. $f(x) = \frac{1}{x}$ besitzt bei $x = 0$ keine Grenzwert, denn

$$\begin{aligned} f(x) &> 1 && \forall 0 < x < 1 && \text{und} \\ f(x) &< 1 && \forall -1 < x < 0. \end{aligned} \quad (4.16)$$

Definition: (Rechtsseitiger Grenzwert)

Eine Funktion f hat an der Stelle x_0 den rechtsseitigen Grenzwert α , wenn gilt: Für jedes $\epsilon > 0 \exists$ ein $\delta(\epsilon)$, so dass $|f(x) - \alpha| < \epsilon \forall x > x_0$ mit $|x - x_0| < \delta(\epsilon)$. Man schreibt dann

$$\lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x) = \alpha. \quad (4.17)$$

Analog definiert man den linksseitigen Grenzwert mit $x < x_0$.

Zurück zu $f(x) = \frac{1}{x}$:

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{1}{x} = +\infty, \quad \lim_{x \rightarrow 0^-} \frac{1}{x} = -\infty. \quad (4.18)$$

Bemerkungen:

1. Gilt $\lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x) = \lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x)$ so existiert der Grenzwert (und ist gleich den Beiden).

2. Man schreibt auch

$$\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = \alpha \quad \text{oder} \quad \lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = \alpha, \quad (4.19)$$

obwohl hier eigentlich nur ein rechts- bzw. linksseitiger Grenzwert gebildet werden kann.

Genauer:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = \alpha \stackrel{\text{Def.}}{\Leftrightarrow} \text{für jedes } \epsilon > 0 \exists K(\epsilon) < \infty, \text{ so dass } |f(x) - \alpha| < \epsilon \forall x > K(\epsilon).$$

Beispiele:

1.

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x} = 0 \quad \text{oder} \quad \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{3x + 2}{4x^2} = 0 \quad (\text{Zählergrad kleiner Nennergrad}) \quad (4.20)$$

2.

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{x^2 + 1}{x - 3} = \infty \quad \text{oder} \quad \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{x^2 + 1}{x - 3} = -\infty \quad (\text{Zählergrad größer Nennergrad}) \quad (4.21)$$

3.

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{x+5}{x-4} = 1 \quad \text{oder} \quad \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1+2x^2}{2x+3x^2} = \frac{2}{3} \quad (\text{Zählergrad gleich Nennergrad}) \quad (4.22)$$

Rechenregeln: Sei $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \alpha$ und $\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = \beta$ (wobei $|\alpha|, |\beta| < \infty$) dann gilt:

1. $\lim_{x \rightarrow x_0} (f(x) + g(x)) = \alpha + \beta$,
2. $\lim_{x \rightarrow x_0} (f(x) g(x)) = \alpha \beta$,
3. $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{1}{f(x)} = \frac{1}{\alpha}$, falls $\alpha \neq 0$.

4.3 Stetigkeit

Definition: (Stetigkeit)

Eine Funktion f ist stetig an der Stelle x_0 , wenn gilt: Für jedes $\epsilon > 0 \exists$ ein $\delta > 0$, so dass $|f(x) - f(x_0)| < \epsilon \forall x \neq x_0$ mit $|x - x_0| < \delta$.

Wir fordern also dreierlei:

1. $f(x)$ ist an der Stelle $x = x_0$ definiert.
2. Der Grenzwert an der Stelle x_0 existiert.
3. Grenzwert und Funktionswert stimmen überein.

$$\text{Kurz: } f \text{ stetig in } x_0 \quad \Leftrightarrow \quad \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = f(x_0)$$

Weiter sagt man f ist stetig auf einem Intervall $I \subseteq \mathbb{R}$ wenn f in jedem Punkt $x_0 \in I$ stetig ist.

Beispiele:

1.

$$f(x) = \frac{1}{x^2} \quad (4.23)$$

Untersuche Stetigkeit bei $x_0 = 0$:

$f(0)$ existiert nicht \Rightarrow nicht stetig in 0 (Singularität, Polstelle)

2.

$$f(x) = \text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & , x > 0 \\ 0 & , x = 0 \\ -1 & , x < 0 \end{cases} \quad (4.24)$$

Untersuche Stetigkeit bei $x_0 = 0$:

$f(0) = 0$ existiert

$\lim_{x \rightarrow 0} f(x)$ existiert nicht, denn

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) = 1 \quad \text{aber} \quad \lim_{x \rightarrow 0^-} f(x) = -1 \quad (4.25)$$

\Rightarrow nicht stetig in 0 (Sprungstelle)

3.

$$f(x) = \begin{cases} 1 & , \quad x \leq 2 \\ x & , \quad x > 2 \end{cases} \quad (4.26)$$

Untersuche Stetigkeit bei $x_0 = 2$:

$f(2) = 1$ existiert,

$\lim_{x \rightarrow 2^-} f(x) = 1 = f(2)$,

aber $\lim_{x \rightarrow 2^+} f(x) = 2$

\Rightarrow nicht stetig in 2 (Sprungstelle)

Merke: *Eine stetige Funktion kann man ohne Absetzen zeichnen.*

4.

$$f(x) = \begin{cases} 1 & , \quad x \neq 1 \\ 3 & , \quad x = 1 \end{cases} \quad (4.27)$$

Untersuche Stetigkeit bei $x_0 = 1$:

$f(1) = 3$ existiert,

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

\Rightarrow nicht stetig in 1

5.

$$f(x) = \frac{x^2 - 1}{x - 1} \quad (4.28)$$

Untersuche Stetigkeit bei $x_0 = 1$:

$f(1)$ ist nicht definiert (0 durch 0 – Definitionslücke), also auch nicht stetig in 1.

Allerdings existiert $\lim_{x \rightarrow 1} f(x) = 2$ (s.o.); definiere nachträglich

$$f(1) := 2, \quad (4.29)$$

Übrigens, für die so *stetig fortgesetzte* Funktion gilt

$$\begin{aligned} f(x) &= \begin{cases} \frac{x^2-1}{x-1} & , \quad x \neq 1 \\ 2 & , \quad x = 1 \end{cases} \\ &= x + 1 \end{aligned} \quad (4.30)$$

6.

$$f(x) = \begin{cases} 1 & , \quad x < 1 \\ x & , \quad x \geq 1 \end{cases} \quad (4.31)$$

Untersuche Stetigkeit bei $x_0 = 1$:

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

also stetig in 1

Analog zu den Rechenregeln für Grenzwerte gilt:

1. Sind f und g stetig auf $I \subseteq \mathbb{R}$, so sind auch $f + g$, αf ($\alpha \in \mathbb{R}$) und fg stetig.

Außerdem ist $\frac{f}{g}$ stetig $\forall x \in I$ mit $g(x) \neq 0$.

2. Sind $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ und $g : J \rightarrow \mathbb{R}$ stetig auf I bzw. J , und ist $g(J) \subseteq I$, dann ist auch $f \circ g$ stetig auf J .

4.4 Asymptoten

Nähert sich eine Funktion einer Geraden beliebig nahe an, so nennt man die Gerade eine Asymptote der Funktion (bzw. des Funktionsgraphs).

Waagerechte Asymptoten

Gilt

$$\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = a \quad \text{oder} \quad \lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = b, \quad (4.32)$$

so hat f eine waagerechte Asymptote $y = a$ bzw. $y = b$.

Senkrechte Asymptoten

Hat f eine Polstelle bei $x = a$, d.h.

$$\lim_{x \rightarrow a^+} |f(x)| = \infty \quad \text{oder} \quad \lim_{x \rightarrow a^-} |f(x)| = \infty, \quad (4.33)$$

so hat f eine senkrechte Asymptote $x = a$.

Schiefe Asymptoten

Gilt ($a \neq 0$)

$$\lim_{x \rightarrow \infty} [f(x) - (ax + b)] = 0 \quad \text{oder} \quad \lim_{x \rightarrow -\infty} [f(x) - (ax + b)] = 0, \quad (4.34)$$

so hat f die schiefe Asymptote $g(x) = ax + b$.⁴

Beispiele:

1. $f(x) = \frac{1}{x}$
 waagerechte Asymptote $y = 0$ (x -Achse)
 senkrechte Asymptote $x = 0$ (y -Achse).
2. $f(x) = \frac{3x^2 + 4}{2x^2 - x}$
 waagerechte Asymptote $y = \frac{3}{2}$
 senkrechte Asymptoten $x = 0$ und $x = \frac{1}{2}$
3. $f(x) = \frac{3x^2 + 4}{x - 1}$
 senkrechte Asymptote $x = 1$

⁴Man schreibt dafür auch $f(x) \sim ax + b$ und meint dann nicht nur $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{f(x)}{ax+b} = 1$ (vgl. Abschnitt 3, Stirlingsche Formel) sondern auch $f(x) - ax \sim b$, d.h. $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{f(x) - ax}{b} = 1$.

schiefe Asymptote... Polynomdivision

$$\begin{array}{r} (3x^2 + 4) : (x - 1) = 3x + 3 + \frac{7}{x - 1} \\ \underline{-3x^2 + 3x} \\ 3x + 4 \\ \underline{-3x + 3} \\ 7 \end{array} \quad (4.35)$$

schiefe Asymptote $g(x) = 3x + 3$

4.5 Differentiation

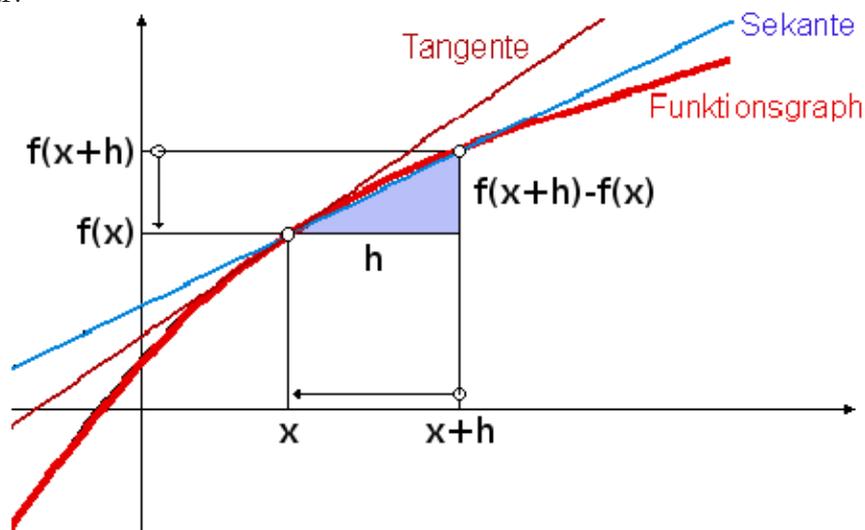
Definition: Sei $I \subset \mathbb{R}$ offen, $x \in I$. Die Funktion $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ heißt differenzierbar in x , falls

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} \quad (4.36)$$

existiert. Man nennt dann

$$f'(x) := \frac{d}{dx} f(x) := \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} \quad (4.37)$$

die Ableitung von f an der Stelle x . Ist $f \forall x \in I$ differenzierbar, so heißt f auf I differenzierbar.



Anschaulich: $f'(x)$ ist die Steigung der Tangente an f im Punkt $(x, f(x))$.

Analog für höhere Ableitungen:

$$\begin{aligned} f''(x) &= f^{(2)}(x) = \left(\frac{d}{dx} \right)^2 f(x) \\ f''' &= f^{(3)} = \frac{d^3 f}{dx^3} \quad \text{etc.} \end{aligned} \quad (4.38)$$

Bemerkung: Damit die Ableitung existieren kann, muss (notwendigerweise)

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

gelten. (Stetigkeit in x)

Beispiele:

1. $f : x \mapsto x^n, n \in \mathbb{N}_0$

$$n = 0: f(x) \equiv 1$$

$$\Rightarrow f(x+h) - f(x) = 0 \quad \forall h \text{ und } \forall x$$

$$\Rightarrow f'(x) \equiv 0$$

beliebige n :

$$\begin{aligned} \lim_{h \rightarrow 0} \frac{(x+h)^n - x^n}{h} &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} \left(\sum_{\nu=0}^n \binom{n}{\nu} x^\nu h^{n-\nu} - x^n \right) \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \sum_{\nu=0}^{n-1} \binom{n}{\nu} x^\nu h^{n-\nu-1} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \left[\binom{n}{n-1} x^{n-1} + \underbrace{h \sum_{\nu=0}^{n-2} \binom{n}{\nu} x^{n-1} h^{n-\nu-2}}_{\xrightarrow{h \rightarrow 0} 0} \right] \\ &= n x^{n-1} \end{aligned} \tag{4.39}$$

Gilt übrigens sogar für $n \in \mathbb{Z} \setminus \{0\}$, z.B. $f(x) = \frac{1}{x}$:

$$\begin{aligned} f'(x) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} \left(\frac{1}{x+h} - \frac{1}{x} \right) \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} \left(\frac{x - (x+h)}{x(x+h)} \right) \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} \left(\frac{-h}{x(x+h)} \right) = -\frac{1}{x^2} \end{aligned} \tag{4.40}$$

2.

$$f(x) = |x| = \begin{cases} x & , \quad x \geq 0 \\ -x & , \quad x < 0 \end{cases} \tag{4.41}$$

$$f'(x) = \begin{cases} 1 & , \quad x > 0 \\ -1 & , \quad x < 0 \end{cases} \tag{4.42}$$

$f'(0)$ existiert nicht.

3. $1 \leq k < n$, $f(x) = x^n$

$$\begin{aligned} f^{(k)}(x) &= n(n-1) \cdots (n-k+1) x^{n-k} \\ &= \binom{n}{k} k! x^{n-k} \end{aligned} \quad (4.43)$$

Satz 3. (Differentiationsregeln)

Seien f und g in x differenzierbar. Dann gilt

(i) *Linearität:* $af + bg$ ist differenzierbar in $x \forall a, b \in \mathbb{R}$, und es gilt

$$(af + bg)'(x) = af'(x) + bg'(x) \quad (4.44)$$

(ii) *Produktregel:* $f \cdot g$ ist differenzierbar in x , und es gilt

$$(fg)'(x) = f'(x)g(x) + f(x)g'(x) \quad (4.45)$$

(iii) *Kettenregel*

Sei f differenzierbar in $g(x) \Rightarrow f \circ g$ ist differenzierbar in x mit

$$\frac{d}{dx}f(g(x)) = f'(g(x))g'(x) \quad (4.46)$$

Beweise folgen direkt aus Rechenregeln für Grenzwerte.

Bemerkung: Aus (iii) und der Ableitung von $\frac{1}{x}$ folgt

$$\left(\frac{1}{g(x)}\right)' = -\frac{g'(x)}{g^2(x)} \quad (\text{falls } g(x) \neq 0) \quad (4.47)$$

und daraus mit (ii)

$$\left(\frac{f}{g}\right)' = \left(f \frac{1}{g}\right)' = f' \frac{1}{g} + f \left(-\frac{g'}{g^2}\right) = \frac{f'g - fg'}{g^2} \quad (\text{Quotientenregel}) \quad (4.48)$$

Beispiele:

$$1. \left((x^2 + 1)^5 + 7x\right)' \stackrel{(i)}{=} \left((x^2 + 1)^5\right)' + 7 \stackrel{(iii)}{=} 5(x^2 + 1)^4(2x) + 7$$

$$2. f(x) = \sqrt[n]{x} = x^{\frac{1}{n}}, \quad x > 0 \quad (n \in \mathbb{Z} \setminus \{0\})$$

definiere $g(x) = x^n \Rightarrow g \circ f$ existiert

$$g(f(x)) = \left(x^{\frac{1}{n}}\right)^n = x, \quad x > 0 \quad (4.49)$$

$$\Rightarrow (g \circ f)'(x) = 1$$

$$\stackrel{(iii)}{=} g'(f(x))f'(x) = n[f(x)]^{n-1}f'(x) = nx^{\frac{n-1}{n}}f'(x) \quad (4.50)$$

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

3.

$$f(x) = \frac{1}{x^2 + 1}, \quad f'(x) \stackrel{\text{(iii)}}{=} -\frac{2x}{(x^2 + 1)^2} \quad (4.51)$$

4.5.1 Alternative Definition mit Klein-o

Differenzierbarkeit von f in x_0 bedeutet Approximierbarkeit in der Nähe von x_0 durch eine Gerade, nämlich die Tangente t im Punkt $(x_0, f(x_0))$,

$$t(x) := f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0). \quad (4.52)$$

Lemma 4. f diffbar in $x_0 \Leftrightarrow \exists a \in \mathbb{R}$, so dass

$$f(x) = f(x_0) + a(x - x_0) + o(x - x_0), \quad x \rightarrow x_0. \quad (4.53)$$

Man nennt dann $a = f'(x_0)$ die Ableitung von f an der Stelle x_0 .

Dabei sagt man $f(x) = o(g(x))$, $x \rightarrow x_0$, falls gilt

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{|f(x)|}{|g(x)|} = 0. \quad (4.54)$$

Beispiele:

1. $x^2 = o(x)$, $x \rightarrow 0$
2. $x^3 = o(x)$, $x \rightarrow 0$
3. $x = o(x^2)$, $x \rightarrow \infty$
4. $e^{-x} = o(x^{-n})$, $x \rightarrow \infty$, $\forall n \in \mathbb{N}$ (Beweis später)
5. $x = o(1)$, $x \rightarrow 0$
6. $x o(x) = o(x^2)$, $x \rightarrow 0$
7. $(1 + x + o(x))(5 - x + o(x)) = 5 + 4x + o(x)$, denn

$$[1 + x + o(x)][5 - x + o(x)] = 5 + (5 - 1)x \underbrace{- x^2}_{=o(x)} + \underbrace{(1 + x)o(x)}_{=o(x)+o(x^2)} + \underbrace{(5 - x)o(x)}_{=o(x)+o(x^2)} + \underbrace{o(x)o(x)}_{=o(x^2)} = 5 + 4x + o(x)$$

Beweis von Lemma 4

$$\begin{aligned} & f(x) = f(x_0) + a(x - x_0) + o(x - x_0) && | - f(x_0) \\ \Leftrightarrow & f(x) - f(x_0) = a(x - x_0) + o(x - x_0) && | : (x - x_0) \\ \Leftrightarrow & \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} = a + o(1) \\ \Leftrightarrow & \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} = a, \end{aligned}$$

d.h. “ \Rightarrow ” wenn f diffbar in x_0 , dann \exists so ein a , und $a = f'(x_0)$,

“ \Leftarrow ” wenn so ein a existiert, dann ist f diffbar in x_0 , und $f'(x_0) = a$.

Bemerkungen:

1. l'Hospitalsche Regel.⁵ Wir suchen

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = \frac{0}{0}, \quad (4.55)$$

also $f(x_0) = 0 = g(x_0)$. Falls f und g diffbar in x_0 und $g'(x_0) \neq 0$, so gilt

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} &= \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{\overset{0}{f(x_0)} + f'(x_0)(x - x_0) + o(x - x_0)}{\overset{0}{g(x_0)} + g'(x_0)(x - x_0) + o(x - x_0)} \\ &= \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f'(x_0) + o(1)}{g'(x_0) + o(1)} \\ &= \frac{f'(x_0)}{g'(x_0)}. \end{aligned} \quad (4.56)$$

Gilt analog für⁶

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = \frac{\infty}{\infty}. \quad (4.57)$$

2. Beweis der Kettenregel. (Satz 3 (iii))

Sei $f(x) = g(h(x))$, h diffbar in x_0 und g diffbar in $y_0 := h(x_0)$.

$$\begin{aligned} f(x) &= g(\underbrace{h(x_0) + h'(x_0)(x - x_0) + o(x - x_0)}_{=:y}) && \text{(da } h \text{ diffbar in } x_0) \\ &= g(y_0) + g'(y_0)(y - y_0) + o(y - y_0) && \text{(da } g \text{ diffbar in } y_0) \\ &= g(h(x_0)) + g'(h(x_0))(h'(x_0)(x - x_0) + o(x - x_0)) + \underbrace{o(h'(x_0)(x - x_0) + o(x - x_0))}_{=o(x-x_0)} \\ &= \underbrace{g(h(x_0))}_{f(x_0)} + \underbrace{g'(h(x_0))h'(x_0)}_{f'(x_0)}(x - x_0) + \underbrace{g'(h(x_0))o(x - x_0) + o(x - x_0)}_{=o(x-x_0)} \quad \square \end{aligned} \quad (4.58)$$

⁵Die eigentlich auf Johann Bernoulli zurückgeht...

⁶Dem ($\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \pm\infty$, $\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = \pm\infty$)

$$\begin{aligned} \alpha := \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} &= \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{\frac{1}{\frac{g(x)}{f(x)}}}{\frac{1}{f(x)}} \quad \left(\text{vom Typ } \frac{0}{0} \right) \\ &= \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{\frac{g'(x)}{(g(x))^2}}{\frac{f'(x)}{(f(x))^2}} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{(f(x))^2 g'(x)}{(g(x))^2 f'(x)} = \alpha^2 \frac{g'(x_0)}{f'(x_0)} \Rightarrow \alpha = \frac{f'(x_0)}{g'(x_0)} \quad \text{(falls existent!)} \end{aligned}$$

4.6 Die Exponentialfunktion

Eulersche Zahl:

$$a_n := \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n \quad (4.59)$$

Wir zeigen zunächst, dass a_n nach oben und unten beschränkt ist:

$$\left(1 + \frac{1}{n}\right)^n \geq 1 + 1 = 2 \quad (\text{Bernoullische Ungleichung, Satz 2}) \quad (4.60)$$

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n &= \sum_{\nu=0}^n \binom{n}{\nu} \left(\frac{1}{n}\right)^\nu \quad (\text{Binomi, Satz 1}) \\ &= \sum_{\nu=0}^n \underbrace{\frac{n(n-1)\cdots(n-\nu+1)}{n^\nu}}_{\leq 1} \frac{1}{\nu!} \\ &\leq \sum_{\nu=0}^n \frac{1}{\nu!} = 1 + \sum_{\nu=1}^n \frac{1}{\nu!} \quad (4.61) \\ &\stackrel{(*)}{\leq} 1 + \sum_{\nu=1}^n \frac{1}{2^{\nu-1}} = 1 + \sum_{\nu=0}^{n-1} \left(\frac{1}{2}\right)^\nu = 1 + \frac{1 - \left(\frac{1}{2}\right)^n}{\frac{1}{2}} \quad (\text{geom. Reihe}) \\ &\leq 1 + 2 = 3 \end{aligned}$$

In (*) haben wir verwendet, dass $\nu! \geq 2^{\nu-1}$ für $\nu \geq 1$.

Beweis dafür: (vollständige Induktion)

$$\nu = 1: 1! = 1 = 2^0$$

$$\nu \rightarrow \nu + 1: (\nu + 1)! = (\nu + 1) \cdot \nu! \underset{\text{I.V.}}{\geq} (\nu + 1) \cdot 2^{\nu-1} \underset{\nu \geq 1}{\geq} 2^\nu. \quad \square$$

Bis jetzt wissen wir also:

$$2 \leq a_n \leq 3 \quad (4.62)$$

Jetzt zeigen wir noch, dass a_n monoton wachsend ist, d.h. z.z. ist $a_{n+1} \geq a_n$ bzw. $\frac{a_{n+1}}{a_n} \geq 1$:

$$\begin{aligned} \frac{\left(1 + \frac{1}{n+1}\right)^{n+1}}{\left(1 + \frac{1}{n}\right)^n} &= \frac{(n+1+1)^{n+1} n^{n+1}}{(n+1)^{n+1} (n+1)^{n+1}} \frac{n+1}{n} \\ &= \frac{n+1}{n} \left(\frac{(n+1+1)(n+1-1)}{(n+1)^2} \right)^{n+1} \quad (4.63) \\ &= \frac{n+1}{n} \left(\frac{(n+1)^2 - 1}{(n+1)^2} \right)^{n+1} = \frac{n+1}{n} \left(1 - \frac{1}{(n+1)^2} \right)^{n+1} \\ &\geq \frac{n+1}{n} \left(1 - \frac{1}{n+1} \right) = 1 \quad (\text{Bernoullische Ungleichung, Satz 2}) \end{aligned}$$

Die Folge a_n wächst monoton und ist nach oben beschränkt – es bleibt ihr nichts anderes übrig, als zu konvergieren. Den Grenzwert nennen wir e (Eulersche Zahl), und wir wissen bereits

$$2 \leq e = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n \leq 3 \quad (4.64)$$

Numerisch findet man $e = 2,718281828459\dots$

Exponentialfunktion: Wir definieren

$$\exp(x) := \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{x}{n}\right)^n, \quad x \in \mathbb{R}, \quad (4.65)$$

und schreiben später auch $\exp(x) = e^x$.

(Dass e^x eine berechnete Schreibweise ist, ist erst noch zu zeigen – vgl. Satz 5, (ii).)

Bemerkungen:

1. Analog zu oben zeigt man auch hier, dass die Folge für alle $x \in \mathbb{R}$ monoton wächst und beschränkt ist \Rightarrow Konvergenz. (Details nicht schwierig, nur un hübsch)⁷
2. $\exp(0) = e^0 = 1$ (offensichtlich)
- 3.

$$\exp(x) \geq 1 + x, \quad (4.66)$$

7

$$\begin{aligned} \left| \left(1 + \frac{x}{n}\right)^n \right| &\leq \sum_{\nu=0}^n \binom{n}{\nu} \left|\frac{x}{n}\right|^\nu = \sum_{\nu=0}^n \underbrace{\frac{n(n-1)\cdots(n-\nu+1)}{n^\nu}}_{\leq 1} \frac{|x|^\nu}{\nu!} \\ &\leq \sum_{\nu=0}^n \frac{|x|^\nu}{\nu!} = \sum_{\nu=0}^{N-2} \frac{|x|^\nu}{\nu!} + \sum_{\nu=N-1}^n \frac{|x|^\nu}{\nu!} \\ &\stackrel{(+)}{\leq} \sum_{\nu=0}^{N-2} \frac{|x|^\nu}{\nu!} + \sum_{\nu=N-1}^n \frac{|x|^\nu}{N^{\nu-N+1}} = \sum_{\nu=0}^{N-2} \frac{|x|^\nu}{\nu!} + \sum_{\nu=0}^{n-N+1} \frac{|x|^{\nu+N-1}}{N^\nu} = \sum_{\nu=0}^{N-2} \frac{|x|^\nu}{\nu!} + |x|^{N-1} \frac{1 - \left(\frac{|x|}{N}\right)^{n-N+2}}{1 - \frac{|x|}{N}} \\ &\leq \sum_{\nu=0}^{N-2} \frac{|x|^\nu}{\nu!} + |x|^{N-1} \frac{N}{N - |x|}, \quad (+) : \quad \nu! \geq N^{\nu-N+1} \quad \text{für } \nu \geq N-1 \quad (\text{vollst. Ind.}), \end{aligned}$$

also nach oben beschränkt, da Ergebnis nicht von n abhängt

(N wird allein durch x festgelegt, $|x| < N \leq n$)

$$\begin{aligned} \frac{\left(1 + \frac{x}{n+1}\right)^{n+1}}{\left(1 + \frac{x}{n}\right)^n} &= \frac{(n+1+x)^{n+1} n^n}{(n+x)^n (n+1)^{n+1}} = \frac{n+1}{n} \left(\frac{n^2 + n + nx}{n^2 + nx + n + x}\right)^{n+1} = \frac{n+1}{n} \left(1 - \frac{x}{n^2 + nx + n + x}\right)^{n+1} \\ &= \frac{n+1}{n} \left(1 - \frac{x}{(n+1)(n+x)}\right)^{n+1} \geq \frac{n+1}{n} \left(1 - \frac{x}{n+x}\right) = 1 \end{aligned}$$

(Bernoulli klappt wieder für $|x| < n$, also für hinreichend große n .)

denn

$$\left(1 + \frac{x}{n}\right)^n \geq 1 + x, \quad \text{falls } x > -n, \quad (\text{Bernoulli}) \quad (4.67)$$

d.h. falls n groß genug; $\Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{x}{n}\right)^n \geq 1 + x$.

