

Notizen zur Vorlesung

Analysis I



G. Sweers

Wintersemester 2022-2023

Inhaltsverzeichnis

1	Zahlen	1
1.1	Elementares	1
1.1.1	Logische Symbole	1
1.1.2	Sonstige Symbole	2
1.1.3	Abbildungen, Funktionen	3
1.2	Natürliche Zahlen	4
1.2.1	Vollständige Induktion	5
1.2.2	Funktionen auf \mathbb{N}	6
1.2.3	Ganze Zahlen	8
1.3	Rationale Zahlen	8
1.3.1	Algebraische Eigenschaften	8
1.3.2	Ordnung in \mathbb{Z} und \mathbb{Q}	9
1.3.3	Unendlich und abzählbar	10
1.3.4	Rationale Zahlen reichen nicht	10
1.3.5	Wie kann man reelle Zahlen einführen?	10
2	Reelle Zahlen	13
2.1	Ordnung	13
2.2	Einführung der reellen Zahlen	14
2.3	Andere Einführungen der reellen Zahlen	18
2.3.1	Nur eine vollständige Erweiterung?	20
2.4	Eigenschaften	21
2.4.1	Abzählbarkeit	21
2.4.2	Vollständigkeit	22
3	Komplexe Zahlen I	23
3.1	Etwas Imaginäres	23
3.2	Algebraische Gleichungen in \mathbb{C}	27
3.2.1	Das Lösen von $z^n = w$	28
3.2.2	Das Lösen von $z^2 + \beta z + \gamma = 0$	30
4	Komplexe Zahlen II	33
4.1	Fundamentalsatz der Algebra	33
4.1.1	Sein und haben	36
4.1.2	Reelle Koeffizienten und komplexe Wurzeln.	36
4.2	Ungleichungen und \mathbb{C}	37
4.3	Geometrische Überlegungen	37
4.4	Abbildungen von \mathbb{C} nach \mathbb{C}	40

5	Folgen und Konvergenz	45
5.1	Cauchy-Folgen und Konvergenz	45
5.1.1	Monotone Folgen	45
5.1.2	Cauchy-Folgen sind konvergente Folgen	46
5.1.3	Rechenregeln	52
5.1.4	Das Einschließungslemma.	54
5.2	Analytische Fundamente	55
5.2.1	Maximum, Minimum, Supremum und Infimum	55
5.2.2	Limes Superior und Limes Inferior	57
5.2.3	Häufungswert und Bolzano-Weierstrass	59
6	Spezielle Funktionen und Grenzwerte	61
6.1	Funktionen	61
6.2	Nochmals Polynome	62
6.3	Rationale Funktionen	63
6.4	Potenzen und Wurzeln	68
6.4.1	Potenzen mit rationalen Koeffizienten	69
6.5	Einige Standardfolgen und deren Grenzwerte	70
6.6	Wie man ohne Taschenrechner zum Beispiel $\sqrt[3]{5}$ approximieren kann.	73
7	Reihen I	75
7.1	Folgen aus Folgen	75
7.2	Konvergenz für Reihen mit positiven Gliedern	77
7.3	Konvergenz für Reihen mit beliebigen Gliedern	79
7.4	Absolute Konvergenz	82
7.5	Zwei Konvergenzkriterien	83
7.6	Konvergenz bei alternierenden Gliedern	85
7.7	Rezeptur	88
8	Reihen II	89
8.1	Summen und Produkte von Reihen	89
8.2	Potenzreihen	91
8.2.1	Exponentialreihe	92
8.2.2	Binomialreihe	93
9	Stetigkeit I	97
9.1	Grenzwerte bei Funktionen	97
9.1.1	Der einfachste Fall	97
9.1.2	Einseitiger Limes	99
9.1.3	Wenn der Limes nicht existiert	101
9.2	Stetigkeit	105
9.2.1	Folgenstetig	109
9.2.2	Stetigkeit in \mathbb{C}	110
10	Stetigkeit II	111
10.1	Regeln bei Grenzwerten und Stetigkeit	111
10.2	Uneigentliche Konvergenz und Asymptoten	113
10.2.1	Horizontale Asymptoten	113
10.2.2	Vertikale Asymptoten	114
10.2.3	Schiefe Asymptoten	116

10.3	Erweiterungen von Limes und Stetigkeit	118
10.4	Folgen der Stetigkeit	119
11	Differentialrechnung I	123
11.1	Ableitung einer Funktion	123
11.2	Einseitige Ableitungen	125
11.3	Höhere Ableitungen	126
11.4	Differenzierbarkeit liefert Stetigkeit	127
11.5	Ableitungsregeln	129
11.6	Potenzreihen ableiten	130
11.7	Spezielle Potenzreihen	133
11.7.1	Exponentialfunktion	133
11.7.2	Trigonometrische Funktionen	134
11.7.3	Hyperbolische Funktionen	138
12	Differentialrechnung II	141
12.1	Mittelwertsatz und Folgen	141
12.2	Die Umkehrfunktion	144
12.2.1	Der Logarithmus als berühmte Umkehrfunktion	146
12.2.2	Die zyklometrischen Funktionen oder Arcusfunktionen als Umkehrfunktionen	148
12.2.3	Die Areafunktionen als Umkehrfunktionen	150
12.3	Taylorpolynome	152
12.3.1	Aussagen und Heuristik	152
12.3.2	Beweis des Taylorschen Satzes	155
12.4	Taylorreihen	156
12.4.1	Zusammenhang zwischen Taylor- und Potenzreihen	157
13	Integralrechnung I	161
13.1	Motivation	162
13.2	Riemann-Integrale	163
13.2.1	Definition für Treppenfunktionen	163
13.2.2	Definition für mehr allgemeine Funktionen	165
13.3	Integrierbare Funktionen	170
13.4	Stetigkeit und Integrierbarkeit	173
13.5	Eigenschaften von Integralen	175
14	Integralrechnung II	179
14.1	Der Hauptsatz der Integralrechnung	179
14.2	Partielle Integration	181
14.3	Substitutionsregel	183
14.4	Kalkül bei Integralen	184
14.4.1	Integration von rationalen Funktionen	184
14.4.2	Integration von trigonometrischen Polynomen	187
14.4.3	Integration von rationalen Funktionen mit Exponent	188
14.4.4	Integration bei quadratischen Wurzeln aus Polynomen von Grad 2	190

15 Integralrechnung III	195
15.1 Uneigentliche Integrale	195
15.1.1 Das uneigentliche Riemann-Integral der ersten Sorte	196
15.1.2 Das uneigentliche Riemann-Integral der zweiten Sorte	199
15.2 Reihen und uneigentliche Riemann-Integrale	203
Literaturverzeichnis	205
Index	206

Analysis 1, Woche 1



Zahlen

1.1 Elementares

Bevor wir mit Analysis anfangen, legen wir erst einige mathematische Symbole fest.

1.1.1 Logische Symbole

Seien \mathcal{A} und \mathcal{B} Aussagen. So eine Aussage ist zum Beispiel: Gras ist grün, oder Krokodile fliegen. Die erste Aussage wird meistens wahr sein; die zweite Aussage höchst selten. Wenn eine Aussage wahr ist, sagt man auch: Sie gilt. Für mathematische Aussagen werden wir zwei Möglichkeiten zulassen: wahr oder unwahr.

Um logische Folgerungen kurz und klar aufschreiben zu können, hat man sich auf die folgenden Symbole geeinigt:

- $\mathcal{A} \wedge \mathcal{B}$ heißt „ \mathcal{A} und \mathcal{B} “;
- $\mathcal{A} \vee \mathcal{B}$ heißt „ \mathcal{A} oder \mathcal{B} “ (auch beides gleichzeitig ist erlaubt);
- $\mathcal{A} \Rightarrow \mathcal{B}$ heißt „wenn \mathcal{A} gilt, dann gilt auch \mathcal{B} “;
 $\mathcal{A} \Leftarrow \mathcal{B}$ bedeutet $\mathcal{B} \Rightarrow \mathcal{A}$;
 $\mathcal{A} \Leftrightarrow \mathcal{B}$ bedeutet $(\mathcal{A} \Rightarrow \mathcal{B}) \wedge (\mathcal{A} \Leftarrow \mathcal{B})$;
- $\neg \mathcal{A}$ ist die Verneinung von \mathcal{A} .

In einer Wahrheitstafel fasst man dies wie folgt zusammen:

\mathcal{A}	\mathcal{B}	$\mathcal{A} \wedge \mathcal{B}$	$\mathcal{A} \vee \mathcal{B}$	$\mathcal{A} \Rightarrow \mathcal{B}$	$\neg \mathcal{A}$
wahr	wahr	wahr	wahr	wahr	unwahr
unwahr	wahr	unwahr	wahr	wahr	wahr
wahr	unwahr	unwahr	wahr	unwahr	unwahr
unwahr	unwahr	unwahr	unwahr	wahr	wahr

Beispiel 1.1. Die Aussage

„Wenn es regnet, fahre ich nicht mit dem Fahrrad zur Arbeit“

Diese Aussage ist wahr, denn ich fahre nie mit dem Fahrrad zur Arbeit. Ob es regnet oder nicht, ist egal.

Beispiel 1.2. Die Aussage

„Wenn man Niederländer ist, hat man Holzschuhe“
ist nicht wahr, denn der Autor dieses Skripts hat keine Holzschuhe.

Beispiel 1.3. Die Aussage

„Die Aussage, dass wenn man Niederländer ist, hat man Holzschuhe, ist unwahr“
ist jedoch wahr.

Bei der Herleitung einer konsistenten Schlussfolgerung ist die logische Umkehrung oft sehr nützlich. Mit Hilfe einer Wahrheitstafel sieht man leicht, dass $\mathcal{A} \Rightarrow \mathcal{B}$ und $\neg \mathcal{B} \Rightarrow \neg \mathcal{A}$ äquivalent sind:

\mathcal{A}	\mathcal{B}	$\mathcal{A} \Rightarrow \mathcal{B}$	$\neg \mathcal{B}$	$\neg \mathcal{A}$	$\neg \mathcal{B} \Rightarrow \neg \mathcal{A}$
wahr	wahr	wahr	unwahr	unwahr	wahr
unwahr	wahr	wahr	unwahr	wahr	wahr
wahr	unwahr	unwahr	wahr	unwahr	unwahr
unwahr	unwahr	wahr	wahr	wahr	wahr

Dieses Ergebnis fassen wir zusammen im nächsten Lemma.

Lemma 1.1 Seien \mathcal{A} und \mathcal{B} beliebige Aussagen. Dann gilt die logische Umkehrung:

$$(\mathcal{A} \Rightarrow \mathcal{B}) \Leftrightarrow (\neg \mathcal{B} \Rightarrow \neg \mathcal{A}).$$

Theoreme, Propositionen und Lemmata werden in der Mathematik benutzt, um mehr oder weniger wichtige Aussagen konzentriert darzustellen.

1.1.2 Sonstige Symbole

Für eine konzentrierte Darstellung mathematischer Ergebnisse verwendet man die folgenden Symbole aus der Mengenlehre:

- $x \in A$ heißt „ x ist ein Element von A “;
- $A \subset B$ heißt „ A ist eine Teilmenge von B “;
- $A \cup B = \{x; x \in A \text{ oder } x \in B\}$ ist die Vereinigung beider Mengen („oder“ ist hier nicht ausschließend);
- $A \cap B = \{x; x \in A \text{ und } x \in B\}$ ist der Durchschnitt beider Mengen;
- $A \setminus B = \{x; x \in A \text{ und } x \notin B\}$;
- \exists heißt „es gibt“;
- \forall heißt „für alle“.

Lemma 1.2 Sei A eine Menge und \mathcal{A}_x eine Aussage für $x \in A$. Dann folgt:

$$\neg(\forall x \in A \text{ gilt } \mathcal{A}_x) \Leftrightarrow (\exists x \in A \text{ mit } \mathcal{A}_x \text{ gilt nicht}).$$

Dies kann man noch kürzer fassen mittels:

$$\neg(\forall x \in A : \mathcal{A}_x) \Leftrightarrow (\exists x \in A : \neg \mathcal{A}_x).$$

Eine allgemeine Aussage für die Elemente einer Menge ist also falsch, wenn man in dieser Menge ein Gegenbeispiel findet.

1.1.3 Abbildungen, Funktionen

Wenn A und B zwei Mengen sind, dann nennt man eine Vorschrift f , die an jedes Element von A ein Element von B koppelt, eine Abbildung oder **Funktion**. Man schreibt $f : A \mapsto B$. Wenn für $(a, b) \in A \times B$ gilt $f(a) = b$, dann nennt man b das Bild von a . Die Teilmenge $f^{-1}(b) := \{a \in A; f(a) = b\}$ nennt man das Urbild von b .

Definition 1.3 Eine Abbildung $f : A \mapsto B$ heißt **injektiv** (= eineindeutig), wenn $f(x) = f(y)$ impliziert, dass $x = y$.

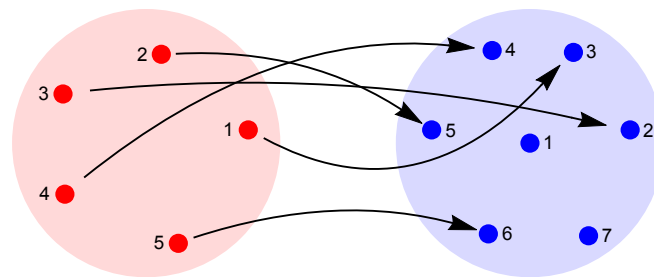


Abbildung 1.1: Skizze einer injektiven Abbildung: jedes Urbild hat höchstens ein Element.

Definition 1.4 Eine Abbildung $f : A \mapsto B$ heißt **surjektiv**, wenn es für jedes $b \in B$ mindestens ein $a \in A$ gibt mit $f(a) = b$.

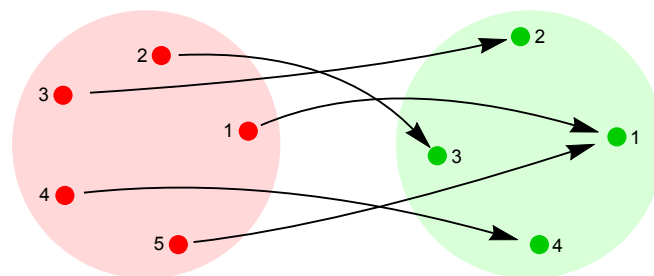


Abbildung 1.2: Skizze einer surjektiven Abbildung: jedes Element von B hat ein nicht-leeres Urbild.

Definition 1.5 Eine Abbildung $f : A \mapsto B$, die surjektiv und injektiv ist, heißt **bijektiv**.

Beispiel 1.4. Sei A die Menge aller Steuerzahler in Deutschland. Die Abbildung f , die deren Steuernummern liefert, ist überraschenderweise nicht injektiv. Tatsächlich scheint

nur die Abbildung nach $\{\text{Steuernummer, Identitätsnummer}\}$ injektiv zu sein. ■

Beispiel 1.5. Sei A die Menge der Studierenden am Donnerstagmorgen 22.10.2015 um 8.30 im Hörsaal B. Weil Mathematik- und Physikstudierende die gleiche Vorlesung hören, wurde befürchtet, dass die Abbildung auf die Sitzplätze surjektiv ist. Die ähnliche Abbildung am Montagmorgen 23.12.2015 wird garantiert nicht surjektiv sein. Diese und ähnliche Abbildungen sind normalerweise jedoch injektiv. ■

1.2 Natürliche Zahlen

Die Menge der **natürlichen Zahlen** nennt man \mathbb{N} :

$$\mathbb{N} = \{0, 1, 2, \dots\}.$$

Manchmal fängt man auch erst mit 1 statt 0 an. Wir werden 0 dazunehmen und für die natürlichen Zahlen ohne 0 schreiben wir

$$\mathbb{N}^+ = \{1, 2, 3, \dots\}.$$

Addition und Multiplikation sind Abbildungen von $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$ nach \mathbb{N} .

Wir nehmen an, dass man diese natürlichen Zahlen kennt. Man könnte sich noch beschweren, dass die alten Römer diese Zahlen \mathbb{N}^+ so nicht kannten und $\{\text{I, II, III, IV, V, } \dots\}$ schrieben.

Axiomatisch kann man \mathbb{N} einführen wie in der Fußnote¹.

Jede natürliche Zahl $n \geq 2$, die nur durch n und 1 innerhalb \mathbb{N} teilbar ist, nennt man **Primzahl**.

Lemma 1.7 *Es gibt unendlich viele Primzahlen.*

Beweis. Wenn es nur endlich viele Primzahlen gäbe, sagen wir nur k viele und nennen wir sie p_1, \dots, p_k , dann ist

$$\tilde{p} = p_1 \dots p_k + 1$$

eine $(k + 1)$ -ste Primzahl. Dies ist ein Widerspruch und wegen Lemma 1.1 folgt die Behauptung. ■

¹Peano führt \mathbb{N} wie folgt ein:

Definition 1.6 \mathbb{N} ist eine Menge für die gilt:

1. $0 \in \mathbb{N}$,
2. Es gibt eine Nachfolgeabbildung $N : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ derart, dass:
 - (a) $0 \notin N(\mathbb{N})$,
 - (b) N ist injektiv,
 - (c) für jede Teilmenge $A \subset \mathbb{N}$, mit $0 \in A$ und $N(A) \subset A$, gilt $A = \mathbb{N}$.

Wenn man kein Römer ist, dann kürzt man durch: $1 := N(0)$, $2 := N(N(0))$ usw.

1.2.1 Vollständige Induktion

Wenn man für alle $n \in \mathbb{N}$ eine Behauptung $B(n)$ beweisen möchte, kann man oft den folgenden Ansatz benutzen:

Theorem 1.8 (Induktionsprinzip) Sei $B(n)$ mit $n \in \mathbb{N}$ eine Folge von Behauptungen. Nehme an

1. $B(0)$ gilt, und
2. $(B(n) \Rightarrow B(n+1))$ gilt für alle $n \in \mathbb{N}$.

Dann hat man „ $B(n)$ gilt für alle $n \in \mathbb{N}$ “.

Bemerkung 1.8.1 Die zweite Bedingung heißt: angenommen $B(n)$ ist wahr, dann folgt, dass auch $B(n+1)$ wahr ist und dies gilt für jedes $n \in \mathbb{N}$.

Beweis. Nenne A die Teilmenge aus \mathbb{N} , die definiert wird durch „ $B(n)$ ist wahr für $n \in A$ “. Eigenschaft 2(c) aus Definition 1.6 gibt das Ergebnis. ■

Als Beispiel betrachten wir eine berühmte Ungleichung.

Lemma 1.9 (Bernoullische Ungleichung) Für $x > -1$ und $n \in \mathbb{N}$ gilt

$$(1+x)^n \geq 1+nx. \quad (1.1)$$

Beweis. Diese Behauptung läßt sich mit dem Induktionsprinzip beweisen. Zwei Aussagen sind zu beweisen.

1. $B(0)$, also $(1+x)^0 \geq 1+0x$.

Dies gilt, denn für $n=0$ hat man $(1+x)^0 = 1 \geq 1+0x$.

2. $B(n) \Rightarrow B(n+1)$ für $n \in \mathbb{N}$, also

$$(1+x)^n \geq 1+nx \Rightarrow (1+x)^{n+1} \geq 1+(n+1)x.$$

Dies beweist man wie folgt: Angenommen

$$(1+x)^n \geq 1+nx \quad (1.2)$$

gilt, dann findet man

$$\begin{aligned} (1+x)^{n+1} &= (1+x)^n (1+x) \stackrel{*}{\geq} (1+nx)(1+x) \\ &= 1+(n+1)x+nx^2 \geq 1+(n+1)x. \end{aligned}$$

Bei *) ist erstens die Induktionsannahme (1.2) benutzt worden, zweitens die Annahme, dass $1+x \geq 0$, und drittens eine der Ordnungsregeln beim Multiplizieren: $a \geq b$ und $c \geq 0$ impliziert $ca \geq cb$.

Aus dem Induktionsprinzip folgt dann (1.1). ■

1.2.2 Funktionen auf \mathbb{N}

Seien a_k für $k \in \mathbb{N}$ irgendwelche Zahlen, die man addieren und multiplizieren kann.

Notation 1.10 Man schreibt für $n \in \mathbb{N}^+$ folgendes:

- $\sum_{k=1}^n a_k = a_1 + a_2 + \dots + a_n$, die Addition von a_1 bis a_n ,
- $\prod_{k=1}^n a_k = a_1 \cdot a_2 \cdot \dots \cdot a_n$, die Multiplikation von a_1 bis a_n .

Es ist bequem auch $n = 0$ zu erlauben und man vereinbart, dass

$$\sum_{k=1}^0 a_k = 0 \quad \text{und} \quad \prod_{k=1}^0 a_k = 1.$$

Bemerkung 1.10.1 Bei den Pünktchen geht man davon aus, dass wir diese eindeutig ergänzen. Eine präzise Definition (hier mit $k = 1$) wäre induktiv:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^0 a_k = 0 \quad \text{und} \quad \sum_{k=1}^{n+1} a_k &= \left(\sum_{k=1}^n a_k \right) + a_{n+1} \quad \text{für alle } n \in \mathbb{N}, \\ \prod_{k=1}^0 a_k = 1 \quad \text{und} \quad \prod_{k=1}^{n+1} a_k &= \left(\prod_{k=1}^n a_k \right) \cdot a_{n+1} \quad \text{für alle } n \in \mathbb{N}. \end{aligned}$$

So findet man

$$\sum_{k=1}^{100} k = 1 + 2 + 3 + \dots + 100 = 5050$$

und man sieht, dass k nur eine Notationshilfe ist. Das Ergebnis 5050 findet man, weil man für $n \in \mathbb{N}$ mit vollständiger Induktion zeigen kann, dass

$$\sum_{k=1}^n k = \frac{1}{2}n(n+1).$$

Auf ähnliche Art definiert man auch für $n, m \in \mathbb{N}$ mit $m \geq 15$:

$$\sum_{k=0}^n a_k = a_0 + a_1 + \dots + a_n \quad \text{und} \quad \sum_{k=15}^m a_k = a_{15} + a_{16} + \dots + a_m.$$

Definition 1.11 Die **Fakultät** wird definiert für $n \in \mathbb{N}$ durch

$$n! := \prod_{k=1}^n k.$$

Man sagt „ n -Fakultät“ und kann sie auch wie folgt schreiben:

$$\begin{aligned} n! &= n(n-1)(n-2) \dots 3 \cdot 2 \cdot 1 \quad \text{für } n \in \mathbb{N}^+, \\ 0! &= 1. \end{aligned}$$

Also:

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	...
$n!$	1	1	2	6	24	120	720	5040	40320	...

Die Zahl $n!$ erscheint beim Anordnen von gefärbten Kugeln. Man kann n unterschiedliche Kugeln auf $n!$ unterschiedliche Möglichkeiten hintereinander legen.

Lemma 1.14 Für $n \in \mathbb{N}$ und beliebige Zahlen $x, y \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$ gilt:

$$(x + y)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^k y^{n-k}. \quad (1.4)$$

Setzt man wie üblich $0^0 = 1$, dann gilt (1.4) sogar für $x, y \in \mathbb{R}$.

Beweis. Man beweist dieses Lemma mit Hilfe vollständiger Induktion. ■

Wenn man erschrickt vor \sum , dann kann man (1.4) notfalls anders schreiben:

$$\sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^k y^{n-k} = \binom{n}{0} y^n + \binom{n}{1} x y^{n-1} + \binom{n}{2} x^2 y^{n-2} + \binom{n}{3} x^3 y^{n-3} + \binom{n}{4} x^4 y^{n-4} + \dots + \binom{n}{n-1} x^{n-1} y + \binom{n}{n} x^n.$$

Dann geht man wieder davon aus, dass jeder die Pünktchen versteht. Übrigens gilt diese letzte Formel auch für $x, y = 0$.

1.2.3 Ganze Zahlen

Man setzt:

$$\mathbb{Z} = \{\dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots\}.$$

Addition, Multiplikation und sogar Subtraktion lassen sich auf $\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$ definieren. Man sagt $n \leq m$ für $n, m \in \mathbb{Z}$, wenn es eine Zahl $k \in \mathbb{N}$ gibt so, dass $n + k = m$.

Für die Teilmenge der *geraden Zahlen* schreibt man

$$2\mathbb{Z} = \{\dots, -4, -2, 0, 2, 4, \dots\}$$

und für die Teilmenge der *ungeraden*

$$2\mathbb{Z} + 1 = \{\dots, -5, -3, -1, 1, 3, \dots\}.$$

1.3 Rationale Zahlen

Man setzt:

$$\mathbb{Q} = \left\{ \frac{n}{m}; n \in \mathbb{Z} \text{ und } m \in \mathbb{N}^+ \right\}.$$

Dabei unterscheidet man jedoch zum Beispiel nicht zwischen $\frac{3}{5}$ und $\frac{9}{15}$. Man sagt $\frac{n}{m} = \frac{a}{b}$, wenn $nb = am$. Addition und Multiplikation werden definiert durch

$$\frac{n}{m} + \frac{a}{b} = \frac{nb + ma}{mb} \text{ und } \frac{n}{m} \frac{a}{b} = \frac{na}{mb}.$$

Identifiziert man $\frac{n}{1}$ und n , dann ist \mathbb{Z} eine Teilmenge von \mathbb{Q} .

1.3.1 Algebraische Eigenschaften

Wenn man $(\mathbb{K}, +, \cdot)$ schreibt, meint man damit, dass \mathbb{K} irgendeine Menge ist, wobei Addition (+) und Multiplikation (\cdot) definiert sind. Insbesondere soll \mathbb{K} abgeschlossen sein unter diesen beiden Operatoren, das heißt: für alle $a, b \in \mathbb{K}$ gilt $a + b \in \mathbb{K}$ und $a \cdot b \in \mathbb{K}$.

Definition 1.15 $(\mathbb{K}, +, \cdot)$ nennt man einen **Körper**, wenn:

$(\mathbb{K}, +)$ additive Gruppe

1. Für alle $a, b, c \in \mathbb{K}$ gilt $(a + b) + c = a + (b + c)$, die **Assoziativität der Addition**;
2. Es gibt ein **neutrales Element der Addition** $0 \in \mathbb{K}$ so, dass für jedes $a \in \mathbb{K}$ gilt $a + 0 = a$;
3. Zu jedem $a \in \mathbb{K}$ gibt es ein **additiv inverses Element** $-a \in \mathbb{K}$ mit $a + (-a) = 0$;
4. Für alle $a, b \in \mathbb{K}$ gilt $a + b = b + a$, die **Kommutativität der Addition**;

$(\mathbb{K} \setminus \{0\}, \cdot)$ multiplikative Gruppe

5. Für alle $a, b, c \in \mathbb{K}$ gilt $(a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c)$, die **Assoziativität der Multiplikation**;
6. Es gibt ein **neutrales Element der Multiplikation** $1 \in \mathbb{K}$ mit $1 \neq 0$ so, dass für jedes $a \in \mathbb{K}$ gilt $a \cdot 1 = a$;
7. Zu jedem $a \in \mathbb{K}$ mit $a \neq 0$ gibt es ein **multiplikativ inverses Element** $a^{-1} \in \mathbb{K}$ mit $a \cdot a^{-1} = 1$;
8. Für alle $a, b \in \mathbb{K}$ gilt $a \cdot b = b \cdot a$, die **Kommutativität der Multiplikation**;
9. Für alle $a, b, c \in \mathbb{K}$ gilt $a \cdot (b + c) = a \cdot b + a \cdot c$, die **Distributivität**.

\mathbb{Q} wird mit Addition und Multiplikation ein Körper.

Bemerkung 1.15.1 Die Eigenschaften 1 bis 4 definieren $(\mathbb{K}, +)$ als (additive) Gruppe. Ebenso definieren die Eigenschaften 5 bis 8 $(\mathbb{K} \setminus \{0\}, \cdot)$ als (multiplikative) Gruppe. Wenn nur die Eigenschaften 1-3 erfüllt sind, dann nennt man $(\mathbb{K}, +)$ eine nicht-kommutative Gruppe. Und um keine Verwirrung aufkommen zu lassen, wird $(\mathbb{K}, +)$, wenn alle 4 Eigenschaften erfüllt sind, auch explizit eine kommutative Gruppe genannt.

Man kann direkt kontrollieren, dass $(\mathbb{Q}, +, \cdot)$ ein Körper ist, und dass $(\mathbb{Q}, +)$ und $(\mathbb{Q} \setminus \{0\}, \cdot)$ eine additive, respektive multiplikative Gruppe ist.

Öfters sieht man folgende „Witz-Addition“ in \mathbb{Q} : $\frac{p}{m} \boxplus \frac{q}{n} = \frac{p+q}{m+n}$. Angenommen wir nehmen immer die ‘kleinstmögliche’ Schreibweise in \mathbb{Q} , also $\frac{2}{3}$ statt $\frac{4}{6}$, welche Probleme hat man denn so für $(\mathbb{Q}, \boxplus, \cdot)$? Welche Körpereigenschaften wären nicht erfüllt?

1.3.2 Ordnung in \mathbb{Z} und \mathbb{Q}

Auf \mathbb{Z} gibt es eine natürliche Ordnung. Man schreibt $z_1 < z_2$, wenn z_1 links von z_2 steht in der Standardauflistung von \mathbb{Z} :

$$\dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots,$$

und $z_1 \leq z_2$, wenn z_1 nicht rechts von z_2 steht in dieser Auflistung. Diese Ordnung von \mathbb{Z} können wir übertragen auf \mathbb{Q} :

Definition 1.16 Seien $\frac{a}{n}$ und $\frac{b}{m}$ in \mathbb{Q} (mit $a, b \in \mathbb{Z}$ und $n, m \in \mathbb{N}^+$). Man schreibt

$$\frac{a}{n} \leq \frac{b}{m}, \text{ wenn } ma \leq nb.$$

Man schreibt $\frac{a}{n} < \frac{b}{m}$, wenn $ma < nb$. Wir werden Ordnung allgemeiner definieren im nächsten Kapitel.

1.3.3 Unendlich und abzählbar

Definition 1.17 1. Man nennt eine Menge A **unendlich**, wenn A nicht leer ist und wenn es eine Abbildung $f : A \mapsto A$ gibt, die injektiv, aber nicht surjektiv ist.

2. Man nennt eine Menge A **abzählbar unendlich**, wenn A unendlich ist und es eine surjektive Abbildung $f : \mathbb{N} \mapsto A$ gibt.

Lemma 1.18 \mathbb{Q} ist abzählbar unendlich.

1.3.4 Rationale Zahlen reichen nicht

Die Griechen aus der Zeit von vor etwa 500 v.Chr. brachten die Zahlen in Verbindung mit messbaren Längen und dachten, dass sich alle Zahlen als Verhältnis von ganzen Zahlen schreiben lassen. Die Länge der Diagonalen im Einheitsquadrat gibt da aber schon ein Problem. Wegen Pythagoras (etwa 570 AC - 500 AC) findet man für die Länge x nämlich $x^2 = 1^2 + 1^2 = 2$.

Lemma 1.19 Es gibt keine rationale Zahl x so, dass $x^2 = 2$.

Beweis. Man beweist diese Aussage durch einen Widerspruch. Nehme an, es gibt $n \in \mathbb{Z}$ und $m \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$ so, dass

$$\left(\frac{n}{m}\right)^2 = 2.$$

Man darf annehmen, dass n und m keinen gemeinsamen Teiler haben, denn wenn es nicht so wäre, könnte man n und m vereinfachen, indem man durch den gemeinsamen Teiler dividiert. Es folgt

$$n^2 = 2m^2.$$

Weil die rechte Seite gerade ist, muss auch die linke Seite gerade sein und so auch n . Es folgt, dass $n = 2k$ für irgendein $k \in \mathbb{Z}$, und man findet

$$4k^2 = 2m^2.$$

Aus $m^2 = 2k^2$ folgt, dass m gerade ist. Dann haben n und m den gemeinsamen Teiler 2 und das ist ein Widerspruch. ■

Anscheinend reichen die rationalen Zahlen nicht aus, und es gibt Löcher zu füllen zwischen den rationalen Zahlen. Das führt zu den sogenannten reellen Zahlen.

1.3.5 Wie kann man reelle Zahlen einführen?

Eine Möglichkeit, die rationalen Zahlen zu vervollständigen, ist, Folgen in \mathbb{Q} und die Ordnung von \mathbb{Q} zu benutzen. Vorher müssen wir vereinbaren, was eine Folge ist. Wenn man

$$\{a_0, a_1, a_2, \dots\}$$

schreibt mit $a_n \in \mathbb{Q}$, dann sieht man wieder die Pünktchen, von denen man nur hoffen kann, dass alle Leser verstehen, was gemeint ist. Eine genauere Notation ist

$$\{a_n\}_{n \in \mathbb{N}}.$$

Lieber schreiben wir also $\{2^{-n}\}_{n \in \mathbb{N}}$ statt $\{1, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \dots\}$. Man kann so eine Folge auch auffassen als eine Abbildung von \mathbb{N} nach \mathbb{Q} , bei der man a_n statt $a(n)$ schreibt.

Die Idee ist wie folgt:

\mathbb{R} ist die Menge aller Grenzwerte von monoton wachsenden, beschränkten Folgen aus \mathbb{Q} .

Wir haben aber noch nicht gesagt, was ein Grenzwert oder ein Limes ist. Auch kann man auf mehrere Arten so die gleiche Zahl bekommen. Man müsste also klären, wie wir zwei Folgen identifizieren, die eine gleiche Zahl liefern. Wir kommen dann auch im nächsten Kapitel auf die Einführung der reellen Zahlen zurück, aber geben hier schon mal ein Beispiel.

Beispiel 1.6. Wir zeigen hier den Anfang einer monoton wachsenden Folge, die

$$\sqrt{2} = 1.4142135623\dots$$

liefert:

$$\left\{ 1, \frac{14}{10}, \frac{141}{100}, \frac{1414}{1000}, \frac{14142}{10000}, \frac{141421}{100000}, \dots \right\}. \quad (1.5)$$

Mit $\sqrt{2}$ ist die positive reelle Zahl gemeint, die 2 ergibt, wenn man sie mit sich selbst multipliziert. Eine andere monoton wachsende Folge rationaler Zahlen, die $\sqrt{2}$ approximiert, ist $\{a_n\}_{n \in \mathbb{N}}$, definiert durch

$$\begin{cases} a_0 = 1 \text{ und} \\ a_{n+1} = \frac{3a_n^2 + 2}{4a_n} \text{ für } n \in \mathbb{N}. \end{cases} \quad (1.6)$$

Man findet

$$\left\{ 1, \frac{5}{4}, \frac{107}{80}, \frac{47147}{34240}, \frac{9013274027}{6457253120}, \frac{327109561768877858987}{232803967329042856960}, \dots \right\} \quad (1.7)$$

und wenn man diese Zahlen bis in 10 Dezimalen berechnet, folgt

$$\{1, 1.25, 1.3375, 1.376956775, 1.3958371864, 1.4050858562, \dots\}.$$

Die Folgen in (1.5) und (1.7) sind äquivalent, in dem Sinne, dass sie beide $\sqrt{2}$ approximieren. Was hier genau mit „approximieren“ gemeint ist, folgt noch.

Als konstruktive Folge ist jedoch nur die in (1.6) interessant, da diese Folge tatsächlich eine Möglichkeit liefert, die Zahl $\sqrt{2}$ zu approximieren durch elementares Rechnen. Wir werden übrigens später noch sehen, dass man $\sqrt{2}$ viel schneller approximieren kann. ■

Analysis 1, Woche 2

Reelle Zahlen

A1

2.1 Ordnung

Definition 2.1 Man nennt \leq eine **Ordnung** für \mathbb{K} , wenn

1. für alle $a \in \mathbb{K}$ gilt $a \leq a$ (**Reflexivität**),
2. für alle $a, b \in \mathbb{K}$ mit $a \leq b$ und $b \leq a$ gilt $a = b$ (**Antisymmetrie**),
3. für alle $a, b, c \in \mathbb{K}$ mit $a \leq b$ und $b \leq c$ gilt $a \leq c$ (**Transitivität**).

Statt $b \leq a$ kann man auch $a \geq b$ schreiben. Man sagt „ b kleiner gleich a “, beziehungsweise „ a größer gleich b “. Man verwendet $a < b$, wenn $a \leq b$ und $a \neq b$.

Für \mathbb{N} , \mathbb{Z} und \mathbb{Q} ist \leq , wenn nichts anderes gesagt wird, immer die übliche Ordnung.

Definition 2.2 (\mathbb{K}, \leq) nennt man **total geordnet**, wenn \leq eine Ordnung für K ist und zusätzlich gilt

4. $a \leq b$ oder $b \leq a$ für alle $a, b \in \mathbb{K}$.

Die Zahlenmengen \mathbb{N} , \mathbb{Z} und \mathbb{Q} mit der Standardordnung \leq sind total geordnet.

Beispiel 2.1. Nehmen wir $(\mathbb{Q} \times \mathbb{Q}, \leq)$, wobei „ $(q_1, q_2) \leq (p_1, p_2)$ “ definiert wird durch „ $q_1 \leq p_1$ und $q_2 \leq p_2$ “, dann ist \leq eine Ordnung. Es ist keine totale Ordnung, denn für $r = (\frac{1}{3}, \frac{2}{3})$ und $s = (\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ gilt weder $r \leq s$ noch $s \leq r$. ■

Definition 2.3 $(\mathbb{K}, +, \cdot, \leq)$ heißt ein **total geordneter Körper**, wenn

1. $(\mathbb{K}, +, \cdot)$ ein Körper ist,
2. (\mathbb{K}, \leq) total geordnet ist,
3. für alle $a, b, c \in \mathbb{K}$ mit $a \leq b$ gilt $a + c \leq b + c$,
4. für alle $a, b, c \in \mathbb{K}$ mit $a \leq b$ und $0 \leq c$ gilt $a \cdot c \leq b \cdot c$.

Beispiel 2.2. $(\mathbb{Q}, +, \cdot, \leq)$ mit der üblichen Ordnung ist ein total geordneter Körper. ■

$(\mathbb{K}, +, \leq)$ heißt eine total geordnete Gruppe, wenn $(\mathbb{K}, +)$ eine Gruppe ist und die Bedingungen 2 und 3 aus Definition 2.3 erfüllt sind.

Definition 2.4 Sei (\mathbb{K}, \leq) total geordnet.

- Eine Folge $\{a_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ mit $a_n \in \mathbb{K}$ heißt **monoton wachsend**, wenn $a_n \leq a_{n+1}$ für alle $n \in \mathbb{N}$.
- Eine Folge $\{a_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ mit $a_n \in \mathbb{K}$ heißt **monoton fallend**, wenn $a_n \geq a_{n+1}$ für alle $n \in \mathbb{N}$.

Gilt zusätzlich, dass $a_n \neq a_{n+1}$ für alle $n \in \mathbb{N}$, dann heißt die Folge **streng monoton wachsend**, beziehungsweise **streng monoton fallend**.

Wenn (\mathbb{K}, \leq) total geordnet ist, dann heißt $k \in \mathbb{K}$ eine *obere Schranke* für die Teilmenge $A \subset K$, wenn für alle $a \in A$ gilt, dass $a \leq k$. Die Zahl $k \in \mathbb{K}$ ist eine *obere Schranke* für die Folge $\{a_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ in \mathbb{K} , wenn für alle $n \in \mathbb{N}$ gilt, dass $a_n \leq k$. Wenn eine Menge oder Folge eine obere Schranke hat, dann heißt sie **nach oben beschränkt**. Ähnlich definiert man *untere Schranke* und *nach unten beschränkt*. Ist die Menge oder die Folge sowohl nach oben als nach unten beschränkt, dann nennt man sie **beschränkt**.

2.2 Einführung der reellen Zahlen

Definition 2.5 Eine Relation \sim auf M heißt **Äquivalenzrelation**, wenn

1. für alle $x \in M$ gilt: $x \sim x$ (**Reflexivität**),
2. für alle $x, y \in M$ gilt: $x \sim y \implies y \sim x$ (**Symmetrie**),
3. für alle $x, y, z \in M$ gilt: $(x \sim y \wedge y \sim z) \implies x \sim z$ (**Transitivität**).

Eine erste Konstruktion für die Einführung der reellen Zahlen verwendet die Ordnung und eine Äquivalenzrelation.

Definition 2.6 (\mathbb{R} als Grenzwerte beschränkter monoton wachsender Folgen)

1. Sei \mathfrak{F} die Menge aller Folgen rationaler Zahlen, die monoton wachsend und nach oben beschränkt sind.
2. Für $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}, \{b_n\}_{n=0}^{\infty} \in \mathfrak{F}$ sagt man $\{a_n\}_{n=0}^{\infty} \sim \{b_n\}_{n=0}^{\infty}$ (beide Folgen sind äquivalent), wenn für jedes $q \in \mathbb{Q}$ gilt

$$a_n \leq q \text{ für alle } n \in \mathbb{N} \Leftrightarrow b_n \leq q \text{ für alle } n \in \mathbb{N}.$$

Anders gesagt: beide Folgen haben die gleichen oberen Schranken.

3. $\mathbb{R} := (\mathfrak{F}, \sim)$, das heißt, man identifiziert äquivalente Folgen und definiert \mathbb{R} als die Menge der Äquivalenzklassen.

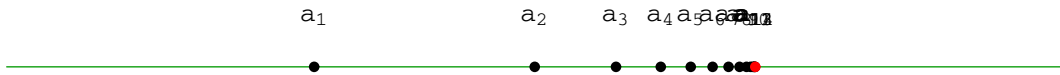


Abbildung 2.1: Eine wachsende Folge

Man kann \mathbb{Q} als Teilmenge von \mathbb{R} betrachten, indem man für $q \in \mathbb{Q}$ die Äquivalenzklasse der Folge $\{q, q, q, q, q, \dots\}$ nimmt. Wenn man jedoch jedes Mal ein Element von \mathbb{R} als Äquivalenzklasse einer bestimmten Folge beschreiben würde, wird man schnell müde. Stattdessen versucht man solche Elemente kürzer zu beschreiben. Wir geben ein paar Beispiele.

- Die Äquivalenzklasse zu $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$, die man in (1.6) definiert hat, nennt man $\sqrt{2}$.
- Die Äquivalenzklasse zu $\{(1 + \frac{1}{n})^n\}_{n=1}^{\infty}$ nennt man e .

Man kann zeigen, dass diese Folge tatsächlich wachsend ist. Als ersten Schritt zeigen wir

$$\frac{n-m+1}{n} \leq \frac{n-m+2}{n+1} \text{ für } 1 \leq m \leq n. \quad (2.1)$$

Dies folgt aus:

$$(n-m+1)(n+1) = n^2 - mn + 2n - m + 1 \leq n^2 - mn + 2n = (n-m+2)n.$$

Mit der Ungleichung in (2.1) für $1 \leq m \leq k$ finden wir, dass

$$\begin{aligned} \binom{n}{k} \left(\frac{1}{n}\right)^k &= \frac{1}{k!} \frac{n}{n} \cdots \frac{n-k+1}{n} \leq \\ &\leq \frac{1}{k!} \frac{n+1}{n+1} \cdots \frac{n-k+2}{n+1} = \binom{n+1}{k} \left(\frac{1}{n+1}\right)^k. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Aus (2.2) folgt wiederum, dass die Folge monoton wachsend ist:

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n &= \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} 1^{n-k} \left(\frac{1}{n}\right)^k = 1 + \sum_{k=1}^n \binom{n}{k} \left(\frac{1}{n}\right)^k \leq \\ &\leq 1 + \sum_{k=1}^n \binom{n+1}{k} \left(\frac{1}{n+1}\right)^k \leq \\ &\leq \sum_{k=0}^{n+1} \binom{n+1}{k} \left(\frac{1}{n+1}\right)^k = \left(1 + \frac{1}{n+1}\right)^{n+1}. \end{aligned}$$

Die Folge ist auch nach oben beschränkt:

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n &= \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \left(\frac{1}{n}\right)^k = \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} \frac{n}{n} \frac{n-1}{n} \cdots \frac{n-k+1}{n} \leq \\ &\leq \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} \leq 1 + 1 + \sum_{k=2}^n \frac{1}{k(k-1)} = \\ &= 2 + \sum_{k=2}^n \frac{k-(k-1)}{k(k-1)} = 2 + \sum_{k=2}^n \left(\frac{1}{k-1} - \frac{1}{k}\right) = \\ &= 2 + \left(1 - \frac{1}{2}\right) + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{3}\right) + \cdots + \left(\frac{1}{n-1} - \frac{1}{n}\right) = \\ &= 2 + 1 - \frac{1}{n} \leq 3. \end{aligned}$$

- Die Äquivalenzklasse zu $\left\{ \sum_{k=0}^n \frac{8}{(4k+1)(4k+3)} \right\}_{n=0}^{\infty}$ heißt π . Dass dies tatsächlich mit dem Flächeninhalt der Einheitsscheibe zu tun hat, können wir hier noch nicht beweisen.

Es stellt sich heraus, dass \mathbb{R} eine vernünftige Struktur hat und auf natürliche Weise die LÖcher in \mathbb{Q} auffüllt, wenn wir Addition, Multiplikation und Ordnung für \mathbb{R} passend definieren. Passend heißt, dass die Definition für Elemente aus \mathbb{Q} die übliche bleibt und sich auf natürliche Art ergänzt für Elemente aus \mathbb{R} . Ein paar Sachen werden wir zeigen.

Erstens die **Addition**. Die ist relativ einfach. Man definiert $x + y$, indem man zwei Folgen rationaler Zahlen zu x und y nimmt, sage $x := \{x_n\}_{n=0}^{\infty} \in \mathfrak{F}$ und $y := \{y_n\}_{n=0}^{\infty} \in \mathfrak{F}$, und schreibt

$$x + y := \{x_n + y_n\}_{n=0}^{\infty}.$$

Mit $x := \{x_n\}_{n=0}^{\infty}$ ist gemeint, dass $\{x_n\}_{n=0}^{\infty}$ ein Vertreter aus \mathfrak{F} ist für die Äquivalenzklasse zu $x \in (\mathfrak{F}, \sim)$. Man kann zeigen, dass $\{x_n + y_n\}_{n=0}^{\infty} \in \mathfrak{F}$ und die dazu gehörende Äquivalenzklasse nicht abhängt von den Vertretern $\{x_n\}_{n=0}^{\infty}$ und $\{y_n\}_{n=0}^{\infty}$.

Auch kann man schon zeigen, dass drei Eigenschaften eines Körpers (Assoziativität, Existenz von einem neutralen Element und Kommutativität bezüglich der Addition) erfüllt sind.

Für die Existenz eines additiv inversen Elementes zu x kann man nicht einfach $\{-x_n\}_{n=0}^{\infty}$ nehmen, weil diese Folge nicht monoton wachsend ist. Nur für $x := \{q\}_{n=0}^{\infty}$ mit $q \in \mathbb{Q}$, kann man $-x := \{-q\}_{n=0}^{\infty}$ nehmen. Jedoch auch wenn $x \in (\mathfrak{F}, \sim)$ nicht eine rationale Zahl darstellt, gibt es aber ein $-x \in (\mathfrak{F}, \sim)$, und das sieht man zum Beispiel mit Hilfe des folgenden Algorithmus. Dieser liefert eine Folge $\{b_n\}_{n=0}^{\infty}$, die $-x$ vertritt.

Algorithmus 2.1 Sei $\{x_m\}_{m=0}^{\infty}$ eine wachsende, nach oben beschränkte Folge rationaler Zahlen.

1. Sei $q \in \mathbb{Q}$ eine obere Schranke für $\{x_m\}_{m=0}^{\infty}$ und setze

$$b_0 := -q, \quad n := 0 \quad \text{und} \quad s_0 := 1.$$

Es gilt $b_0 \in \mathbb{Q}$ und $b_0 \leq -x_m$ für alle $m \in \mathbb{N}$.

2. Wenn $-b_n - s_n$ eine obere Schranke ist für $\{x_m\}_{m=0}^{\infty}$, setze

$$b_{n+1} := b_n + s_n \quad \text{und} \quad s_{n+1} := s_n.$$

Wenn $-b_n - s_n$ keine obere Schranke ist für $\{x_m\}_{m=0}^{\infty}$, setze

$$b_{n+1} := b_n \quad \text{und} \quad s_{n+1} := \frac{1}{2}s_n.$$

In beiden Fällen gilt $b_{n+1} \in \mathbb{Q}$ und $b_n \leq b_{n+1} \leq -x_m$ für alle $m \in \mathbb{N}$.

3. Setze $n := n + 1$ und gehe zurück zu 2.

Eine Illustration finden Sie in Abbildung 2.2.

Die Folge $\{b_n\}_{n=0}^{\infty}$ enthält nur rationale Zahlen, ist monoton wachsend, nach oben beschränkt und soll $-x := \{b_n\}_{n=0}^{\infty}$ liefern. Das Letzte muss man aber noch zeigen, also dass $x + (-x) = 0$ oder besser gesagt: dass $\{x_n + b_n\}_{n=0}^{\infty} \sim \{0\}_{n=0}^{\infty}$.

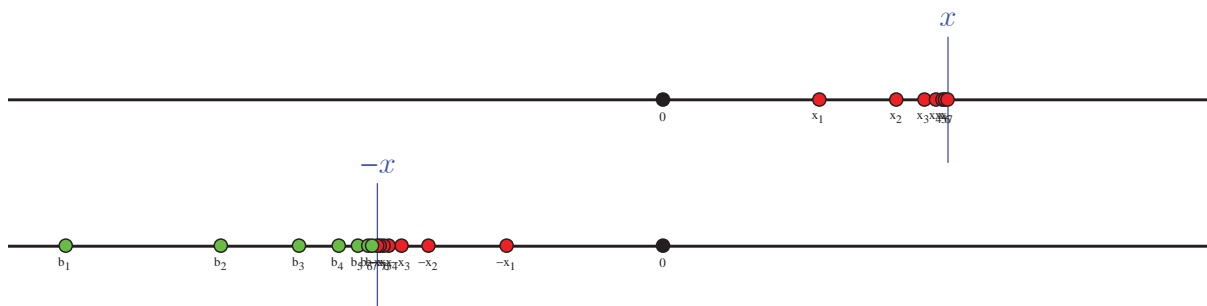


Abbildung 2.2: Wenn $x = \{x_0, x_1, x_2, \dots\}$ wachsend ist, dann ist $\{-x_0, -x_1, -x_2, \dots\}$ fallend und deshalb nicht passend für $-x$. Für eine passende Definition von $-x$ soll man eine wachsende Folge bestimmen. So eine Folge ist in grün dargestellt.

Die **Multiplikation** in \mathbb{R} ist schon lästiger zu definieren. Wenn $x := \{x_n\}_{n=0}^\infty \in \mathfrak{F}$ und $y := \{y_n\}_{n=0}^\infty \in \mathfrak{F}$ so sind, dass x_n und y_n positiv sind für n genügend groß, dann setzt man

$$x \cdot y := \{\max(0, x_n) \max(0, y_n)\}_{n=0}^\infty.$$

Auch hier muss man zeigen, dass das Ergebnis nicht vom zufälligen Vertreter abhängt.

Wenn für alle x_n gilt, dass $x_n < 0$, aber $y_n > 0$ für n genügend groß, dann benutzt man zweimal den Algorithmus für das additiv Inverse und definiert

$$x \cdot y = -((-x) \cdot y),$$

und so weiter.

Die **Ordnung** \leq wird wie folgt definiert in \mathbb{R} . Seien x, y vertreten durch monoton wachsende Folgen $\{x_n\}_{n=0}^\infty$ und $\{y_n\}_{n=0}^\infty \in \mathfrak{F}$, dann setzt man $x \leq y$, wenn:

$$\{x_n\}_{n=0}^\infty \sim \{y_n\}_{n=0}^\infty \text{ oder } \exists N \in \mathbb{N} : n \geq N \Rightarrow x_n \leq y_n. \tag{2.3}$$

Auch hier muss man kontrollieren, dass die Definition nicht von den spezifischen Vertretern abhängt, dass man so eine totale Ordnung bekommt, und sie die Ordnung auf \mathbb{Q} erweitert.

Bemerkung 2.6.1 *Bemerke, dass wenn man nur die zweite Hälfte in (2.3) als Definition der Ordnung auf \mathbb{R} nimmt, diese nicht wohldefiniert ist. Denn mit nur dieser zweiten Hälfte als Definition für $x \leq y$, würde man für $x_n = 1$ und $y_n = \frac{n}{n+1}$ finden, dass*

$$\{1\}_{n=0}^\infty \text{ ist nicht kleiner gleich } \left\{ \frac{n}{n+1} \right\}_{n=0}^\infty,$$

obwohl beide Folgen 1 repräsentieren. Dies widerspricht der ersten Bedingung einer Ordnung.

Zu zeigen, dass \mathbb{R} alle Eigenschaften eines total geordneten Körpers erfüllt, ist eine ziemlich langwierige Sache und die Ergebnisse sind nicht sehr überraschend. Auch findet man, dass die übliche Addition, Multiplikation und Anordnung in \mathbb{Q} bei \mathbb{R} erhalten bleiben. Man findet:

Theorem 2.7 $(\mathbb{R}, +, \cdot, \leq)$ ist ein total geordneter Körper.

Notation 2.8 Die folgenden Teilmengen von \mathbb{R} nennt man Intervalle. Seien $a, b \in \mathbb{R}$ mit $a < b$.

- $[a, b] := \{x \in \mathbb{R}; a \leq x \leq b\}$; (**abgeschlossenes Intervall**)
- $(a, b) := \{x \in \mathbb{R}; a < x < b\}$; (**offenes Intervall**)
- $(a, b] := \{x \in \mathbb{R}; a < x \leq b\}$.

Manchmal sieht man auch:

- $(-\infty, b] := \{x \in \mathbb{R}; x \leq b\}$.

Die Bedeutung von $[a, b)$, $[a, \infty)$, (a, ∞) und so weiter kann man erraten.

Wir haben hier die Symbole $-\infty$ (negativ unendlich) und ∞ (positiv unendlich) benutzt. ∞ und $-\infty$ sind keine Zahlen und liegen nicht in \mathbb{R} . Man schreibt ab und zu trotzdem $\overline{\mathbb{R}} := \mathbb{R} \cup \{-\infty, \infty\}$. Man kann mit $(\overline{\mathbb{R}}, +, \cdot)$ jedoch nicht mehr wie mit einem Körper arbeiten. Zum Beispiel lässt sich $\infty - \infty$ nicht vernünftig definieren.

2.3 Andere Einführungen der reellen Zahlen

Statt monoton wachsender, nach oben beschränkter Folgen in \mathbb{Q} zu nehmen, kann man auf ähnliche Art auch monoton nach unten beschränkte Folgen in \mathbb{Q} nehmen. Das wäre eine zweite Konstruktion, die jedoch nicht sehr überrascht.



Abbildung 2.3: Eine fallende Folge

Für eine nächste Möglichkeit brauchen wir die Betragsfunktion. Sei \mathbb{K} eine Gruppe oder ein Körper mit einer totalen Ordnung \leq . Dann setzt man

$$|a| = \begin{cases} a & \text{wenn } 0 \leq a, \\ -a & \text{wenn } a < 0. \end{cases}$$

Definition 2.9 (\mathbb{R} durch Cauchy-Folgen von rationalen Zahlen) *Eine dritte Konstruktion:*

1. $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ mit $a_n \in \mathbb{Q}$ heißt eine **Cauchy-Folge** (auch *Fundamentalfolge* genannt), wenn:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N_{\varepsilon} \in \mathbb{N} \forall n, m \in \mathbb{N} : n, m \geq N_{\varepsilon} \Rightarrow |a_n - a_m| < \varepsilon.$$

Sei \mathcal{CF} die Menge aller Cauchy-Folgen in \mathbb{Q} .

2. Für $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}, \{b_n\}_{n=0}^{\infty} \in \mathcal{CF}$ sagt man $\{a_n\}_{n=0}^{\infty} \sim \{b_n\}_{n=0}^{\infty}$ (beide Folgen sind äquivalent) wenn

$$\forall \varepsilon > 0 \exists M_{\varepsilon} \in \mathbb{N} \forall n \in \mathbb{N} : n \geq M_{\varepsilon} \Rightarrow |a_n - b_n| < \varepsilon.$$

3. Setze $\mathbb{R} := (\mathcal{CF}, \sim)$.



Abbildung 2.4: Eine Cauchy-Folge

Jede monoton wachsende, nach oben beschränkte Folge in \mathbb{Q} ist eine Cauchy-Folge und daher sieht man, dass $(\mathfrak{F}, \sim) \subset (\mathfrak{C}\mathfrak{F}, \sim)$, mit \sim der jeweils zugehörigen Äquivalenzrelation. Auch \supset gilt, aber um das zu zeigen, braucht es etwas Arbeit. Da auch $+$, \cdot und \leq bei beiden Konstruktionen übereinstimmen, bekommt man ein äquivalentes Ergebnis.

Beispiel 2.3. Definiere $a_0 = 1$ und $a_{n+1} = \frac{1}{4}a_n + \frac{3}{2}a_n^{-1}$ für $n \in \mathbb{N}$. Diese Folge liegt in \mathbb{Q} und ist eine Cauchy-Folge. Sie ist weder wachsend noch fallend. Die ersten Terme sind:

n	0	1	2	3	4	
a_n	1	$\frac{7}{4}$	$\frac{145}{112}$	$\frac{96289}{64960}$	$\frac{34590381121}{25019733760}$	
	1	1.75	1.29...	1.48...	1.38...	

Man kann zeigen, dass a_n nach $\sqrt{2}$ geht. ■

Definition 2.10 (\mathbb{R} durch Dedekindsche Schnitte) Eine vierte Konstruktion:

1. (A, B) heißt Schnitt von \mathbb{Q} , wenn $A, B \subset \mathbb{Q}$ mit
 - (a) $A \neq \emptyset, B \neq \emptyset$ und $A \cup B = \mathbb{Q}$ und $A \cap B = \emptyset$.
 - (b) für jedes $a \in A$ und $b \in B$ gilt $a \leq b$.
2. wenn es $q \in \mathbb{Q}$ gibt mit $a \leq q$ für alle $a \in A$ und $q \leq b$ für alle $b \in B$, dann sagen wir die folgenden Schnitte sind äquivalent:

$$(A \setminus \{q\}, B \cup \{q\}) \sim (A \cup \{q\}, B \setminus \{q\}).$$

3. Sei \mathfrak{S} die Menge aller Schnitte in \mathbb{Q} . Setze $\mathbb{R} := (\mathfrak{S}, \sim)$.



Abbildung 2.5: Ein Schnitt

Beispiel 2.4. Ein Schnitt für $\sqrt{2}$ ist

- $A = \{a \in \mathbb{Q}; a \leq 0 \text{ oder } a^2 \leq 2\}$,
- $B = \{a \in \mathbb{Q}; a \geq 0 \text{ und } a^2 \geq 2\}$.

Weil es keine Zahl $a \in \mathbb{Q}$ gibt derart, dass $a^2 = 2$ folgt $A \cap B = \emptyset$.

Definition 2.11 (\mathbb{R} durch Intervallschachtelungen) *Eine fünfte Konstruktion:*

1. $\{I_n\}_{n=0}^\infty$ mit $I_n = [a_n, b_n]$ und $a_n < b_n$ heißt eine **Intervallschachtelung**, wenn

(a) für jedes $n \in \mathbb{N}$ gilt $I_{n+1} \subset I_n$;

(b) es für jedes $\varepsilon > 0$ ein Intervall I_n gibt mit Länge $b_n - a_n < \varepsilon$.

Sei \mathfrak{I} die Menge der Intervallschachtelungen in \mathbb{Q} .

2. Zwei Intervallschachtelungen $\{I_n\}_{n=0}^\infty$ und $\{J_n\}_{n=0}^\infty$ heißen äquivalent, wenn für jedes $n \in \mathbb{N}$ gilt $I_n \cap J_n \neq \emptyset$.

3. Setze $\mathbb{R} := (\mathfrak{I}, \sim)$.

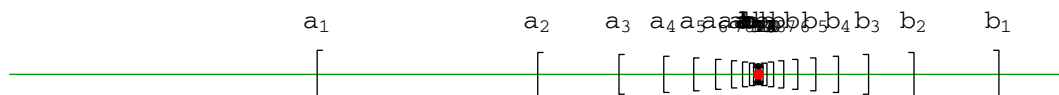


Abbildung 2.6: Eine Intervallschachtelung

Beispiel 2.5. Eine Intervallschachtelung für $\sqrt{2}$ ist $\{[a_n, b_n]\}_{n \in \mathbb{N}}$ mit

- $a_0 = 1$ und $a_{n+1} = \frac{3a_n^2 + 2}{4a_n}$ für $n \in \mathbb{N}$,

- $b_0 = 2$ und $b_{n+1} = \frac{3b_n^2 + 2}{4b_n}$ für $n \in \mathbb{N}$.

2.3.1 Nur eine vollständige Erweiterung?

Zu diesen verschiedenen Einführungen von \mathbb{R} sollte man aber einige Fragen klären. Zum Beispiel:

- Liefern diese Verfahren alle das gleiche Ergebnis?
- Man findet, mit \mathbb{Q} angefangen, eine größere Menge, die man \mathbb{R} nennt. Wenn man ein ähnliches Verfahren loslässt auf \mathbb{R} , bekommt man dann eine noch größere Menge?

Selbstverständlich sind monoton wachsende Folgen keine monoton fallenden Folgen und man hat streng genommen zwei verschiedene Ergebnisse, wenn man bei den ersten beiden Konstruktionen nur die Form der Konstruktion betrachtet. Trotzdem soll man das Gefühl haben, dass diese zwei Methoden keinen wesentlichen Unterschied herbeiführen. In der Mathematik verwendet man den Begriff **isomorph**. Man meint mit „ A ist isomorph zu B “, dass es nicht nur eine bijektive Abbildung von A nach B gibt, sondern dass diese Abbildung auch die Struktur behält¹.

Bevor wir die zweite Frage beantworten können, brauchen wir:

¹Der Begriff Isomorphie hängt ab von der betreffenden Struktur.

Definition 2.13 Sei (\mathbb{K}, \leq) total geordnet. Dann heißt \mathbb{K} **vollständig bezüglich der Ordnung**, wenn jede nicht-leere nach oben beschränkte Menge $M \subset \mathbb{K}$ eine kleinste obere Schranke hat. Diese kleinste obere Schranke von M heißt das „**Supremum von M** “ und man schreibt $\sup M$.

Theorem 2.14 Der total geordnete Körper $(\mathbb{Q}, +, \cdot, \leq)$ hat, bis auf Isomorphien, eine eindeutige Erweiterung, die vollständig ist bezüglich der Ordnung, nämlich $(\mathbb{R}, +, \cdot, \leq)$.

Dieses Theorem werden wir nicht beweisen.

Es gibt Erweiterungen von \mathbb{Q} , die echt kleiner sind als \mathbb{R} , aber nicht vollständig bezüglich der Ordnung sind. Zum Beispiel ist auch $\mathbb{Q}[\sqrt{2}] := \{p + q\sqrt{2}; p, q \in \mathbb{Q}\}$ eine Erweiterung von \mathbb{Q} , die jedoch nicht vollständig ist.

2.4 Eigenschaften

2.4.1 Abzählbarkeit

Wir haben gesehen, dass \mathbb{Q} abzählbar unendlich ist. Wie ist das mit \mathbb{R} ?

Theorem 2.15 \mathbb{R} ist nicht abzählbar.

Beweis. Wir nehmen an, $\{x_0, x_1, x_2, \dots\}$ sei eine Abzählung von \mathbb{R} , und werden einen Widerspruch erzeugen. Das funktioniert wie folgt: Zu jedem x_n kann man die Dezimalentwicklung als Folge nehmen. So wie $\sqrt{2}$ die Äquivalenzklasse von der monoton wachsenden und beschränkten Folge $\{1, 1.4, 1.41, 1.412, \dots\}$ darstellt. Wir definieren y durch eine Folge $\{y_n\}_{n=0}^{\infty}$, die wir als Dezimalentwicklung definieren, wo die n -te Dezimale von y (eine Ziffer von 0 bis 9) ungleich der n -ten Dezimale von x_n gewählt wird (und auch ungleich 9). Also zum Beispiel für die reellen Zahlen

$$\begin{aligned} x_0 & \simeq \{50, 51, 51.3, 51.34, 51.343, 51.3436\dots\} \\ x_1 & \simeq \{400, 440, 444, 444.6, 444.66, 444.666\dots\} \\ x_2 & \simeq \{0, .1, .19, .191, .1912, .19121, .19123\dots\} \\ x_3 & \simeq \{3, 3.1, 3.12, 3.123, 3.1234, 3.12345, \dots\} \\ & \dots \end{aligned}$$

wären die Dezimale, die zu meiden sind, **1.693...**. Wir ersetzen dann die Ziffer k durch $k + 1$ oder $k - 1$. Die Ziffern 9 und 0 sollen dabei vermieden werden. Nehme zum Beispiel

$$y \simeq \{2, 2.7, 2.78, 2.784, \dots\}.$$

Die Zahl y liegt in \mathbb{R} (die Folge ist monoton wachsend und beschränkt). Die Ziffern 9 und 0 sollen vermieden werden, weil

$$1.00000000\dots = .999999999\dots$$

Definition 2.12 Zwei total geordnete Körper $(\mathbb{K}, +, \cdot, \leq)$ und $(\mathbb{L}, \oplus, \odot, \leq)$ heißen **isomorph**, wenn es eine bijektive Abbildung $\varphi: \mathbb{K} \rightarrow \mathbb{L}$ gibt, für die gilt:

1. $\varphi(a + b) = \varphi(a) \oplus \varphi(b)$;
2. $\varphi(a \cdot b) = \varphi(a) \odot \varphi(b)$;
3. $a \leq b \Leftrightarrow \varphi(a) \leq \varphi(b)$.

Die Dezimalentwicklung von reellen Zahlen ist leider nicht eindeutig (surjektiv aber nicht injektiv!) jedoch nur bei solchen Zahlen. Wenn man 0 und 9 meidet, ist die Dezimalentwicklung eindeutig und daher ist y nicht in der Abzählung, weil y sich von jedem x_n in mindestens einer Dezimalstelle unterscheidet. ■

\mathbb{Q} ist abzählbar und hat also deutlich weniger Elemente als das überabzählbare \mathbb{R} . Wenn man jedoch bedenkt, dass \mathbb{R} mit Folgen in \mathbb{Q} konstruiert wurde, sollte man nicht überrascht sein, dass Folgendes gilt:

Lemma 2.16

- Für alle $x, y \in \mathbb{R}$ mit $x < y$ gibt es ein $q \in \mathbb{Q}$, so dass $x < q < y$.
- \mathbb{Q} liegt **dicht** in \mathbb{R} .

Das letzte heißt, jedes $x \in \mathbb{R}$ kann man beliebig nahe innerhalb \mathbb{Q} approximieren, oder anders gesagt: Für jedes $x \in \mathbb{R}$ und $n \in \mathbb{N}^+$, gibt es $q \in \mathbb{Q}$ mit $|x - q| < \frac{1}{n}$.

Dieses Lemma sollte man selber beweisen können.

Bemerkung 2.16.1 Übrigens gilt auch: Für alle $p, q \in \mathbb{Q}$ mit $p < q$ gibt es $x \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}$, so dass $p < x < q$. Man nehme zum Beispiel $x = p + \frac{q-p}{2}\sqrt{2}$.

2.4.2 Vollständigkeit

Einen ganz wichtigen Bestandteil von Theorem 2.14 möchten wir noch mal betonen.

Korollar 2.17 (\mathbb{R}, \leq) ist vollständig, das heißt, jede nicht leere, beschränkte Menge aus \mathbb{R} hat ein Supremum.

Für eine andere Möglichkeit, diese Vollständigkeit zu formulieren, braucht man den Begriff „Limes“. Ein Limes wird auch Grenzwert genannt.

Definition 2.18 Sei $\{x_n\}_{n=0}^{\infty}$ eine Folge von Zahlen in \mathbb{R} .

- Die Folge heißt eine **Cauchy-Folge**, wenn:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N_\varepsilon \in \mathbb{N} \forall n, m \in \mathbb{N} : n, m > N_\varepsilon \implies |x_n - x_m| < \varepsilon.$$

- Die Folge heißt **konvergent**, wenn es $a \in \mathbb{R}$ gibt mit:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N_\varepsilon \in \mathbb{N} \forall n, m \in \mathbb{N} : n \geq N_\varepsilon \implies |x_n - a| < \varepsilon.$$

Man schreibt $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$ und nennt a den **Limes** dieser Folge.

Die Vollständigkeit von \mathbb{R} ist der wesentliche Unterschied mit \mathbb{Q} . Sie folgt aus der Definition von \mathbb{R} . Folgendes sollte man nun selber beweisen können:

Theorem 2.19 Sei \mathbb{R} wie in Definition 2.6. Dann gilt:

- Jede monoton wachsende, nach oben beschränkte Folge in \mathbb{R} hat einen Limes in \mathbb{R} .
- Jede monoton fallende, nach unten beschränkte Folge in \mathbb{R} hat einen Limes in \mathbb{R} .
- Jede beschränkte nicht leere Menge in \mathbb{R} hat ein Supremum in \mathbb{R} .
- Jede Cauchy-Folge in \mathbb{R} ist konvergent in \mathbb{R} .

Bemerkung 2.19.1 Diese 4 Aussagen sind sogar äquivalent.

Analysis 1, Woche 3

Komplexe Zahlen I



3.1 Etwas Imaginäres

Zusätzlich zu den reellen Zahlen führen wir das Symbol i ein und wir vereinbaren:

$$i^2 = -1.$$

Wir möchten die reellen Zahlen erweitern mit i . Das heißt, wir möchten mit i addieren und multiplizieren können. Sofort sieht man, dass die kleinste Menge, die $\mathbb{R} \cup \{i\}$ umfasst und abgeschlossen unter Addition und Multiplikation ist, mindestens Zahlen der Form $x + iy$ enthalten sollte und wir auch für solche Zahlen Addition und Multiplikation definieren müssen. Betrachten wir also

$$\mathbb{R}[i] = \{x + iy; x, y \in \mathbb{R}\} \quad (3.1)$$

- Die Addition wird wie üblich¹ definiert:

$$(x + iy) + (a + ib) = (x + a) + i(y + b). \quad (3.2)$$

Man sieht fast sofort, dass Assoziativität und Kommutativität für diese Addition gelten, dass auch ein neutrales Element, $0 + i0$, zur Addition existiert und dass jedes Element ein additiv Inverses hat.

- Wenn wir die „normale“ Regel für Multiplikation in \mathbb{R} erhalten möchten, dann sollte gelten

$$\begin{aligned} (x + iy)(a + ib) &= x(a + ib) + iy(a + ib) \\ &= xa + xib + iya + iyb \\ &= xa + ix b + iy a + i i y b \\ &= (xa - yb) + i(xb + ya). \end{aligned}$$

Die Multiplikation in $\mathbb{R}[i]$ definieren wir auch genau so. Wir schreiben vorläufig \odot :

$$(x + iy) \odot (a + ib) = (xa - yb) + i(xb + ya). \quad (3.3)$$

¹Das Wort ‘üblich’ ist eigentlich nur eine Ausrede, um die Feinheiten „unter den Teppich zu kehren“. Formell unterscheidet man drei verschiedene $+$. Schreiben wir $+$ für die bekannte Addition in \mathbb{R} , $\dot{+}$ für die Notation in $\mathbb{R}[i] = \{x \dot{+} iy; x, y \in \mathbb{R}\}$ und \oplus für die Addition in $\mathbb{R}[i]$, würde es so ausschauen:

$$(x \dot{+} iy) \oplus (a \dot{+} ib) = (x + a) \dot{+} i(y + b).$$

Weil $(\mathbb{R}[i], \oplus)$ eine Gruppe bildet, die $(\mathbb{R}, +)$ erweitert wenn man $x + i0$ und x identifiziert, folgt, dass man ohne Probleme dreimal $+$ schreiben kann.

Jeder Buchhalter kann direkt kontrollieren, dass Assoziativität und Kommutativität für die Multiplikation gelten. Sogar die Distributivität folgt unmittelbar. Auch findet man gleich das neutrale Element:

$$(x + iy) \odot (1 + i0) = (x \cdot 1 - y \cdot 0) + i(x \cdot 0 + y \cdot 1) = x + iy.$$

Für das inverse Element bei der Multiplikation muss man sich einige Mühe geben. Für $x + iy \neq 0 + i0$, also $x \neq 0$ und $y \neq 0$, hat man $x^2 + y^2 \neq 0$, und es ist folgendes wohldefiniert:

$$(x + iy)^{-1} = \frac{x}{x^2 + y^2} + i \frac{-y}{x^2 + y^2}.$$

Eine Kontrollrechnung ergibt

$$\begin{aligned} (x + iy)^{-1} \odot (x + iy) &= \left(\frac{x}{x^2 + y^2} + i \frac{-y}{x^2 + y^2} \right) \odot (x + iy) = \\ &= \left(\frac{x}{x^2 + y^2} x - \frac{-y}{x^2 + y^2} y \right) + i \left(\frac{x}{x^2 + y^2} y + \frac{-y}{x^2 + y^2} x \right) = 1 + i0. \end{aligned}$$

Auch die Multiplikation \odot in $\mathbb{R}[i]$ verträgt sich mit der Multiplikation in \mathbb{R} :

$$(x + i0) \odot (a + i0) = (x \cdot a - 0 \cdot 0) + i(x \cdot 0 + 0 \cdot a) = x \cdot a + i0 = x \cdot a.$$

Deshalb gibt es keine Probleme, wenn wir statt $(x + iy) \odot (a + ib)$ ab jetzt nur $(x + iy)(a + ib)$ schreiben.

Definition 3.1 Mit (3.1, 3.2, 3.3) setzt man

$$(\mathbb{C}, +, \cdot) := (\mathbb{R}[i], +, \odot)$$

und nennt \mathbb{C} die Menge der **komplexen Zahlen**.

Die Tatsache, dass $(\mathbb{C}, +, \cdot)$ eine vernünftige Struktur hat, fasst man zusammen in:

Lemma 3.2 $(\mathbb{C}, +, \cdot)$ ist ein Körper.

Beispiel 3.1.

- $(1 + i2) + (3 + i4) = 4 + i6,$
- $(1 + i2)(3 + i4) = -5 + i10,$
- $\frac{1 + i2}{3 + i4} = \frac{11}{25} + i \frac{2}{25},$
- $i^2 = (0 + i1)^2 = (0 + i1)(0 + i1) = -1 + i0 = -1.$

Und endlich können wir die Wurzel aus einer negativen Zahl ziehen:

Beispiel 3.2. Man löst $z^2 = -17$ wie folgt:

$$z^2 = -17 \Leftrightarrow z^2 + 17 = 0 \Leftrightarrow z^2 - (i\sqrt{17})^2 = 0 \Leftrightarrow (z - i\sqrt{17})(z + i\sqrt{17}) = 0$$

und

$$(z - i\sqrt{17})(z + i\sqrt{17}) = 0 \Leftrightarrow (z - i\sqrt{17} = 0 \text{ oder } z + i\sqrt{17} = 0). \quad (3.4)$$

Man findet $z \in \{i\sqrt{17}, -i\sqrt{17}\}$.

In (3.4) wird benutzt, dass für $a \neq 0$ eine Inverse a^{-1} existiert. Wenn $ab = 0$ gilt und $a \neq 0$, dann folgt

$$b = (a^{-1}a)b = a^{-1}(ab) = a^{-1}0 = 0.$$

Also auch hier finden wir mit Hilfe der Körpereigenschaften für $ab = 0$ mit $a, b \in \mathbb{C}$, dass $a = 0$ oder $b = 0$.

Obwohl \mathbb{C} nicht \mathbb{R}^2 ist, kann es nützlich sein, die Darstellung in \mathbb{R}^2 zu benutzen, um Fragen zu veranschaulichen.

Definition 3.3 Sei $z \in \mathbb{C}$ und schreibe $z = x + iy$ mit $x, y \in \mathbb{R}$.

1. Der **Realteil**: $\operatorname{Re}(z) = x$;
2. Der **Imaginärteil**: $\operatorname{Im}(z) = y$;
3. Der **Betrag**²: $|z| = \sqrt{x^2 + y^2}$;
4. Das **Argument**: $\operatorname{Arg}(z) =$ „die Größe des Winkels $\sphericalangle(1, 0, z)$ gegen den Uhrzeigersinn gemessen“.

Bemerkung 3.3.1 Die Definition des Arguments ist hier derart, dass $\operatorname{Arg}(z) \in [0, 2\pi)$ für alle $z \in \mathbb{C} \setminus \{0\}$. Mit einer anderen Buchführung hätte man auch zum Beispiel $\operatorname{Arg}(z) \in (-\pi, \pi]$ nehmen können. Für $z = 0$ definieren wir kein Argument.

Man sollte noch kontrollieren, ob der oben definierte Betrag übereinstimmt mit dem schon vorher definierten Betrag für reelle Zahlen:

$$|x|_{\mathbb{C}} = |x + i0|_{\mathbb{C}} = \sqrt{x^2 + 0^2} = \sqrt{x^2} = \begin{cases} x & (\text{wenn } x \geq 0) \\ -x & (\text{wenn } x < 0) \end{cases} = |x|_{\mathbb{R}};$$

also können wir ohne Probleme $| \quad |$ schreiben.

Nützlich ist auch die sogenannte **komplexe Konjugation**.

Definition 3.4 Für $z \in \mathbb{C}$, mit $z = x + iy$ und $x, y \in \mathbb{R}$, schreibt man $\bar{z} = x - iy$.

Bemerkung 3.4.1 \bar{z} nennt man das komplex Konjugierte von z .

Lemma 3.5 Sei $z, w \in \mathbb{C}$. Dann gilt:

- $z \bar{z} = |z|^2$;
- $\overline{z + w} = \bar{z} + \bar{w}$ und $\overline{z \bar{w}} = \bar{z} w$.

Der Beweis ist direkt.

Die komplexe Konjugation kommt u.a. zur Hilfe bei der Division:

$$\frac{w}{z} = \frac{w \bar{z}}{z \bar{z}} = \frac{w \bar{z}}{z \bar{z}} = |z|^{-2} w \bar{z}.$$

²„Absolute value“ oder „modulus“ in Englisch.

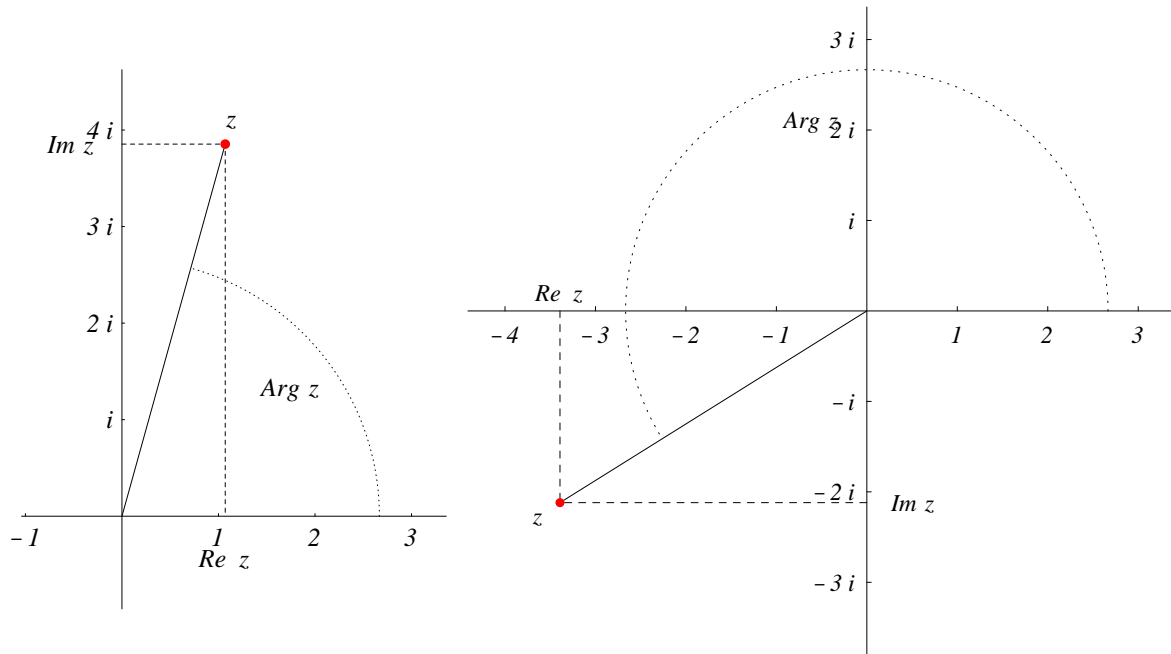
Beispiel 3.3.

$$\frac{1-2i}{-3+4i} = \frac{1-2i}{-3+4i} \cdot \frac{-3-4i}{-3-4i} = \frac{(1-2i)(-3-4i)}{(-3+4i)(-3-4i)} = \frac{-11+2i}{3^2+4^2} = -\frac{11}{25} + i\frac{2}{25}.$$

Wenn wir Sinus und Cosinus³ aus der Schule ausleihen, dann heben wir jetzt zwei ‘verschiedene’ Möglichkeiten eine komplexe Zahl zu schreiben:

$$z = \operatorname{Re}(z) + i \operatorname{Im}(z),$$

$$z = |z| (\cos(\operatorname{Arg}(z)) + i \sin(\operatorname{Arg}(z))).$$



Addition zweier komplexer Zahlen kann man darstellen, indem man das Parallelogramm zu den beiden Punkten komplett macht.

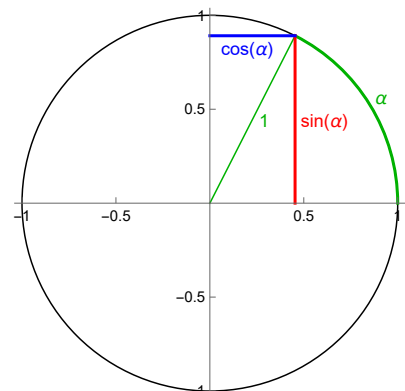
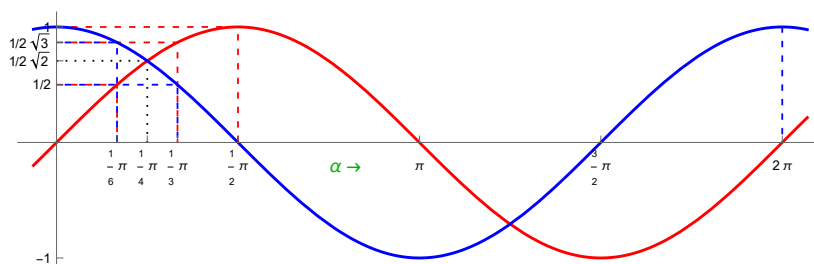
Man erinnere sich vielleicht auch noch an den folgenden Formeln:

$$\sin(\alpha + \beta) = \sin(\alpha) \cos(\beta) + \cos(\alpha) \sin(\beta),$$

$$\cos(\alpha + \beta) = \cos(\alpha) \cos(\beta) - \sin(\alpha) \sin(\beta),$$

gültig für alle $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$. Überraschenderweise kann man so auch zu der Multiplikation eine geometrische Darstellung finden.

³Vorläufig werden wir die Funktionen sin und cos benutzen, so wie man sie in der Schule eingeführt hat, das heißt, als ‘Projektionen’ von Punkten auf dem Einheitskreis zu den beiden Achsen. Und dann gibt es auch noch $\tan(\varphi) = \frac{\sin(\varphi)}{\cos(\varphi)}$.



Der Graph für den Sinus geht durch $(0,0)$ und ist hier rot; der für Cosinus ist blau; für den Winkel benutzt man die Bogenlänge auf dem Einheitskreis und nicht Grad oder ”degree”.

Lemma 3.6 Wenn $z, w \in \mathbb{C}$, dann gilt:

1. $|zw| = |z| |w|$,
2. und für $zw \neq 0$ gilt, dass

$$\operatorname{Arg}(zw) = \begin{cases} \operatorname{Arg}(z) + \operatorname{Arg}(w) & \text{für } \operatorname{Arg}(z) + \operatorname{Arg}(w) < 2\pi, \\ \operatorname{Arg}(z) + \operatorname{Arg}(w) - 2\pi & \text{für } \operatorname{Arg}(z) + \operatorname{Arg}(w) \geq 2\pi. \end{cases}$$

Also folgt:

$$zw = |z| |w| \left(\cos(\operatorname{Arg}(z) + \operatorname{Arg}(w)) + i \sin(\operatorname{Arg}(z) + \operatorname{Arg}(w)) \right). \quad (3.5)$$

Bemerkung 3.6.1 Grob zusammengefasst: beim Produkt in \mathbb{C} werden „Längen multipliziert und Winkel addiert“.

Beweis. Wir schreiben $z = x + iy$ und $w = u + iv$ und finden:

$$\begin{aligned} |zw| &= |(xu - yv) + i(xv + yu)| = \sqrt{(xu - yv)^2 + (xv + yu)^2} \\ &= \sqrt{x^2u^2 - 2xyuv + y^2v^2 + x^2v^2 + 2xyuv + y^2u^2} \\ &= \sqrt{x^2u^2 + y^2v^2 + x^2v^2 + y^2u^2} = \sqrt{(x^2 + y^2)(u^2 + v^2)} = \sqrt{x^2 + y^2} \sqrt{u^2 + v^2} = |z| |w|. \end{aligned}$$

Mit Hilfe der ‘zweiten’ Schreibweise und $\operatorname{Arg}(z) = \alpha$, $\operatorname{Arg}(w) = \beta$, haben wir

$$\begin{aligned} zw &= |z| (\cos \alpha + i \sin \alpha) \cdot |w| (\cos \beta + i \sin \beta) = \\ &= |z| |w| ((\cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta) + i (\cos \alpha \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta)) = \\ &= |z| |w| (\cos(\alpha + \beta) + i \sin(\alpha + \beta)). \end{aligned}$$

Also

$$\cos(\operatorname{Arg}(zw)) = \cos(\alpha + \beta) \quad \text{und} \quad \sin(\operatorname{Arg}(zw)) = \sin(\alpha + \beta)$$

und weil $0 \leq \alpha + \beta \leq 4\pi$, findet man $\operatorname{Arg}(zw) = \alpha + \beta$ oder $\operatorname{Arg}(zw) = \alpha + \beta - 2\pi$. ■

3.2 Algebraische Gleichungen in \mathbb{C}

Definition 3.7 Eine Funktion $p: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ der Form

$$p(z) = a_n z^n + a_{n-1} z^{n-1} + \cdots + a_1 z + a_0$$

mit $n \in \mathbb{N}$ und $a_i \in \mathbb{C}$ nennt man **Polynom**. Wenn $a_n \neq 0$, dann sagt man: „ p hat Grad n “. Eine Zahl $z_1 \in \mathbb{C}$ derart, dass $p(z_1) = 0$ gilt, heißt eine **Wurzel** von p .

Man kann mit diesem i jetzt Quadratwurzeln von negativen Zahlen ziehen. Was passiert aber, wenn man $z^2 = i$ oder $z^2 = 2 + 2i$ zu lösen versucht? Gibt es Lösungen von $z^5 = i$? Und wenn es sie gibt, kann man sie auch berechnen?

3.2.1 Das Lösen von $z^n = w$

Wir fangen gleich mal allgemeiner an und fragen uns, ob wir Folgendes lösen können:

$$z^n = w \in \mathbb{C} \text{ und } n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}.$$

Benutzt man das letzte Lemma, dann findet man

$$|z|^n = |z^n| = |w|,$$

und weil $|w| \geq 0$ ist und $|z| \geq 0$ sein sollte, folgt

$$|z| = \sqrt[n]{|w|}. \quad (3.6)$$

Weil

$$\text{Arg}(z^n) = \text{Arg}(w),$$

wenn z eine Lösung ist, läßt der zweite Teil des gleichen Lemmas folgern, dass

$$\text{Arg}(z^n) = n \text{Arg}(z) - 2k\pi,$$

wobei man ein $k \in \{0, 1, 2, \dots, n\}$ zulassen muss. Also hat man

$$\text{Arg}(z) = \frac{1}{n} (\text{Arg}(w) + 2k\pi) \text{ für ein } k \in \{0, 1, 2, \dots, n-1\}. \quad (3.7)$$

Das heißt, wenn z eine Lösung ist von $z^n = w$, dann kann man (3.6) und (3.7) kombinieren und bekommt

$$\begin{aligned} z &= |z| (\cos(\text{Arg}(z)) + i \sin(\text{Arg}(z))) = \\ &= \sqrt[n]{|w|} \left(\cos\left(\frac{1}{n} (\text{Arg}(w) + 2k\pi)\right) + i \sin\left(\frac{1}{n} (\text{Arg}(w) + 2k\pi)\right) \right). \end{aligned}$$

Lemma 3.8 Die Lösungen $z \in \mathbb{C}$ von $z^n = w \in \mathbb{C}$ und $n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$ sind:

$$\left\{ \sqrt[n]{|w|} \left(\cos\left(\frac{\text{Arg}(w) + 2k\pi}{n}\right) + i \sin\left(\frac{\text{Arg}(w) + 2k\pi}{n}\right) \right); k \in \{0, 1, 2, \dots, n-1\} \right\}.$$

Bemerkung 3.8.1 Man bemerke, dass es für $w \neq 0$ genau n verschiedene Lösungen gibt.

Beweis. Vorher haben wir schon gezeigt, dass jede Lösung diese Form hat. Mit Lemma 3.6 sieht man direkt, dass man auch tatsächlich Lösungen hat:

$$\begin{aligned} z^n &= \left(\sqrt[n]{|w|} \left(\cos\left(\frac{1}{n} \text{Arg}(w) + \frac{k}{n} 2\pi\right) + i \sin\left(\frac{1}{n} \text{Arg}(w) + \frac{k}{n} 2\pi\right) \right) \right)^n \\ &= |w| (\cos(\text{Arg}(w) + k2\pi) + i \sin(\text{Arg}(w) + k2\pi)) \\ &= |w| (\cos(\text{Arg}(w)) + i \sin(\text{Arg}(w))) = w. \end{aligned}$$

Man erinnere sich, dass \sin und \cos beide 2π -periodisch sind. ■

Beispiel 3.4. Gefragt: $z^6 = -4 - 4\sqrt{3}i$.

Es folgt $|z|^6 = |z^6| = |-4 - 4\sqrt{3}i| = \sqrt{(-4)^2 + (-4\sqrt{3})^2} = \sqrt{64} = 8$ und

$$|z| = \sqrt[6]{8} = (2^3)^{\frac{1}{6}} = 2^{\frac{3}{6}} = 2^{\frac{1}{2}} = \sqrt{2}.$$

Auch hat man $\text{Arg}(z^6) = \text{Arg}(-4 - 4\sqrt{3}i) = \frac{4}{3}\pi$ (fertigen Sie eine Skizze an) und damit

$$\text{Arg}(z) = \frac{1}{6} \left(\frac{4}{3}\pi + 2k\pi \right) = \frac{2}{9}\pi + \frac{1}{3}k\pi.$$

Die Lösungen sind

$$\begin{aligned} &\sqrt{2} \left(\cos \frac{2}{9}\pi + i \sin \frac{2}{9}\pi \right), \sqrt{2} \left(\cos \frac{5}{9}\pi + i \sin \frac{5}{9}\pi \right), \sqrt{2} \left(\cos \frac{8}{9}\pi + i \sin \frac{8}{9}\pi \right), \\ &\sqrt{2} \left(\cos \frac{11}{9}\pi + i \sin \frac{11}{9}\pi \right), \sqrt{2} \left(\cos \frac{14}{9}\pi + i \sin \frac{14}{9}\pi \right), \sqrt{2} \left(\cos \frac{17}{9}\pi + i \sin \frac{17}{9}\pi \right). \end{aligned}$$

Leider ist das kaum einfacher zu schreiben. Man sieht aber so direkt, dass diese 6 Lösungen in der komplexen Ebene die Ecken eines regelmäßigen Sechsecks bilden.

Beispiel 3.5. Gefragt sind $z \in \mathbb{C}$ derart, dass $z^2 = 1 + 2i$.

Man findet $|z|^2 = |z^2| = \sqrt{1^2 + 2^2} = \sqrt{5}$ und dann gilt

$$|z| = \sqrt[4]{5}.$$

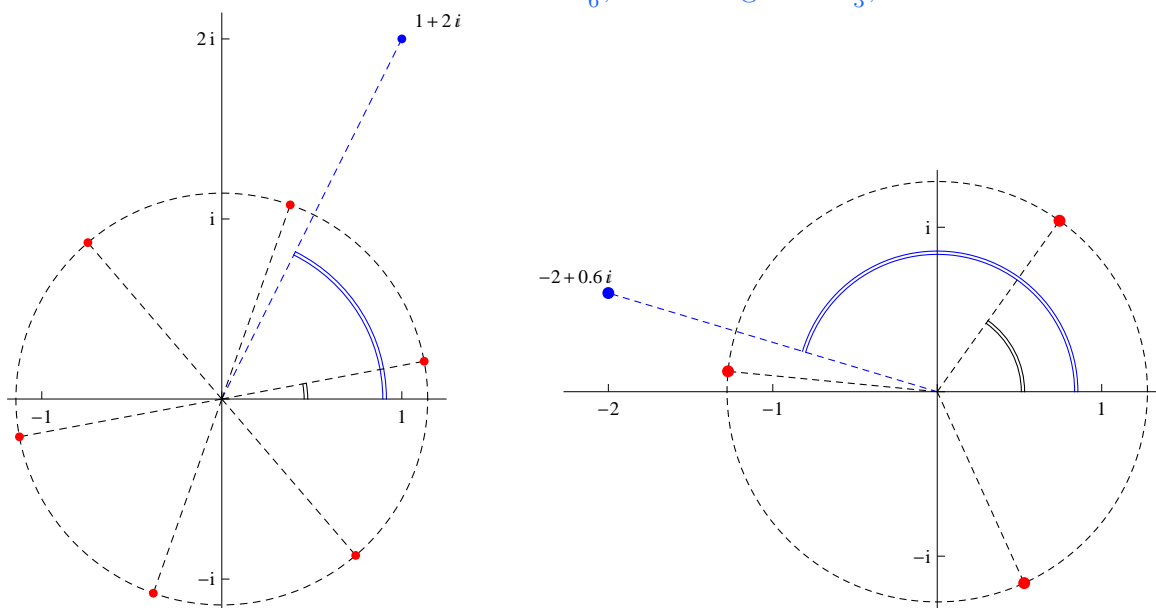
Auch $\text{Arg}(z^2) = \text{Arg}(1 + 2i) = \arctan(2)$ und damit

$$\text{Arg}(z) = \frac{1}{2} \arctan(2) \text{ oder } \text{Arg}(z) = \frac{1}{2} \arctan(2) + \pi.$$

Die Lösungen sind

$$\begin{aligned} &\sqrt[4]{5} \left(\cos \left(\frac{1}{2} \arctan(2) \right) + i \sin \left(\frac{1}{2} \arctan(2) \right) \right) \text{ und} \\ &-\sqrt[4]{5} \left(\cos \left(\frac{1}{2} \arctan(2) \right) + i \sin \left(\frac{1}{2} \arctan(2) \right) \right). \end{aligned}$$

Beispiel 3.6. Darstellungen in der komplexen Ebene der Lösungen von $z^6 = 1 + 2i$ und von $z^3 = -2 + 0.6i$. Der Winkel in schwarz ist $\frac{1}{6}$, beziehungsweise $\frac{1}{3}$, vom blauen Winkel.



Beispiel 3.7. Schreibe ohne trigonometrische Funktionen: $\cos\left(\frac{1}{2}\arctan(2)\right)$.

Setze $x = \sqrt[4]{5} \cos\left(\frac{1}{2}\arctan(2)\right)$ und $y = \sqrt[4]{5} \sin\left(\frac{1}{2}\arctan(2)\right)$, und es folgt, dass

$$\begin{aligned}(x + iy)^2 &= \left(\sqrt[4]{5} \left(\cos\left(\frac{1}{2}\arctan 2\right) + i \sin\left(\frac{1}{2}\arctan 2\right)\right)\right)^2 \\ &= (\sqrt[4]{5})^2 \left(\cos(\arctan 2) + i \sin(\arctan 2)\right) \\ &= \sqrt{5} \left(\frac{1}{\sqrt{1^2 + 2^2}} + i \frac{2}{\sqrt{1^2 + 2^2}}\right) = 1 + 2i.\end{aligned}$$

Weil $(x + iy)^2 = x^2 - y^2 + 2ixy$, folgt

$$x^2 - y^2 = 1 \text{ und } 2xy = 2.$$

So folgt $y = \frac{1}{x}$ und $x^2 - x^{-2} = 1$. Via $x^2(x^2 - x^{-2}) = x^2$ bekommt man

$$x^4 - x^2 - 1 = 0 \Leftrightarrow \left(x^2 - \frac{1}{2}\right)^2 = \frac{5}{4} \Leftrightarrow x^2 = \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}\sqrt{5}.$$

Weil x^2 nicht negativ ist, hat man $x^2 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{5}$ und $x = \pm\sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{5}}$. Weil x positiv ist, folgt

$$\cos\left(\frac{1}{2}\arctan(2)\right) = \frac{x}{\sqrt[4]{5}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{5}}}{\sqrt[4]{5}} = \sqrt{\frac{1}{2\sqrt{5}} + \frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{1}{10}\sqrt{5} + \frac{1}{2}}.$$

3.2.2 Das Lösen von $z^2 + \beta z + \gamma = 0$

Der Trick, den wir im letzten Beispiel angewendet haben, ist auch nützlich für das Berechnen der Wurzeln eines quadratischen Polynoms:

$$z^2 + \beta z + \gamma = 0 \Leftrightarrow \left(z + \frac{1}{2}\beta\right)^2 = \frac{1}{4}\beta^2 - \gamma.$$

Dieser Trick wird die **quadratische Ergänzung** genannt. Setzen wir $w = z + \frac{1}{2}\beta$, dann können wir $w^2 = \frac{1}{4}\beta^2 - \gamma$ lösen.

Dies macht man durch

$$|w^2| = \left|\frac{1}{4}\beta^2 - \gamma\right| \text{ und } \text{Arg}(w^2) = \text{Arg}\left(\frac{1}{4}\beta^2 - \gamma\right)$$

und findet mit $k \in \{0, 1\}$, dass

$$|w| = \sqrt{\left|\frac{1}{4}\beta^2 - \gamma\right|} \text{ und } \text{Arg}(w) = \frac{1}{2}\text{Arg}\left(\frac{1}{4}\beta^2 - \gamma\right) + k\pi.$$

Argument und Betrag bestimmen w und so auch $z = w - \frac{1}{2}\beta$.

Bemerkung 3.8.2 Man kann sogar $\text{Re } w$ und $\text{Im } w$ berechnen. Setze $w = x + iy$ und man findet

$$x^2 - y^2 = \text{Re}\left(\frac{1}{4}\beta^2 - \gamma\right) \text{ und } 2xy = \text{Im}\left(\frac{1}{4}\beta^2 - \gamma\right). \quad (3.8)$$

Wenn $\operatorname{Im}(\frac{1}{4}\beta^2 - \gamma) \neq 0$ gilt, folgt $x \neq 0$ und $y = \frac{1}{2}x^{-1} \operatorname{Im}(\frac{1}{4}\beta^2 - \gamma)$ aus der rechten Hälfte von (3.8). Einsetzen in der linken Hälfte von (3.8) ergibt $x^2 - Bx^{-2} = A$ und die reelle quadratische Gleichung in x^2

$$x^4 - Ax^2 - B = 0,$$

mit $A = \operatorname{Re}(\frac{1}{4}\beta^2 - \gamma)$ und $B = \frac{1}{4}(\operatorname{Im}(\frac{1}{4}\beta^2 - \gamma))^2$. Als Nächstes löst man nach x^2 , x und anschließend nach y auf. Bemerke, dass man zwei Lösungen für x und das dazugehörige y findet. Schlussendlich bekommt man

$$z = x + iy - \frac{1}{2}\beta.$$

Beispiel 3.8. Gefragt sind die Lösungen von $z^2 + (4 + 2i)z + 3 + 12i = 0$. Diese Gleichung wird umgeschrieben nach

$$(z + (2 + i))^2 = (2 + i)^2 - 3 - 12i = -8i$$

und weil $-8i = (-2 + 2i)^2$ gilt, folgt

$$z + (2 + i) = -2 + 2i \text{ oder } z + (2 + i) = -(-2 + 2i).$$

Also findet man $z \in \{-4 + i, -3i\}$. ■

Beispiel 3.9. Wenn man zum Beispiel $z^2 = -4$ lösen möchte, dann kann man auf einem Schmierblatt $z = \pm\sqrt{-4} = \pm\sqrt{4}\sqrt{-1} = \pm 2i$ schreiben. Aber dann bitte das Schmierblatt ins Altpapier geben, und nur $z \in \{2i, -2i\}$ als Antwort liefern.

Schlimmer wird es schon, wenn man $z^2 = 2i$ durch $z = \pm\sqrt{i}\sqrt{2}$. Jetzt ist diese Wurzel aus i wohl ganz fehl am Platz. Da hilft nur

$$|z|^2 = |z^2| = 2 \text{ also } |z| = \sqrt{2} \text{ und}$$

$$2\operatorname{Arg}(z) = \operatorname{Arg}(z^2) + 2k\pi = \frac{1}{2}\pi + 2k\pi \text{ für } k \in \{0, 1\}.$$

Man bekommt zwei Möglichkeiten: $z = z_1$ und $z = z_2$, wobei

$$z_1 = \sqrt{2} \left(\cos\left(\frac{1}{4}\pi\right) + i \sin\left(\frac{1}{4}\pi\right) \right) = \sqrt{2} \left(\frac{1}{2}\sqrt{2} + i\frac{1}{2}\sqrt{2} \right) = 1 + i,$$

$$z_2 = \sqrt{2} \left(\cos\left(\frac{5}{4}\pi\right) + i \sin\left(\frac{5}{4}\pi\right) \right) = \sqrt{2} \left(-\frac{1}{2}\sqrt{2} - i\frac{1}{2}\sqrt{2} \right) = -1 - i.$$

Wenn man unbedingt die Wurzelfunktion für komplexe Zahlen definieren möchte, hat man ein Problem. Wir werden später zeigen, dass man dazu entweder eine nicht-stetige Funktion oder eine mehrwertige Funktion verwenden sollte.

Beispiel 3.10. Eine alte Version von Maple⁴ und auch noch Maple 16 löst

$$z^2 + \left(1 + 4\sqrt{2} + i(3 + \sqrt{2})\right)z + \sqrt{2} + 11i = 0$$

wie folgt:

```
> solve(z^2+(1+4*2^(1/2)+I*(3+2^(1/2)))*z+2^(1/2)+11*I=0, z);
```

$$-2\sqrt{2} - \frac{1}{2} - \frac{3}{2}I - \frac{1}{2}I\sqrt{2} + \frac{1}{2}\sqrt{-2\sqrt{2} + 26I\sqrt{2} + 22 - 22I}, -2\sqrt{2} - \frac{1}{2} - \frac{3}{2}I$$

$$+ \frac{1}{2}I\sqrt{2} - \frac{1}{2}\sqrt{-2\sqrt{2} + 26I\sqrt{2} + 22 - 22I}$$

Das scheinen zwar zwei Lösungen zu sein, jedoch erhalten beide auch Unfug mit Wurzeln aus komplexen Zahlen.

Mit Mathematica⁴ findet man, dass die beiden Lösungen sich wie folgt vernünftig schreiben lassen: $z_1 = -1 - i\sqrt{2}$ und $z_2 = -4\sqrt{2} - 3i$. ■

⁴Maple und Mathematica sind zwei Computer Algebra Programme, die, wenn vernünftig benutzt, sehr hilfreich sein können.

Analysis 1, Woche 4

Komplexe Zahlen II

A1

4.1 Fundamentalsatz der Algebra

Wir haben gesehen, dass eine Gleichung wie $z^2 + \alpha z + \beta = 0$ meistens zwei Lösungen hat und, dass $z^n = \alpha$ sogar n Lösungen in \mathbb{C} hat.

Theorem 4.1 (Fundamentalsatz der Algebra) Sei $n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$ und sei $a_1, \dots, a_n \in \mathbb{C}$. Die Gleichung

$$z^n + a_1 z^{n-1} + a_2 z^{n-2} + \dots + a_{n-1} z + a_n = 0 \quad (4.1)$$

hat mindestens eine Lösung in \mathbb{C} .

Beweis. Einen Beweis werden Sie spätestens in der Vorlesung Funktionentheorie bekommen. Der Beweis wird analytische Methoden verwenden. ■

Einen alternativen Beweis mit topologischen Argumenten kann man sich überlegen, wenn man sich das folgende Beispiel ansieht:

Beispiel 4.1. Wir betrachten das Polynom

$$p(z) = z^5 + iz^4 - (i+i)z^3 + z + \frac{3}{4}.$$

Weil z^5 für $|z| \rightarrow \infty$ dieses Polynom dominiert, kann man sich überzeugen, dass

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(p(z)) > 0 & \quad \text{für } |z| \text{ genügend groß und } \operatorname{Arg}(z) \in \left\{0, \frac{2}{5}\pi, \frac{4}{5}\pi, \frac{6}{5}\pi, \frac{8}{5}\pi\right\}, \\ \operatorname{Im}(p(z)) > 0 & \quad \text{für } |z| \text{ genügend groß und } \operatorname{Arg}(z) \in \left\{\frac{1}{5}\pi, \frac{3}{5}\pi, \pi, \frac{7}{5}\pi, \frac{9}{5}\pi\right\}. \end{aligned}$$

Die Verteilung von \mathbb{C} in

$$R^+ := \{z \in \mathbb{C}; \operatorname{Re}(p(z)) > 0\}$$

und

$$R^- := \{z \in \mathbb{C}; \operatorname{Re}(p(z)) < 0\}$$

sieht für $|z|$ sehr groß sogar ähnlich aus wie die für $\operatorname{Re}(z^5) > 0$ und $\operatorname{Re}(z^5) < 0$, und diese letzte Verteilung kann man explizit berechnen, nämlich

$$\operatorname{Re}(z^5) > 0 \Leftrightarrow$$

$$\operatorname{Arg}(z) \in \left[0, \frac{\pi}{10}\right) \cup \left(\frac{3\pi}{10}, \frac{5\pi}{10}\right) \cup \left(\frac{7\pi}{10}, \frac{9\pi}{10}\right) \cup \left(\frac{11\pi}{10}, \frac{13\pi}{10}\right) \cup \left(\frac{15\pi}{10}, \frac{17\pi}{10}\right) \cup \left(\frac{19\pi}{10}, 2\pi\right).$$

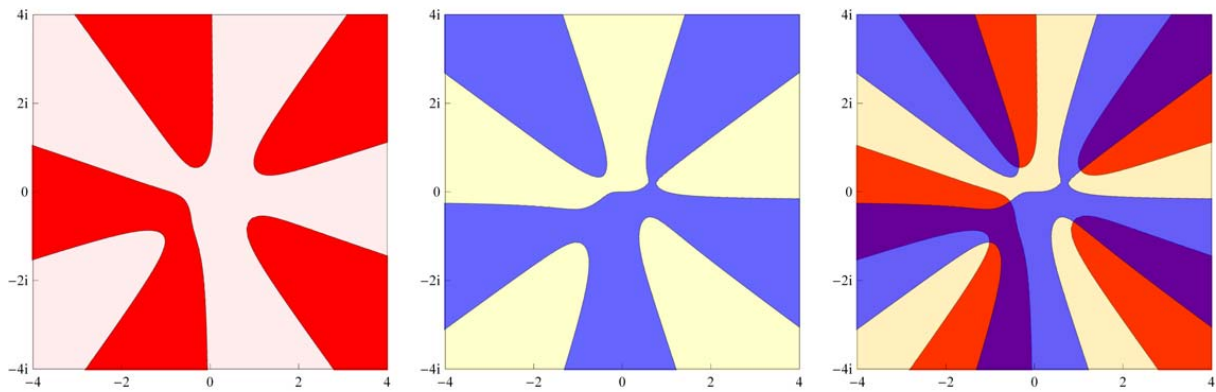


Abbildung 4.1: Im linken Bild R^+ und R^- (in rot); im mittleren Bild I^+ und I^- (in blau); rechts die Kombination. Wenn die vier Farben in der Kombination sich in einem Punkt treffen, ist der Punkt eine Nullstelle von p . Es gibt hier 5 solcher Punkte.

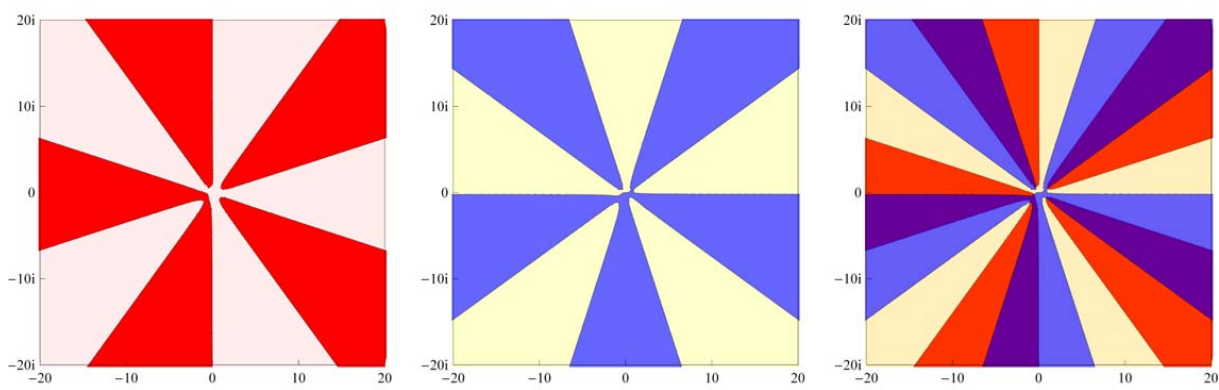


Abbildung 4.2: Ein ähnliches Bild wie in Abbildung 4.1 jedoch ein größerer Ausschnitt. Die Verteilung in R^+ und R^- und in I^+ und I^- sieht schon fast so aus wie die für z^5 .

Ähnliches gilt auch hier für $I^+ = \{z \in \mathbb{C}; \operatorname{Im}(p(z)) > 0\}$ und $I^- = \{z \in \mathbb{C}; \operatorname{Im}(p(z)) < 0\}$, und

$$\operatorname{Im}(z^5) > 0 \Leftrightarrow \operatorname{Arg}(z) \in \left(\frac{\pi}{5}, \frac{2\pi}{5}\right) \cup \left(\frac{3\pi}{5}, \frac{4\pi}{5}\right) \cup \left(\pi, \frac{6\pi}{5}\right) \cup \left(\frac{7\pi}{5}, \frac{8\pi}{5}\right) \cup \left(\frac{9\pi}{5}, 2\pi\right).$$

Wenn die Ränder von R^+ , R^- und von I^+ , I^- sich schneiden in dem Punkt z_0 , gilt, dass $\operatorname{Re}(p(z_0)) = 0$ und $\operatorname{Im}(p(z_0)) = 0$, und so folgt, ein Schnittpunkt ist eine Nullstelle von p . Jetzt muss man sich nur noch überzeugen, dass es einen solchen Schnittpunkt gibt.

Dafür macht man das folgende: Man folgt einer Kurve, wo $\operatorname{Re}(z) = 0$ gilt, von weit aussen nach innen und anschließend auch wieder hinaus. Liegt am Anfang rechts von der Kurve R^- , dann fängt man an im I^+ . Wenn man wieder nach außen geht, liegt rechts noch immer R^- obwohl man endet in I^- . Das bedeutet, dass man irgendwo unterwegs von I^+ nach I^- gekommen ist. Es gibt also eine Übergangsstelle von I^+ nach I^- und genau da liegt eine Nullstelle. ■

Lemma 4.2 Sei $n \in \mathbb{N}^+$, seien $a_1, \dots, a_n \in \mathbb{C}$ und schreibe

$$p(z) = z^n + a_1 z^{n-1} + a_2 z^{n-2} + \dots + a_{n-1} z + a_n. \quad (4.2)$$

Wenn z_0 eine Nullstelle von p ist, also $p(z_0) = 0$ gilt, dann gibt es $b_1, \dots, b_{n-1} \in \mathbb{C}$ so, dass

$$p(z) = (z - z_0) (z^{n-1} + b_1 z^{n-2} + \dots + b_{n-2} z + b_{n-1}).$$

Beweis. Wir erläutern den Algorithmus, den man benutzt bei der Division $p(z)/(z+w)$:

- Erster Schritt:

$$z + w \ / \ z^n + a_1 z^{n-1} + a_2 z^{n-2} + \dots + a_{n-1} z + a_n \ \backslash \ z^{n-1}$$

$$\frac{z^n + w z^{n-1}}{(a_1 - w) z^{n-1} + a_2 z^{n-2} + \dots + a_{n-1} z + a_n}$$

- Zweiter Schritt:

$$z + w \ / \ z^n + a_1 z^{n-1} + a_2 z^{n-2} + \dots + a_{n-1} z + a_n \ \backslash \ z^{n-1} + (a_1 - w) z^{n-2}$$

$$\frac{z^n + w z^{n-1}}{(a_1 - w) z^{n-1} + a_2 z^{n-2} + \dots + a_{n-1} z + a_n}$$

$$\frac{(a_1 - w) z^{n-1} + w (a_1 - w) z^{n-2}}{(a_2 - w (a_1 - w)) z^{n-2} + \dots + a_{n-1} z + a_n}$$

usw. Man findet am Ende einen konstanten Restterm, den wir c nennen. Also

$$\frac{z^n + a_1 z^{n-1} + a_2 z^{n-2} + \dots + a_{n-1} z + a_n}{z + w} = z^{n-1} + b_1 z^{n-1} + \dots + b_{n-2} z + b_{n-1} + \frac{c}{z + w}.$$

Nehmen wir $w = -z_0$,

$$b_1 = a_1 - w = a_1 + z_0,$$

$$b_2 = a_2 - w(a_1 - w) = a_2 + z_0(a_1 + z_0),$$

$$b_3 = \dots,$$

und schreiben wir $q(z) = z^{n-1} + b_1 z^{n-1} + \dots + b_{n-2} z + b_{n-1}$, dann folgt

$$\frac{p(z)}{z - z_0} = q(z) + \frac{c}{z - z_0}$$

und

$$p(z) = (z - z_0) q(z) + c.$$

Man findet $0 = p(z_0) = (z_0 - z_0) q(z_0) + c = c$ und dann auch, dass

$$p(z) = (z - z_0) q(z)$$

mit q ein Polynom von Grad $n - 1$. ■

Korollar 4.3 Sei $n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$ und $a_1, \dots, a_n \in \mathbb{C}$ und definiere p durch (4.2). Dann gibt es $z_1, z_2, \dots, z_n \in \mathbb{C}$ so, dass

$$p(z) = (z - z_1)(z - z_2) \dots (z - z_n). \quad (4.3)$$

Beweis. Wir benutzen vollständige Induktion. Für $n = 1$ hat man $p(z) = z + a_1$, und das Ergebnis folgt, wenn wir $z_1 = -a_1$ nehmen.

Jetzt nehmen wir an, dass sich jedes Polynom von Grad n schreiben lässt wie in (4.3).

Sei P ein Polynom von Grad $n + 1$:

$$P(z) = z^{n+1} + a_1 z^n + a_2 z^{n-1} + \dots + a_n z + a_{n+1}.$$

Aus dem Fundamentalsatz folgt, dass $P(z) = 0$ mindestens eine Lösung hat: nennen wir sie z_0 . Mit dem letzten Lemma gibt es ein Polynom p so, dass

$$P(z) = (z - z_0) p(z)$$

Weil p Grad n hat, gibt es z_1, \dots, z_n mit

$$p(z) = (z - z_1)(z - z_2) \dots (z - z_n)$$

und damit folgt die Behauptung: $P(z) = (z - z_0)(z - z_1)(z - z_2) \dots (z - z_n)$. ■

4.1.1 Sein und haben

Der Fundamentalsatz der Algebra besagt, dass man ein Polynom von Grad n schreiben kann als Produkt von n linearen Faktoren. Das heißt, für p aus (4.2) existieren $z_1, \dots, z_n \in \mathbb{C}$ derart, dass p als in (4.3) zu schreiben ist.

Eine ganz andere Frage ist, ob man diese z_i auch explizit berechnen kann. Approximieren und den Limes nehmen wird, wenn man das vernünftig macht, sicher funktionieren. Wenn man diese Wurzeln aber durch ein algebraisches Verfahren berechnen möchte, wie es die pq -Formel¹ macht für Polynome von Grad 2, dann geht das leider selten. Übrigens macht die pq -Formel keinen Sinn, wenn man ohne weiteres $\sqrt{\quad}$ einer komplexen Zahl nimmt, so wie Maple auf Seite 32.

Für $n = 1$: Trivial: $z + a_1 = (z - (-a_1))$.

Für $n = 2$: Durch quadratische Ergänzung:

$$z^2 + a_1z + a_2 = \left(z + \frac{1}{2}a_1\right)^2 + a_2 - \frac{1}{4}a_1^2,$$

und $w \in \mathbb{C}$ so, dass $w^2 = a_2 - \frac{1}{4}a_1^2$, findet man

$$z^2 + a_1z + a_2 = \left(z - \left(-\frac{1}{2}a_1 - iw\right)\right) \left(z - \left(-\frac{1}{2}a_1 + iw\right)\right).$$

Für $n = 3$: Die Methode von Cardano².

Für $n = 4$: Die Methode von Ferrari³.

Für $n \geq 5$: Keine algebraische Lösungsformel.

Es hört echt auf bei $n = 4$. Man hat für Polynome von Grad 5 und höher keine algebraische Methode, um die Wurzeln im Allgemeinen zu finden: „es gibt die Wurzeln, aber man hat sie nicht explizit“. Es gibt sogar einen Satz, der sagt, dass es keine solche algebraische Formel geben kann.

4.1.2 Reelle Koeffizienten und komplexe Wurzeln.

Lemma 4.4 (Bei reellen Koeffizienten) Sei $n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$ und $a_1, \dots, a_n \in \mathbb{R}$ und definiere p durch (4.2). Wenn $p(z_1) = 0$ für $z_1 \in \mathbb{C}$, dann gilt auch $p(\bar{z}_1) = 0$.

Beweis. Weil die a_i reell sind hat man sofort

$$\begin{aligned} p(\bar{z}_1) &= (\bar{z}_1)^n + a_1 (\bar{z}_1)^{n-1} + a_2 (\bar{z}_1)^{n-2} + \dots + a_{n-1} (\bar{z}_1) + a_n = \\ &= \overline{z_1^n + a_1 z_1^{n-1} + a_2 z_1^{n-2} + \dots + a_{n-1} z_1 + a_n} = \overline{p(z_1)} = 0. \end{aligned}$$

■

¹Wieso sind p und q so beliebt? Es gibt die Englische Redensart: Mind your p's and q's. Eine Erklärung die man im Internet findet:

Mind your pints and quarts. This is suggested as deriving from the practise of chalking up a tally of drinks in English pubs (on the slate). Publicans had to make sure to mark up the quart drinks as distinct from the pint drinks.

²Siehe <http://mathworld.wolfram.com/CubicFormula.html>

³Siehe <http://mathworld.wolfram.com/QuarticEquation.html>

4.2 Ungleichungen und \mathbb{C}

Es gibt keine totale Ordnung von \mathbb{C} , die zu der Körperstruktur passt. Wenn wir $i > 0$ nehmen würden, dann müsste $-1 = i^2 > 0$ stimmen. Ebenso führt $-i > 0$ zu $-1 > 0$. Obwohl es keine vernünftige Anordnung in \mathbb{C} gibt, gibt es doch einige nützliche Ungleichungen bei reellen Ausdrücke komplexer Zahlen.

Lemma 4.5 Sei $z, w \in \mathbb{C}$. Dann gilt

1. $|\operatorname{Re} z| \leq |z|$ und $|\operatorname{Im} z| \leq |z|$;
2. $|z| \leq |\operatorname{Re} z| + |\operatorname{Im} z|$;
3. die Dreiecksungleichung: $|z + w| \leq |z| + |w|$.