4.

$$\exp(x) \leq x \exp(x) + 1 \quad (4.68)$$

bzw. $\exp(x) \cdot (1 - x) \leq 1$. Beweis:

$$\left(1 + \frac{x}{n}\right)^n (1 - x) \stackrel{(*)}{\leq} \left(1 + \frac{x}{n}\right)^n \left(1 - \frac{x}{n}\right)^n = \left(1 - \frac{x^2}{n^2}\right)^n, \quad (4.69)$$

wobei $(*)$: Bernoulli, falls n groß genug.

Für hinreichend große n gilt weiter

$$0 \leq \left(1 - \frac{x^2}{n^2}\right) \leq 1 \quad (4.70)$$

und damit auch die Potenz, und für $n \rightarrow \infty$ folgt die Behauptung.

5.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{x}{n^2}\right)^n = 1 \quad (4.71)$$

Beweis:

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{x}{n^2}\right)^n &= \sum_{\nu=0}^n \binom{n}{\nu} \left(\frac{x}{n^2}\right)^\nu = 1 + \sum_{\nu=1}^n \frac{1}{n^\nu} \binom{n}{\nu} \left(\frac{x}{n}\right)^\nu \\ &\leq 1 + \frac{1}{n} \underbrace{\sum_{\nu=1}^n \binom{n}{\nu} \left(\frac{x}{n}\right)^\nu}_{\text{beschränkt durch } \exp(x)} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 1 \end{aligned} \quad (4.72)$$

Analog gilt $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{x}{n^{1+\epsilon}}\right)^n = 1 \quad \forall \epsilon > 0$.

6. $x > 0 \Rightarrow \exp(x) > \left(1 + \frac{x}{n}\right)^n$ da Folge monoton wachsend (und “=” gilt nur für $x = 0$),

$$\begin{aligned} \exp(x) &> \left(1 + \frac{x}{n}\right)^n = \sum_{\nu=0}^n \binom{n}{\nu} \left(\frac{x}{n}\right)^\nu \\ &\geq \binom{n}{n} \left(\frac{x}{n}\right)^n = \frac{x^n}{n^n} = x^{n-1} \frac{x}{n^n} \\ &> x^{n-1} \quad \text{für } x > n^n \end{aligned} \quad (4.73)$$

$\Rightarrow \exp(x) > x^m$ für jedes m , wenn nur x hinreichend groß ($x > (m+1)^{m+1}$),

d.h. $\exp(x)$ wächst schneller als jede Potenz für $x \rightarrow \infty$,

kurz $x^m = o(\exp(x))$, $x \rightarrow \infty$.

Satz 5. (Eigenschaften der Exponentialfunktion)

- (i) $\exp(0) = 1$
- (ii) *Funktionalgleichung* $\exp(x) \exp(y) = \exp(x + y)$
- (iii) $\exp(x) > 0$
- (iv) für jedes $n \in \mathbb{N}$ gilt

$$\begin{aligned} \exp(x) &> x^n && \text{für große } x \\ \exp(x) &< |x|^{-n} && \text{für betragsmäßig große negative } x \end{aligned} \quad (4.74)$$

insbesondere: $\lim_{x \rightarrow \infty} \exp(x) = \infty$ und $\lim_{x \rightarrow -\infty} \exp(x) = 0$

- (v) $\exp(x)$ ist streng monoton wachsend, d.h.

$$x > y \quad \Rightarrow \quad \exp(x) > \exp(y) \quad (4.75)$$

- (vi) $\exp(x)$ ist stetig $\forall x \in \mathbb{R}$

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

Beweise:

- (i) klar lt. Def.

- (ii)

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{x}{n}\right)^n \left(1 + \frac{y}{n}\right)^n &\xrightarrow{n \rightarrow \infty} \exp(x) \exp(y) \\ &= \left(1 + \frac{x+y}{n} + \frac{xy}{n^2}\right)^n = \left(1 + \frac{x+y}{n}\right)^n \underbrace{\left(1 + \frac{xy}{n^2 \left(1 + \frac{x+y}{n}\right)}\right)^n}_{\xrightarrow{n \rightarrow \infty} 1 \text{ (Bem. 5)}} \\ &\xrightarrow{n \rightarrow \infty} \exp(x+y) \end{aligned} \quad (4.76)$$

- (iii) $x \geq 0$: $e^x > 0$ (lt. Def.) $\Rightarrow e^{-x} = \frac{1}{e^x} > 0$, d.h. $e^x > 0$ auch für $x < 0$

Bemerkung: Aus der Definition von \exp (oder aus Bem. 3) folgt sogar $e^x > 1 \forall x > 0$.

- (iv) $e^x > x^n$ lt. Bem. 6; mit $e^{-x} = \frac{1}{e^x}$ folgt zweiter Teil.

- (v) $x < y$: $e^y = e^{y+x-x} = e^x \underbrace{e^{y-x}}_{>1} > e^x$

- (vi) z.z.: $\lim_{h \rightarrow 0} e^{x+h} = e^x$

$$\lim_{h \rightarrow 0} e^{x+h} = e^x \lim_{h \rightarrow 0} e^h \quad (4.77)$$

z.z. bleibt Stetigkeit bei Null.

Für $|h| < 1$ gilt lt. Bem. 3 und 4:

$$\underbrace{1+h}_{\xrightarrow[h \rightarrow 0]{1}} \leq e^h \leq \underbrace{\frac{1}{1-h}}_{\xrightarrow[h \rightarrow 0]{1}}, \quad (4.78)$$

also auch $\lim_{h \rightarrow 0} e^h = 1$.

(vii)

$$\frac{e^{x+h} - e^x}{h} = e^x \frac{e^h - 1}{h} \quad (4.79)$$

d.h. e^x diffbar in $x \Leftrightarrow e^x$ diffbar in Null.

Wieder lt. Bem. 3 und 4 gilt für $h > 0$:

$$\frac{1+h-1}{h} \leq \frac{e^h-1}{h} \leq \frac{he^h+1-1}{h} \quad (4.80)$$

$$\text{d.h.} \quad 1 \leq \frac{e^h-1}{h} \leq e^h \xrightarrow[h \rightarrow 0]{} 1,$$

also $\lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{e^h-1}{h} = 1$ (und analog für $h < 0$).

4.7 Umkehrfunktionen

Definition: $f : A \rightarrow B$ (z.B. $A, B \subseteq \mathbb{R}$) heißt

- surjektiv, falls jedes $b \in B$ als Bild auftritt ($b \in B \Rightarrow \exists a \in A$ mit $f(a) = b$),
- injektiv, falls: $a \neq \tilde{a} \Rightarrow f(a) \neq f(\tilde{a}) \forall a, \tilde{a} \in A$,
- bijektiv, falls f surjektiv und injektiv ist.

Bemerkungen:

1. $f : A \rightarrow B$ nicht surjektiv – “heilbar”, denn

$$\tilde{B} := f(A) = \{b \in \mathbb{R} \mid \exists a \in A, \text{ so dass } f(a) = b\} \quad (4.81)$$

$\Rightarrow f : A \rightarrow \tilde{B}$ ist surjektiv. Z.B.

$$\begin{aligned} f : \mathbb{R} &\rightarrow \mathbb{R} \\ x &\mapsto x^2 \end{aligned} \quad (4.82)$$

ist nicht surjektiv, denn $-1 \in B = \mathbb{R}$ tritt nicht als Funktionswert auf.

$f(A) = \mathbb{R}_0^+$, und damit ist

$$\begin{aligned} f : \mathbb{R} &\rightarrow \mathbb{R}_0^+ \\ x &\mapsto x^2 \end{aligned} \quad (4.83)$$

surjektiv.

2. fehlende Injektivität ist kritischer, z.B.

$$\begin{aligned} f : \mathbb{R} &\rightarrow \mathbb{R}_0^+ \\ x &\mapsto x^2 \end{aligned} \quad (4.84)$$

ist nicht injektiv, denn $(-1)^2 = 1^2$ aber $-1 \neq 1$.

$$f_1 : \mathbb{R}_0^+ \rightarrow \mathbb{R}_0^+ \quad , \quad f_2 : \mathbb{R}_0^- \rightarrow \mathbb{R}_0^+ \quad (4.85)$$

$$x \mapsto x^2 \quad \quad \quad x \mapsto x^2 \quad (4.86)$$

sind injektiv (und bijektiv).

3. Ist $f : A \rightarrow B$ bijektiv, so existiert in natürlicher Weise eine Funktion

$$\begin{aligned} f^{-1} : \quad B &\rightarrow A \\ b = f(a) &\mapsto a \end{aligned} \quad (4.87)$$

genannt Umkehrfunktion von f . $\left(f^{-1} \neq \frac{1}{f}\right)$

4. $f : A \rightarrow B$ bijektiv

\Rightarrow es existiert $f^{-1} : B \rightarrow A$

\Rightarrow es existiert $f^{-1} \circ f : A \rightarrow A$

sowie $f \circ f^{-1} : B \rightarrow B$

mit $(f^{-1} \circ f)(x) = f^{-1}(f(x)) = x \quad \forall x \in A$

und $(f \circ f^{-1})(x) = f(f^{-1}(x)) = x \quad \forall x \in B$

5. f^{-1} ist f gespiegelt an der ersten Winkelhalbierenden.

6. Streng monotone Funktionen sind injektiv.

7. Sei $f : A \rightarrow B$ diffbar, dann gilt

$$\begin{aligned} f'(x) > 0 \quad \forall x \in I \subseteq A &\Rightarrow f \text{ ist streng monoton wachsend auf } I \\ f'(x) < 0 \quad \forall x \in I \subseteq A &\Rightarrow f \text{ ist streng monoton fallend auf } I \end{aligned} \quad (4.88)$$

Beispiele:

1.

$$\begin{aligned} f_1 : \mathbb{R}_0^+ &\rightarrow \mathbb{R}_0^+ \quad , \quad f_1^{-1} : \mathbb{R}_0^+ \rightarrow \mathbb{R}_0^+ \\ x &\mapsto x^2 \quad \quad \quad x \mapsto \sqrt{x} \end{aligned} \quad (4.89)$$

$$\begin{aligned} f_2 : \mathbb{R}_0^- &\rightarrow \mathbb{R}_0^+ \quad , \quad f_2^{-1} : \mathbb{R}_0^+ \rightarrow \mathbb{R}_0^- \\ x &\mapsto x^2 \quad \quad \quad x \mapsto -\sqrt{x} \end{aligned} \quad (4.90)$$

$$f_2^{-1} \circ f_2 : \mathbb{R}_0^- \rightarrow \mathbb{R}_0^- \quad , \quad f_2 \circ f_2^{-1} : \mathbb{R}_0^+ \rightarrow \mathbb{R}_0^+ \quad (4.91)$$

$$2. \quad f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, \quad f(x) = x \quad \Rightarrow \quad f^{-1} = f$$

3. $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, $f(x) = x^2 + x$

$$\begin{aligned} f'(x) = 2x + 1 : \quad & f'(x) > 0 \quad \forall \quad x > -\frac{1}{2} \\ & f'(x) < 0 \quad \forall \quad x < -\frac{1}{2} \end{aligned} \quad (4.92)$$

$$f\left(-\frac{1}{2}\right) = -\frac{1}{4}, \quad \lim_{x \rightarrow \pm\infty} = \infty, \quad f \text{ stetig} \quad (4.93)$$

\Rightarrow jedes $y \in [-\frac{1}{4}, \infty)$ tritt als Funktionswert auf; d.h.

$$f_1 : [-\frac{1}{2}, \infty) \rightarrow [-\frac{1}{4}, \infty) \quad \text{und} \quad f_2 : (-\infty, -\frac{1}{2}] \rightarrow [-\frac{1}{4}, \infty), \quad (4.94)$$

beide mit derselben Abbildungsvorschrift wie f , sind surjektiv und (da monoton) auch injektiv, d.h. bijektiv.

$$\Rightarrow \quad f_1^{-1} : [-\frac{1}{4}, \infty) \rightarrow [-\frac{1}{2}, \infty) \quad \text{und} \quad f_2^{-1} : [-\frac{1}{4}, \infty) \rightarrow (-\infty, -\frac{1}{2}] \quad (4.95)$$

Wie sehen die f_j^{-1} aus?

Nenne $y = f(x)$, und da $(f^{-1} \circ f)(x) = x$ gilt $f^{-1}(y) = x$.

Löse also $y = f(x)$ nach x auf!

$$y = x^2 + x \quad \Leftrightarrow \quad x^2 + x - y = 0 \quad (4.96)$$

$$\text{quadratische Gleichung: } x = \frac{-1 \pm \sqrt{1 + 4y}}{2} = -\frac{1}{2} \pm \sqrt{y + \frac{1}{4}}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \quad f_1^{-1}(x) &= -\frac{1}{2} + \sqrt{x + \frac{1}{4}} \\ f_2^{-1}(x) &= -\frac{1}{2} - \sqrt{x + \frac{1}{4}} \end{aligned} \quad (4.97)$$

Satz 6. (Ableitung der Umkehrfunktion)

Ist $f : I \rightarrow J$ bijektiv und diffbar, dann folgt

$f^{-1} : J \rightarrow I$ ist diffbar $\forall x \in J$ mit $f'(f^{-1}(x)) \neq 0$ und es gilt

$$f^{-1}'(x) = \frac{1}{f'(f^{-1}(x))}. \quad (4.98)$$

Beweis:

Man zeigt zunächst, dass f^{-1} diffbar ist (ohne Beweis).

Dann wendet man auf $f(f^{-1}(x)) = x$ die Kettenregel an,

$$f'(f^{-1}(x)) \cdot f^{-1}'(x) = 1. \quad (4.99)$$

Mit Division durch $f'(f^{-1}(x))$ (das war $\neq 0$) folgt die Behauptung. \square

4.8 Der Logarithmus

Definition: Die Umkehrfunktion von $\exp : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^+$ heißt (natürlicher) Logarithmus,

$$\log : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R} \quad (4.100)$$

Manchmal schreibt man statt \log auch \ln (*logarithmus naturalis*).

also: $e^{\log x} = x$ für $x > 0$ und $\log(e^x) = x$ für $x \in \mathbb{R}$.

Bemerkung:

e^x ist injektiv, da streng monoton wachsend

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} e^x = 0, \quad \lim_{x \rightarrow \infty} e^x = \infty$$

$$\Rightarrow \exp(\mathbb{R}) = (0, \infty)$$

Satz 7. (Eigenschaften von \log)

- (i) $\log 1 = 0, \quad \log e = 1$
- (ii) $\log(xy) = \log x + \log y$
- (iii) $\lim_{x \rightarrow 0^+} \log x = -\infty, \quad \lim_{x \rightarrow \infty} \log x = \infty$
- (iv) $(\log x)' = \frac{1}{x}, \quad x > 0$
 $\Rightarrow \log x$ ist streng monoton wachsend

Beweis:

- (i) $e^0 = 1 \Rightarrow \log 1 = 0$
 $e^1 = e \Rightarrow \log e = 1$
- (ii) $e^{\log x + \log y} = e^{\log x} e^{\log y} = xy = e^{\log(xy)}$
Da e^x injektiv folgt Behauptung.
- (iii) $\lim_{x \rightarrow -\infty} e^x = 0 \Leftrightarrow \lim_{x \rightarrow 0^+} \log x = -\infty$
 $\lim_{x \rightarrow \infty} e^x = \infty \Leftrightarrow \lim_{x \rightarrow \infty} \log x = \infty$
- (iv) e^x diffbar und $(e^x)' > 0$, also insbesondere $\neq 0$
 $\xRightarrow{\text{Satz 6}} \log x$ ist diffbar, mit

$$(\log x)' = \frac{1}{\exp'(\log(x))} = \frac{1}{\exp(\log(x))} = \frac{1}{x}. \quad (4.101)$$

4.9 Weitere elementare Funktionen

Allgemeine Exponentialfunktion

Für $a > 0$, definieren wir

$$\begin{aligned} f : \mathbb{R} &\rightarrow \mathbb{R}^+ \\ x &\mapsto a^x \end{aligned} \quad (4.102)$$

durch

$$f(x) = a^x := e^{x \log a}. \quad (4.103)$$

Es gilt dann

$$\log(a^x) = \log(e^{x \log a}) = x \log a. \quad (4.104)$$

Umkehrfunktion: Logarithmus zur Basis a

$$\log_a x := \frac{\log x}{\log a} \quad (4.105)$$

für $a > 0$, $a \neq 1$, $x > 0$. Denn, z.B.,

$$\log_a a^x = \frac{\log(a^x)}{\log a} = \frac{x \log a}{\log a} = x. \quad (4.106)$$

Also: $\log_e = \log = \ln$.

Auch gebräuchlich: $\text{lb} := \log_2$, $\text{lg} := \log_{10}$.

Allgemeine Potenz

$$x^\alpha := e^{\alpha \log x} \quad \text{für } \alpha \in \mathbb{R}, \quad x > 0. \quad (4.107)$$

Umkehrfunktion:

$$x^{\frac{1}{\alpha}} \quad \text{für } \alpha \neq 0, \quad x > 0. \quad (4.108)$$

Hyperbolische Funktionen. Siehe Übungen.

Eigenschaften und Rechenregeln.

1. $(x^\alpha)^\beta = x^{\alpha\beta}$
2. $x^{\alpha+\beta} = x^\alpha x^\beta$
3. $\log(x^\alpha) = \alpha \log x$

(dort, wo die Ausdrücke definiert sind)

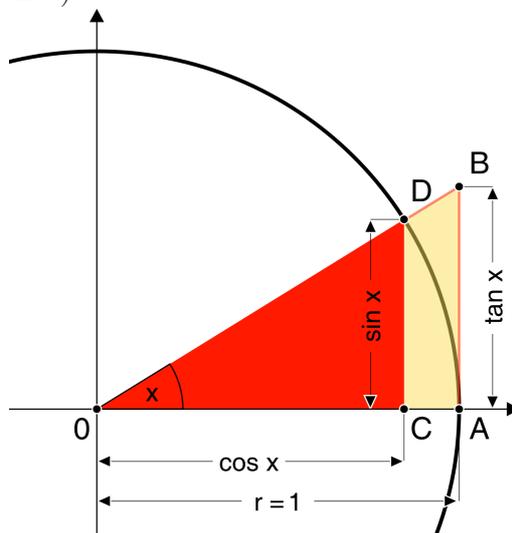
Bemerkungen zur Notation:

$$x^{\alpha\beta} \equiv x^{(\alpha\beta)}, \quad \log x^\alpha \equiv \log(x^\alpha) \quad (4.109)$$

4.10 Trigonometrische Funktionen

Einheitskreis (Kreis mit Radius 1)

Umfang 2π (Definition von π)



definiert $\sin x$ und $\cos x$ für $0 \leq x < 2\pi$
 2π -periodisch fortgesetzt, d.h.

$$\sin(x + 2\pi n) = \sin(x) \quad \forall n \in \mathbb{Z}. \quad (4.110)$$

(ebenso für \cos)

$$\tan x := \frac{\sin x}{\cos x} \quad \text{und} \quad \cot x = \frac{\cos x}{\sin x}, \quad (4.111)$$

wo definiert.

Spezielle Werte:

$$\begin{aligned} \sin 0 &= 0, & \cos 0 &= 1 \\ \sin \frac{\pi}{2} &= 1, & \cos \frac{\pi}{2} &= 0 \end{aligned} \quad (4.112)$$

Translationen:

$$\sin(x + \pi) = -\sin x \quad \cos(x + \pi) = -\cos x \quad (4.113)$$

$$\sin\left(x + \frac{\pi}{2}\right) = \cos x \quad \cos\left(x + \frac{\pi}{2}\right) = -\sin x \quad (4.114)$$

Weitere wichtige Beziehungen:

1. $\sin^2 x + \cos^2 x = 1 \quad \forall x$ (Pythagoras)
 und damit auch $|\sin x| \leq 1, |\cos x| \leq 1 \quad \forall x \in \mathbb{R}$
2. $\sin(-x) = -\sin x, \quad \cos(-x) = \cos x$

3. Für $0 < x < \frac{\pi}{2}$ gilt (siehe Abbildung):

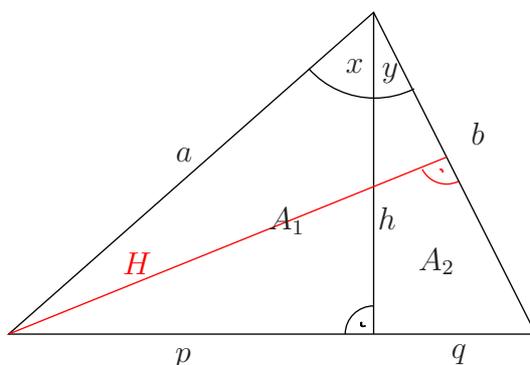
$$\sin x < x < \tan x .$$

Satz 8. (Additionstheoreme)

$$\begin{aligned} \sin(x + y) &= \sin x \cos y + \cos x \sin y \\ \cos(x + y) &= \cos x \cos y - \sin x \sin y \end{aligned} \tag{4.115}$$

Beweis:

Laut Translationseigenschaften genügt es, die Additionstheoreme für $x, y > 0, x + y < \frac{\pi}{2}$ zu beweisen.



$$\begin{aligned} h &= a \cos x, & h &= b \cos y \\ p &= a \sin x, & q &= b \sin y \\ A_1 &= \frac{ph}{2} = \frac{ab \sin x \cos y}{2}, & A_2 &= \frac{qh}{2} = \frac{ab \cos x \sin y}{2} \end{aligned} \tag{*}$$

$$A_1 + A_2 = \frac{Hb}{2} = \frac{ab \sin(x + y)}{2} \tag{+}$$

(*) und (+) \Rightarrow Behauptung

$$\begin{aligned} \cos(x + y) &= \sin(x + y + \frac{\pi}{2}) \\ &= \sin x \cos(y + \frac{\pi}{2}) + \cos x \sin(y + \frac{\pi}{2}) \\ &= \sin x (-\sin y) + \cos x \cos y \end{aligned} \tag{4.116}$$

□

Korollar zu Satz 8.

$$(\sin x)' = \cos x \quad \text{und} \quad (\cos x)' = -\sin x \tag{4.117}$$

Beweis: (für $\sin x$; $\cos x$ folgt aus $\sin(x + \frac{\pi}{2}) = \cos x$)

$$\begin{aligned} \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sin(x+h) - \sin x}{h} &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sin x \cos h + \cos x \sin h - \sin x}{h} \\ &= \sin x \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\cos h - 1}{h} + \cos x \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sin h}{h} \end{aligned} \quad (4.118)$$

reduziert auf Ableitungen von \sin und \cos bei Null.

Aus Beziehung 3 folgt für $0 < x < \frac{\pi}{2}$ (Kehrwerte):

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sin x} &> \frac{1}{x} > \frac{1}{\tan x} \\ \Rightarrow 1 &> \frac{\sin x}{x} > \cos x \xrightarrow{x \rightarrow 0} 1 \end{aligned} \quad (4.119)$$

und damit

$$\lim_{h \rightarrow 0+} \frac{\sin h}{h} = 1 \quad (\text{analog für } h \rightarrow 0-) \quad (4.120)$$

Der andere Limes wird Null:

$$\begin{aligned} \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\cos h - 1}{h} &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sqrt{1 - \sin^2 h} - 1}{h} \frac{\sqrt{1 - \sin^2 h} + 1}{\sqrt{1 - \sin^2 h} + 1} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{(1 - \sin^2 h) - 1}{h(\sqrt{1 - \sin^2 h} + 1)} \\ &= - \left(\lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sin h}{h} \right) \cdot \left(\lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sin h}{\sqrt{1 - \sin^2 h} + 1} \right) \\ &= -1 \cdot \frac{0}{2} = 0 \end{aligned} \quad (4.121)$$

□

Die Umkehrfunktion des *Sinus* heißt *Arcus Sinus*, z.B.

$$\arcsin : [-1, 1] \rightarrow \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right] \quad (\text{Hauptzweig}) \quad (4.122)$$

... anderer Zweig: $[-1, 1] \rightarrow \left[\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}\right]$

... viele Zweige: $[-1, 1] \rightarrow \left[\frac{2n-1}{2}\pi, \frac{2n+1}{2}\pi\right], n \in \mathbb{Z}$

Hauptzweige der anderen trigonometrischen Funktionen:

$$\begin{aligned} \arccos &: [-1, 1] \rightarrow [0, \pi] \\ \arctan &: \mathbb{R} \rightarrow \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right) \\ \operatorname{arccot} &: \mathbb{R} \rightarrow (0, \pi) \end{aligned} \quad (4.123)$$

Ableitungen (Hauptzweige): (mit Satz 6)

$$\begin{aligned}
 (\arcsin x)' &= \frac{1}{\cos(\arcsin(x))} = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} \\
 (\arccos x)' &= \frac{1}{-\sin(\arccos(x))} = -\frac{1}{\sqrt{1-x^2}} \\
 (\tan x)' &= \left(\frac{\sin x}{\cos x}\right)' = \frac{\cos^2 x + \sin^2 x}{\cos^2 x} = \frac{1}{\cos^2 x} \\
 &= 1 + \tan^2 x \\
 (\arctan x)' &= \frac{1}{1 + \tan^2(\arctan x)} = \frac{1}{1 + x^2}
 \end{aligned} \tag{4.124}$$

4.11 Potenzreihen

Beispiel: Die endliche geometrische Reihe war ($x \neq 1$)

$$\sum_{\nu=0}^n x^\nu = \frac{1 - x^{n+1}}{1 - x}. \tag{4.125}$$

Für $|x| < 1$ gilt $\lim_{n \rightarrow \infty} x^n = 0$, und damit

$$\sum_{\nu=0}^{\infty} x^\nu = \frac{1}{1 - x}, \tag{4.126}$$

wobei $\sum_{\nu=0}^{\infty} a_\nu := \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{\nu=0}^n a_\nu$, d.h. man untersucht das Verhalten

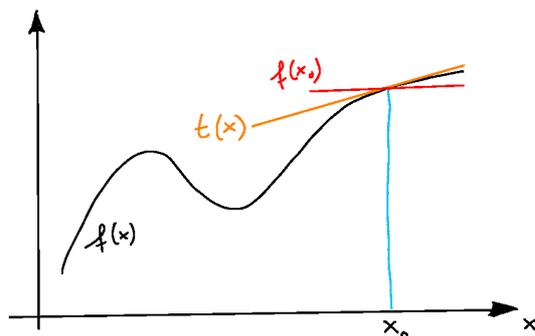
der Folge der Partialsummen, $s_n := \sum_{\nu=0}^n a_\nu$ für $n \rightarrow \infty$.

$$\text{Reihe: } \sum_{n=m}^{\infty} a_n \quad (\text{Summe mit Grenze } \infty) \tag{4.127}$$

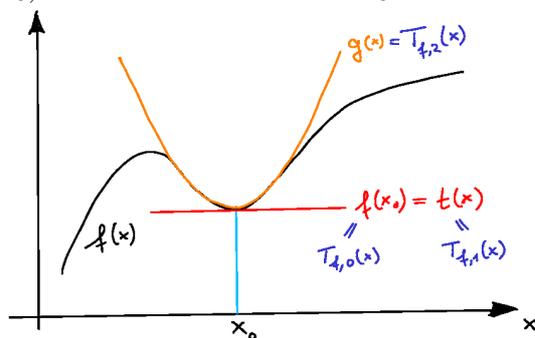
$$\text{Potenzreihe in } x: \sum_{n=m}^{\infty} a_n x^n$$

Allgemeine Idee: Suche Näherung für Funktion $f(x)$ um die Stelle x_0 (so oft diffbar wie nötig):

- f stetig in $x_0 \Rightarrow$ kann dort nicht springen – einfachste Näherung: $f(x) \approx f(x_0)$ für x in der Nähe von x_0



- f diffbar \Rightarrow Tangente an der Stelle x_0 existiert – etwas bessere Näherung: $f(x) \approx f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0)$ für x in der Nähe von x_0



- Näherung, $g(x)$, soll auch Änderung der Steigung (f'') berücksichtigen – Ansatz:

$$g(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + c(x - x_0)^2 \quad (4.128)$$

Offensichtlich gilt bereits $f(x_0) = g(x_0)$ und $f'(x_0) = g'(x_0)$. Bestimme c aus Forderung

$$f''(x_0) \stackrel{!}{=} g''(x_0) \quad (4.129)$$

$$g''(x) = 2c \quad \Rightarrow \quad c = \frac{f''(x_0)}{2}. \quad (4.130)$$

Höhere Näherungen: Ansatz,

$$T_{f,n}(x) = \sum_{\nu=0}^n c_{\nu}(x - x_0)^{\nu} \quad (4.131)$$

und bestimme die c_{ν} aus Forderungen

$$f^{(\mu)}(x_0) \stackrel{!}{=} T_{f,n}^{(\mu)}(x_0), \quad \mu = 0, \dots, n \quad (4.132)$$

$$T_{f,n}^{(\mu)}(x) = \sum_{\nu=\mu}^n \nu(\nu-1)\cdots(\nu-\mu+1) c_{\nu} (x - x_0)^{\nu-\mu} \quad (4.133)$$

$$\Rightarrow T_{f,n}^{(\mu)}(x_0) = \mu! c_{\mu}$$

d.h. wir erhalten

$$c_\nu = \frac{f^{(\nu)}(x_0)}{\nu!} \quad (4.134)$$

Man nennt

$$T_{f,n}(x) = \sum_{\nu=0}^n \frac{f^{(\nu)}(x_0)}{\nu!} (x - x_0)^\nu \quad (4.135)$$

das n -te Taylor-Polynom von f und

$$T_f(x) = \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{f^{(\nu)}(x_0)}{\nu!} (x - x_0)^\nu \quad (4.136)$$

die (formale) Taylor-Reihe von f .

Fragen:

- Ist $T_{f,n}(x)$ eine gute Näherung für $f(x)$ in der Nähe von x_0 ?
- Konvergiert $T_f(x)$? (Und für welche x , und gegen welchen Wert?)

Vermutung: Nächster Term der Entwicklung als Maß für den Fehler ...?

Satz 9. (Satz von Taylor)

Sei $f : I \rightarrow \mathbb{R}$, $I = (a, b) \subseteq \mathbb{R}$, $n + 1$ mal diffbar. Dann gilt für $x, x_0 \in I$

$$f(x) = \sum_{\nu=0}^n \frac{f^{(\nu)}(x_0)}{\nu!} (x - x_0)^\nu + R_n(x), \quad (4.137)$$

und für $x > x_0 \exists \xi \in (x_0, x)$ (für $x < x_0 \exists \xi \in (x, x_0)$) mit

$$R_n(x) = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!} (x - x_0)^{n+1}. \quad (4.138)$$

R_n heißt (Lagrangesches) Restglied, x_0 heißt Entwicklungspunkt.

(ohne Beweis)

Bemerkungen:

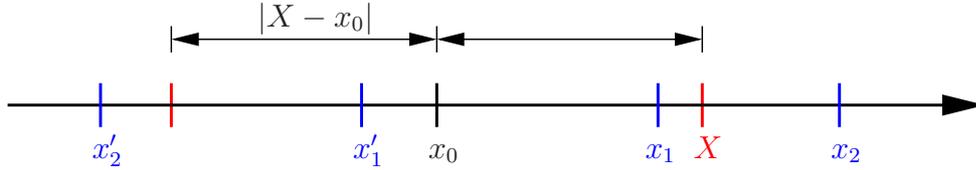
1. Insbesondere gilt $f(x) = T_{f,n}(x) + o((x - x_0)^n)$.
2. Es gibt auch andere Restgliedformeln (z.B. später Integralrestglied, dann mit Beweis).
3. $T_f(x)$ konvergiert also genau dann gegen $f(x)$, wenn

$$\lim_{n \rightarrow \infty} R_n(x) = 0 \quad \text{bzw. wenn} \quad \lim_{n \rightarrow \infty} |R_n(x)| = 0. \quad (4.139)$$

4. Falls $\lim_{n \rightarrow \infty} |R_n(x)| > 0$ (oder gar nicht existent), dann divergiert $T_f(x)$ (meistens) oder konvergiert gegen eine andere Funktion (selten).

5. Sei $|x_1 - x_0| < |X - x_0| < |x_2 - x_0|$, dann gilt:

$$\begin{aligned} \text{aus } \lim_{n \rightarrow \infty} |R_n(X)| = 0 &\Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} |R_n(x_1)| = 0 \\ \text{aus } \lim_{n \rightarrow \infty} |R_n(X)| > 0 &\Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} |R_n(x_2)| > 0 \end{aligned} \quad (4.140)$$



d.h. man findet einen Radius $R \geq 0$ mit

$$\begin{aligned} T_f(x) &= f(x) \quad \forall |x - x_0| < R \\ T_{f,n}(x) &\not\rightarrow f(x) \quad \forall |x - x_0| > R \end{aligned} \quad (4.141)$$

6. Sei f in x_1 singulär (Pol, ...), dann gilt $R \leq |x_0 - x_1|$.

Beispiele:

1. $|x| < 1$:

$$\frac{1}{1-x} = \sum_{\nu=0}^{\infty} x^\nu \quad (\text{s.o.}) \quad (4.142)$$

Für $|x| > 1$ divergiert die Reihe (Summanden wachsen an).

2. $f(x) = e^x \Rightarrow f^{(\nu)}(x) = e^x$

$$T_f(x) = \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{f^{(\nu)}(0)}{\nu!} x^\nu = \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{x^\nu}{\nu!} \quad (4.143)$$

$|x| < K \in \mathbb{R}^+$:

$$\begin{aligned} |R_n(x)| &= \left| \frac{f^{n+1}(\xi)}{(n+1)!} x^{n+1} \right| = \left| e^\xi \frac{x \cdot x \cdots x}{1 \cdot 2 \cdots (n+1)} \right| \\ &\stackrel{K < N \leq n}{\leq} e^K \left| \frac{x \cdot x \cdots x}{1 \cdot 2 \cdots (N-1)} \frac{x \cdot x \cdots x}{N \cdot (N+1) \cdots (n+1)} \right| \\ &\leq \underbrace{e^K \left| \frac{x^{N-1}}{(N-1)!} \right|}_{\text{hängt nicht von } n \text{ ab}} \underbrace{\left(\frac{K}{N} \right)^{n-N+2}}_{\xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0, \text{ da } K/N < 1} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0 \end{aligned} \quad (4.144)$$

Also

$$e^x = \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{x^\nu}{\nu!} \quad \forall x \in \mathbb{R}. \quad (4.145)$$

3. $f(x) = \log(1+x)$, $|x| < 1$

$$f'(x) = \frac{1}{1+x} = \sum_{\nu=0}^{\infty} (-x)^{\nu} = \sum_{\nu=0}^{\infty} (-1)^{\nu} x^{\nu} \quad (4.146)$$

Da $\sum_{\nu=0}^{\infty} (-1)^{\nu} \frac{x^{\nu+1}}{\nu+1} + c$ gliedweise differenziert $f'(x)$ ergibt, vermuten wir

$$\log(1+x) = c - \sum_{\nu=1}^{\infty} (-1)^{\nu} \frac{x^{\nu}}{\nu}, \quad (4.147)$$

und folgern aus $f(0) = \log 1 = 0$, dass $c = 0$.

Bemerkung: Falls Reihe hübsch, darf man gliedweise differenzieren (und integrieren); eigentlich braucht man gleichmäßige Konvergenz (machen wir aber nicht). Für Taylorreihen und x innerhalb des Konvergenzradius' geht alles gut.

4. **Binomische Reihe:** $f(x) = (1+x)^{\alpha}$, $\alpha \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$

$$f^{(\nu)}(x) = \alpha(\alpha-1) \cdots (\alpha-\nu+1) (1+x)^{\alpha-\nu} \quad \Rightarrow \quad \frac{f^{(\nu)}(0)}{\nu!} = \binom{\alpha}{\nu} \quad (4.148)$$

also

$$(1+x)^{\alpha} = \sum_{\nu=0}^{\infty} \binom{\alpha}{\nu} x^{\nu}, \quad |x| < 1 \quad (4.149)$$

Spezialfälle:

- $\alpha = n \in \mathbb{N}$: binomischer Satz (sogar für alle $x \in \mathbb{R}$)
- $\alpha = -1$: geometrische Reihe,

$$\binom{-1}{\nu} = \frac{(-1)(-2) \cdots (-1-\nu+1)}{\nu!} = (-1)^{\nu} \quad (4.150)$$

- $\alpha = \frac{1}{2}$:

$$\sqrt{1+x} = \sum_{\nu=0}^{\infty} \binom{1/2}{\nu} x^{\nu}, \quad |x| < 1 \quad (4.151)$$

5. $\sin^{(2\nu)}(x) = (-1)^{\nu} \sin x$, $\sin^{(2\nu+1)}(x) = (-1)^{\nu} \cos x$, also

$$\sin x = \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{(-1)^{\nu}}{(2\nu+1)!} x^{2\nu+1} \quad \forall x \in \mathbb{R} \quad (4.152)$$

analog:

$\cos^{(2\nu)}(x) = (-1)^{\nu} \cos x$, $\cos^{(2\nu+1)}(x) = (-1)^{\nu+1} \sin x$, also

$$\cos x = \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{(-1)^{\nu}}{(2\nu)!} x^{2\nu} \quad \forall x \in \mathbb{R} \quad (4.153)$$

6.

$$(\arctan x)' = \frac{1}{1+x^2} = \sum_{\nu=0}^{\infty} (-1)^\nu x^{2\nu}, \quad |x| < 1 \quad (4.154)$$

folgere

$$\arctan x = \sum_{\nu=0}^{\infty} (-1)^\nu \frac{x^{2\nu+1}}{2\nu+1} + c \quad (4.155)$$

mit $c = 0$ da $\arctan 0 = 0$.

7.

$$\frac{\sin x}{x} = \frac{1}{x} \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{(-1)^\nu}{(2\nu+1)!} x^{2\nu+1} = \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{(-1)^\nu}{(2\nu+1)!} x^{2\nu} = 1 - \frac{x^2}{6} + o(x^2) \quad (4.156)$$

8. Grenzwerte berechnen...

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x^2 \sin^4 x}{(\cos x - 1)^3} &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x^2 (x + o(x))^4}{(1 - \frac{x^2}{2} + o(x^2) - 1)^3} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x^2 (x^4 + o(x^4))}{-\frac{x^6}{8} + o(x^6)} \\ &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x^6 + o(x^6)}{-\frac{x^6}{8} + o(x^6)} = -8 \end{aligned} \quad (4.157)$$

... besser als sechsmal l'Hospital!

04.12.2013

9.

$$\begin{aligned} \frac{e^x}{1-x} &= \left(\sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{x^\nu}{\nu!} \right) \left(\sum_{\mu=0}^{\infty} x^\mu \right), \quad \text{für } |x| < 1 \text{ (wg. geom. Reihe)} \\ &= \left(1 + x + \frac{x^2}{2} + o(x^2) \right) (1 + x + x^2 + o(x^2)) \\ &= 1 + 2x + \frac{5}{2}x^2 + o(x^2), \quad x \rightarrow 0 \end{aligned} \quad (4.158)$$

allgemein (**Cauchy-Produkt**):

$$\begin{aligned} \left(\sum_{\nu=0}^{\infty} a_\nu x^\nu \right) \left(\sum_{\mu=0}^{\infty} b_\mu x^\mu \right) &= \sum_{\nu=0}^{\infty} \sum_{\mu=0}^{\infty} a_\nu b_\mu x^{\nu+\mu} \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{\nu=0}^n a_\nu b_{n-\nu} x^n \end{aligned} \quad \begin{array}{l} n := \nu + \mu \\ n: 0 \dots \infty \\ \nu: 0 \dots n \\ \mu = n - \nu \end{array} \quad (4.159)$$

Erlaubt, falls alles hübsch (beide Reihen absolut konvergent,

d.h. z.B. $\sum_{\nu=0}^{\infty} |a_{\nu} x^{\nu}| < \infty$). Damit nochmal

$$\begin{aligned} \frac{e^x}{1-x} &= \left(\sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{x^{\nu}}{\nu!} \right) \left(\sum_{\mu=0}^{\infty} x^{\mu} \right), \quad |x| < 1 \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{\nu=0}^n \frac{1}{\nu!} x^n \\ &= \frac{1}{0!} + \left(\frac{1}{0!} + \frac{1}{1!} \right) x + \left(\frac{1}{0!} + \frac{1}{1!} + \frac{1}{2!} \right) x^2 + o(x^2) \end{aligned} \quad (4.160)$$

4.12 Kurvendiskussion

- Definitionsbereich
- Verhalten am Rand des Definitionsbereichs
(Asymptoten, Definitionslücken, stetige Fortsetzbarkeit, ...)
- Nullstellen
- Extrema
- Skizze

Beispiele:

1. $f(x) = \frac{1-x^4}{1+x^4}$ definiert $\forall x \in \mathbb{R}$

Spiegelsymmetrie (Spiegelung an y-Achse), denn $f(-x) = f(x)$

Verhalten am "Rand" des Definitionsbereichs: $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} f(x) = -1$

Nullstellen: $f(x) = 0 \Leftrightarrow x^4 = 1 \Leftrightarrow x = \pm 1$

Extrempunkte:

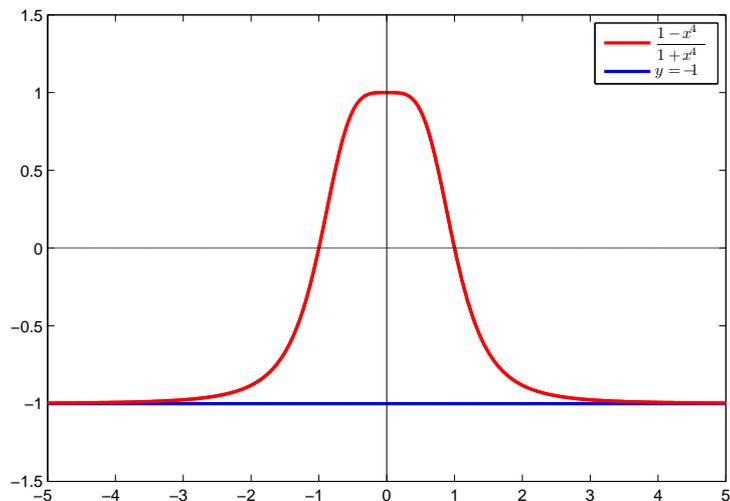
$$\begin{aligned} f'(x) &= \frac{-4x^3(1+x^4) - (1-x^4)4x^3}{(1+x^4)^2} \\ &= \frac{-8x^3}{(1+x^4)^2} \stackrel{!}{=} 0 \Leftrightarrow x = 0 \end{aligned} \quad (4.161)$$

z.B. Taylorentwicklung:

$$f(x) \stackrel{\text{geom.R.}}{=} (1-x^4)(1-x^4 + \underbrace{x^8 - x^{12} + \dots}_{=o(x^4)}) = 1 - 2x^4 + o(x^4) \quad (4.162)$$

also Hochpunkt $(0, 1)$.

Skizze:



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

Definitionsbereich: $\mathbb{R} \setminus \{-1, 1\}$

Zähler bei $x = -1$ auch Null:

$$\begin{array}{r} (x^3 + 1) : (x + 1) = x^2 - x + 1 \\ \underline{-x^3 - x^2} \\ -x^2 \\ \underline{x^2 + x} \\ x + 1 \\ \underline{-x - 1} \\ 0 \end{array} \quad (4.163)$$

stetig fortsetzbar durch $f(-1) := -\frac{3}{2}$ und damit

$$f(x) = \frac{x^2 - x + 1}{x - 1} \quad (4.164)$$

Pol (erster Ordnung, also mit Vorzeichenwechsel) bei $x = 1$,
d.h. $f(x) \sim \frac{1}{x-1} \rightarrow \pm\infty$ für $x \rightarrow 1\pm$

Verhalten für große $|x|$:

entweder durch Polynomdivision...

$$\begin{array}{r} (x^2 - x + 1) : (x - 1) = x + \frac{1}{x - 1} \\ \underline{-x^2 + x} \\ 1 \end{array} \quad (4.165)$$

...oder durch Taylorentwicklung

$$\begin{aligned}
 f(x) &= \frac{x - 1 + \frac{1}{x}}{1 - \frac{1}{x}} \\
 &\stackrel{|x|>1}{=} \left(x - 1 + \frac{1}{x}\right) \left(1 + \frac{1}{x} + \frac{1}{x^2} + \dots\right) \\
 &= x + (1 - 1) + \frac{1 - 1 + 1}{x} + \dots \\
 &= x + \frac{1}{x} + \dots
 \end{aligned} \tag{4.166}$$

also $f(x) \sim x \rightarrow \pm\infty$ für $x \rightarrow \pm\infty$

Nullstellen:

$$f(x) = 0 \Leftrightarrow x^2 - x + 1 = 0 \Leftrightarrow x = \frac{1 \pm \sqrt{1-4}}{2} \notin \mathbb{R} \tag{4.167}$$

keine (in \mathbb{R})

Ableitung:

$$f'(x) = \frac{(2x-1)(x-1) - (x^2-x+1)}{(x-1)^2} = \frac{2x^2 - 3x + 1 - x^2 + x - 1}{(x-1)^2} = \frac{x^2 - 2x}{(x-1)^2} \tag{4.168}$$

Extrema: $f' = 0 \Leftrightarrow x = 0$ oder $x = 2$

Lokales Maximum $f(0) = -1$, lokales Minimum $f(2) = 3$

Warum (Min/Max)? 4 Möglichkeiten:

(i) wegen Stetigkeit, Pol und Asymptotik

(ii) Untersuche VZ von $f'(x) = \frac{x(x-2)}{(x-1)^2}$:

bei 0: $+$ \rightarrow $-$ also Hochpunkt

bei 2: $-$ \rightarrow $+$ also Tiefpunkte

(iii) Untersuche f'' :

$$\begin{aligned}
 f''(0) < 0 &\Rightarrow \text{Hochpunkt} \\
 f''(2) > 0 &\Rightarrow \text{Tiefpunkt}
 \end{aligned} \tag{4.169}$$

Vorsicht: Hinreichend, nicht notwendig – falls $f'' = 0$ folgt gar nichts!

(iv) Taylorentwicklung

um Null:

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{x^2 - x + 1}{x - 1} = \frac{-1 + x - x^2}{1 - x} \\ &= (-1 + x - x^2) (1 + x + x^2 + x^3 + \dots) \\ &= -1 + (-x + x) + (-x^2 + x^2 - x^2) + \dots \\ &= -1 - x^2 + \dots \end{aligned} \tag{4.170}$$

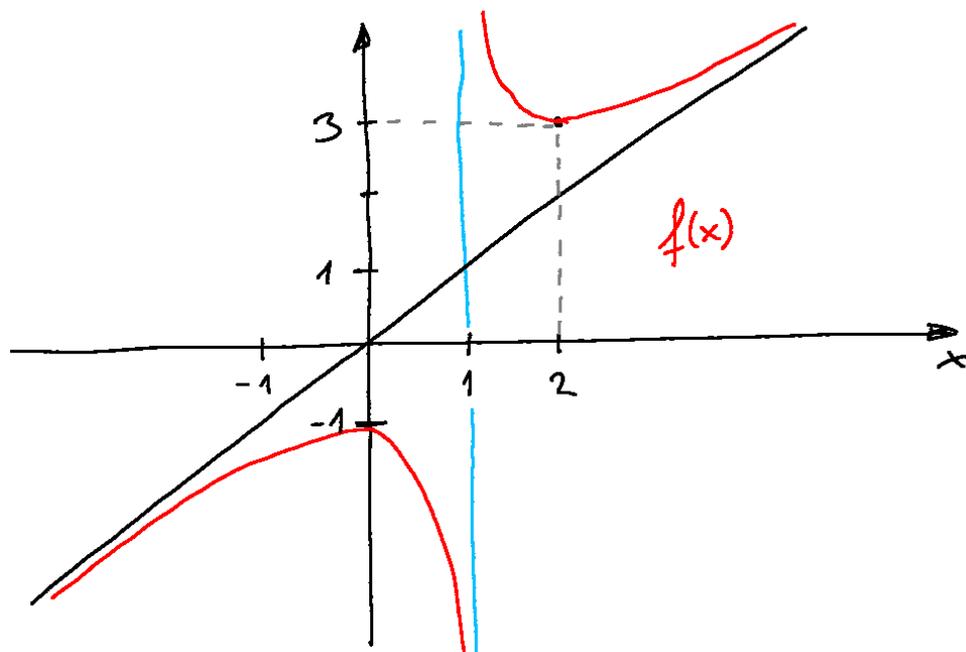
also Hochpunkt $(0, -1)$

um 2:

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{x^2 - x + 1}{x - 1} \\ &= \frac{(x - 2)^2 + 4x - 4 + x + 1}{x - 2 + 1} \\ &= \frac{(x - 2)^2 + 3(x - 2) + 3}{1 + (x - 2)} \\ &= (3 + 3(x - 2) + (x - 2)^2) (1 - (x - 2) + (x - 2)^2 - (x - 2)^3 + \dots) \\ &= 3 + (3 - 3)(x - 2) + (3 - 3 + 1)(x - 2)^2 + \dots \\ &= 3 + (x - 2)^2 + \dots \end{aligned} \tag{4.171}$$

also Tiefpunkt $(2, 3)$.

Skizze:



$$3. f : x \mapsto \sqrt{x - \frac{1}{x}}$$

Definitionsbereich: $x \neq 0$ und $x - \frac{1}{x} \geq 0 \Leftrightarrow x \geq \frac{1}{x}$

(i) für $x > 0$: $x^2 \geq 1 \Rightarrow x \geq 1$

(ii) für $x < 0$: $x^2 \leq 1 \Rightarrow x \geq -1$

also: Definitionsbereich $[-1, 0) \cup [1, \infty)$

Verhalten am Rand des Definitionsbereichs / Nullstellen:

$$f(-1) = 0$$

$$f(x) \sim \sqrt{-\frac{1}{x}} \rightarrow \infty \text{ für } x \rightarrow 0-$$

$$f(1) = 0$$

$$f(x) \sim \sqrt{x} \rightarrow \infty \text{ für } x \rightarrow \infty$$

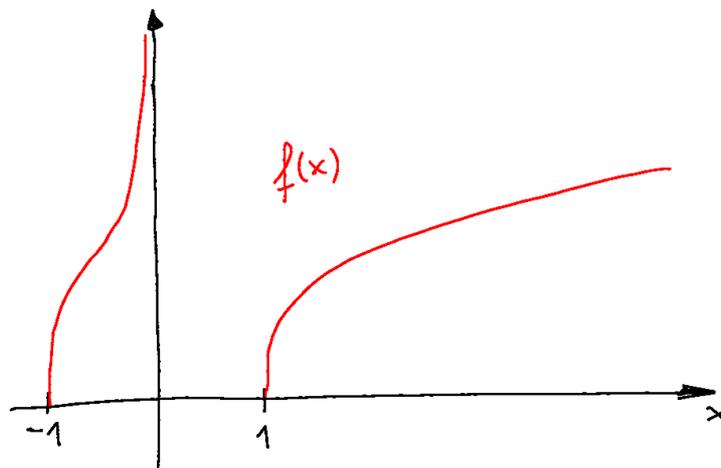
Ableitung:

$$f'(x) = \frac{1 + \frac{1}{x^2}}{2\sqrt{x - \frac{1}{x}}} > 0 \quad \forall x \in \mathbb{D} \quad (4.172)$$

...am Rand des Definitionsbereichs:

$$\lim_{x \rightarrow -1+} f'(x) = \infty, \quad \lim_{x \rightarrow 1+} f'(x) = \infty. \quad (4.173)$$

Skizze:



5 Vektorrechnung

5.1 Vektorräume

Definition: (Gruppe)

Sei $G \neq \emptyset$ eine Menge und \circ eine Verknüpfung $\circ : G \times G \rightarrow G$.

(G, \circ) heißt Gruppe falls gilt:

(G1) aus $a, b \in G \Rightarrow a \circ b \in G$ (Abgeschlossenheit)

(folgt eigentlich bereits aus $\circ : G \times G \rightarrow G$, ist aber gut, das explizit festzuhalten)

(G2) $(a \circ b) \circ c = a \circ (b \circ c) \forall a, b, c \in G$ (Assoziativität)

(G3) $\exists e \in G$ mit $a \circ e = a = e \circ a \forall a \in G$ (neutrales Element)

(G4) für jedes $a \in G \exists a^{-1} \in G$ mit $a \circ a^{-1} = e = a^{-1} \circ a$ (inverses Element)

(wobei e das neutrale Element aus (G3) ist)

Definition: (abelsche Gruppe)

Eine Gruppe (G, \circ) heißt kommutativ oder abelsch falls zusätzlich gilt:

(G5) $a \circ b = b \circ a \forall a, b \in G$ (Kommutativität)

Eigenschaften: (von Gruppen)

1. Das neutrale Element e ist eindeutig bestimmt.

Beweis: Annahme $\exists \tilde{e} \neq e$ mit $\forall a \in G$:

$$\begin{array}{ll}
 & \tilde{e} \circ a = a \quad \quad \quad | \circ a^{-1} \text{ von rechts} \\
 \Leftrightarrow & (\tilde{e} \circ a) \circ a^{-1} = a \circ a^{-1} \\
 \stackrel{(G2)}{\Leftrightarrow} & \tilde{e} \circ (a \circ a^{-1}) = a \circ a^{-1} \\
 \stackrel{(G4)}{\Leftrightarrow} & \tilde{e} \circ e = e \\
 \stackrel{(G3)}{\Leftrightarrow} & \tilde{e} = e \quad \quad \quad \text{Widerspruch}
 \end{array} \tag{5.1}$$

2. Zu jedem $a \in G$ ist das inverse Element eindeutig bestimmt.

Beweis: Annahme $\exists b \neq a^{-1}$ mit

$$\begin{array}{ll}
 & b \circ a = e \quad \quad \quad | \circ a^{-1} \text{ von rechts} \\
 \Leftrightarrow & (b \circ a) \circ a^{-1} = e \circ a^{-1} \\
 \stackrel{(G2)}{\Leftrightarrow} & b \circ (a \circ a^{-1}) = e \circ a^{-1} \\
 \stackrel{(G4)}{\Leftrightarrow} & b \circ e = e \circ a^{-1} \\
 \stackrel{(G3)}{\Leftrightarrow} & b = a^{-1} \quad \quad \quad \text{Widerspruch}
 \end{array} \tag{5.2}$$

3. Gleichungen lassen sich eindeutig lösen:

$\forall a, b \in G \exists x, y \in G$, so dass $a \circ x = b$ und $y \circ a = b$.