Beweis. Aussage 1 folgt sofort. Aussage 2 folgt aus

$$\begin{aligned} |z|^2 &= (\operatorname{Re} z)^2 + (\operatorname{Im} z)^2 \leq (\operatorname{Re} z)^2 + 2|\operatorname{Re} z| |\operatorname{Im} z| + (\operatorname{Im} z)^2 = \\ &= (|\operatorname{Re} z| + |\operatorname{Im} z|)^2. \end{aligned}$$

Für 3 braucht man, dass $z + \bar{z} = 2 \operatorname{Re}(z)$, und wendet dies an für $\operatorname{Re}(z\bar{w})$. Man hat so:

$$\begin{aligned} |z + w|^2 &= (z + w) \overline{(z + w)} = (z + w)(\bar{z} + \bar{w}) = \\ &= z\bar{z} + z\bar{w} + \bar{z}w + w\bar{w} = z\bar{z} + (z\bar{w} + \bar{z}w) + w\bar{w} = \\ &= z\bar{z} + 2 \operatorname{Re}(z\bar{w}) + w\bar{w} \leq \\ &\leq |z|^2 + 2|z\bar{w}| + |w|^2 = |z|^2 + 2|z||\bar{w}| + |w|^2 = \\ &= |z|^2 + 2|z||w| + |w|^2 = (|z| + |w|)^2. \end{aligned}$$

Und weil der Betrag nicht negativ ist, folgt

$$|z + w| \leq |z| + |w|.$$

Zeichnet man z , w und $z + w$, dann sieht man, wieso sie diesen Namen trägt. ■

4.3 Geometrische Überlegungen

In \mathbb{R}^2 werden Geraden beschrieben durch

$$\{(x, y); ax + by = c\},$$

wobei $a, b, c \in \mathbb{R}$ und $ab \neq 0$. Ähnlich beschreibt man eine Gerade in \mathbb{C} durch

$$\{z \in \mathbb{C}; a \operatorname{Re} z + b \operatorname{Im} z = c\}.$$

Wenn man bedenkt, dass $\operatorname{Re} z = \frac{z + \bar{z}}{2}$ und $\operatorname{Im} z = \frac{z - \bar{z}}{2i}$, ist $a \operatorname{Re} z + b \operatorname{Im} z = c$ äquivalent zu

$$\overline{(a + ib)z} + (a + ib)\bar{z} = a(z + \bar{z}) - ib(z - \bar{z}) = 2c.$$

Nennt man $w = a + ib$, dann wird die letzte Gleichung:

$$\bar{w}z + w\bar{z} = 2c. \tag{4.4}$$

Anders gesagt:

Bemerkung 4.6 Für jede Gerade ℓ in \mathbb{C} gibt es $w \in \mathbb{C} \setminus \{0\}$ and $c \geq 0$ derart, dass

$$\ell = \{z \in \mathbb{C}; \bar{w}z + w\bar{z} = 2c\}.$$

Übrigens kann man hier natürlich auch c statt $2c$ nehmen.

Sei $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$ mit $\alpha \neq \beta$. Weil $|z - \alpha|$ die Distanz von α zu z darstellt, kann man $z \in \mathbb{C}$ mit $|z - \alpha| = |z - \beta|$ beschreiben als die $z \in \mathbb{C}$, die die gleiche Distanz zu α als auch zu β haben.

Bemerkung 4.7 Die Mittelsenkrechte S zwischen α und β in \mathbb{C} wird beschrieben durch

$$S = \{z \in \mathbb{C}; |z - \alpha| = |z - \beta|\}.$$

Berechnen, dass diese Formel eine Gerade liefert, kann man auch. Man hat

$$(z - \alpha) \overline{(z - \alpha)} = |z - \alpha|^2 = |z - \beta|^2 = (z - \beta) \overline{(z - \beta)}$$

und mittels

$$z\bar{z} - \alpha\bar{z} - \bar{\alpha}z + \bar{\alpha}\alpha = z\bar{z} - \beta\bar{z} - \bar{\beta}z + \bar{\beta}\beta$$

findet man

$$\overline{(\beta - \alpha)}z + (\beta - \alpha)\bar{z} = |\beta|^2 - |\alpha|^2.$$

Diese letzte Formel entspricht genau der Darstellung in (4.4) mit $c \in \mathbb{R}$. Indem man eventuell α und β vertauscht, kann man dafür sorgen, dass $c \geq 0$.

Beispiel 4.2. Der Weg zurück zu einer reellen Schreibweise geht auch: Schreibt man $z = x + iy$, so folgt nach einigen Schritten, dass

$$x \operatorname{Re}(\beta - \alpha) + y \operatorname{Im}(\beta - \alpha) = \frac{1}{2} (|\beta|^2 - |\alpha|^2). \quad (4.5)$$

Mit Schulkenntnissen sollte man erkennen, dass (4.5) die Gleichung einer Geraden in der Ebene ist, senkrecht auf $\begin{pmatrix} \operatorname{Re}(\beta - \alpha) \\ \operatorname{Im}(\beta - \alpha) \end{pmatrix}$ und mit dem Stützpunkt $\begin{pmatrix} \frac{1}{2} \operatorname{Re}(\alpha + \beta) \\ \frac{1}{2} \operatorname{Im}(\alpha + \beta) \end{pmatrix}$. Für \mathbb{C} wäre dies: senkrecht auf $\beta - \alpha$ und mit Stützpunkt $\frac{1}{2}(\alpha + \beta)$. ■

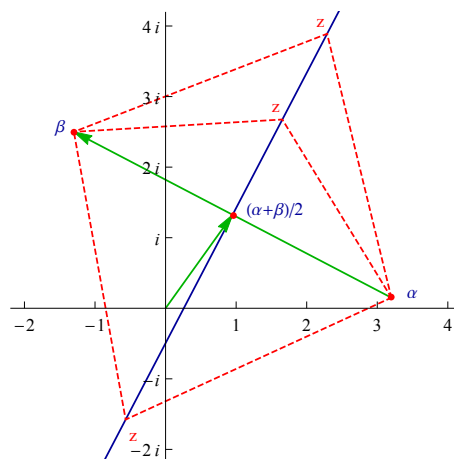


Abbildung 4.3: Eine Mittelsenkrechte aus Bemerkung 4.7

Sei $w \in \mathbb{C}$ und $r \in \mathbb{R}^+$. Dann beschreibt $\{z \in \mathbb{C}; |z + w| = r\}$ einen Kreis in \mathbb{C} mit Mittelpunkt $-w$. Und jeden Kreis in \mathbb{C} kann man so beschreiben. Weil $|\alpha|^2 = \alpha\bar{\alpha}$ gilt, ist $|z + w| = r$ gleich

$$z\bar{z} + \bar{w}z + w\bar{z} + w\bar{w} = r^2. \quad (4.6)$$

Wir können die Formel für Kreis und Gerade kombinieren und finden dann das folgende Lemma:

Lemma 4.8 (Darstellung von Kreisen und Geraden in \mathbb{C}) Sei $a, b \in \mathbb{R}$, $w \in \mathbb{C}$ mit $|w|^2 > ab$ und

$$K = \{z \in \mathbb{C}; az\bar{z} + \bar{w}z + w\bar{z} + b = 0\}. \quad (4.7)$$

1. Wenn $a \neq 0$ gilt, dann ist K ein Kreis in \mathbb{C} . Jeden Kreis K in \mathbb{C} kann man schreiben wie in (4.7) mit $a \neq 0$.
2. Wenn $a = 0$ gilt, dann ist K eine Gerade in \mathbb{C} . Jede Gerade K in \mathbb{C} kann man schreiben wie in (4.7) mit $a = 0$.

Beweis. Wenn $a = 0$, dann hat man einen Ausdruck der Form (4.4) und beschreibt (4.7) eine Gerade. Wenn $a \neq 0$, dann ist (4.7) gleich

$$z\bar{z} + \overline{\left(\frac{w}{a}\right)}z + \left(\frac{w}{a}\right)\bar{z} + \frac{b}{a} = 0$$

und man hat

$$\left|z + \frac{w}{a}\right|^2 = \left|\frac{w}{a}\right|^2 - \frac{b}{a} = \frac{|w|^2 - ab}{a^2}.$$

Wenn, und nur wenn $|w|^2 > ab$ gilt, ist die rechte Seite positiv und es gibt einen Kreis. ■

Beispiel 4.3. Sei $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$ und $\ell \in \mathbb{R}$ mit $\ell > |\alpha - \beta|$. Die Menge

$$\{z \in \mathbb{C}; |z - \alpha| + |z - \beta| = \ell\}$$

beschreibt eine Ellipse. Wenn man $\alpha = 1 + i$, $\beta = -1 - i$ und $\ell = 4$ nimmt, bekommt man die Figur in Abbildung 4.4. ■

Beispiel 4.4. Sei $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$ und $\varphi \in (0, 2\pi)$ mit $\alpha \neq \beta$. Dann beschreibt die Menge

$$\{z \in \mathbb{C}; \text{Arg}(z - \alpha) = \text{Arg}(z - \beta) + \varphi\}$$

einen Teil von einem Kreis durch und zwischen α und β wie in Abbildung 4.5. Einen Beweis werden wir später geben. Bedenkt man, dass

$$\text{Arg}\left(\frac{z - \alpha}{z - \beta}\right) = \text{Arg}(z - \alpha) - \text{Arg}(z - \beta) + 2k\pi \text{ mit } k \in \{0, 1\},$$

dann findet man, dass

$$\left\{z \in \mathbb{C}; \text{Arg}\left(\frac{z - \alpha}{z - \beta}\right) = \varphi\right\}$$

einen ganzen Kreisbogen von α nach β beschreibt mit Ausnahme der beiden Endpunkte α und β . ■

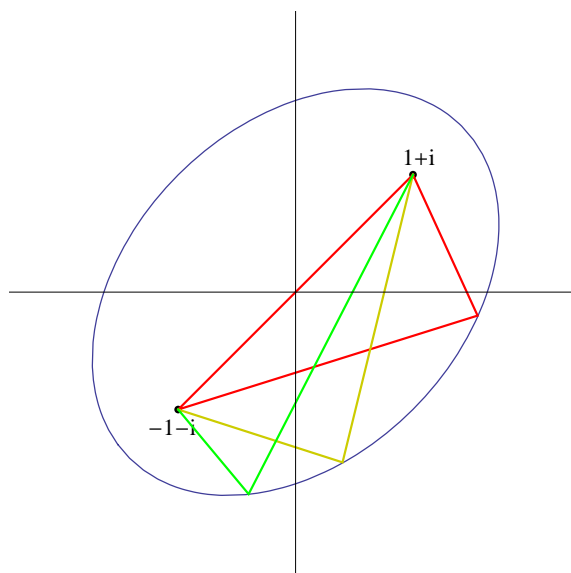


Abbildung 4.4: Die Ellipse aus Beispiel 4.3

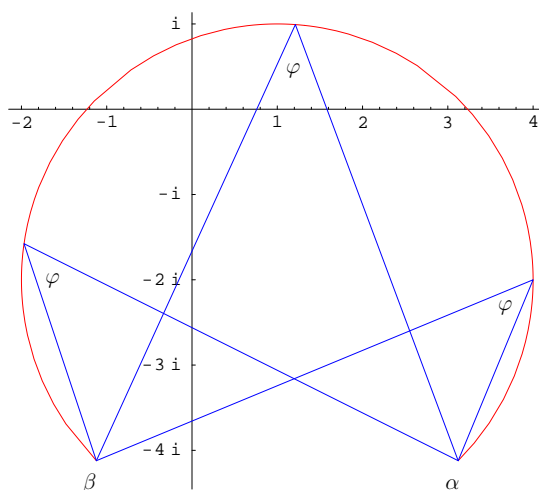


Abbildung 4.5: Der Teil des Kreises aus Beispiel 4.4

4.4 Abbildungen von \mathbb{C} nach \mathbb{C}

Abbildungen von \mathbb{R} nach \mathbb{R} lassen sich graphisch in der Ebene darstellen. Für Abbildungen von \mathbb{C} nach \mathbb{C} bräuchte man 2×2 reelle Dimensionen für eine ähnliche Darstellung. Trotzdem lassen sich einige einfache Abbildungen graphisch erklären.

Definition 4.9 1. Sei $w \in \mathbb{C}$. Die Funktion $f : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ mit

$$f(z) = z + w$$

nennt man eine **Translation** (Verschiebung).

2. Sei $w \in \mathbb{C}$ mit $|w| = 1$. Die Funktion $f : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ mit

$$f(z) = wz$$

nennt man eine **Rotation** (Drehung). Der Winkel der Rotation ist $\text{Arg}(w)$.

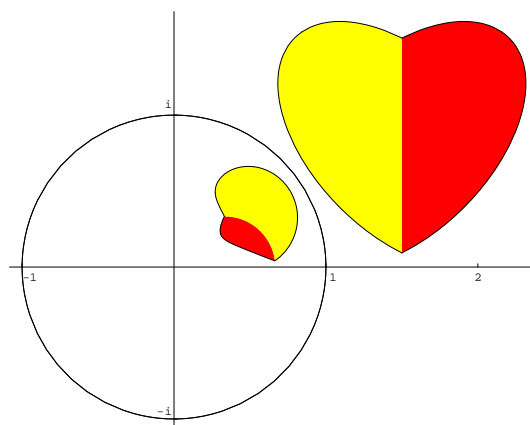


Abbildung 4.6: Eine Spiegelung am Einheitskreis

3. Sei $w \in \mathbb{R}^+$. Die Funktion $f : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ mit

$$f(z) = wz$$

nennt man eine **Skalierung**.

4. Man kann die beiden letzten Typen auch kombinieren. Sei $w \in \mathbb{C} \setminus \{0\}$. Die Funktion $f : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ mit

$$f(z) = wz$$

nennt man eine **Drehskalierung**.

5. Kombinationen von Translationen und Drehskalierungen werden **Gleichförmigkeitstransformationen** genannt und sind wie folgt: Nehme $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$ mit $\alpha \neq 0$ und definiere $f : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ durch

$$f(z) = \alpha z + \beta. \quad (4.8)$$

6. Die Abbildung $f : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ mit

$$f(z) = \bar{z}$$

beschreibt eine **Spiegelung** an der reellen Achse.

7. Die Abbildung $f : \mathbb{C} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{C}$ mit

$$f(z) = \frac{1}{\bar{z}} \quad (4.9)$$

beschreibt eine **Spiegelung** am Einheitskreis. Siehe Abbildung 4.6.

8. Die Abbildung $f : \mathbb{C} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{C}$ mit

$$f(z) = \frac{1}{z}, \quad (4.10)$$

und manchmal auch die in (4.9), wird eine **Inversion** genannt.

Bemerkung 4.9.1 Gleichförmigkeitstransformationen heißen so, weil $K \subset \mathbb{C}$ und $f(K) = \{f(z); z \in K\}$ die gleiche „Form“ haben. Die Spiegelungen und die Inversion erhalten im Allgemeinen nicht die Form einer Menge.

Lemma 4.10 Setzen wir $\mathbb{C}^* = \mathbb{C} \cup \{\infty\}$ und erweitern die Inversion durch $f : \mathbb{C}^* \rightarrow \mathbb{C}^*$ mit

$$f(z) = \begin{cases} \frac{1}{z} & \text{für } z \in \mathbb{C} \setminus \{0\}, \\ \infty & \text{für } z = 0, \\ 0 & \text{für } z = \infty. \end{cases}$$

Diese Inversion bildet Kreise und Geraden in \mathbb{C}^* ab auf Kreisen und Geraden in \mathbb{C}^* .

Bemerkung 4.10.1 Ein Kreis in \mathbb{C}^* ist ein Kreis in \mathbb{C} . Eine Gerade in \mathbb{C}^* ist eine Gerade in \mathbb{C} mit zusätzlich ∞ .

Beweis. Lemma 4.8 besagt, dass Kreise und Geraden in \mathbb{C} dargestellt werden durch

$$K = \{z \in \mathbb{C}; az\bar{z} + \bar{w}z + w\bar{z} + b = 0\}$$

mit $w \in \mathbb{C}$, $a, b \in \mathbb{R}$ unter der Bedingung, dass $|w|^2 > ab$. Dann gilt

$$\begin{aligned} f(K \setminus \{0\}) &= \{f(z); z \in \mathbb{C} \text{ mit } az\bar{z} + \bar{w}z + w\bar{z} + b = 0 \text{ und } z \neq 0\} \\ &= \left\{ \frac{1}{z}; z \in \mathbb{C} \text{ mit } az\bar{z} + \bar{w}z + w\bar{z} + b = 0 \text{ und } z \neq 0 \right\} \\ &= \left\{ u; u \in \mathbb{C} \text{ mit } a \frac{1}{u} \overline{\left(\frac{1}{u}\right)} + \bar{w} \frac{1}{u} + w \overline{\left(\frac{1}{u}\right)} + b = 0 \right\} \end{aligned}$$

und wenn man mit $u\bar{u}$ multipliziert, folgt

$$\begin{aligned} f(K \setminus \{0\}) &= \{u; u \in \mathbb{C} \text{ mit } a + \bar{w}u + wu + bu\bar{u} = 0\} \\ &= \{u; u \in \mathbb{C} \text{ mit } bu\bar{u} + \bar{w}u + wu + a = 0\}. \end{aligned}$$

Diese Menge hat auch wieder die Struktur für Kreis und Gerade aus Lemma 4.8 mit a und b vertauscht und mit \bar{w} statt w .

Man muss sich noch überlegen, was für $0 \in K$ mit $f(0)$ passiert. Wenn $0 \in K$ gilt, dann folgt $b = 0$ und weiter

$$f(K \setminus \{0\}) = \{u; u \in \mathbb{C} \text{ mit } \bar{w}u + wu + a = 0\}.$$

Dies ist eine Gerade und eine Gerade in \mathbb{C}^* enthält ∞ . Weil $f(0) = \infty$ gilt, passt dies auch.

Umgekehrt, wenn K eine Gerade in \mathbb{C}^* ist, dann folgt $a = 0$ und $b \neq 0$, wird $f(K)$ ein Kreis durch 0 und außerdem gilt $0 = f(\infty)$. ■

Definition 4.11 Sei $\alpha, \beta, \gamma, \delta \in \mathbb{C}$ mit $\alpha\delta \neq \beta\gamma$. Man nennt

$$f(z) = \frac{\alpha z - \beta}{\gamma z - \delta} \tag{4.11}$$

eine **gebrochen lineare Abbildung**.

Bemerkung 4.11.1 So wie es hier definiert ist, müsste man Bedenken haben, denn wir sagen nicht, welche z erlaubt sind. Für $\gamma = 0$ und $\alpha\delta \neq \beta\gamma$ folgt $\delta \neq 0$ und ist (4.11) wohldefiniert auf \mathbb{C} . Für $\gamma \neq 0$ ist (4.11) nur definiert auf $\mathbb{C} \setminus \{\delta/\gamma\}$.

Meistens definiert man jedoch die gebrochen linearen Abbildungen als Abbildung von $\mathbb{C}^* = \mathbb{C} \cup \{\infty\}$ nach \mathbb{C}^* und die Definition ist wie folgt für $\gamma \neq 0$:

$$f(z) = \begin{cases} \frac{\alpha z - \beta}{\gamma z - \delta} & \text{für } z \in \mathbb{C} \setminus \{\delta/\gamma\}, \\ \infty & \text{für } z = \delta/\gamma, \\ \frac{\alpha}{\gamma} & \text{für } z = \infty. \end{cases} \quad (4.12)$$

Für $\gamma = 0 \neq \alpha\delta$ ist (4.11) wohldefiniert auf \mathbb{C} und man setzt $f(\infty) = \infty$. Man könnte denken, dass wir in (4.12) mit $\frac{1}{0}$ und $\frac{\infty}{\infty}$ gerechnet haben, aber sagen Sie es bitte nicht laut. Hier ist ∞ nur ein Symbol, das man als „unendlich“ ausspricht.

Bemerkung 4.11.2 Wenn $\gamma = 0$ in $f(z) = \frac{\alpha z - \beta}{\gamma z - \delta}$, dann folgt aus $\alpha\delta \neq \beta\gamma$, dass $\alpha \neq 0$ und f ist wie in (4.8). Wenn $\gamma \neq 0$, dann gilt

$$f(z) = \frac{\alpha}{\gamma} + \frac{\alpha\delta - \beta\gamma}{\gamma} \frac{1}{\gamma z - \delta}$$

und f ist die Kombination der hier oben genannten Abbildungen:

$$\begin{aligned} f_1(z) &= \gamma z, & f_2(z) &= z - \delta, & f_3(z) &= \frac{1}{z}, \\ f_4(z) &= \bar{z}, & f_5(z) &= \frac{\alpha\delta - \beta\gamma}{\gamma} z, & f_6(z) &= z + \frac{\alpha}{\gamma}. \end{aligned}$$

Es gilt nämlich: $f(z) = (f_6 \circ f_5 \circ f_4 \circ f_3 \circ f_2 \circ f_1)(z)$.

Lemma 4.12 Sei f eine gebrochen lineare Abbildung. Wenn $E \subset \mathbb{C}^*$ ein Kreis oder eine Gerade ist, dann ist auch $f(E)$ ein Kreis oder eine Gerade in \mathbb{C}^* .

Beweis. Weil jede gebrochen lineare Abbildung zusammengesetzt werden kann aus Verschiebung, Drehskalierung und $z \mapsto z^{-1}$, brauchen wir es nur für diese Abbildungen einzeln zu beweisen. Für eine Verschiebung oder Drehskalierung kann man die Aussage glauben oder sie auch leicht selbst beweisen. Für die Inversion verwenden wir Lemma 4.10. ■

Lemma 4.13 Die inverse Abbildung zu einer gebrochen linearen Abbildung ist auch eine gebrochen lineare Abbildung.

Beweis. Wenn $w = \frac{\alpha z - \beta}{\gamma z - \delta}$, mit $\alpha\delta \neq \beta\gamma$, dann folgt durch Rechnen für $\gamma z \neq \delta$ und $\gamma w \neq \alpha$, dass

$$w = \frac{\alpha z - \beta}{\gamma z - \delta} \Leftrightarrow w(\gamma z - \delta) = \alpha z - \beta \Leftrightarrow (w\gamma - \alpha)z = w\delta - \beta \Leftrightarrow z = \frac{\delta w - \beta}{\gamma w - \alpha}.$$

Die Funktion $f : \{z \in \mathbb{C}; \gamma z \neq \delta\} \rightarrow \{w \in \mathbb{C}; \gamma w \neq \alpha\}$ hat also als Inverse Funktion

$$f^{\text{inv}}(w) = \frac{\delta w - \beta}{\gamma w - \alpha}.$$

Für die erweiterte Funktion von \mathbb{C}^* nach \mathbb{C}^* wie in (4.12), sieht man, dass $f^{\text{inv}}(\infty) = \delta/\gamma$ und $f^{\text{inv}}(\alpha/\gamma) = \infty$ auch passen zu $f(\delta/\gamma) = \infty$ und $f(\infty) = \alpha/\gamma$. ■

Gehen wir mal zurück zu Beispiel 4.4. Dort haben wir die Menge

$$\{z \in \mathbb{C}; \text{Arg}(z - \alpha) = \text{Arg}(z - \beta) + \varphi\}$$

betrachtet für $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$ und $\varphi \in (0, 2\pi)$ mit $\alpha \neq \beta$. Setzen wir $w = \cos \varphi + i \sin \varphi$, dann gilt $\text{Arg}(w) = \varphi$ und aus $\text{Arg}(z - \alpha) = \text{Arg}(z - \beta) + \varphi$ folgt, dass

$$\frac{z - \alpha}{z - \beta} = rw$$

für irgendein $r \in \mathbb{R}^+$. Die Funktion $f : \mathbb{C}^* \rightarrow \mathbb{C}^*$ mit $f(z) = \frac{z - \alpha}{z - \beta}$ ist eine gebrochen lineare Abbildung, dann ist also auch f^{inv} eine gebrochen lineare Abbildung. Dann beschreibt $\{f^{\text{inv}}(rw); r \in \mathbb{R}\}$ einen Kreis oder eine Gerade, weil $\{rw; r \in \mathbb{R}\}$ eine Gerade beschreibt. Weil wir nur eine halbe Gerade haben, nämlich $\{rw; r \in \mathbb{R}^+\}$, bekommen wir mit $\{f^{\text{inv}}(rw); r \in \mathbb{R}^+\}$ wahrscheinlich nur einen Teil dieses Kreises. Indem wir die beiden Endpunkte betrachten, haben wir $f^{\text{inv}}(0) = \alpha$ und $f^{\text{inv}}(\infty) = \beta$. Das heißt, wir haben wahrscheinlich nur einen Bogen des Kreises und dieser Bogen verbindet α mit β . Weil $\text{Arg}(z - \alpha) > \text{Arg}(z - \beta)$ kann man sich davon überzeugen, dass dieser Bogen rechts von der Geraden $\alpha\beta$ in der Richtung α nach β liegt.

Analysis 1, Woche 5

Folgen und Konvergenz



5.1 Cauchy-Folgen und Konvergenz

Eine Folge in \mathbb{R} ist eine Abbildung von \mathbb{N} nach \mathbb{R} und wird meistens dargestellt durch

$$\{x_n\}_{n=0}^{\infty}, \{x_n\}_{n \in \mathbb{N}} \text{ oder } \{x_0, x_1, x_2, \dots\}$$

Das heißt, für jedes $n \in \mathbb{N}$ ist $x_n \in \mathbb{R}$ vorgeschrieben. Ebenso ist eine Folge in \mathbb{C} eine Abbildung von \mathbb{N} nach \mathbb{C} .

Zum Beispiel ist $\left\{ \frac{(-1)^n}{n+1} \right\}_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge in \mathbb{R} , für die man auch

$$\left\{ 1, \frac{-1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{-1}{4}, \dots \right\}$$

hätte schreiben können, wenn wir alle richtig raten, was auf dem Pünktchen stehen sollte.

5.1.1 Monotone Folgen

Die reellen Zahlen haben wir eingeführt, indem wir monoton wachsende Folgen in \mathbb{Q} benutzt haben. Bei einer wachsenden, beschränkten, rationalen Folge $\{q_n\}_{n=0}^{\infty}$ und der dadurch definierten Zahl $x \in \mathbb{R}$ schreibt man

$$q_n \uparrow x \text{ für } n \rightarrow \infty.$$

Wir haben bemerkt, dass man mit monoton wachsenden, beschränkten Folgen in \mathbb{R} keine noch größere Zahlenmenge bekommt. Diese Aussage werden wir mal genauer betrachten, und dafür brauchen wir Teilfolgen.

Definition 5.1 Eine Folge $\{b_n\}_{n=0}^{\infty}$ heißt eine **Teilfolge** von $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$, wenn es eine streng wachsende Funktion

$$f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$$

gibt, so dass $b_k = a_{f(k)}$ für alle $k \in \mathbb{N}$.

Einfach gesagt: man bekommt eine Teilfolge einer Folge, wenn man Elemente aus dieser Folge entfernt, jedoch so, dass unendlich viele stehen bleiben. Man darf keine Elemente umordnen.

Bemerkung 5.1.1 Meistens schreibt man $n_k = f(k)$ und bekommt so $\{a_{n_k}\}_{k=0}^\infty$ als Teilfolge von $\{a_n\}_{n=0}^\infty$. Dann heißt f ist wachsend, dass $n_0 < n_1 < n_2 < \dots$, also

$$\forall k, \ell \in \mathbb{N} : k < \ell \implies n_k < n_\ell.$$

Beispiel 5.1. Die Folge $\{n^2\}_{n=0}^\infty$ ist eine Teilfolge von $\{n\}_{n=0}^\infty$:

$$\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, \dots\}.$$

Die Folge $\{1 + n^2 + (-1)^n\}_{n=0}^\infty$ ist keine Teilfolge von $\{n\}_{n=0}^\infty$, denn in

$$\{1 + n^2 + (-1)^n\}_{n=0}^\infty = \{2, 1, 6, 9, 18, \dots\}$$

stehen 2 und 1 falsch herum. ■

Lemma 5.2 Sei $\{x_n\}_{n=0}^\infty$ eine wachsende und beschränkte Folge in \mathbb{R} . Dann gibt es ein kleinstes $x \in \mathbb{R}$ mit $x_n \leq x$ für alle $n \in \mathbb{N}$.

Bemerkung 5.2.1 Wir schreiben in dem Fall, dass $x_n \uparrow x$ für $n \rightarrow \infty$ oder einfach nur $x_n \uparrow x$. Es gilt übrigens, dass $x = \sup \{x_n; n \in \mathbb{N}\}$.

Bemerkung 5.2.2 Für eine fallende beschränkte Folge $\{x_n\}_{n=0}^\infty$ schreiben wir $x_n \downarrow x$, wenn $-x_n \uparrow -x$. Also x ist hier die größte untere Schranke.

Beweis. Entweder a) gibt es eine streng wachsende Teilfolge $\{x_{n_k}\}_{k=0}^\infty$ oder b) x_n ist konstant für n genügend groß, sagen wir für $n \geq N$. Im zweiten Fall nimmt man $x = x_N \in \mathbb{R}$. Betrachten wir nun den ersten Fall und schreiben $y_k = x_{n_k}$. Weil $y_k \in \mathbb{R}$, gibt es $q_{k,m} \in \mathbb{Q}$ mit $q_{k,m} \uparrow y_k$ für $m \rightarrow \infty$. Weil $y_0 < y_1$ gibt es m_1 mit $y_0 < q_{1,m_1} \leq y_1$; weil $y_1 < y_2$ gibt es m_2 mit $q_{1,m_1} \leq y_1 < q_{2,m_2} \leq y_2$ usw. Das heißt, wir finden eine wachsende Folge

$$q_{1,m_1} \leq q_{2,m_2} \leq q_{3,m_3} \leq \dots$$

und weil $\{x_n\}_{n=0}^\infty$ beschränkt ist, ist auch $\{q_{n,m_n}\}_{n=0}^\infty$ beschränkt. Dies bedeutet, dass die Folge rationaler Zahlen $\{q_{n,m_n}\}_{n=0}^\infty$ zu einem Element von \mathbb{R} führt. Nennen wir dieses Element x . Es gilt $q_{n,m_n} \uparrow x$. Weil $x_k \leq x_{n_k} = y_k \leq q_{k+1,m_{k+1}}$ folgt $x_k \leq x$ für alle $k \in \mathbb{N}$. Wenn $\tilde{x} < x$ gilt, gibt es $x_{n_k} = y_k \geq q_{k,m_k} > \tilde{x}$. Das heißt, x ist das kleinste. ■

5.1.2 Cauchy-Folgen sind konvergente Folgen

Wir haben schon definiert, was eine konvergente Folge in \mathbb{R} ist:

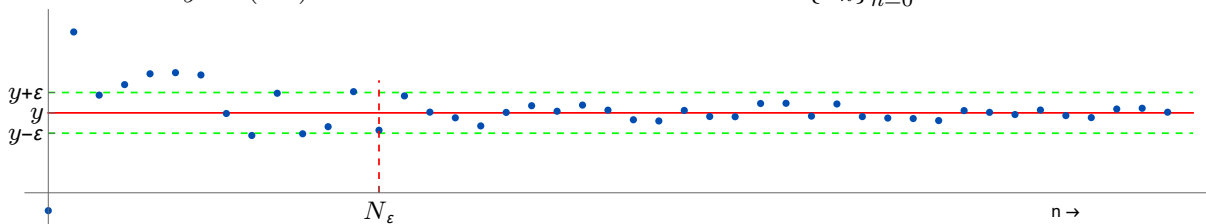
Definition (Def. 2.18) Eine Folge $\{x_n\}_{n=0}^\infty$ in \mathbb{R} heißt **konvergent**, wenn es $y \in \mathbb{R}$ gibt derart, dass

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N_\varepsilon \in \mathbb{N} \forall n \in \mathbb{N} : n > N_\varepsilon \implies |x_n - y| < \varepsilon, \quad (5.1)$$

und man schreibt

$$\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = y. \quad (5.2)$$

Die Zahl y in (5.2) heißt **Grenzwert** oder **Limes** von $\{x_n\}_{n=0}^{\infty}$.



Konvergenz in \mathbb{R} kann man sich wie hier oben vorstellen: Für jedes $\varepsilon > 0$ gibt es $N_\varepsilon \in \mathbb{N}$, derart, dass wenn man mit n an N_ε vorbei ist, dann liegen die zugehörigen a_n innerhalb einer Bandbreite ε von dem Limes.

Definition 5.3 Eine Folge, die nicht konvergent ist, nennt man **divergent**.

Beispiel 5.2. Die Folge $\left\{\frac{1}{n+1}\right\}_{n \in \mathbb{N}}$ ist konvergent, und zwar nach 0. Das zeigt man wie folgt: Sei $\varepsilon > 0$. Man wählt für N_ε die kleinste natürliche Zahl oberhalb $\frac{1}{\varepsilon} - 1$, und es folgt für $n > N_\varepsilon$, dass

$$\left| \frac{1}{n+1} - 0 \right| = \frac{1}{n+1} < \frac{1}{N_\varepsilon + 1} \leq \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon} - 1 + 1} = \varepsilon.$$

Also gilt $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n+1} = 0$.

Wieso hat man N_ε so gewählt? Weil man auf einem Schmierblatt mal kurz versucht hat, was man braucht um $\frac{1}{n+1} < \varepsilon$ zu bekommen:

$$\frac{1}{n+1} < \varepsilon \Leftrightarrow \frac{1}{\varepsilon} < n+1 \Leftrightarrow \frac{1}{\varepsilon} - 1 < n.$$

Wir haben schon Cauchy-Folgen in \mathbb{Q} für eine Definition von \mathbb{R} betrachtet und auch Cauchy-Folgen in \mathbb{R} definiert:

Definition (Def. 2.18) Eine Folge $\{x_n\}_{n=0}^{\infty}$ in \mathbb{R} ist eine **Cauchy-Folge**, wenn folgendes gilt:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N_\varepsilon \in \mathbb{N} \forall n, m \in \mathbb{N} : n, m > N_\varepsilon \implies |x_n - x_m| < \varepsilon. \quad (5.3)$$

Diese Cauchy-Folgen in \mathbb{R} werden wir uns nun etwas ausgiebiger anschauen.

Beispiel 5.3. Betrachte die Folge $\left\{\frac{n}{n+1}(-1)^n\right\}_{n \in \mathbb{N}}$. Schreibt man diese Folge aus, findet man

$$\left\{0, -\frac{1}{2}, \frac{2}{3}, -\frac{3}{4}, \frac{4}{5}, \dots\right\}.$$

Die ungeraden Terme scheinen nach 1 zu gehen und die geraden nach -1 . Nehmen wir zwei aufeinanderfolgende Terme, so folgt

$$\left| \frac{n}{n+1}(-1)^n - \frac{n+1}{n+2}(-1)^{n+1} \right| = |-1|^n \left| \frac{n}{n+1} + \frac{n+1}{n+2} \right| = \frac{n}{n+1} + \frac{n+1}{n+2}.$$

Für $n \geq 1$ folgt

$$\frac{n}{n+1} + \frac{n+1}{n+2} > \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1.$$

Also ist diese Folge keine Cauchy-Folge, denn für $\varepsilon = \frac{1}{2}$ liegen für jedes N rechts davon zwei (hier sogar aufeinanderfolgende) Termen in der Folge mehr als $\frac{1}{2}$ voneinander entfernt. Mit dem nächsten Ergebnis ist die Folge sofort auch nicht konvergent.

Beispiel 5.4. Wir betrachten die Folge $\{a_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ definiert durch

$$a_n = 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{6} + \frac{1}{24} + \frac{1}{120} + \cdots + \frac{1}{(n+1)!}$$

Eine genauere Definition ist $a_n = \sum_{k=0}^n \frac{1}{(k+1)!}$. Man sieht nicht so ganz leicht, wohin diese Folge konvergiert.

Es ist leichter zu zeigen, dass sie eine Cauchy-Folge ist. Wir fangen hinten in (5.3) an und nehmen ohne Einschränkung der Allgemeinheit $m > n$. Dann gilt

$$\begin{aligned} |a_n - a_m| &= \frac{1}{(n+2)!} + \frac{1}{(n+3)!} + \frac{1}{(n+4)!} + \cdots + \frac{1}{(m+1)!} \\ &= \frac{1}{(n+2)(n+1)n \cdots 2 \cdot 1} + \frac{1}{(n+3)(n+2)(n+1) \cdots 2 \cdot 1} + \frac{1}{(n+4)(n+3)(n+2) \cdots 2 \cdot 1} + \cdots + \frac{1}{(m+1)m(m-1) \cdots 2 \cdot 1} \\ &\leq \frac{1}{(n+2)(n+1)} + \frac{1}{(n+3)(n+2)} + \frac{1}{(n+4)(n+3)} + \cdots + \frac{1}{(m+1)m} \\ &= \frac{(n+2) - (n+1)}{(n+2)(n+1)} + \frac{(n+3) - (n+2)}{(n+3)(n+2)} + \frac{(n+4) - (n+3)}{(n+4)(n+3)} + \cdots + \frac{(m+1) - m}{(m+1)m} \\ &= \left(\frac{1}{n+1} - \frac{1}{n+2} \right) + \left(\frac{1}{n+2} - \frac{1}{n+3} \right) + \left(\frac{1}{n+3} - \frac{1}{n+4} \right) + \cdots + \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{m+1} \right) \\ &= \frac{1}{n+1} - \frac{1}{m+1} < \frac{1}{n+1}. \end{aligned} \tag{5.4}$$

Sei nun $\varepsilon > 0$ und nehme n_ε die kleinste natürliche Zahl größer $1/\varepsilon$. Für diese Zahl n_ε ist (5.3) erfüllt, denn für $n, m > n_\varepsilon$ gilt

$$|a_n - a_m| < \frac{1}{n_\varepsilon + 1} < \varepsilon.$$

Man darf sich jetzt noch wundern, wieso man in (5.4) so schätzt, dass es genau passt. Nach viel Üben sollte man sich nicht mehr wundern.

In den ersten Wochen haben wir schon genannt, dass Cauchy-Folgen in \mathbb{R} immer auch konvergent sind und umgekehrt. Diesmal folgt der Satz mit einem Beweis:

Theorem 5.4 Sei $\{x_n\}_{n=0}^\infty$ eine Folge reeller Zahlen.

- Wenn sie konvergent ist, dann ist sie eine Cauchy-Folge.
- Wenn sie eine Cauchy-Folge ist, dann ist sie konvergent.

Beweis Theorem 5.4: Konvergent \Rightarrow Cauchy. Sei $\varepsilon > 0$ und sei $N_\varepsilon^{\text{konv}}$ die zugehörige Zahl aus (5.1). Dann passt $N_\varepsilon^{\text{Cauchy}} := N_{\varepsilon/2}^{\text{konv}}$ für die Definition in (5.3). Denn für $n, m > N_{\varepsilon/2}^{\text{konv}}$ gilt:

$$|x_n - x_m| = |x_n - y + y - x_m| \leq |x_n - y| + |y - x_m| < \frac{1}{2}\varepsilon + \frac{1}{2}\varepsilon = \varepsilon.$$

Die Behauptung in der anderen Richtung ist schwieriger und braucht mehrere Zwischenschritte, die wir nun vorstellen.

Lemma 5.5 Jede Cauchy-Folge $\{x_n\}_{n=0}^\infty$ in \mathbb{R} ist beschränkt.

Beweis. Sei $N_1 \in \mathbb{N}$ derart, dass $|x_n - x_m| < 1$ gilt für $n, m > N_1$. Dies folgt aus der Definition von Cauchy-Folge, wenn man $\varepsilon = 1$ nimmt. Als nächstes setzen wir

$$M = \max \{|x_0|, |x_1|, |x_2|, \dots, |x_{N_1}|, |x_{N_1+1}| + 1\}.$$

Weil hier endlich viele Zahlen stehen, ist $M \in \mathbb{R}$ wohldefiniert. Für $n \in \{0, \dots, N_1\}$ gilt dann direkt, dass $|x_n| \leq M$, und für $n \geq N_1 + 1$ folgt

$$|x_n| = |x_n - x_{N_1+1} + x_{N_1+1}| \leq |x_n - x_{N_1+1}| + |x_{N_1+1}| < 1 + |x_{N_1+1}| \leq M.$$

Das heißt, dass $|x_n| \leq M$ für alle $n \in \mathbb{N}$, und bedeutet, dass die Folge durch M beschränkt ist. ■

Lemma 5.6 Jede Folge in \mathbb{R} hat eine monotone Teilfolge.

Beweis. Wenn die Folge $\{x_n\}_{n=0}^\infty$ unbeschränkt ist, dann gibt es entweder eine Teilfolge $\{x_{n_k}\}_{k=1}^\infty$ mit $x_{n_k} \uparrow \infty$ oder mit $x_{n_k} \downarrow \infty$ und wir sind fertig. Wir dürfen also annehmen, dass $\{x_n\}_{n=0}^\infty$ beschränkt ist. Dann gibt es $M \in \mathbb{N}$ mit $|x_n| \leq M$ für alle $n \in \mathbb{N}$ und existiert das Supremum für jede Teilfolge. Der Begriff Supremum findet man in Definition 2.13.

Sei $\{x_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ nun eine beschränkte Folge in \mathbb{R} . Dann gilt eine dieser beiden Aussagen:

- $\forall k \in \mathbb{N} \exists n \in \mathbb{N}$ mit $n \geq k$: $x_n \geq \sup \{x_m; m > n\}$, oder die Verneinung
- $\exists k \in \mathbb{N} \forall n \in \mathbb{N}$ mit $n \geq k$: $x_n < \sup \{x_m; m > n\}$.

Eine Skizze zu der ersten Aussage findet man in Abbildung 5.1. Die erste Aussage

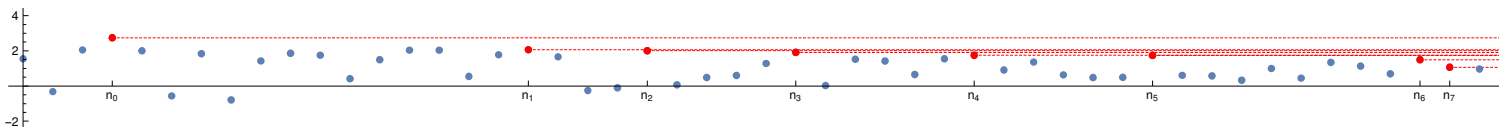


Abbildung 5.1: In grau eine Folge $\{x_n\}_{n \in \mathbb{N}}$; in rot eine fallende Teilfolge $\{x_{n_k}\}_{k \in \mathbb{N}}$ derart, dass für alle $k \geq 0$ und $n > n_k$ gilt $x_{n_k} \geq x_n$.

bedeutet, dass es eine fallende Teilfolge gibt. Nämlich für $k = 0$ existiert $n_0 \geq 0$ mit

$$x_{n_0} \geq \sup \{x_m; m > n_0\}.$$

Für $k = n_0 + 1$ existiert $n_1 \geq n_0 + 1$ mit

$$x_{n_1} \geq \sup \{x_m; m > n_1\}$$

und weil $n_1 > n_0$ gilt $x_{n_0} \geq x_{n_1}$.

Für $k = n_1 + 1$ existiert $n_2 \geq n_1 + 1$ mit

$$x_{n_2} \geq \sup \{x_m; m > n_2\}$$

und weil $n_2 > n_1$ gilt $x_{n_1} \geq x_{n_2}$. Und so weiter. Dies liefert eine fallende Teilfolge $\{x_{n_k}\}_{k \in \mathbb{N}}$.

Wenn die erste Aussage nicht gilt, dann, als Verneinung dieser Aussage, ist die zweite Aussage wahr. Diese Aussage liefert uns eine Zahl $k \in \mathbb{N}$ derart, dass

$$x_k < \sup \{x_m; m > k\}.$$

Setze $n_0 = k$. Dann gibt es einen $n_1 > n_0$ mit $x_{n_0} < x_{n_1}$. Weil $n_1 \geq k$ gilt

$$x_{n_1} < \sup \{x_m; m > n_1\},$$

und es gibt einen $n_2 > n_1$ mit $x_{n_1} < x_{n_2}$. Weil $n_2 \geq k$ gilt

$$x_{n_2} < \sup \{x_m; m > n_2\},$$

und es gibt einen $n_3 > n_2$ mit $x_{n_2} < x_{n_3}$. Und so weiter. Diese Teilfolge $\{x_{n_k}\}_{k \in \mathbb{N}}$ ist monoton wachsend. ■

Eine Cauchy-Folge hat also eine beschränkte monotone Teilfolge $\{x_{n_k}\}_{k \in \mathbb{N}}$. Für diese Teilfolge gibt es $x \in \mathbb{R}$ mit $x_{n_k} \uparrow x$, wenn sie wachsend ist, oder $-x_{n_k} \uparrow -x$, wenn sie fallend ist.

Lemma 5.7 Sei $\{x_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ eine reelle Folge mit $x_n \uparrow x \in \mathbb{R}$ oder $-x_n \uparrow -x \in \mathbb{R}$. Dann gilt $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x$.

Bemerkung 5.7.1 Man schreibt statt $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = y$ manchmal auch $x_n \rightarrow y$ für $n \rightarrow \infty$.

Beweis. Wir zeigen dies für $x_n \uparrow x \in \mathbb{R}$; $-x_n \uparrow -x \in \mathbb{R}$ ist ähnlich. Weil x die kleinste obere Schranke für $\{x_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ ist, ist $x - \varepsilon$ mit $\varepsilon > 0$ keine obere Schranke. Das bedeutet, es gibt ein $N \in \mathbb{N}$ mit $x_N > x - \varepsilon$. Weil die Folge wachsend ist und nach oben durch x beschränkt ist, gilt

$$x - \varepsilon < x_N \leq x_{N+1} \leq x_{N+2} \leq \dots \leq x$$

und für $n \geq N$ gilt $|x_n - x| < \varepsilon$. ■

Lemma 5.8 Sei $\{x_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ eine reelle Cauchy-Folge mit einer nach x konvergenten Teilfolge. Dann konvergiert $\{x_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ nach x .

Beweis. Weil $\{x_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ eine Cauchy-Folge ist, gibt es für $\varepsilon > 0$ eine Zahl $N_\varepsilon^{(1)} \in \mathbb{N}$ derart, dass

$$n, m > N_\varepsilon^{(1)} \Rightarrow |x_n - x_m| < \varepsilon.$$

Für die konvergente Teilfolge $\{x_{k_n}\}_{n \in \mathbb{N}}$ gilt

$$n > N_\varepsilon^{(2)} \Rightarrow |x_{k_n} - x| < \varepsilon.$$

Nehmen wir $N_\varepsilon = \max(N_\varepsilon^{(1)}, N_\varepsilon^{(2)})$, so folgt für $n > N_\varepsilon$, dass

$$|x_n - x| \leq |x_n - x_{k_{N_\varepsilon+1}}| + |x_{k_{N_\varepsilon+1}} - x| < \frac{1}{2}\varepsilon + \frac{1}{2}\varepsilon = \varepsilon.$$

Den ersten Term kann man abschätzen, weil $n > N_\varepsilon^{(1)}$ und $k_{N_\varepsilon+1} \geq N_\varepsilon + 1 > N_\varepsilon^{(1)}$; den zweiten Term, weil $k_{N_\varepsilon+1} \geq N_\varepsilon + 1 > N_\varepsilon^{(2)}$. ■

Beweis Theorem 5.4: Cauchy \Rightarrow konvergent. Lemma 5.5 zeigt, dass die Cauchy-Folge beschränkt ist, und Lemma 5.6, dass Sie eine monotone beschränkte Teilfolge hat.

Diese Teilfolge hat nach Lemma 5.7 einen Limes x und durch Lemma 5.8 konvergiert dann auch die Cauchy-Folge nach x . ■

Theorem 5.4 kann man auch für Folgen in \mathbb{C} beweisen. Weil es in \mathbb{C} keine vernünftige Ordnung gibt, kann man den letzten Beweis jedoch nicht direkt wiederholen. Stattdessen bemerkt man, dass man die Realteile und Imaginärteile einer Folge in \mathbb{C} als zwei Folgen in \mathbb{R} betrachten kann.

Korollar 5.9

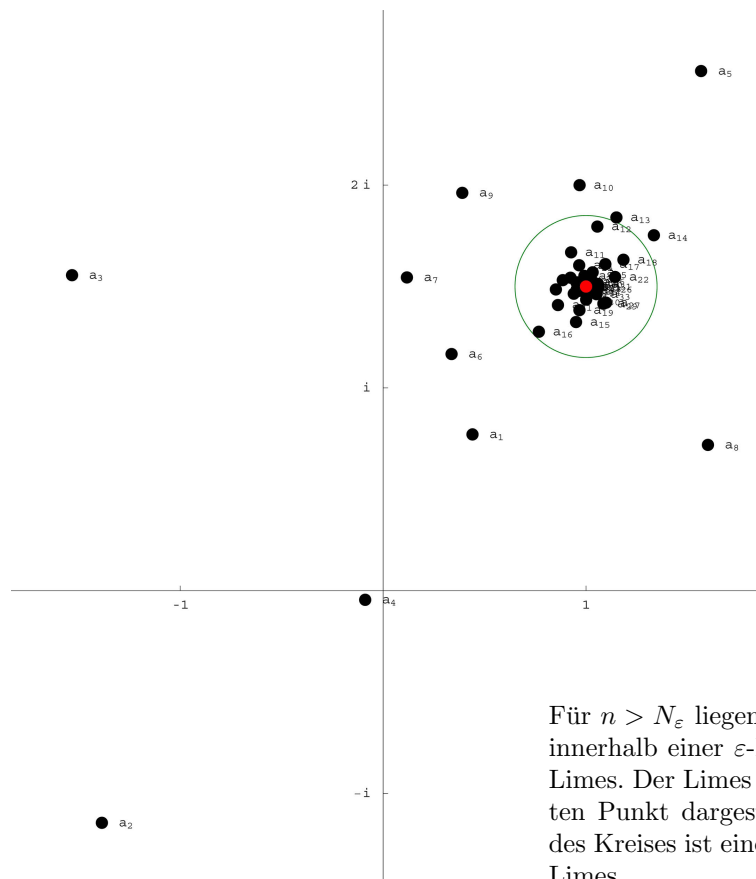
- Jede Cauchy-Folge in \mathbb{C} ist konvergent in \mathbb{C} .
- Jede konvergente Folge in \mathbb{C} ist eine Cauchy-Folge in \mathbb{C} .

Beweis. Man braucht eigentlich nur zu bemerken, dass

$$|z| \leq |\operatorname{Re} z| + |\operatorname{Im} z| \quad \text{und} \quad |\operatorname{Re} z| \leq |z| \quad \text{und} \quad |\operatorname{Im} z| \leq |z|.$$

Mit Hilfe dieser Ungleichungen zeigt man:

$$\begin{aligned} \{z_n\}_{n \in \mathbb{N}} \text{ ist Cauchy in } \mathbb{C} &\Leftrightarrow \begin{cases} \{\operatorname{Re} z_n\}_{n \in \mathbb{N}} \text{ ist Cauchy in } \mathbb{R} \\ \{\operatorname{Im} z_n\}_{n \in \mathbb{N}} \text{ ist Cauchy in } \mathbb{R} \end{cases} \\ &\quad \updownarrow \\ \{z_n\}_{n \in \mathbb{N}} \text{ ist konvergent in } \mathbb{C} &\Leftrightarrow \begin{cases} \{\operatorname{Re} z_n\}_{n \in \mathbb{N}} \text{ ist konvergent in } \mathbb{R} \\ \{\operatorname{Im} z_n\}_{n \in \mathbb{N}} \text{ ist konvergent in } \mathbb{R} \end{cases} \end{aligned}$$



Für $n > N_\varepsilon$ liegen die (komplexen) a_n innerhalb einer ε -Entfernung von dem Limes. Der Limes wird durch einen roten Punkt dargestellt und das Innere des Kreises ist eine ε -Umgebung dieses Limes.

5.1.3 Rechenregeln

Wir bringen hier die wichtigsten Rechenregeln für den Limes.

Lemma 5.10 Seien $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ und $\{b_n\}_{n=0}^{\infty}$ konvergente Folgen in \mathbb{R} (oder \mathbb{C}) und $c \in \mathbb{R}$ (oder \mathbb{C}). Dann gilt:

1. $\lim_{n \rightarrow \infty} ca_n = c \lim_{n \rightarrow \infty} a_n$;
2. $\lim_{n \rightarrow \infty} (a_n + b_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n + \lim_{n \rightarrow \infty} b_n$;
3. $\lim_{n \rightarrow \infty} (a_n b_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n \lim_{n \rightarrow \infty} b_n$;
4. $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = \frac{\lim_{n \rightarrow \infty} a_n}{\lim_{n \rightarrow \infty} b_n}$ wenn $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n \neq 0$;
5. $\lim_{n \rightarrow \infty} |a_n| = \left| \lim_{n \rightarrow \infty} a_n \right|$;
6. $\lim_{n \rightarrow \infty} \operatorname{Re}(a_n) = \operatorname{Re}\left(\lim_{n \rightarrow \infty} a_n\right)$ und $\lim_{n \rightarrow \infty} \operatorname{Im}(a_n) = \operatorname{Im}\left(\lim_{n \rightarrow \infty} a_n\right)$.

Bemerkung 5.10.1 Zu 4 soll man folgendes bemerken: Wenn $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n \neq 0$, dann gibt es N derart, dass für $n > N$ folgt $b_n \neq 0$. Für diese n ist a_n/b_n wohldefiniert.

Bemerkung 5.10.2 Wenn man $\lim_{n \rightarrow \infty} \operatorname{Arg}(a_n)$ und $\operatorname{Arg}\left(\lim_{n \rightarrow \infty} a_n\right)$ vergleicht, findet man nicht immer den gleichen Grenzwert. Betrachte $a_n = 1 - \frac{i}{n}$:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \operatorname{Arg}\left(1 - \frac{i}{n}\right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(2\pi - \arctan\left(\frac{1}{n}\right)\right) = 2\pi,$$

$$\operatorname{Arg}\left(\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{i}{n}\right)\right) = \operatorname{Arg}(1) = 0.$$

Bemerkung 5.10.3 Man kann auch reelle Folgen wie $\{n\}_{n=0}^{\infty}$ betrachten. Für eine solche Folge möchte man $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \infty$ schreiben. Das heißt dann, der Limes existiert nicht (oder existiert nur im uneigentlichen Sinne), und es gibt für jedes $M \in \mathbb{N}$ eine Zahl $N_M \in \mathbb{N}$, so dass $a_n > M$ wenn $n > N_M$.

Ähnlich kann man $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = -\infty$ definieren. Die Rechenregeln, die hier oben stehen, gelten im allgemeinen nicht. Es gilt jedoch:

1. Wenn $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \infty$ und $c > 0$, dann $\lim_{n \rightarrow \infty} ca_n = \infty$.
2. Wenn $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \infty$ und $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = \infty$, dann $\lim_{n \rightarrow \infty} (a_n + b_n) = \infty$.
3. Wenn $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \infty$ und $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = c \in \mathbb{R}$, dann $\lim_{n \rightarrow \infty} (a_n + b_n) = \infty$.
4. Wenn $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \infty$ und $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = \infty$, dann $\lim_{n \rightarrow \infty} (a_n b_n) = \infty$.
5. Wenn $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \infty$ und $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = c \in \mathbb{R}^+$, dann $\lim_{n \rightarrow \infty} (a_n b_n) = \infty$.

Einen Beweis dieser Behauptungen dürfen Sie sich selber ausdenken.

Übrigens, wenn $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \infty$ und $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = -\infty$, dann kann man so allgemein nichts sagen zu $\lim_{n \rightarrow \infty} (a_n + b_n)$. Auch aus $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \infty$ und $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = 0$ kann man noch nichts folgern für $\lim_{n \rightarrow \infty} (a_n b_n)$.

Beweis von Lemma 5.10. Nennen wir $a = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n$ und $b = \lim_{n \rightarrow \infty} b_n$.

1. Sei $\varepsilon > 0$. Dann gibt es $N_{\varepsilon/(1+|c|)} \in \mathbb{N}$, so dass $|a_n - a| < \varepsilon/(1+|c|)$ für $n > N_{\varepsilon/(1+|c|)}$. Es folgt, dass für $n > N_{\varepsilon/(1+|c|)}$

$$|ca_n - ca| = |c| |a_n - a| \leq |c| \frac{\varepsilon}{(1+|c|)} < \varepsilon.$$

Man könnte sich fragen, warum wir $\varepsilon/(1+|c|)$ statt $\varepsilon/|c|$ verwenden. Eigentlich sollte $\varepsilon/|c|$ doch reichen? Jein! Für $c \neq 0$ klappt es, aber den Fall $c = 0$ müssen wir dann getrennt behandeln, weil da $\varepsilon/|c|$ nicht definiert ist.

2. Sei $\varepsilon > 0$. Dann müssen wir zeigen, dass es $N_\varepsilon \in \mathbb{N}$ gibt, so dass gilt

$$|(a_n + b_n) - (a + b)| < \varepsilon \text{ für } n > N_\varepsilon.$$

Weil $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$ gilt, gibt es $N_{\varepsilon/2}^a \in \mathbb{N}$, so dass $|a_n - a| < \varepsilon/2$ für $n > N_{\varepsilon/2}^a$. Ebenso gibt es $N_{\varepsilon/2}^b \in \mathbb{N}$, so dass $|b_n - b| < \varepsilon/2$ für $n > N_{\varepsilon/2}^b$. Setzen wir $N_\varepsilon = \max(N_{\varepsilon/2}^a, N_{\varepsilon/2}^b)$, dann folgt für $n > N_\varepsilon$:

$$|(a_n + b_n) - (a + b)| \leq |a_n - a| + |b_n - b| < \frac{1}{2}\varepsilon + \frac{1}{2}\varepsilon = \varepsilon.$$

3. Sei $\varepsilon > 0$. Setze $\varepsilon_1 = \frac{1}{2|b|+2}\varepsilon$ und $\varepsilon_2 = \min\left(\frac{1}{2|a|+2}\varepsilon, 1\right)$. Es gibt $N_{\varepsilon_1}^a \in \mathbb{N}$ so, dass $|a_n - a| < \varepsilon_1$ für $n > N_{\varepsilon_1}^a$ und $N_{\varepsilon_2}^b \in \mathbb{N}$ so, dass $|b_n - b| < \varepsilon_2$ für $n > N_{\varepsilon_2}^b$. Für $n > N_\varepsilon = \max(N_{\varepsilon_1}^a, N_{\varepsilon_2}^b)$ haben wir $|b_n - b| < \varepsilon_2 \leq 1$, also auch $|b_n| \leq |b_n - b| + |b| \leq |b| + 1$, und

$$\begin{aligned} |(a_n b_n) - (ab)| &= |a_n b_n - ab_n + ab_n - ab| \leq |a_n b_n - ab_n| + |ab_n - ab| = \\ &\leq |a_n - a| |b_n| + |a| |b_n - b| \leq \\ &\leq (|b| + 1) |a_n - a| + |a| |b_n - b| < \\ &< (|b| + 1) \frac{\varepsilon}{2|b| + 2} + |a| \frac{\varepsilon}{2|a| + 2} \leq \\ &\leq \frac{1}{2}\varepsilon + \frac{1}{2}\varepsilon = \varepsilon. \end{aligned}$$

4. Sei $\varepsilon > 0$. Nehmen wir¹ $\varepsilon_1 = \min\left(\frac{1}{2}|b|\varepsilon, 1\right)$ und $\varepsilon_2 = \min\left(\frac{1}{4}\frac{|b|^2}{|a|+1}\varepsilon, \frac{1}{2}|b|\right)$. Dann gibt es $N_{\varepsilon_1}^a, N_{\varepsilon_2}^b \in \mathbb{N}$ so, dass $|a_n - a| < \varepsilon_1$ für $n > N_{\varepsilon_1}^a$ und $|b_n - b| < \varepsilon_2$ für $n > N_{\varepsilon_2}^b$. Also gilt auch $|a_n| \leq |a_n - a| + |a| \leq 1 + |a|$ für $n > N_{\varepsilon_1}^a$ und $|b_n| \geq |b| - |b - b_n| \geq |b| - \frac{1}{2}|b| = \frac{1}{2}|b|$

¹Frage: Wieso diese eigenartigen ε_1 und ε_2 ? Antwort: Weil es damit klappt. Frage: Wieso klappt es denn mit diesen Zahlen? Antwort: Weil man erst das Ende berechnet und dann im Rückwärtsgang anschaut, was man dazu braucht.

für $n > N_{\varepsilon_1}^b$. Damit zeigt sich, dass für $n > N_\varepsilon := \max(N_{\varepsilon_1}^a, N_{\varepsilon_2}^b)$ gilt

$$\begin{aligned} \left| \frac{a_n}{b_n} - \frac{a}{b} \right| &= \left| \frac{a_n}{b_n} - \frac{a_n}{b} + \frac{a_n}{b} - \frac{a}{b} \right| \leq \left| \frac{a_n}{b_n} - \frac{a_n}{b} \right| + \left| \frac{a_n}{b} - \frac{a}{b} \right| \leq \\ &\leq \frac{|a_n|}{|b| |b_n|} |b - b_n| + \frac{1}{|b|} |a_n - a| \leq \\ &\leq \frac{|a| + 1}{\frac{1}{2}|b|^2} |b - b_n| + \frac{1}{|b|} |a_n - a| < \\ &< \frac{|a| + 1}{\frac{1}{2}|b|^2} \varepsilon_2 + \frac{1}{|b|} \varepsilon_1 \leq \frac{1}{2} \varepsilon + \frac{1}{2} \varepsilon = \varepsilon. \end{aligned}$$

5. Weil die Dreiecksungleichung impliziert, dass

$$-|a_n - a| \leq |a_n| - |a| \leq |a_n - a|,$$

gilt, folgt $||a_n| - |a|| \leq |a_n - a|$ und wir können zu jedem $\varepsilon > 0$ für die Folge $\{|a_n|\}_{n=0}^\infty$ das N_ε für $\{a_n\}_{n=0}^\infty$ wählen.