Beweis: $x = a^{-1} \circ b$ und $y = b \circ a^{-1}$ tun's – Eindeutigkeit?

Annahme: $\exists z \neq y$ mit

$$\begin{aligned}
& z \circ a = b && | \circ a^{-1} \text{ von rechts} \\
\Leftrightarrow & z \circ a \circ a^{-1} = b \circ a^{-1} && (5.3) \\
\Leftrightarrow & z = b \circ a^{-1} = y && \text{Widerspruch}
\end{aligned}$$

Bemerkung: für nicht-abelsche Gruppen gilt i.A. $x \neq y$.

Beispiele

1. $(\mathbb{Z}, +)$: $e = 0$, $a^{-1} = -a$ für $a \in \mathbb{Z}$
natürlich ebenso $(\mathbb{R}, +)$ aber nicht $(\mathbb{N}, +)$!
2. $(\mathbb{Q} \setminus \{0\}, \cdot)$: $e = 1$, für $\mathbb{Q} \ni x = \frac{p}{q}$ mit $p, q \in \mathbb{Z}$ (vollständig gekürzt) ist $x^{-1} = \frac{q}{p}$
ebenso $(\mathbb{R} \setminus \{0\}, \cdot)$ aber nicht $(\mathbb{Z} \setminus \{0\}, \cdot)$!
3. (Menge aller Polynome vom Grad $\leq n$, $+$)
4. G : Menge aller Symmetrieoperationen (Drehungen, Spiegelungen etc.), die ein bestimmtes Objekt (Atom, Molekül, ...) invariant lassen.
 \circ : Nacheinanderausführen der Operationen.

Definition: (Körper)

Sei $K \neq \emptyset$ eine Menge mit zwei Verknüpfungen, $+$: $K \times K \rightarrow K$ und \cdot : $K \times K \rightarrow K$.

$(K, +, \cdot)$ heißt Körper, falls gilt:

(K1) $(K, +)$ ist eine abelsche Gruppe mit neutralem Element 0.

(K2) $(K \setminus \{0\}, \cdot)$ ist ebenfalls eine abelsche Gruppe.

(K3) $(a + b) \cdot c = a \cdot c + b \cdot c \forall a, b \in K$ und $c \in K \setminus \{0\}$ (Distributivität)

Bemerkungen:

1. Nenne das zu $a \in K$ additiv inverse Element $(-a)$.
2. Jeder Körper hat mindestens zwei Elemente, nämlich $0 \in K$ und, da $(K \setminus \{0\}, \cdot)$ Gruppe ist, $\exists e \in K$, $e \neq 0$ (multiplikativ neutrales Element).
3. Multiplikation mit 0: $a \in K \setminus \{0\}$

$$0 = e + (-e) \quad | \cdot a \quad (5.4)$$

$$0 \cdot a = (e + (-e)) \cdot a \stackrel{(K3)}{=} a + (-e) \cdot a =: \tilde{a} \in K \quad (5.5)$$

Annahme: $\tilde{a} \in K \setminus \{0\} \Rightarrow \tilde{a} \cdot a^{-1} = e + (-e) = 0 \notin K \setminus \{0\}$ – Widerspruch!

$\Rightarrow \tilde{a} = 0$ also $0 \cdot a = 0$.

außerdem folgt wegen $a + (-e) \cdot a = 0$, dass $(-a) = (-e) \cdot a$.

4. Üblicherweise nennen wir $e = 1$ (multiplikativ neutrales Element).

5. aus $a \cdot b = 0 \Rightarrow a = 0$ oder $b = 0$, denn
anderfalls $a, b \in K \setminus \{0\} \Rightarrow a \cdot b \in K \setminus \{0\}$ da Gruppe – Widerspruch!

Beispiele

1. $(\mathbb{Q}, +, \cdot)$, $(\mathbb{R}, +, \cdot)$, oder auch: $(\mathbb{C}, +, \cdot)$

2. $\mathbb{Z}_2 = \{0, 1\}$ mit $(+, \cdot)$ modulo 2, d.h.

$$0 + 0 = 0, \quad 1 + 0 = 1, \quad 1 + 1 = 0 \quad (5.6)$$

$$0 \cdot 0 = 0, \quad 0 \cdot 1 = 0, \quad 1 \cdot 1 = 1 \quad (5.7)$$

$$\Rightarrow (-1) = 1 \text{ und } 1^{-1} = 1$$

3. $\mathbb{Z}_3 = \{0, 1, 2\}$ mit $(+, \cdot)$ modulo 3, d.h.

$$\begin{array}{c|ccc} + & 0 & 1 & 2 \\ \hline 0 & 0 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 2 & 0 \\ 2 & 2 & 0 & 1 \end{array} \quad \begin{array}{c|ccc} \cdot & 0 & 1 & 2 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 2 \\ 2 & 0 & 2 & 1 \end{array} \quad (5.8)$$

$$\Rightarrow (-1) = 2, (-2) = 1 \text{ (additiv Inverse)}$$

$$\text{und } 1^{-1} = 1, 2^{-1} = 2 \text{ (multiplikativ Inverse)}$$

Bemerkungen:

- abelsche Gruppen \Rightarrow Tabellen symmetrisch bzgl. Spiegelung an der Diagonalen \
- Gruppen \Rightarrow Gleichungen eindeutig lösbar
 \Rightarrow jedes Element tritt in jeder Zeile und Spalte genau einmal auf!
(In \cdot -Tabelle natürlich der Block ohne Nullen, da nur $(K \setminus \{0\}, \cdot)$ Gruppe ist!)

4. $\mathbb{Z}_4 = \{0, 1, 2, 3\}$ mit $(+, \cdot)$ modulo 4 ist **kein** Körper, denn
 $2 \cdot 2 = 0 \notin \mathbb{Z}_4 \setminus \{0\}$ – Widerspruch zu $(\mathbb{Z}_4 \setminus \{0\}, \cdot)$ Gruppe

Definition: (Vektorraum)

Sei $(V, +)$ eine abelsche Gruppe mit neutralem Element $\vec{0}$,
 K ein Körper und $\cdot : K \times V \rightarrow V$ (skalare Multiplikation).
 V heißt Vektorraum über K falls zusätzlich gilt:

(V1) $\lambda \cdot \vec{a} \in V \quad \forall \lambda \in K \text{ und } \forall \vec{a} \in V$ (Abgeschlossenheit)

(V2) $\lambda \cdot (\vec{a} + \vec{b}) = \lambda \cdot \vec{a} + \lambda \cdot \vec{b}$
 $(\lambda + \mu) \cdot \vec{a} = \lambda \cdot \vec{a} + \mu \cdot \vec{a}$
 $\forall \lambda, \mu \in K \text{ und } \forall \vec{a}, \vec{b} \in V$ (Distributivgesetze)

(V3) $1 \cdot \vec{a} = \vec{a} \quad \forall \vec{a} \in V$

(V4) $\lambda \cdot (\mu \cdot \vec{a}) = (\lambda \cdot \mu) \cdot \vec{a} \quad \forall \lambda, \mu \in K \text{ und } \forall \vec{a} \in V$ (Assoziativgesetz)

Bemerkung

1. Multiplikationspunkte dürfen wie üblich weggelassen werden.
2. Aus (G1) für $(V, +)$ und (V1) $\Rightarrow \lambda \vec{a} + \mu \vec{b} \in V \quad \forall \lambda, \mu \in K \text{ und } \forall \vec{a}, \vec{b} \in V$

Beispiele

1. \mathbb{R} über \mathbb{R}
2. Ebene \mathbb{R}^2 , Raum \mathbb{R}^3 über \mathbb{R}
allgemein \mathbb{R}^n mit komponentenweiser Vektor-Addition und skalarer Multiplikation

$$\vec{a}, \vec{b} \in \mathbb{R}^n : \quad \vec{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix}, \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} \quad (5.9)$$

$$\vec{a} + \vec{b} = \begin{pmatrix} a_1 + b_1 \\ a_2 + b_2 \\ \vdots \\ a_n + b_n \end{pmatrix}, \quad \lambda \vec{a} = \begin{pmatrix} \lambda a_1 \\ \lambda a_2 \\ \vdots \\ \lambda a_n \end{pmatrix} \quad (5.10)$$

3. Polynome (beliebigen Grads) über \mathbb{R}

$$P(x) = \sum_{\nu=0}^n a_\nu x^\nu, \quad Q(x) = \sum_{\nu=0}^m b_\nu x^\nu, \quad a_\nu, b_\nu, x \in \mathbb{R} \quad (5.11)$$

$$\lambda P(x) = \sum_{\nu=0}^n \lambda a_\nu x^\nu, \quad P(x) + Q(x) = \sum_{\nu=0}^{\max\{n,m\}} (a_\nu + b_\nu) x^\nu, \quad (5.12)$$

(wobei $a_\nu = 0 \forall \nu > n$ und $b_\nu = 0 \forall \nu > m$)
übrigens ∞ -dimensional (später)

5.2 Lineare Unabhängigkeit

Definitionen:

1. $\vec{0}$ ist linear abhängig (l.a.)
 $\vec{a} \neq \vec{0}$ ist linear unabhängig (l.u.)
2. Zwei Vektoren \vec{a}, \vec{b} heißen l.u. \Leftrightarrow aus $\lambda \vec{a} + \mu \vec{b} = \vec{0} \Rightarrow \lambda = \mu = 0$
d.h. der Nullvektor $\vec{0}$ besitzt nur eine triviale Darstellung durch \vec{a}, \vec{b}

anderfalls heißen sie l.a.

$$\vec{a}, \vec{b} \text{ l.a.} \Leftrightarrow \vec{a} \parallel \vec{b}$$

$$\vec{a}, \vec{b} \text{ l.u.} \Leftrightarrow \vec{a}, \vec{b} \text{ spannen die Ebene}$$

$$\left\{ \lambda \vec{a} + \mu \vec{b} \mid \lambda, \mu \in K \right\} \quad (5.13)$$

auf.

3. $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \dots, \vec{a}_n$ heißen l.u. \Leftrightarrow aus $\sum_{j=1}^n \lambda_j \vec{a}_j = \vec{0} \Rightarrow \lambda_j = 0 \quad \forall j = 1, \dots, n$

Sind $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \dots, \vec{a}_n$ l.u., so ist Koeffizientenvergleich möglich, d.h.

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \vec{a}_j = \sum_{j=1}^n \mu_j \vec{a}_j \quad \Leftrightarrow \quad \lambda_j = \mu_j \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (5.14)$$

Sind $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \dots, \vec{a}_n \in \mathbb{R}^n$ l.u. so spannen sie den gesamten \mathbb{R}^n auf, d.h. für jeden Vektor $\vec{b} \in \mathbb{R}^n$ gibt es eindeutig bestimmte Koeffizienten λ_j , so dass

$$\vec{b} = \sum_{j=1}^n \lambda_j \vec{a}_j \quad (5.15)$$

Bestimmung der λ_j durch Lösen eines linearen Gleichungssystems.

Beispiel:

$$\vec{a}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \vec{a}_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \vec{a}_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5.16)$$

Fragen:

1. Sind die Vektoren l.u.?
2. Kann man z.B. $\vec{b} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}$ als Linearkombination (LK) der \vec{a}_j darstellen?

Zu 2:

Suche λ_j mit

$$\lambda_1 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \lambda_2 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \lambda_3 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} \quad (5.17)$$

d.h. löse das lineare Gleichungssystem (LGS)

$$\begin{array}{rcl} \lambda_1 & + & \lambda_2 & & = & 1 \\ & & \lambda_2 & + & \lambda_3 & = & 2 \\ \lambda_1 & & & + & \lambda_3 & = & 3 \end{array} \quad (5.18)$$

Umformen: erlaubte Operationen

- Zeilen vertauschen
- Zeile mit Faktor $\neq 0$ multiplizieren
- Vielfache einer Zeile zu einer anderen addieren
- **Vorsicht:** Eine Zeile, die man zu einer anderen Zeile addiert, im gleichen Schritt selbst unverändert lassen!

Gauß-Algorithmus:

- Ziel 1: Zeilenstufenform (durch Vorwärtselimination)

- Rückwärtselimination

kompakte Schreibweise

$$\begin{array}{c}
 \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 2 \\ 1 & 0 & 1 & 3 \end{array} \right) \begin{array}{l} \leftarrow^{-1} \\ \leftarrow^{+} \end{array} \\
 \hline
 \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 2 \\ 0 & -1 & 1 & 2 \end{array} \right) \begin{array}{l} \leftarrow^{+} \\ \leftarrow^{+} \end{array} \\
 \hline
 \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 2 & 4 \end{array} \right) \begin{array}{l} | \cdot 1/2 \\ \end{array} \quad (*) \\
 \hline
 \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 2 \end{array} \right) \begin{array}{l} \leftarrow^{+} \\ \leftarrow^{-1} \end{array} \\
 \hline
 \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 2 \end{array} \right) \begin{array}{l} \leftarrow^{+} \\ \leftarrow^{-1} \end{array} \\
 \hline
 \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 2 \end{array} \right)
 \end{array} \quad (5.19)$$

Die Lösung steht in der letzten Spalte:

$$\lambda_1 = 1, \quad \lambda_2 = 0, \quad \lambda_3 = 2. \quad (5.20)$$

Alternativ kann man auch in (*) – Zeilenstufenform – ablesen

$$\begin{array}{rcl}
 2\lambda_3 = 4 & \Rightarrow & \lambda_3 = 2 \\
 \lambda_2 + \lambda_3 = 2 & \Rightarrow & \lambda_2 = 2 - \lambda_3 = 0 \\
 \lambda_1 + \lambda_2 = 1 & \Rightarrow & \lambda_1 = 1 - \lambda_2 = 1
 \end{array} \quad (5.21)$$

Zu 1: Die drei sind Vektoren l.u.

Dazu löst man das LGS $(\cdots | \vec{0})$ und prüft, ob es nur die Lösung $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 0$ hat. (Sieht man auch bereits in (*). – Wäre unterwegs eine Zeile mit ausschließlich Nullen links von | aufgetreten, so wären die Vektoren l.a.)

Neues Beispiel dazu: \vec{a}_1, \vec{a}_2 wie oben,

$$\vec{a}_3 = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (5.22)$$

also

$$\begin{array}{c}
 \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{array} \right) \begin{array}{l} \left. \vphantom{\begin{array}{ccc|c}} \right]^{-1} \\ \leftarrow \vphantom{\begin{array}{ccc|c}} \end{array} \right]_{+} \end{array} \\
 \hline
 \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 \end{array} \right) \begin{array}{l} \left. \vphantom{\begin{array}{ccc|c}} \right]_{+} \\ \leftarrow \vphantom{\begin{array}{ccc|c}} \end{array} \right]_{+} \end{array} \\
 \hline
 \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right) \begin{array}{l} \left. \vphantom{\begin{array}{ccc|c}} \right]_{+} \\ \leftarrow \vphantom{\begin{array}{ccc|c}} \end{array} \right]_{-1} \end{array} \\
 \hline
 \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right)
 \end{array} \tag{5.23}$$

d.h.

$$\lambda_3 = t, \quad \lambda_1 = \lambda_2 = -t \tag{5.24}$$

löst $\forall t \in \mathbb{R}$, d.h. die Vektoren $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$ sind l.a.

Läßt sich $\vec{b} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}$ als LK darstellen? Nein, denn...

$$\begin{array}{c}
 \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 2 \\ 1 & 0 & 1 & 3 \end{array} \right) \begin{array}{l} \left. \vphantom{\begin{array}{ccc|c}} \right]^{-1} \\ \leftarrow \vphantom{\begin{array}{ccc|c}} \end{array} \right]_{+} \end{array} \\
 \hline
 \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 2 \\ 0 & -1 & -1 & 2 \end{array} \right) \begin{array}{l} \left. \vphantom{\begin{array}{ccc|c}} \right]_{+} \\ \leftarrow \vphantom{\begin{array}{ccc|c}} \end{array} \right]_{+} \end{array} \\
 \hline
 \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 4 \end{array} \right)
 \end{array} \tag{5.25}$$

...letzte Zeile bedeutet

$$0 \cdot \lambda_1 + 0 \cdot \lambda_2 + 0 \cdot \lambda_3 = 4 \quad \text{Widerspruch!} \tag{5.26}$$

Vorsicht: Keine "Ringoperationen" machen!

$$\begin{array}{c}
 \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 3 \end{array} \right) \begin{array}{l} \left. \vphantom{\begin{array}{ccc|c}} \right]_{+} \\ \leftarrow \vphantom{\begin{array}{ccc|c}} \end{array} \right]_{+} \end{array} \begin{array}{l} \left. \vphantom{\begin{array}{ccc|c}} \right]_{+} \\ \leftarrow \vphantom{\begin{array}{ccc|c}} \end{array} \right]_{-1} \end{array} \\
 \hline
 \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & -1 & -2 \\ 1 & 1 & 0 & 3 \\ 0 & 1 & 1 & 5 \end{array} \right) \begin{array}{l} \left. \vphantom{\begin{array}{ccc|c}} \right]_{+}^{-1} \\ \leftarrow \vphantom{\begin{array}{ccc|c}} \end{array} \right]_{+} \end{array} \\
 \hline
 \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & -1 & -2 \\ 0 & 1 & 1 & 5 \\ 0 & 1 & 1 & 5 \end{array} \right) \begin{array}{l} \left. \vphantom{\begin{array}{ccc|c}} \right]_{+}^{-1} \\ \leftarrow \vphantom{\begin{array}{ccc|c}} \end{array} \right]_{+} \end{array} \\
 \hline
 \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & -1 & -2 \\ 0 & 1 & 1 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right) \begin{array}{l} \left. \vphantom{\begin{array}{ccc|c}} \right]_{+}^{-1} \\ \leftarrow \vphantom{\begin{array}{ccc|c}} \end{array} \right]_{+} \end{array}
 \end{array} \tag{5.27}$$

oben: eindeutige Lösung $x_1 = 1, x_2 = 2, x_3 = 3$.

unten: wähle $x_3 = t \in \mathbb{R}$ beliebig, $x_2 = 5 - t, x_1 = t - 2$, d.h. die allgemeine Lösung wäre

$$\vec{x} = \begin{pmatrix} -2 \\ 5 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix} t \quad - \text{ zu viel!!!} \quad (5.28)$$

Erster Schritt war verboten!

5.3 Lineare Gleichungssysteme und allgemeiner Gauß-Algorithmus

Allgemein: $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \dots, \vec{a}_n, \vec{b} \in \mathbb{R}^m$

$$\sum_{j=1}^n x_j \vec{a}_j = \vec{b} \quad (5.29)$$

heißt lineares Gleichungssystem (LGS) – m Gleichungen für n Unbekannte.

$\vec{b} = 0$: homogenes LGS

$\vec{b} \neq 0$: inhomogenes LGS

Andere Schreibweise für LGS:

$$L(\vec{x}) = \vec{b}, \quad (5.30)$$

wobei

$$L : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$$

$$\vec{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \mapsto L(\vec{x}) = \sum_{j=1}^n x_j \vec{a}_j \quad (5.31)$$

eine **lineare** Abbildung ist, denn offensichtlich gilt

$$L(\lambda \vec{x} + \mu \vec{y}) = \lambda L(\vec{x}) + \mu L(\vec{y}). \quad (5.32)$$

Die Mengen

$$\mathcal{L}_{\vec{b}} := \left\{ \vec{x} \in \mathbb{R}^n \mid L(\vec{x}) = \vec{b} \right\} \quad \text{und} \quad \mathcal{L}_0 := \left\{ \vec{x} \in \mathbb{R}^n \mid L(\vec{x}) = \vec{0} \right\} \quad (5.33)$$

heißen Lösungsmenge des inhomogenen bzw. des homogenen LGS.

Übrigens: Man nennt \mathcal{L}_0 auch $\ker L$, den *Kern von L* .

Satz 10. Seien $\vec{x}_1^h, \vec{x}_2^h \in \mathcal{L}_0$ und $\vec{y}^p \in \mathcal{L}_{\vec{b}}$, dann gilt:

(i) $\lambda \vec{x}_1^h + \mu \vec{x}_2^h \in \mathcal{L}_0 \quad \forall \lambda, \mu \in \mathbb{R}$,

(ii) $\vec{y} \in \mathcal{L}_{\vec{b}} \Leftrightarrow \exists \vec{x} \in \mathcal{L}_0 \text{ mit } \vec{y} = \vec{y}^p + \vec{x}$.

Beweis:

(i) $L(\lambda \vec{x}_1^h + \mu \vec{x}_2^h) = \lambda L(\vec{x}_1^h) + \mu L(\vec{x}_2^h) = \vec{0} + \vec{0}$

(ii) “ \Leftarrow ”: $L(\vec{y}) = L(\vec{y}^p + \vec{x}) = L(\vec{y}^p) + L(\vec{x}) = \vec{b} + \vec{0} = \vec{b}$

“ \Rightarrow ”: $\vec{x} := \vec{y} - \vec{y}^p, L(\vec{x}) = L(\vec{y}) - L(\vec{y}^p) = \vec{b} - \vec{b} = \vec{0}$ □

Zur Lösung: Bringe

$$\left(\begin{array}{cccc|c} \vec{a}_1 & \vec{a}_2 & \cdots & \vec{a}_n & \vec{b} \end{array} \right) \tag{5.34}$$

auf Zeilenstufenform (ZSF)

$$\left(\begin{array}{cccccccc|c} \blacksquare & * & * & * & \cdots & & * & \cdots & * & \tilde{b}_1 \\ 0 & 0 & \blacksquare & * & \cdots & & * & \cdots & * & \tilde{b}_2 \\ 0 & 0 & 0 & \blacksquare & * & \cdots & * & \cdots & * & \tilde{b}_3 \\ \vdots & & & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & & & & 0 & \blacksquare & * & \cdots & * & \tilde{b}_r \\ 0 & & & & & & 0 & \cdots & 0 & \tilde{b}_{r+1} \\ 0 & & & & & & 0 & \cdots & 0 & \vdots \\ 0 & & \cdots & & & & 0 & \cdots & 0 & \tilde{b}_m \end{array} \right) \left. \begin{array}{l} \vphantom{\left(\right)} \\ \vphantom{\left(\right)} \end{array} \right\} \begin{array}{l} r \text{ Zeilen} \\ \\ \\ \\ \\ m - r \text{ Zeilen} \end{array} \tag{5.35}$$

Kennzeichen der ZSF:

1. \blacksquare sind Zahlen $\neq 0$.
2. $*$ sind irgendwelche Zahlen.
3. Links (und unterhalb) von \blacksquare stehen nur Nullen.
4. Stufen von \blacksquare zu \blacksquare : eine Zeile nach unten, mindestens eine Spalte nach rechts.

Lösung des LGS:

1. Zeile der Form $(0 \cdots 0 | \tilde{b}_j)$ mit $\tilde{b}_j \neq 0$ bedeutet: LGS hat keine Lösung.
2. Spalten ohne \blacksquare entsprechen frei wählbaren Variablen (parametrisiere so die Lösung).
3. Variablen, die Spalten mit \blacksquare entsprechen, sind durch die Zeile, in der \blacksquare steht, festgelegt (von unten nach oben arbeiten).

Insbesondere hat das LGS mit ZSF

$$\left(\begin{array}{ccc|c} \blacksquare & & * & \tilde{b}_1 \\ & \ddots & & \vdots \\ 0 & & \blacksquare & \tilde{b}_m \end{array} \right) \tag{5.36}$$

(mit $n = m$) eine eindeutige Lösung.

Beispiele:

1.

$$\left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 2 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 2 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{array} \right) \tag{5.37}$$

hat keine Lösung.

2.

$$\left(\begin{array}{ccc|c} \boxed{1} & 2 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \boxed{2} & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right), \quad (5.38)$$

$x_3 = 2$, $x_2 = t \in \mathbb{R}$ beliebig, $x_1 = 1 - x_3 - 2t = -1 - 2t$, bzw.

$$\vec{x} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} t, \quad t \in \mathbb{R}. \quad (5.39)$$

3.

$$\left(\begin{array}{ccc|c} \boxed{1} & 2 & 1 & 1 \\ 0 & \boxed{1} & 2 & 4 \\ 0 & 0 & \boxed{1} & 0 \end{array} \right), \quad (5.40)$$

$x_3 = 0$, $x_2 = 4 - 2x_3 = 4$, $x_1 = 1 - 2x_2 - x_3 = -7$ (eindeutig).

5.4 Unterräume, Dimension und Basis

Definition: (Dimension)

Sei V ein Vektorraum. Die maximale Anzahl linear unabhängiger Vektoren in V heißt Dimension von V , $\dim V$.

Bemerkung: $\dim \mathbb{R}^n = n$

Beweis: Die kanonischen Einheitsvektoren

$$\vec{e}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \vec{e}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \dots, \quad \vec{e}_n = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5.41)$$

sind linear unabhängig $\Rightarrow \dim \mathbb{R}^n \geq n$.

Seien $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \dots, \vec{a}_{n+1} \in \mathbb{R}^n$. Bringe das LGS

$$\left(\vec{a}_1 \quad \vec{a}_2 \quad \dots \quad \vec{a}_{n+1} \mid \vec{0} \right) \quad (5.42)$$

auf Zeilenstufenform. Diese enthält höchstens n ■, da das LGS n Zeilen hat.

\Rightarrow Mindestens eine Variable bleibt frei wählbar.

\Rightarrow Es gibt nichttriviale Lösungen, d.h. die Vektoren sind l.a.

Also ist $\dim \mathbb{R}^n < n + 1$ und damit $= n$. □

Definition: (Unterraum)

Sei V Vektorraum über K . U heißt Unterraum von V , falls gilt:

- (i) $U \subseteq V$
- (ii) U ist ein Vektorraum (über K).

Bemerkung:

- 1. Zu gegebenem $U \subseteq V$ ist lediglich zu prüfen, ob aus $\vec{a}, \vec{b} \in U, \lambda \in K$, folgt, dass auch $\vec{a} + \vec{b}$ und $\lambda\vec{a} \in U$ sind. (Rechenregeln erbt U von V .)
- 2. $\dim U \leq \dim V$

Beispiele:

- 1. $U = \{\vec{0}\}$ ist Unterraum, $\dim U = 0$.
- 2. Die Lösungsmenge \mathcal{L}_0 eines homogenen LGS, $L(\vec{x}) = \vec{0}, L : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$, ist Unterraum des \mathbb{R}^n , denn offensichtlich

$$\mathcal{L}_0 = \ker L = \left\{ \vec{x} \in \mathbb{R}^n \mid L(\vec{x}) = \vec{0} \right\} \subseteq \mathbb{R}^n, \quad (5.43)$$

und Abgeschlossenheit folgt aus Satz 10 (i).
 $\dim \mathcal{L}_0 =$ Anzahl der Spalten ohne ■ in ZSF.

Definitionen: (Lineare Hülle, Erzeugendensystem, Basis)

Sei V ein Vektorraum über K und $\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_n \in V$.

- 1. Man nennt die Menge aller Linearkombinationen,

$$\text{span}(\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_n) := \left\{ \vec{x} \in V \mid \vec{x} = \sum_{j=1}^n \lambda_j \vec{a}_j, \lambda_j \in K \right\}, \quad (5.44)$$

die lineare Hülle (oder den Aufspann) von $\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_n$.

- 2. Die Vektoren $\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_n$ heißen Erzeugendensystem von V , falls gilt

$$\text{span}(\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_n) = V. \quad (5.45)$$

Man sagt auch, sie spannen V auf.

- 3. Sind die Vektoren $\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_n$ l.u. und bilden ein Erzeugendensystem von V , so heißen sie Basis von V .

Bemerkungen:

- 1. $\text{span}(\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_n)$ ist ein Unterraum von V .
- 2. Die Anzahl der Vektoren einer Basis von V ist gleich $\dim V$.

Beispiele:

- 1. Die Vektoren

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \vec{c} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (5.46)$$

spannen den \mathbb{R}^2 auf, sind aber keine Basis, da $\vec{a} + \vec{b} = \vec{c}$

2. Die kanonischen Einheitsvektoren \vec{e}_j (s.o.), $j = 1, \dots, n$, mit Komponenten $(\vec{e}_j)_k = \delta_{jk}$, wobei

$$\delta_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{für } j = k \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.47)$$

das Kronecker-Symbol ist, bilden eine Basis des \mathbb{R}^n (die kanonische Basis).

3. Die Vektoren

$$\vec{x}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \vec{x}_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \vec{x}_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (5.48)$$

bilden eine Basis des \mathbb{R}^3 .

4. $\{1\}$ ist eine Basis von \mathbb{C} als VR über \mathbb{C} , d.h. $\dim \mathbb{C} = 1$.
 5. $\{1, i\}$ ist eine Basis von \mathbb{C} als VR über \mathbb{R} , d.h. $\dim \mathbb{C} = 2$.

Satz 11.

Seien $\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_n \in \mathbb{R}^m$. Die Dimension von $\text{span}(\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_n)$ ist gleich der Anzahl der \blacksquare in der Zeilenstufenform von

$$\left(\begin{array}{cccc|c} \vec{a}_1 & \vec{a}_2 & \cdots & \vec{a}_n & \vec{0} \end{array} \right). \quad (5.49)$$

Bemerkung: Damit gilt $\dim \mathcal{L}_0 + \dim \text{span}(\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_n) = n$.

Beweisskizze: maximale Anzahl \blacksquare : n

1. $n \blacksquare \Rightarrow$ Vektoren l.u. $\Rightarrow \dim \text{span}(\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_n) = n$
2. eine Spalte ohne $\blacksquare \Rightarrow$ Vektoren l.a. $\Rightarrow \dim \text{span}(\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_n) < n$.
 Lasse diese Spalte weg: restliche $n - 1$ Vektoren sind l.u.
 $\Rightarrow \dim \text{span}(\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_n) = n - 1$.
3. etc.

5.5 Skalarprodukt und Norm

Definition: (Skalarprodukt)

Sei V ein Vektorraum über \mathbb{R} . Eine Abbildung $\langle \cdot, \cdot \rangle : V \times V \rightarrow \mathbb{R}$ heißt Skalarprodukt, wenn gilt:

- (S1) $\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle = \langle \vec{b}, \vec{a} \rangle$ (symmetrisch)⁸
 (S2) $\langle \vec{a}, \lambda \vec{b} \rangle = \lambda \langle \vec{a}, \vec{b} \rangle$
 $\langle \vec{a}, \vec{b} + \vec{c} \rangle = \langle \vec{a}, \vec{b} \rangle + \langle \vec{a}, \vec{c} \rangle$ (linear)
 (S3) $\langle \vec{a}, \vec{a} \rangle \geq 0$, wobei $\langle \vec{a}, \vec{a} \rangle = 0 \Leftrightarrow \vec{a} = \vec{0}$ (positiv definit)
 $\forall \vec{a}, \vec{b}, \vec{c} \in V$ und $\forall \lambda \in \mathbb{R}$.

⁸Später werden wir auch Vektorräume über den komplexen Zahlen \mathbb{C} betrachten; dann muss (S1) modifiziert werden.

Satz 12. (Norm)

Sei V ein Vektorraum über \mathbb{R} . Jedes Skalarprodukt, $\langle \cdot, \cdot \rangle : V \times V \rightarrow \mathbb{R}$ induziert eine Norm, $\| \cdot \| : V \rightarrow \mathbb{R}_0^+$,

$$\|\vec{a}\| := \sqrt{\langle \vec{a}, \vec{a} \rangle}, \quad (5.50)$$

mit den Eigenschaften

$$(N1) \quad \|\vec{a}\| = 0 \Leftrightarrow \vec{a} = \vec{0}$$

$$(N2) \quad \|\lambda \vec{a}\| = |\lambda| \|\vec{a}\|$$

$$(N3) \quad \|\vec{a} + \vec{b}\| \leq \|\vec{a}\| + \|\vec{b}\| \quad (\text{Dreiecksungleichung})$$

$\forall \vec{a}, \vec{b} \in V$ und $\forall \lambda \in \mathbb{R}$.

Bemerkung: Normen können auch ohne Bezug zu Skalarprodukten definiert werden.

Beweis:

(N1) folgt aus (S3).

Zu (N2):

$$\|\lambda \vec{a}\| = \sqrt{\langle \lambda \vec{a}, \lambda \vec{a} \rangle} \stackrel{(S2)}{=} \sqrt{\lambda \langle \lambda \vec{a}, \vec{a} \rangle} \stackrel{(S1)}{=} \sqrt{\lambda \langle \vec{a}, \lambda \vec{a} \rangle} \stackrel{(S2)}{=} \sqrt{\lambda^2 \langle \vec{a}, \vec{a} \rangle} = |\lambda| \sqrt{\langle \vec{a}, \vec{a} \rangle} = |\lambda| \|\vec{a}\| \quad (5.51)$$

Für (N3) beweisen wir zunächst:

Lemma 13. (Cauchy-Schwarzsche Ungleichung)

Skalarprodukt und Norm erfüllen

$$|\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle| \leq \|\vec{a}\| \|\vec{b}\| \quad \forall \vec{a}, \vec{b} \in V. \quad (CS)$$

Beweis: Fall $\vec{b} = \vec{0}$ klar; also $\vec{b} \neq \vec{0}$:

$$0 \leq \langle \vec{a} - \lambda \vec{b}, \vec{a} - \lambda \vec{b} \rangle = \|\vec{a}\|^2 + \lambda^2 \|\vec{b}\|^2 - 2\lambda \langle \vec{a}, \vec{b} \rangle, \quad (5.52)$$

wähle $\lambda = \frac{\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle}{\|\vec{b}\|^2}$,

$$0 \leq \|\vec{a}\|^2 + \frac{(\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle)^2}{\|\vec{b}\|^2} - 2 \frac{(\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle)^2}{\|\vec{b}\|^2} = \|\vec{a}\|^2 - \frac{(\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle)^2}{\|\vec{b}\|^2} \quad (5.53)$$

$$\Leftrightarrow (\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle)^2 \leq \|\vec{a}\|^2 \|\vec{b}\|^2$$

□

Damit (N3):

$$\begin{aligned} \|\vec{a} + \vec{b}\|^2 &= \langle \vec{a} + \vec{b}, \vec{a} + \vec{b} \rangle = \|\vec{a}\|^2 + \|\vec{b}\|^2 + 2\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle \\ &\stackrel{(CS)}{\leq} \|\vec{a}\|^2 + \|\vec{b}\|^2 + 2\|\vec{a}\| \|\vec{b}\| = (\|\vec{a}\| + \|\vec{b}\|)^2 \end{aligned} \quad (5.54)$$

□

Beispiel: (kanonisches Skalarprodukt im \mathbb{R}^n)

Für $\vec{a}, \vec{b} \in \mathbb{R}^n$ definiert

$$\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle = \sum_{j=1}^n a_j b_j \quad (5.55)$$

ein Skalarprodukt. Wir schreiben

$$\vec{a} \cdot \vec{b} := \langle \vec{a}, \vec{b} \rangle \quad (5.56)$$

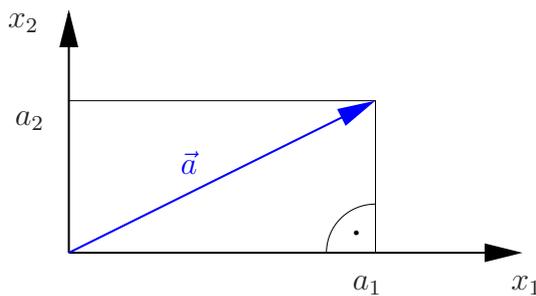
(bzw. auch $\vec{a}\vec{b} = \vec{a} \cdot \vec{b}$) und für die zugehörige Norm

$$|\vec{a}| := \|\vec{a}\| = \sqrt{\sum_{j=1}^n a_j^2} \quad (5.57)$$

Interpretation:

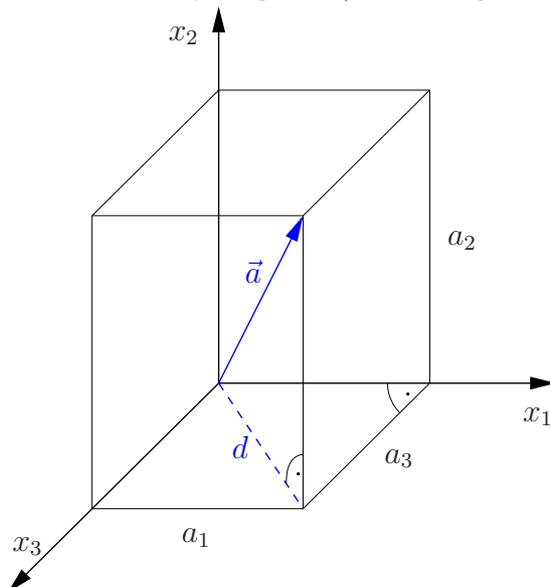
1. Norm/Betrag: Länge des Vektors

- \mathbb{R}^2 Pythagoras



$$|\vec{a}|^2 = a_1^2 + a_2^2$$

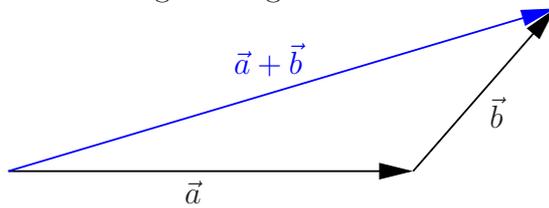
- \mathbb{R}^3 zweimal Pythagoras (Raumdiagonale)



$$\begin{aligned} d^2 &= a_1^2 + a_2^2 \\ |\vec{a}|^2 &= d^2 + a_3^2 \\ &= a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 \end{aligned}$$

- \mathbb{R}^n analog $(n - 1)$ -mal Pythagoras

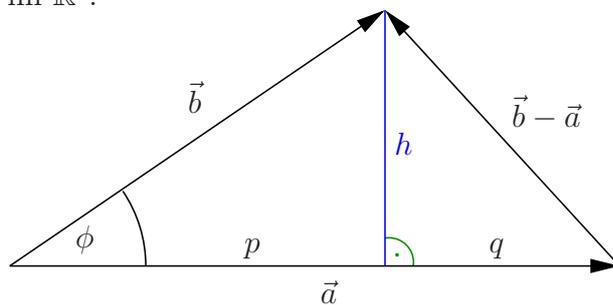
2. Dreiecksungleichung



$$|\vec{a} + \vec{b}| \leq |\vec{a}| + |\vec{b}|$$

3. Winkel zwischen \vec{a} und \vec{b}

- im \mathbb{R}^2 :



$$|\vec{a}| = p + q$$

$$h^2 + q^2 = |\vec{b} - \vec{a}|^2 \quad (5.58)$$

$$\Leftrightarrow h^2 + (|\vec{a}| - p)^2 = (\vec{b} - \vec{a})^2 \quad (5.59)$$

$$\Leftrightarrow \cancel{h^2} + \cancel{|\vec{a}|^2} + p^2 - 2p|\vec{a}| = \cancel{|\vec{b}|^2} + \cancel{|\vec{a}|^2} - 2\vec{a}\vec{b} \quad | \left(-\frac{1}{2}\right) \quad (5.60)$$

$$\Leftrightarrow \underset{\cos \phi = p/|\vec{b}|}{|\vec{a}||\vec{b}| \cos \phi} = \vec{a}\vec{b} \quad (5.61)$$

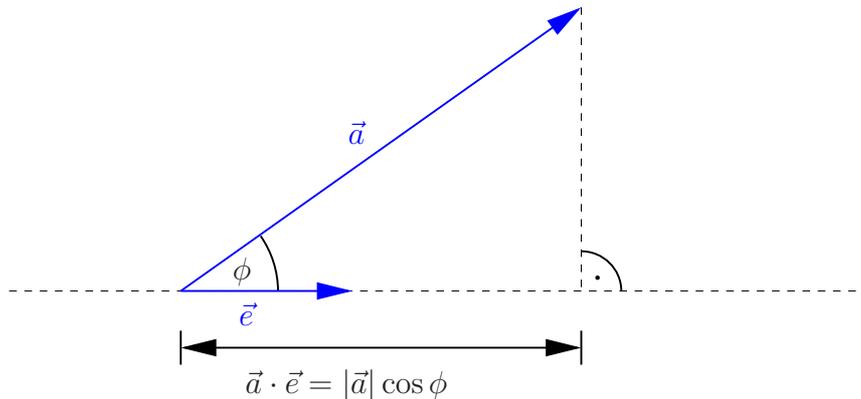
- im \mathbb{R}^n : verlege Skizze in die Ebene, in der \vec{a} und \vec{b} liegen

- allgemein: (CS) stellt sicher, dass $\frac{|\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle|}{\|\vec{a}\| \|\vec{b}\|} \leq 1$, d.h. wir können immer $\arccos\left(\frac{\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle}{\|\vec{a}\| \|\vec{b}\|}\right)$ als Winkel zwischen den Vektoren \vec{a} , \vec{b} betrachten.

4. \vec{e} heißt Einheitsvektor, falls $\|\vec{e}\| = 1$.

$\vec{a}, \vec{e} \in \mathbb{R}^n$, $|\vec{e}| = 1$:

$\vec{a} \cdot \vec{e}$ ist die Projektion von \vec{a} auf die Richtung von \vec{e} , denn



Allgemein für $\vec{a}, \vec{e} \in V$, $\|\vec{e}\| = 1$:

Nenne $\langle \vec{a}, \vec{e} \rangle = \|\vec{a}\| \cos \phi$ die Projektion von \vec{a} auf die Richtung von \vec{e} .

Definition: (Orthogonalität)

Zwei Vektoren $\vec{a}, \vec{b} \in V$ heißen orthogonal zueinander, falls $\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle = 0$.

Bemerkungen:

1. Für den Winkel zwischen den Vektoren gilt dann

$$\phi = \arccos\left(\frac{\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle}{\|\vec{a}\| \|\vec{b}\|}\right) = \arccos(0) = \frac{\pi}{2} \hat{=} 90^\circ.$$

2. Aus Orthogonalität folgt Lineare Unabhängigkeit (für Vektoren $\neq \vec{0}$)

Seien $\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_n \in V$, $\vec{a}_j \neq \vec{0}$, paarweise orthogonal, d.h. $\langle \vec{a}_j, \vec{a}_k \rangle = 0 \forall k \neq j$:

$$\vec{0} = \sum_{j=1}^n \lambda_j \vec{a}_j \tag{5.62}$$

\Rightarrow

$$0 = \left\langle \vec{a}_k, \sum_{j=1}^n \lambda_j \vec{a}_j \right\rangle = \sum_{j=1}^n \lambda_j \underbrace{\langle \vec{a}_k, \vec{a}_j \rangle}_{=\delta_{jk} \|\vec{a}_k\|^2} = \lambda_k \underbrace{\|\vec{a}_k\|^2}_{>0} \tag{5.63}$$

$\Rightarrow \lambda_k = 0 \forall k = 1, \dots, n$, d.h. die Vektoren sind l.u. □

Definition: (ON-Basis)

Eine Basis, deren Elemente paarweise orthogonal sind, nennt man Orthogonal-Basis. Sind die Vektoren zusätzlich normiert, d.h. haben sie alle Norm 1, dann bilden sie eine Orthonormal-Basis (ONB).

Kurz: $\{\vec{a}_j\}_{j=1, \dots, \dim V}$ ONB $\Leftrightarrow \langle \vec{a}_j, \vec{a}_k \rangle = \delta_{jk} \forall j, k = 1, \dots, \dim V$

Schmidtsches Orthogonalisierungsverfahren:

gegeben: Basis $\{\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_n\}$ von V

gesucht: ON-Basis $\{\vec{c}_1, \dots, \vec{c}_n\}$ von V

$$\vec{c}_1 = \frac{\vec{a}_1}{\|\vec{a}_1\|} \quad (5.64)$$

$$\vec{b}_2 = \vec{a}_2 - \langle \vec{c}_1, \vec{a}_2 \rangle \vec{c}_1 \quad \vec{c}_2 = \frac{\vec{b}_2}{\|\vec{b}_2\|} \quad (5.65)$$

$$\vec{b}_3 = \vec{a}_3 - \langle \vec{c}_1, \vec{a}_3 \rangle \vec{c}_1 - \langle \vec{c}_2, \vec{a}_3 \rangle \vec{c}_2 \quad \vec{c}_3 = \frac{\vec{b}_3}{\|\vec{b}_3\|} \quad (5.66)$$

$$\vdots \quad (5.67)$$

$$\vec{b}_n = \vec{a}_n - \sum_{j=1}^{n-1} \langle \vec{c}_j, \vec{a}_n \rangle \vec{c}_j \quad \vec{c}_n = \frac{\vec{b}_n}{\|\vec{b}_n\|} \quad (5.68)$$

Bemerkung: Sind die Start-Vektoren $\{\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_n\}$ l.a. so ergibt sich irgendwann der Nullvektor $\vec{0}$ (evt. mehrfach) – weglassen! \Rightarrow Die $\vec{c}_j \neq \vec{0}$ bilden eine ONB von $\text{span}(\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_n)$.

Beispiel:

$$\vec{a}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \vec{a}_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad V = \text{lineare Hülle der beiden} \quad (5.69)$$

$$\begin{aligned} \vec{c}_1 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \\ \vec{b}_2 &= \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix} - \frac{3}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \\ \vec{c}_2 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (5.70)$$

Basis-Entwicklung eines Vektors:

gegeben: $\vec{a} \in V$ und ONB $\{\vec{c}_j\}$ von V

gesucht: \vec{a} als LK der \vec{c}_j , d.h.

$$\vec{a} = \sum_{j=1}^n \lambda_j \vec{c}_j$$

Lösung: Bilde Skalarprodukt mit \vec{c}_k ,

$$\langle \vec{c}_k, \vec{a} \rangle = \left\langle \vec{c}_k, \sum_{j=1}^n \lambda_j \vec{c}_j \right\rangle = \sum_{j=1}^n \lambda_j \underbrace{\langle \vec{c}_k, \vec{c}_j \rangle}_{=\delta_{jk}} = \lambda_k. \quad (5.71)$$

Beispiel:

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5.72)$$

mit obiger Basis: $\vec{c}_1 \vec{a} = \frac{4}{\sqrt{2}} = 2\sqrt{2}$, $\vec{c}_2 \vec{a} = -\frac{2}{\sqrt{2}} = -\sqrt{2} \Rightarrow \vec{a} = 2\sqrt{2}\vec{c}_1 - \sqrt{2}\vec{c}_2$.

5.6 Kreuzprodukt und Spatprodukt im \mathbb{R}^3

Definition: (Kreuzprodukt)

Für $\vec{a}, \vec{b} \in \mathbb{R}^3$ definiert man das Kreuzprodukt (oder Vektorprodukt) durch

$$\vec{a} \times \vec{b} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} a_2 b_3 - a_3 b_2 \\ a_3 b_1 - a_1 b_3 \\ a_1 b_2 - a_2 b_1 \end{pmatrix}. \quad (5.73)$$

Satz 14. (Eigenschaften von \times)

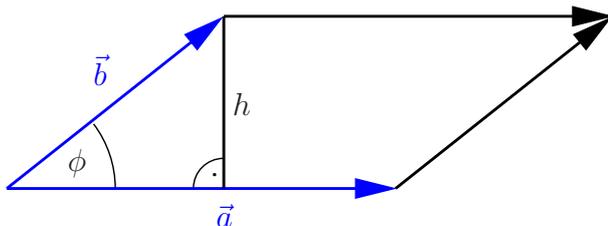
$\vec{a}, \vec{b}, \vec{c} \in \mathbb{R}^3, \lambda \in \mathbb{R}$:

- (i) $\vec{a} \times \vec{b} = -\vec{b} \times \vec{a}$ *(antikommutativ)*
- (ii) $\vec{a} \times (\vec{b} + \vec{c}) = \vec{a} \times \vec{b} + \vec{a} \times \vec{c}$ *(Distributivgesetz)*
- (iii) $\lambda(\vec{a} \times \vec{b}) = (\lambda\vec{a}) \times \vec{b} = \vec{a} \times (\lambda\vec{b})$
- (iv) $|\vec{a} \times \vec{b}| = \text{Fläche des von } \vec{a} \text{ und } \vec{b} \text{ aufgespannten Parallelogramms}$
- (v) $\vec{a} \times \vec{b}$ ist orthogonal zu \vec{a} und zu \vec{b}
(bzgl. des kanonischen Skalarprodukts)
- (vi) falls $\vec{a} \times \vec{b} \neq \vec{0}$, bilden \vec{a}, \vec{b} und $\vec{a} \times \vec{b}$ ein Rechtssystem *(rechte Hand-Regel)*

Bemerkung: (ii) & (iii): Linearität

Beweis:

- (i) klar lt. Def. (vertausche b_j und a_j)
übrigens: $\Rightarrow \vec{a} \times \vec{a} = \vec{0}$
- (ii) & (iii) explizit nachrechnen
- (iv) Fläche:



$$\begin{aligned} F &= |\vec{a}|h \\ &= |\vec{a}||\vec{b}| \sin \phi \\ &= |\vec{a}||\vec{b}| \sqrt{1 - \cos^2 \phi} \\ &= \sqrt{|\vec{a}|^2 |\vec{b}|^2 - |\vec{a}\vec{b}|^2} \end{aligned} \quad (5.74)$$

einerseits:

$$\begin{aligned}
 (\vec{a} \times \vec{b})^2 &= (a_2 b_3)^2 + (a_3 b_2)^2 - 2a_2 b_2 a_3 b_3 \\
 &\quad + (a_3 b_1)^2 + (a_1 b_3)^2 - 2a_3 b_3 a_1 b_1 \\
 &\quad + (a_1 b_2)^2 + (a_2 b_1)^2 - 2a_1 b_1 a_2 b_2
 \end{aligned} \tag{5.75}$$

andererseits:

$$\begin{aligned}
 \vec{a}^2 \vec{b}^2 - (\vec{a} \vec{b})^2 &= (a_1^2 + a_2^2 + a_3^2)(b_1^2 + b_2^2 + b_3^2) - (a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3)^2 \\
 &= \cancel{a_1^2 b_1^2} + a_1^2 b_2^2 + a_1^2 b_3^2 \\
 &\quad + a_2^2 b_1^2 + \cancel{a_2^2 b_2^2} + a_2^2 b_3^2 \\
 &\quad + a_3^2 b_1^2 + a_3^2 b_2^2 + \cancel{a_3^2 b_3^2} \\
 &\quad - \cancel{a_1^2 b_1^2} - \cancel{a_2^2 b_2^2} - \cancel{a_3^2 b_3^2} \\
 &\quad - 2a_2 b_2 a_3 b_3 - 2a_3 b_3 a_1 b_1 - 2a_1 b_1 a_2 b_2
 \end{aligned} \tag{5.76}$$

also $F = |\vec{a} \times \vec{b}|$

(v)

$$\begin{aligned}
 \vec{a}(\vec{a} \times \vec{b}) &= a_1 a_2 b_3 - a_1 a_3 b_2 + a_2 a_3 b_1 - a_2 a_1 b_3 + a_3 a_1 b_2 - a_3 a_2 b_1 = 0 \\
 \vec{b}(\vec{a} \times \vec{b}) &= -\vec{b}(\vec{b} \times \vec{a}) = 0
 \end{aligned} \tag{5.77}$$

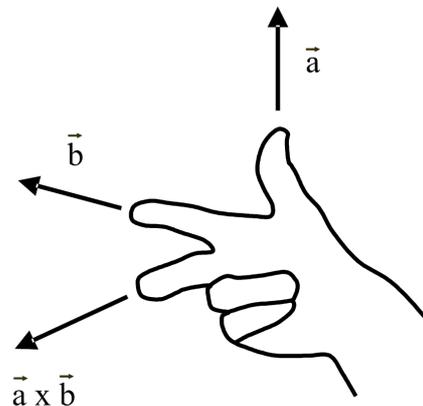
(vi) Zunächst überprüft man: $\vec{e}_1 \times \vec{e}_2 = \vec{e}_3$
(sowie $\vec{e}_2 \times \vec{e}_3 = \vec{e}_1$ und $\vec{e}_3 \times \vec{e}_1 = \vec{e}_2$)

Allgemein:

Nenne die Richtung von \vec{a} die x_1 -Richtung,

$$\text{bilde } \vec{a} \times \vec{b} = \vec{a} \times \underbrace{\left(\vec{b} - \frac{(\vec{a} \cdot \vec{b})}{|\vec{a}|} \frac{\vec{a}}{|\vec{a}|} \right)}_{\text{nenne } x_2\text{-Richtung}},$$

dann zeigt $\vec{a} \times \vec{b}$ wieder in x_3 -Richtung.