6. Weil $|\operatorname{Re} a_n - \operatorname{Re} a| \leq |a_n - a|$ folgt die letzte Aussage auf ähnliche Art. ■

5.1.4 Das Einschließungslemma.

Lemma 5.11 (Einschließungslemma) Wenn $\{a_n\}_{n=0}^\infty$, $\{b_n\}_{n=0}^\infty$ und $\{c_n\}_{n=0}^\infty$ drei reelle Folgen sind, wobei

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \ell = \lim_{n \rightarrow \infty} c_n \text{ und } \forall n \in \mathbb{N} : a_n \leq b_n \leq c_n,$$

dann gilt $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = \ell$.

Bemerkung 5.11.1 Das Lemma ist auch bekannt als das Lemma der Räuber und Gendarmen. Auf Englisch heißt es das Sandwichlemma.

Beweis. Sei $\varepsilon > 0$. Dann gibt es $N_\varepsilon^a, N_\varepsilon^c \in \mathbb{N}$, so dass $|a_n - \ell| < \varepsilon$ für $n > N_\varepsilon^a$ und $|c_n - \ell| < \varepsilon$ für $n > N_\varepsilon^c$. Für $n > \max(N_\varepsilon^a, N_\varepsilon^c)$ gilt

$$b_n - \ell \geq a_n - \ell \geq -|a_n - \ell| > -\varepsilon \text{ und } b_n - \ell \leq c_n - \ell \leq |c_n - \ell| < \varepsilon,$$

also $|b_n - \ell| < \varepsilon$ für $n > N_\varepsilon^b := \max(N_\varepsilon^a, N_\varepsilon^c)$. ■

Beispiel 5.5. Wir wollen $\lim_{n \rightarrow \infty} n^2 2^{-n}$ bestimmen.

Wir setzen $a_n = n^2 2^{-n}$, bemerken $a_n > 0$ und betrachten a_{n+1}/a_n . Es gilt

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

und für $n \geq 10$ folgt

$$\frac{a_{n+1}}{a_n} \leq \frac{1.1^2}{2} = 0.605 \leq 0.7,$$

also $a_{n+1} \leq 0.7 a_n$. Daraus folgt, dass für $n \geq 10$ gilt

$$0 \leq a_n \leq (0.7)^{n-10} a_{10}.$$

Weil $\lim_{n \rightarrow \infty} 0 = 0 = \lim_{n \rightarrow \infty} (0.7)^{n-10} a_{10}$ gilt, folgt mit dem Einschließungslemma, dass

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n^2 2^{-n} = 0.$$

Dies wäre ein Fall von: „Potenzen gewinnen von Polynomen“. Bei Lemma 6.13 beweisen wir allgemein, dass

$$\text{für } k \in \mathbb{N}^+ \text{ und } s > 1 \text{ gilt } \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^k}{s^n} = 0.$$

Eine Beweisidee für diese Behauptung findet man schon, wenn man das letzte Beispiel betrachtet.

Lemma 5.12 *Einige sonstige Standardgrenzwerte.*

- Sei $s \in \mathbb{R}$. Dann gilt $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{s^n}{n!} = 0$.
- Es gilt $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n!}{n^n} = 0$.

Beweis. Für die erste Behauptung fixiert man $N > |s|$ und bemerkt, dass für alle $n > N$ folgendes gilt:

$$0 \leq \left| \frac{s^n}{n!} \right| \leq \frac{N^n}{n!} \leq \frac{N^N}{N!} \frac{N}{N+1} \cdots \frac{N}{n-1} \frac{N}{n} \leq \frac{N^N}{N!} 1 \cdots 1 \frac{N}{n} = \frac{N^{N+1}}{N!} \frac{1}{n}.$$

Für die zweite Behauptung bemerke man, dass für $n \geq 1$ folgt

$$0 \leq \frac{n!}{n^n} = \frac{n}{n} \frac{n-1}{n} \cdots \frac{2}{n} \frac{1}{n} \leq \frac{1}{n}.$$

Das Einschließungslemma liefert das Ergebnis. ■

5.2 Analytische Fundamente

5.2.1 Maximum, Minimum, Supremum und Infimum

Notation 5.13 *Man definiert für $a, b \in \mathbb{R}$ das Maximum beziehungsweise das Minimum wie folgt*

$$\max(a, b) := \begin{cases} b & \text{falls } a \leq b, \\ a & \text{falls } a > b, \end{cases} \quad \text{und} \quad \min(a, b) := \begin{cases} a & \text{falls } a \leq b, \\ b & \text{falls } a > b. \end{cases} \quad (5.5)$$

Für mehr als zwei Termen wird Maximum und Minimum wie folgt definiert:

Definition 5.14 *Sei $A \subset \mathbb{R}$.*

1. Wenn es $a \in A$ gibt mit $x \leq a$ für alle $x \in A$, dann heißt a das **Maximum** von A .
2. Wenn es $a \in A$ gibt mit $x \geq a$ für alle $x \in A$, dann heißt a das **Minimum** von A .

Bemerkung 5.14.1 Für endlich viele Terme, das heißt $A = \{a_1, \dots, a_n\}$, kann man das Maximum (und auch das Minimum) iterativ definieren. Für zwei Terme nimmt man (5.5) und man setzt anschließend für $n \geq 2$:

$$\max(a_1, \dots, a_n, a_{n+1}) := \max(\max(a_1, \dots, a_n), a_{n+1}).$$

Wenn A mehr als endlich viele Elemente hat, hat man nicht unbedingt ein Maximum.

- Zum Beispiel hat $A = \{\frac{n+1}{n+2}; n \in \mathbb{N}\}$ kein Maximum, denn $\frac{n+1}{n+2} < 1$ und kleiner als 1 kann ein Maximum nicht sein, denn für jede Zahl $a < 1$ gibt es ein $n \in \mathbb{N}$ mit $\frac{n+1}{n+2} > a$.
- Auch $B = \{\sin(n); n \in \mathbb{N}\}$ hat kein Maximum. Wenn B ein Maximum hätte, dann wäre π eine rationale Zahl.
- Die Menge $C = \{\cos(n); n \in \mathbb{N}\}$ hat jedoch ein Maximum, denn $\cos(n) \leq \cos(0) = 1$.

Das Maximum einer Menge muss in der Menge liegen. Allgemeiner ist der folgende Begriff Supremum. Das Supremum hatten wir übrigens schon definiert für beschränkte Mengen in \mathbb{R} auf Seite 21.

Definition 5.15 Sei $A \subset \mathbb{R}$.

1. Das **Supremum** von A ist definiert durch

$$\sup A = \text{die kleinste obere Schranke für } A.$$

Wenn A nicht nach oben beschränkt ist, dann setzt man $\sup A = \infty$ (also $\sup A$ existiert nicht als eine reelle Zahl und nur, wie man sagt, im uneigentlichen Sinne). Wenn $A = \emptyset$, dann setzt man $\sup A = -\infty$ (auch hier keine reelle Zahl).

2. Das **Infimum** von A ist definiert durch

$$\inf A = \text{die größte untere Schranke für } A$$

und ähnlich wie oben wird ∞ und $-\infty$ verwendet.

Setzt man $-A := \{-x; x \in A\}$, so gilt $\inf A = -\sup(-A)$.

Beispiel 5.6. Für $A = \{x \in \mathbb{Q}; x^2 < 2\}$ gilt $\sup A = \sqrt{2}$ und $\inf A = -\sqrt{2}$.
Für $B = \{\frac{1}{n}; n \in \mathbb{N}^+\}$ gilt $\sup B = 1$ und $\inf B = 0$.

Bemerkung 5.15.1 Wenn also A ein Maximum hat, dann gilt $\sup A = \max A$. Eine beschränkte Menge hat nicht unbedingt ein Maximum. Die Vollständigkeit von \mathbb{R} impliziert, dass jede beschränkte Menge in \mathbb{R} ein Supremum und ein Infimum in \mathbb{R} hat.

Bemerkung 5.15.2 Übrigens heißt eine Menge $A \subset \mathbb{C}$ (oder \mathbb{R}) beschränkt, wenn es $R \in \mathbb{R}^+$ gibt, so dass für alle $a \in A$ gilt $|a| < R$.

5.2.2 Limes Superior und Limes Inferior

Definition 5.16 Sei $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ eine reelle Folge.

1. Der **Limes Superior** von $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ ist definiert durch

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sup_{k \geq n} a_k \right).$$

2. Der **Limes Inferior** von $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ ist definiert durch

$$\liminf_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\inf_{k \geq n} a_k \right).$$

Bemerkung 5.16.1 Wenn $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ nicht nach oben beschränkt ist, sagt man

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} a_n = \infty$$

im **uneigentlichen** Sinne. Das heißt, $\limsup_{n \rightarrow \infty} a_n$ existiert nicht als Zahl. Ähnliches kann man beim Limes Inferior finden.

Beispiel 5.7. Betrachte die Folge $\{(-1)^n \frac{n+2}{n+1}\}_{n \in \mathbb{N}}$. Setzt man

$$a_n = (-1)^n \frac{n+2}{n+1} \text{ und } b_n = \sup_{k \geq n} a_k,$$

dann werden die Terme wie folgt aufgelistet:

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	...		
a_n	2	$-\frac{3}{2}$	$\frac{4}{3}$	$-\frac{5}{4}$	$\frac{6}{5}$	$-\frac{7}{6}$	$\frac{8}{7}$	$-\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$...		
b_n	2	$\frac{4}{3}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{6}{5}$	$\frac{6}{5}$	$\frac{8}{7}$	$\frac{8}{7}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{10}{9}$...		

Es folgt, dass

$$b_n = \begin{cases} \frac{n+2}{n+1} & \text{für } n \text{ gerade,} \\ \frac{n-1+2}{n-1+1} & \text{für } n \text{ ungerade,} \end{cases}$$

und weil $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n+2}{n+1} = 1 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n-1+2}{n-1+1}$ gilt, folgt

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} b_n = 1.$$

Lemma 5.17 Sei $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ eine beschränkte reelle Folge. Dann existiert $\limsup_{n \rightarrow \infty} a_n$ in \mathbb{R} .

Beweis. Weil auch $\{a_n\}_{n=k}^{\infty}$ beschränkt ist, existiert $\sup_{k \geq n} a_k$ in \mathbb{R} . Weil

$$\sup_{k \geq n+1} a_k \leq \sup_{k \geq n} a_k$$

ist $\{b_n\}_{n=0}^{\infty}$ mit $b_n = \sup_{k \geq n} a_k$ eine fallende beschränkte Folge. Eine fallende beschränkte reelle Folge hat einen Grenzwert in \mathbb{R} : $b = \lim_{n \rightarrow \infty} b_n$ existiert. ■

Beispiel 5.8. Für $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ mit $a_n = \frac{(-1)^n n}{n+1}$ gilt

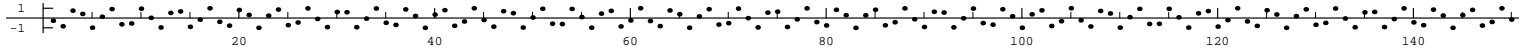
$$\limsup_{n \rightarrow \infty} a_n = 1 \text{ und } \liminf_{n \rightarrow \infty} a_n = -1.$$

Wir können vermuten, dass auch für $\{b_n\}_{n=0}^{\infty}$ mit $b_n = \operatorname{Re} \left(\left(\frac{3}{5} + \frac{4}{5}i \right)^{2n} \right)$ gilt

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} b_n = 1 \text{ und } \liminf_{n \rightarrow \infty} b_n = -1.$$

Dies zu beweisen ist jedoch nicht so einfach.

Hier steht eine Skizze von $\{(n, b_n); n \in \mathbb{N}\}$:



Die Notation verführt dazu, mit dem Limes Superior und dem Limes Inferior zu rechnen wie mit dem Limes. Leider ist eine solche Annahme falsch. Einige Regeln, die gelten, stehen im folgenden Lemma:

Lemma 5.18 Wenn $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ und $\{b_n\}_{n=0}^{\infty}$ reelle Folgen sind mit $\limsup_{n \rightarrow \infty} a_n$, $\limsup_{n \rightarrow \infty} b_n$, $\liminf_{n \rightarrow \infty} b_n \in \mathbb{R}$, dann gilt:

1. $\limsup_{n \rightarrow \infty} (a_n + b_n) \leq \limsup_{n \rightarrow \infty} a_n + \limsup_{n \rightarrow \infty} b_n$;
2. $\limsup_{n \rightarrow \infty} (a_n + b_n) \geq \limsup_{n \rightarrow \infty} a_n + \liminf_{n \rightarrow \infty} b_n$

Beweis. Die erste Behauptung folgt aus

$$\sup_{k \geq n} (a_k + b_k) \leq \sup_{k \geq n} \left(a_k + \sup_{\ell \geq n} b_\ell \right) = \sup_{k \geq n} a_k + \sup_{\ell \geq n} b_\ell$$

und Limesrechnung:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sup_{k \geq n} a_k + \sup_{\ell \geq n} b_\ell \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sup_{k \geq n} a_k + \lim_{n \rightarrow \infty} \sup_{\ell \geq n} b_\ell;$$

die zweite aus

$$\sup_{k \geq n} (a_k + b_k) \geq \sup_{k \geq n} \left(a_k + \inf_{\ell \geq n} b_\ell \right) = \sup_{k \geq n} a_k + \inf_{\ell \geq n} b_\ell$$

und eine ähnliche Limesrechnung. ■

Beispiel 5.9. Die Ungleichungen in Lemma 5.18 können strikt sein. Betrachte die Folge $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$, definiert durch $a_n = ((-1)^n - 1)n$ und $b_n = ((-1)^{n+1} - 1)n$. Die ersten Termen sind wie folgt:

$$\begin{array}{cccccccc} a_n : & 0, & -2, & 0, & -6, & 0, & -10, & 0, & -14, & 0, & \dots \\ b_n : & 0, & 0, & -4, & 0, & -8, & 0, & -12, & 0, & -16, & \dots \\ a_n + b_n : & 0, & -2, & -4, & -6, & -8, & -10, & -12, & -14, & -16, & \dots \end{array}$$

Dann hat man

$$-\infty = \limsup_{n \rightarrow \infty} (a_n + b_n) \leq \limsup_{n \rightarrow \infty} a_n + \limsup_{n \rightarrow \infty} b_n = 0 + 0 = 0.$$

Ein Beispiel, bei dem die zweite Ungleichung strikt ist, darf man selber basteln. ■

5.2.3 Häufungswert und Bolzano-Weierstrass

Definition 5.19 Sei $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ eine Folge. Dann heißt $h \in \mathbb{R}$ (oder \mathbb{C}) **Häufungswert** für diese Folge, wenn es eine Teilfolge $\{a_{n_k}\}_{k=0}^{\infty}$ gibt mit $\lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k} = h$.

Statt Häufungswert sagt man auch Häufungspunkt.

Theorem 5.20 (Bolzano-Weierstrass)

Jede beschränkte Folge in \mathbb{R} (in \mathbb{C}) hat einen Häufungswert in \mathbb{R} (in \mathbb{C}).

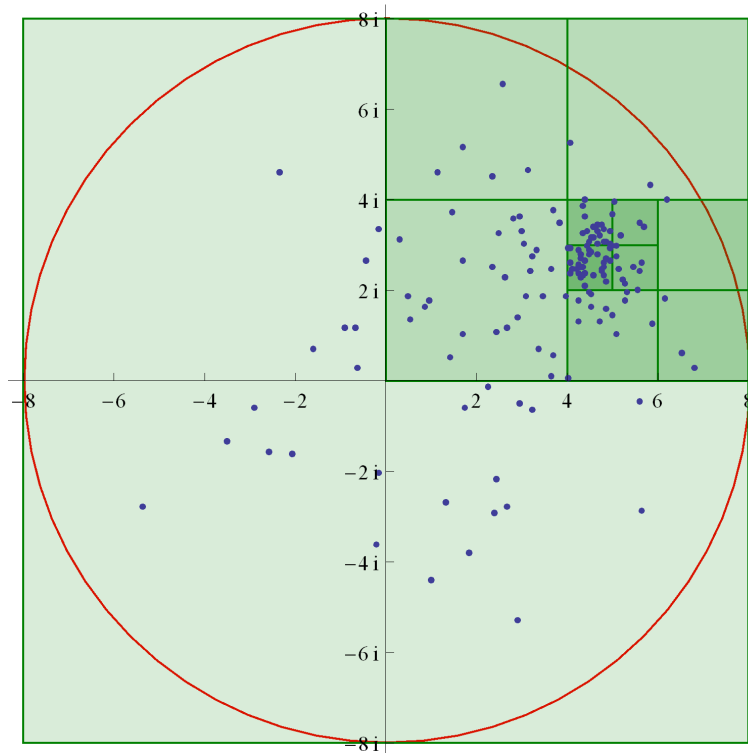


Abbildung 5.2: Skizze zu den Elementen einer komplexen Folge beschränkt durch $M = 8$ und wie man einen Häufungspunkt findet.

Beweis. Sei also $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ eine beschränkte komplexe Folge. Dann gibt es $M \in \mathbb{R}^+$ so, dass $|a_n| < M$ für alle $n \in \mathbb{N}$ und also auch $|\operatorname{Re} a_n| < M$ und $|\operatorname{Im} a_n| < M$. Wenn unendlich viele Zahlen $\{a_n\}$ in dem Quadrat

$$Q_0 = [-M, M] + i[-M, M] = \{z \in \mathbb{C}; -M \leq \operatorname{Re} z \leq M \text{ und } -M \leq \operatorname{Im} z \leq M\}$$

liegen, dann liegen auch unendlich viele Zahlen $\{a_n\}$ in einem der vier Teilquadrate mit halb so großen Längen. Nenne dieses Teilquadrat, das auch unendlich viele Zahlen $\{a_n\}$ enthält, Q_1 . Es könnte zum Beispiel $Q_1 = [0, M] + i[-M, 0]$ sein. Wir wiederholen diese Aufteilung und finden eine Folge von Quadraten:

$$Q_0 \supset Q_1 \supset Q_2 \supset Q_3 \supset \dots$$

Nehme $a_{n_0} = a_0 \in Q_0$. Dann gibt es $a_{n_1} \in Q_1$ mit $n_1 > 0$, $a_{n_2} \in Q_2$ mit $n_2 > n_1$, $a_{n_3} \in Q_3$ mit $n_3 > n_2$ usw. Wir bekommen eine Teilfolge $\{a_{n_k}\}_{k=1}^{\infty}$ mit $a_{n_k} \in Q_k$. Weil $a_{n_k}, a_{n_\ell} \in Q_{\min(k,\ell)}$ gilt, hat man

$$|a_{n_k} - a_{n_\ell}| \leq |\operatorname{Re}(a_{n_k} - a_{n_\ell})| + |\operatorname{Im}(a_{n_k} - a_{n_\ell})| \leq 4M \left(\frac{1}{2}\right)^{\min(k,\ell)}.$$

So ist die Folge $\{a_{n_k}\}_{k=1}^{\infty}$ eine Cauchy-Folge, und Cauchy-Folgen in \mathbb{C} sind konvergent. Der Limes, der zu dieser Folge $\{a_{n_k}\}_{k=1}^{\infty}$ gehört, ist ein Häufungswert für $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$. ■

Übrigens hätte man auch Lemma 5.6 benutzen können: Die Folge $\{\operatorname{Re}(a_n)\}_{n=0}^{\infty}$ ist beschränkt und hat also eine monotone Teilfolge $\{\operatorname{Re}(a_{n_k})\}_{k=0}^{\infty}$. Die Folge $\{\operatorname{Im}(a_{n_k})\}_{k=0}^{\infty}$ ist beschränkt und hat eine monotone Teilfolge $\{\operatorname{Im}(a_{n_{k_\ell}})\}_{\ell=0}^{\infty}$. Wegen Lemma 5.7 konvergiert $\{\operatorname{Im}(a_{n_{k_\ell}})\}_{\ell=0}^{\infty}$ in \mathbb{R} und auch $\{\operatorname{Re}(a_{n_{k_\ell}})\}_{\ell=0}^{\infty}$ als Teilfolge einer konvergenten Folge in \mathbb{R} . Dann konvergiert $\{a_{n_{k_\ell}}\}_{\ell=0}^{\infty}$ in \mathbb{C} .

Beispiel 5.10. Die Folge $\left\{\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}i\sqrt{3}\right)^n\right\}_{n \in \mathbb{N}}$ hat 6 Häufungspunkte, nämlich

$$\left\{1, -1, \frac{1}{2} + \frac{1}{2}i\sqrt{3}, -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}i\sqrt{3}, \frac{1}{2} - \frac{1}{2}i\sqrt{3}, -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}i\sqrt{3}\right\}.$$

Beispiel 5.11. Die Folge $\left\{\cos\left(\pi n + \frac{1}{n}\right)\right\}_{n \in \mathbb{N}}$ hat als Häufungspunkte $\{-1, 1\}$.

Beispiel 5.12. Die Folge $\left\{\cos\left(3n + \frac{1}{n}\right)\right\}_{n \in \mathbb{N}}$ hat als Häufungspunkte

$$[-1, 1] = \{x \in \mathbb{R}; -1 \leq x \leq 1\}.$$

Dies zu beweisen ist jedoch nicht einfach. ■

Lemma 5.21 Sei $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ eine reelle Folge. Dann ist $\limsup_{n \rightarrow \infty} a_n$, wenn er existiert in \mathbb{R} , der größte Häufungswert und $\liminf_{n \rightarrow \infty} a_n$, wenn er existiert in \mathbb{R} , der kleinste Häufungswert von $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$.

Beweis. Selber machen. ■

Analysis 1, Woche 6

Spezielle Funktionen und Grenzwerte



6.1 Funktionen

Funktionen oder Abbildungen sind wir schon mehrere Male begegnet. In Abschnitt 1.1.3 hat man eine Funktion wie folgt definiert:

Definition 6.1 Eine Funktion $f : A \rightarrow B$ ist eine Vorschrift, die auf eindeutige Weise zu jedem Element $a \in A$ ein Element $b \in B$ zuordnet.

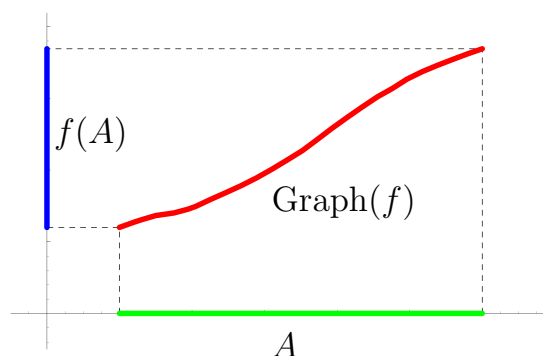
Auch Eigenschaften einer Funktion wie Surjektivität und Injektivität wurden definiert.

Notation 6.2 Sei $f : A \rightarrow B$ eine Funktion. Man nennt

1. die Menge A den **Definitionsbereich**;
2. die Menge B den **Wertebereich**;
3. die Menge $f(A) = \{f(a) \in B; \exists a \in A\}$ die **Wertemenge**;
4. die folgende Teilmenge von $A \times B$:

$$\text{Graph}(f) = \{(a, f(a)); a \in A\},$$

den **Graph** der Funktion.



Bemerkung 6.2.1 Wenn man $f(x) = x^2$ als Funktion betrachten möchte, dann reicht diese Vorschrift nicht. Man muss auch noch den Definitionsbereich angeben. Einige Beispiele:

1. Die Funktion $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}_0^+$ mit $f(x) = x^2$ ist surjektiv aber nicht injektiv.
2. Die Funktion $f : \mathbb{R}_0^+ \rightarrow \mathbb{R}$ mit $f(x) = x^2$ ist nicht surjektiv aber injektiv.
3. Die Funktion $f : \mathbb{R}_0^+ \rightarrow \mathbb{R}_0^+$ mit $f(x) = x^2$ ist surjektiv und injektiv, also auch bijektiv.
4. Die Funktion $f : \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{N}$ mit $f(x) = x^2$ ist nicht surjektiv und nicht injektiv.

NB $\mathbb{R}^+ = (0, \infty)$ und $\mathbb{R}_0^+ = [0, \infty)$.

Bemerkung 6.2.2 Manchmal wird statt B auch $f(A)$ als Wertebereich gehandelt und man nennt $f(A)$ das Bild von A .

6.2 Nochmals Polynome

Ein Polynom

$$p(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + a_{n-2} x^{n-2} + \dots + a_1 x + a_0 \quad (6.1)$$

kann man betrachten als Funktion von \mathbb{R} nach \mathbb{R} oder von \mathbb{C} nach \mathbb{C} . Es ist sogar möglich p als Funktion auf die Menge der $k \times k$ -Matrizen zu betrachten.

Lemma 6.3 Sei p ein Polynom von Grad $n \geq 1$.

1. Dann ist $p : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ surjektiv.
2. $p : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ ist injektiv, dann und nur dann, wenn $n = 1$.

Bemerkung 6.3.1 Für $p : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ kann man eine solche Aussage nicht machen. Zum Beispiel $p(x) = x^2$ als Funktion von \mathbb{R} nach \mathbb{R} ist nicht surjektiv. Und $p(x) = x^3$, als Funktion von \mathbb{R} nach \mathbb{R} , ist injektiv und hat Grad 3.

Beweis. 1. Sei $w \in \mathbb{C}$ und betrachte $p(z) - w = 0$. Dann ist $p(z) - w$ auch ein Polynom von Grad n und der Fundamentalsatz der Algebra besagt, dass er eine Nullstelle in \mathbb{C} hat. Anders gesagt, es gibt $z \in \mathbb{C}$ mit $p(z) = w$.

2. (\Leftarrow) Wenn p von Grad 1 ist, also $p(z) = a_1 z + a_0$ mit $a_1 \neq 0$, dann ist $a_1 z + a_0 = w$ für jede $w \in \mathbb{C}$ eindeutig lösbar.

2. (\Rightarrow) Sei p ein Polynom von Grad $n > 1$. Als Folgerung dieses Fundamentalsatzes gibt es $z_1, \dots, z_n \in \mathbb{C}$ so, dass

$$p(z) = a_n (z - z_1)(z - z_2) \dots (z - z_n).$$

Wenn nicht alle z_i gleich sind, dann hat p zwei verschiedene Nullstellen, das heißt $p(z_i) = p(z_j) = 0$ für $z_i \neq z_j$ und p ist nicht injektiv. Wenn alle z_i gleich sind, dann gilt

$$p(z) = a_n (z - z_1)^n.$$

Für dieses Polynom hat $p(z) = a_n$ zum Beispiel genau n unterschiedliche Lösungen, nämlich

$$z = z_1 + \cos\left(\frac{k}{n}2\pi\right) + i \sin\left(\frac{k}{n}2\pi\right)$$

mit $k \in \{0, \dots, n-1\}$, und p ist wiederum nicht injektiv. ■

Lemma 6.4 Angenommen, $z_0, z_1, \dots, z_n \in \mathbb{C}$ sind alle verschieden. Schreiben wir Polynome wie in (6.1), dann gilt folgendes:

1. Es gibt genau ein Polynom n -ten Grades mit $a_n = 1$, das z_1, z_2, \dots, z_n als Nullstellen hat.
2. Es gibt genau ein Polynom n -ten Grades mit $p(z_0) = 1$, das z_1, z_2, \dots, z_n als Nullstellen hat.

In beiden Fällen gilt: Wenn $z_0, z_1, \dots, z_n \in \mathbb{R}$, dann hat man $a_0, a_1, \dots, a_n \in \mathbb{R}$.

Beweis. Aus Lemma 4.2 folgt, dass wenn p die Nullstelle z_1 hat, es ein Polynom q von Grad $n - 1$ gibt so, dass $p(z) = (z - z_1)q(z)$. Man hat auch $q(z_i) = p(z_i)/(z_i - z_1) = 0$ für $i > 1$. Eine wiederholte Anwendung ergibt, dass

$$p(z) = (z - z_1) \dots (z - z_n) \tilde{q} \quad (6.2)$$

mit $\tilde{q} \in \mathbb{C} \setminus \{0\}$.

1. Weil $\tilde{q} = a_n$ gilt und $a_n = 1$ gelten soll, hat man

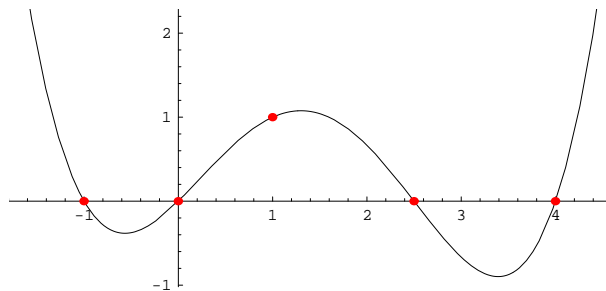
$$p(z) = (z - z_1) \dots (z - z_n). \quad (6.3)$$

als einzige Möglichkeit.

2. Für p in (6.2) gilt $p(z_0) = 1$ genau dann, wenn $(z_0 - z_1)(z_0 - z_2) \dots (z_0 - z_n) \tilde{q} = 1$. Die einzige Möglichkeit ist

$$p(z) = \frac{(z - z_1)(z - z_2) \dots (z - z_n)}{(z_0 - z_1)(z_0 - z_2) \dots (z_0 - z_n)}. \quad (6.4)$$

Sowohl p in (6.3) als auch in (6.4) kann man wieder in der Form (6.1) schreiben. Man sieht sofort, dass $z_0, \dots, z_n \in \mathbb{R}$ impliziert, dass die Koeffizienten a_0, \dots, a_n von sowohl (6.3) als auch von (6.4) reell sind. ■



Eine Skizze vom Graphen des Polynoms p von Grad 4 mit $p(-1) = p(0) = p(\frac{5}{2}) = p(4) = 0$ und $p(1) = 1$.

Korollar 6.5 Angenommen, z_0, z_1, \dots, z_n sind $n + 1$ unterschiedliche, reelle (oder komplexe) Zahlen. Für die reellen (oder komplexen) Zahlen f_0, f_1, \dots, f_n gibt es ein Polynom p mit höchstens Grad n so, dass $p(z_i) = f_i$ für $i = 0, 1, \dots, n$.

Beweis. Man nehme

$$p(z) = \sum_{i=0}^n \left(\prod_{\substack{0 \leq j \leq n \\ j \neq i}} \frac{z - z_j}{z_i - z_j} \right) f_i. \quad (6.5)$$

Es folgt, dass $p(z_k) = \sum_{i=0}^n \left(\prod_{\substack{0 \leq j \leq n \\ j \neq i}} \frac{z_k - z_j}{z_i - z_j} \right) f_i = \left(\prod_{\substack{0 \leq j \leq n \\ j \neq k}} \frac{z_k - z_j}{z_k - z_j} \right) f_k = f_k$. ■

Bemerkung 6.5.1 Man nennt (6.5) die Lagrangesche Interpolationsformel.

6.3 Rationale Funktionen

Definition 6.6 Eine **rationale Funktion** f besteht aus dem Quotienten zweier Polynome, sagen wir p und q . Wenn q die Nullstellen z_1, \dots, z_k hat, dann heißt das:

$$f : \mathbb{C} \setminus \{z_1, \dots, z_k\} \rightarrow \mathbb{C} \text{ und } f(z) = \frac{p(z)}{q(z)}. \quad (6.6)$$

Bemerkung 6.6.1

Man darf davon ausgehen, dass p und q in (6.6) keine gemeinsame Nullstelle haben. Denn wenn sie eine solche hätten, ließe sich die Formel $\frac{p(z)}{q(z)}$ vereinfachen. Zum Beispiel:

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

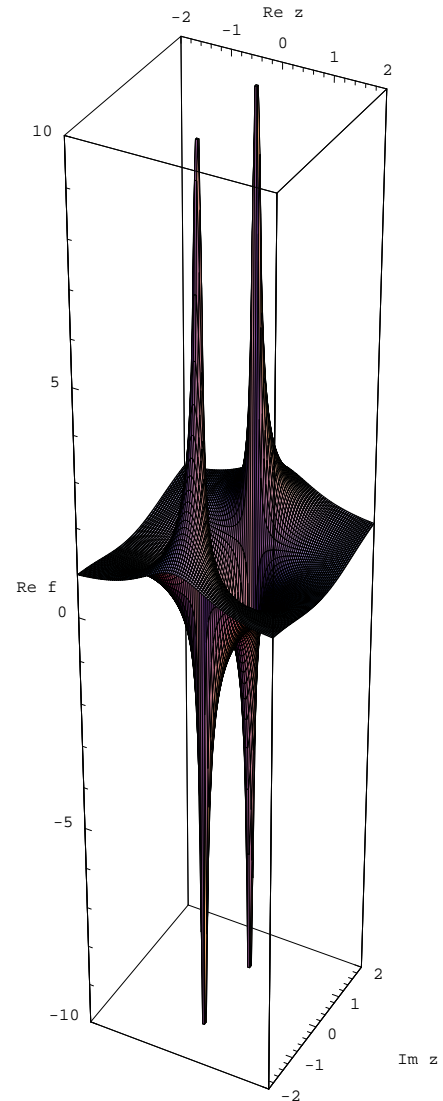
Wenn p und q keine gemeinsame Nullstelle haben, dann nennt man eine Nullstelle von q einen Pol von f . Wenn $z = z_1$ eine n -fache Nullstelle für q ist, heißt z_1 ein n -facher Pol von f . In der Nähe eines Pols ist eine rationale Funktion unbeschränkt. Hier rechts steht eine Skizze zum Graphen des reellen Teils von $\frac{z^2 - 1}{z^2 + 1}$, das heißt, von der Funktion $f_1 : \mathbb{C} \setminus \{i, -i\} \rightarrow \mathbb{R}$ mit

$$f_1(z) = \operatorname{Re} \left(\frac{z^2 - 1}{z^2 + 1} \right).$$

Wir werden uns als Nächstes befassen mit der Frage, wie man eine rationale Funktion

$$f(z) = \frac{p(z)}{q(z)}. \quad (6.7)$$

so zerlegen kann, dass nur eine Summe einfacher Funktionen übrig bleibt.



Proposition 6.7 (Partialbruchzerlegung bei Polen erster Ordnung) Seien p und q Polynome. Wir nehmen an, dass

$$q(z) = (z - z_1)(z - z_2) \dots (z - z_k)$$

mit $z_1, \dots, z_k \in \mathbb{C}$ alle verschieden.

Dann gibt es $c_j \in \mathbb{C}$ und ein Polynom \tilde{p} derart, dass man die rationale Funktion f in (6.7), also

$$f(z) = \frac{p(z)}{q(z)},$$

schreiben kann als

$$f(z) = \frac{c_1}{z - z_1} + \frac{c_2}{z - z_2} + \dots + \frac{c_k}{z - z_k} + \tilde{p}(z).$$

Bemerkung 6.7.1 Wenn man eine Stammfunktion einer rationalen Funktion f finden möchte, dann ist es notwendig eine solche Zerlegung zu haben.

Wenn q mehrfache Nullstellen hat, wird das Ergebnis aufwendiger. Dieses Ergebnis wird formuliert in der nächsten Proposition.

Proposition 6.8 (Allgemeine Partialbruchzerlegung) Seien p und q Polynome. Wir nehmen an, dass

$$q(z) = (z - z_1)^{n_1} (z - z_2)^{n_2} \dots (z - z_k)^{n_k}$$

mit $z_1, \dots, z_k \in \mathbb{C}$ alle verschieden. Es gilt $n_1, \dots, n_k \in \mathbb{N}^+$.

Dann gibt es $c_{\ell,j} \in \mathbb{C}$ und ein Polynom \tilde{p} derart, dass man die rationale Funktion f in (6.7), also

$$f(z) = \frac{p(z)}{q(z)},$$

schreiben kann als

$$\begin{aligned} f(z) = & \frac{c_{1,1}}{z - z_1} + \frac{c_{1,2}}{(z - z_1)^2} + \dots + \frac{c_{1,n_1-1}}{(z - z_1)^{n_1-1}} + \frac{c_{1,n_1}}{(z - z_1)^{n_1}} + \\ & + \frac{c_{2,1}}{z - z_2} + \frac{c_{2,2}}{(z - z_2)^2} + \dots + \frac{c_{2,n_2-1}}{(z - z_2)^{n_2-1}} + \frac{c_{2,n_2}}{(z - z_2)^{n_2}} + \\ & + \dots + \\ & + \frac{c_{k,1}}{z - z_k} + \frac{c_{k,2}}{(z - z_k)^2} + \dots + \frac{c_{k,n_k-1}}{(z - z_k)^{n_k-1}} + \frac{c_{k,n_k}}{(z - z_k)^{n_k}} + \tilde{p}(z). \end{aligned}$$

Bemerkung 6.8.1 Sowohl für Proposition 6.7 als auch für 6.8 hat man:

- Wenn $\text{Grad}(p) \geq \text{Grad}(q)$ gilt, dann folgt $\text{Grad}(\tilde{p}) = \text{Grad}(p) - \text{Grad}(q)$.
- Wenn $\text{Grad}(p) < \text{Grad}(q)$ gilt, dann folgt $\tilde{p} = 0$.

Bemerkung 6.8.2 Man nennt diesen Vorgang die **Zerlegung in Partialbrüche** und das Ergebnis die **Partialbruchzerlegung**. Aus dieser neuen Darstellung folgt, dass es zum Verständnis einer rationalen Funktion reicht, das Verhalten von einzelnen Polen zu studieren. Der Grund für diesen Aufwand soll, wenn nicht jetzt, spätestens bei der Integration deutlich werden.

Beispiel 6.1. Bevor wir einen Beweis geben, erinnern wir nochmals an den **Divisionsalgorithmus**. Wir haben ihn benutzt, um Faktoren aus einem Polynom zu holen. Auch bei der Abtrennung von Standardtermen aus einer rationalen Funktion wird er benutzt. Als Beispiel:

$$f(x) = \frac{x^6 + x^5 + x^4 + 1}{x^4 - 2x^2 + 1}. \quad (6.8)$$

1. Die Division liefert

$$\begin{array}{r} x^4 - 2x^2 + 1 \quad / \quad x^6 + x^5 + x^4 + 1 \quad \backslash \quad x^2 + x + 3 \\ \underline{x^6 - 2x^4 + x^2} \\ x^5 + 3x^4 - x^2 + 1 \\ \underline{x^5 - 2x^3 + x} \\ 3x^4 + 2x^3 - x^2 - x + 1 \\ \underline{3x^4 - 6x^2 + 3} \\ 2x^3 + 5x^2 - x - 2 \end{array}$$

und also

$$\frac{x^6 + x^5 + x^4 + 1}{x^4 - 2x^2 + 1} = x^2 + x + 3 + \frac{2x^3 + 5x^2 - x - 2}{x^4 - 2x^2 + 1}.$$

2.i. Bemerge, dass $x^4 - 2x^2 + 1 = (x - 1)^2 (x^2 + 2x + 1)$. Wir verfolgen mit

$$\begin{aligned} \frac{2x^3 + 5x^2 - x - 2}{x^4 - 2x^2 + 1} &= \frac{2x^3 + 5x^2 - x - 2}{(x - 1)^2 (x^2 + 2x + 1)} = \\ &= \frac{(2x^3 + 5x^2 - x - 2) + \boxed{-1} (x^2 + 2x + 1) + \boxed{1} (x^2 + 2x + 1)}{(x - 1)^2 (x^2 + 2x + 1)} = (*) \end{aligned}$$

Hier ist $\boxed{-1}$ so gewählt, dass $((2x^3 + 5x^2 - x - 2) + \boxed{-1} (x^2 + 2x + 1))_{x=1} = 0$, das heißt, man berechnet c derart, dass

$$0 = (2x^3 + 5x^2 - x - 2)_{x=1} + c (x^2 + 2x + 1)_{x=1} = 4 + c \cdot 4.$$

Demzufolge ist $(2x^3 + 5x^2 - x - 2) - 1(x^2 + 2x + 1)$ ein Polynom mit $x = 1$ als Nullstelle. Und weil $x = 1$ eine Nullstelle ist, kann man einen Faktor $(x - 1)$ ausklammern in

$$(2x^3 + 5x^2 - x - 2) - 1(x^2 + 2x + 1) = 2x^3 + 4x^2 - 3x - 3.$$

Dazu benutzt man wiederum eine Division:

$$\begin{array}{r|l} x - 1 & 2x^3 + 4x^2 - 3x - 3 \quad \setminus \quad 2x^2 + 6x + 3 \\ & \underline{2x^3 - 2x^2} \\ & 6x^2 - 3x - 3 \\ & \underline{6x^2 - 6x} \\ & 3x - 3 \\ & \underline{3x - 3} \\ & 0 \end{array}$$

Man findet $2x^3 + 4x^2 - 3x - 3 = (x - 1)(2x^2 + 6x + 3)$ und geht wie folgt weiter:

$$\begin{aligned} (*) &= \frac{(2x^3 + 5x^2 - x - 2) - 1(x^2 + 2x + 1)}{(x - 1)^2 (x^2 + 2x + 1)} + \frac{1(x^2 + 2x + 1)}{(x - 1)^2 (x^2 + 2x + 1)} = \\ &= \frac{(x - 1)(2x^2 + 6x + 3)}{(x - 1)^2 (x^2 + 2x + 1)} + \frac{1}{(x - 1)^2} = \frac{(2x^2 + 6x + 3)}{(x - 1)(x^2 + 2x + 1)} + \frac{1}{(x - 1)^2}. \end{aligned}$$

2.ii. Das gleiche tun wir mit

$$\begin{aligned} \frac{(2x^2 + 6x + 3)}{(x - 1)(x^2 + 2x + 1)} &= \frac{(2x^2 + 6x + 3) - \frac{11}{4}(x^2 + 2x + 1)}{(x - 1)(x^2 + 2x + 1)} + \frac{\frac{11}{4}(x^2 + 2x + 1)}{(x - 1)(x^2 + 2x + 1)} = \\ &= \frac{(-\frac{3}{4}x - \frac{1}{4})(x - 1)}{(x - 1)(x^2 + 2x + 1)} + \frac{\frac{11}{4}}{x - 1} = \frac{-\frac{3}{4}x - \frac{1}{4}}{x^2 + 2x + 1} + \frac{\frac{11}{4}}{x - 1}. \end{aligned}$$

Es wurde benutzt, dass

$$(2x^2 + 6x + 3) - \frac{11}{4}(x^2 + 2x + 1) = -\frac{3}{4}x^2 + \frac{1}{2}x + \frac{1}{4} = (-\frac{3}{4}x - \frac{1}{4})(x - 1).$$

2.iii. Noch einmal ähnliches:

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

3. Insgesamt bringt es uns zu

$$\frac{x^6 + x^5 + x^4 + 1}{x^4 - 2x^2 + 1} = x^2 + x + 3 + \frac{1}{(x-1)^2} + \frac{\frac{11}{4}}{x-1} + \frac{\frac{1}{2}}{(x+1)^2} + \frac{-\frac{3}{4}}{x+1}. \quad (6.9)$$

Rechts in (6.9) steht die Partialbruchzerlegung von links, also von (6.8). ■

Wenn man dieses Beispiel genau betrachtet, gibt es eigentlich nur einen wichtigen Schritt.

Lemma 6.9 Seien p und q Polynome mit $\text{Grad}(p) \leq \text{Grad}(q) - 1$ und so, dass p und q keine gemeinsame Nullstelle haben. Sei z_1 eine m -fache Nullstelle von q , sagen wir

$$q(z) = (z - z_1)^m \tilde{q}(z),$$

dann gibt es ein Polynom \tilde{p} mit $\text{Grad}(\tilde{p}) \leq \text{Grad}(q) - 2$ und eine Zahl $c \in \mathbb{C}$ so, dass

$$\frac{p(z)}{q(z)} = \frac{p(z)}{(z - z_1)^m \tilde{q}(z)} = \frac{\tilde{p}(z)}{(z - z_1)^{m-1} \tilde{q}(z)} + \frac{c}{(z - z_1)^m}. \quad (6.10)$$

Beweis von Lemma 6.9. Weil $\tilde{q}(z_1) \neq 0$, ist $c = \frac{p(z_1)}{\tilde{q}(z_1)}$ wohldefiniert und es ist folgendes erlaubt:

$$\frac{p(z)}{(z - z_1)^m \tilde{q}(z)} = \frac{p(z) - \frac{p(z_1)}{\tilde{q}(z_1)} \tilde{q}(z) + \frac{p(z_1)}{\tilde{q}(z_1)} \tilde{q}(z)}{(z - z_1)^m \tilde{q}(z)} = \frac{p(z) - \frac{p(z_1)}{\tilde{q}(z_1)} \tilde{q}(z)}{(z - z_1)^m \tilde{q}(z)} + \frac{p(z_1)}{\tilde{q}(z_1)} \frac{1}{(z - z_1)^m}.$$

Weil $P(z) = p(z) - \frac{p(z_1)}{\tilde{q}(z_1)} \tilde{q}(z)$ ein Polynom mit $z = z_1$ als Nullstelle und von $\text{Grad}(P) \leq \text{Grad}(q) - 1$ ist, gibt es ein Polynom \tilde{p} mit $\text{Grad}(\tilde{p}) = \text{Grad}(P) - 1$ so, dass

$$P(z) = (z - z_1) \tilde{p}(z).$$

Es folgt, mit c wie oben, dass

$$\frac{p(z)}{(z - z_1)^m \tilde{q}(z)} = \frac{\tilde{p}(z)}{(z - z_1)^{m-1} \tilde{q}(z)} + \frac{c}{(z - z_1)^m}. \quad \blacksquare$$

Beweis von Theorem 6.8. Der erste Schritt wäre, im Fall $\text{Grad}(p) \geq \text{Grad}(q)$, durch eine Division eine rationale Funktion zu bekommen mit dem Grad des Zählers kleiner als dem Grad des Nenners. Das liefert uns ein Polynom r und ein Polynom p_1 mit $\text{Grad}(p_1) \leq \text{Grad}(q) - 1$ derart, dass

$$\frac{p(z)}{q(z)} = r(z) + \frac{p_1(z)}{q(z)}.$$

Als nächsten Schritt vereinfachen wir $\frac{p_1(z)}{q(z)}$ so, dass p_1 und q keine gemeinsame Nullstelle haben. Jetzt brauchen wir das Theorem nur für solche $\frac{p_1(z)}{q(z)}$ zu beweisen.

Das beweisen wir mit vollständiger Induktion nach dem Grad von q .

1) Wenn $\text{Grad}(q) = 1$, dann gilt $\text{Grad}(p_1) = 0$ und $\frac{p_1(z)}{q(z)}$ hat schon die gefragte Form.

2) Nehmen wir an, dieses Theorem stimmt für alle q mit Grad n . Wenn wir ein Polynom q von Grad $n + 1$ haben, dann erlaubt uns Lemma 6.9 die Induktionsannahme zu nutzen, denn (6.10) gibt uns eine rationale Funktion mit Grad n im Nenner. ■

Die oben durchgeführte Spaltung kann eine langwierige Sache sein, wenn man all diese Schritte verfolgt. Weil man aber jetzt weiß, was zu erwarten ist, kann man schneller voran kommen.

Beispiel 6.2. Nehmen wir $\frac{z^5}{z^4 + 2z^2 + 1}$. Die erste Division läßt sich kaum kürzen:

$$\frac{z^5}{z^4 + 2z^2 + 1} = \frac{z^5 + 2z^3 + z}{z^4 + 2z^2 + 1} - \frac{2z^3 + z}{z^4 + 2z^2 + 1} = z - \frac{2z^3 + z}{z^4 + 2z^2 + 1}.$$

Dann muss man immer noch den Nenner faktorisieren:

$$z^4 + 2z^2 + 1 = (z^2 + 1)^2 = ((z - i)(z + i))^2 = (z - i)^2 (z + i)^2.$$

Wir können jetzt aber verwenden, dass wir wissen, es gibt $a, b, c, d \in \mathbb{C}$, so dass

$$\frac{2z^3 + z}{z^4 + 2z^2 + 1} = \frac{2z^3 + 0z^2 + 1z + 0}{z^4 + 2z^2 + 1} = \frac{a}{(z - i)^2} + \frac{b}{z - i} + \frac{c}{(z + i)^2} + \frac{d}{z + i}. \quad (6.11)$$

Die rechte Seite kann man zusammennehmen:

$$\begin{aligned} & \frac{a}{(z - i)^2} + \frac{b}{z - i} + \frac{c}{(z + i)^2} + \frac{d}{z + i} = \\ &= \frac{a(z + i)^2 + b(z + i)^2(z - i) + c(z - i)^2 + d(z - i)^2(z + i)}{(z - i)^2(z + i)^2} = \\ &= \frac{(b + d)z^3 + (a + ib + c - id)z^2 + (2ia + b - 2ic + d)z + ib - a - c - id}{(z^2 + 1)^2}. \end{aligned} \quad (6.12)$$

Man muss nur noch ein lineares System von 4 Gleichungen lösen, damit die Termen in (6.11) und (6.12) passen:

$$\begin{cases} 2 = b + d, \\ 0 = a + ib + c - id, \\ 1 = 2ia + b - 2ic + d, \\ 0 = ib - a - c - id. \end{cases}$$

Es folgt $a = \frac{1}{4}i$, $b = 1$, $c = -\frac{1}{4}i$ und $d = 1$ und das Ergebnis lautet:

$$\frac{z^5}{z^4 + 2z^2 + 1} = z - \frac{\frac{1}{4}i}{(z - i)^2} - \frac{1}{z - i} + \frac{\frac{1}{4}i}{(z + i)^2} - \frac{1}{z + i}.$$

6.4 Potenzen und Wurzeln

Potenzen mit ganzen Zahlen sind definiert durch

$$\begin{aligned} \text{wenn } n \in \mathbb{N}^+ : \quad z^n &= \underbrace{z \cdot z \cdot z \cdot \dots \cdot z}_{n \text{ Faktoren}} && \text{für } z \in \mathbb{C}, \\ \text{wenn } n = 0 : \quad z^0 &= 1 && \text{für } z \in \mathbb{C}, \\ \text{wenn } n \in \mathbb{Z}^- : \quad z^n &= \frac{1}{z^{-n}} && \text{für } z \in \mathbb{C} \setminus \{0\}. \end{aligned}$$

Die ersten Erweiterungen sind die Wurzelfunktionen:

- Wenn $n \in \mathbb{N}$ gerade ist, dann ist $(y \mapsto y^n) : \mathbb{R}_0^+ \rightarrow \mathbb{R}_0^+$ bijektiv. Dann gibt es genau eine Lösung $y \in \mathbb{R}_0^+$ von $x = y^n$ für alle $x \in \mathbb{R}_0^+ := [0, \infty)$.
- Wenn $n \in \mathbb{N}$ ungerade ist, dann ist $(y \mapsto y^n) : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ bijektiv. Dann gibt es genau eine Lösung $y \in \mathbb{R}$ von $x = y^n$ für alle $x \in \mathbb{R}$.

Die Bijektivität folgt aus der Tatsache, dass die Funktionen $(y \mapsto y^n) : \mathbb{R}_0^+ \rightarrow \mathbb{R}_0^+$ mit n gerade und $(y \mapsto y^n) : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit n ungerade, monoton wachsend, also injektiv, und surjektiv sind. Also ist die nächste Definition erlaubt.

Definition 6.10 Die n -te Wurzel für $n \in \mathbb{N}^+$:

1. Wenn n gerade ist, wird $\sqrt[n]{\cdot} : \mathbb{R}_0^+ \rightarrow \mathbb{R}_0^+$ definiert durch

$$\sqrt[n]{x} = y \iff (y^n = x \text{ und } y \geq 0).$$

2. Wenn n ungerade ist, wird $\sqrt[n]{\cdot} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ definiert durch

$$\sqrt[n]{x} = y \iff y^n = x.$$

6.4.1 Potenzen mit rationalen Koeffizienten

Was machen wir mit $f(x) = x^{\frac{m}{n}}$ für $m \in \mathbb{Z}$ und $n \in \mathbb{N}^+$? Für $x > 0$ gibt es kein Problem.

Definition 6.11 Sei $\frac{m}{n} \in \mathbb{Q}$ mit $n \in \mathbb{N}^+$ und $m \in \mathbb{Z}$. Die Funktion $(x \mapsto x^{\frac{m}{n}}) : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^+$ wird definiert durch

$$x^{\frac{m}{n}} = \sqrt[n]{x^m}.$$

Auch für diese Definition muss man zeigen, dass sie korrekt ist. Jede rationale Zahl hat ja mehrere Darstellungsmöglichkeiten: $\frac{2}{3} = \frac{4}{6} = \frac{10}{15} = \dots$. Man kann jedoch sehen, dass $y_1 = x^{\frac{km}{kn}}$ mit $k \in \mathbb{N}^+$ und $y_2 = x^{\frac{m}{n}}$ das gleiche Ergebnis liefern. Betrachten wir $\sqrt[kn]{x^{km}}$ und $\sqrt[n]{x^m}$, dann folgt mit Definition 6.10, dass sowohl

$$y_1^{kn} = \left(\sqrt[kn]{x^{km}} \right)^{kn} = x^{km} \text{ als auch } y_2^{kn} = (y_2^n)^k = \left(\left(\sqrt[n]{x^m} \right)^n \right)^k = (x^m)^k = x^{km}$$

gilt. Also hat man $y_1^{kn} = y_2^{kn}$ und weil $(y \mapsto y^{kn}) : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^+$ injektiv ist, folgt $y_1 = y_2$.

Bemerkung 6.11.1 Man würde denken, dies geht auch für negative Zahlen x , bis man folgendes betrachtet:

$$-1 = \sqrt[3]{-1} = \sqrt[3]{(-1)^5} = (-1)^{\frac{5}{3}} = (-1)^{\frac{10}{6}} = \sqrt[6]{(-1)^{10}} = \sqrt[6]{1} = 1.$$

Um derartige Probleme zu vermeiden, definieren wir $x \mapsto x^{\frac{m}{n}}$ nicht für $x < 0$. Auch für $z \in \mathbb{C} \setminus [0, \infty)$ werden wir hier keine rationale Potenzen definieren.

Für positive x passt das alles wie man möchte und man kann wie 'üblich' mit den Koeffizienten verfahren:

Lemma 6.12 Seien $x, y \in \mathbb{R}^+$ und $p, q \in \mathbb{Q}$. Dann gilt:

1. $x^{p+q} = x^p x^q$;
2. $x^{pq} = (x^p)^q$;
3. $(xy)^p = x^p y^p$.

Beweis. Wenn p und q in \mathbb{Z} liegen, dann folgen diese Ergebnisse aus einer wiederholten Anwendung der Körpereigenschaften. Übrig bleibt, es zu beweisen für $\mathbb{Q} \setminus \mathbb{Z}$. Da verwenden wir die Definition und, dass diese Gleichungen für ganze Zahlen gelten.

Wir setzen $p = \frac{m}{n}$ und $q = \frac{k}{\ell}$ mit $m, k \in \mathbb{Z}$ und $n, \ell \in \mathbb{N}^+$.

1. Die erste Behauptung:

$$\begin{aligned} (x^{p+q})^{n\ell} &= \left(x^{\frac{m}{n} + \frac{k}{\ell}}\right)^{n\ell} = \left(x^{\frac{m\ell + kn}{n\ell}}\right)^{n\ell} = \left(\sqrt[n\ell]{x^{m\ell + kn}}\right)^{n\ell} = x^{m\ell + kn}, \\ (x^p x^q)^{n\ell} &= \left(x^{\frac{m}{n}}\right)^{n\ell} \left(x^{\frac{k}{\ell}}\right)^{n\ell} = \left(\sqrt[n]{x^m}\right)^\ell \left(\sqrt[\ell]{x^k}\right)^n = (x^m)^\ell (x^k)^n = x^{m\ell + kn}, \end{aligned}$$

also gilt $(x^{p+q})^{n\ell} = (x^p x^q)^{n\ell}$ und die Injektivität von $(x \mapsto x^{n\ell}) : \mathbb{R}_0^+ \rightarrow \mathbb{R}_0^+$ liefert $x^{p+q} = x^p x^q$.

2. Die zweite Behauptung:

$$\begin{aligned} (x^{pq})^{n\ell} &= \left(x^{\frac{mk}{n\ell}}\right)^{n\ell} = \left(\sqrt[n\ell]{x^{mk}}\right)^{n\ell} = x^{mk}, \\ ((x^p)^q)^{n\ell} &= \left(\left(x^{\frac{m}{n}}\right)^{\frac{k}{\ell}}\right)^{n\ell} = \left(\sqrt[\ell]{\left(x^{\frac{m}{n}}\right)^k}\right)^n = \left(x^{\frac{m}{n}}\right)^{kn} = \left(\sqrt[n]{x^m}\right)^k = (x^m)^k = x^{mk}, \end{aligned}$$

und die Injektivität von $(x \mapsto x^{n\ell}) : \mathbb{R}_0^+ \rightarrow \mathbb{R}_0^+$ liefert $x^{pq} = (x^p)^q$.

3. Die dritte Behauptung:

$$((xy)^p)^n = \sqrt[n]{(xy)^{m^n}} = (xy)^m = x^m y^m = \sqrt[n]{x^m} \sqrt[n]{y^m} = (x^p)^n (y^p)^n = (x^p y^p)^n$$

und die Injektivität von $(x \mapsto x^n) : \mathbb{R}_0^+ \rightarrow \mathbb{R}_0^+$ liefert $(xy)^p = x^p y^p$. ■

6.5 Einige Standardfolgen und deren Grenzwerte

Lemma 6.13 *Einige Standardgrenzwerte:*

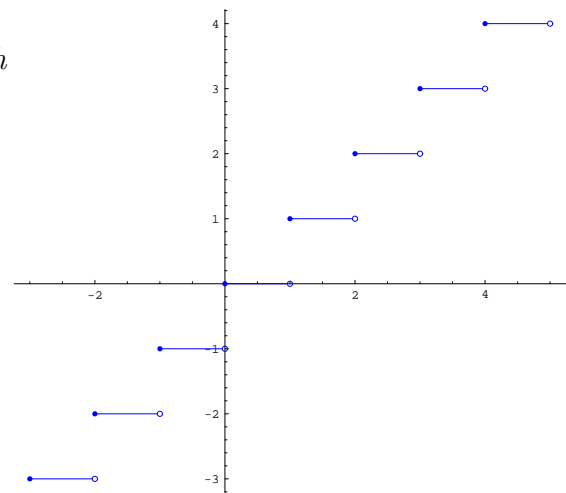
1. $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n^q} = 0$ für $q \in \mathbb{Q}^+$;
2. $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{x} = 1$ für $x \in \mathbb{R}^+$;
3. $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{n} = 1$;
4. $\lim_{n \rightarrow \infty} n^m z^n = 0$ für $m \in \mathbb{N}$ und $z \in \mathbb{C}$ mit $|z| < 1$;
5. $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = e$.

Definition 6.14 Die Entierfunktion wird auch Gaußklammer oder Ganzzahlfunktion genannt:

$$\begin{aligned} [\cdot] &: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, \\ [x] &:= \max \{n \in \mathbb{Z}; n \leq x\}. \end{aligned}$$

Manchmal wird auch $\lfloor \cdot \rfloor$ geschrieben.

Eine Skizze zum Graphen der Entierfunktion findet man rechts.



Bemerkung 6.14.1 Es folgt, dass

$$[x] \leq x < [x] + 1 \text{ für alle } x \in \mathbb{R}.$$

Beweis von Lemma 6.13. Sei $\varepsilon > 0$.

1. Man nehme $N_\varepsilon = [\varepsilon^{-1/q}] + 1$:

$$\left| \frac{1}{n^q} - 0 \right| = n^{-q} \leq ([\varepsilon^{-1/q}] + 1)^{-q} < (\varepsilon^{-1/q})^{-q} = \varepsilon.$$

2. Man nehme $N_\varepsilon = [\frac{x-1}{n}] + 1$. Die Bernoullische Ungleichung besagt, dass

$$(1 + y)^n \geq 1 + ny \text{ für } y > -1.$$

Nimmt man $y = \frac{x-1}{n}$, dann findet man $(1 + \frac{x-1}{n})^n \geq x$ und daraus folgt

$$1 + \frac{x-1}{n} \geq \sqrt[n]{x}.$$

Für $x \geq 1$ gilt also

$$|\sqrt[n]{x} - 1| = \sqrt[n]{x} - 1 \leq \frac{x-1}{n}.$$

Wenn wir also $N = [\frac{x-1}{\varepsilon}] + 1$ nehmen, folgt für $n > N$, dass

$$|\sqrt[n]{x} - 1| \leq \frac{x-1}{n} < \frac{x-1}{[\frac{x-1}{\varepsilon}] + 1} < \varepsilon.$$

Für $0 < x < 1$ benutzen wir, dass $x^{-1} > 1$, dass $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{x^{-1}} = 1$ und

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{x} = \frac{1}{\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{x^{-1}}}.$$

3. Neben der Bernoullischen Ungleichung hat man auch für $n \geq 2$ und $y \geq 0$ mit der Binomialformel, dass

$$(1 + y)^n \geq 1 + \binom{n}{1}y + \binom{n}{2}y^2 \geq 1 + \frac{n(n-1)}{2}y^2.$$

Nimmt man $y = \sqrt[n]{n} - 1$, so folgt

$$n - 1 = (1 + (\sqrt[n]{n} - 1))^n - 1 \geq \frac{n(n-1)}{2} (\sqrt[n]{n} - 1)^2.$$

Vereinfachen gibt

$$\frac{2(n-1)}{n(n-1)} \geq (\sqrt[n]{n} - 1)^2$$

und weil $\sqrt[n]{n} > 1$, bekommt man

$$\sqrt[n]{n} - 1 \leq \sqrt{\frac{2}{n}}.$$

Weil

$$1 \leq \sqrt[n]{n} \leq 1 + \sqrt{2} \frac{1}{n^{\frac{1}{2}}}$$

folgt das Ergebnis aus Lemma 5.10, Lemma 6.13.1, und das Einschließungslemma.