Definition: (Spatprodukt)

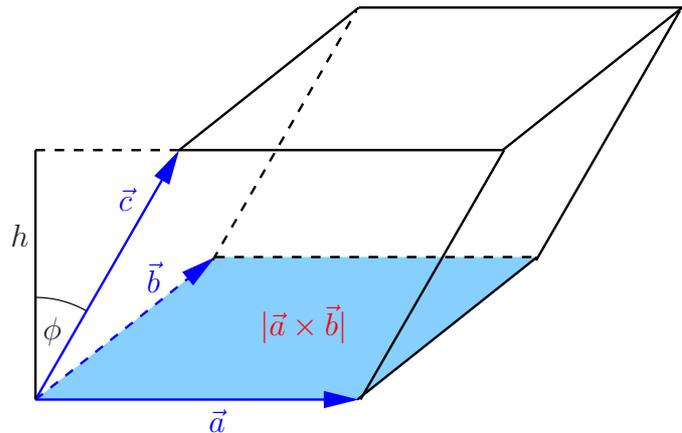
Die Abbildung $|\cdot, \cdot, \cdot| : \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$,

$$|\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}| = (\vec{a} \times \vec{b}) \cdot \vec{c} \tag{5.78}$$

heißt Spatprodukt.

Eigenschaften:

1. $|\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}| = |\vec{b}, \vec{c}, \vec{a}| = |\vec{c}, \vec{a}, \vec{b}|$
2. $|\vec{b}, \vec{a}, \vec{c}| = -|\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}|$
3. Der Betrag von $|\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}|$ ist gleich dem Volumen des, von den Vektoren aufgespannten, Parallelepipeds bzw. Spats.



Beweis:

1. explizit nachrechnen
2. folgt aus $\vec{b} \times \vec{a} = -\vec{a} \times \vec{b}$
3. $||\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}|| = \underbrace{|\vec{a} \times \vec{b}|}_{\text{Grundfläche}} \underbrace{|\vec{c}| \cos \phi}_{\text{Höhe}} = V$

5.7 Geraden und Ebenen

Geraden:

- (i) gegeben: Punkt $\vec{p}_1 \in \mathbb{R}^n$ und Richtung $\vec{v} \in \mathbb{R}^n$,

$$g = \{\vec{x} \in \mathbb{R}^n \mid \vec{x} = \vec{p}_1 + \vec{v}t, t \in \mathbb{R}\} \quad (5.79)$$

- (ii) gegeben: zwei Punkte $\vec{p}_1, \vec{p}_2 \in \mathbb{R}^n$,

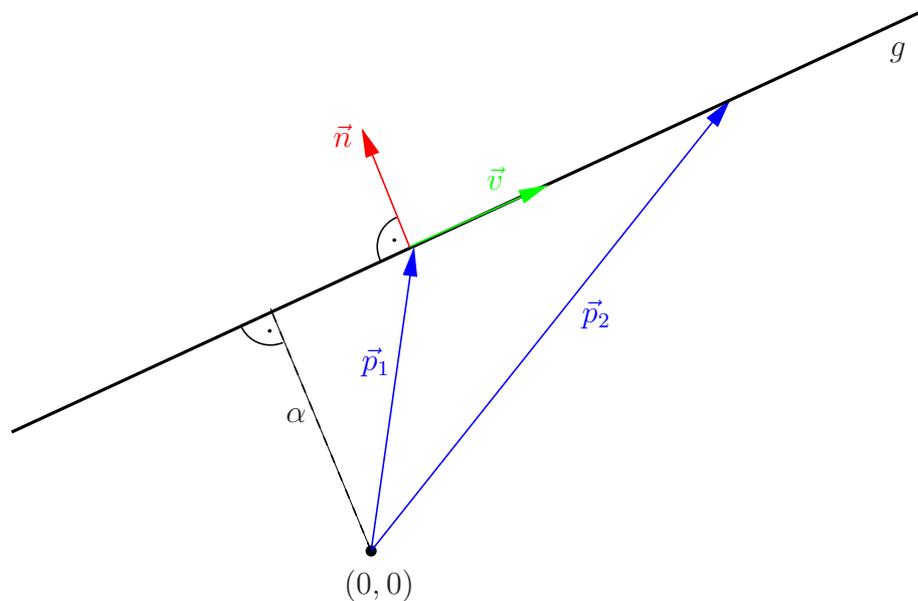
$$g = \{\vec{x} \in \mathbb{R}^n \mid \vec{x} = \vec{p}_1 + (\vec{p}_2 - \vec{p}_1)t, t \in \mathbb{R}\} \quad (5.80)$$

- (iii) **speziell im \mathbb{R}^2**

gegeben: Punkt \vec{p}_1 und Normalenrichtung \vec{n} (kurz: $\vec{n} \perp g$)

$$\begin{aligned} g &= \{\vec{x} \in \mathbb{R}^2 \mid (\vec{x} - \vec{p}_1)\vec{n} = 0\} \\ &= \{\vec{x} \in \mathbb{R}^2 \mid \vec{x}\vec{n} = \alpha, \alpha = \vec{p}_1\vec{n}\}. \end{aligned} \quad (5.81)$$

- parameterfreie Darstellung
- Falls $|\vec{n}| = 1$, dann ist $|\alpha|$ der Abstand der Gerade vom Ursprung.



Ebenen:

(i) gegeben: Punkt $\vec{p}_1 \in \mathbb{R}^n$ und 2 Richtungen $\vec{v}, \vec{w} \in \mathbb{R}^n$ l.u.,

$$E = \{ \vec{x} \in \mathbb{R}^n \mid \vec{x} = \vec{p}_1 + \vec{v}s + \vec{w}t, \quad s, t \in \mathbb{R} \} \quad (5.82)$$

(ii) gegeben: zwei Punkte $\vec{p}_1, \vec{p}_2 \in \mathbb{R}^n$ und eine Richtung $\vec{v} \in \mathbb{R}^n$ mit $\vec{p}_2 - \vec{p}_1, \vec{v}$ l.u.,

$$E = \{ \vec{x} \in \mathbb{R}^n \mid \vec{x} = \vec{p}_1 + (\vec{p}_2 - \vec{p}_1)s + \vec{v}t, \quad s, t \in \mathbb{R} \} \quad (5.83)$$

(iii) gegeben: drei Punkte $\vec{p}_1, \vec{p}_2, \vec{p}_3 \in \mathbb{R}^n$ mit $\vec{p}_2 - \vec{p}_1, \vec{p}_3 - \vec{p}_1$ l.u.,

$$E = \{ \vec{x} \in \mathbb{R}^n \mid \vec{x} = \vec{p}_1 + (\vec{p}_2 - \vec{p}_1)s + (\vec{p}_3 - \vec{p}_1)t, \quad s, t \in \mathbb{R} \} \quad (5.84)$$

(iv) **speziell im \mathbb{R}^3**

gegeben: Punkt \vec{p}_1 und $\vec{n} \perp E$,

$$\begin{aligned} E &= \{ \vec{x} \in \mathbb{R}^3 \mid (\vec{x} - \vec{p}_1)\vec{n} = 0 \} \\ &= \{ \vec{x} \in \mathbb{R}^3 \mid \vec{x}\vec{n} = \alpha, \quad \alpha = \vec{p}_1\vec{n} \} . \end{aligned} \quad (5.85)$$

- parameterfreie Darstellung
- Falls $|\vec{n}| = 1$, dann ist $|\alpha|$ der Abstand der Ebene vom Ursprung.
- Darstellung heißt Hessesche Normalform, falls $|\vec{n}| = 1$ und \vec{n} so, dass $\alpha \geq 0$.

Geraden im \mathbb{R}^3 : Schnitte zweier nicht paralleler Ebenen, z.B. parameterfreie Darstellung,

$$g = \{ \vec{x} \in \mathbb{R}^3 \mid \vec{x}\vec{n}_1 = \alpha_1, \quad \vec{x}\vec{n}_2 = \alpha_2 \} , \quad (5.86)$$

mit \vec{n}_1, \vec{n}_2 l.u.

5.8 Kurven und Spezielle Koordinatensysteme

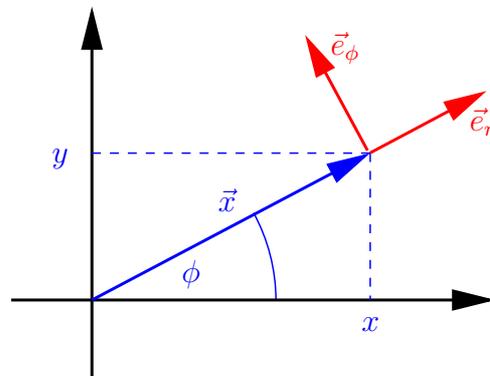
Polarkoordinaten im \mathbb{R}^2 :

$\vec{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^2$ lässt sich auch durch Radius $r \in [0, \infty)$ (Abstand zum Ursprung) und Winkel $\phi \in [0, 2\pi)$ charakterisieren,

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{x^2 + y^2}, \\ \phi &= \arctan \frac{y}{x} \quad (\text{Zweig beachten}). \end{aligned} \quad (5.87)$$

Umgekehrt:

$$x = r \cos \phi, \quad y = r \sin \phi \quad (5.88)$$



Bemerkung: Für $(0, 0)$ ist ϕ nicht definiert.

Einheitsvektoren (an jedem Punkt – mitgeführtes Koordinatensystem):

$$\vec{e}_r = \begin{pmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \end{pmatrix}, \quad \vec{e}_\phi = \begin{pmatrix} -\sin \phi \\ \cos \phi \end{pmatrix} \quad (5.89)$$

mit

$$\begin{aligned} |\vec{e}_r|^2 &= \cos^2 \phi + \sin^2 \phi = 1, & |\vec{e}_\phi|^2 &= 1, \\ \vec{e}_r \cdot \vec{e}_\phi &= \cos \phi (-\sin \phi) + \sin \phi \cos \phi = 0, \end{aligned} \quad (5.90)$$

also ONB, und

$$\vec{x} = \begin{pmatrix} r \cos \phi \\ r \sin \phi \end{pmatrix} = r \vec{e}_r \quad (5.91)$$

Definition: (Kurven im \mathbb{R}^n)

Eine Abbildung

$$\begin{aligned} \vec{x}: \mathbb{R} \supseteq I &\rightarrow \mathbb{R}^n \\ t &\mapsto \vec{x}(t) = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (5.92)$$

heißt Kurve im \mathbb{R}^n .

Die (Momentan-)Geschwindigkeit (entlang der Kurve) ist die (komponentenweise) Ableitung nach t ,

$$\dot{\vec{x}}(t) = \frac{d}{dt} \vec{x}(t) = \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{pmatrix}. \quad (5.93)$$

Analog: Beschleunigung $\ddot{\vec{x}}(t) = \frac{d^2}{dt^2} \vec{x}(t)$.

Beispiele:

1.

$$\begin{aligned} \vec{x}(t) &= \vec{x}_0 + \vec{v}t, & \vec{x}_0, \vec{v} \in \mathbb{R}^3 \text{ fest} \\ \Rightarrow \dot{\vec{x}}(t) &= \vec{v}, & \ddot{\vec{x}}(t) = \vec{0} \end{aligned} \quad (5.94)$$

(Gerade, gleichförmige Bewegung)

2.

$$\begin{aligned} \vec{x}(t) &= \frac{1}{2}\vec{a}t^2, & \vec{a} \in \mathbb{R}^3 \text{ fest} \\ \Rightarrow \dot{\vec{x}}(t) &= \vec{a}t, & \ddot{\vec{x}}(t) = \vec{a} \end{aligned} \quad (5.95)$$

(Gerade, gleichförmig beschleunigte Bewegung)

3. Kurve im \mathbb{R}^2 gegeben durch $r(t)$ und $\phi(t)$:

$$\vec{x}(t) = \begin{pmatrix} r(t) \cos(\phi(t)) \\ r(t) \sin(\phi(t)) \end{pmatrix} \quad (5.96)$$

Geschwindigkeit:

$$\begin{aligned} \dot{\vec{x}}(t) &= \begin{pmatrix} \dot{r}(t) \cos(\phi(t)) - r(t) \sin(\phi(t)) \dot{\phi}(t) \\ \dot{r}(t) \sin(\phi(t)) + r(t) \cos(\phi(t)) \dot{\phi}(t) \end{pmatrix} \\ &= \dot{r}(t) \begin{pmatrix} \cos(\phi(t)) \\ \sin(\phi(t)) \end{pmatrix} + r(t) \dot{\phi}(t) \begin{pmatrix} -\sin(\phi(t)) \\ \cos(\phi(t)) \end{pmatrix} \\ &= \dot{r}(t) \vec{e}_r + r(t) \dot{\phi}(t) \vec{e}_\phi \end{aligned} \quad (5.97)$$

Beispiel zum Beispiel: $\phi(t) = \omega t$, $r(t) = R$, ω, R fest

$$\dot{\vec{x}}(t) = 0 \vec{e}_r + R\omega \vec{e}_\phi \quad (\text{bzw. } \vec{e}_{\phi(t)=\omega t}) \quad (5.98)$$

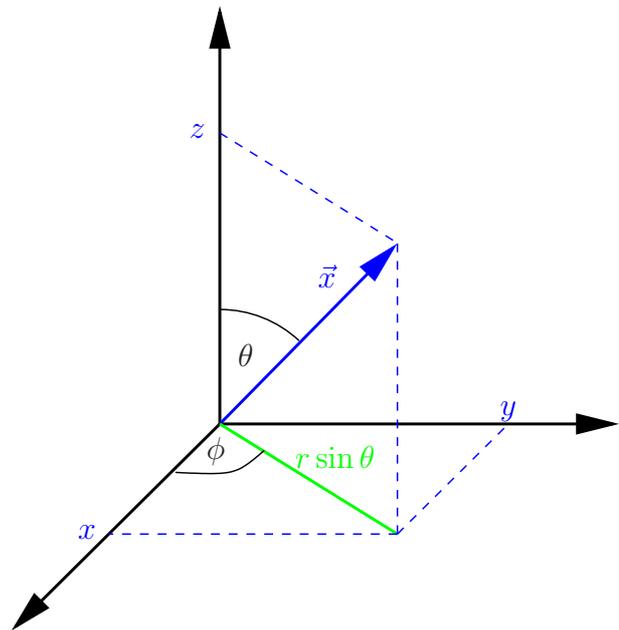
(Kreis, mit Winkelgeschwindigkeit ω durchlaufen)

Kugelkoordinaten im \mathbb{R}^3 :

$\vec{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3$ lässt sich durch Radius $r = |\vec{x}|$ und zwei Winkel, θ und ϕ , charakterisieren,

$$\vec{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r \sin \theta \cos \phi \\ r \sin \theta \sin \phi \\ r \cos \theta \end{pmatrix}, \quad (5.99)$$

$r \in [0, \infty)$, $\theta \in [0, \pi]$, $\phi \in [0, 2\pi)$.



Umgekehrt:

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \\ \phi &= \arctan \frac{y}{x} \quad (\text{Zweig beachten!}), \\ \theta &= \arccos \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \quad (\text{da } \frac{z}{r} = \cos \theta). \end{aligned} \quad (5.100)$$

6 Matrizen und Determinanten

6.1 Matrizen

Definition: Eine $m \times n$ -Matrix A ist ein rechteckiges Zahlenschema,

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix}, \quad (6.1)$$

mit m Zeilen und n Spalten. Die $a_{ij} \in \mathbb{R}$ (oder $\in \mathbb{C}$) heißen Elemente (oder Komponenten) der Matrix. Wir schreiben

$$A = (a_{ij}) \quad (6.2)$$

und sagen $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ (bzw. $A \in \mathbb{C}^{m \times n}$).

Bemerkungen:

1. Vektoren $\in \mathbb{R}^n$ lassen sich als Matrizen auffassen, entweder als Spaltenvektor,

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n \times 1}, \quad (6.3)$$

oder als Zeilenvektor,

$$(x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^{1 \times n}. \quad (6.4)$$

2. Die Addition zweier Matrizen gleichen Typs definiert man komponentenweise,

$$\begin{aligned} A &= (a_{ij}), & B &= (b_{ij}) \\ C &= A + B & \text{mit } C &= (c_{ij}), \quad c_{ij} = a_{ij} + b_{ij}, \end{aligned} \quad (6.5)$$

z.B.

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 5 & 6 \\ 7 & 8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6 & 8 \\ 10 & 12 \end{pmatrix}. \quad (6.6)$$

3. Ebenso die Multiplikation mit Skalaren,

$$\begin{aligned} A &= (a_{ij}), \quad \lambda \in \mathbb{R} \\ D &= \lambda A \quad \text{mit } D = (d_{ij}), \quad d_{ij} = \lambda a_{ij}, \end{aligned} \quad (6.7)$$

z.B.

$$2 \cdot \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & 4 \\ 6 & 8 \end{pmatrix} \quad (6.8)$$

4. Damit wird $\mathbb{R}^{m \times n}$ Vektorraum über \mathbb{R} mit den üblichen Rechenregeln und Dimension $\dim \mathbb{R}^{m \times n} = mn$.

Neutrales Element der Addition bzw. "Nullvektor" ist die Nullmatrix:

$$0 = \begin{pmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix}. \quad (6.9)$$

Definition: Für zwei Matrizen $A = (a_{ij}) \in \mathbb{R}^{m \times l}$ und $B = (b_{ij}) \in \mathbb{R}^{l \times n}$ definiert man das Matrixprodukt durch

$$C = AB \quad \text{mit} \quad C = (c_{ij}), \quad c_{ij} = \sum_{k=1}^l a_{ik} b_{kj}, \quad (6.10)$$

kurz: *Zeile mal Spalte*.

Bemerkung: Ebenso wird für $A \in \mathbb{C}^{m \times l}$ und $B \in \mathbb{C}^{l \times n}$ das Produkt $AB \in \mathbb{C}^{m \times n}$ definiert.

Beispiel:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{2 \times 3}, \quad B = \begin{pmatrix} 1 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 1 & 0 \\ 0 & 6 & 0 & 1 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{3 \times 4} \quad (6.11)$$

$$AB = \begin{pmatrix} 1 & 32 & 2 & 3 \\ 0 & 5 & 1 & 0 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{2 \times 4}$$

zum Rechnen:

$$\begin{array}{c|ccc} & & & \\ & & & \\ & & & \\ \hline \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 1 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 1 & 0 \\ 0 & 6 & 0 & 1 \end{pmatrix} & & \\ \hline & & & \end{array} \quad (6.12)$$

$$32 = 1 \cdot 4 + 2 \cdot 5 + 3 \cdot 6$$

BA ist hier gar nicht definiert!

Bemerkungen:

1. Sind A und B quadratisch, so ist sowohl AB als auch BA definiert –i.A. gilt aber $AB \neq BA$ (nichtkommutativ), z.B.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 2 & 0 \end{pmatrix}, \quad (6.13)$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 2 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

2.

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 1 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n \times n} \quad (6.14)$$

heißt Einheitsmatrix, mit Elementen

$$I = (\delta_{ij}), \quad \delta_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{für } j = k \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}, \quad (\text{Kronecker-}\delta) \quad (6.15)$$

Für jede quadratische Matrix $A = (a_{ij}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ (oder $\in \mathbb{C}^{n \times n}$) gilt

$$AI = IA = A, \quad (6.16)$$

denn, z.B. mit $C = (c_{ij}) = AI$,

$$c_{ij} = \sum_k a_{ik} \delta_{kj} = a_{ij}. \quad (6.17)$$

Rechenregeln:

1. $(A_1 + A_2)B = A_1B + A_2B$
 $A(B_1 + B_2) = AB_1 + AB_2$
2. $\lambda(AB) = (\lambda A)B = A(\lambda B)$
3. $A(BC) = (AB)C$

wobei $\lambda \in \mathbb{R}$, alles andere Matrizen, Typen so, dass alle Produkte definiert.

Beweis: Nachrechnen.

Definition: Sei $A = (a_{ij}) \in \mathbb{R}^{m \times n}$. Man nennt die Matrix $A^T = (a_{ij}^T) \in \mathbb{R}^{n \times m}$ mit Elementen

$$a_{ij}^T = a_{ji} \quad (6.18)$$

die Transponierte von A .

Beispiele:

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 2 & 4 \end{pmatrix}, \quad \vec{x} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} = (1 \ 2 \ 3)^T = (1, 2, 3)^T \quad (6.19)$$

Rechenregeln: ($\lambda \in \mathbb{R}$, A, B Matrizen – so, dass AB definiert)

1. $(A + B)^T = A^T + B^T$
2. $(\lambda A)^T = \lambda A^T$
3. $(A^T)^T = A$

4. $(AB)^T = B^T A^T$, denn, mit $C = AB$

$$c_{ij}^T = c_{ji} = \sum_k a_{jk} b_{ki} = \sum_k a_{kj}^T b_{ik}^T = \sum_k b_{ik}^T a_{kj}^T, \quad (6.20)$$

also $C^T = B^T A^T$. □

Anwendung (Matrixprodukt): Lineare Gleichungssysteme.

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &= b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &= b_2 \\ &\vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &= b_m \end{aligned} \quad (6.21)$$

ist äquivalent zu

$$A\vec{x} = \vec{b} \quad (6.22)$$

mit $A = (a_{ij}) \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $\vec{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n$ bzw. $\in \mathbb{R}^{n \times 1}$ und $\vec{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^m$
(vgl. Kurzschreibweise für LGS).

Spezialfall: $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\vec{x}, \vec{b} \in \mathbb{R}^n$: quadratisches LGS (n Gleichungen für n Unbekannte),

$$A\vec{x} = \vec{b} \quad (6.23)$$

Jetzt wäre es schön, wenn man durch A "teilen" könnte, um \vec{x} zu bekommen.

Definition: Sei $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$. Man nennt A^{-1} die zu A inverse Matrix, falls gilt

$$A^{-1}A = I \quad \text{und} \quad AA^{-1} = I. \quad (6.24)$$

Bemerkungen:

1. Nicht alle Matrizen sind invertierbar, z.B.

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \Rightarrow \quad A^2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (6.25)$$

Annahme: $\exists B \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ mit

$$\begin{array}{ll} BA = I & | \cdot A \text{ von rechts} \\ B \underbrace{A^2}_{=0} = A & \text{Widerspruch!} \end{array} \quad (6.26)$$

2. Falls existent, so ist Inverse eindeutig bestimmt, denn:

Annahme: $BA = I$ und $AC = I$. (z.z.: $B = C$)

$$B = BI = B(AC) = (BA)C = IC = C \quad \square \quad (6.27)$$

3. quadratisches LGS $A\vec{x} = \vec{b}$, A invertierbar $\Rightarrow \vec{x} = A^{-1}\vec{b}$, eindeutig!

Berechnung: $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, betrachte

$$AX = I \tag{6.28}$$

falls lösbar, dann $X = A^{-1}$. Spaltenweise:

$$X = (\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_n), \quad I = (\vec{e}_1, \dots, \vec{e}_n), \tag{6.29}$$

d.h. $\vec{x}_i = i$ -te Spalte von X . Es gilt

$$AX = (A\vec{x}_1, \dots, A\vec{x}_n) \stackrel{!}{=} (\vec{e}_1, \dots, \vec{e}_n) \tag{6.30}$$

d.h. wir lösen simultan die n LGS $A\vec{x}_i = \vec{e}_i$. Praktisch: Gauß-Algorithmus

$$\frac{\left(\begin{array}{cc|cc} A & & I & \end{array} \right)}{\vdots} \tag{6.31}$$

$$\frac{\left(\begin{array}{cc|cc} I & & A^{-1} & \end{array} \right)}{\quad}$$

Beispiel:

$$A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \tag{6.32}$$

$$\begin{array}{l} \left(\begin{array}{cc|cc} a & b & 1 & 0 \\ c & d & 0 & 1 \end{array} \right) \begin{array}{l} \leftarrow -\frac{c}{a} \\ \leftarrow + \end{array} \cdot 1/a \\ \hline \left(\begin{array}{cc|cc} 1 & \frac{b}{a} & \frac{1}{a} & 0 \\ 0 & \frac{ad-bc}{a} & -\frac{c}{a} & 1 \end{array} \right) \left| \cdot \frac{a}{ad-bc} \right. \\ \hline \left(\begin{array}{cc|cc} 1 & \frac{b}{a} & \frac{1}{a} & 0 \\ 0 & 1 & -\frac{c}{ad-bc} & \frac{a}{ad-bc} \end{array} \right) \begin{array}{l} \leftarrow + \\ \leftarrow -\frac{b}{a} \end{array} \\ \hline \left(\begin{array}{cc|cc} 1 & 0 & \frac{1}{a} + \frac{bc}{a(ad-bc)} & -\frac{b}{ad-bc} \\ 0 & 1 & -\frac{c}{ad-bc} & \frac{a}{ad-bc} \end{array} \right) \end{array} \tag{6.33}$$

$$\frac{1}{a} + \frac{bc}{a(ad-bc)} = \frac{1 \cdot ad - bc + bc}{a \cdot ad - bc} = \frac{d}{ad-bc} \tag{6.34}$$

also

$$A^{-1} = \frac{1}{ad-bc} \begin{pmatrix} d & -b \\ -c & a \end{pmatrix}, \quad \text{falls } ad-bc \neq 0. \tag{6.35}$$

Man nennt die Zahl

$$\det A = \det \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = ad - bc \tag{6.36}$$

die Determinante von A .

Sie bestimmt, ob A invertierbar ist ($\det A \neq 0$) oder nicht ($\det A = 0$).

6.2 Determinanten

$$\det \begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{pmatrix} = a_1 b_2 - a_2 b_1 = \left[\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 0 \end{pmatrix} \right]_3 = \left[\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ a_1 b_2 - a_2 b_1 \end{pmatrix} \right]_3$$

ist also Fläche (mit Vorzeichen) des, von den Vektoren

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}, \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^2$$

aufgespannten, Parallelogramms (vgl. Kreuzprodukt). Vorzeichen:

$$\det \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = 1, \quad \det(\vec{a}, \vec{b}) = -\det(\vec{b}, \vec{a}).$$

Verallgemeinerung auf höhere Dimension? Suche Abbildung

$$\det : \mathbb{R}^{n \times n} \rightarrow \mathbb{R}, \tag{6.37}$$

die das Volumen des, von den Spaltenvektoren der Matrix aufgespannten Parallelepipeds liefert (mit Orientierung, d.h. VZ) \Rightarrow Gewünschte Eigenschaften:

(i) Linearität in jeder Spalte, insbesondere

$$\det(\vec{a}_1, \dots, \lambda \vec{a}_j, \dots, \vec{a}_n) = \lambda \det(\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_j, \dots, \vec{a}_n) \quad \forall j = 1, \dots, n$$

(ii) Normierung

$$\det I = \det(\vec{e}_1, \dots, \vec{e}_n) = 1$$

(Volumen des n -dimensionalen Einheitswürfels: $1 \cdot 1 \cdots 1 = 1^n = 1$)

(iii) Alternierend, d.h. wechselt das Vorzeichen, wenn man zwei Spalten vertauscht.

Folgerungen:

(i) \Rightarrow

$$\det A = \det \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} = \sum_{j_1, \dots, j_n=1}^n C_{j_1 \dots j_n} a_{j_1 1} a_{j_2 2} \cdots a_{j_n n}$$

(Jeder Summand enthält genau ein Element aus jeder Spalte.)

(ii) \Rightarrow

$$\det I = C_{123 \dots n} = 1 \tag{6.38}$$

(iii) :

$$\det(\vec{e}_{j_1}, \dots, \vec{e}_{j_n}) = C_{j_1 \dots j_n} \tag{6.39}$$

vertausche zwei Spalten

$$\begin{aligned} C_{\dots j_k \dots j_l \dots} &= \det(\dots, \vec{e}_{j_k}, \dots, \vec{e}_{j_l}, \dots) \\ &= -\det(\dots, \vec{e}_{j_l}, \dots, \vec{e}_{j_k}, \dots) = -C_{\dots j_l \dots j_k \dots} \end{aligned} \quad (6.40)$$

Sind nun zwei der Indizes gleich (also $j_l = j_k, l \neq k$), dann ist das zugehörige C Null, d.h. jeder Summand enthält jetzt genau ein Element aus jeder Spalte **und** jeder Zeile. Weiter folgt mit $j_l \neq j_k$: Beträge aller $C_{j_1 \dots j_n}$ sind gleich (= 1).

Damit sind alle C festgelegt!

Beispiele:

- $n = 2$: $C_{11} = C_{22} = 0, \quad C_{12} = 1, \quad C_{21} = -1$ (passt, s.o.)
- $n = 3$

$$\begin{aligned} C_{123} &= 1 && \text{vertausche 1. und 2. Index} \\ C_{213} &= -1 && \text{vertausche 2. und 3. Index} \\ C_{231} &= 1 && \text{etc.} \\ C_{321} &= -1 && \\ C_{312} &= 1 && \\ C_{132} &= -1 && \end{aligned} \quad (6.41)$$

Damit erhält man tatsächlich das Spatprodukt, denn

$$\begin{aligned} \det(\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}) &= a_1 b_2 c_3 - a_2 b_1 c_3 + a_2 b_3 c_1 - a_3 b_2 c_1 + a_3 b_1 c_2 - a_1 b_3 c_2 \\ &= \underbrace{\begin{pmatrix} a_2 b_3 - a_3 b_2 \\ a_3 b_1 - a_1 b_3 \\ a_1 b_2 - a_2 b_1 \end{pmatrix}}_{=\vec{a} \times \vec{b}} \cdot \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix} = |\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}|. \end{aligned} \quad (6.42)$$

Mit etwas Indexgymnastik ergeben sich folgende

weitere Eigenschaften der Determinante: (ohne vollständige Beweise)

1. $\det A^T = \det A$
2. für (obere) Dreiecksmatrizen: Produkt der Diagonalelemente

$$\det \begin{pmatrix} a_{11} & & * \\ & \ddots & \\ 0 & & a_{nn} \end{pmatrix} = a_{11} a_{22} \cdots a_{nn} \quad (6.43)$$

3. Spalten oder Zeilen vertauschen: Faktor (-1)
insbesondere: Sind zwei Spalten (Zeilen) gleich, so verschwindet die Determinante.

4. det ist linear in jeder Zeile und Spalte, vgl. Forderung (i), insbesondere

$$\det(\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_j + \vec{b}, \dots, \vec{a}_n) = \det(\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_j, \dots, \vec{a}_n) + \det(\vec{a}_1, \dots, \vec{b}, \dots, \vec{a}_n). \quad (6.44)$$

Ebenso für Zeilen.

5. Vielfaches einer Spalte (Zeile) zu einer anderen: det invariant, denn (4. mit $\vec{b} = \lambda \vec{a}_k$, $k \neq j$)

$$\det(\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_j + \lambda \vec{a}_k, \dots, \vec{a}_n) = \det(\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_j, \dots, \vec{a}_n) + \lambda \det(\underbrace{\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_k, \dots, \vec{a}_n}_{j\text{-te Spalte}}). \quad (6.45)$$

=0, da \vec{a}_k doppelt vorkommt

also Gauß (ohne Durchmultiplizieren)

Beispiel:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & 2 & 3 \\ 1 & 1 & 5 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} \leftarrow \leftarrow \leftarrow \\ \leftarrow \leftarrow \leftarrow \end{array} \right]_+^{-1} \\ \leftarrow \leftarrow \leftarrow \end{array} \right]_+ \end{array} \quad (6.46)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 3 & 4 \\ 0 & 0 & 4 \end{pmatrix}$$

d.h. $\det A = 1 \cdot 3 \cdot 4 = 12$.

6. $\det A \neq 0$

\Leftrightarrow Spalten von A sind l.u. (ebenso Zeilen)

$\Leftrightarrow A$ invertierbar

\Leftrightarrow LGS $A\vec{x} = \vec{b}$ hat für jedes \vec{b} eine eindeutige Lösung, nämlich $\vec{x} = A^{-1}\vec{b}$

7. Determinantenmultiplikationssatz:

$$\det(AB) = \det A \cdot \det B.$$

$$\Rightarrow \det A^{-1} = \frac{1}{\det A}, \quad \text{denn} \quad \det A \cdot \det A^{-1} = \det(AA^{-1}) = \det I = 1$$

Satz 15. (Laplacescher Entwicklungssatz)

Sei $A = (a_{ij}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$. Die Matrix $A_{ij} \in \mathbb{R}^{(n-1) \times (n-1)}$ entsteht aus A durch Streichen der i -ten Zeile und der j -ten Spalte. Es gilt

$$\det A = \sum_{i=1}^n (-1)^{i+j} a_{ij} \det A_{ij} \quad (\text{Entwicklung nach der } j\text{-ten Spalte})$$

$$= \sum_{j=1}^n (-1)^{i+j} a_{ij} \det A_{ij} \quad (\text{Entwicklung nach der } i\text{-ten Zeile}) \quad (6.47)$$

(ohne Beweis)

Bemerkungen:

1. Vorzeichen sind schachbrettartig verteilt:

$$\begin{pmatrix} + & - & + & \cdots \\ - & + & - & \\ + & - & + & \\ \vdots & & & \ddots \end{pmatrix} \quad (6.48)$$

2. Vor allem sinnvoll, für Zeilen (Spalten) mit vielen Nullen.

Beispiel:

$$\begin{aligned} \det \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{pmatrix} &= 1 \det \begin{pmatrix} 5 & 6 \\ 8 & 9 \end{pmatrix} - 4 \det \begin{pmatrix} 2 & 3 \\ 8 & 9 \end{pmatrix} + 7 \det \begin{pmatrix} 2 & 3 \\ 5 & 6 \end{pmatrix} \\ &\quad \text{(Entwicklung nach der 1. Spalte)} \\ &= -4 \det \begin{pmatrix} 2 & 3 \\ 8 & 9 \end{pmatrix} + 5 \det \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 7 & 9 \end{pmatrix} - 6 \det \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 7 & 8 \end{pmatrix} \\ &\quad \text{(Entwicklung nach der 2. Zeile)} \end{aligned} \quad (6.49)$$

7 Komplexe Zahlen

Führe eine Zahl i ein, mit

$$i^2 = -1, \quad (7.1)$$

bzw. auch $i = \sqrt{-1}$. Komplexe Zahlen

$$\mathbb{C} = \{z = x + iy \mid x, y \in \mathbb{R}\} \quad (7.2)$$

Rechnen wie mit reellen Zahlen, d.h. $z_j = x_j + iy_j$, $x_j, y_j \in \mathbb{R}$,

$$\begin{aligned} z_1 + z_2 &= x_1 + iy_1 + x_2 + iy_2 \\ &= (x_1 + x_2) + i(y_1 + y_2) \\ z_1 \cdot z_2 &= (x_1 + iy_1)(x_2 + iy_2) \\ &= x_1x_2 + ix_1y_2 + iy_1x_2 + i^2y_1y_2 \\ &= (x_1x_2 - y_1y_2) + i(x_1y_2 + y_1x_2) \end{aligned} \quad (7.3)$$

$\bar{z} = x - iy$ heißt **komplex konjugiert** zu $z = x + iy$. Es folgt

$$\overline{z_1 z_2} = \bar{z}_1 \bar{z}_2, \quad (7.4)$$

und insbesondere $\overline{z^n} = \bar{z}^n$ ($n \in \mathbb{N}_0$).

$(\mathbb{C}, +, \cdot)$ ist ein Körper mit

- neutralem Element der Addition: $0 = 0 + i0$
- neutralem Element der Multiplikation: $1 = 1 + i0$
- additiv Inversem (zu $z = x + iy$, $x, y \in \mathbb{R}$): $-z = -x - iy$
- multiplikativ Inversem (zu $z \neq 0$, $z = x + iy$, $x, y \in \mathbb{R}$):

$$z^{-1} = \frac{1}{z} = \frac{\bar{z}}{z\bar{z}} = \frac{x - iy}{(x + iy)(x - iy)} = \frac{x - iy}{x^2 + y^2} \quad (\text{insbesondere: } i^{-1} = \frac{1}{i} = -i). \quad (7.5)$$

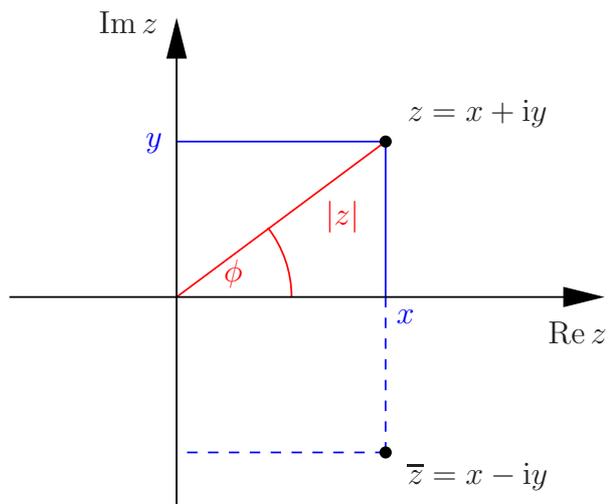
Man nennt $x \in \mathbb{R}$ **Realteil** und $y \in \mathbb{R}$ **Imaginärteil** von $z = x + iy$ und schreibt

$$\operatorname{Re} z = x, \quad \operatorname{Im} z = y \quad (7.6)$$

Offensichtlich gilt

$$\operatorname{Re} z = \frac{z + \bar{z}}{2}, \quad \operatorname{Im} z = \frac{z - \bar{z}}{2i} \quad (7.7)$$

Anschaulich:
Gaußsche Zahlenebene



Polardarstellung: Charakterisiere z durch Betrag und Argument (Phase)

$$\begin{aligned} r = |z| &= \sqrt{z\bar{z}} = \sqrt{x^2 + y^2} \\ \phi &= \arg z \in [0, 2\pi) \end{aligned} \tag{7.8}$$

$\arg z = \arctan \frac{y}{x}$ (Zweig!)

Damit $z^{-1} = \frac{\bar{z}}{|z|^2}$ und $z = r \cos \phi + ir \sin \phi$.

Einheitskreis: $\{z = \cos \phi + i \sin \phi \mid \phi \in [0, 2\pi)\}$,
 denn $|\cos \phi + i \sin \phi|^2 = \cos^2 \phi + \sin^2 \phi = 1$.

7.1 Komplexe e-Funktion

Behauptung: $e^{i\phi} = \cos \phi + i \sin \phi, \forall \phi \in \mathbb{R}$, (vgl. Prolog)

wobei die komplexe e-Funktion über die bekannte Reihe definiert wird,

24.01.2014

$$e^z := \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n!}, \quad z \in \mathbb{C} \tag{7.9}$$

$$\begin{aligned} e^{i\phi} &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{i^n \phi^n}{n!} \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{i^{2n}}{(2n)!} \phi^{2n} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{i^{2n+1}}{(2n+1)!} \phi^{2n+1} \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n)!} \phi^{2n} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n i}{(2n+1)!} \phi^{2n+1} \\ &= \cos \phi + i \sin \phi. \quad \square \end{aligned} \tag{7.10}$$

Damit nochmal Polardarstellung: $z = re^{i\phi} = |z|e^{i \arg z}$.

Definiert man auch $\sin z$ und $\cos z$ für $z \in \mathbb{C}$ durch die Reihen, so gilt auch

$$e^{iz} = \cos z + i \sin z \quad \forall z \in \mathbb{C}. \quad (7.11)$$

Rechnung genau gleich wie (7.10)

Eigenschaften: (für $\phi \in \mathbb{R}$ und $z, w \in \mathbb{C}$)

1. $|e^{i\phi}| = 1$
2. $e^z \cdot e^w = e^{z+w}$
3. $\overline{e^z} = e^{\overline{z}}$, insbesondere $\overline{e^{i\phi}} = e^{-i\phi}$
4. $\arg e^{i\phi} = \phi$ (bis auf Vielfache von 2π)
5. $\cos z = \frac{e^{iz} + e^{-iz}}{2}$, $\sin z = \frac{e^{iz} - e^{-iz}}{2i}$

Beispiele:

1. **Moivre-Formel**

$$(\cos \phi + i \sin \phi)^n = \cos(n\phi) + i \sin(n\phi), \quad \forall \phi \in \mathbb{R}, \forall n \in \mathbb{N} \quad (7.12)$$

denn $e^{in\phi} = (e^{i\phi})^n$

2. Additionstheoreme (früher geometrisch bewiesen) lassen sich nun direkt nachrechnen, z.B. ($z, w \in \mathbb{C}$)

$$\begin{aligned} \sin z \cos w + \cos z \sin w &= \frac{e^{iz} - e^{-iz}}{2i} \frac{e^{iw} + e^{-iw}}{2} + \frac{e^{iz} + e^{-iz}}{2} \frac{e^{iw} - e^{-iw}}{2i} \\ &= \frac{1}{4i} \left[e^{i(z+w)} + e^{i(z-w)} - e^{i(-z+w)} - e^{i(-z-w)} \right. \\ &\quad \left. + e^{i(z+w)} - e^{i(z-w)} + e^{i(-z+w)} - e^{i(-z-w)} \right] \\ &= \frac{e^{i(z+w)} - e^{-i(z+w)}}{2i} \\ &= \sin(w + z). \end{aligned} \quad (7.13)$$

3. $x \in \mathbb{R}$:

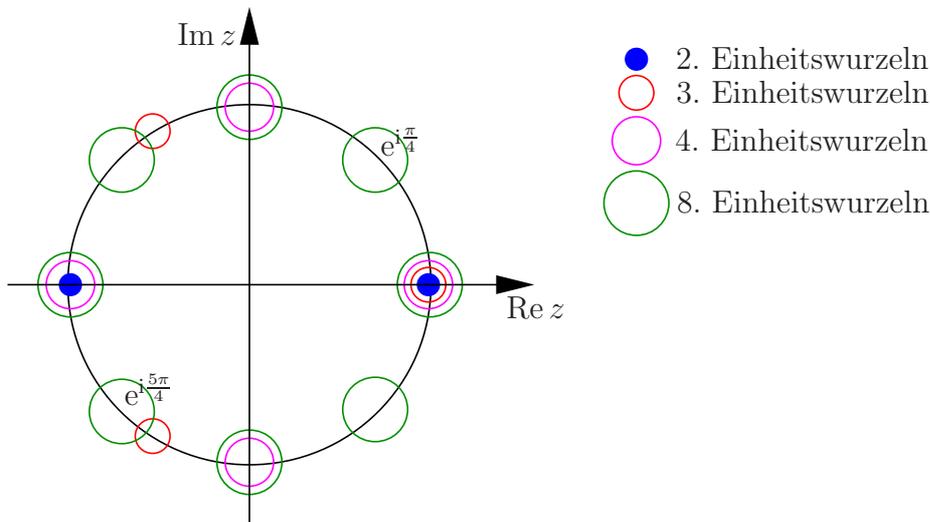
$$\begin{aligned}
 \sum_{\nu=0}^n \sin(\nu x) &= \operatorname{Im} \sum_{\nu=0}^n e^{i\nu x} = \operatorname{Im} \frac{e^{i(n+1)x} - 1}{e^{ix} - 1} && (x \neq 2\pi k, k \in \mathbb{Z}) \\
 &= \operatorname{Im} \frac{e^{i\frac{n+1}{2}x} (e^{i\frac{n+1}{2}x} - e^{-i\frac{n+1}{2}x})}{e^{i\frac{x}{2}} (e^{i\frac{x}{2}} - e^{-i\frac{x}{2}})} \frac{2i}{2i} \\
 &= \operatorname{Im} e^{i\frac{n}{2}x} \underbrace{\frac{\sin(\frac{n+1}{2}x)}{\sin(\frac{x}{2})}}_{\text{reell}} \\
 &= \sin\left(\frac{n}{2}x\right) \frac{\sin\left(\frac{n+1}{2}x\right)}{\sin\left(\frac{x}{2}\right)}
 \end{aligned} \tag{7.14}$$

Einheitswurzeln. Gesucht sind alle Lösungen $z \in \mathbb{C}$ von $z^n = 1$.

29.01.2014

Ansatz: $z = e^{i\phi} \Rightarrow z^n = e^{in\phi} \stackrel{!}{=} 1 \Leftrightarrow n\phi = 2\pi\nu, \nu \in \mathbb{Z}$

$$\Rightarrow \text{Lösungen: } \phi_\nu = \frac{2\pi}{n}\nu, \quad \nu = 0, 1, \dots, n-1 \tag{7.15}$$



n -te Wurzeln aus $w \in \mathbb{C}$:

$$z^n \stackrel{!}{=} w = |w|e^{i\psi}$$

$$z = \sqrt[n]{|w|} e^{i\frac{\psi}{n} + i\frac{2\pi}{n}\nu}, \quad \nu = 0, 1, \dots, n-1. \tag{7.16}$$

Beispiel \sqrt{i} : $i = e^{i\frac{\pi}{2}}$

$z_0 = e^{i\frac{\pi}{4}}$ und $z_1 = e^{i\frac{\pi}{4} + i\pi} = e^{i\frac{5\pi}{4}}$ erfüllen $z_j^2 = i$.

7.2 \mathbb{C}^n , $\mathbb{C}^{m \times n}$ und Verwandtes

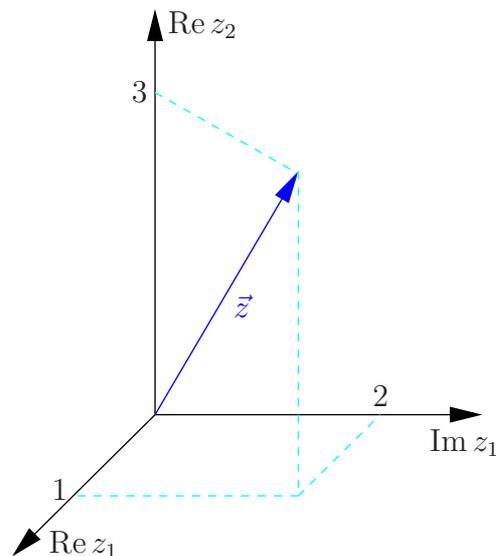
\mathbb{C} als Vektorraum über \mathbb{R} :

Dimension 2, Basis $\{1, i\}$, isomorph⁹ zu \mathbb{R}^2
(Gaußsche Zahlenebene);

analog ist z.B. \mathbb{C}^2 über \mathbb{R} isomorph zu \mathbb{R}^4 ,
z.B.

$$\vec{z} = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + 2i \\ 3 \end{pmatrix} \in \mathbb{C}^2 \quad (7.17)$$

Mit dem Zeichnen der 4. Achse, $\text{Im } z_2$, tue ich
mich etwas schwer...



Weiter sind z.B.

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \begin{pmatrix} i \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7.19)$$

l.u. in \mathbb{C}^2 als VR über \mathbb{R} , aber

l.a. in \mathbb{C}^2 als VR über \mathbb{C} .

Komplexe Vektorräume: Vektorräume über dem Körper \mathbb{C}

Alles wie bei reellen Vektorräumen, mit einer Ausnahme:

Skalarprodukte, $V \times V \rightarrow \mathbb{C}$, müssen

$$(S1)' \quad \langle \vec{z}, \vec{w} \rangle = \overline{\langle \vec{w}, \vec{z} \rangle}$$

erfüllen.

Wegen (S2), $\langle \vec{z}, \lambda \vec{w} \rangle = \lambda \langle \vec{z}, \vec{w} \rangle$, folgt

$$\langle \lambda \vec{z}, \vec{w} \rangle = \bar{\lambda} \langle \vec{z}, \vec{w} \rangle \quad (7.20)$$

Beispiel: $V = \mathbb{C}^n$ über \mathbb{C}

$$\vec{z} = \begin{pmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_n \end{pmatrix}, \quad \vec{w} = \begin{pmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix}, \quad z_j, w_j \in \mathbb{C} \quad (7.21)$$

⁹isomorph heißt hier: es gibt eine lineare bijektive Abbildung, z.B.

$$\mathbb{C}^2 \ni \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} \text{Re } z_1 \\ \text{Im } z_1 \\ \text{Re } z_2 \\ \text{Im } z_2 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^4, \quad (7.18)$$

die die Vektorraumstruktur erhält.

Kanonisches Skalarprodukt:

$$\langle \vec{z}, \vec{w} \rangle = \vec{z}^T \vec{w} := \sum_{j=1}^n \bar{z}_j w_j \quad (7.22)$$

mittlerer Ausdruck in Matrixschreibweise

Zugehörige Norm:

$$\|\vec{z}\| = |\vec{z}| = \sqrt{\vec{z}^T \vec{z}} = \sqrt{\sum_{j=1}^n |z_j|^2} \quad (7.23)$$

Beispiele:

$$\begin{aligned} \left\langle \begin{pmatrix} 1 \\ i \\ 1+i \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 3 \\ 5 \\ 1+i \end{pmatrix} \right\rangle &= (1, -i, 1-i) \begin{pmatrix} 3 \\ 5 \\ 1+i \end{pmatrix} \\ &= 3 - 5i + \underbrace{(1-i)(1+i)}_{=2} = 5 - 5i \end{aligned} \quad (7.24)$$

$$\left| \begin{pmatrix} 1+i \\ 2 \end{pmatrix} \right| = \sqrt{(1-i)(1+i) + 4} = \sqrt{6} \quad (7.25)$$

Matrizen mit komplexen Einträgen: $A = (a_{jk}) \in \mathbb{C}^{m \times n}$.

Komplex konjugierte Matrix:

$$\bar{A} = (\bar{a}_{jk}), \quad \overline{AB} = \bar{A} \bar{B}. \quad (7.26)$$

Alles wie gehabt, z.B. Determinanten,

$$\det \begin{pmatrix} 2+i & 1+3i \\ 4i & 2-i \end{pmatrix} = 4 + 1 - (4i - 12) = 17 - 4i \quad (7.27)$$

8 Integration

Definition: Sei $I \subseteq \mathbb{R}$ ein offenes Intervall und $f : I \rightarrow \mathbb{R}$. Eine diffbare Funktion $F : I \rightarrow \mathbb{R}$ heißt Stammfunktion von f , falls gilt $F'(x) = f(x) \forall x \in I$.

Bemerkung: Ist F Stammfunktion von f , so auch \tilde{F} mit $\tilde{F}(x) = F(x) + c$ für jedes $c \in \mathbb{R}$, denn

$$\tilde{F}'(x) = (F(x) + c)' = F'(x) = f. \quad (8.1)$$

So erhält man alle Stammfunktionen von f , denn, sind F und G Stammfunktionen, so gilt

$$(F(x) - G(x))' = F'(x) - G'(x) = f(x) - f(x) = 0, \quad (8.2)$$

d.h. $F(x) - G(x)$ ist konstant.

(Nur konstante Funktionen haben Ableitung $\equiv 0$:

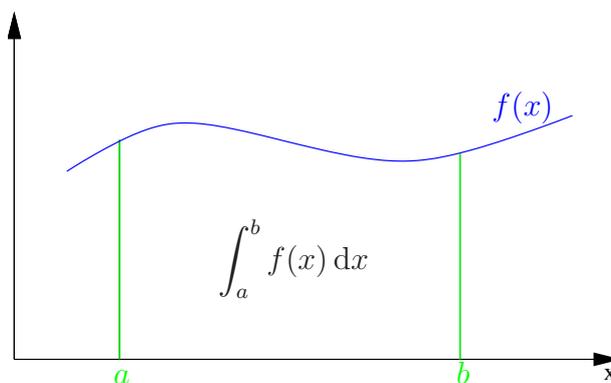
$$g'(x) = 0 \forall x \in I$$

$\Rightarrow g$ ist monoton wachsend und fallend $\forall x \in I$

$\Rightarrow g$ ist konstant.)

Fläche unter Funktionsgraph: Sei $I \subseteq \mathbb{R}$ ein Intervall, $a, b \in I$, $a < b$, $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ stetig auf I und $f(x) \geq 0 \forall x \in I$. Wir bezeichnen den Flächeninhalt der Fläche, begrenzt durch den Graph von f , die x -Achse und die senkrechten Geraden $x = a$ und $x = b$, mit

$$\int_a^b f(x) dx. \quad (8.3)$$



Behauptung: (Hauptsatz der Differential- Integralrechnung)

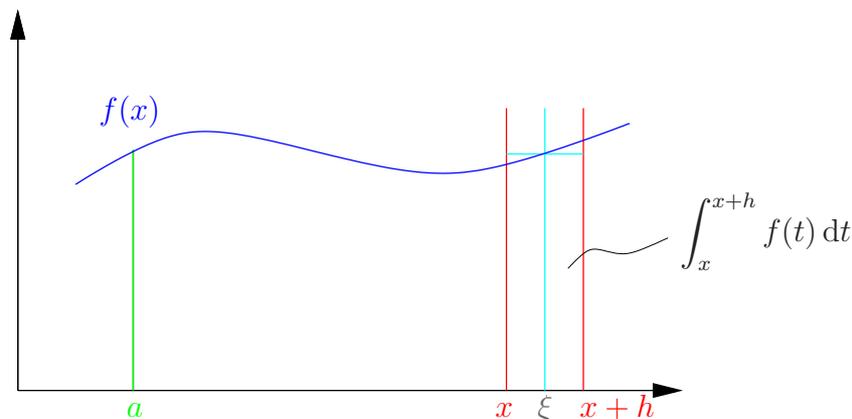
$$F(x) := \int_a^x f(t) dt \quad (8.4)$$

ist Stammfunktion von $f \forall x \in I$, d.h.

$$\frac{d}{dx} \int_a^x f(t) dt = f(x) \quad (8.5)$$

Beweisidee:

$$F'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{F(x+h) - F(x)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} \int_x^{x+h} f(t) dt. \quad (8.6)$$



Da f stetig, existiert sicher ein $\xi \in [x, x+h]$, so dass

$$\int_x^{x+h} f(t) dt = h f(\xi). \quad (8.7)$$

Damit gilt

$$F'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} f(\xi) = f(\lim_{h \rightarrow 0} \xi) = f(x) \quad (8.8)$$

□

Berechnung von Integralen: Nun gilt

$$\int_a^b f(x) dx = F(b) - F(a), \quad (8.9)$$

wobei F eine beliebige Stammfunktion von f ist, denn:

Sei F eine beliebige Stammfunktion von f , so existiert ein $c \in \mathbb{R}$ mit

$$\begin{aligned} F(x) &= \int_a^x f(t) dt + c \\ \Rightarrow F(a) &= \int_a^a f(t) dt + c = c \\ \Rightarrow \int_a^x f(t) dt &= F(x) - c = F(x) - F(a). \end{aligned} \quad (8.10)$$

$\forall x \in I$, insbesondere für $x = b$. □

Beispiel: $a \in \mathbb{R}$

$$\int_0^{\frac{\pi}{a}} \sin(ax) dx = -\frac{\cos(ax)}{a} \Big|_0^{\frac{\pi}{a}} = \left(-\frac{\cos(\pi)}{a} \right) - \left(-\frac{\cos(0)}{a} \right) = \frac{2}{a} \quad (8.11)$$

Bemerkung: Man schreibt auch (unbestimmtes Integral)

$$\int f(x) dx = F(x) \quad \text{falls} \quad F'(x) = f(x). \quad (8.12)$$

Beispiele:

$$1. \quad \int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1}, \quad n \neq -1 \quad (8.13)$$

$$2. \quad \int \frac{dx}{x} = \log x \quad (8.14)$$

Jetzt fehlt uns noch eine saubere Definition des Integrals, die z.B. auch die Schreibweise dx motiviert. . .