4. Wenn $m = 0$, hat man mit der Bernoullischen Ungleichung

$$|z|^n = \frac{1}{(1 + |z|^{-1} - 1)^n} \leq \frac{1}{1 + n(|z|^{-1} - 1)} \leq \frac{1}{n} \frac{1}{|z|^{-1} - 1} = \frac{1}{n} \frac{|z|}{1 - |z|}. \quad (6.13)$$

Weil $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \frac{|z|}{1 - |z|} = 0$, gilt auch $\lim_{n \rightarrow \infty} |z|^n = 0$.

Wenn $m \geq 1$, hat man

$$|n^m z^n| = \left| \sqrt[n]{n} |z|^{\frac{1}{n}} \right|^{mn} \leq \left| \left(1 + \sqrt{\frac{2}{n}} \right) |z|^{\frac{1}{n}} \right|^{mn}.$$

Weil $|z| < 1$ gilt, und weil $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \sqrt{\frac{2}{n}} \right) = 1$, gibt es $N \in \mathbb{N}$ und $0 < \theta < 1$, so dass

$$\left| \left(1 + \sqrt{\frac{2}{n}} \right) |z|^{\frac{1}{n}} \right| \leq \theta.$$

Wie in (6.13) hat man

$$\theta^n = \frac{1}{(1 + (\theta^{-1} - 1))^n} \leq \frac{1}{1 + n(\theta^{-1} - 1)} \leq \frac{1}{n(\theta^{-1} - 1)} = \frac{1}{n} \frac{\theta}{1 - \theta},$$

und mit

$$|n^m z^n| \leq \theta^{mn} = (\theta^n)^m \leq \frac{1}{n^m} \left(\frac{\theta}{1 - \theta} \right)^m \leq \left(\frac{\theta}{1 - \theta} \right)^m \frac{1}{n},$$

folgt $\lim_{n \rightarrow \infty} n^m z^n = 0$.

5. Dass dieser Limes existiert, wurde schon auf Seite 15 gezeigt. Die Zahl e wurde als solches definiert. ■

Aussagen:

$$\begin{aligned}
 & \left(1 - \frac{1}{m}\right)x + \frac{w}{mx^{m-1}} \geq \sqrt[m]{w} \Leftrightarrow (m-1)x + \frac{w}{x^{m-1}} \geq m \sqrt[m]{w} \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow & m-1 + \frac{w}{x^m} \geq m \frac{\sqrt[m]{w}}{x} \Leftrightarrow \frac{w}{x^m} \geq 1 + m \left(\frac{\sqrt[m]{w}}{x} - 1\right) \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow & \left(\frac{\sqrt[m]{w}}{x}\right)^m \geq 1 + m \left(\frac{\sqrt[m]{w}}{x} - 1\right) \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow & \left(1 + \left(\frac{\sqrt[m]{w}}{x} - 1\right)\right)^m \geq 1 + m \left(\frac{\sqrt[m]{w}}{x} - 1\right).
 \end{aligned}$$

Setzt man $y = \frac{\sqrt[m]{w}}{x} - 1$, dann erkennt man, dass die letzte Ungleichung stimmt wegen der Bernoullischen Ungleichung (Lemma 1.9):

$$(1+y)^m \geq 1+my \text{ für } y \geq -1.$$

Damit hat man auch

$$f(x) = \left(1 - \frac{1}{m}\right)x + \frac{w}{mx^{m-1}} \geq \sqrt[m]{w}.$$

Weil $a_0 > 0$ gilt, folgt $a_1 = f(a_0) \geq \sqrt[m]{w}$ und mit Induktion, dass $f(a_n) \geq \sqrt[m]{w}$ für $n \in \mathbb{N}^+$.

Für $a_n \geq \sqrt[m]{w}$ finden wir

$$a_{n+1} = \left(1 - \frac{1}{m}\right)a_n + \frac{w}{ma_n^{m-1}} = a_n - \frac{a_n^m - w}{ma_n^{m-1}} \leq a_n.$$

So haben wir eine monoton fallende Folge bekommen, die nach unten beschränkt ist. Die Vollständigkeit von \mathbb{R} besagt, dass $\{a_n\}_{n=0}^\infty$ einen Grenzwert a hat. Und weil $a_n \geq \sqrt[m]{w}$ gilt auch $a \geq \sqrt[m]{w}$.

Jetzt, nachdem wir die Existenz des Limes gezeigt haben, können wir damit rechnen und mit allen Einzelschritten folgt:

$$\begin{aligned}
 a &= \lim_{n \rightarrow \infty} a_{n+1} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\left(1 - \frac{1}{m}\right)a_n + \frac{w}{ma_n^{m-1}} \right) \\
 &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\left(1 - \frac{1}{m}\right)a_n \right) + \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{w}{ma_n^{m-1}} \\
 &= \left(1 - \frac{1}{m}\right) \lim_{n \rightarrow \infty} a_n + \frac{w}{m} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{a_n^{m-1}} \\
 &= \left(1 - \frac{1}{m}\right) \lim_{n \rightarrow \infty} a_n + \frac{w}{m} \frac{1}{\lim_{n \rightarrow \infty} a_n^{m-1}} \\
 &= \left(1 - \frac{1}{m}\right) \lim_{n \rightarrow \infty} a_n + \frac{w}{m} \frac{1}{(\lim_{n \rightarrow \infty} a_n)^{m-1}} \\
 &= \left(1 - \frac{1}{m}\right)a + \frac{w}{m} \frac{1}{a^{m-1}}.
 \end{aligned}$$

Es gilt also, dass

$$\frac{1}{m}a = \frac{w}{m} \frac{1}{a^{m-1}},$$

und wir finden, dass $a^m = w$. ■

Analysis 1, Woche 7

A1

Reihen I

7.1 Folgen aus Folgen

Wenn $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ eine reelle oder komplexe Folge ist, kann man daraus eine neue Folge $\{s_n\}_{n=0}^{\infty}$ konstruieren durch

$$s_n = a_0 + a_1 + \cdots + a_n,$$

oder netter geschrieben

$$s_n = \sum_{k=0}^n a_k.$$

Die Folge $\{\sum_{k=0}^n a_k\}_{n=0}^{\infty}$ nennt man **eine Reihe**, die Zahlen a_n sind die Glieder dieser Reihe und s_n die **Partialsommen**.

Die Hauptfrage, die man bei einer Reihe stellt, ist:

- Konvergiert sie? Anders gesagt, existiert $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n a_k$?

Die zweite Frage ist meistens viel schwieriger zu beantworten:

- Wenn sie konvergiert: Gegen welche Zahl konvergiert sie?

Anders gesagt, kann man $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n a_k$ berechnen?

Bemerkung 7.1 *Es gibt in manchen Büchern zu Analysis eine etwas irreführende Schreibweise für Reihen:*

- Für $\{\sum_{k=0}^n a_k\}_{n=0}^{\infty}$ schreibt man $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$.

Man verwendet jedoch die gleiche Notation auch für einen möglichen Grenzwert:

- $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n a_k =: \sum_{k=0}^{\infty} a_k$.

Dann muss aus dem Kontext deutlich werden, ob mit $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ Folge oder Limes gemeint ist. Am Anfang werden wir die formal eindeutige, aber aufwendige Notation verwenden.

Beispiel 7.1. Die **harmonische Reihe** ist definiert als $\left\{\sum_{k=1}^n \frac{1}{k}\right\}_{n=1}^{\infty}$:

$$s_n := \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} = 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} + \cdots + \frac{1}{n}.$$

Sie ist nicht konvergent:

$$\begin{aligned} s_n &= 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} + \frac{1}{6} + \frac{1}{7} + \frac{1}{8} + \frac{1}{9} + \cdots + \frac{1}{16} + \frac{1}{17} + \cdots + \frac{1}{n} \\ &\geq 1 + \frac{1}{2} + \underbrace{\frac{1}{4} + \frac{1}{4}}_4 + \underbrace{\frac{1}{8} + \frac{1}{8} + \frac{1}{8} + \frac{1}{8}}_8 + \underbrace{\frac{1}{16} + \cdots + \frac{1}{16}}_{16} + \underbrace{\frac{1}{32} + \cdots + \frac{1}{32}}_{32} + \cdots + \frac{1}{2^m} \\ &\geq 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \cdots \end{aligned} \quad (7.1)$$

Hier ist 2^m die kleinste Zweierpotenz größer gleich n . Man findet, dass $\{s_n\}_{n=1}^{\infty}$ unbeschränkt ist.

Möchte man dies präzise zeigen, dann bemerkt man, dass wegen (7.1) für die Teilfolge $\{s_{2^k}\}_{k=1}^{\infty}$ gilt, dass

$$s_{2^k} \geq \frac{1}{2}k \text{ für alle } k \in \mathbb{N}.$$

Dann ist diese Teilfolge unbeschränkt, und daher auch die Folge $\{s_n\}_{n=1}^{\infty}$ selbst. Weil die Folge $\{s_n\}_{n=1}^{\infty}$ monoton ist, kann man sogar sagen, dass $\lim_{n \rightarrow \infty} s_n = \infty$. ■

Beispiel 7.2. Die **geometrische Reihe** für $z \in \mathbb{C}$ ist definiert als $\left\{\sum_{k=0}^n z^k\right\}_{n=0}^{\infty}$. Sie konvergiert genau dann, wenn $|z| < 1$.

Das sieht man wie folgt: Für $z \neq 1$ gilt

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^n z^k &= 1 + z + z^2 + \cdots + z^n \\ &= \frac{(1 + z + z^2 + \cdots + z^n)(1 - z)}{(1 - z)} = \frac{1 - z^{n+1}}{1 - z}, \end{aligned}$$

und man bekommt

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n z^k = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1 - z^{n+1}}{1 - z} = \frac{1 - \lim_{n \rightarrow \infty} z^{n+1}}{1 - z} = \begin{cases} \frac{1}{1 - z} & \text{wenn } |z| < 1, \\ \text{divergent} & \text{wenn } |z| \geq 1. \end{cases}$$

Wenn $z = 1$ hat man

$$\sum_{k=0}^n z^k = \sum_{k=0}^n 1 = n + 1,$$

und es folgt auch hier Divergenz. ■

Lemma 7.2 1. Wenn $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n a_k$ existiert, dann gilt $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$.

2. $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$ ist nicht ausreichend für die Konvergenz der Reihe $\left\{\sum_{k=0}^n a_k\right\}_{n=0}^{\infty}$.

Beweis. 1. Es gilt $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = b$ genau dann, wenn $\lim_{n \rightarrow \infty} b_{n+1} = b$. Setzt man $s = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n a_k$, dann sieht man sofort, dass

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} a_{n+1} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{k=0}^{n+1} a_k - \sum_{k=0}^n a_k \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^{n+1} a_k - \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n a_k = s - s = 0.$$

2. Die harmonische Reihe ist ein Beispiel, das besagt, dass $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$ keine ausreichende Bedingung ist für die Konvergenz von $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n a_k$. Also

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0 \not\Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n a_k \text{ existiert.}$$

■

Bemerkung 7.2.1 Die erste Aussage dieses Lemmas, nämlich

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n a_k \text{ existiert} \implies \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0,$$

ist äquivalent zu der logischen Umkehrung¹

$$\{a_n\}_{n \in \mathbb{N}} \text{ konvergiert nicht nach } 0 \implies \left\{ \sum_{k=0}^n a_k \right\}_{n \in \mathbb{N}} \text{ divergiert.}$$

Und nochmals, aus $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$ folgt nicht die Summierbarkeit, obwohl dies bei Hausaufgaben und Klausuren immer wieder behauptet wird.

7.2 Konvergenz für Reihen mit positiven Gliedern

Lemma 7.3 Sei $q \in \mathbb{Q}^+$. Die Reihe $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^q}$ konvergiert genau dann, wenn $q > 1$.

Bemerkung 7.3.1 Anders gesagt: die Folge $\left\{ \sum_{k=1}^n \frac{1}{k^q} \right\}_{n=1}^{\infty}$ konvergiert genau dann, wenn $q > 1$. Oder nochmals anders gesagt: $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{1}{k^q}$ existiert genau dann, wenn $q > 1$. Dies gilt sogar für $q \in \mathbb{R}$ aus $(1, \infty)$.

¹Wenn A und B zwei Aussagen sind, dann ist die Behauptung $A \Rightarrow B$ gleichwertig zu $\neg B \Rightarrow \neg A$.

„Wenn es ein normales Fahrrad ist, dann hat es zwei Räder“ ist gleichwertig zu „Wenn es keine zwei Räder hat, ist es kein normales Fahrrad“.

„Wenn es zwei Räder hat, ist es ein normales Fahrrad“ ist eine ganz andere Aussage.



Beweis. Für $q > 1$ gilt

$$\begin{aligned} s_n &= 1 + \frac{1}{2^q} + \frac{1}{3^q} + \frac{1}{4^q} + \frac{1}{5^q} + \frac{1}{6^q} + \frac{1}{7^q} + \frac{1}{8^q} + \cdots + \frac{1}{n^q} \\ &\leq 1 + \frac{1}{2^q} + \frac{1}{2^q} + \frac{1}{4^q} + \frac{1}{4^q} + \frac{1}{4^q} + \frac{1}{4^q} + \frac{1}{8^q} + \cdots + \frac{1}{2^{kq}} \end{aligned}$$

wiederum mit $k \in \mathbb{N}$ die kleinste Zahl so, dass $2^k \geq n$. Man findet

$$\begin{aligned} s_n &\leq 1 + \frac{2}{2^q} + \frac{4}{4^q} + \cdots + \frac{2^k}{2^{kq}} \\ &= 1 + \frac{1}{2^{q-1}} + \frac{1}{2^{2(q-1)}} + \cdots + \frac{1}{2^{k(q-1)}} \\ &= \sum_{\ell=0}^k \left(\frac{1}{2^{q-1}} \right)^\ell \leq \frac{1}{1 - \frac{1}{2^{q-1}}} \end{aligned}$$

weil $\frac{1}{2^{q-1}} < 1$ für $q > 1$. Also ist $\{s_n\}_{n=1}^\infty$ eine monotone und beschränkte Folge und deshalb konvergent.

Für $q \leq 1$ gilt

$$\begin{aligned} s_n &= 1 + \frac{1}{2^q} + \frac{1}{3^q} + \frac{1}{4^q} + \frac{1}{5^q} + \cdots + \frac{1}{n^q} \\ &\geq 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} + \cdots + \frac{1}{n} \end{aligned}$$

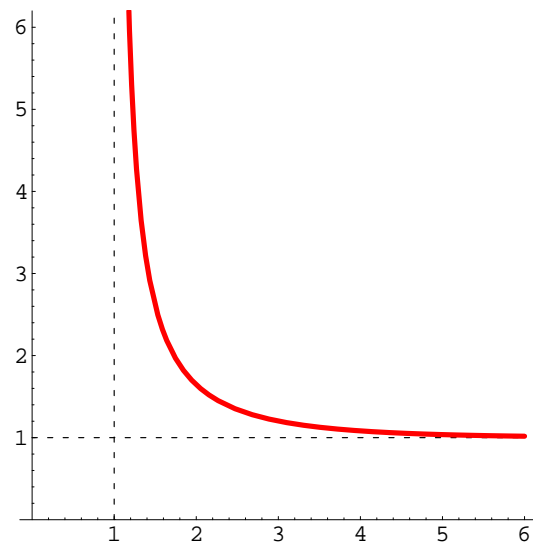
und $s_n \rightarrow \infty$ für $n \rightarrow \infty$. ■

Bemerkung 7.3.2 Die Funktion

$$\left(q \mapsto \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^q} \right) : (1, \infty) \rightarrow \mathbb{R} \quad (7.2)$$

heißt die *Riemann-Zeta-Funktion*. Sie wird oft mit ζ notiert. Man kann zeigen, dass:

$$\begin{aligned} \zeta(2) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} = \frac{1}{6} \pi^2, \\ \zeta(4) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^4} = \frac{1}{90} \pi^4, \\ \zeta(6) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^6} = \frac{1}{945} \pi^6, \\ \zeta(8) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^8} = \frac{1}{9450} \pi^8. \end{aligned}$$



Skizze der Riemann-Zeta-Funktion

Die **Riemann-Zeta-Funktion** ist durch (7.2) definiert auf $\mathbb{Q} \cap (1, \infty)$. Später werden wir sehen, dass man die Riemann-Zeta-Funktion ζ sogar auf $\mathbb{C} \setminus \{1\}$ definieren kann und dass $\zeta(z)$ für $\operatorname{Re} z > 1$ mit der obigen Summe übereinstimmt.

Ein wichtiges Werkzeug haben wir im Beweis soeben gesehen, nämlich ein Vergleichskriterium.

Lemma 7.4 (Majorantenkriterium) Seien $\{a_n\}_{n=0}^\infty$ und $\{b_n\}_{n=0}^\infty$ reelle Folgen mit

$$0 \leq a_n \leq b_n \text{ für alle } n \in \mathbb{N}.$$

1. Wenn die Reihe $\left\{ \sum_{n=0}^k b_n \right\}_{k=0}^{\infty}$ konvergiert, dann konvergiert die Reihe $\left\{ \sum_{n=0}^k a_n \right\}_{k=0}^{\infty}$.
2. Wenn die Reihe $\left\{ \sum_{n=0}^k a_n \right\}_{k=0}^{\infty}$ divergiert, dann divergiert die Reihe $\left\{ \sum_{n=0}^k b_n \right\}_{k=0}^{\infty}$.

Beweis. Weil die zweite Aussage die logische Umkehrung der ersten Aussage ist, brauchen wir nur eine zu beweisen. Also nehmen wir an, die Folge $\left\{ \sum_{n=0}^k b_n \right\}_{k=0}^{\infty}$ ist konvergent, dass heißt, es gibt $s \in \mathbb{R}$ mit

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{n=0}^k b_n = s.$$

- i. Weil $0 \leq b_n$ für alle $n \in \mathbb{N}$, gilt $\sum_{n=0}^k b_n \leq s$ für alle $k \in \mathbb{N}$.
- ii. Weil $a_n \leq b_n$ für alle $n \in \mathbb{N}$, gilt $\sum_{n=0}^k a_n \leq s$ für alle $k \in \mathbb{N}$.
Die Folge $\left\{ \sum_{n=0}^k a_n \right\}_{k=0}^{\infty}$ ist also nach oben durch s beschränkt.
- iii. Weil $0 \leq a_n$ für alle $n \in \mathbb{N}$, ist die Folge $\left\{ \sum_{n=0}^k a_n \right\}_{k=0}^{\infty}$ monoton wachsend.

Eine beschränkte, monoton wachsende Folge hat einen Limes. ■

7.3 Konvergenz für Reihen mit beliebigen Gliedern

Intermezzo. Betrachten wir zunächst als Beispiel die Reihe $\left\{ \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k}{k+1} \right\}_{n=0}^{\infty}$, das heißt, die Folge der Partialsummen mit den Gliedern $\left\{ 1, -\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, -\frac{1}{4}, \frac{1}{5}, -\frac{1}{6}, \frac{1}{7}, -\frac{1}{8}, \dots \right\}$ und

$$\sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k+1} = 1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{3} - \frac{1}{4} + \frac{1}{5} - \frac{1}{6} + \frac{1}{7} - \frac{1}{8} + \dots$$

Wenn wir wie folgt vorgehen,

$$\begin{aligned} & 1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{3} - \frac{1}{4} + \frac{1}{5} - \frac{1}{6} + \frac{1}{7} - \frac{1}{8} + \dots \\ &= 1 + \underbrace{\frac{1}{2} - 2 \cdot \frac{1}{2}}_0 + \frac{1}{3} + \underbrace{\frac{1}{4} - 2 \cdot \frac{1}{4}}_0 + \frac{1}{5} + \underbrace{\frac{1}{6} - 2 \cdot \frac{1}{6}}_0 + \frac{1}{7} + \underbrace{\frac{1}{8} - 2 \cdot \frac{1}{8}}_0 + \dots \\ &= \mathbf{1} + \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}} - \mathbf{1} + \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{3}} + \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{4}} - \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}} + \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{5}} + \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{6}} - \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{3}} + \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{7}} + \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{8}} - \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{4}} + \dots \end{aligned}$$

dann sieht man, dass so jedes positive Glied sich kürzt mit dem korrespondierenden negativen Glied und man so als Limes 0 bekommen sollte. Andererseits hat man auch

$$\begin{aligned} & 1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{3} - \frac{1}{4} + \frac{1}{5} - \frac{1}{6} + \frac{1}{7} - \frac{1}{8} + \dots \\ &= \left(1 - \frac{1}{2}\right) + \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{4}\right) + \left(\frac{1}{5} - \frac{1}{6}\right) + \left(\frac{1}{7} - \frac{1}{8}\right) + \dots \\ &= \frac{1}{2} + \frac{1}{12} + \frac{1}{30} + \frac{1}{56} + \dots \geq \frac{1}{2}. \end{aligned}$$

Damit hätten wir bewiesen, dass

$$0 = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n+1} \geq \frac{1}{2}.$$

Oder doch nicht?

In dem komischen ‘Beweis’ haben wir umgeordnet beim Addieren und das ist im Allgemeinen nur gültig bei endlich vielen Änderungen. Die Kommutativität besagt, dass $a + b = b + a$ und wenn man diese Regel (und die Assoziativität) 4 mal benutzt, hat man auch

$$a + b + c + d + e = e + d + c + b + a.$$

Dass man diese Regel auch bei unendlich vielen Termen benutzen darf, ist nie gesagt worden und ist im Allgemeinen auch nicht gültig.

Definition 7.5 Die Folge $\{b_n\}_{n=0}^{\infty}$ heißt eine **Umordnung** von $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$, wenn es eine bijektive Abbildung $\sigma : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ gibt, so dass $b_n = a_{\sigma(n)}$.

Wie wir mit dem Beispiel gesehen haben, kann sich der Limes einer Reihe ändern nach Umordnen. Für Reihen mit positiven Gliedern gibt es eine Ausnahme.

Lemma 7.6 Sei $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ eine reelle Folge mit $a_n \geq 0$ und derart, dass $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n a_k = \ell$ existiert. Dann gilt auch für jede Umordnung σ , dass $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n a_{\sigma(k)} = \ell$.

Beweis. Setze $N_{\sigma}(n) = \max\{\sigma(k); 0 \leq k \leq n\}$ und weil $a_k \geq 0$ folgt, dass

$$s_n := \sum_{k=0}^n a_{\sigma(k)} \leq \sum_{k=0}^{N_{\sigma}(n)} a_k \leq \ell.$$

Weil $\{s_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ wachsend und beschränkt ist, ist die Folge konvergent, sagen wir $s := \lim_{n \rightarrow \infty} s_n$. Also gilt $s \leq \ell$. Ebenso ist die Inverse σ^{invers} von σ eine Umordnung und dies liefert $\ell \leq s$. ■

Für Reihen mit sowohl negativen als auch positiven Gliedern hat man im Intermezzo gesehen, dass eine Umordnung zu einem anderen Ergebnis führen kann. Auch für Reihen in \mathbb{C} gibt es dieses Phänomen. Dies passiert jedoch nicht bei jeder solchen Folge. Solche Reihen haben einen Namen:

Definition 7.7 Sei $a_n \in \mathbb{C}$ für alle $n \in \mathbb{N}$. Die Reihe $\{\sum_{k=0}^n a_k\}_{n \in \mathbb{N}}$ heißt **unbedingt konvergent**, wenn die Reihe $\{\sum_{k=0}^n a_{\sigma(k)}\}_{n \in \mathbb{N}}$ für jede Umordnung σ konvergiert.

Bemerkung 7.7.1 Wenn eine Reihe konvergent, aber nicht unbedingt konvergent ist, heißt sie **bedingt konvergent**.

Beispiel 7.3. Die Reihe $\left\{ \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k}{k+1} \right\}_{n \in \mathbb{N}}$ ist bedingt konvergent. Man kann eine Umordnung finden, so dass die umgeordnete Reihe divergiert. ■

Beispiel 7.4. Die Reihe $\left\{ \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k}{(k+1)^2} \right\}_{n \in \mathbb{N}}$ ist unbedingt konvergent. Für jede Umordnung konvergiert die zugehörige Reihe und zwar zum gleichen Limes:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k}{(k+1)^2} = \frac{\pi^2}{12}.$$

Diese Zahl können wir erst später berechnen.

Wenn $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ eine Folge reeller Zahlen ist, dann findet man durch

$$a_n^+ := \begin{cases} a_n & \text{wenn } a_n \geq 0, \\ 0 & \text{wenn } a_n < 0. \end{cases} \quad \text{und} \quad a_n^- := \begin{cases} 0 & \text{wenn } a_n \geq 0, \\ -a_n & \text{wenn } a_n < 0. \end{cases}$$

zwei Folgen mit nicht-negativen Zahlen $\{a_n^+\}_{n=0}^{\infty}$ und $\{a_n^-\}_{n=0}^{\infty}$. Bemerke, dass $a_n^+, a_n^- \geq 0$ und $a_n = a_n^+ - a_n^-$ gilt.

Proposition 7.8 Sei $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ eine Folge reeller Zahlen. Nehme an, $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n a_k = \ell$ existiert. Dann gelten die folgenden Aussagen:

1. Die Reihe $\left\{ \sum_{k=0}^n a_k \right\}_{n \in \mathbb{N}}$ ist unbedingt konvergent genau dann, wenn $\left\{ \sum_{k=0}^n a_k^+ \right\}_{n \in \mathbb{N}}$ und $\left\{ \sum_{k=0}^n a_k^- \right\}_{n \in \mathbb{N}}$ beide konvergieren.
2. Wenn die Reihe $\left\{ \sum_{k=0}^n a_k \right\}_{n \in \mathbb{N}}$ unbedingt konvergent ist, dann gilt für jede Umordnung, dass

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n a_{\sigma(k)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n a_k.$$

Beweis. 1. \implies (durch Widerspruch)

Nehmen wir an $\left\{ \sum_{k=0}^n a_k^+ \right\}_{n \in \mathbb{N}}$ ist divergent. Wir schreiben $b_n = a_n^+$. Wenn $\left\{ \sum_{k=0}^n b_k \right\}_{n \in \mathbb{N}}$ nicht konvergiert, dann folgt, weil $b_n \geq 0$ ist, dass $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n b_k = \infty$. Denn nach oben beschränkte wachsende Folgen haben einen Grenzwert. Wir konstruieren nun die folgende Umordnung.

Sei $n_1 \in \mathbb{N}$ derart, dass $\sum_{k=0}^{n_1} b_k \geq 1$ und nehme an, die Indizes innerhalb $\{0, 1, \dots, n_1\}$ für die $a_k = b_k$ gilt, sind $\{m_{1,1}, \dots, m_{1,\ell_1}\}$. Sei $m_{1,0}$ der erste Index mit $a_{m_{1,0}} < 0$.

Sei $n_2 \in \mathbb{N}$ derart, dass $\sum_{k=0}^{n_2} b_k \geq 2 - a_{m_{1,0}}$ und nehme an, die Indizes innerhalb $\{n_1 + 1, \dots, n_2\}$ für die $a_k = b_k$ gilt, sind $\{m_{2,1}, \dots, m_{2,\ell_2}\}$. Sei $m_{2,0}$ der zweite Index mit $a_{m_{2,0}} < 0$.

Sei $n_3 \in \mathbb{N}$ derart, dass $\sum_{k=0}^{n_3} b_k \geq 3 - a_{m_{1,0}} - a_{m_{2,0}}$ und nehme an, die Indizes innerhalb $\{n_2 + 1, \dots, n_3\}$ für die $a_k = b_k$ gilt, sind $\{m_{3,1}, \dots, m_{3,\ell_3}\}$. Sei $m_{3,0}$ der dritte Index mit $a_{m_{3,0}} < 0$. Und so weiter. Die Folge

$$\left\{ \underbrace{a_{m_{1,1}}, \dots, a_{m_{1,\ell_1}}}_{\text{positiv}}, \underbrace{a_{m_{1,0}}}_{\text{negativ}}, \underbrace{a_{m_{2,1}}, \dots, a_{m_{2,\ell_2}}}_{\text{positiv}}, \underbrace{a_{m_{2,0}}}_{\text{negativ}}, \underbrace{a_{m_{3,1}}, \dots, a_{m_{3,\ell_3}}}_{\text{positiv}}, a_{m_{3,0}}, \dots \right\}$$

ist eine umgeordnete Folge mit

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n a_{\sigma(k)} = \infty.$$

Weil die Annahme ist, dass jede Umordnung konvergiert, folgt der Widerspruch.

Auch wenn $\{\sum_{k=0}^n a_k^-\}_{n \in \mathbb{N}}$ divergent ist, folgt ähnlich ein Widerspruch.

1. \Leftarrow (direkt)

Sei σ eine Umordnung. Weil $a_k^+ \geq 0$ kann man Lemma 7.6 verwenden. Wenn $\{\sum_{k=0}^n a_k^+\}_{n \in \mathbb{N}}$ konvergiert, dann ist auch $\{\sum_{k=0}^n a_{\sigma(k)}^+\}_{n \in \mathbb{N}}$ konvergent, und es gilt, dass

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n a_{\sigma(k)}^+ = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n a_k^+.$$

Ähnliches trifft zu für $\{\sum_{k=0}^n a_k^+\}_{n \in \mathbb{N}}$ und es folgt, dass

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n a_{\sigma(k)} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n (a_{\sigma(k)}^+ - a_{\sigma(k)}^-) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{k=0}^n a_{\sigma(k)}^+ - \sum_{k=0}^n a_{\sigma(k)}^- \right) \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n a_{\sigma(k)}^+ - \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n a_{\sigma(k)}^- = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n a_k^+ - \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n a_k^- \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{k=0}^n a_k^+ - \sum_{k=0}^n a_k^- \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n (a_k^+ - a_k^-) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n a_k. \end{aligned} \quad (7.3)$$

2. Diese Aussage folgt aus 1 und (7.3). ■

Im ersten Teil des Beweises haben wir für eine nur bedingt konvergente Reihe eine Umordnung so konstruiert, dass die zugehörige umgeordnete Reihe nach ∞ konvergiert. Statt ∞ hätte man ähnlich auch eine beliebige Zahl $s \in \mathbb{R}$ nehmen können. Dies ist genau die Aussage des Riemannschen Umordnungssatzes. Er besagt, dass man eine bedingt konvergente Reihe mit reellen Koeffizienten so umordnen kann, dass sie nach einer beliebigen reellen Zahl konvergiert.

7.4 Absolute Konvergenz

Definition 7.9 Sei $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ eine Folge komplexer Zahlen. Eine Reihe $\{\sum_{k=0}^n a_k\}_{n \in \mathbb{N}}$ heißt **absolut konvergent**, wenn $\{\sum_{k=0}^n |a_k|\}_{n \in \mathbb{N}}$ konvergent ist.

Proposition 7.10 Sei $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ eine Folge komplexer Zahlen. Dann sind äquivalent:

1. $\{\sum_{k=0}^n a_k\}_{n \in \mathbb{N}}$ ist unbedingt konvergent.
2. $\{\sum_{k=0}^n |a_k|\}_{n \in \mathbb{N}}$ ist absolut konvergent.

Beweis. Wenn $\{\sum_{k=0}^n a_k\}_{n \in \mathbb{N}}$ unbedingt konvergent ist, dann sind auch $\{\sum_{k=0}^n \operatorname{Re} a_k\}_{n \in \mathbb{N}}$ und $\{\sum_{k=0}^n \operatorname{Im} a_k\}_{n \in \mathbb{N}}$ unbedingt konvergent. Und umgekehrt, wenn $\{\sum_{k=0}^n \operatorname{Re} a_k\}_{n \in \mathbb{N}}$ und $\{\sum_{k=0}^n \operatorname{Im} a_k\}_{n \in \mathbb{N}}$ unbedingt konvergent sind, ist auch $\{\sum_{k=0}^n a_k\}_{n \in \mathbb{N}}$ unbedingt konvergent.

Weiterhin folgt mit dem Majorantenkriterium, weil

$$|\operatorname{Re} a_k| \leq |a_k|, \quad |\operatorname{Im} a_k| \leq |a_k| \quad \text{und} \quad |a_k| \leq |\operatorname{Re} a_k| + |\operatorname{Im} a_k|,$$

dass $\{\sum_{k=0}^n |a_k|\}_{n \in \mathbb{N}}$ konvergent ist, genau dann wenn sowohl $\{\sum_{k=0}^n |\operatorname{Re} a_k|\}_{n \in \mathbb{N}}$ als auch $\{\sum_{k=0}^n |\operatorname{Im} a_k|\}_{n \in \mathbb{N}}$ konvergent sind. Also reicht es auch hier, die Aussage für reelle Folgen zu beweisen. Nehmen wir also an, $a_n \in \mathbb{R}$.

\implies : Wenn $\{\sum_{k=0}^n a_k\}_{n \in \mathbb{N}}$, mit $a_n \in \mathbb{R}$ für alle $n \in \mathbb{N}$, unbedingt konvergent ist, dann impliziert Proposition 7.8, dass $\{\sum_{k=0}^n a_k^+\}_{n \in \mathbb{N}}$ und $\{\sum_{k=0}^n a_k^-\}_{n \in \mathbb{N}}$ konvergieren. Weil

$$\sum_{k=0}^n |a_k| = \sum_{k=0}^n a_k^+ + \sum_{k=0}^n a_k^-$$

gilt, konvergiert $\{\sum_{k=0}^n |a_k|\}_{n \in \mathbb{N}}$.

\impliedby : Wenn $\{\sum_{k=0}^n |a_k|\}_{n \in \mathbb{N}}$ konvergiert, liefert das Majorantenkriterium die Konvergenz von $\{\sum_{k=0}^n a_k^+\}_{n \in \mathbb{N}}$ und $\{\sum_{k=0}^n a_k^-\}_{n \in \mathbb{N}}$. ■

Korollar 7.11 (Absolute Konvergenz impliziert Konvergenz)

Sei $a_n \in \mathbb{C}$. Wenn $\{\sum_{k=0}^n |a_k|\}_{n \in \mathbb{N}}$ konvergent ist, ist auch $\{\sum_{k=0}^n a_k\}_{n \in \mathbb{N}}$ konvergent.

Beweis. Absolute Konvergenz liefert unbedingte Konvergenz. Unbedingte Konvergenz enthält Konvergenz. ■

Wir geben eine kurze Übersicht, wie man Reihen $\left\{ \sum_{n=0}^k a_n \right\}_{k \in \mathbb{N}}$ klassifizieren kann:

- | | |
|--|---|
| <p>1. konvergent</p> <p>2. divergent</p> | $\left\{ \begin{array}{l} \text{1a. unbedingt konvergent} = \text{absolut konvergent} \\ \text{1b. bedingt konvergent} = \left\{ \begin{array}{l} \text{konvergent,} \\ \text{jedoch nicht absolut} \end{array} \right\} \end{array} \right.$ |
|--|---|

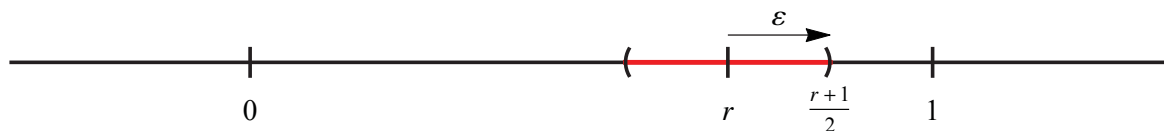
7.5 Zwei Konvergenzkriterien

Lemma 7.12 (Quotientenkriterium) Sei $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ eine komplexe Folge, so dass

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{|a_{n+1}|}{|a_n|} = r \in \mathbb{R}$$

existiert.

- Wenn $r < 1$, dann ist $\sum_{n=0}^{\infty} a_n$ absolut konvergent.
- Wenn $r > 1$, dann ist $\sum_{n=0}^{\infty} a_n$ divergent.

Abbildung 7.1: Die ε -Umgebung von r

Beweis. Nehme $\varepsilon = \frac{1}{2} |1 - r|$. Für $r \neq 1$ ist $\varepsilon > 0$ und es gibt $N_\varepsilon \in \mathbb{N}$, so dass

$$\left| \frac{|a_{n+1}|}{|a_n|} - r \right| < \varepsilon \text{ für } n > N_\varepsilon.$$

Für $r < 1$ hat man $\frac{r+1}{2} < 1$ und liegt die ε -Umgebung von r links von $\frac{r+1}{2}$. Siehe auch Abbildung 7.1.

Es folgt, dass

$$\frac{|a_{n+1}|}{|a_n|} = \frac{|a_{n+1}|}{|a_n|} - r + r < \varepsilon + r = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}r < 1 \text{ für } n > N_\varepsilon$$

und via

$$|a_{n+2}| \leq \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}r\right) |a_{n+1}| \leq \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}r\right)^2 |a_n| \text{ für } n > N_\varepsilon$$

auch, dass

$$|a_n| \leq \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}r\right)^{n-N_\varepsilon-1} |a_{N_\varepsilon+1}| \text{ für } n > N_\varepsilon.$$

Weil $\frac{1}{2} + \frac{1}{2}r < 1$ gilt, ist $\sum_{k=N_\varepsilon+1}^{\infty} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}r\right)^{n-N_\varepsilon-1} |a_{N_\varepsilon+1}|$ eine konvergente geometrische Reihe. Mit dem Majorantenkriterium konvergiert $\sum_{k=N_\varepsilon+1}^{\infty} |a_n|$ und so auch $\sum_{k=0}^{\infty} |a_n|$.

Wenn $r > 1$ folgt

$$\frac{|a_{n+1}|}{|a_n|} = \frac{|a_{n+1}|}{|a_n|} - r + r > -\varepsilon + r = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}r > 1 \text{ für } n > N_\varepsilon$$

und

$$|a_n| \geq |a_{N_\varepsilon+1}| > 0 \text{ für } n > N_\varepsilon.$$

Also entweder $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n$ existiert nicht, oder $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n \neq 0$. Weil $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$ eine notwendige Bedingung ist für Konvergenz, ist $\sum_{n=0}^{\infty} a_n$ divergent. ■

Lemma 7.13 (Wurzelkriterium) Sei $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ eine komplexe Folge.

Setze $\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = r \in [0, \infty]$.

- Wenn $r < 1$, dann ist $\sum_{n=0}^{\infty} a_n$ absolut konvergent.
- Wenn $r > 1$, dann ist $\sum_{n=0}^{\infty} a_n$ divergent.
- Wenn $\sum_{n=0}^{\infty} a_n$ bedingt konvergent ist, dann gilt $r = 1$.

Bemerkung 7.13.1 Wenn $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|}$ existiert, dann gilt $\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|}$. Der Limes Superior einer nicht negativen Folge „existiert“ immer in $[0, \infty]$.

Beweis. Wenn $r < 1$ gilt und wir $\varepsilon = \frac{1}{2}(1 - r)$ nehmen, gibt es $N_\varepsilon \in \mathbb{N}$, so dass

$$\sqrt[n]{|a_n|} < r + \varepsilon \text{ für } n > N_\varepsilon.$$

Wenn $\sqrt[n]{|a_n|} < r + \varepsilon = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}r$, folgt

$$|a_n| < \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}r\right)^n \text{ für } n > N_\varepsilon$$

mit $\frac{1}{2} + \frac{1}{2}r < 1$ und wir können fortfahren wie beim Quotientenkriterium.

Wenn $r > 1$ gilt, dann gibt es eine Teilfolge $\{a_{n_k}\}_{k=0}^\infty$, so dass $\sqrt[n_k]{|a_{n_k}|} > 1$ und also auch $|a_{n_k}| > 1$. Das heißt, entweder $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n$ existiert nicht, oder $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n \neq 0$. Weil $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$

eine notwendige Bedingung ist für Konvergenz, ist $\sum_{n=0}^\infty a_n$ divergent.

Wenn man $r \neq 1$ hat, dann ist die Reihe entweder divergent (wenn $r > 1$) oder absolut konvergent (wenn $r < 1$). Damit ist bedingte Konvergenz ausgeschlossen. ■

7.6 Konvergenz bei alternierenden Gliedern

Wir haben uns nicht umsonst erst mal beschränkt auf Reihen mit positiven Gliedern. Wenn so eine Reihe konvergent ist, dann ist sie auch absolut konvergent und man muss sich keine Sorgen darüber machen, in welcher Folge man die Glieder addiert. Für Reihen mit Vorzeichenwechsel und auch für Reihen mit komplexen Gliedern ist Konvergenz eine kompliziertere Sache. Es kann sein, dass eine Umordnung konvergiert und eine andere divergiert. Einige Spezialfälle kann man aber trotzdem angehen. Insbesondere bei Reihen mit alternierenden Gliedern kann man oft relativ einfach Konvergenz beweisen.

Man nennt eine reelle Folge $\{a_n\}_{n=0}^\infty$ alternierend, wenn $a_n a_{n+1} < 0$ für alle $n \in \mathbb{N}$, das heißt, das Vorzeichen zweier aufeinanderfolgender Termen ist negativ. Ein Beispiel ist $\sum_{n=0}^\infty \frac{(-1)^n}{n+1}$.

Lemma 7.14 (Kriterium von Leibniz)

Sei $\{a_n\}_{n=0}^\infty$ eine reelle Folge mit folgenden Eigenschaften:

1. $(-1)^n a_n > 0$ für alle $n \in \mathbb{N}$, also $\{a_n\}_{n=0}^\infty$ alternierend;
2. $|a_{n+1}| \leq |a_n|$ für alle $n \in \mathbb{N}$, also $\{|a_n|\}_{n=0}^\infty$ fallend;
3. $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$, also $\{a_n\}_{n=0}^\infty$ Nullfolge.

Dann gilt: $\sum_{n=0}^\infty a_n$ ist konvergent.

Beweis. Setzen wir

$$\alpha_k = \sum_{n=0}^k a_n$$

und betrachten wir zusätzlich die Folgen $\{\beta_k\}_{k=0}^\infty$ und $\{\gamma_k\}_{k=0}^\infty$ mit

$$\beta_k = \sum_{n=0}^{2[\frac{1}{2}k]} a_n \text{ und } \gamma_k = \sum_{n=0}^{2[\frac{1}{2}k]+1} a_n.$$

Das sieht zwar kompliziert aus, vereinfacht sich jedoch wie folgt:

$$\begin{aligned}\beta_k &: \{a_0, a_0, a_0 - |a_1| + a_2, a_0 - |a_1| + a_2, a_0 - |a_1| + a_2 - |a_3| + a_4, \dots\}, \\ \alpha_k &: \{a_0, a_0 - |a_1|, a_0 - |a_1| + a_2, a_0 - |a_1| + a_2 - |a_3|, a_0 - |a_1| + a_2 - |a_3| + a_4, \dots\}, \\ \gamma_k &: \{a_0 - |a_1|, a_0 - |a_1|, a_0 - |a_1| + a_2 - |a_3|, a_0 - |a_1| + a_2 - |a_3|, a_0 - |a_1| + a_2 - |a_3| + a_4 - |a_5|, \dots\}.\end{aligned}$$

Man findet, dass $\{\beta_k\}_{k=0}^\infty$ eine monoton fallende Folge und $\{\gamma_k\}_{k=0}^\infty$ eine monoton wachsende Folge ist. Weil beide Folgen beschränkt sind, haben sie einen Grenzwert, sagen wir ℓ_γ und ℓ_β . Weil

$$\beta_k - \gamma_k = \left| a_{2\lfloor \frac{1}{2}k \rfloor + 1} \right|$$

und $\lim_{k \rightarrow \infty} a_{2\lfloor \frac{1}{2}k \rfloor + 1} = 0$, hat man $\ell_\beta = \ell_\gamma$. Außerdem hat man

$$\gamma_k \leq \alpha_k \leq \beta_k$$

und das Sandwichlemma liefert $\lim_{k \rightarrow \infty} \alpha_k = \ell_\beta$. ■

Mit Hilfe dieses Kriteriums finden wir, dass $\sum_{n=0}^\infty (-1)^n \frac{1}{n+1}$ konvergent ist. Wir werden später noch mal zeigen, dass

$$\sum_{n=0}^\infty (-1)^n \frac{1}{n+1} = \log 2. \quad (7.4)$$

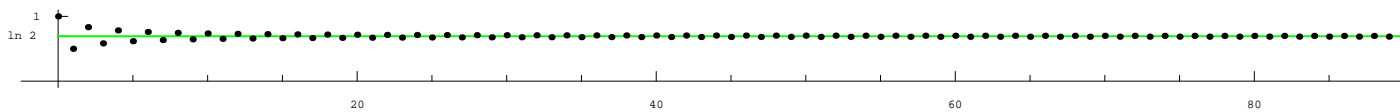


Abbildung 7.2: Graphische Darstellung für die Reihe in (7.4)

Für das nächste Beispiel verwenden wir die folgenden Schulkenntnisse über den Logarithmus. Man sieht in der Literatur sowohl $\ln(\cdot)$ als auch $\log(\cdot)$ für den Logarithmus.

1. $\ln : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$ ist strikt wachsend und surjektiv.
2. Es gilt $\ln(xy) = \ln(x) + \ln(y)$ für $x, y \in \mathbb{R}^+$.
Dies impliziert, dass für $x \in \mathbb{R}^+$ und $n \in \mathbb{N}$ gilt $\ln(x^n) = n \ln(x)$, und außerdem, dass $\ln(1) = 0$.
3. Es gibt eine Zahl $e \in (2, 3)$ mit $\ln(e) = 1$.

Beispiel 7.5. Betrachten wir $\sum_{n=10}^\infty \frac{(-1)^n}{\ln(\ln n)}$.

- Weil $10 > 9 > e^2$ und der Logarithmus strikt wachsend ist, folgt für $n \geq 10$, dass

$$\ln(\ln n) \geq \ln(\ln(e^2)) \geq \ln 2 > \ln 1 = 0.$$

Dann sind die Glieder also alternierend.

- Weil der Logarithmus wachsend ist, ist $\left\{ \frac{1}{\ln(\ln n)} \right\}_{n=10}^\infty$ eine monoton fallende Folge.

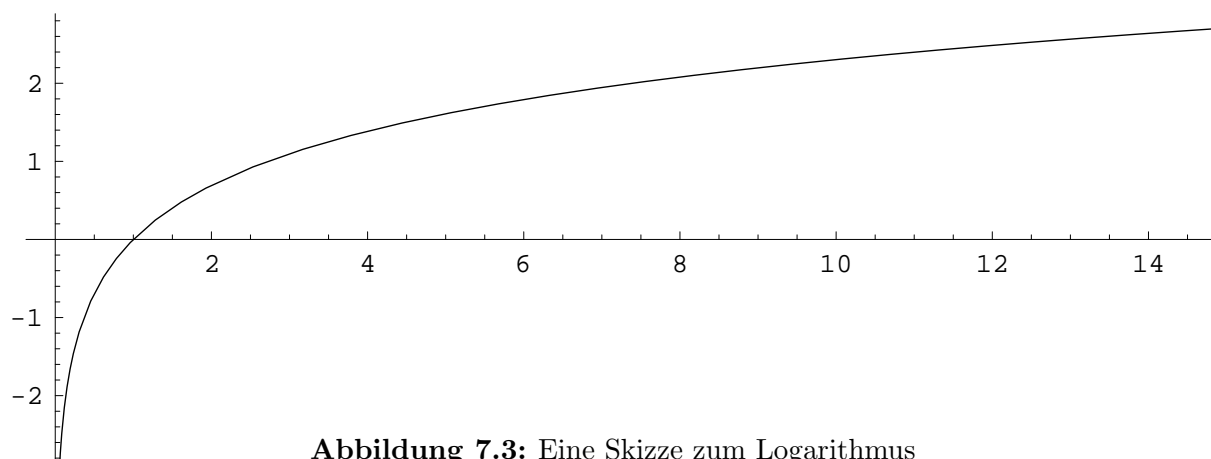


Abbildung 7.3: Eine Skizze zum Logarithmus

- Weil der Logarithmus wachsend und surjektiv ist, folgt $\ln x \rightarrow \infty$ wenn $x \rightarrow \infty$. Dies impliziert, dass $\frac{1}{\ln(\ln n)} \rightarrow 0$ für $n \rightarrow \infty$.

Das Kriterium von Leibniz trifft zu und die Reihe ist konvergent.

Die Frage, ob diese Reihe vielleicht auch absolut konvergent ist, kann man verneinen. Weil $\ln(x) \leq x$ für $x > 0$ gilt², folgt $\ln \ln(n) \leq \ln(n) \leq n$ für $n \geq 3$ und dann auch die folgende Abschätzung:

$$\frac{1}{\ln \ln(n)} \geq \frac{1}{n}.$$

Man sieht mit dem Majorantenkriterium, dass die Reihe nicht absolut konvergent ist. ■

²Für $x \in (0, 1]$ gilt $\ln(x) \leq \ln(1) = 0 < x$.

Für $x \in (e^n, e^{n+1}]$ mit $n \in \mathbb{N}$ gilt $\ln(x) \leq \ln(e^{n+1}) = n+1 \leq 2^n \leq e^n < x$.

7.7 Rezeptur

Wie geht man auf eine strukturierte Art die Frage an, ob eine Reihe $\left\{ \sum_{n=0}^k b_n \right\}_{k=0}^{\infty}$ konvergiert? Die folgende Anleitung kann dazu helfen. Wir verwenden dabei die Kurznotation $\sum_{n=0}^{\infty} b_n$ für die Reihe.

1 Frage: $b_n \rightarrow 0$?

Antwort:	$\begin{cases} \text{Ja} & \text{--> Frage } \mathbf{2}. \\ \text{Nein} & \text{--> Reihe } \mathbf{divergent}. \end{cases}$
----------	--

2 Frage: Reihe absolut konvergent? Dazu $\sum_{n=0}^{\infty} |b_n|$ vergleichen mit bekannter Reihe:

(a) Polynomialer Typ: $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n^q}$ und ähnlich. Benutze Majorantenkriterium mit $\frac{c}{n^q}$ und $c > 0$.

Antwort:	$\begin{cases} b_n \geq \frac{c}{n^q} \text{ und } q \leq 1 & \text{--> } \sum_{n=0}^{\infty} b_n \text{ } \mathbf{divergent}. \\ b_n \leq \frac{c}{n^q} \text{ und } q > 1 & \text{--> } \sum_{n=0}^{\infty} b_n \text{ und auch } \sum_{n=0}^{\infty} b_n \text{ } \mathbf{konvergent}. \end{cases}$
----------	--

Wenn b_n kein festes Vorzeichen hat und $\sum_{n=0}^{\infty} |b_n|$ divergiert: --> Frage **3**.

(b) Potenztyp: $\sum_{n=0}^{\infty} r^n$ und ähnlich. Berechne r durch (Quotienten- oder) Wurzelkriterium.

Antwort:	$\begin{cases} \limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{ b_n } = r > 1 & \text{--> } \sum_{n=0}^{\infty} b_n \text{ } \mathbf{divergent}. \\ \limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{ b_n } = r = 1 & \text{--> Frage } \mathbf{3}. \\ \limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{ b_n } = r < 1 & \text{--> } \sum_{n=0}^{\infty} b_n \text{ } \mathbf{konvergent}. \end{cases}$
----------	---

Bemerkung: $r > 1$ sollte nicht auftreten, denn dann gilt nicht $b_n \rightarrow 0$.

(c) Anderer Typ: --> Frage **3**.

3 Frage: Glieder alternierend und Leibniz trifft zu?

Antwort:	$\begin{cases} \text{Ja} & \text{--> Reihe } \mathbf{konvergent}. \\ \text{Nein} & \text{--> } \mathbf{4}. \end{cases}$
----------	---

4 Eigene Kreativität gefragt.

Analysis 1, Woche 8

Reihen II

A1

8.1 Summen und Produkte von Reihen

Wenn wir zwei Reihen haben, die konvergieren, dann folgt aus „Grenzwert der Summe ist Summe der Grenzwerte“, dass man die zwei Reihen addieren kann und dass der Limes so ist, wie man vielleicht naiv erwartet.

Lemma 8.1 Seien $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ und $\{b_n\}_{n=0}^{\infty}$ zwei (komplexe) Folgen und sei $A, B \in \mathbb{C}$. Wenn $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n a_k = A$ und $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n b_k = B$, dann gilt $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n (a_k + b_k) = A + B$.

Bemerkung 8.1.1 Obwohl hier umgeordnet wird, ist es so, dass man sich bei dieser bestimmten Umordnung keine Sorgen zur Konvergenz machen muss.

Beweis. Schreibe $A_n = \sum_{k=0}^n a_k$ und $B_n = \sum_{k=0}^n b_k$, dann folgt das Ergebnis aus

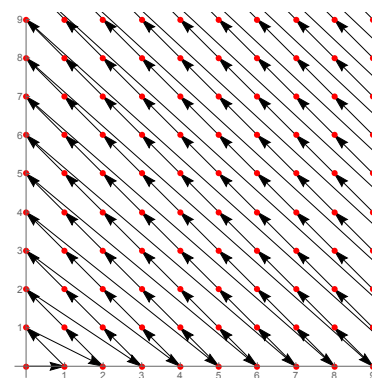
$$\lim_{n \rightarrow \infty} (A_n + B_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} A_n + \lim_{n \rightarrow \infty} B_n.$$

■

Im nächsten Lemma finden wir eine Möglichkeit, ein Produkt zweier Reihen umzuordnen zu einer Reihe mit Termen $c_k = \sum_{m=0}^k a_m b_{k-m}$.

Lemma 8.2 Seien $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ und $\{b_n\}_{n=0}^{\infty}$ zwei (komplexe) Folgen. Wenn $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ und $\sum_{k=0}^{\infty} b_k$ absolut konvergent sind, dann gilt

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n \left(\sum_{m=0}^k a_m b_{k-m} \right) = \left(\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n a_k \right) \left(\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n b_k \right).$$



Bemerkung 8.2.1 In der Skizze sollen die roten Punkte die Zahlen $a_i b_j$ darstellen, und die Pfeile die Reihenfolge der Umordnung in $\sum_{k=0}^{\infty} \sum_{m=0}^k a_m b_{k-m}$.

Beweis. Man bemerke, dass

$$\{(m, k - m); 0 \leq m \leq k \leq n\} = \{(m, \ell); 0 \leq m, \ell \text{ und } \ell + m \leq n\}$$

gilt, und dies uns in den folgenden Abschätzungen die erste Gleichung liefert

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^n \left| \sum_{m=0}^k a_m b_{k-m} \right| &\leq \sum_{k=0}^n \sum_{m=0}^k |a_m b_{k-m}| = \sum_{\ell=0}^n \sum_{m=0}^{n-\ell} |a_m b_\ell| \leq \\ &\leq \sum_{\ell=0}^n \sum_{m=0}^n |a_m b_\ell| = \left(\sum_{m=0}^n |a_m| \right) \left(\sum_{\ell=0}^n |b_\ell| \right). \end{aligned}$$

Dann ist also die Umordnung absolut konvergent, wenn $\sum_{m=0}^{\infty} a_m$ und $\sum_{k=0}^{\infty} b_k$ es sind.

So ist $\left\{ \sum_{k=0}^n \sum_{m=0}^k |a_m b_{k-m}| \right\}_{n \in \mathbb{N}}$ wachsend und nach oben beschränkt, und hat also einen Grenzwert. Weil absolute Konvergenz gewöhnliche Konvergenz impliziert, ist auch $\left\{ \sum_{k=0}^n \sum_{m=0}^k a_m b_{k-m} \right\}_{n \in \mathbb{N}}$ konvergent.

Wir zeigen anschließend, dass

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n \sum_{m=0}^k a_m b_{k-m} = \left(\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n a_k \right) \left(\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n b_k \right).$$

Dazu vergleichen wir

$$I_n := \sum_{k=0}^n a_k \sum_{\ell=0}^n b_\ell \text{ und } II_n := \sum_{k=0}^n \sum_{m=0}^k a_m b_{k-m}.$$

Es gilt

$$|I_n - II_n| = \left| \sum_{\substack{m+\ell > n \\ m, \ell \leq n}} a_m b_\ell \right| \leq \sum_{m > \frac{1}{2}n} \sum_{\ell \geq 0} |a_m| |b_\ell| + \sum_{m \geq 0} \sum_{\ell > \frac{1}{2}n} |a_m| |b_\ell|. \quad (8.1)$$

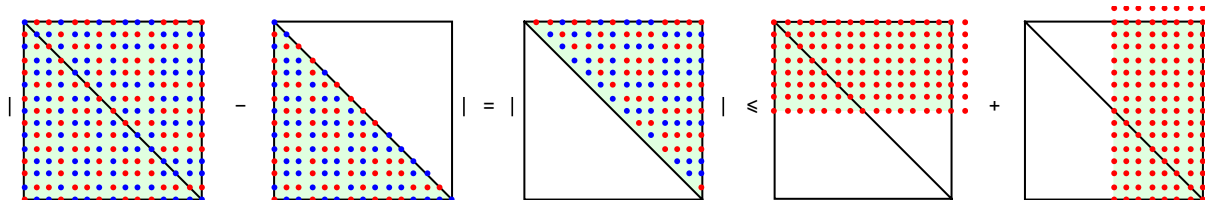


Abbildung 8.1: Skizze zu den Termen in I_n und II_n und wie man sie abschätzt in (8.1).

Weil $\sum_{m=0}^{\infty} a_m$ absolut konvergent ist, folgt

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{m > \frac{1}{2}n} |a_m| = 0 \text{ und } A := \sum_{m \geq 0} |a_m| < \infty.$$

Ebenso, weil $\sum_{\ell=0}^{\infty} b_\ell$ absolut konvergent ist, folgt

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{\ell > \frac{1}{2}n} |b_\ell| = 0 \text{ und } B := \sum_{\ell \geq 0} |b_\ell| < \infty.$$

Mit (8.1) folgert man, dass

$$|I_n - II_n| \leq B \sum_{m > \frac{1}{2}n} |a_m| + A \sum_{\ell > \frac{1}{2}n} |b_\ell|,$$

und mit dem Einschließungslemma findet man $\lim_{n \rightarrow \infty} |I_n - II_n| = 0$. ■

8.2 Potenzreihen

Definition 8.3 Sei $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ eine (komplexe) Folge und $z \in \mathbb{C}$. Dann nennt man

$$\left\{ \sum_{k=0}^n a_k z^k \right\}_{n=0}^{\infty}$$

eine Potenzreihe in z .

Man findet für die $z \in D \subset \mathbb{C}$, bei dem $\sum_{k=0}^{\infty} a_k z^k$ konvergiert, eine Funktion

$$\left(z \mapsto \sum_{k=0}^{\infty} a_k z^k \right) : D \subset \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}.$$

Naiv könnte man sagen, dass so eine Potenzreihe ein Polynom von Grad ∞ wäre. Das ist aber nicht üblich und auch irreführend. Den Namen „Polynom“ reservieren wir für Funktionen von der folgenden Form mit $N \in \mathbb{N}$:

$$p(z) = \sum_{k=0}^N a_k z^k.$$

Ein Polynom ist definiert für alle $z \in \mathbb{C}$. Bei einer Potenzreihe ist das nicht der Fall. Zum Beispiel ist $\sum_{k=0}^{\infty} z^k$ nur definiert für $|z| < 1$. Ähnliches gilt für jede Potenzreihe, wie man im nächsten Lemma sehen kann.

Lemma 8.4 Sei $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ eine (komplexe) Folge und sei $\left\{ \sum_{k=0}^n a_k z^k \right\}_{n=0}^{\infty}$ eine Potenzreihe in z . Dann gibt es $R_a \in [0, \infty]$, so dass:

1. wenn $|z| < R_a$, dann ist $\sum_{k=0}^{\infty} a_k z^k$ absolut konvergent;
2. wenn $|z| > R_a$, dann ist $\sum_{k=0}^{\infty} a_k z^k$ divergent.

Wir werden nun etwas schlampig und schreiben $\sum_{k=0}^{\infty} a_k z^k$ manchmal für die Reihe und manchmal auch für den möglichen Grenzwert $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n a_k z^k$.

Bemerkung 8.4.1 Dieses R_a heißt der **Konvergenzradius** zu $\sum_{k=0}^{\infty} a_k z^k$. Man kann ihn berechnen auf folgende Weise: Setze

$$\ell_a = \limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|}.$$

Dieser Limes ℓ_a existiert in $[0, \infty]$. Das heißt, entweder $\ell_a \in [0, \infty)$ ist eine reelle Zahl, oder das Symbol ∞ . Es gilt

$$R_a = \begin{cases} 0 & \text{wenn } \ell_a = \infty, \\ \ell_a^{-1} & \text{wenn } \ell_a \in \mathbb{R}^+, \\ \infty & \text{wenn } \ell_a = 0. \end{cases} \quad (8.2)$$

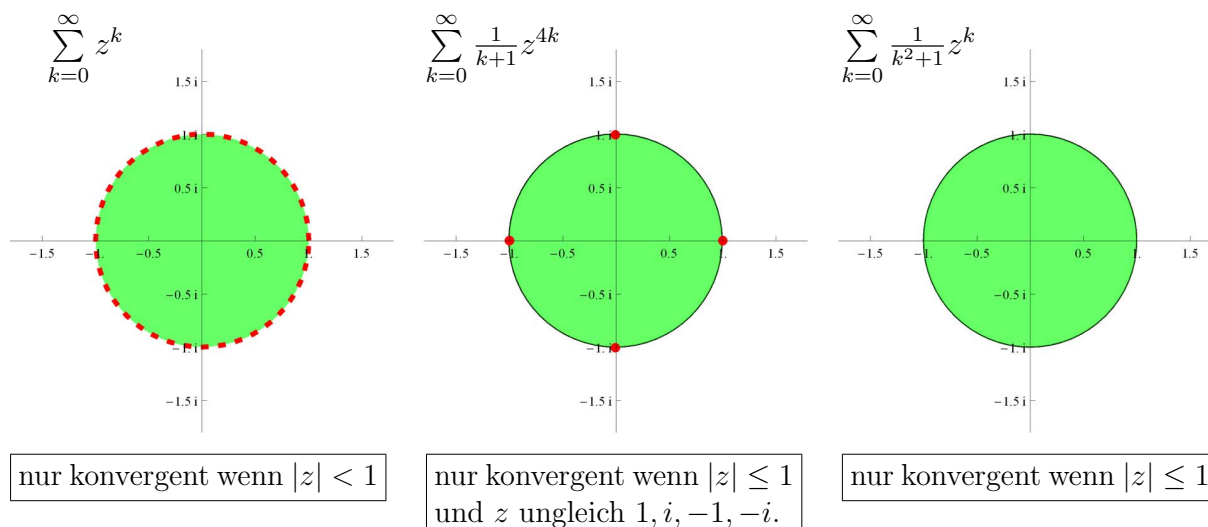


Abbildung 8.2: Konvergenzgebiete

Bemerkung 8.4.2 Für $|z| = R_a$ kann man nicht ohne weiteres eine Aussage machen, ob die Potenzreihe konvergent oder divergent ist. Wir geben drei Beispiele mit gleichem Konvergenzradius aber unterschiedlichen Konvergenzgebieten in Abbildung 8.2.

Beweis von Lemma 8.4. Man benutze das Wurzelkriterium. Für die Potenzreihe gilt

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n z^n|} < 1 \Rightarrow \sum_{k=0}^{\infty} a_k z^k \text{ konvergent,}$$

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n z^n|} > 1 \Rightarrow \sum_{k=0}^{\infty} a_k z^k \text{ divergent.}$$

Das Ergebnis folgt, indem man bemerkt, dass

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n z^n|} = |z| \limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = \ell_a |z|.$$

Die genügenden Bedingungen für Konvergenz, respektive Divergenz, nämlich $\ell_a |z| < 1$ und $\ell_a |z| > 1$, lassen sich mit R_a in (8.2) übersetzen in respektive $|z| < R_a$ und $|z| > R_a$.

■

8.2.1 Exponentialreihe

Definition 8.5 Die Exponentialreihe in $z \in \mathbb{C}$ definiert man durch

$$\exp(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} z^n.$$

Weil für $n \in \mathbb{N}$ (und gerade) gilt, dass

$$\begin{aligned} 0 \leq \sqrt[n]{\frac{1}{n!}} &= \sqrt[n]{\frac{1}{n(n-1)(n-2)\dots(n/2)(n/2-1)\dots 3 2 1}} \\ &\leq \sqrt[n]{\frac{1}{(\frac{1}{2}n)(\frac{1}{2}n)(\frac{1}{2}n)\dots(\frac{1}{2}n) 1 \dots 1 1 1}} \\ &= \frac{1}{\sqrt[n]{(\frac{1}{2}n)^{(\frac{1}{2}n)}}} = \sqrt{2} n^{-\frac{1}{2}} = \sqrt{2/n}, \end{aligned}$$

und weil $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{2/n} = 0$ gilt (und eine ähnliche Abschätzung für ungerade n), findet man

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{\left| \frac{1}{n!} \right|} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{\left| \frac{1}{n!} \right|} = 0.$$

Es folgt mit dem Wurzelkriterium, dass:

Lemma 8.6 $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} z^n$ hat den Konvergenzradius $R = \infty$.

Das hat wiederum zur Folge, dass $(z \mapsto \exp(z)) : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ wohldefiniert ist.

Lemma 8.7 Für alle $w, z \in \mathbb{C}$ gilt:

$$\exp(w + z) = \exp(w) \exp(z).$$

Beweis. Weil die Reihe $\sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} z^k$ absolut konvergent ist für alle $z \in \mathbb{C}$, können wir aus Lemma 8.2 schließen, dass

$$\begin{aligned} \exp(w) \exp(z) &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} w^k \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m!} z^m = \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \left(\sum_{m+k=n} \frac{1}{k!} w^k \frac{1}{m!} z^m \right) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} \frac{1}{(n-k)!} w^k z^{n-k} = \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \sum_{k=0}^n \frac{n!}{k!(n-k)!} w^k z^{n-k} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \left(\sum_{k=0}^n \binom{n}{k} w^k z^{n-k} \right) = \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} (w+z)^n = \exp(w+z). \end{aligned}$$

■

8.2.2 Binomialreihe

Definition 8.8 Die Binomialreihe für $s \in \mathbb{C}$ in $z \in \mathbb{C}$ setzt man

$$\text{bin}(s; z) = \sum_{n=0}^{\infty} \binom{s}{n} z^n.$$

Wir erinnern noch mal daran, dass für $s \in \mathbb{C}$ und $n \in \mathbb{N}$ gilt

$$\binom{s}{n} = \frac{s(s-1)(s-2)\dots(s-n+2)(s-n+1)}{n(n-1)(n-2)\dots 2 \quad 1} = \prod_{m=0}^{n-1} \frac{s-m}{n-m}.$$

Für $n, s \in \mathbb{N}$ mit $n > s$ gilt $\binom{s}{n} = 0$. Wenn $s \in \mathbb{N}$ gilt, folgt also

$$\text{bin}(s; z) = \sum_{n=0}^{\infty} \binom{s}{n} z^n = \sum_{n=0}^s \binom{s}{n} z^n = (1+z)^s$$

und $\text{bin}(s; z)$ ist dann ein Polynom.

Lemma 8.9 Für $s \in \mathbb{C} \setminus \mathbb{N}$ hat $\sum_{n=0}^{\infty} \binom{s}{n} z^n$ den Konvergenzradius $R = 1$.

Beweis mit Quotientenkriterium. Wenn $s \in \mathbb{C} \setminus \mathbb{N}$, dann gilt

$$\binom{s}{n} \neq 0 \text{ für alle } n \in \mathbb{N}.$$

Nehmen wir also $s \notin \mathbb{N}$ und betrachten den Quotienten zweier aufeinanderfolgender Glieder, so finden wir:

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\left| \binom{s}{n+1} z^{n+1} \right|}{\left| \binom{s}{n} z^n \right|} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{\frac{s(s-1)(s-2)\dots(s-(n+1)+2)(s-(n+1)+1)}{(n+1)n(n-1)\dots 2 \quad 1} z^{n+1}}{\frac{s(s-1)(s-2)\dots(s-n+2)(s-n+1)}{n(n-1)(n-2)\dots 2 \quad 1} z^n} \right| \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{\frac{1}{(n+1)} \frac{(s-n)}{1}}{\frac{1}{1}} z \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{|s-n|}{n+1} |z| = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{|\frac{s}{n} - 1|}{\left(1 + \frac{1}{n}\right)} |z| = |z|. \end{aligned}$$

Also konvergiert die Reihe, wenn $|z| < 1$, und sie divergiert, wenn $|z| > 1$. Der Konvergenzradius ist also 1. ■

Lemma 8.10 Für alle $t, s \in \mathbb{C}$ und $z \in \mathbb{C}$ mit $|z| < 1$ gilt:

$$\text{bin}(t; z) \text{bin}(s; z) = \text{bin}(s+t; z).$$

Beweis. Weil $R = 1$ der Konvergenzradius ist, dürfen wir wegen Lemma 8.2 für $|z| < 1$ die Umordnung durchführen:

$$\begin{aligned} \text{bin}(t; z) \text{bin}(s; z) &= \sum_{k=0}^{\infty} \binom{t}{k} z^k \sum_{m=0}^{\infty} \binom{s}{m} z^m = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\sum_{k+m=n} \binom{t}{k} z^k \binom{s}{m} z^m \right) \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \left(\sum_{k+m=n} \binom{t}{k} \binom{s}{m} \right) z^n = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\sum_{k=0}^n \binom{t}{k} \binom{s}{n-k} \right) z^n \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \binom{t+s}{n} z^n. \end{aligned}$$

Die letzte Identität benutzt das folgende Ergebnis: ■

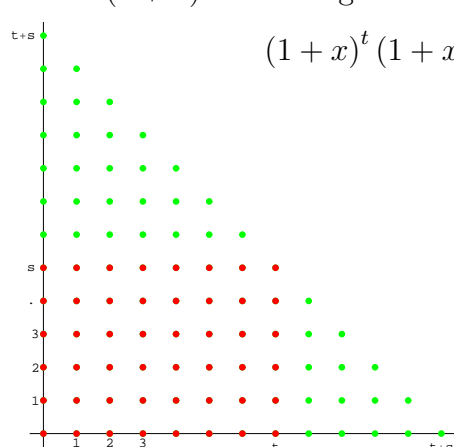
Lemma 8.11 Sei $t, s \in \mathbb{C}$ und $n \in \mathbb{N}$. Dann gilt

$$\sum_{k=0}^n \binom{t}{k} \binom{s}{n-k} = \binom{t+s}{n}. \quad (8.3)$$

Beweis. Der Beweis geht in mehreren Schritten. Zuerst nehmen wir an, dass $t, s \in \mathbb{N}$. Für $t, s \in \mathbb{N}$ gilt nämlich

$$(1+x)^{t+s} = \sum_{n=0}^{t+s} \binom{t+s}{n} x^n. \quad (8.4)$$

Wenn wir $(1+x)^{t+s}$ wie folgt schreiben, finden wir



$$\begin{aligned} (1+x)^t (1+x)^s &= \sum_{k=0}^t \binom{t}{k} x^k \sum_{m=0}^s \binom{s}{m} x^m \\ &= \sum_{k=0}^t \sum_{m=0}^s \binom{t}{k} \binom{s}{m} x^{k+m} \\ &= \sum_{n=0}^{t+s} \sum_{m+k=n} \binom{t}{k} \binom{s}{m} x^{k+m} \\ &= \sum_{n=0}^{t+s} \left(\sum_{k=0}^n \binom{t}{k} \binom{s}{n-k} \right) x^n. \end{aligned} \quad (8.5)$$

Man soll bemerken, dass die letzten zwei Summen über eine größere Menge summieren. Weil aber $\binom{t}{k} = 0$ für $k > t \in \mathbb{N}$ und $\binom{s}{m} = 0$ für $m > s \in \mathbb{N}$, bleibt die Summe gleich. Weil die beiden Polynome in (8.4) und (8.5) identisch sind, sind die Koeffizienten identisch und es folgt (8.3).

Der zweite Schritt betrifft den Fall $s \in \mathbb{N}$ und $t \in \mathbb{C}$. Für $s \in \mathbb{N}$ fest gewählt betrachten wir die folgenden Polynome in t :

$$p_1(t) = \binom{t+s}{n} \quad \text{und} \quad p_2(t) = \sum_{k=0}^n \binom{t}{k} \binom{s}{n-k}.$$

Sowohl p_1 als auch p_2 ist ein Polynom von Grad n . Das Besondere ist, dass $p_1(t) = p_2(t)$ für alle $t \in \mathbb{N}$, weil dann das Ergebnis aus dem ersten Abschnitt gilt. Also ist $p_1(t) - p_2(t)$ ein Polynom von Grad höchstens n , das Nullstellen hat für alle $t \in \mathbb{N}$. Das geht nur wenn $p_1 - p_2 = 0$. Das heißt, wir haben jetzt bewiesen, dass (8.3) gilt für alle $t \in \mathbb{C}$ und $s \in \mathbb{N}$.

Der dritte Schritt betrifft den Fall $s \in \mathbb{C}$ und $t \in \mathbb{N}$. Weil die Gleichung in (8.3) symmetrisch bezüglich s und t ist, trifft auch zu, dass (8.3) stimmt für alle $t \in \mathbb{N}$ und $s \in \mathbb{C}$.

Den Trick mit den Polynomen p_1 und p_2 können wir nochmals benutzen, jetzt aber für jedes $s \in \mathbb{C}$ fest gewählt. Wir bekommen dann, dass (8.3) gilt für alle $s, t \in \mathbb{C}$. ■

Was kann man mit der Binomialreihe?

- Wenn $n > s \in \mathbb{N}$, hat man $\binom{s}{n} = 0$, und man bekommt

$$\text{bin}(s; z) = \sum_{n=0}^{\infty} \binom{s}{n} z^n = \sum_{n=0}^s \binom{s}{n} z^n = (1+z)^s.$$

- Für $s \in \mathbb{Q}^+$, sagen wir $s = \frac{k}{m}$ mit $k, m \in \mathbb{N}^+$, bekommt man

$$(\operatorname{bin}(s; z))^m = \operatorname{bin}(ms; z) = \operatorname{bin}(k; z) = (1 + z)^k.$$

Weil für $x \in (-1, 1)$ gilt, dass $\operatorname{bin}(s; x) \in \mathbb{R}$, hat man für ungerade m

$$\operatorname{bin}(s; x) = (1 + x)^s. \quad (8.6)$$

Für gerade m findet man $\operatorname{bin}(s; z) = \pm (1 + z)^s$. Weil aber $\operatorname{bin}(s; 0) = 1$ gilt, erwartet man auch da (8.6). Wir werden im nächsten Kapitel zeigen, dass $z \mapsto \operatorname{bin}(s; z)$ stetig ist auf $B_1(0) = \{z \in \mathbb{C}; |z| < 1\}$. Aus Stetigkeit und $\operatorname{bin}(s; 0) = 1$ folgt (8.6) auch für m gerade.

- Für $s \in \mathbb{Q}^-$, benutzt man $\operatorname{bin}(s; x) \operatorname{bin}(-s; x) = \operatorname{bin}(0; x) = 1$ und damit folgt aus (8.6) für $s \in \mathbb{Q}^+$ die Gültigkeit der Formel auch für $s \in \mathbb{Q}^-$.

Jetzt kommt jedoch das Interessanteste. Wir konnten vorhin nur direkt Potenzen x^q für $x > 0$ und $q \in \mathbb{Q}$ definieren. Die Binomialreihe lässt mit Kunst- und Handwerk eine Erweiterung zu nach $q \in \mathbb{C}$.

Eine Definition der **Potenz** x^s für $s \in \mathbb{C}$ (und $x \in \mathbb{R}^+$) geht wie folgt:

- Die Formel in (8.6) kann man benutzen, um x^s zu definieren für $x \in \mathbb{R}^+$ und $s \in \mathbb{C}$. Nämlich für $x \in (0, 2)$ und $s \in \mathbb{C}$:

$$x^s = \operatorname{bin}(s; x - 1),$$

für $x \in [2, 4)$ und $s \in \mathbb{C}$:

$$x^s = \operatorname{bin}(2s; x^{\frac{1}{2}} - 1),$$

für $x \in [4, 8)$ und $s \in \mathbb{C}$:

$$x^s = \operatorname{bin}(3s; x^{\frac{1}{3}} - 1),$$

usw.

Man könnte auf diese Art x^s definieren für alle $x \in \mathbb{R}^+$ und $s \in \mathbb{C}$:

Sei $x \in \mathbb{R}^+$ und sei $s \in \mathbb{C}$.

- Für $x \in (0, 2)$ nimmt man $x^s = \operatorname{bin}(s; x - 1)$.
- Sei $n \in \mathbb{N}$ und $n \geq 2$. Für $x \in [2^{n-1}, 2^n)$ nimmt man $x^s = \operatorname{bin}(ns; x^{\frac{1}{n}} - 1)$.

Vorher hatten wir x^s nur für $s \in \mathbb{Q}$ definiert. Wir werden eine derartige Definition jedoch nicht verwenden, denn wenn man den Logarithmus eingeführt hat, ist

$$x^s := \exp(s \ln(x)) \text{ für } x \in \mathbb{R}^+ \text{ und } s \in \mathbb{C}$$

viel einfacher.

Analysis 1, Woche 9

A1

Stetigkeit I

9.1 Grenzwerte bei Funktionen

9.1.1 Der einfachste Fall

Wir erinnern noch mal an den Grenzwert bei einer Folge. Sei $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ eine reelle (oder komplexe) Folge. Dann heißt ℓ der Limes oder der Grenzwert dieser Folge, notiert als

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \ell,$$

wenn

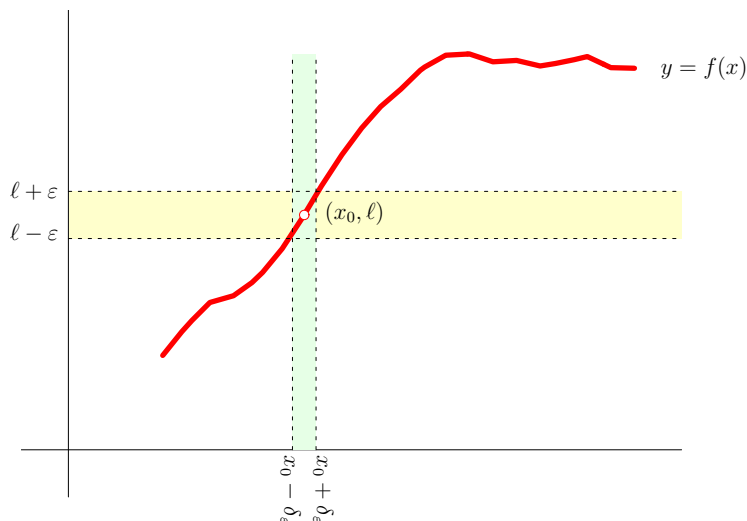
$$\forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N} \forall n \in \mathbb{N} : n > N \Rightarrow |a_n - \ell| < \varepsilon. \quad (9.1)$$

Um zu zeigen, dass $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \ell$, muss man also für jedes $\varepsilon > 0$ eine Zahl $N \in \mathbb{N}$ angeben können, so dass, wenn n größer N ist, a_n weniger als ε von ℓ entfernt liegt.

Eine ähnliche Struktur möchte man beim Limes einer Funktion haben.

Definition 9.1 (des Limes bei einer Funktion) Sei die Funktion $f : \mathbb{R} \setminus \{x_0\} \rightarrow \mathbb{R}$ gegeben. Dann sagt man „ $\ell \in \mathbb{R}$ ist der Limes von f für x gegen x_0 “ und schreibt $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \ell$, wenn

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 \forall x \in \mathbb{R} : 0 < |x - x_0| < \delta \Rightarrow |f(x) - \ell| < \varepsilon. \quad (9.2)$$



Um zu zeigen, dass

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

muss man also für jedes $\varepsilon > 0$ eine Zahl $\delta_\varepsilon > 0$ angeben können, so dass wenn $x \neq x_0$ weniger als δ_ε entfernt von x_0 liegt, $f(x)$ weniger als ε entfernt von ℓ liegt.

Bemerkung 9.1.1 Ähnlich wie man in (9.1) „ $N = N_\varepsilon$ “ hat, gilt auch hier „ $\delta = \delta_\varepsilon$ “.

Bemerkung 9.1.2 Genau gleich definiert man für eine Funktion $f : \mathbb{C} \setminus \{z_0\} \rightarrow \mathbb{C}$ den Limes $\ell \in \mathbb{C}$ von f für z gegen z_0 , wenn gilt:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 \forall x \in \mathbb{C} : 0 < |x - z_0| < \delta \Rightarrow |f(x) - \ell| < \varepsilon. \quad (9.3)$$

Beispiel 9.1. Für die Funktion $f : \mathbb{R} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $f(x) = \frac{1}{x^5} \exp\left(\frac{-1}{x^2}\right)$ gilt $\lim_{x \rightarrow 0} f(x) = 0$.

Wir verwenden, dass

$$\exp(-a) = \frac{1}{\exp(a)} \text{ für alle } a \in \mathbb{C}$$

und dass

$$\exp(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} t^k \geq \frac{1}{3!} t^3 \text{ für } t \geq 0.$$

Das erste Ergebnis zeigt, dass

$$\frac{1}{x^5} \exp\left(\frac{-1}{x^2}\right) = \frac{1}{x^5 \exp\left(\frac{1}{x^2}\right)},$$

und das zweite zeigt, dass

$$|f(x) - 0| = \left| \frac{1}{x^5 \exp\left(\frac{1}{x^2}\right)} \right| \leq \frac{1}{|x^5| \frac{1}{3!} \left(\frac{1}{x^2}\right)^3} = 6 |x|.$$

Sei $\varepsilon > 0$. Dann folgt für $0 < |x - 0| < \delta := \frac{1}{6}\varepsilon$, dass $|f(x) - 0| \leq 6|x| < 6\delta = \varepsilon$. ■

Beispiel 9.2. Für die Funktion $f : \mathbb{R} \setminus \{0, 1\} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $f(x) = \frac{x}{x-1} - \frac{1}{x^2-x}$ gilt $\lim_{x \rightarrow 1} f(x) = 2$.

Sei $\varepsilon > 0$. Wir nehmen $\delta = \min\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\varepsilon\right)$. Dann ist $\delta > 0$ und es folgt für $0 < |x - 1| < \delta$, dass

$$\begin{aligned} |f(x) - 2| &= \left| \frac{x}{x-1} - \frac{1}{x^2-x} - 2 \right| = \left| \frac{-x^2 + 2x - 1}{x^2 - x} \right| \\ &= \left| \frac{-(x-1)^2}{x(x-1)} \right| = \left| -\frac{x-1}{x} \right| = \frac{|x-1|}{|x|} \leq 2|x-1| < 2\delta \leq \varepsilon. \end{aligned}$$

Die erste Ungleichung verwendet, dass für $|x - 1| < \delta \leq \frac{1}{2}$ folgendes gilt:

$$\frac{1}{|x|} = \frac{1}{x} < 2.$$

Die letzte Ungleichung gilt, weil wir $\delta \leq \frac{1}{2}\varepsilon$ gewählt haben. ■

9.1.2 Einseitiger Limes

Was machen wir, wenn statt einem Punkt im Definitionsgebiet von f noch viel mehr fehlt? Oder wenn wir uns absichtlich der Stelle nur von einer Seite annähern möchten? Zum Beispiel wollen wir auch den Grenzwert von \sqrt{x} für $x \rightarrow 0$ nehmen können. Weil die Wurzel aber nur für nicht-negative Zahlen definiert ist, kann man nur von oben zu 0 kommen. Oder wir wollen nur für x von rechts gegen 1 den Limes von $\frac{|x-1|}{x^2-1}$ berechnen.

Definition 9.2 (des einseitigen Limes bei einer Funktion)

1. Sei $f : (x_0, x_0 + s) \rightarrow \mathbb{R}$ mit $s > 0$ eine Funktion. Man sagt

ℓ ist der Limes von f für x von rechts (oder von oben) gegen x_0 ,

und schreibt $\lim_{x \downarrow x_0} f(x) = \ell$, wenn

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 \forall x \in \mathbb{R} : 0 < x - x_0 < \delta \Rightarrow |f(x) - \ell| < \varepsilon.$$

2. Sei $f : (x_0 - s, x_0) \rightarrow \mathbb{R}$ mit $s > 0$ eine Funktion. Man sagt

ℓ ist der Limes von f für x von links (oder von unten) gegen x_0 ,

und schreibt $\lim_{x \uparrow x_0} f(x) = \ell$, wenn

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 \forall x \in \mathbb{R} : -\delta < x - x_0 < 0 \Rightarrow |f(x) - \ell| < \varepsilon.$$

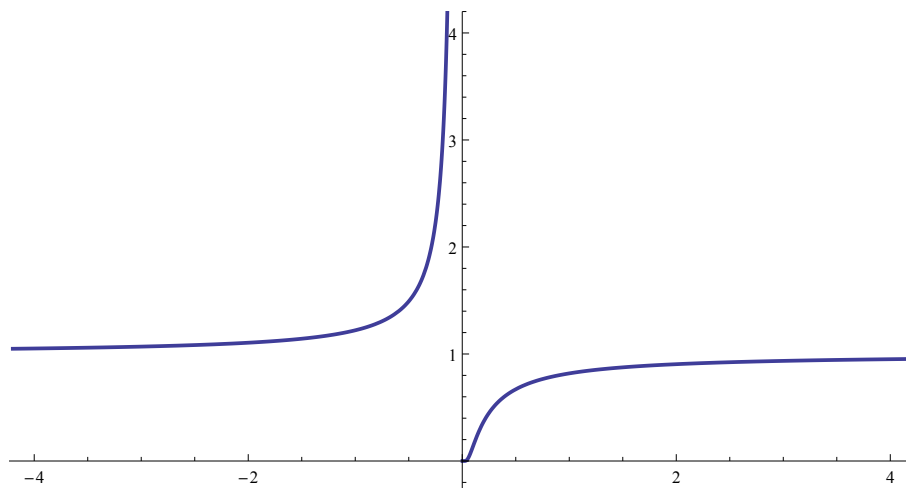


Abbildung 9.1: Skizze zu $f(x) = \exp\left(\frac{-1}{5x}\right)$. In 0 existiert nur der Limes von rechts.

Wenn wir Grenzwerte für Funktionen in \mathbb{C} nehmen wollen, dann können wir nicht nur von unten, sondern auch von der positiven imaginären Seite oder sogar noch auf andere Art dahin gehen (zum Beispiel über eine Spirale). Um all diese Möglichkeiten zusammenzufassen, braucht es den Begriff *punktierte r -Umgebung*:

- Sei $r \in \mathbb{R}^+$ und $a \in \mathbb{R}$. Die Menge $(a - r, a + r)$ heißt r -Umgebung von a in \mathbb{R} .
- Sei $r \in \mathbb{R}^+$ und $a \in \mathbb{R}$. Die Menge $(a - r, a) \cup (a, a + r)$ heißt punktierte r -Umgebung von a in \mathbb{R} .

Bemerkung 9.2.1 Auch in \mathbb{C} werden (punktierte) Umgebungen benutzt. Statt Intervalle in \mathbb{R} benutzt man kreisförmige Umgebungen:

- Sei $r \in \mathbb{R}^+$ und $a \in \mathbb{C}$. Die Menge $B_r(a) := \{x \in \mathbb{C}; |x - a| < r\}$ heißt r -Umgebung von a in \mathbb{C} .
- Sei $r \in \mathbb{R}^+$ und $a \in \mathbb{C}$. Die Menge $B_r(a)^* := \{x \in \mathbb{C}; 0 < |x - a| < r\}$ heißt punktierte r -Umgebung von a in \mathbb{C} .

Die Notation $B_r(a)$ und $B_r(a)^*$ werden wir auch benutzen in \mathbb{R} oder \mathbb{R}^n .

Jede Menge U für die es ein $r > 0$ gibt mit $B_r(a) \subset U$, heißt eine Umgebung von a .

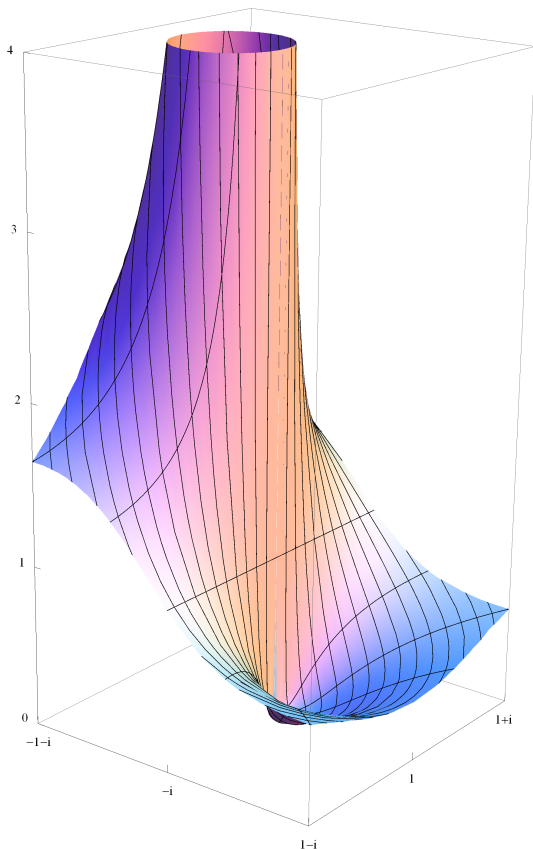
Bemerkung 9.2.2 Sei $f : A \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ (oder $A \subset \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$) eine Funktion. Wenn $B_r(x_0)^* \cap A$ nicht leer ist für alle $r > 0$, dann sagt man „ ℓ ist der Limes von f für x gegen x_0 innerhalb A “, notiert als

$$\lim_{\substack{x \rightarrow x_0 \\ x \in A}} f(x) = \ell,$$

wenn

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 \forall x \in A : 0 < |x - x_0| < \delta \Rightarrow |f(x) - \ell| < \varepsilon. \quad (9.4)$$

Beispiel 9.3. Hier unten findet man eine Skizze der Funktion $f : \mathbb{C} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{R}$, definiert durch



$$f(z) = \left| \exp\left(\frac{-1}{z}\right) \right|.$$

Wir können zeigen, dass

$$\lim_{\substack{z \rightarrow 0 \\ z \in \mathbb{R}^+}} f(z) = 0 \quad \text{und} \quad \lim_{\substack{z \rightarrow 0 \\ z \in \mathbb{R}^-}} f(z) = \infty.$$

Bald wird man auch zeigen können, dass

$$\lim_{\substack{z \rightarrow 0 \\ \operatorname{Re}(z)=0}} f(z) = 1,$$

und setzt man

$$A = \{z \in \mathbb{C}; |\operatorname{Im}(z)| < \operatorname{Re}(z)\},$$

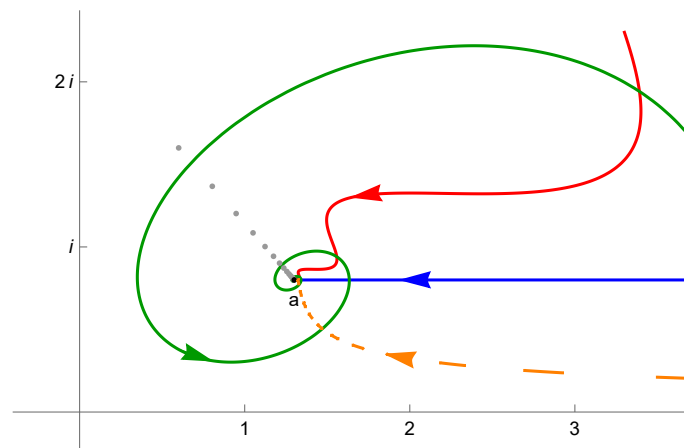
so folgt sogar

$$\lim_{\substack{z \rightarrow 0 \\ z \in A}} f(z) = 0.$$

Für $f : \{z \in \mathbb{R} \setminus \{a\}; |z - a| < r\} \rightarrow \mathbb{R}$ kann man sofort zeigen, dass

$$\lim_{x \downarrow a} f(x) = \lim_{x \uparrow a} f(x) = \ell \iff \lim_{x \rightarrow a} f(x) = \ell.$$

Für $f : \{z \in \mathbb{C} \setminus \{a\}; |z - a| < r\} \rightarrow \mathbb{R}$ gibt es viele Wege um nach a zu gehen und keine solche Aussage. Siehe Abbildung 9.2.

Abbildung 9.2: Mehrere Wege führen nach $a \in \mathbb{C}$.

9.1.3 Wenn der Limes nicht existiert

Was soll man machen, wenn man vermutet und beweisen möchte, dass eine Funktion f in x_0 keinen Limes hat?

Wir gehen mal direkt von der Definition aus. Nehmen wir an, es gilt nicht, dass $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \ell$, dann gibt es zwei Möglichkeiten:

1. entweder $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)$ existiert nicht, oder
2. $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)$ existiert, ist aber ungleich ℓ .

Schreiben wir (9.2) wie folgt:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 \forall x \in (x_0 - \delta, x_0 + \delta) \setminus \{x_0\} : |f(x) - \ell| < \varepsilon, \quad (9.5)$$

dann wird die Verneinung

$$\exists \varepsilon > 0 \forall \delta > 0 \exists x \in (x_0 - \delta, x_0 + \delta) \setminus \{x_0\} : |f(x) - \ell| \geq \varepsilon. \quad (9.6)$$

Die Aussage in (9.6) besagt „ $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \ell$ gilt nicht“ und lässt sowohl Möglichkeit 1 als auch 2 zu.

Um (9.6) zu zeigen, muss man ein $\varepsilon > 0$ finden, so dass es beliebig nahe bei x_0 ein x gibt mit $|f(x) - \ell| \geq \varepsilon$. Wie soll man dies in einem konkreten Fall angehen? Was nimmt man für ℓ , wenn der Limes nicht existiert? Bevor wir eine Antwort geben, zeigen wir erst das folgende Ergebnis:

Lemma 9.3 Sei $f : \mathbb{R} \setminus \{a\} \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion und $\ell \in \mathbb{R}$. Die folgenden Aussagen sind gleichwertig:

1. $f(x)$ konvergiert gegen ℓ für x nach a , oder anders geschrieben: $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = \ell$.
2. Für alle Folgen $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ mit $a_n \neq a$ und $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$ gilt $\lim_{n \rightarrow \infty} f(a_n) = \ell$.

Bemerkung 9.3.1 Man sagt: für reelle Funktionen sind Limes (1.) und Folgenlimes (2.) gleichwertig.

Bemerkung 9.3.2 Um zu zeigen, dass eine Funktion keinen Grenzwert hat ist der zweite Punkt sehr nützlich. Für $f : \mathbb{R} \setminus \{a\} \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion und $\ell \in \mathbb{R}$ sind die folgenden Aussagen gleichwertig:

- $f(x)$ konvergiert nicht gegen ℓ für x nach a .
- Es gibt eine Folge $\{a_n\}_{n=0}^{\infty} \subset \mathbb{R} \setminus \{a\}$ mit $a_n \rightarrow a$ und $f(a_n) \not\rightarrow \ell$ für $n \rightarrow \infty$.

Wenn man zeigen möchte, dass der Limes nicht gleich ℓ ist, reicht es also, eine Folge $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ zu finden, die gegen a geht, für die aber $\{f(a_n)\}_{n=0}^{\infty}$ nicht gegen ℓ geht.

Beweis. (\Rightarrow) Wenn $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = \ell$, dann gibt es für jedes $\varepsilon > 0$ ein $\delta_\varepsilon > 0$, so dass für $x \in B_{\delta_\varepsilon}(a)^*$ gilt $|f(x) - \ell| < \varepsilon$. Sei $\varepsilon > 0$, sei $\delta_\varepsilon > 0$ passend wie in der Definition und sei $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ eine Folge mit $a_n \neq a$ und $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$. Dann gibt es $N = N_{\delta_\varepsilon} \in \mathbb{N}$ derart, dass $|a_n - a| < \delta_\varepsilon$ für $n > N$. Weil $a_n \in B_{\delta_\varepsilon}(a)^*$ gilt, folgt $|f(a_n) - \ell| < \varepsilon$.

(\Leftarrow) Dies beweisen wir mittels der logischen Umkehrung:

$$A \Rightarrow B \text{ ist äquivalent zu } \neg B \Rightarrow \neg A.$$

Wenn $\lim_{x \rightarrow a} f(x) \neq \ell$, dann, wie oben bemerkt, gibt es $\varepsilon > 0$ so, dass für alle $\delta > 0$, also auch für $\delta = \frac{1}{n}$, mindestens ein $x \in B_\delta(a)^*$ existiert mit $|f(x) - \ell| \geq \varepsilon$. Nennen wir a_n eine solche zu $\delta = \frac{1}{n}$ passende Zahl x . Also gilt $a_n \in B_{1/n}(a)^*$ und $|f(a_n) - \ell| \geq \varepsilon$. Weil für jedes $n \in \mathbb{N}^+$ gilt, dass $|a - a_n| < \frac{1}{n}$, folgt $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$. Weil außerdem $|f(a_n) - \ell| \geq \varepsilon$, gilt $\lim_{n \rightarrow \infty} f(a_n) = \ell$ nicht. ■

Bis jetzt haben wir immer einen Kandidaten für ℓ bereitgehalten. Wenn man zeigen möchte, dass der Limes nicht existiert, kann man folgendes benutzen:

Lemma 9.4 Sei $f : \mathbb{R} \setminus \{x_0\} \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion. Der Limes $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)$ existiert genau dann nicht, wenn

1. es eine Folge $\{a_n\}_{n=0}^{\infty} \subset \mathbb{R} \setminus \{x_0\}$ gibt mit

$$a_n \rightarrow x_0 \quad \text{und} \quad |f(a_n)| \rightarrow \infty \quad \text{für } n \rightarrow \infty,$$

2. oder es zwei Folgen $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}, \{b_n\}_{n=0}^{\infty} \subset \mathbb{R} \setminus \{x_0\}$ gibt mit

$$\left. \begin{array}{l} a_n \rightarrow x_0 \quad \text{und} \quad f(a_n) \rightarrow \ell_a \\ b_n \rightarrow x_0 \quad \text{und} \quad f(b_n) \rightarrow \ell_b \neq \ell_a \end{array} \right\} \text{für } n \rightarrow \infty.$$

Beweis. (\Rightarrow) Fall *i*. Nehme an, es gibt keine Folge $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ mit

$$a_n \rightarrow x_0 \quad \text{und} \quad f(a_n) \rightarrow \ell \quad \text{für } n \rightarrow \infty \quad \text{und irgendein } \ell \in \mathbb{R}.$$

Dann konvergiert auch $\{f(x_0 + \frac{1}{n})\}_{n=1}^{\infty}$ nicht. Entweder ist diese Folge unbeschränkt und dann gibt es eine Teilfolge mit $|f(x_0 + \frac{1}{n})| \rightarrow \infty$, also gilt Aussage 1, oder diese Folge ist beschränkt. Jede beschränkte Folge in \mathbb{R} (und auch in \mathbb{C}) hat einen Häufungspunkt ℓ_1 und dann auch eine konvergente Teilfolge: $f(x_0 + \frac{1}{n_k}) \rightarrow \ell_1$. Das letzte ist ein Widerspruch zu der Annahme.

Fall *ii*. Nehme an, es gibt eine Folge $\{a_n\}_{n=0}^\infty$ mit

$$a_n \rightarrow x_0 \text{ und } f(a_n) \rightarrow \ell \text{ f\"ur } n \rightarrow \infty \text{ und irgendein } \ell \in \mathbb{R}.$$

Weil $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)$ nicht existiert, gibt es $\varepsilon > 0$ und f\"ur jedes $n \in \mathbb{N}^+$ mindestens ein b_n mit $|b_n - x_0| < \frac{1}{n}$ und $|f(b_n) - \ell| > \varepsilon$. Entweder ist $\{f(b_n)\}_{n=0}^\infty$ unbeschr\"ankt und gibt es eine Teilfolge $\{b_{n_k}\}_{k=0}^\infty$ mit $|f(b_{n_k})| \rightarrow \infty$, es folgt Aussage 1, oder $\{f(b_n)\}_{n=0}^\infty$ ist beschr\"ankt. Wenn $\{f(b_n)\}_{n=0}^\infty$ beschr\"ankt ist, dann gibt es einen H\"aufungspunkt ℓ^* und wir k\"onnen eine Teilfolge $\{f(b_{n_k})\}_{k=0}^\infty$ finden derart, dass $f(b_{n_k}) \rightarrow \ell^*$. Weil $|b_{n_k} - x_0| < \frac{1}{n_k} \rightarrow 0$ findet man $b_{n_k} \rightarrow x_0$. Aus

$$|\ell - \ell^*| = \lim_{k \rightarrow \infty} |f(a_k) - f(b_{n_k})| \geq \varepsilon$$

folgt $\ell \neq \ell^*$ und haben wir Aussage 2 bewiesen.

(\Leftarrow) Man nehme $\varepsilon = 1$ f\"ur Fall 1, beziehungsweise $\varepsilon = \frac{1}{4}|\ell_a - \ell_b|$ f\"ur Fall 2. Wenn ℓ der Limes w\"are, dann gibt es kein $\delta > 0$, so dass f\"ur alle x mit $0 < |x - x_0| < \delta$ gilt $|f(x) - \ell| < \varepsilon$. F\"ur den ersten Fall gibt es n\"amlich $a_n \in B_\delta(x_0)$ mit $|f(a_n)| > \ell + 1$. F\"ur den zweiten Fall gilt entweder $|\ell - \ell_a| \geq 2\varepsilon$ oder $|\ell - \ell_b| \geq 2\varepsilon$. Nehmen wir an $|\ell - \ell_a| \geq 2\varepsilon$, dann gibt es $a_n \in B_\delta(x_0)$ mit $|f(a_n) - \ell_a| < \varepsilon$ und

$$|f(a_n) - \ell| \geq |\ell_a - \ell| - |f(a_n) - \ell_a| > 2\varepsilon - \varepsilon = \varepsilon.$$

■

Beispiel 9.4. $\lim_{x \downarrow 0} \frac{1}{\sqrt{x}}$ existiert nicht. Nehmen Sie $\{\frac{1}{n}\}_{n=1}^\infty$:

$$\frac{1}{\sqrt{\frac{1}{n}}} = \sqrt{n} \rightarrow \infty \text{ f\"ur } n \rightarrow \infty.$$

■

Beispiel 9.5. $\lim_{x \downarrow 0} \sin(\frac{1}{x})$ existiert nicht. Dies zeigen wir wie folgt:

- Die Folge $\{\frac{1}{\pi n}\}_{n=0}^\infty$ konvergiert nach 0 und

$$\sin\left(\frac{1}{\frac{1}{\pi n}}\right) = \sin(\pi n) = 0 \rightarrow 0.$$

- Auch die Folge $\{\frac{2}{\pi(4n+1)}\}_{n=0}^\infty$ konvergiert nach 0 w\"ahrend

$$\sin\left(\frac{1}{\frac{2}{\pi(4n+1)}}\right) = \sin\left(2n\pi + \frac{1}{2}\pi\right) = 1 \rightarrow 1.$$

Zwei nach 0 konvergierende Folgen mit unterschiedlichen Grenzwerten bei der Funktion bedeutet, dass der Limes $\lim_{x \downarrow 0} \sin(\frac{1}{x})$ nicht existiert. Siehe Abbildung 9.3.

■

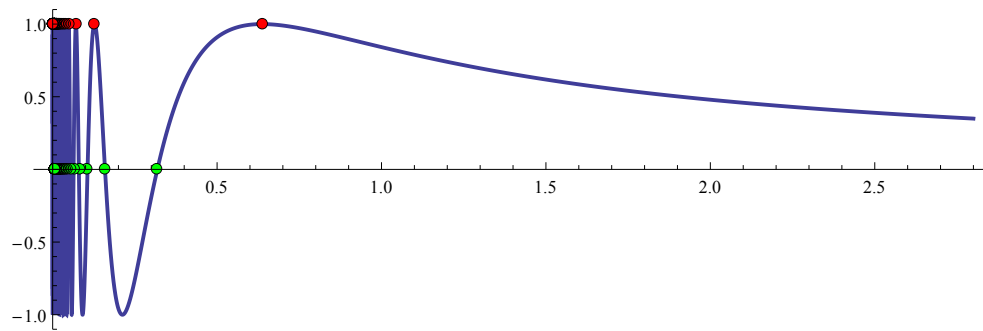


Abbildung 9.3: Skizze zu $f(x) = \sin\left(\frac{1}{x}\right)$ mit den Punkten $\left(\frac{2}{(4n+1)\pi}, 1\right)$ in rot und in grün $\left(\frac{1}{n\pi}, 0\right)$.

Beispiel 9.6. Betrachte die Funktion $f: \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$, definiert durch

$$f(x) = \frac{1}{3}x^{5/2} \left(\frac{1}{x} + \left[\frac{1}{x} \right] \right).$$

Hier ist $[\cdot]$ die Ganzzahlfunktion aus Definition 6.14. Was kann man sagen zu $\lim_{x \downarrow 0} f(x)$?

Weil für $t > 0$ folgt, dass $0 \leq t + [t] \leq 2t$ gilt, finden wir

$$0 \leq f(x) \leq \frac{1}{3}x^{5/2} \left(2\frac{1}{x} \right)$$

also für $x > 0$ gilt

$$0 \leq f(x) \leq \frac{2}{3}x^{3/2}$$

Weil $\lim_{x \downarrow 0} \frac{2}{3}x^{3/2} = 0$ folgt $\lim_{x \downarrow 0} f(x) = 0$. Will man dies mit der Definition zeigen, dann ist für $\varepsilon > 0$ die Zahl $\delta_\varepsilon := \left(\frac{3}{2}\varepsilon\right)^{2/3}$ passend. Selbstverständlich passt auch jedes kleinere $\delta_\varepsilon > 0$.

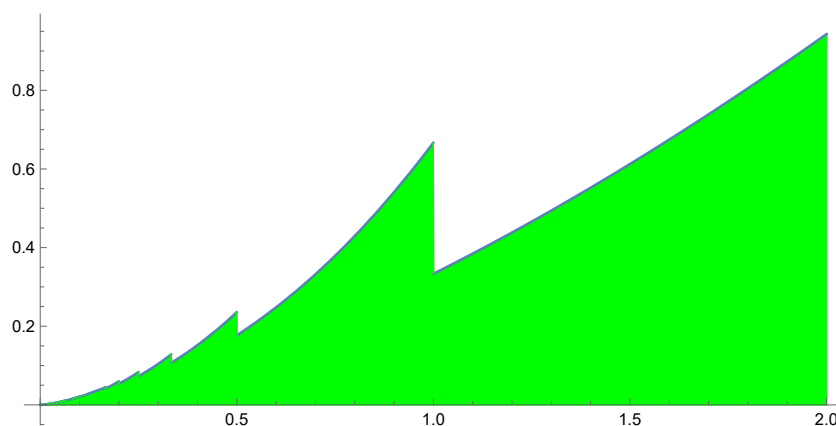


Abbildung 9.4: Skizze zu $f(x) = \frac{1}{3}x^{5/2} \left(\frac{1}{x} + \left[\frac{1}{x} \right] \right)$

Beispiel 9.7. Betrachte die Funktion $g: \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$, definiert durch

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

Was kann man sagen zu $\lim_{x \downarrow 0} g(x)$?

Nimmt man $x_n = \frac{1}{n+1}$ so gilt $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = 0$ und

$$\lim_{n \rightarrow \infty} g(x_n) = n + 1 - [n + 1] = n + 1 - (n + 1) = 0.$$

Nimmt man $y_n = \frac{1}{n+1/2}$ so gilt $\lim_{n \rightarrow \infty} y_n = 0$ und

$$\lim_{n \rightarrow \infty} g(y_n) = n + \frac{1}{2} - [n + \frac{1}{2}] = n + \frac{1}{2} - n = \frac{1}{2}.$$

Weil $0 \neq \frac{1}{2}$ existiert $\lim_{x \downarrow 0} g(x)$ nicht.

9.2 Stetigkeit

Definition 9.5 Die Funktion $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ (oder $\mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$) ist **stetig** in $a \in \mathbb{R}$, wenn

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

Bemerkung 9.5.1 Benutzt man die Definition vom Grenzwert, dann sieht man, dass stetig in a heißt:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 \forall x \in \mathbb{R} : |x - a| < \delta \Rightarrow |f(x) - f(a)| < \varepsilon. \quad (9.7)$$

Weil da für $x = a$ eine Trivialität steht: $|f(a) - f(a)| < \varepsilon$, kann man bei Stetigkeit die Bedingung $0 < |x - a|$ weglassen.

Bemerkung 9.5.2 Selbstverständlich passt man die Definition an, wenn f nur auf einem Teilgebiet definiert ist: Die Funktion $f : A \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ (oder $A \subset \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$) ist stetig in $a \in A$, wenn

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 \forall x \in A : |x - a| < \delta \Rightarrow |f(x) - f(a)| < \varepsilon. \quad (9.8)$$

- Wenn $A \cap B_r(a)^* = \emptyset$ für ein $r > 0$, dann ist die Bedingung in (9.8) trivialerweise erfüllt für alle $\delta \in (0, r]$.
- Wenn $A \cap B_r(a)^* \neq \emptyset$ für alle $r > 0$, dann schreibt man

$$\lim_{\substack{x \rightarrow a \\ x \in A}} f(x) = f(a).$$

Definition 9.6 Die Funktion $f : A \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ (oder $A \subset \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$) heißt **stetig**, wenn sie stetig ist in jedem $a \in A$:

$$\forall a \in A \forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 \forall x \in A : |x - a| < \delta \Rightarrow |f(x) - f(a)| < \varepsilon. \quad (9.9)$$

Es gibt auch den Begriff gleichmäßig stetig bei Funktionen. Bei einer stetigen Funktion $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ hängt δ nicht nur von ε ab, sondern kann auch von der Stelle a abhängen. Bei einer gleichmäßig stetigen Funktion darf δ nur von ε abhängen.

Definition 9.7 Die Funktion $f : A \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ (oder $A \subset \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$) heißt **gleichmäßig stetig** auf $A \subset \mathbb{R}$, wenn:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 \forall a, x \in A : |x - a| < \delta \Rightarrow |f(x) - f(a)| < \varepsilon. \quad (9.10)$$

Die Differenz zwischen (9.9) und (9.10) betrifft die Position der Quantoren.

Wir zeigen nun anhand einiger Beispiele, wie man die Definition von Stetigkeit direkt verwenden kann. Später werden wir meistens die Stetigkeit zeigen, indem wir einen diesbetreffenden Beweis zurückführen auf elementare Funktionen, bei denen die Stetigkeit bekannt ist.

Beispiel 9.8. Die Funktion $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $f(x) = x^3$ ist stetig. Sei $a \in \mathbb{R}$. Um Stetigkeit in a zu beweisen, muss man für jedes $\varepsilon > 0$ ein $\delta_\varepsilon > 0$ angeben, so dass die Implikation in (9.7) gilt. Hinten angefangen heißt das: man muss dafür sorgen, dass $|x^3 - a^3| < \varepsilon$. Weil für $|x - a| < 1$ gilt $|x| \leq |a| + 1$, bekommen wir folgende Abschätzung:

$$\begin{aligned} |x^3 - a^3| &= |x^2 + ax + a^2| |x - a| \leq \\ &(|x|^2 + |a| |x| + a^2) |x - a| \leq 3(|a| + 1)^2 |x - a|. \end{aligned}$$

Jetzt kann man raten, welches $\delta_\varepsilon > 0$ man nehmen kann:

$$\delta_\varepsilon = \min \left(1, \frac{\varepsilon}{3(|a| + 1)^2} \right). \quad (9.11)$$

Man bekommt für $|x - a| < \delta_\varepsilon$, dass $|x - a| < 1$ und dann auch

$$|x^3 - a^3| \leq 3(|a| + 1)^2 |x - a|,$$

und somit

$$3(|a| + 1)^2 |x - a| < 3(|a| + 1)^2 \frac{\varepsilon}{3(|a| + 1)^2} = \varepsilon.$$

Kurzgefasst: für δ_ε wie in (9.11) folgt

$$|x - a| < \delta_\varepsilon \Rightarrow |x^3 - a^3| < \varepsilon.$$

Beispiel 9.9. Die Funktion $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $f(x) = \sqrt[3]{x}$ ist stetig. Sei $a \in \mathbb{R}$. Um Stetigkeit in a zu beweisen, müssen wir x genügend nah an a nehmen, das heißt δ_ε genügend klein, um

$$|\sqrt[3]{x} - \sqrt[3]{a}| < \varepsilon$$

zu haben für die Zahl $\varepsilon > 0$, die uns beliebig gegeben wird. Wir unterscheiden zwei Fälle.

Für $a = 0$ nehmen wir $\delta_\varepsilon = \varepsilon^3$. Dann gilt:

$$|\sqrt[3]{x} - \sqrt[3]{a}| = |\sqrt[3]{x} - \sqrt[3]{0}| = \sqrt[3]{|x|} < \sqrt[3]{\delta_\varepsilon} = \sqrt[3]{\varepsilon^3} = \varepsilon.$$

Für $a \neq 0$ nehmen wir $\delta_\varepsilon = \min(|a|, \varepsilon \sqrt[3]{a^2})$. Dann gilt

$$\begin{aligned}
 |\sqrt[3]{x} - \sqrt[3]{a}| &= \left| \frac{\sqrt[3]{x^2} + \sqrt[3]{x}\sqrt[3]{a} + \sqrt[3]{a^2}}{\sqrt[3]{x^2} + \sqrt[3]{x}\sqrt[3]{a} + \sqrt[3]{a^2}} \right| |\sqrt[3]{x} - \sqrt[3]{a}| = \\
 &= \frac{\left| (\sqrt[3]{x^2} + \sqrt[3]{x}\sqrt[3]{a} + \sqrt[3]{a^2}) (\sqrt[3]{x} - \sqrt[3]{a}) \right|}{\left| \sqrt[3]{x^2} + \sqrt[3]{x}\sqrt[3]{a} + \sqrt[3]{a^2} \right|} = \\
 &= \frac{|x - a|}{\left| \sqrt[3]{x^2} + \sqrt[3]{x}\sqrt[3]{a} + \sqrt[3]{a^2} \right|} \leq \text{(wird unten erklärt)} \\
 &\leq \frac{|x - a|}{\sqrt[3]{a^2}} < \frac{1}{\sqrt[3]{a^2}} \delta_\varepsilon \leq \varepsilon.
 \end{aligned} \tag{9.12}$$

Weil $|x - a| < \delta_\varepsilon \leq |a|$ gilt, haben x und a das gleiche Vorzeichen, und es folgt

$$\sqrt[3]{x^2} + \sqrt[3]{x}\sqrt[3]{a} + \sqrt[3]{a^2} \geq \sqrt[3]{a^2} > 0$$

und

$$\frac{1}{\sqrt[3]{x^2} + \sqrt[3]{x}\sqrt[3]{a} + \sqrt[3]{a^2}} \leq \frac{1}{\sqrt[3]{a^2}}.$$

Selbstverständlich ist unsere Wahl für δ_ε nicht, wie es scheint, aus den Wolken gefallen, sondern wir haben erst mal gerechnet, wie in (9.12) dargestellt ist. Dann haben wir ein passendes $\delta_\varepsilon > 0$ festgelegt und schlussendlich die Folgerungen in der logisch richtigen Anordnung aufgeschrieben. ■

Beispiel 9.10.

1. Die Funktion $f : \mathbb{R} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{R}$, definiert durch $f(x) = \frac{1}{x}$, ist stetig.
2. Die Funktion $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $f(x) = \frac{1}{x}$ ist nicht wohldefiniert.
3. Die Funktion $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, definiert durch $f(0) = 0$ und $f(x) = \frac{1}{x}$ für $x \neq 0$, ist nicht stetig in 0 und stetig in a für jedes $a \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$. ■

Beispiel 9.11. Die Funktion $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, definiert durch

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } x \in \mathbb{Q}, \\ 0 & \text{wenn } x \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}, \end{cases}$$

ist nirgendwo stetig. ■

Beispiel 9.12. Die Funktion $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, definiert durch

$$f(x) = \begin{cases} x & \text{wenn } x \in \mathbb{Q}, \\ 0 & \text{wenn } x \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}, \end{cases}$$

ist nur in 0 stetig.

Bemerke, dass obwohl diese Funktion in 0 stetig ist, man auch hier den Graphen nicht zeichnen kann „ohne den Stift vom Papier zu nehmen“.

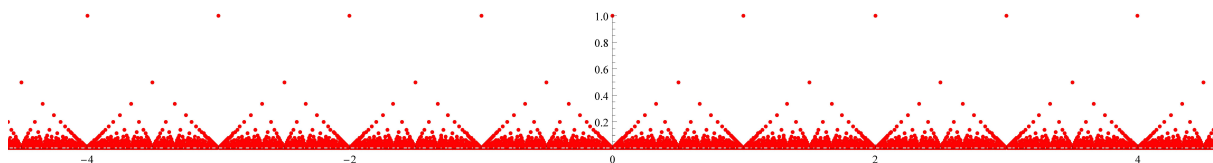
Beispiel 9.13. Die Funktion $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, definiert durch

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } x = 0, \\ \frac{1}{m} & \text{wenn } x = \frac{n}{m} \text{ mit } n \in \mathbb{Z} \setminus \{0\}, m \in \mathbb{N}^+ \text{ und } \text{ggT}(|n|, m) = 1, \\ 0 & \text{wenn } x \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}, \end{cases}$$

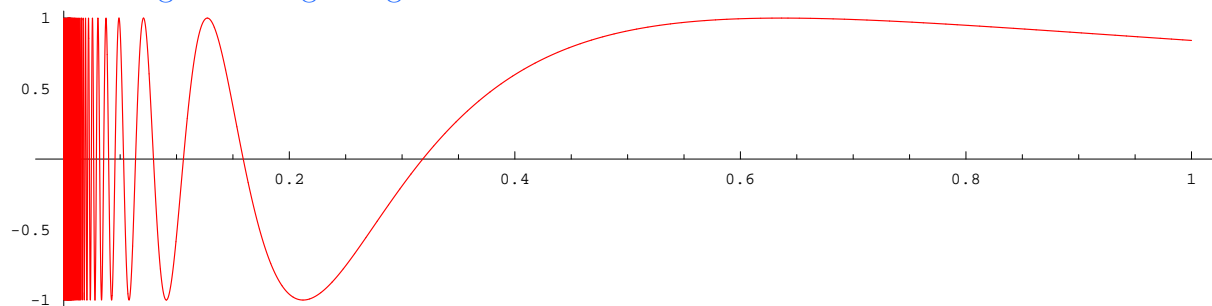
ist stetig in jedem $a \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}$ und nicht stetig in jedem $a \in \mathbb{Q}$. Die Bedingung

$$\text{ggT}(|n|, m) = 1$$

(der größte gemeinsame Teiler) sorgt dafür, dass $x = \frac{n}{m} \in \mathbb{Q}$ als Quotient auf die einfachste Art geschrieben wird und somit, dass f wohldefiniert ist. Hier steht eine Skizze zu dieser Funktion:



Beispiel 9.14. Die Funktion $f : (0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ mit $f(x) = \sin\left(\frac{1}{x}\right)$ ist stetig und beschränkt, aber nicht gleichmäßig stetig.