8.1 Riemannsche Zwischensummen

Definition: (Riemannsche Zwischensummen)

Sei $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}_0^+$ beschränkt und stückweise stetig (d.h. höchstens an endlich vielen Stellen unstetig). Zerlege $[a, b]$ in n Teilintervalle $[x_{j-1}, x_j]$, $j = 1, \dots, n$, mit

$$a = x_0 < x_1 < \dots < x_{n-1} < x_n = b, \quad (8.15)$$

und wähle aus jedem eine Zwischenstelle

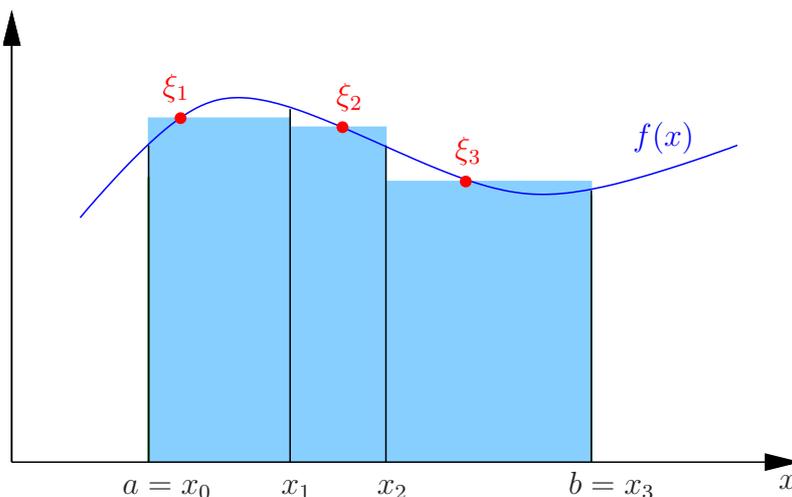
$$\xi_j \in [x_{j-1}, x_j]. \quad (8.16)$$

Man nennt

$$Z_n := \sum_{j=1}^n f(\xi_j)(x_j - x_{j-1}) \quad (8.17)$$

eine (Riemannsche) Zwischensumme. Die Länge des größten Teilintervalls heißt Feinheit μ_n der Zerlegung,

$$\mu_n = \max_j (x_j - x_{j-1}). \quad (8.18)$$

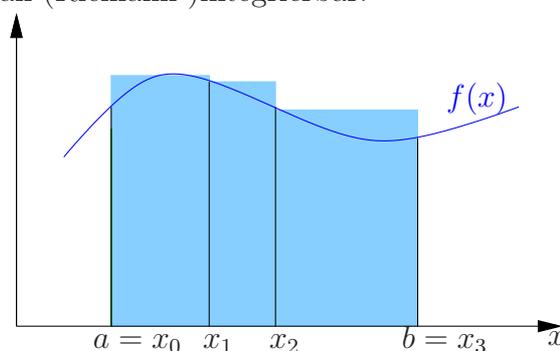
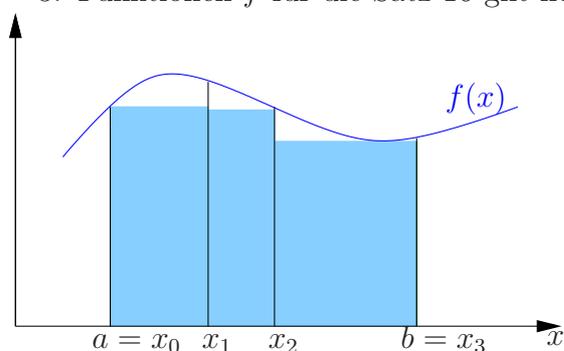


Satz 16. Sei alles wie in obiger Definition, dann gilt: Für jede Folge von Zerlegungen und Belegungen mit $\lim_{n \rightarrow \infty} \mu_n = 0$ existiert $\lim_{n \rightarrow \infty} Z_n$, der Grenzwert ist für alle solchen Folgen gleich, und wir schreiben

$$\lim_{n \rightarrow \infty} Z_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{j=1}^n f(\xi_j)(x_j - x_{j-1}) = \int_a^b f(x) dx. \quad (8.19)$$

Bemerkungen:

1. Aus $\Delta x = x_{j+1} - x_j$ wird dx : infinitesimale x -Änderung.
2. "Stützstellen" ξ_j müssen nicht äquidistant gewählt werden (z.B. bei numerischer Approximation).
3. Funktionen f für die Satz 16 gilt nennt man (Riemann-)integrierbar.



Beweisidee:

Bilde Ober- und Untersummen,

$$S_n^O := \sum_{j=1}^n \max_{x \in [x_{j-1}, x_j]} f(x) \cdot (x_j - x_{j-1}) \quad \text{und} \quad S_n^U := \sum_{j=1}^n \min_{x \in [x_{j-1}, x_j]} f(x) \cdot (x_j - x_{j-1}), \quad (8.20)$$

dann gilt

$$\min_{x \in [a, b]} f(x) \cdot (b - a) \leq S_n^U \leq Z_n \leq S_n^O \leq \max_{x \in [a, b]} f(x) \cdot (b - a). \quad (8.21)$$

S_n^U nach oben beschränkt. Bildet man das $n + 1$ -te Folgenglied durch Teilen eines Teilintervalls, so ist $S_{n+1}^U \geq S_n^U \Rightarrow$ Konvergenz. I.A. ist Konvergenz etwas aufwendiger. S_n^O analog. Die beiden Limites sind gleich (und damit auch der von Z_n), da

$$f \text{ stückweise stetig} \Rightarrow \max_{x \in [x_{j-1}, x_j]} f(x) - \min_{x \in [x_{j-1}, x_j]} f(x) \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{} 0 \text{ für fast alle } j. \quad (8.22)$$

Eigenschaften: (f, g stückweise stetig und beschränkt, $b > a$)

1. (Linearität)

$$\int_a^b [\lambda f(x) + \mu g(x)] dx = \lambda \int_a^b f(x) dx + \mu \int_a^b g(x) dx, \quad \lambda, \mu \in \mathbb{R} \quad (8.23)$$

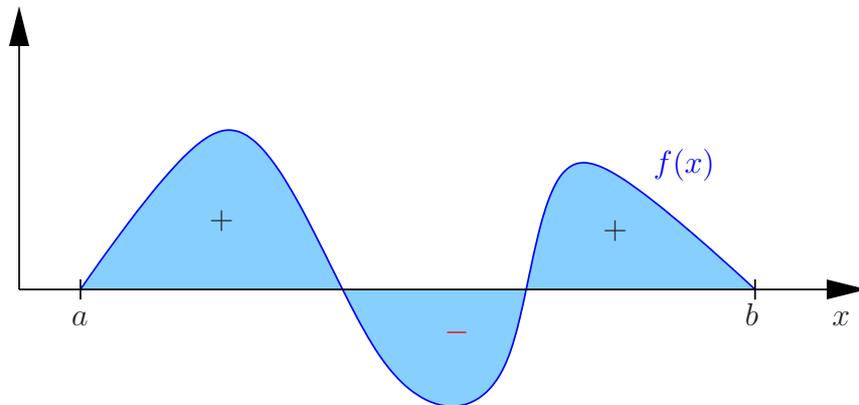
2.

$$\int_a^b f(x) dx = \int_a^c f(x) dx + \int_c^b f(x) dx, \quad c \in [a, b] \quad (8.24)$$

3. $f(x) \geq 0 \forall x \in [a, b]$: $\int_a^b f(x) dx =$ Fläche unter Graph

$$\int_a^b [-f(x)] dx \stackrel{(1)}{=} - \int_a^b f(x) dx \quad (8.25)$$

\Rightarrow Fläche wird mit Vorzeichen gemessen
(2)



4. $f(x) \leq g(x) \forall x \in [a, b] \Rightarrow$

$$\int_a^b f(x) dx \leq \int_a^b g(x) dx \quad (8.26)$$

5.

$$\left| \int_a^b f(x) dx \right| \stackrel{(3)}{\leq} \int_a^b |f(x)| dx \quad (8.27)$$

6.

$$\int_b^a f(x) dx := - \int_a^b f(x) dx \quad (8.28)$$

(Damit ist in (2) nun auch c außerhalb $[a, b]$ erlaubt, falls beide Integrale auf der rechten Seite existieren.)

Uneigentliche Integrale.

Man definiert

$$\int_a^\infty f(x) dx := \lim_{b \rightarrow \infty} \int_a^b f(x) dx \quad (8.29)$$

falls $\int_a^b \dots$ für beliebig große b existiert.

Analog für $\lim_{x \rightarrow b} f(x) = \pm\infty, a < b$:

$$\int_a^b f(x) dx := \lim_{y \rightarrow b^-} \int_a^y f(x) dx \quad (8.30)$$

Beispiele

1.

$$\int_1^{\infty} \frac{1}{x^2} dx = \lim_{b \rightarrow \infty} \int_1^b \frac{1}{x^2} dx = \lim_{b \rightarrow \infty} \underbrace{\left[-\frac{1}{x} \right]_1^b}_{= -\frac{1}{x} \Big|_1^{\infty}} = \lim_{b \rightarrow \infty} \left(-\frac{1}{b} + 1 \right) = 1 \quad (8.31)$$

2.

$$\int_0^1 \frac{1}{\sqrt{x}} dx \left(= \lim_{y \rightarrow 0+} \int_y^1 \frac{1}{\sqrt{x}} dx \right) = 2\sqrt{x} \Big|_0^1 = 2 - 0 = 2 \quad (8.32)$$

Bemerkung: Falls uneigentlich an mehreren Stellen, muss man die Limites unabhängig bilden dürfen, z.B.

$$\int_{-1}^1 \frac{dx}{x} \neq \lim_{y \rightarrow 0+} \left(\int_{-1}^{-y} \frac{dx}{x} + \int_y^1 \frac{dx}{x} \right) \quad (8.33)$$

Linke Seite existiert nicht,

$$\begin{aligned} \int_{-1}^1 \frac{dx}{x} &= \lim_{b \rightarrow 0-} \int_{-1}^b \frac{dx}{x} + \lim_{a \rightarrow 0+} \int_a^1 \frac{dx}{x} \\ &= \lim_{b \rightarrow 0-} \left[\log |x| \right]_{-1}^b + \lim_{a \rightarrow 0+} \left[\log x \right]_a^1 \\ &= \lim_{b \rightarrow 0-} \log |b| - \lim_{a \rightarrow 0+} a \\ &= \text{“} -\infty + \infty \text{”} \end{aligned} \quad (8.34)$$

wohingegen

$$\begin{aligned} \lim_{y \rightarrow 0+} \left(\int_{-1}^{-y} \frac{dx}{x} + \int_y^1 \frac{dx}{x} \right) &= \lim_{y \rightarrow 0+} \left(\log |x| \Big|_{-1}^{-y} + \log x \Big|_y^1 \right) \\ &= \lim_{y \rightarrow 0+} (\log y - \log y) = 0 \end{aligned} \quad (8.35)$$

Übrigens: $(\log |x|)' = \frac{1}{x}$, denn (Kettenregel)

$$\log |x| = \begin{cases} \log x, & x > 0 \\ \log(-x), & x < 0 \end{cases}, \quad (\log |x|)' = \begin{cases} \frac{1}{x}, & x > 0 \\ \frac{1}{(-x)}(-1), & x < 0 \end{cases} \quad (8.36)$$

8.2 Integrationstechniken

Satz 17. (Partielle Integration)

Seien f und g stetig auf $[a, b]$ und stetig diffbar auf (a, b) , dann gilt

$$\int_a^b f'(x) g(x) dx = f(x) g(x) \Big|_a^b - \int_a^b f(x) g'(x) dx \quad (8.37)$$

Beweis: Wegen $(fg)' = f'g + fg'$ gilt

$$\begin{aligned} \int_a^b [f'(x) g(x) + f(x) g'(x)] dx &= f(x) g(x) \Big|_a^b \\ &= \int_a^b f'(x) g(x) dx + \int_a^b f(x) g'(x) dx \quad \square \end{aligned} \quad (8.38)$$

abziehen \Rightarrow Beh.

Beispiele:

1.

$$\begin{aligned} \int x \cos x dx &= x \sin x - \int 1 \cdot \sin x dx \\ &= x \sin x + \cos x \end{aligned} \quad (8.39)$$

2.

$$\begin{aligned} \int \log x dx &= \int 1 \cdot \log x dx \\ &= x \log x - \int x \frac{1}{x} dx \\ &= x \log x - x \end{aligned} \quad (8.40)$$

Analog:

$$\begin{aligned} \int \arcsin x dx &= x \arcsin x - \int x \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} dx \\ &= x \arcsin x + \sqrt{1-x^2} \end{aligned} \quad (8.41)$$

3.

$$\begin{aligned} \int \sin^2 x dx &= -\sin x \cos x + \int \cos^2 x, dx \\ &= -\sin x \cos x + \int (1 - \sin^2 x), dx \\ &= -\sin x \cos x + x - \int \sin^2 x dx \\ &= \frac{x}{2} - \frac{1}{2} \sin x \cos x \end{aligned} \quad (8.42)$$

Satz 18. (Integralrestglied für Taylor)

Sei f $n + 1$ -mal stetig diffbar auf (a, b) , dann gilt

$$f(x) - \sum_{\nu=0}^n \frac{f^{(\nu)}(x_0)}{\nu!} (x - x_0)^\nu = \frac{1}{n!} \int_{x_0}^x f^{(n+1)}(t) (x - t)^n dt, \quad (8.43)$$

wobei $x, x_0 \in (a, b)$.

Beweis: (vollständige Induktion)

$n = 0$:

$$f(x) - f(x_0) = \int_{x_0}^x f'(t) dt \quad \text{o.k.} \quad (8.44)$$

$n \rightarrow n + 1$:

$$\begin{aligned} f(x) - \sum_{\nu=0}^{n+1} \frac{f^{(\nu)}(x_0)}{\nu!} (x - x_0)^\nu \\ &= f(x) - \sum_{\nu=0}^n \frac{f^{(\nu)}(x_0)}{\nu!} (x - x_0)^\nu - \frac{f^{(n+1)}(x_0)}{(n+1)!} (x - x_0)^{n+1} \\ &\stackrel{\text{i.V.}}{=} \frac{1}{n!} \int_{x_0}^x f^{(n+1)}(t) (x - t)^n dt - \frac{f^{(n+1)}(x_0)}{(n+1)!} (x - x_0)^{n+1} \\ &\stackrel{\text{p.I.}}{=} \underbrace{\frac{1}{n!} f^{(n+1)}(t) \left(-\frac{(x-t)^{n+1}}{n+1} \right) \Big|_{t=x_0}^{t=x}}_{=0 + \frac{f^{(n+1)}(x_0)}{(n+1)!} (x-x_0)^{n+1}} - \frac{1}{n!} \int_{x_0}^x f^{(n+2)}(t) \left(-\frac{(x-t)^{n+1}}{n+1} \right) dt - \frac{f^{(n+1)}(x_0)}{(n+1)!} (x - x_0)^{n+1} \\ &= \frac{1}{(n+1)!} \int_{x_0}^x f^{(n+2)}(t) (x - t)^{n+1} dt \end{aligned} \quad (8.45)$$

□

Satz 19. (Substitutionsregel)

Sei f stetig auf I und $g : [a, b] \rightarrow J \subset I$ stetig diffbar, dann gilt

$$\int_a^b f(g(t)) g'(t) dt = \int_{g(a)}^{g(b)} f(x) dx. \quad (8.46)$$

Beweis: Sei F Stammfunktion von f ,

- $\int_{g(a)}^{g(b)} f(x) dx = F(x) \Big|_{g(a)}^{g(b)} = F(g(b)) - F(g(a))$
- $\frac{d}{dt} F(g(t)) = F'(g(t)) g'(t) = f(g(t)) g'(t)$

$$\int_a^b f(g(t)) g'(t) dt = F(g(t)) \Big|_a^b = F(g(b)) - F(g(a)) \quad \square \quad (8.47)$$

Beispiele:

1.

$$\int \frac{g'(t)}{g(t)} dt = \log |g(t)|, \quad \text{mit } f(x) = \frac{1}{x}, F(x) = \log |x| \quad (8.48)$$

z.B.

$$\begin{aligned} \int \tan x dx &= \int \frac{\sin x}{\cos x} dx = -\log |\cos x|, & \text{mit } g(x) &= \cos x, \\ \int_e^{10} \frac{dx}{x \log x} &= \log \log x \Big|_e^{10} = \log \log 10, & \text{mit } g(x) &= \log x, \end{aligned} \quad (8.49)$$

2.

$$\begin{aligned} \int \sin^n x \cos x dx & \quad \sin x = t, \quad \cos x dx = dt \quad \left(\frac{dt}{dx} = \cos x \right) \\ &= \int t^n dt = \frac{t^{n+1}}{n+1} = \frac{\sin^{n+1}(x)}{n+1} \end{aligned} \quad (8.50)$$

3.

$$\int_0^\pi \sin^2 x dx \quad \sin x = t, \quad \cos x dx = dt, \quad dx = \frac{dt}{\cos x} = \frac{dt}{\sqrt{1-\sin^2 x}} = \frac{dt}{\sqrt{1-t^2}} \quad (8.51)$$

$$\neq \int_{\sin 0=0}^{\sin \pi=0} \frac{t^2}{\sqrt{1-t^2}} dt = 0 ?$$

Vorsicht: $\sin^2 x + \cos^2 x = 1 \forall x$,

aber $\cos x = \sqrt{1 - \sin^2 x}$ nur dort, wo $\cos x \geq 0$,

z.B. nicht für $\frac{\pi}{2} < x \leq \pi$.

Merke: Vorsicht beim Wurzelziehen!

Übrigens: Das Integral löst man mit partieller Integration, siehe Beispiel dort.

Einschub: Ableiten nach oberer und/oder unterer Grenze

(vgl. ÜA 69)

$$\frac{d}{dx} \int_{\phi(x)}^{\psi(x)} f(t) dt \quad (8.52)$$

Sei F Stammfunktion von f , d.h. $F' = f$:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \int_{\phi(x)}^{\psi(x)} f(t) dt &= \frac{d}{dx} \left(F(\psi(x)) - F(\phi(x)) \right) \\ &= F'(\psi(x)) \psi'(x) - F'(\phi(x)) \phi'(x) \\ &= f(\psi(x)) \psi'(x) - f(\phi(x)) \phi'(x) \end{aligned} \tag{8.53}$$

F taucht nicht mehr auf! Geht also auch, wenn man F nicht explizit kennt!

Beispiel:

$$\frac{d}{dx} \int_0^{\sin x} e^{-t^2} dt = e^{-\sin^2 x} \cos x. \tag{8.54}$$

8.2.1 Partialbruchzerlegung

Idee:

$$\begin{aligned} \int \frac{1}{(x-1)(x-2)} dx &= \int \left(\frac{1}{x-2} - \frac{1}{x-1} \right) dx \\ &= \log|x-2| - \log|x-1| \\ &= \log \left| \frac{x-2}{x-1} \right| \end{aligned} \tag{8.55}$$

Wie findet man die **Zerlegung**?

Ziel: Berechne

$$\int \frac{P(x)}{Q(x)} dx \tag{8.56}$$

mit Polynomen, P, Q , mit reellen Koeffizienten – o.B.d.A Zählergrad < Nennergrad (sonst Polynomdivision). Sei Q von Grad n , d.h.

$$Q(x) = c_n \prod_{j=1}^r (x - x_j)^{\nu_j}, \quad \sum_{j=1}^r \nu_j = n, \quad c_n \neq 0, \tag{8.57}$$

Nullstellen x_j mit Vielfachheiten ν_j :

- Entweder $x_j \in \mathbb{R}$
- oder $x_j \notin \mathbb{R} \Rightarrow \overline{x_j}$ ist auch Nullstelle,

denn mit

$$Q(x) = \sum_{k=0}^n c_k x^k, \quad c_j \in \mathbb{R}, \tag{8.58}$$

gilt: Aus $Q(x_j) = \sum_{k=0}^n c_k x_j^k = 0$ folgt

$$0 = \overline{Q(x_j)} = \sum_{k=0}^n \overline{c_k x_j^k} = \sum_{k=0}^n c_k \overline{x_j^k} = Q(\overline{x_j}). \quad \square \quad (8.59)$$

Beispiel: $Q(x) = 1 + x^2$, Nullstellen $\pm i$.

Nun gilt:

$$\begin{aligned} \frac{P(x)}{Q(x)} &= \frac{a_1^{(1)}}{x - x_1} + \frac{a_1^{(2)}}{(x - x_1)^2} + \dots + \frac{a_1^{(\nu_1)}}{(x - x_1)^{\nu_1}} \\ &\quad + \frac{a_2^{(1)}}{x - x_2} + \dots + \frac{a_2^{(\nu_2)}}{(x - x_2)^{\nu_2}} \\ &\quad \vdots \\ &\quad + \frac{a_r^{(1)}}{x - x_r} + \dots + \frac{a_r^{(\nu_r)}}{(x - x_r)^{\nu_r}} \end{aligned} \quad (8.60)$$

mit Koeffizienten $a_j^{(k)} \in \mathbb{C}$. (Beweis: Auf Hauptnenner bringen.)

Falls Nullstelle komplex, so sind Koeffizienten der komplex konjugierten Nullstelle auch das Komplexkonjugierte der Koeffizienten (nur dann wird Summe der Partialbrüche wieder reell).

Partialbrüche lassen sich integrieren

Beispiele

1.

$$\frac{1}{(x-1)(x-2)} = \frac{a}{x-1} + \frac{b}{x-2} \quad (8.61)$$

1. Methode: Hauptnenner & Koeffizientenvergleich

$$\begin{aligned} a(x-2) + b(x-1) &= (a+b)x - (2a+b) \stackrel{!}{=} 1 \\ \Rightarrow a+b &= 0, \quad 2a+b = -1 \quad (\text{LGS}) \\ \Rightarrow b &= -a, \quad a = -1 \quad \Rightarrow (b=1) \end{aligned} \quad (8.62)$$

2. Methode: Grenzübergänge ("Zuhaltmethode")

$$\frac{1}{(x-1)(x-2)} = \frac{a}{x-1} + \frac{b}{x-2} \quad \left| (x-1) \text{ danach } x=1 \right. \quad (8.63)$$

$$\frac{1}{-1} = a$$

$$\dots \quad \left| (x-2) \text{ danach } x=2 \right. \quad (8.64)$$

$$\frac{1}{1} = b$$

2.

$$\frac{x+1}{(x-1)^2} = \frac{a}{x-1} + \frac{b}{(x-1)^2} \quad \left| (x-1)^2, \quad x=1 \right. \quad (8.65)$$

$$1+1=2=b$$

...

$$\left| (x-1), \quad x \rightarrow \infty \right. \quad (8.66)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{x+1}{x-1} = 1 = a$$

also

$$\begin{aligned} \int \frac{x+1}{(x-1)^2} dx &= \int \frac{1}{x-1} dx + \int \frac{2}{(x-1)^2} dx \\ &= \log|x-1| - \frac{2}{x-1} \end{aligned} \quad (8.67)$$

3.

$$\frac{x^2-1}{(x^2+1)^2} = \frac{a}{x-i} + \frac{b}{(x-i)^2} + \frac{\bar{a}}{x+i} + \frac{\bar{b}}{(x+i)^2} \quad \left| (x-i)^2, \quad x=i \right. \quad (8.68)$$

$$\frac{i^2-1}{(i+i)^2} = \frac{1}{2} = b$$

$$\dots \quad \left| (x-i), \quad x \rightarrow \infty \right. \quad (8.69)$$

$$0 = a + \bar{a} \quad \Leftrightarrow \quad \operatorname{Re} a = 0$$

$$\dots \quad \left| x=0 \right. \quad (8.70)$$

$$-1 = ia - \frac{1}{2} - i\bar{a} - \frac{1}{2} \quad \Leftrightarrow \quad \operatorname{Im} a = 0 \quad (8.71)$$

also

$$\begin{aligned} \int \frac{x^2-1}{(x^2+1)^2} dx &= \frac{1}{2} \int \frac{dx}{(x-i)^2} + \frac{1}{2} \int \frac{dx}{(x+i)^2} \\ &\stackrel{(*)}{=} -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{x-i} + \frac{1}{x+i} \right) = -\frac{x}{x^2+1} \end{aligned} \quad (8.72)$$

Da wir uns nicht sicher sind, ob (*) o.k. war, machen wir zumindest den Test:

$$\left(-\frac{x}{x^2+1} \right)' = -\frac{(x^2+1) - x \cdot 2x}{(x^2+1)^2} = \frac{x^2-1}{(x^2+1)^2} \quad \text{o.k.} \quad (8.73)$$

Übrigens, auch gut für Reihenentwicklung:

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{(x-1)(x-2)} &= \frac{1}{1-x} - \frac{1}{2} \frac{1}{1-\frac{x}{2}} \\
 &= \sum_{\nu=0}^{\infty} x^{\nu} - \frac{1}{2} \sum_{\nu=0}^{\infty} x^{\nu} 2^{-\nu} \\
 &= \sum_{\nu=0}^{\infty} (1 - 2^{-(\nu+1)}) x^{\nu}
 \end{aligned}
 \tag{8.74}$$

Bisher hätten wir das mit dem Cauchy-Produkt gerechnet.

Beispiel aus der Vorlesung vom 6.2.13, wiederholt am 16.4.13:

$$\int_3^{\infty} \frac{7x+1}{(x^2-1)(x+2)} dx
 \tag{8.75}$$

Nenner-Nullstellen: $-1, 1, 2$, d.h.

$$\frac{7x+1}{(x^2-1)(x+2)} = \frac{A}{x+1} + \frac{B}{x-1} + \frac{C}{x-2},
 \tag{8.76}$$

$\cdot(x+1), x \rightarrow -1: \frac{-7+1}{(-1-1)(-1-2)} = A$, d.h. $A = -1$.

Analog: $B = -4, C = 5$. Damit

$$\begin{aligned}
 \int_3^{\infty} \frac{7x+1}{(x^2-1)(x+2)} dx &= \int_3^{\infty} \left(-\frac{1}{x+1} - \frac{4}{x-1} + \frac{5}{x-2} \right) dx \\
 &= \left[-\log(x+1) - 4\log(x-1) + 5\log(x-2) \right]_3^{\infty} \\
 &= \left[\log \frac{(x-2)^5}{(x+1)(x-1)^4} \right]_3^{\infty} = \log 1 - \log \frac{1}{4 \cdot 2^4} \\
 &= 6 \log 2
 \end{aligned}
 \tag{8.77}$$