Um zu zeigen, dass sie stetig ist in $x \in (0, 1]$, muss man für jedes $\varepsilon > 0$ ein $\delta > 0$ (also $\delta = \delta_{\varepsilon, x}$) finden, so dass für alle $y \in (0, 1]$ mit $|y - x| < \delta$ gilt $|f(x) - f(y)| < \varepsilon$. Das klappt, weil f die Zusammensetzung zweier stetiger Funktionen ist (denn $x \neq 0$). Man kann auch direkt finden, dass

$$\left| \sin\left(\frac{1}{x}\right) - \sin\left(\frac{1}{y}\right) \right| \stackrel{\text{Mittelwertsatz}}{\leq} \left| \frac{1}{x} - \frac{1}{y} \right| = \frac{|y - x|}{xy} \quad (9.13)$$

und damit, dass $\delta_{\varepsilon,x} = \min\left(\frac{1}{2}x, \frac{1}{2}x^2\varepsilon\right)$ passt. Für $|x - y| < \frac{1}{2}x$ gilt nämlich

$$y > \frac{1}{2}x, \quad (9.14)$$

und kombiniert man (9.13), (9.14) und $|x - y| < \frac{1}{2}x^2\varepsilon$, folgt

$$\left| \sin\left(\frac{1}{x}\right) - \sin\left(\frac{1}{y}\right) \right| \leq \frac{|y - x|}{xy} < \frac{|x - y|}{\frac{1}{2}x^2} < \frac{\frac{1}{2}x^2\varepsilon}{\frac{1}{2}x^2} = \varepsilon.$$

Die Funktion ist nicht gleichmäßig stetig. Dazu müssen wir $\varepsilon > 0$ finden, wobei es kein $\delta > 0$ gibt, das zu allen x und y mit $|x - y| < \delta$ passt. Sei $\varepsilon \in (0, 1)$ und $\delta > 0$. Wähle $n \in \mathbb{N}$ so, dass $n > \frac{1}{\delta}$, und setze $x = \frac{1}{2\pi n + \frac{1}{2}\pi}$ und $y = \frac{1}{2\pi n + \frac{3}{2}\pi}$. Es gilt

$$\begin{aligned} \left| \frac{1}{2\pi n + \frac{1}{2}\pi} - \frac{1}{2\pi n + \frac{3}{2}\pi} \right| &= \frac{\pi}{(2\pi n + \frac{1}{2}\pi)(2\pi n + \frac{3}{2}\pi)} < \frac{1}{n} < \delta \text{ und} \\ \left| f\left(\frac{1}{2\pi n + \frac{1}{2}\pi}\right) - f\left(\frac{1}{2\pi n + \frac{3}{2}\pi}\right) \right| &= \left| \sin\left(2\pi n + \frac{1}{2}\pi\right) - \sin\left(2\pi n + \frac{3}{2}\pi\right) \right| = 2 > \varepsilon. \end{aligned}$$

9.2.1 Folgenstetig

Bei dem Limes haben wir schon gesehen, dass es vernünftig sein kann, zurückzugreifen auf Grenzwerte von Folgen. Auch für Stetigkeit kann so etwas nützlich sein.

Lemma 9.8 Sei $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion. Die folgenden Aussagen sind gleichwertig:

1. f ist stetig in a .
2. f ist folgenstetig in a :

Für jede Folge $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ mit $a_n \rightarrow a$ für $n \rightarrow \infty$ gilt $f(a_n) \rightarrow f(a)$ für $n \rightarrow \infty$.

Bemerkung 9.8.1 Wir formulieren getrennt nochmals die negative Version. Die folgenden Aussagen sind gleichwertig:

1. f ist nicht stetig in a .
2. Es gibt eine Folge $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ mit $a_n \rightarrow a$ und $f(a_n) \not\rightarrow f(a)$ für $n \rightarrow \infty$.

Bemerkung 9.8.2 Wir haben im Lemma

$$a_n \rightarrow a \text{ für } n \rightarrow \infty \text{ statt } \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$$

und

$$f(a_n) \rightarrow f(a) \text{ für } n \rightarrow \infty \text{ statt } \lim_{n \rightarrow \infty} f(a_n) = f(a)$$

geschrieben. Die Bedeutung ist in beiden Fällen gleich. Der Grund, dass wir in der Bemerkung $f(a_n) \not\rightarrow f(a)$ für $n \rightarrow \infty$ schreiben, ist, dass die Verneinung von

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f(a_n) = f(a), \text{ also auch von } f(a_n) \rightarrow f(a) \text{ für } n \rightarrow \infty,$$

nicht $\lim_{n \rightarrow \infty} f(a_n) \neq f(a)$ ist, sondern

$\lim_{n \rightarrow \infty} f(a_n)$ existiert nicht, oder

$\lim_{n \rightarrow \infty} f(a_n)$ existiert, ist aber ungleich $f(a)$.

Die beiden letzten Aussagen fasst man zusammen in

$f(a_n) \not\rightarrow f(a)$ für $n \rightarrow \infty$.

Beweis von Lemma 9.8. Benutze die Ergebnisse in Lemma 9.3.

(\Rightarrow) Die Aussage

f ist stetig in a

kann man schreiben als:

es gibt $\ell \in \mathbb{R}$ mit $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = \ell$ und $f(a) = \ell$.

Aus $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = \ell$ folgt

für jede Folge $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ mit $a_n \neq a$ und $a_n \rightarrow a$ für $n \rightarrow \infty$ gilt $f(a_n) \rightarrow \ell$ für $n \rightarrow \infty$.

Weil $f(a) = \ell$ können wir die Bedingung $a_n \neq a$ weglassen und auch ℓ ersetzen durch $f(a)$.

(\Leftarrow) Wenn

für jede Folge $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ mit $a_n \rightarrow a$ für $n \rightarrow \infty$ gilt $f(a_n) \rightarrow f(a)$ für $n \rightarrow \infty$,

dann hat man auch

für jede Folge $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ mit $a_n \neq a$ und $a_n \rightarrow a$ für $n \rightarrow \infty$ gilt $f(a_n) \rightarrow f(a)$ für $n \rightarrow \infty$.

■

9.2.2 Stetigkeit in \mathbb{C}

Alle Lemmas in diesem Kapitel kann man anpassen für Funktionen $f : A \subset \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ und behalten dann ihre Gültigkeit.

Nur die Definitionen von $\lim_{x \downarrow x_0} f(x)$ und $\lim_{x \uparrow x_0} f(x)$ sind typisch für reelle Argumente.

Analysis 1, Woche 10

Stetigkeit II

A1

10.1 Regeln bei Grenzwerten und Stetigkeit

Die ε - δ -Geschichten sind wesentlich bei Analysis. Einige darauffolgende Rechenregeln helfen dabei, manchmal schneller zum Ziel zu kommen.

Lemma 10.1 Seien $f, g : \mathbb{R} \setminus \{a\} \rightarrow \mathbb{R}$ zwei Funktionen mit

$$\lim_{x \rightarrow a} f(x) = \ell_f \quad \text{und} \quad \lim_{x \rightarrow a} g(x) = \ell_g,$$

und sei $c \in \mathbb{R}$. Dann gilt:

1. $\lim_{x \rightarrow a} cf(x) = c \lim_{x \rightarrow a} f(x)$;
2. $\lim_{x \rightarrow a} (f(x) + g(x)) = \lim_{x \rightarrow a} f(x) + \lim_{x \rightarrow a} g(x)$;
3. $\lim_{x \rightarrow a} (f(x) g(x)) = \lim_{x \rightarrow a} f(x) \lim_{x \rightarrow a} g(x)$;
4. und wenn $\ell_g \neq 0$, dann $\lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x)}{g(x)} = \frac{\lim_{x \rightarrow a} f(x)}{\lim_{x \rightarrow a} g(x)}$.

Beweis. Weil wir gezeigt haben, dass die Aussage $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = \ell$ gleichwertig ist zu $\lim_{n \rightarrow \infty} f(a_n) = \ell$ für alle Folgen $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ mit $a_n \neq a$ und $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$, folgen diese Behauptungen aus Lemma 5.10. Man kann auch einen direkten Beweis geben und das werden wir anschließend tun.

Nehmen wir als Beispiel das Produkt. Für $\varepsilon > 0$ müssen wir ein $\delta > 0$ finden, so dass $0 < |x - a| < \delta \Rightarrow |f(x)g(x) - \ell_f \ell_g| < \varepsilon$. Dabei darf und soll man anwenden, dass es für f und g bei jedem $\varepsilon > 0$ ein dazugehöriges $\delta > 0$ gibt. Nennen wir diese Zahlen bei $\varepsilon > 0$ für f beziehungsweise g hier $\delta_f(\varepsilon)$ und $\delta_g(\varepsilon)$. Das heißt:

- Für $\varepsilon > 0$ folgt aus $0 < |x - a| < \delta_f(\varepsilon)$ dass $|f(x) - \ell_f| < \varepsilon$;
- Für $\varepsilon > 0$ folgt aus $0 < |x - a| < \delta_g(\varepsilon)$ dass $|g(x) - \ell_g| < \varepsilon$.

Sei $\varepsilon > 0$. Man nehme

$$\delta(\varepsilon) = \min \left(\delta_f \left(\frac{\varepsilon}{2(|\ell_g| + 1)} \right), \delta_g(1), \delta_g \left(\frac{\varepsilon}{2(|\ell_f| + 1)} \right) \right).$$

Bemerke, dass $\delta(\varepsilon) > 0$ gilt für jedes $\varepsilon > 0$.

Für $|x - a| < \delta(\varepsilon)$ gilt, weil $\delta(\varepsilon) \leq \delta_g(1)$, dass $|g(x)| \leq |g(x) - \ell_g| + |\ell_g| < 1 + |\ell_g|$ und

$$\begin{aligned} |f(x)g(x) - \ell_f \ell_g| &= |f(x)g(x) - \ell_f g(x) + \ell_f g(x) - \ell_f \ell_g| \leq \\ &\leq |f(x) - \ell_f| |g(x)| + |\ell_f| |g(x) - \ell_g| < \\ &\leq |f(x) - \ell_f| (|\ell_g| + 1) + |\ell_f| |g(x) - \ell_g| = \end{aligned} \quad (10.1)$$

und weil $\delta(\varepsilon) \leq \delta_f\left(\frac{\varepsilon}{2(|\ell_g|+1)}\right)$ und $\delta(\varepsilon) \leq \delta_g\left(\frac{\varepsilon}{2(|\ell_f|+1)}\right)$ gilt, folgt

$$(10.1) < \frac{\varepsilon}{2(|\ell_g|+1)} (|\ell_g|+1) + |\ell_f| \frac{\varepsilon}{2(|\ell_f|+1)} \leq \frac{1}{2}\varepsilon + \frac{1}{2}\varepsilon = \varepsilon.$$

Selbstverständlich wurde diese Zahl $\delta(\varepsilon)$ rückwirkend gefunden. ■

Korollar 10.2 Seien $f, g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ stetige Funktionen und sei $c \in \mathbb{R}$. Dann sind auch cf , $f + g$ und fg stetig.

Korollar 10.3 Jedes Polynom ist stetig auf \mathbb{R} (und auch auf \mathbb{C}).

Beweis. Jedes Polynom kann man schreiben als Summe und Produkt von endlich vielen Termen c und x . Die Funktionen $f_0, f_1 : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ (oder $\mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$) mit $f_0(x) = 1$ und $f_1(x) = x$ sind stetig: man nehme $\delta_0(\varepsilon) = 1$ und $\delta_1(\varepsilon) = \varepsilon$. Dann folgt aus $|x - y| < \delta_i(\varepsilon)$, dass $|f_i(x) - f_i(y)| < \varepsilon$. Das Ergebnis folgt aus Lemma 10.1-1,2,3. ■

Korollar 10.4 Jede rationale Funktion ist stetig in allen $a \in \mathbb{R}$ (allen $a \in \mathbb{C}$), wo der Nenner ungleich null ist.

Beweis. Eine rationale Funktion ist der Quotient zweier Polynome und Polynome sind stetig. Wenn der Nenner ungleich null ist, kann man Lemma 10.1-4 anwenden. ■

Ein Lemma, welches wir bei ‘Folgen’ nicht gesehen haben, ist folgendes:

Lemma 10.5 Seien $f, g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ zwei stetige Funktionen. Dann gilt:

$$\lim_{x \rightarrow a} f(g(x)) = f\left(\lim_{x \rightarrow a} g(x)\right) = f(g(a)).$$

Das heißt, auch $f \circ g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ ist stetig.

Bemerkung 10.5.1 Die Funktion $f \circ g$ (sprich eff-nach-ge) ist definiert durch

$$(f \circ g)(x) = f(g(x))$$

und sagt: Die Zusammenstellung stetiger Funktionen ist wiederum stetig.

Beweis von Lemma 10.5. Sei wiederum $\varepsilon > 0$ gegeben. Man soll $\delta(\varepsilon) > 0$ finden, so dass

$$|x - a| < \delta(\varepsilon) \Rightarrow |f(g(x)) - f(g(a))| < \varepsilon.$$

Dabei darf man verwenden, dass es für jedes $\varepsilon > 0$ ein $\delta_g(\varepsilon)$ gibt, so dass

$$|x - a| < \delta_g(\varepsilon) \Rightarrow |g(x) - g(a)| < \varepsilon$$

und dass es für jedes $\varepsilon > 0$ ein $\delta_f(\varepsilon)$ gibt, so dass

$$|y - g(a)| < \delta_f(\varepsilon) \Rightarrow |f(y) - f(g(a))| < \varepsilon.$$

Man liest dies hintereinander und sieht, dass $\delta(\varepsilon) = \delta_g(\delta_f(\varepsilon))$ passt:

$$\begin{aligned} |x - a| < \delta_g(\delta_f(\varepsilon)) &\Rightarrow |g(x) - g(a)| < \delta_f(\varepsilon), \\ |g(x) - g(a)| < \delta_f(\varepsilon) &\Rightarrow |f(g(x)) - f(g(a))| < \varepsilon. \end{aligned}$$

■

Übrigens folgt aus $\lim_{y \rightarrow b} f(y) = \ell$ und $\lim_{x \rightarrow a} g(x) = b$ nicht, dass $\lim_{x \rightarrow a} f(g(x)) = \ell$. Ein Gegenbeispiel für eine solche Behauptung ist:

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{für } x \neq 0, \\ 0 & \text{für } x = 0, \end{cases} \quad \text{und } g(x) = x \sin\left(\frac{1}{x}\right).$$

Skizzen zu f , g und $f \circ g$ findet man in Abbildung 10.1.

Setzen wir $a_n = \frac{1}{n\pi}$ so gilt $a_n \rightarrow 0$ und $g(a_n) \rightarrow 0$ für $n \rightarrow \infty$. Weil jedoch sogar $g(a_n) = 0$ gilt, findet man

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f(g(a_n)) = f(0) = 0 \neq 1 = \lim_{x \rightarrow 0} f(x).$$

Der Limes $\lim_{x \rightarrow 0} f(g(x))$ existiert sogar nicht.

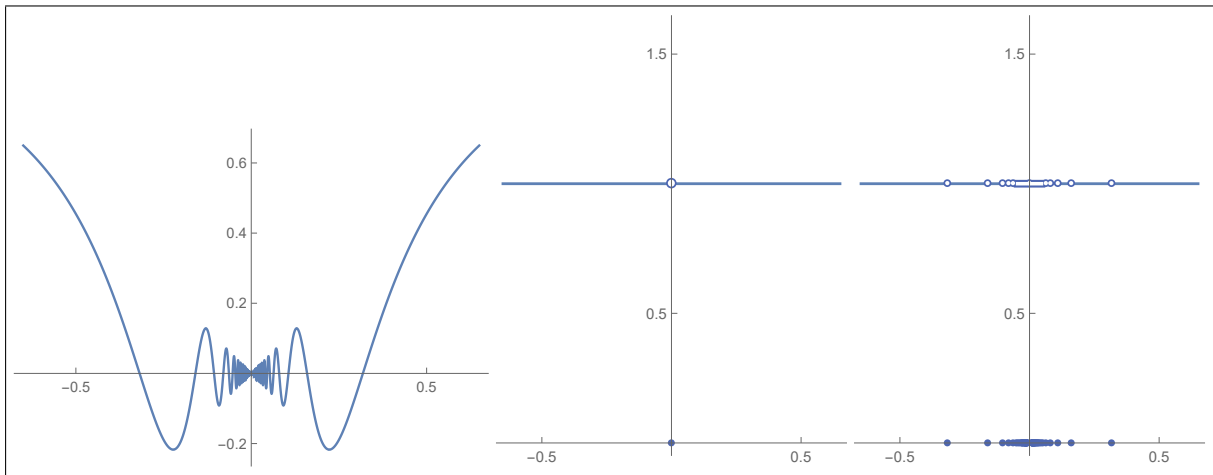


Abbildung 10.1: Skizzen zu g , f und $f \circ g$.

10.2 Uneigentliche Konvergenz und Asymptoten

Uneigentlich hat immer etwas mit ∞ zu tun. Nochmals sei bemerkt, dass ∞ keine Zahl ist und ∞ nur als Symbol benutzt wird.

10.2.1 Horizontale Asymptoten

Definition 10.6 Sei die Funktion $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ gegeben. Dann sagt man ℓ ist der Limes von f für x nach ∞ , notiert als

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

wenn

$$\forall \varepsilon > 0 \exists M \in \mathbb{R} \forall x \in \mathbb{R} : x > M \Rightarrow |f(x) - \ell| < \varepsilon. \quad (10.2)$$

Man sagt: f hat eine horizontale Asymptote für $x \rightarrow \infty$.

Bemerkung 10.6.1 Die Zeile in (10.2) kann man auch ersetzen durch

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N} \forall x \in \mathbb{R} : x > N \Rightarrow |f(x) - \ell| < \varepsilon. \quad (10.3)$$

Die Aussage in (10.3) impliziert direkt (10.2) mit $M = N$. Nimmt man in für N eine ganze Zahl größer M , dann folgt aus (10.2) sofort (10.3).

Bemerkung 10.6.2 Ähnlich wird

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

definiert durch

$$\forall \varepsilon > 0 \exists M \in \mathbb{R} \forall x \in \mathbb{R} : x < M \Rightarrow |f(x) - \ell| < \varepsilon. \quad (10.4)$$

Diese Aussage ist äquivalent zu

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N} \forall x \in \mathbb{R} : x < -N \Rightarrow |f(x) - \ell| < \varepsilon. \quad (10.5)$$

Beispiel 10.1. Für die Funktion $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $f(x) = \frac{x}{\sqrt{1+x^2}}$ gilt $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = 1$.

Denn für $x > N = N_\varepsilon := \left\lceil \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \right\rceil + 1$ hat man

$$\begin{aligned} \left| \frac{x}{\sqrt{1+x^2}} - 1 \right| &= \left| \frac{x - \sqrt{1+x^2}}{\sqrt{1+x^2}} \frac{x + \sqrt{1+x^2}}{x + \sqrt{1+x^2}} \right| = \left| \frac{x^2 - (1+x^2)}{x\sqrt{1+x^2} + 1+x^2} \right| = \\ &= \frac{1}{x\sqrt{1+x^2} + 1+x^2} \leq \frac{1}{x^2} < \frac{1}{N^2} < \varepsilon. \end{aligned}$$

10.2.2 Vertikale Asymptoten

Definition 10.7 Sei die Funktion $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ gegeben. Dann sagt man ∞ ist der uneigentliche Limes von f für x nach a , notiert als

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

wenn

$$\forall N \in \mathbb{N} \exists \delta > 0 \forall x \in \mathbb{R} : 0 < |x - a| < \delta \Rightarrow f(x) > N.$$

Man sagt $-\infty$ ist der uneigentliche Limes von f für x nach a , notiert als

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

wenn

$$\forall N \in \mathbb{N} \exists \delta > 0 \forall x \in \mathbb{R} : 0 < |x - a| < \delta \Rightarrow f(x) < -N.$$

In beiden Fällen sagt man, dass f eine vertikale Asymptote hat für $x \rightarrow a$.

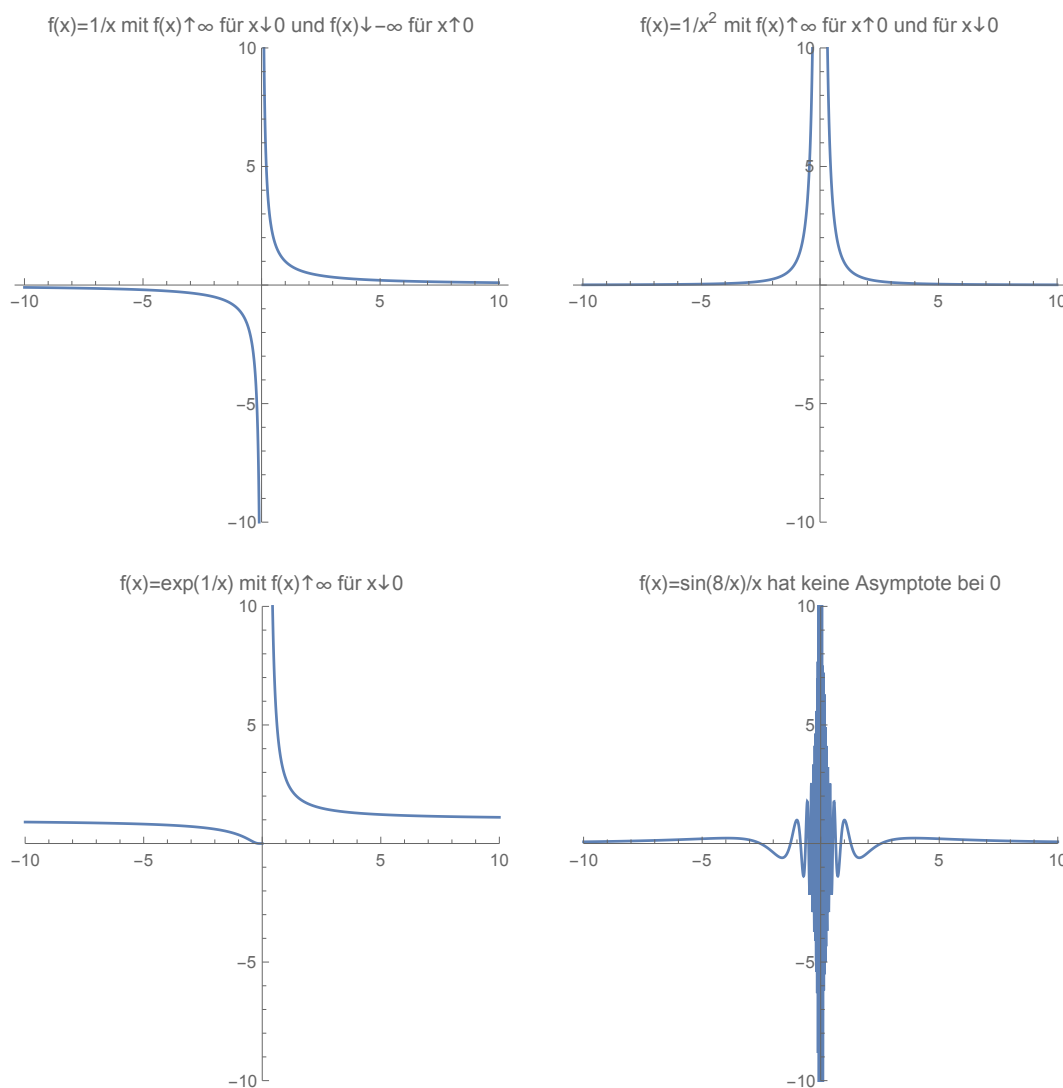


Abbildung 10.2: Asymptoten und mal keine Asymptote

Bemerkung 10.7.1 Auch kann man nur von einer Seite kommen. Man sagt ∞ ist der uneigentliche Limes von f für x von oben nach a , notiert als

$$\lim_{x \downarrow a} f(x) = \infty,$$

wenn

$$\forall N \in \mathbb{N} \exists \delta > 0 \forall x \in \mathbb{R} : 0 < x - a < \delta \Rightarrow f(x) > N.$$

Auch hier sagt man f hat eine vertikale Asymptote für $x \rightarrow a$. Ähnlich definiert man

$$\lim_{x \downarrow a} f(x) = -\infty, \quad \lim_{x \uparrow a} f(x) = \infty \quad \text{und} \quad \lim_{x \uparrow a} f(x) = -\infty.$$

Beispiel 10.2. Für die Funktion $f : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$ mit $f(x) = \frac{x^2 + 1}{x}$ gilt $\lim_{x \downarrow 0} f(x) = \infty$.
Denn für $x \in (0, \delta_N)$ mit $\delta_N = N^{-1}$ hat man

$$\frac{x^2 + 1}{x} = x + \frac{1}{x} > \frac{1}{x} > N.$$

Beispiel 10.3. Die Funktion $h : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$ mit $h(x) = \frac{1}{x} \sin\left(\frac{1}{x}\right)$ hat keinen (uneigentlichen) Limes für $x \downarrow 0$ und also keine Asymptote bei 0.

10.2.3 Schiefe Asymptoten

Definition 10.8 Sei die Funktion $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ gegeben. Man sagt, dass f eine schiefe Asymptote $y(x) = ax + b$ hat für $x \rightarrow \infty$, wenn

$$\lim_{x \rightarrow \infty} |f(x) - (ax + b)| = 0. \quad (10.6)$$

Bemerkung 10.8.1 Wenn man herausfinden möchte, welche a und b in Frage kämen bei (10.6), dann kann man wie folgt vorgehen: Wenn (10.6) gilt, dann findet man a mittels

$$a = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f(x)}{x}. \quad (10.7)$$

Weil $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{b}{x} = 0$ gilt, findet man nämlich, dass

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow \infty} \left| \frac{f(x)}{x} - a \right| &= \lim_{x \rightarrow \infty} \left| \frac{f(x)}{x} - a - \frac{b}{x} \right| = \lim_{x \rightarrow \infty} \left| \frac{f(x) - (ax + b)}{x} \right| = \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} |f(x) - (ax + b)| \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{|x|} = 0, \end{aligned}$$

denn der erste Limes in der letzten Zeile existiert wegen der Annahme. Anschließend folgt b aus

$$b = \lim_{x \rightarrow \infty} (f(x) - ax). \quad (10.8)$$

Hat man (10.8) bewiesen, so folgt auch (10.6).

Existiert einer der beiden Grenzwerte in (10.7) oder (10.8) nicht, so hat f keine schiefe Asymptote für $x \rightarrow \infty$.

Beispiel 10.4. Die Funktion $f : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$ mit $f(x) = \frac{x^2 + x + 1}{x}$ hat $1 + x$ als schiefe Asymptote für $x \rightarrow \infty$. Denn für $x > N_\varepsilon := \left[\frac{1}{\varepsilon}\right] + 1$ hat man

$$\left| \frac{x^2 + x + 1}{x} - (1 + x) \right| = \left| \frac{1}{x} \right| = \frac{1}{x} < \varepsilon.$$

Beispiel 10.5. Die Funktion $f : \mathbb{R} \setminus \{1\} \rightarrow \mathbb{R}$ definiert durch

$$f(x) = \frac{\exp(x) - x}{\exp(x) + 1} \exp\left(\frac{1}{1-x}\right) \quad (10.9)$$

hat drei Asymptoten:

1. eine horizontale Asymptote: $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = 1$;
2. eine vertikale Asymptote: $\lim_{x \uparrow 1} f(x) = \infty$;
3. eine schiefe Asymptote: $\lim_{x \rightarrow -\infty} |f(x) - (-x + 1)| = 0$.

In Abbildung 10.3 findet man eine Skizze dieser Funktion.

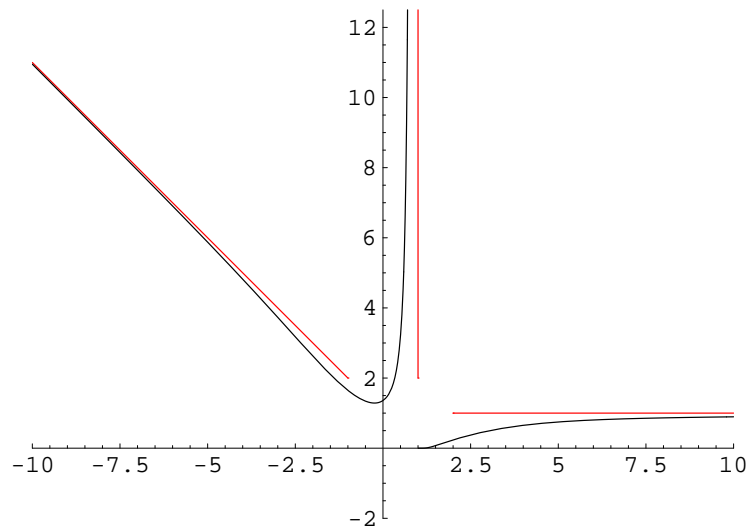


Abbildung 10.3: Skizze zu der Funktion in (10.9)

Wir bestimmen a und b wie in Bemerkung 10.8.1 und verwenden dazu mehrmals die Ergebnisse aus Lemma 10.1.

Die Zahl a berechnen: Weil

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{f(x)}{x} &= \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{1}{x} \frac{\exp(x) - x}{\exp(x) + 1} \exp\left(\frac{1}{1-x}\right) = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{\frac{1}{x} \exp(x) - 1}{\exp(x) + 1} \exp\left(\frac{1}{1-x}\right) \\ &= \frac{\lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{1}{x} \exp(x) - 1}{\lim_{x \rightarrow -\infty} \exp(x) + 1} \lim_{x \rightarrow -\infty} \exp\left(\frac{1}{1-x}\right) = \frac{0 - 1}{0 + 1} \exp(0) = -1, \end{aligned}$$

kann a nur -1 sein.

Die Zahl b berechnen: Wir vereinfachen

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow -\infty} (f(x) - ax) &= \lim_{x \rightarrow -\infty} (f(x) + x) = \lim_{x \rightarrow -\infty} \left(\frac{\exp(x) - x}{\exp(x) + 1} \exp\left(\frac{1}{1-x}\right) + x \right) \\ &= \lim_{x \rightarrow -\infty} \left(\left(\frac{\exp(x) - x}{\exp(x) + 1} + x \right) \exp\left(\frac{1}{1-x}\right) + x \left(1 - \exp\left(\frac{1}{1-x}\right) \right) \right) \\ &= \underbrace{\lim_{x \rightarrow -\infty} \left(\frac{\exp(x) - x}{\exp(x) + 1} + x \frac{\exp(x) + 1}{\exp(x) + 1} \right) \exp\left(\frac{1}{1-x}\right)}_A + \underbrace{\lim_{x \rightarrow -\infty} x \left(1 - \exp\left(\frac{1}{1-x}\right) \right)}_B \end{aligned}$$

und finden

$$\begin{aligned} A &= \lim_{x \rightarrow -\infty} \left(\frac{\exp(x) - x}{\exp(x) + 1} + \frac{x \exp(x) + x}{\exp(x) + 1} \right) \exp\left(\frac{1}{1-x}\right) \\ &= \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{\exp(x)(x+1)}{\exp(x) + 1} \exp\left(\frac{1}{1-x}\right) = \frac{0}{0+1} \exp(0) = 0. \end{aligned}$$

Wir haben schon mal gezeigt, dass $y \leq \exp(y) - 1 \leq \frac{y}{1-y}$ für $y \in (0, 1)$. Wenn wir das für B benutzen und bemerken, dass $0 < \frac{1}{1-x} < 1$ für $x \rightarrow -\infty$, so folgt

$$-x \frac{1}{1-x} \leq -x \left(\exp \left(\frac{1}{1-x} \right) - 1 \right) \leq -x \frac{\frac{1}{1-x}}{1 - \frac{1}{1-x}} = 1.$$

Weil $\lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{-x}{1-x} = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{-1}{1/x-1} = \frac{-1}{0-1} = 1$, finden wir mit dem Einschließungssatz, dass $B = 1$.

Wir haben somit gezeigt, dass

$$b = \lim_{x \rightarrow -\infty} (f(x) + x) = A + B = 0 + 1 = 1$$

und das bedeutet $\lim_{x \rightarrow -\infty} (f(x) - (-x + 1)) = 0$. Die schiefe Asymptote ist $y = -x + 1$.

Beispiel 10.6. Eine Funktion, die definiert ist auf $\mathbb{R} \setminus \{0\}$, die keinen Limes für $x \rightarrow 0$ hat und bei 0 auch keine Asymptote, ist zum Beispiel $g(x) = \sin\left(\frac{1}{x}\right)$. Siehe Abbildung 10.4.

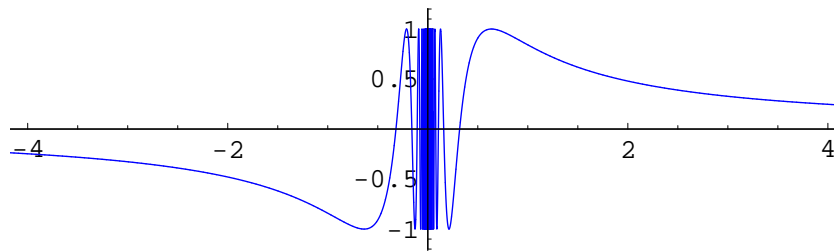


Abbildung 10.4: Skizze zu $x \mapsto \sin\left(\frac{1}{x}\right)$.

10.3 Erweiterungen von Limes und Stetigkeit

Definition 10.9 Sei die Funktion $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ gegeben. Dann sagt man ℓ ist der **Limes Superior** von f für x nach a , notiert als

$$\limsup_{x \rightarrow a} f(x) = \ell,$$

wenn

$$\lim_{\varepsilon \downarrow 0} \left(\sup_{0 < |x-a| < \varepsilon} f(x) \right) = \ell.$$

Definition 10.10 Sei die Funktion $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ gegeben. Dann sagt man ℓ ist der **Limes Inferior** von f für x nach a , notiert als

$$\liminf_{x \rightarrow a} f(x) = \ell,$$

wenn

$$\lim_{\varepsilon \downarrow 0} \left(\inf_{0 < |x-a| < \varepsilon} f(x) \right) = \ell.$$

Man kann sich selbst überlegen, wie man $\limsup_{x \downarrow a} f(x)$ oder $\liminf_{x \rightarrow -\infty} f(x)$ vernünftig definiert.

Beispiel 10.7. $\limsup_{x \rightarrow 0} \sin\left(\frac{1}{x}\right) = 1$ und $\liminf_{x \rightarrow 0} \sin\left(\frac{1}{x}\right) = -1$.

Definition 10.11 Sei die Funktion $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ gegeben. Dann heißt f **oberhalb stetig** in a , wenn

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

Die Funktion f heißt **unterhalb stetig** in a , wenn

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

Bemerkung 10.11.1 Man kann selbstverständlich auch rechts-unterhalb stetig usw. definieren.

10.4 Folgen der Stetigkeit

Wenn eine stetige Funktion an einer Stelle positiv ist, dann ist sie auch positiv in einer Umgebung dieser Stelle:

Lemma 10.12 Sei $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ eine stetige Funktion. Sei $x_0 \in [a, b]$ derart, dass $f(x_0) \neq 0$. Dann gibt es $\delta > 0$ derart, dass:

1. Wenn $f(x_0) > 0$ dann folgt $f(x) > 0$ für alle $x \in (x_0 - \delta, x_0 + \delta) \cap [a, b]$;
2. Wenn $f(x_0) < 0$ dann folgt $f(x) < 0$ für alle $x \in (x_0 - \delta, x_0 + \delta) \cap [a, b]$.

Beweis. Für den Fall, dass $f(x_0) > 0$, nehme $\varepsilon = f(x_0)$. Weil f stetig ist, gibt es für ε eine Zahl $\delta > 0$ derart, dass für $x \in (x_0 - \delta, x_0 + \delta) \cap [a, b]$ gilt, dass $|f(x) - f(x_0)| < \varepsilon$. Mit der Dreiecksungleichung folgt für solche x , dass

$$f(x) = f(x_0) + f(x) - f(x_0) \geq f(x_0) - |f(x) - f(x_0)| > f(x_0) - \varepsilon = 0.$$

Für $f(x_0) < 0$ nehme $\varepsilon = -f(x_0)$ und 2. folgt auf ähnlicher Art. ■

Theorem 10.13 (Nullstellensatz) Sei $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ eine stetige Funktion mit

$$f(a) < 0 < f(b).$$

Dann gibt es $x \in (a, b)$ mit $f(x) = 0$.

Es gibt sogar eine erste Nullstelle x_1 und eine letzte Nullstelle x_2 in (a, b) mit $x_1 \leq x_2$, also eventuell identisch. Das bedeutet:

$$\begin{aligned} f(x) &< 0 \quad \text{für } x \in [a, x_1), \\ f(x_1) &= 0 \quad \text{und } f(x_2) = 0 \\ f(x) &> 0 \quad \text{für } x \in (x_2, b]. \end{aligned}$$

Bemerkung 10.13.1 Die Funktion $f : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$, definiert durch $f(x) = \sin(x - \pi^2/x)$, hat viele Nullstellen aber keine erste und keine letzte Nullstelle.

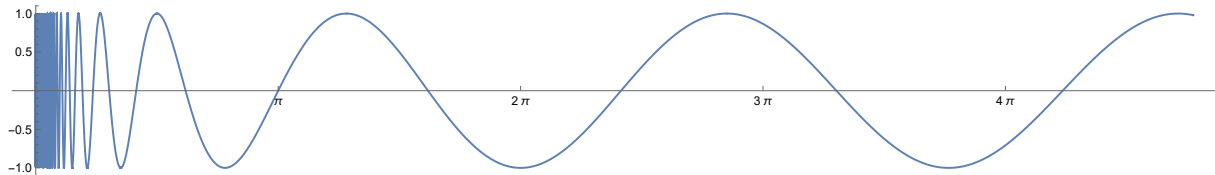


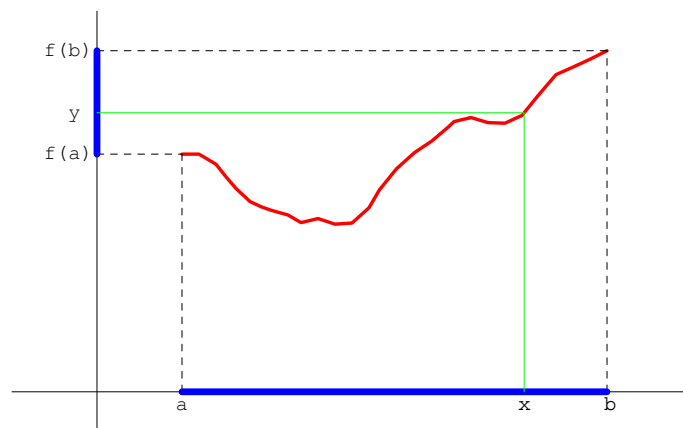
Abbildung 10.5: Die Funktion aus Bemerkung 10.13.1

Beweis von Theorem 10.13. Setze $A = \{x \in [a, b]; f(x) \geq 0\}$. Weil A nicht leer ist, denn $b \in A$, und A nach unten beschränkt ist, existiert $m := \inf \{x \in A\}$ in \mathbb{R} wegen der Vollständigkeit von \mathbb{R} . Wir werden nun zeigen, dass $m \in (a, b)$ die erste Nullstelle ist von f in $[a, b]$. Das bedeutet $m > a$, $m < b$, $f(m) = 0$ und $f < 0$ in $[a, m)$.

- $m > a$ folgt aus Lemma 10.12.
- $m < b$ folgt auch aus Lemma 10.12.
- Weil $m := \inf \{x \in A\}$ gibt es $\{a_n\}_{n=0}^{\infty} \subset A$ mit $a_n \rightarrow m$ für $n \rightarrow \infty$. Wenn $f(m) < 0$ gelten würde, dann folgt aus Lemma 10.12, dass $f(a_n) < 0$ für n genügend groß und das ist ein Widerspruch. Also gilt $f(m) \geq 0$.
- Wenn $f(m) > 0$ gelten würde, dann folgt aus Lemma 10.12, dass $f(m - \frac{1}{n}) > 0$ für n genügend groß. Weil $\{m - \frac{1}{n}\}_{n=0}^{\infty} \notin A$ und $m - \frac{1}{n} > a$ für n genügend groß ist, gilt für solche n , dass $f(m - \frac{1}{n}) < 0$ und das ist ein Widerspruch. Also gilt $f(m) \leq 0$.

Wir haben $m \in (a, b)$ und $f(m) = 0$ und die Definition von A liefert $f < 0$ in $[a, m)$. Das heißt, m ist die erste Nullstelle von f in (a, b) . Auf ähnliche Art gibt es auch eine letzte Nullstelle x_2 in (a, b) . Wenn es insgesamt nur eine Nullstelle gibt, ist diese sowohl erste als letzte. ■

Korollar 10.14 (Zwischenwertsatz) Sei $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ eine stetige Funktion. Dann gibt es für jedes y zwischen $f(a)$ und $f(b)$ ein $x \in (a, b)$ mit $f(x) = y$.



Beweis. Verwende den Nullstellensatz für $g : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ mit entweder $g(x) = f(x) - y$ oder $g(x) = y - f(x)$. ■

Theorem 10.15 (Weierstraß) Sei $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ eine stetige Funktion. Dann gibt es $x_{\min}, x_{\max} \in [a, b]$ mit

$$f(x_{\min}) \leq f(x) \leq f(x_{\max}) \text{ für alle } x \in [a, b].$$

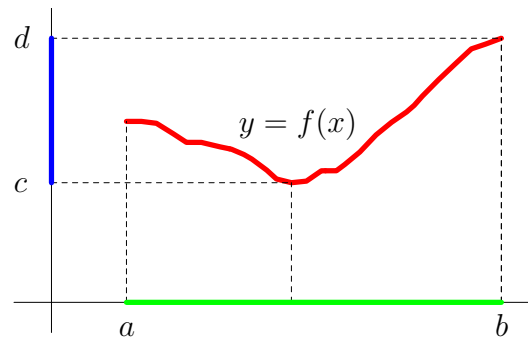
Anders gesagt: auf einem beschränkten und abgeschlossenen Intervall nimmt eine stetige Funktion f ihr Minimum und Maximum an.

Beweis. Sei $\{x_n\}_{n=0}^{\infty}$ eine Folge in $[a, b]$ mit $f(x_n) \rightarrow \sup \{f(x); x \in [a, b]\}$. Wegen des Satzes von Bolzano-Weierstraß (Theorem 5.20) hat $\{x_n\}_{n=0}^{\infty}$ einen Häufungswert in \mathbb{R} . Das heißt, es gibt eine konvergente Teilfolge $\{x_{n_k}\}_{k=0}^{\infty}$ und weil $[a, b]$ abgeschlossen ist, gilt $\tilde{x} = \lim_{k \rightarrow \infty} x_{n_k} \in [a, b]$. Weil f stetig ist, folgt $f(x_{n_k}) \rightarrow f(\tilde{x}) \in \mathbb{R}$. Also gilt $\sup \{f(x); x \in [a, b]\} = f(\tilde{x})$ und weil $f(\tilde{x})$ das Supremum liefert, gilt für alle $x \in [a, b]$, dass

$$f(x) \leq f(\tilde{x}) = \max \{f(x); x \in [a, b]\}.$$

Man nehme $x_{\max} = \tilde{x}$.

Ebenso zeigt man, dass es x_{\min} gibt. ■



Korollar 10.16 Wenn $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ eine stetige Funktion ist, dann gibt es $c, d \in \mathbb{R}$ mit $[c, d] = \{f(x); x \in [a, b]\}$.

Beweis. Man kombiniere Theorem 10.15 und den Zwischenwertsatz. ■

Analysis 1, Woche 11

Differentialrechnung I

A1

11.1 Ableitung einer Funktion

Sei $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion. Die Gerade durch die Punkte $(a, f(a))$ und $(b, f(b))$ findet man als Graph der Funktion $\ell : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit

$$\ell(x) = \frac{f(b) - f(a)}{b - a} (x - a) + f(a).$$

Man berechnet direkt, dass $\ell(a) = f(a)$ und $\ell(b) = f(b)$, und weil die Funktion ℓ die Form $\ell(x) = c_1x + c_2$ hat mit $c_1, c_2 \in \mathbb{R}$, ist der Graph eine Gerade. Für den Richtungskoeffizienten c_1 gilt, dass $c_1 = \frac{f(b) - f(a)}{b - a}$.

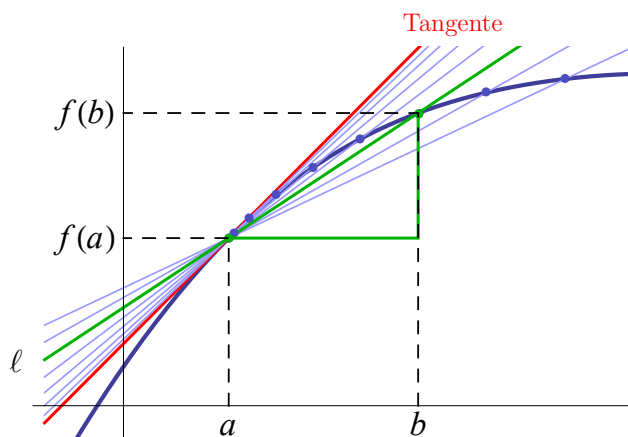


Abbildung 11.1: Approximation der Tangente an f in a

Wenn man nun b immer näher an a nimmt, sieht es aus, als ob die zugehörige Gerade sich der Tangente nähert. Das heißt, wenn

$$c := \lim_{b \downarrow a} \frac{f(b) - f(a)}{b - a} \quad (11.1)$$

existiert, dann müsste die Funktion $\ell : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit

$$\ell(x) = c(x - a) + f(a)$$

die Tangente an f an der Stelle $(a, f(a))$ beschreiben. In Abbildung 11.1 ist dies dargestellt.

Wenn man so vorgeht, dann sollte der Grenzwert in (11.1) auch existieren. Dazu definiert man folgendes:

Definition 11.1 Sei I ein offenes Intervall in \mathbb{R} mit $a \in I$.

- Die Funktion $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ heißt **differenzierbar** in a , wenn

$$\lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x) - f(a)}{x - a} \text{ existiert in } \mathbb{R}. \quad (11.2)$$

- Wenn dieser Limes existiert, schreibt man $f'(a) := \lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x) - f(a)}{x - a}$ und nennt $f'(a)$ die **Ableitung** von f in a .

Bemerkung 11.1.1 Wenn $I \subset \mathbb{R}$ ein offenes Intervall ist und $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion, die an jeder Stelle $a \in I$ differenzierbar ist, dann nennt man f differenzierbar auf I .

Bemerkung 11.1.2 Nehmen wir an, dass a und I wie in Definition 11.1 sind. Dann ist (11.2) gleichwertig zu:

$$\text{es gibt } c \in \mathbb{R} \text{ derart, dass } \lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x) - (f(a) + c(x - a))}{x - a} = 0. \quad (11.3)$$

Man sieht direkt, dass $c = f'(a)$ gilt. Die Formel in (11.3) kann man leicht veranschaulichen. Die Funktion $x \mapsto f(a) + c(x - a)$ beschreibt die Tangente zu f an der Stelle a . „Der Limes in (11.3) gleich null“ heißt, dass wenn man die vertikale Distanz zwischen f und ihrer Tangente vergleicht mit der horizontalen Entfernung von a , diese vertikale Distanz wesentlich schneller kleiner wird als die horizontale Entfernung. Vergleiche dazu in der Grafik die vertikale Differenz zwischen der roten und blauen Kurve mit der horizontalen Entfernung zu a bei $(a, f(a))$. Siehe Abbildung 11.2.

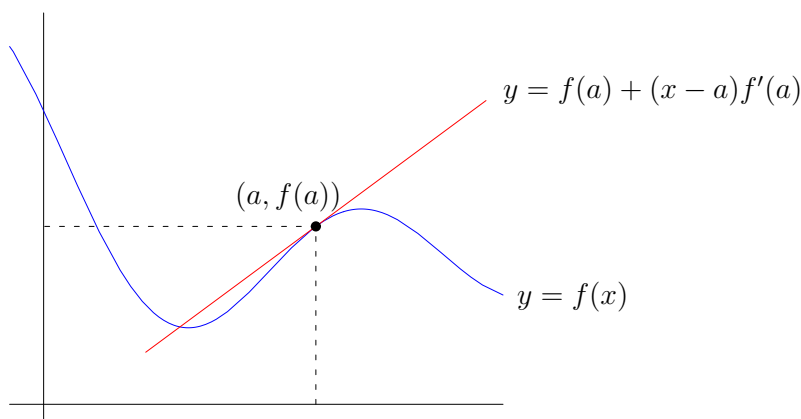


Abbildung 11.2: Die Graphik einer Funktion in blau und ihre Tangente in a in rot.

Bemerkung 11.1.3 Man kann auch Differenzierbarkeit für komplexe Funktionen definieren:

- Wenn man eine Funktion f vom offenen Intervall $I \subset \mathbb{R}$ nach \mathbb{C} betrachtet, dann heißt f differenzierbar in $a \in I$, wenn

$$(x \mapsto \operatorname{Re}(f(x))) : I \rightarrow \mathbb{R} \text{ und } (x \mapsto \operatorname{Im}(f(x))) : I \rightarrow \mathbb{R}$$

beide differenzierbar in a sind.

- Wenn man Funktionen von einer offenen Teilmenge $A \subset \mathbb{C}$ nach \mathbb{C} betrachtet, dann wird die Definition wie folg.: Sei $\alpha \in A$ und sei $B \subset A$ eine offene Umgebung von α . Die Funktion $f : A \rightarrow \mathbb{C}$ heißt **komplex differenzierbar** in α , wenn

$$\lim_{z \rightarrow \alpha} \frac{f(z) - f(\alpha)}{z - \alpha} \text{ existiert in } \mathbb{C}.$$

Bei komplex differenzierbar muss der Limes von „allen Richtungen“ genommen werden, man kann also erwarten, dass komplex differenzierbar eine „schwerere Bedingung“ ist als differenzierbar. Dies ist auch so, aber das werden wir hier nicht weiter besprechen. Der genaue Unterschied wird bei ‘Funktionentheorie’ deutlich werden.

11.2 Einseitige Ableitungen

Definition 11.2 Sei I ein Intervall in \mathbb{R} und $a \in I$. Sei $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion.

- Nehme an: $[a, a + \varepsilon) \subset I$ für irgendein $\varepsilon > 0$.
Die Funktion f heißt **rechtsdifferenzierbar** in $a \in I$, wenn

$$f'_+(a) := \lim_{x \downarrow a} \frac{f(x) - f(a)}{x - a} \text{ existiert in } \mathbb{R}.$$

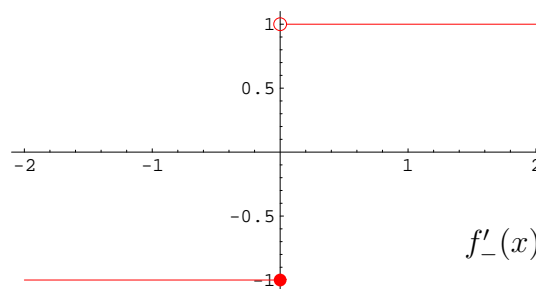
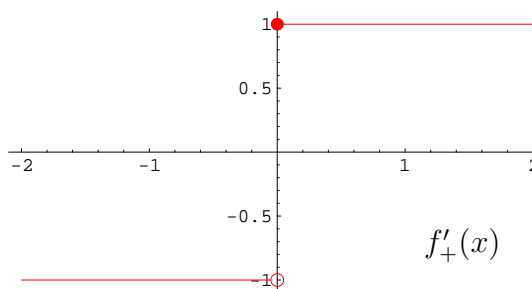
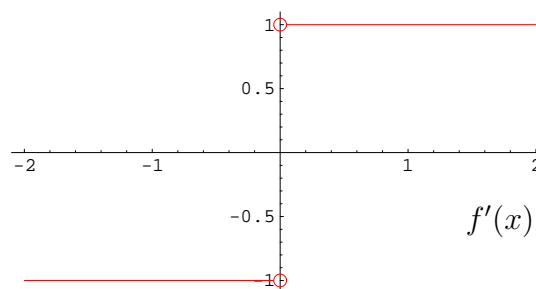
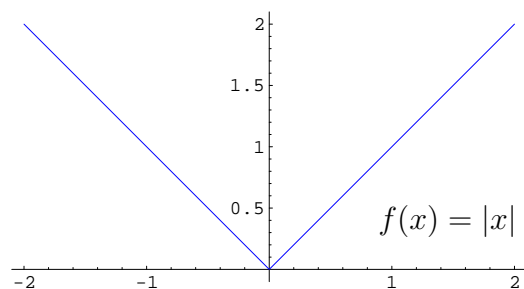
- Nehme an: $(a - \varepsilon, a] \subset I$ für irgendein $\varepsilon > 0$.
Die Funktion f heißt **linksdifferenzierbar** in $a \in I$, wenn

$$f'_-(a) := \lim_{x \uparrow a} \frac{f(x) - f(a)}{x - a} \text{ existiert in } \mathbb{R}. \quad (11.4)$$

Beispiel 11.1. Für $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $f(x) = |x|$ hat man

$$f'(x) = \begin{cases} 1 & \text{für } x > 0, \\ \text{existiert nicht} & \text{für } x = 0, \\ -1 & \text{für } x < 0; \end{cases}$$

$$f'_+(x) = \begin{cases} 1 & \text{für } x \geq 0, \\ -1 & \text{für } x < 0; \end{cases} \quad \text{und} \quad f'_-(x) = \begin{cases} 1 & \text{für } x > 0, \\ -1 & \text{für } x \leq 0; \end{cases}$$



Theorem 11.3 Sei $f : (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$ eine differenzierbare Funktion und $c \in (a, b)$.

1. Wenn $f'(c) > 0$, dann gibt es $\delta > 0$, so dass $\begin{cases} f(x) > f(c) \text{ für } x \in (c, c + \delta), \\ f(x) < f(c) \text{ für } x \in (c - \delta, c). \end{cases}$
2. Wenn $f'(c) < 0$, dann gibt es $\delta > 0$, so dass $\begin{cases} f(x) < f(c) \text{ für } x \in (c, c + \delta), \\ f(x) > f(c) \text{ für } x \in (c - \delta, c). \end{cases}$
3. Wenn f ein (lokales) Extremum¹ hat in c , dann gilt $f'(c) = 0$.

Bemerkung 11.3.1 Die letzte Aussage ist bekannt als das **Kriterium von Fermat** für ein Extremum.

Beweis. Sei $f'(c) > 0$ und nimm $\varepsilon = f'(c)$. Dann gibt es $\delta > 0$, so dass für $x \in (c - \delta, c + \delta) \setminus \{c\}$ gilt

$$\left| \frac{f(x) - f(c)}{x - c} - f'(c) \right| < \varepsilon$$

und dann auch

$$0 = f'(c) - \varepsilon < \frac{f(x) - f(c)}{x - c} < f'(c) + \varepsilon.$$

Das heißt, dass $f(x) - f(c)$ und $x - c$ das gleiche Vorzeichen haben und dies liefert die erste Behauptung. Die zweite Annahme zeigt auf ähnliche Art, dass $f(x) - f(c)$ und $x - c$ gegengesetzte Vorzeichen haben und so die zweite Behauptung.

Diese ersten beiden Behauptungen zeigen, dass es für $f'(c) \neq 0$ kein Extremum in c gibt. Die logische Umkehrung besagt dann, dass wenn es ein (lokales) Extremum in c gibt, dann gilt $f'(c) = 0$. ■

11.3 Höhere Ableitungen

Wenn $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ (oder $f : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$) differenzierbar ist in einer Umgebung von a , dann kann man $f' : B_r(a) \rightarrow \mathbb{R}$ (oder $f' : B_r(a) \rightarrow \mathbb{C}$) als selbständige Funktion betrachten und von dieser Funktion f' wieder die Differenzierbarkeit betrachten. Wir schreiben $f^{(1)} := f'$, $f^{(2)} := (f')'$ usw.

Definition 11.4 Sei $f : A \subset \mathbb{R}$ (oder \mathbb{C}) eine Funktion mit $B_r(a) \subset A$ für $a \in A$ und ein $r > 0$. Sei $n \in \mathbb{N} \setminus \{0, 1\}$. Nehme an, dass die ersten $n - 1$ Ableitungen $f^{(1)}, f^{(2)}, \dots, f^{(n-1)}$ in $B_r(a)$ existieren. Dann sagt man f ist n mal differenzierbar in a , wenn die n -te Ableitung

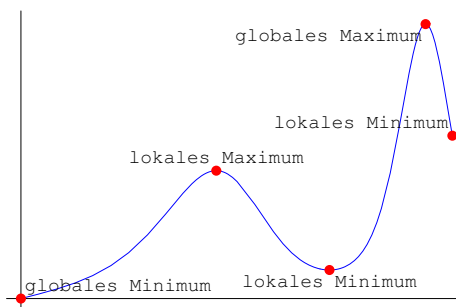
$$f^{(n)}(a) = \lim_{x \rightarrow a} \frac{f^{(n-1)}(x) - f^{(n-1)}(a)}{x - a} \in \mathbb{R}$$

existiert.

¹Sei I ein Intervall.

- Die Funktion $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ hat ein globales Maximum in $c \in I$, wenn $f(x) \leq f(c)$ für alle $x \in I$.
- Die Funktion $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ hat ein lokales Maximum in $c \in I$, wenn es $\varepsilon > 0$ gibt mit $f(x) \leq f(c)$ für alle $x \in I \cap (c - \varepsilon, c + \varepsilon)$.

Ähnlich definiert man ein globales und ein lokales Minimum. Bemerke, dass ein globales Extremum immer auch ein lokales Extremum ist.



Bemerkung 11.4.1 Man schreibt auch $f'' = f^{(2)}$ und $f''' = f^{(3)}$ usw. Manchmal werden auch römische Ziffern benutzt.

Bemerkung 11.4.2 Wenn die n -te Ableitung auch noch stetig ist, sagt man f ist n mal stetig differenzierbar.

Es sei noch bemerkt, dass um f' bei a differenzieren zu können, es nicht reicht f' nur in a zu haben. Um eine Ableitung in a betrachten zu können, muss die betreffende Funktion in einer Umgebung von a definiert sein. Das heißt, wenn wir $f''(a)$ berechnen möchten, dann soll f' bekannt sein in einer Umgebung von a .

Beispiel 11.2. Die Funktion $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $g(x) = x|x|$ ist einmal stetig differenzierbar in 0:

$$g'(x) = 2|x| \text{ für alle } x \in \mathbb{R},$$

$$g''(x) = \begin{cases} 2 & \text{für } x > 0, \\ -2 & \text{für } x < 0, \\ \text{existiert nicht in } 0, \end{cases}$$

und für $n \geq 2$:

$$g^{(n)}(x) = \begin{cases} 0 & \text{für } x \neq 0, \\ \text{existiert nicht in } 0. \end{cases}$$

Für $x \in (a, b) \subset \mathbb{R}^+$ kann man verwenden, dass $g(x) = x^2$ auf (a, b) und g die Standardableitungen hat. Ähnlich hat man für $x \in (a, b) \subset \mathbb{R}^-$, dass $g(x) = -x^2$. Bei $x = 0$ muss man zurück zur Definition:

$$g'(0) = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{g(x) - g(0)}{x - 0} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x|x| - 0|0|}{x - 0} = \lim_{x \rightarrow 0} |x| = 0.$$

Die zweite Ableitung in 0 existiert nicht, denn

$$\lim_{x \downarrow 0} \frac{g'(x) - g'(0)}{x - 0} = \lim_{x \downarrow 0} \frac{2|x| - 0}{x - 0} = 2,$$

$$\lim_{x \uparrow 0} \frac{g'(x) - g'(0)}{x - 0} = \lim_{x \uparrow 0} \frac{2|x| - 0}{x - 0} = -2.$$

11.4 Differenzierbarkeit liefert Stetigkeit

Lemma 11.5 Sei $f : (c, d) \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion und sei $a \in (c, d)$. Wenn f differenzierbar ist in a , dann ist f stetig in a .

Bemerkung 11.5.1 Auch gilt, dass wenn f rechts(links)differenzierbar ist in a , dann ist f rechts(links)stetig in a .

Beweis. Wir verwenden Lemma 10.1-3:

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow a} f(x) - f(a) &= \lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x) - f(a)}{x - a} (x - a) \\ &= \lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x) - f(a)}{x - a} \lim_{x \rightarrow a} (x - a) = f'(a) (a - a) = 0. \end{aligned}$$



Beispiel 11.3. Die Funktion $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $f(x) = |x|$ ist (siehe Beispiel 1)

1. stetig auf \mathbb{R} ;
2. differenzierbar auf $\mathbb{R} \setminus \{0\}$ und nicht differenzierbar in 0;
3. rechtsdifferenzierbar und linksdifferenzierbar auf \mathbb{R} !

Definition 11.6 Sei I ein Intervall in \mathbb{R} . Eine Funktion $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ heißt Lipschitz-stetig in $a \in I$, wenn es $L \in \mathbb{R}^+$ und eine Umgebung $(a - \delta, a + \delta)$ gibt derart, dass

$$|f(x) - f(a)| \leq L|x - a| \text{ für alle } x \in I \cap (a - \delta, a + \delta).$$

L heißt eine Lipschitz-Konstante bezüglich f in a .

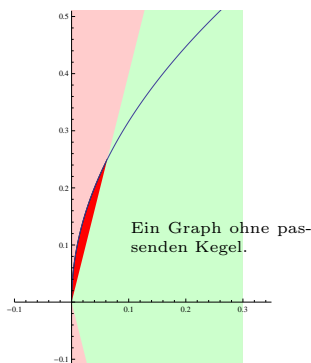
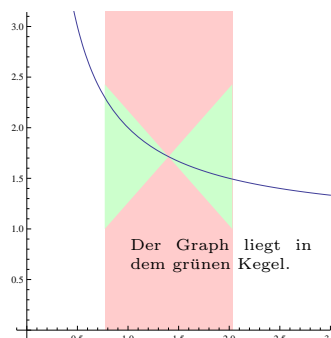
Bemerkung 11.6.1 Lipschitz-Stetigkeit gibt Stetigkeit. Sei $\varepsilon > 0$ und nehme $\delta = L^{-1}\varepsilon$.

Definition 11.7 Die Funktion f erfüllt die Lipschitz-Bedingung auf dem Intervall I mit Lipschitz-Konstante $L \in \mathbb{R}$, wenn

$$|f(x) - f(y)| \leq L|x - y| \text{ für alle } x, y \in I.$$

Beispiel 11.4. Die Funktion $f : (0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ mit $f(x) = \frac{1}{x} + 1$ ist Lipschitz-stetig in jedem $a > 0$. Denn setzen wir $L = \frac{2}{a^2}$, gilt

$$\begin{aligned} \left| \left(\frac{1}{x} + 1 \right) - \left(\frac{1}{a} + 1 \right) \right| &= \frac{|a - x|}{ax} \leq \\ \frac{|x - a|}{\frac{1}{2}a^2} &= L|x - a| \text{ für } x \in \left(\frac{1}{2}a, \frac{3}{2}a \right). \end{aligned}$$



Beispiel 11.5. $f : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ mit $f(x) = \sqrt{x}$ ist nicht Lipschitz-stetig in 0:

$$\left| \sqrt{x} - \sqrt{0} \right| = \sqrt{x} = \frac{1}{\sqrt{x}} |x - 0|$$

und $\frac{1}{\sqrt{x}}$ ist nicht beschränkt für $x \rightarrow 0$.

Lemma 11.8 Sei I ein Intervall in \mathbb{R} . Wenn f differenzierbar ist in $a \in I$, dann ist f Lipschitz-stetig in a .

Beweis. Weil $\lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x) - f(a)}{x - a}$ existiert, ist $\frac{f(x) - f(a)}{x - a}$ beschränkt auf einer punktierten Umgebung von a . Jede solche Schranke kann man als Lipschitz-Konstante nehmen. ■

11.5 Ableitungsregeln

Lemma 11.9 Seien $f, g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ differenzierbare Funktionen und $a \in \mathbb{R}$, so gilt:

1. $(f + g)'(a) = f'(a) + g'(a)$;
2. $(f \cdot g)'(a) = f'(a) \cdot g(a) + f(a) \cdot g'(a)$ (Produktregel);
3. wenn $g(a) \neq 0$, dann $\left(\frac{f}{g}\right)'(a) = \frac{f'(a) \cdot g(a) - f(a) \cdot g'(a)}{g(a)^2}$ (Quotientenregel);
4. $(f \circ g)'(a) = f'(g(a)) \cdot g'(a)$ (Kettenregel).

Bemerkung 11.9.1 Die genaue Aussage bei $(f + g)'(a) = f'(a) + g'(a)$ ist wie folgt: Wenn f und g differenzierbar sind in a , dann ist auch die Funktion $h : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, definiert durch $h(x) = f(x) + g(x)$, differenzierbar in a und außerdem gilt $h'(a) = f'(a) + g'(a)$.

Bemerkung 11.9.2 Übrigens braucht man für 1, 2 und 3 nur, dass f und g in einer Umgebung von a definiert sind und dass sie in a differenzierbar sind. Für die Kettenregel braucht man, dass f in einer Umgebung von $g(a)$ definiert ist und in $g(a)$ differenzierbar ist. Selbstverständlich soll g wieder in einer Umgebung von a definiert und in a differenzierbar sein.

Bemerkung 11.9.3 Identische Regeln gelten für differenzierbare Funktionen von (Teilmengen von) \mathbb{C} nach \mathbb{C} .

Beweis. Die erste Aussage ist eine sofortige Folge von Lemma 10.1 2. Für die zweite Aussage verwenden wir

$$\frac{(f \cdot g)(x) - (f \cdot g)(a)}{x - a} = \frac{f(x) - f(a)}{x - a} g(x) + f(a) \frac{g(x) - g(a)}{x - a}.$$

Lemma 10.1 2 und 3, und Lemma 11.5

$$\begin{aligned} & \lim_{x \rightarrow a} \left(\frac{f(x) - f(a)}{x - a} g(x) + f(a) \frac{g(x) - g(a)}{x - a} \right) \\ &= \lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x) - f(a)}{x - a} \lim_{x \rightarrow a} g(x) + f(a) \lim_{x \rightarrow a} \frac{g(x) - g(a)}{x - a} \\ &= f'(a) g(a) + f(a) g'(a). \end{aligned}$$

Für die dritte Aussage

$$\begin{aligned} \frac{\frac{f(x)}{g(x)} - \frac{f(a)}{g(a)}}{x - a} &= \frac{f(x) g(a) - f(a) g(x)}{g(a) g(x) (x - a)} \\ &= \frac{1}{g(a) g(x)} \left(\frac{f(x) - f(a)}{x - a} g(a) - f(a) \frac{g(x) - g(a)}{x - a} \right) \end{aligned}$$

und wiederum Lemma 10.1.

Den Beweis der Kettenregel spalten wir auf. 1) Wenn $g'(a) \neq 0$, dann gilt für $|x - a| < \delta$, mit δ genügend klein gewählt, dass $g(x) \neq g(a)$. Sei $\{x_n\}_{n=0}^{\infty}$ mit $x_n \rightarrow a$, dann folgt aus der Stetigkeit von g , dass $y_n = g(x_n) \rightarrow g(a)$. Dann kann man

$$\frac{f(g(x_n)) - f(g(a))}{x_n - a} = \frac{f(y_n) - f(g(a))}{y_n - g(a)} \frac{g(x_n) - g(a)}{x_n - a}$$

schreiben und weil $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f(y_n) - f(g(a))}{y_n - g(a)} = f'(g(a))$ und $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{g(x_n) - g(a)}{x_n - a} = g'(a)$ gilt, folgt so das Ergebnis.

2) Wenn $g'(a) = 0$, verwenden wir Lemma 11.8, nämlich dass f die Lipschitzbedingung in $g(a)$ erfüllt:

$$\left| \frac{f(g(x)) - f(g(a))}{x - a} \right| \leq L \left| \frac{g(x) - g(a)}{x - a} \right|$$

und $\lim_{x \rightarrow a} \frac{g(x) - g(a)}{x - a} = g'(a) = 0$ liefert das Ergebnis. ■

11.6 Potenzreihen ableiten

Ableitungen von Polynomen sind in der Schule ausgiebig behandelt worden. Als Auffrischung:

- Sei $c \in \mathbb{R}$ und $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $f(x) = c$, dann gilt

$$f'(x) = \lim_{y \rightarrow x} \frac{c - c}{y - x} = \lim_{y \rightarrow x} 0 = 0. \quad (11.5)$$

- Sei $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $f(x) = x$, dann gilt

$$f'(x) = \lim_{y \rightarrow x} \frac{y - x}{y - x} = \lim_{y \rightarrow x} 1 = 1. \quad (11.6)$$

- Sei $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $f(x) = x^n$ und $n \in \mathbb{N}^+$, dann gilt

$$f'(x) = nx^{n-1}. \quad (11.7)$$

Um (11.7) zu beweisen, benutzen wir Lemma 11.9 und vollständige Induktion. Wir haben $(x^1)' = 1 = 1 x^{1-1}$. Angenommen $(x^n)' = nx^{n-1}$ gilt, so folgt

$$\begin{aligned} (x^{n+1})' &= (x x^n)' = (x)' (x^n) + (x) (x^n)' \\ &= 1 x^n + x nx^{n-1} = (n+1) x^n. \end{aligned}$$

Wiederum mit Lemma 11.9 folgt für $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, definiert durch

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n$$

mit $a_i \in \mathbb{R}$, dass diese Funktion differenzierbar ist und, dass

$$f'(x) = a_1 + 2a_2x + \dots + na_nx^{n-1}. \quad (11.8)$$

Wenn man genau hinschaut sieht man, dass auch $f : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ mit $f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n$ und $a_i \in \mathbb{C}$ die Ableitung $f'(x)$ in (11.8) hat.

Wir werden nun zeigen, dass innerhalb des Konvergenzradius, Funktionen, die durch eine Potenzreihe definiert sind, eine ähnlich aussehende Ableitung besitzen.

Theorem 11.10 Sei $f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ eine Potenzreihe mit Konvergenzradius $R \in (0, \infty]$. Dann ist $f(x) : B_R(0) \rightarrow \mathbb{R}$ differenzierbar (und auch $B_R(0) \rightarrow \mathbb{C}$ komplex differenzierbar) und

$$f'(x) = \sum_{n=1}^{\infty} na_n x^{n-1} \text{ für } x \in B_R(0). \quad (11.9)$$

Bevor wir dieses Theorem beweisen, brauchen wir zwei Hilfssätze.

Lemma 11.11 Die folgenden Potenzreihen haben den gleichen Konvergenzradius:

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n, \quad \sum_{n=0}^{\infty} |a_n| x^n, \quad \sum_{n=1}^{\infty} a_n n x^n \quad \text{und} \quad \sum_{n=1}^{\infty} a_n n x^{n-1}.$$

Beweis. Mit dem Wurzelkriterium, Lemma 7.13, siehe auch Bemerkung 8.4.1, findet man den Konvergenzradius R von $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ via „ $R\ell = 1$ “ und $\ell = \limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|}$.

Weil

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = \limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|}$$

gilt, haben die ersten beiden Potenzreihen den gleichen Konvergenzradius.

Weil

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n n|} = \limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{n} = \limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|}$$

gilt, man erinnere sich an die Rechenregel für den Limes Superior und $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{n} = 1$, hat auch die dritte Potenzreihe den gleichen Konvergenzradius.

Weil

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n n x^n = x \sum_{n=1}^{\infty} a_n n x^{n-1}$$

gilt, hat auch die letzte Potenzreihe den gleichen Konvergenzradius. ■

Um zu beweisen, dass f in Theorem 11.10 die besagte Ableitung hat, ist für $x \in B_R(0)$ folgendes zu zeigen:

$$\lim_{y \rightarrow x} \left| \frac{\sum_{n=0}^{\infty} a_n y^n - \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n}{y - x} - \sum_{n=1}^{\infty} a_n n x^{n-1} \right| = 0. \quad (11.10)$$

Setzen wir $\delta = \frac{1}{2}(R - |x|)$. Es gilt $\delta > 0$ und weil $|x| = R - 2\delta$, findet man für y mit $|x - y| < \delta$, dass

$$|y| \leq |y - x| + |x| < \delta + R - 2\delta < R - \delta < R$$

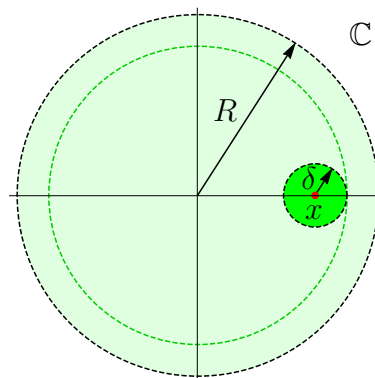
und dann konvergiert auch $\sum_{n=0}^{\infty} a_n y^n$. Die Potenzreihe $\sum_{n=1}^{\infty} a_n n x^{n-1}$ konvergiert wegen des letzten Lemmas. Also dürfen wir die drei unendlichen Summen in (11.10) zusammenlegen. Weil auch noch die Terme für $n = 0, 1$ gleich Null sind, ist (11.10) identisch zu

$$\lim_{y \rightarrow x} \left| \sum_{n=2}^{\infty} a_n \left(\frac{y^n - x^n}{y - x} - n x^{n-1} \right) \right| = 0. \quad (11.11)$$

Um (11.11) zu zeigen, werden wir für den Term zwischen Klammern die folgende Abschätzung verwenden.

Lemma 11.12 Für $x, y \in \mathbb{C}$ und $n \in \mathbb{N}$ mit $n \geq 2$ gilt

$$\left| \frac{y^n - x^n}{y - x} - n x^{n-1} \right| \leq \frac{n(n-1)}{2} |y - x| \max(|x|, |y|)^{n-2}. \quad (11.12)$$



Beweis. Für $n = 2$ gilt $\left| \frac{y^2 - x^2}{y - x} - 2x \right| = \left| \frac{(x-y)(x+y)}{x-y} - 2x \right| = |y - x|$ und die Behauptung stimmt. Angenommen (11.12) gilt für n . Dann folgt

$$\begin{aligned} & \left| \frac{y^{n+1} - x^{n+1}}{y - x} - (n+1)x^n \right| \\ &= \left| \frac{y(y^n - x^n) + x^n(y - x)}{y - x} - nx^{n-1}y + nx^{n-1}(y - x) - x^n \right| \\ &= \left| \frac{y(y^n - x^n)}{y - x} - nx^{n-1}y + nx^{n-1}(y - x) \right| \\ &\leq \left| \frac{y^n - x^n}{y - x} - nx^{n-1} \right| |y| + n|x|^{n-1}|y - x| \\ &\leq \frac{n(n-1)}{2} |y - x| \max(|x|, |y|)^{n-2} |y| + n|y - x| |x|^{n-1} \\ &\leq \left(\frac{n(n-1)}{2} + n \right) |y - x| \max(|x|, |y|)^{n-1} = \frac{(n+1)n}{2} |y - x| \max(|x|, |y|)^{n-1}, \end{aligned}$$

und Lemma 11.12 ist mit vollständiger Induktion bewiesen. \blacksquare

Beweis von Theorem 11.10. Für x, y und δ wie oben gilt $\max(|x|, |y|) < R - \frac{1}{2}\delta$ und

$$\begin{aligned} \sum_{n=2}^N |a_n| \left| \frac{y^n - x^n}{y - x} - nx^{n-1} \right| &\leq \sum_{n=2}^N |a_n| \frac{n(n-1)}{2} |y - x| \max(|x|, |y|)^{n-2} \\ &= \frac{1}{2} |y - x| \sum_{n=2}^N |a_n| n(n-1) \left(R - \frac{1}{2}\delta \right)^{n-2}. \end{aligned} \quad (11.13)$$

Mit der Hilfe von Lemma 11.11 konvergiert auch die Potenzreihe

$$\sum_{n=2}^{\infty} |a_n| n(n-1) t^{n-2} \text{ für } |t| < R$$

und existiert

$$\sum_{n=2}^{\infty} |a_n| n(n-1) \left(R - \frac{1}{2}\delta \right)^{n-2} =: M \in \mathbb{R}^+. \quad (11.14)$$

Es folgt aus (11.13) und (11.14), dass

$$\left| \sum_{n=2}^{\infty} a_n \left(\frac{y^n - x^n}{y - x} - nx^{n-1} \right) \right| \leq \sum_{n=2}^{\infty} |a_n| \left| \frac{y^n - x^n}{y - x} - nx^{n-1} \right| \leq \frac{1}{2} |y - x| M$$

und mit dem Einschließungslemma, dass

$$\lim_{y \rightarrow x} \left| \sum_{n=2}^{\infty} a_n \left(\frac{y^n - x^n}{y - x} - nx^{n-1} \right) \right| = 0.$$

Genau dies wäre zu zeigen. \blacksquare

Man kann das gleiche Ergebnis verwenden, um zu zeigen, dass innerhalb des Konvergenzradius auch f' differenzierbar ist.

Korollar 11.13 *Innerhalb des Konvergenzradius ist eine Potenzreihe beliebig oft differenzierbar. Außerdem gilt für die n -te Ableitung von $f(x) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k x^k$, dass $f^{(n)}(0) = n! a_n$.*

11.7 Spezielle Potenzreihen

11.7.1 Exponentialfunktion

Wir haben die Exponentialfunktion definiert in Definition 8.5 als eine Potenzreihe

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

und in Lemma 8.6 sahen wir, dass sie mit Konvergenzradius ∞ hat. Wegen Theorem 11.10 gilt für alle $x \in \mathbb{R}$

$$\exp'(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{n!} x^{n-1} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(n-1)!} x^{n-1} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} x^n = \exp(x).$$

Lassen Sie uns noch einige Regeln für diese Funktion ableiten.

In Lemma 8.7 sahen wir, dass $\exp(x+y) = \exp(x)\exp(y)$ für alle $x, y \in \mathbb{C}$, und deswegen finden wir

$$\exp(nx) = (\exp(x))^n \text{ für } x \in \mathbb{C} \text{ und } n \in \mathbb{N}. \quad (11.15)$$

Für $x \in \mathbb{R}^+$ folgt $\exp(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} x^n > 0$ und mit $\exp(-x)\exp(x) = \exp(0) = 1$ bekommen wir

$$\exp(x) > 0 \text{ für alle } x \in \mathbb{R}. \quad (11.16)$$

Weil $y^m = a \in \mathbb{R}^+$ mit $m \in \mathbb{N}^+$ eindeutig lösbar ist in \mathbb{R}^+ , und diese Lösung $y = \sqrt[m]{a}$ ist, finden wir für $n \in \mathbb{N}$ und $m \in \mathbb{N}^+$ aus

$$\left(\exp\left(\frac{n}{m}\right)\right)^m = \exp(n) = (\exp(1))^n,$$

dass

$$\exp\left(\frac{n}{m}\right) = \exp(1)^{\frac{n}{m}}. \quad (11.17)$$

Dies gilt sogar für $n \in \mathbb{Z}^-$, denn mit $\tilde{n} = -n \in \mathbb{N}$ folgt

$$\exp\left(\frac{n}{m}\right) = \frac{1}{\exp\left(-\frac{n}{m}\right)} = \frac{1}{\exp\left(\frac{\tilde{n}}{m}\right)} = \frac{1}{\exp(1)^{\tilde{n}/m}} = \exp(1)^{\frac{n}{m}}.$$

Definition 11.14 (Die Eulersche Zahl) $e := \exp(1)$.

Für alle $q \in \mathbb{Q}$ haben wir also

$$\exp(q) = e^q.$$

Weil $(x \mapsto \exp(x)) : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ differenzierbar, also auch stetig ist, ist

$$e^x := \exp(x)$$

eine vernünftige Definition. Wir werden sogar e^z definieren:

Definition 11.15 $e^z := \exp(z)$ für $z \in \mathbb{C}$.

Wir finden

$$\begin{aligned} e^{z+w} &= \exp(z+w) = \exp(z)\exp(w) = e^z e^w \text{ für } w, z \in \mathbb{C}, \\ e^{nz} &= \exp(nz) = (\exp(z))^n = (e^z)^n \text{ für } n \in \mathbb{N} \text{ und } z \in \mathbb{C}, \end{aligned}$$

und e^z bringt tatsächlich die Rechenregel, die man erwartet. Aber Vorsicht, wir haben keine Regel, die für beliebige $w, z \in \mathbb{C} \setminus \mathbb{Z}$ definiert, was $(e^z)^w$ sein sollte.

11.7.2 Trigonometrische Funktionen

Auf Seite 26 haben wir kurz wiederholt, wie die Sinus- und Cosinusfunktion geometrisch definiert sind. Wir wollen hier eine analytische Definition geben und anschließend zeigen, dass diese neue Definition tatsächlich die gleichen Eigenschaften hat wie die altbekannten Funktionen.

Definition 11.16 Sei $z \in \mathbb{C}$. Dann setzt man:

- $\sin(z) = \frac{e^{iz} - e^{-iz}}{2i}$;
- $\cos(z) = \frac{e^{iz} + e^{-iz}}{2}$.

Bemerkung 11.16.1 Weil die Potenzreihe bei der Exponentialfunktion Konvergenzradius ∞ hat, kann man auch \sin und \cos als Potenzreihe schreiben für alle $z \in \mathbb{C}$ (und also auch für $x \in \mathbb{R}$):

$$\begin{aligned} \sin(z) &= \frac{1}{2i} \left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} (iz)^n - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} (-iz)^n \right) = \frac{1}{2i} \sum_{\substack{n=0 \\ n \text{ ungerade}}}^{\infty} \frac{2}{n!} i^n z^n \\ &= \frac{1}{2i} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{2}{(2k+1)!} i^{2k+1} z^{2k+1} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k+1)!} z^{2k+1} \end{aligned} \quad (11.18)$$

und

$$\begin{aligned} \cos(z) &= \frac{1}{2} \left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} (iz)^n + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} (-iz)^n \right) = \frac{1}{2} \sum_{\substack{n=0 \\ n \text{ gerade}}}^{\infty} \frac{2}{n!} i^n z^n \\ &= \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{2}{(2k)!} i^{2k} z^{2k} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k)!} z^{2k}. \end{aligned} \quad (11.19)$$

Die Sinus und Cosinus aus Definition 11.16 erfüllen Folgendes:

1. Sie sind reell für $x \in \mathbb{R}$, denn die Koeffizienten in (11.18) und (11.19) sind reell. Es gilt sogar

$$\sin(0) = 0 \text{ und } \cos(0) = 1.$$

Außerdem ist der Sinus ungerade und der Cosinus gerade:

$$\sin(-x) = -\sin(x) \text{ und } \cos(-x) = \cos(x) \text{ für alle } x \in \mathbb{R}.$$

2. Sie erfüllen

$$(\sin(x))^2 + (\cos(x))^2 = 1, \quad (11.20)$$

denn

$$\begin{aligned} (\sin(x))^2 + (\cos(x))^2 &= \left(\frac{e^{ix} - e^{-ix}}{2i} \right)^2 + \left(\frac{e^{ix} + e^{-ix}}{2} \right)^2 \\ &= \frac{e^{2ix} - 2e^0 + e^{-2ix}}{-4} + \frac{e^{2ix} + 2e^0 + e^{-2ix}}{4} = 1. \end{aligned}$$

3. Es gilt

$$\sin'(x) = \cos(x), \quad (11.21)$$

denn aus (11.18) und (11.9) folgt

$$\sin'(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k+1)!} (2k+1) x^{2k} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k)!} x^{2k} = \cos(x).$$

Ebenso gilt

$$\cos'(x) = -\sin(x), \quad (11.22)$$

denn

$$\begin{aligned} \cos'(x) &= \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k)!} 2k x^{2k-1} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k-1)!} x^{2k-1} \\ &= - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{(2m+1)!} x^{2m+1} = -\sin(x). \end{aligned}$$

4. Es gilt

$$\sin(x+y) = \sin(x) \cos(y) + \cos(x) \sin(y), \quad (11.23)$$

$$\cos(x+y) = \cos(x) \cos(y) - \sin(x) \sin(y). \quad (11.24)$$

Man beweist diese Aussagen mit Hilfe von Definition 11.16, $e^{a+b} = e^a e^b$ und sorgfältigem Rechnen.

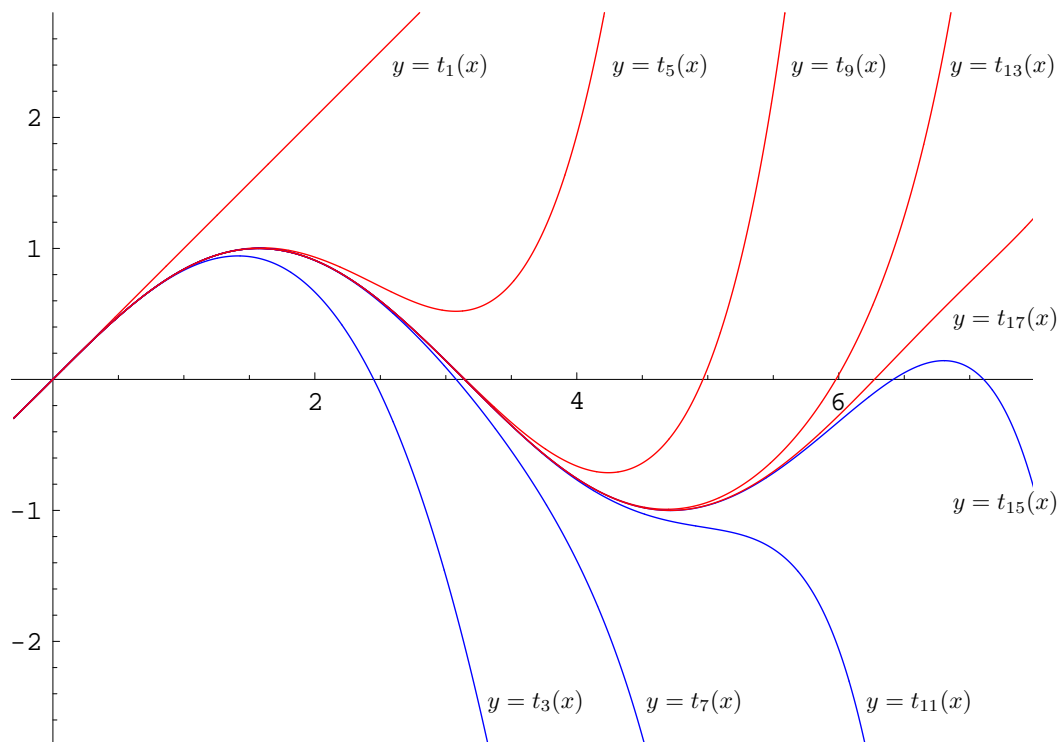


Abbildung 11.3: Hier oben stehen Skizzen zu $y = t_{2m+1}(x)$, wobei die t_{2m+1} die Polynomen darstellen, die man bekommt, wenn man in der Potenzreihe bei dem Sinus nur die Terme bis zu Grad $2m+1$ nimmt: $t_{2m+1}(x) = \sum_{k=0}^m \frac{(-1)^k}{(2k+1)!} x^{2k+1}$.

5. Der Cosinus hat eine erste positive Nullstelle in $(\sqrt{2}, 2)$.

Die Terme in der Reihe $\sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{(2m)!} x^{2m}$ sind für $x > 0$ alternierend. Für $x^2 < 12$ zeigt man, dass die Folge

$$\left\{ \frac{1}{(2m)!} x^{2m} \right\}_{m=0}^{\infty} = \left\{ 1, \frac{1}{2}x^2, \frac{1}{4!}x^4, \frac{1}{6!}x^6, \dots \right\}$$

ab $m = 1$ monoton fällt. Daraus folgt, wie beim Kriterium von Leibniz, dass für $x^2 < 12$ gilt:

$$1 - \frac{1}{2}x^2 \leq 1 - \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{4!}x^4 - \frac{1}{6!}x^6 \leq 1 - \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{4!}x^4 - \frac{1}{6!}x^6 + \frac{1}{8!}x^8 - \frac{1}{10!}x^{10} \leq \dots$$

und

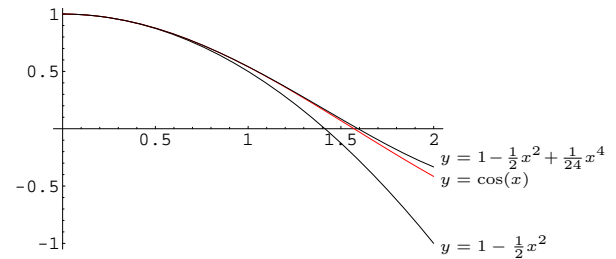
$$1 \geq 1 - \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{4!}x^4 \geq 1 - \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{4!}x^4 - \frac{1}{6!}x^6 + \frac{1}{8!}x^8 \geq \dots$$

Das heißt:

$$1 - \frac{1}{2}x^2 < \cos(x) < 1 - \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{24}x^4 \text{ für } x \in (-\sqrt{12}, \sqrt{12}).$$

Weil $1 - \frac{1}{2}x^2 \geq 0$ für $x \in [0, \sqrt{2}]$ und weil $\left[1 - \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{24}x^4\right]_{x=2} = -\frac{1}{3} < 0$ gilt, hat der Cosinus wegen Theorem 10.13 eine erste positive Nullstelle in $(\sqrt{2}, 2)$.

Diese erste positive Nullstelle vom Cosinus definiert man als $\frac{1}{2}\pi$.



Aus (11.20) folgt dann $|\sin(\frac{1}{2}\pi)| = 1$. Um zu zeigen, dass $\sin(\frac{1}{2}\pi) = +1$, kann man die alternierende Folge in der Sinusreihe benutzen. Sie liefert die folgende Abschätzung:

$$x - \frac{1}{6}x^3 < \sin(x) \text{ für } x \in (0, \sqrt{20}).$$

Mit

$$\begin{aligned} x - \frac{1}{6}x^3 &\geq 1 - \frac{1}{6} \left(\frac{3}{2}\right)^3 = \frac{7}{16} && \text{auf } \left[1, \frac{3}{2}\right] \\ x - \frac{1}{6}x^3 &\geq \frac{3}{2} - \frac{1}{6}(2)^3 = \frac{1}{6} && \text{auf } \left[\frac{3}{2}, 2\right] \end{aligned}$$

hat man $\sin(x) > 0$ auf $[1, 2]$. Weil $\frac{1}{2}\pi \in (\sqrt{2}, 2) \subset [1, 2]$ gilt, folgt

$$\sin\left(\frac{1}{2}\pi\right) = 1. \quad (11.25)$$

6. Es folgt π ist eine Nullstelle für den Sinus: Durch (11.23) findet man

$$\sin(\pi) = 2 \cos\left(\frac{1}{2}\pi\right) \sin\left(\frac{1}{2}\pi\right) = 0.$$

Mit (11.25) findet man weitere Eigenschaften:

$$\begin{aligned} \sin\left(x + \frac{1}{2}\pi\right) &= \sin(x) \cos\left(\frac{1}{2}\pi\right) + \cos(x) \sin\left(\frac{1}{2}\pi\right) = \cos(x), \\ \sin\left(x - \frac{1}{2}\pi\right) &= \sin(x) \cos\left(\frac{1}{2}\pi\right) - \cos(x) \sin\left(\frac{1}{2}\pi\right) = -\cos(x), \end{aligned}$$

und anschließend

$$\begin{aligned} \sin(x + \pi) &= \cos\left(x + \frac{1}{2}\pi\right) = -\sin(x), \\ \sin(x + 2\pi) &= -\sin(x + \pi) = \sin(x), \\ \cos(x + \pi) &= \sin\left(x + \frac{3}{2}\pi\right) = -\sin\left(x + \frac{1}{2}\pi\right) = -\cos(x), \\ \cos(x + 2\pi) &= -\cos(x + \pi) = \cos(x). \end{aligned}$$

Bemerkung 11.16.2 In der Schule hat man Sinus (und auch Cosinus) definiert mit Winkeln und Einheitskreis. Hier werden sie durch eine Potenzreihe definiert. Bekommt man eigentlich die gleichen Funktionen? Beide Definitionen vom Sinus geben eine Funktion $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $f''(x) = -f(x)$ für $x \in \mathbb{R}$ und mit $f(0) = 0$ und $f'(0) = 1$. Spätestens in einer Vorlesung Differentialgleichungen wird gezeigt, dass es genau eine Funktion gibt mit diesen Eigenschaften.

Der Tangens und der Cotangens werden definiert als:

$$\begin{aligned} \tan : \{z \in \mathbb{C}; \cos(z) \neq 0\} &\rightarrow \mathbb{C} & \text{mit } \tan(z) &= \frac{\sin(z)}{\cos(z)}, \\ \cot : \{z \in \mathbb{C}; \sin(z) \neq 0\} &\rightarrow \mathbb{C} & \text{mit } \cot(z) &= \frac{\cos(z)}{\sin(z)}. \end{aligned}$$

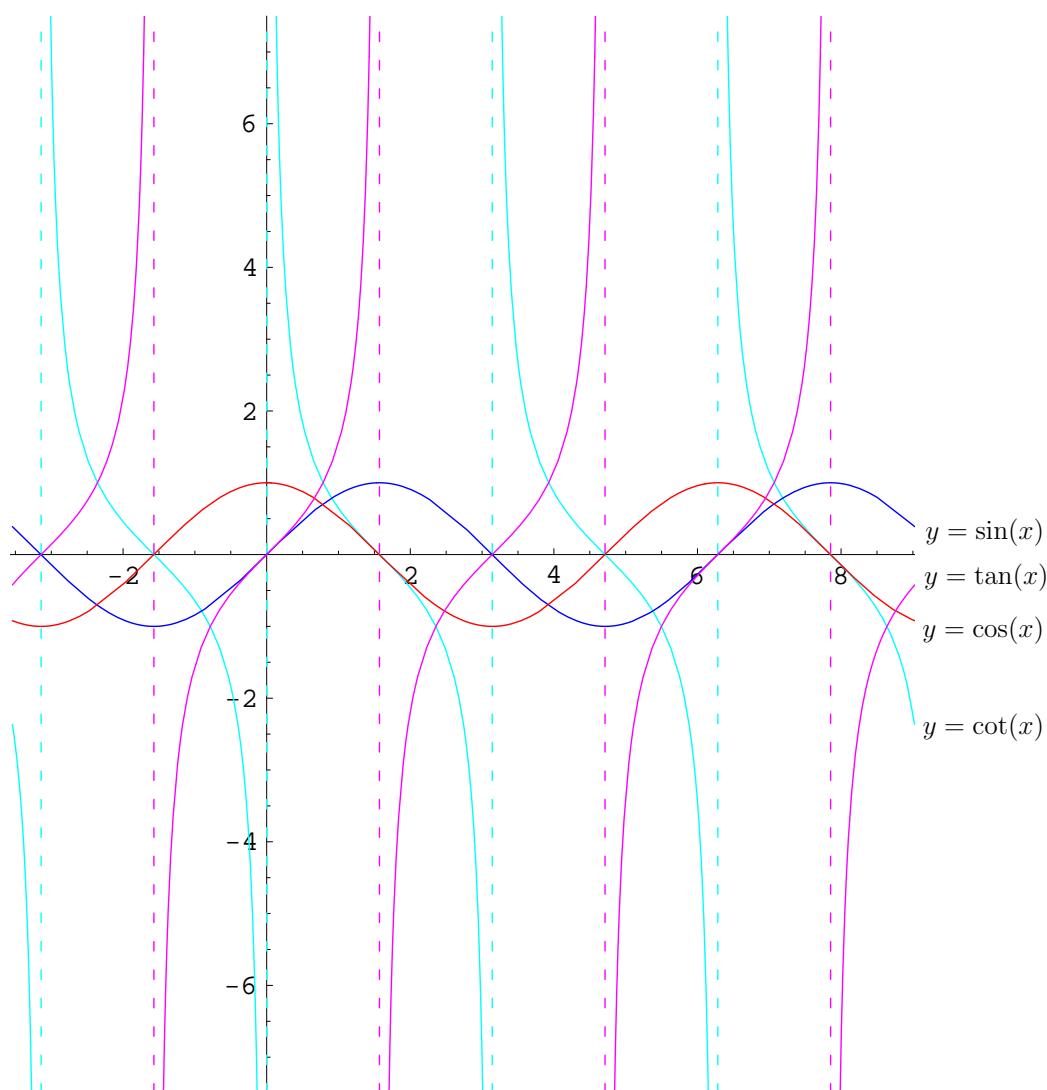


Abbildung 11.4: Skizzen zu sin, cos, tan und cot

11.7.3 Hyperbolische Funktionen

Auch den folgenden Funktionen kann man begegnen.

Definition 11.17 Sei $z \in \mathbb{C}$. Man setzt:

- $\sinh(z) = \frac{e^z - e^{-z}}{2}$ (*Sinus hyperbolicus*);
- $\cosh(z) = \frac{e^z + e^{-z}}{2}$ (*Cosinus hyperbolicus*);
- $\tanh(z) = \frac{\sinh(z)}{\cosh(z)}$;
- $\coth(z) = \frac{\cosh(z)}{\sinh(z)}$ für $z \neq 0$.

Einige Eigenschaften von \sinh und \cosh :

1. Sie sind reell für $x \in \mathbb{R}$ und es gilt

$$\sinh(0) = 0 \text{ und } \cosh(0) = 1. \quad (11.26)$$

2. Es gilt

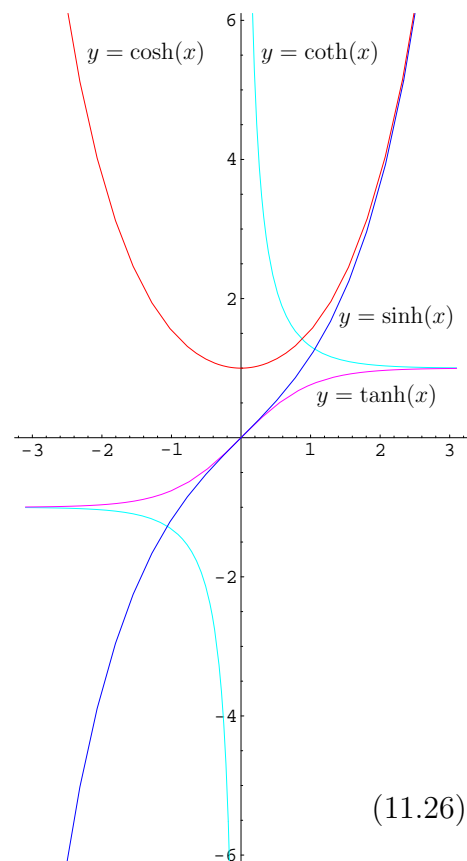
$$(\cosh(x))^2 - (\sinh(x))^2 = 1, \quad (11.27)$$

3. und

$$\sinh'(x) = \cosh(x) \text{ und } \cosh'(x) = \sinh(x). \quad (11.28)$$

Zwischen \sin und \sinh , respektive \cos und \cosh gibt es folgende Identitäten:

$$\sinh(iz) = i \sin(z) \text{ und } \cosh(iz) = \cos(z).$$



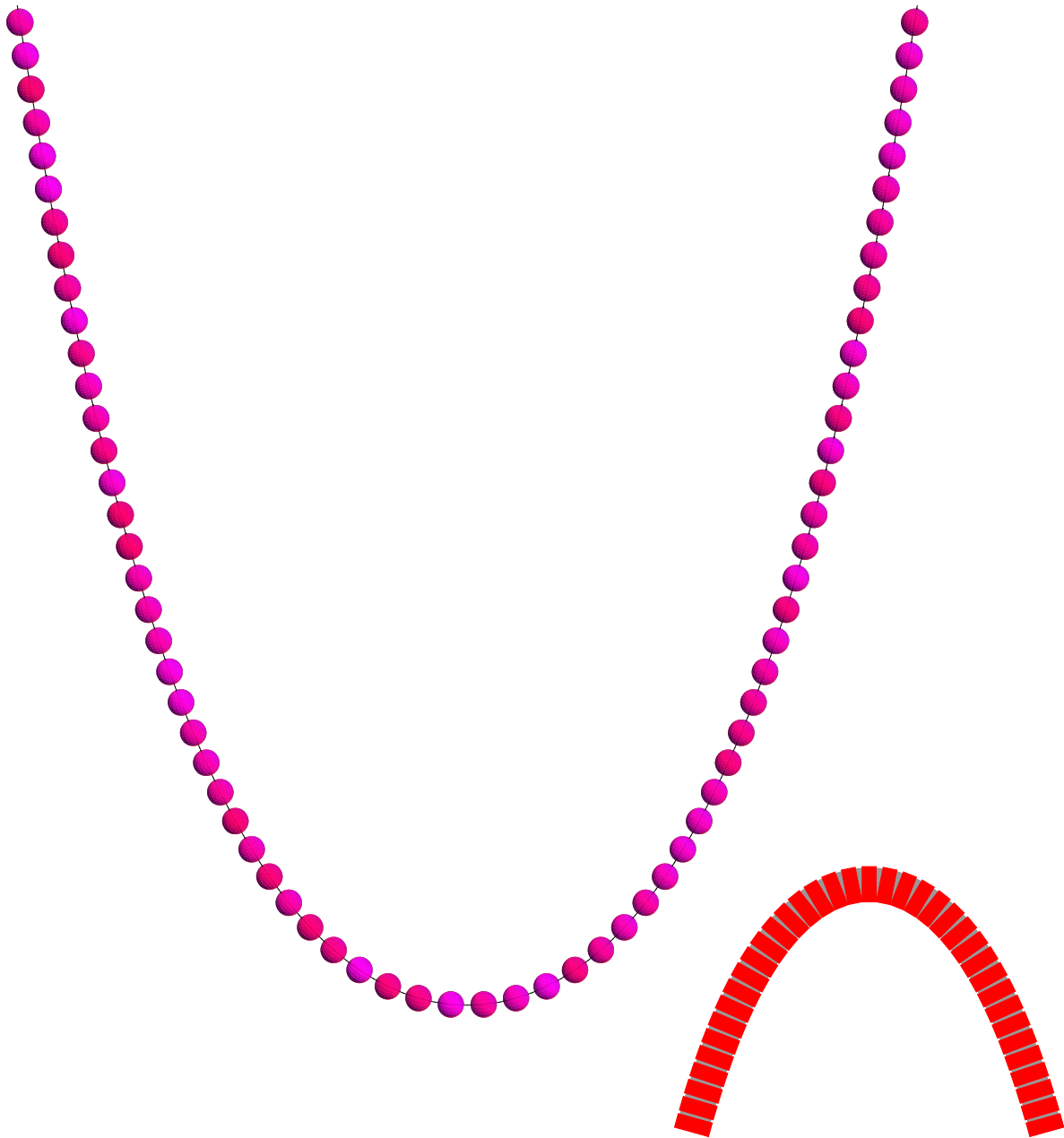


Abbildung 11.5: Die Funktion Cosinus hyperbolicus taucht auf als Kettenlinie. Der Maurer, der ein stabilen Bogen errichten möchte, verwendet einen skalierten $-\cosh$.

Analysis 1, Woche 12

Differentialrechnung II

A1

12.1 Mittelwertsatz und Folgen

Theorem 12.1 (Rolle) Sei $a, b \in \mathbb{R}$ mit $a < b$ und $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion. Nehmen wir an, dass f stetig ist, dass $f|_{(a,b)} : (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$ differenzierbar ist und $f(a) = f(b)$. Dann gibt es $c \in (a, b)$ mit $f'(c) = 0$.

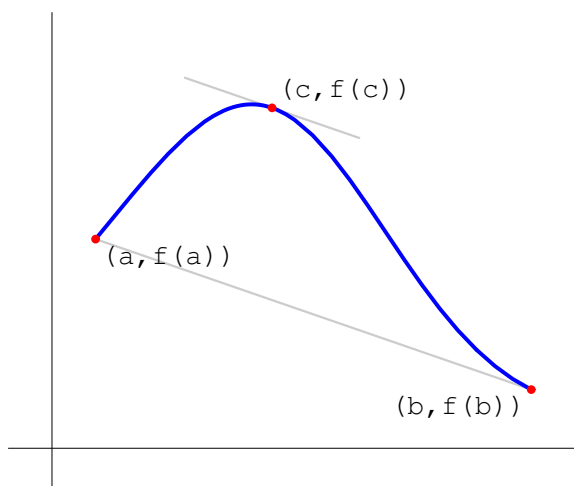
Beweis. Wenn f konstant ist, so gilt sogar für jedes $x \in (a, b)$

$$f'(x) = \lim_{y \rightarrow x} \frac{f(y) - f(x)}{y - x} = \lim_{y \rightarrow x} \frac{0}{y - x} = 0.$$

Wenn f nicht konstant ist, dann gibt es $x_0 \in (a, b)$ mit $f(x_0) \neq f(a)$. Wenn $f(x_0) > f(a)$, dann hat wegen Theorem 10.15 f ein Maximum in $[a, b]$, sagen wir in x_1 , und weil $f(x_0) > f(a) = f(b)$ muss x_1 im Innern des Intervalls liegen, das heißt $x_1 \in (a, b)$. Eine Anwendung von Theorem 11.3 gibt $f'(x_1) = 0$. Für $f(x_0) < f(a)$ geht man ähnlich vor. ■

Theorem 12.2 (Mittelwertsatz) Sei $a, b \in \mathbb{R}$ mit $a < b$ und $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion. Nehmen wir an, dass f stetig ist und dass $f|_{(a,b)} : (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$ differenzierbar ist. Dann gibt es $c \in (a, b)$ mit

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



Beweis. Man betrachte $g : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ mit

$$g(x) = f(x) - \frac{f(b) - f(a)}{b - a} (x - a).$$

Es folgt sofort, dass $g(a) = f(a)$ und

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

und dass man den Satz von Rolle auf g anwenden kann. ■

Korollar 12.3 Sei $f : (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$ eine differenzierbare Funktion.

1. Wenn $f'(x) \geq 0$ für alle $x \in (a, b)$, dann ist f monoton wachsend auf (a, b) .
2. Wenn $f'(x) > 0$ für alle $x \in (a, b)$, dann ist f streng monoton wachsend auf (a, b) .
3. Wenn $f'(x) \leq 0$ für alle $x \in (a, b)$, dann ist f monoton fallend auf (a, b) .
4. Wenn $f'(x) < 0$ für alle $x \in (a, b)$, dann ist f streng monoton fallend auf (a, b) .

Beweis. Man nehme $x_1 < x_2$ mit $x_1, x_2 \in (a, b)$ und der Mittelwertsatz gibt $c \in (x_1, x_2)$, so dass

$$f(x_2) - f(x_1) = (x_2 - x_1) f'(c).$$

Die Ungleichung für $f'(x)$ liefert die gleiche Ungleichung für $f(x_2) - f(x_1)$. ■

Korollar 12.4 Sei $f : (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$ eine differenzierbare Funktion und $c \in (a, b)$.

1. Wenn $f'(x) \geq 0$ für alle $x \in (a, c)$ und $f'(x) \leq 0$ für alle $x \in (c, b)$, dann hat f ein lokales Maximum in c .
2. Wenn $f'(x) \leq 0$ für alle $x \in (a, c)$ und $f'(x) \geq 0$ für alle $x \in (c, b)$, dann hat f ein lokales Minimum in c .

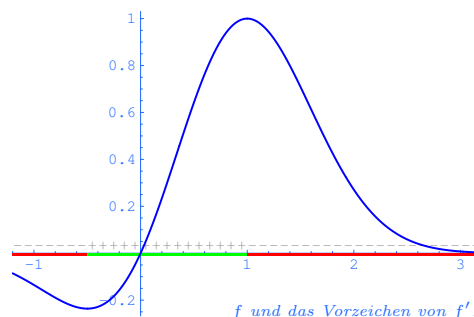
Beispiel 12.1. Gefragt sind die Extrema der Funktion $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $f(x) = x \exp(x - x^2)$. Man findet

$$f'(x) = (1 + 2x)(1 - x) \exp(x - x^2)$$

und bekommt sofort:

$$\begin{aligned} f'(x) < 0 & \text{ für } x < -\frac{1}{2} \text{ und für } x > 1, \\ f'(x) > 0 & \text{ für } x \in \left(-\frac{1}{2}, 1\right). \end{aligned}$$

Damit hat f ein lokales Maximum in 1 und ein lokales Minimum in $-\frac{1}{2}$. Weil $f(x) \rightarrow 0$ für $x \rightarrow \pm\infty$ sind es sogar globale Extrema.



Mit Hilfe der zweiten Ableitung, wenn sie existiert, kann man oft sehen, ob man es bei $f'(x_0) = 0$ mit einem Minimum oder einem Maximum zu tun hat.

Lemma 12.5 Sei $f : (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$ eine zweimal differenzierbare Funktion und $x_0 \in (a, b)$.

1. Wenn $f'(x_0) = 0$ und $f''(x_0) > 0$, dann hat f ein (lokales) Minimum in x_0 .
2. Wenn $f'(x_0) = 0$ und $f''(x_0) < 0$, dann hat f ein (lokales) Maximum in x_0 .

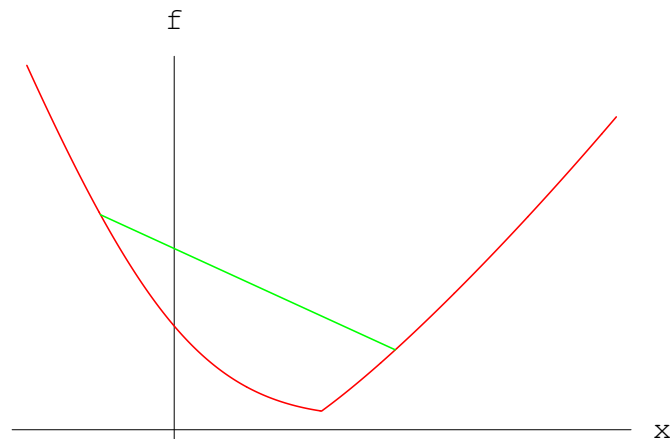
Beweis. Wir zeigen nur die erste Aussage. Wegen Theorem 11.3 folgt aus $f''(x_0) > 0$, dass es $\varepsilon > 0$ gibt, so dass

$$\begin{aligned} f'(x) < f'(x_0) = 0 & \text{ für } x \in (x_0 - \varepsilon, x_0) \text{ und} \\ 0 = f'(x_0) < f'(x) & \text{ für } x \in (x_0, x_0 + \varepsilon). \end{aligned}$$

Das Ergebnis folgt dann aus Korollar 12.4. ■

Definition 12.6 Eine Funktion $f : (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$ heißt konvex, wenn für alle $x, y \in (a, b)$ und $\theta \in (0, 1)$ gilt

$$f(\theta x + (1 - \theta)y) \leq \theta f(x) + (1 - \theta)f(y).$$



Bei einer konvexen Funktion liegt jeder Verbindungsstrich von zwei Punkten auf dem Graphen, oberhalb von (oder auf) diesem Graphen.

Lemma 12.7 Sei $f : (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$ eine zweimal differenzierbare Funktion und $f''(x) \geq 0$ für alle $x \in (a, b)$. Dann ist f konvex.

Beweis. Betrachte die Funktion $g : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ mit

$$g(\theta) = f(\theta x + (1 - \theta)y) - \theta f(x) - (1 - \theta)f(y).$$

Dann gilt $g(0) = g(1) = 0$ und wir müssen zeigen, dass $g(\theta) \leq 0$ gilt für alle $\theta \in (0, 1)$. Man hat

$$\begin{aligned} g'(\theta) &= (x - y) f'(\theta x + (1 - \theta)y) - f(x) + f(y), \\ g''(\theta) &= (x - y)^2 f''(\theta x + (1 - \theta)y) \geq 0. \end{aligned} \quad (12.1)$$

Nehme an $g(\theta_0) > 0$ für ein $\theta_0 \in (0, 1)$. Wegen des Mittelwertsatzes gibt es $\theta_1 \in (0, \theta_0)$ mit

$$g'(\theta_1) = \frac{g(\theta_0) - g(0)}{\theta_0 - 0} = \frac{g(\theta_0)}{\theta_0} > 0$$

und es gibt $\theta_2 \in (\theta_0, 1)$ mit

$$g'(\theta_2) = \frac{g(1) - g(\theta_0)}{1 - \theta_0} = \frac{-g(\theta_0)}{1 - \theta_0} < 0.$$

Dann gibt es auch $\theta_3 \in (\theta_1, \theta_2)$ mit

$$g''(\theta_3) = \frac{g'(\theta_2) - g'(\theta_1)}{\theta_2 - \theta_1} < 0,$$

und das ist ein Widerspruch zu (12.1). ■

Bemerkung 12.7.1 Konvexe Funktionen müssen nicht zweimal differenzierbar sein; sogar nicht mal einmal. Eine konvexe Funktion $f : (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$ ist jedoch stetig in (a, b) und hat sogar eine rechte und eine linke Ableitung auf (a, b) . Als Beispiel betrachte die Funktion $x \mapsto |x| : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Sie ist konvex, jedoch nicht differenzierbar in 0.

12.2 Die Umkehrfunktion

Definition 12.8 Sei $I \subset \mathbb{R}$ und $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion. Dann heißt $f^{inv} : f(I) \rightarrow \mathbb{R}$ eine Umkehrfunktion zu f , wenn

$$f^{inv} \circ f(x) = x \text{ für alle } x \in I.$$

Hier setzt man $f(I) = \{y \in \mathbb{R}; \exists x \in I \text{ mit } y = f(x)\}$.

Bemerkung 12.8.1 Die Umkehrfunktion für f wird in einigen Büchern auch mit f^{-1} notiert. Das könnte verwirrend sein, denn die Umkehrfunktion zu $x \mapsto 2x^3$ ist nicht $x \mapsto (2x^3)^{-1}$!

Wenn $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ injektiv ist, zum Beispiel weil f streng monoton ist, dann gibt es eine Umkehrfunktion. Die Umkehrfunktion nennt man auch die Inverse.

Theorem 12.9 (Satz zur Umkehrfunktion)

Sei $I \subset \mathbb{R}$ ein Intervall¹ und sei $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ eine stetige, streng monotone Funktion.

- Dann ist $J = \{f(x); x \in I\}$ ein Intervall, es gibt eine Umkehrfunktion $f^{inv} : J \rightarrow I$ und diese Umkehrfunktion f^{inv} ist stetig und streng monoton.
- Wenn außerdem f differenzierbar ist in $\tilde{x} \in I^\circ$ und $f'(\tilde{x}) \neq 0$, dann ist f^{inv} differenzierbar in $\tilde{y} = f(\tilde{x})$ und es gilt

$$(f^{inv})'(\tilde{y}) = \frac{1}{f'(\tilde{x})}.$$

Beweis. 1) Aus dem Zwischenwertsatz folgt, dass J ein Intervall ist.

Die Existenz einer Inverse: Wenn eine Funktion streng monoton ist, ist sie injektiv. Surjektivität von I zum Wertebereich $J = f(I)$ ist selbstverständlich. Dann ist $f : I \rightarrow J$ bijektiv und die Umkehrfunktion $f^{inv} : J \rightarrow I$ existiert.

2) Die strenge Monotonie von f^{inv} beweist man auch sofort. Weil f streng monoton ist, sagen wir wachsend, dann gilt für $x_1, x_2 \in I$, dass

$$x_1 > x_2 \Rightarrow f(x_1) > f(x_2).$$

Dies impliziert direkt $x_1 \geq x_2 \Rightarrow f(x_1) \geq f(x_2)$ und so auch

$$f^{inv}(y_1) \geq f^{inv}(y_2) \Rightarrow y_1 \geq y_2.$$

Weil $\neg(a \leq b)$ identisch zu $a > b$ ist, findet man als die gleichwertige logische Umkehrung:

$$y_1 < y_2 \Rightarrow f^{inv}(y_1) < f^{inv}(y_2).$$

¹Mit einem beliebigen Intervall I ist gemeint $[a, b]$, $(a, b]$, $[a, b)$, (a, b) , $(-\infty, b]$, $(-\infty, b)$, $[a, \infty)$, (a, ∞) oder $(-\infty, \infty)$ mit $a, b \in \mathbb{R}$ und $a < b$. Wenn die Randpunkte zum Intervall I gehören, dann nennt man das Intervall abgeschlossen; wenn nicht, dann nennt man es offen. Übrigens, ∞ ist kein Punkt und dann auch kein Randpunkt.

Man kann jedes Intervall abschließen (man schreibt \bar{I}) und „öffnen“ (man schreibt I°).

$I :$	$[a, b]$	$(a, b]$	$[a, b)$	(a, b)	$(-\infty, b]$	$(-\infty, b)$	$[a, \infty)$	(a, ∞)	$(-\infty, \infty)$
$\bar{I} :$	$[a, b]$	$[a, b]$	$[a, b]$	$[a, b]$	$(-\infty, b]$	$(-\infty, b]$	$[a, \infty)$	$[a, \infty)$	$(-\infty, \infty)$
$I^\circ :$	(a, b)	(a, b)	(a, b)	(a, b)	$(-\infty, b)$	$(-\infty, b)$	(a, ∞)	(a, ∞)	$(-\infty, \infty)$

3) Die Stetigkeit: Sei $b \in J$ und setze $a = f^{inv}(b)$. Wir nehmen an, dass a im Innern von I liegt. Sei $\varepsilon > 0$ und nehme an, dass $(a - \varepsilon, a + \varepsilon) \in I$. Sonst betrachten wir $\varepsilon_0 \in (0, \varepsilon)$ mit $(a - \varepsilon_0, a + \varepsilon_0) \in I$. Wenn f monoton wachsend ist, dann gilt:

$$x \in (a - \varepsilon, a + \varepsilon) \implies f(x) \in (f(a - \varepsilon), f(a + \varepsilon)).$$

Wenn f monoton fallend ist, dann gilt:

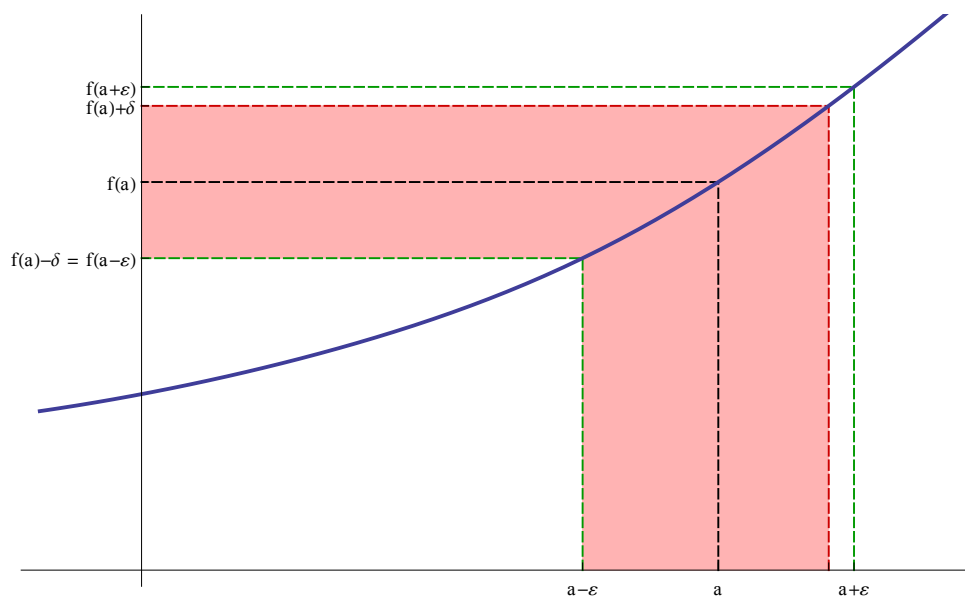
$$x \in (a - \varepsilon, a + \varepsilon) \implies f(x) \in (f(a + \varepsilon), f(a - \varepsilon)).$$

Wir setzen

$$\delta = \min(|f(a) - f(a - \varepsilon)|, |f(a + \varepsilon) - f(a)|)$$

und weil f streng monoton ist, gilt $\delta > 0$. Für $|y - b| < \delta$ liegt y zwischen $f(a - \varepsilon)$ und $f(a + \varepsilon)$, und es folgt, dass $f^{inv}(y) \in (a - \varepsilon, a + \varepsilon)$, anders gesagt, dass

$$|f^{inv}(y) - f^{inv}(b)| < \varepsilon.$$



Wenn a ein Randpunkt von I ist, bekommt man das Ergebnis, indem man einseitige Umgebungen benutzt.

4) Die Differenzierbarkeit: Sei $\{y_n\}_{n=0}^{\infty}$ eine beliebige Folge mit $y_n \rightarrow \tilde{y}$ und $y_n \neq \tilde{y}$. Setze $x_n = f^{inv}(y_n)$. Dann gilt wegen der Stetigkeit, dass $x_n = f^{inv}(y_n) \rightarrow f^{inv}(\tilde{y}) = \tilde{x}$, und wegen der strengen Monotonie, dass $x_n \neq \tilde{x}$. Es folgt

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f^{inv}(y_n) - f^{inv}(\tilde{y})}{y_n - \tilde{y}} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n - \tilde{x}}{f(x_n) - f(\tilde{x})} = \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\frac{f(x_n) - f(\tilde{x})}{x_n - \tilde{x}}} = \frac{1}{\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f(x_n) - f(\tilde{x})}{x_n - \tilde{x}}} = \frac{1}{f'(\tilde{x})}. \end{aligned}$$

Weil $\{y_n\}_{n=0}^{\infty}$ eine beliebige Folge ist mit $y_n \neq \tilde{y}$, gilt

$$(f^{inv})'(\tilde{y}) = \lim_{y \rightarrow \tilde{y}} \frac{f^{inv}(y) - f^{inv}(\tilde{y})}{y - \tilde{y}} = \frac{1}{f'(\tilde{x})}.$$

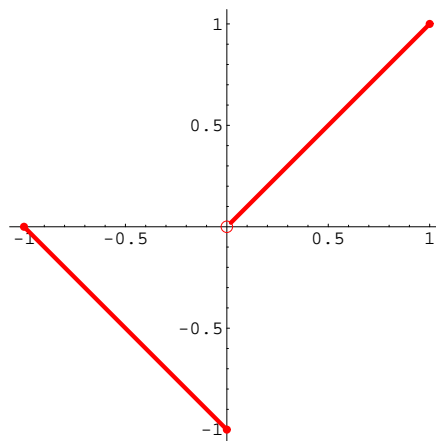
■

Bemerkung 12.9.1

Wenn $f : I \rightarrow J$ mit I ein Intervall, eine umkehrbare und stetige Funktion ist, dann ist f monoton. Stetigkeit oder Monotonie sind aber nicht notwendig für die Existenz einer Umkehrfunktion. Betrachte $f : [-1, 1] \rightarrow [-1, 1]$ mit

$$f(x) = \begin{cases} x & \text{für } x \in (0, 1], \\ -1 - x & \text{für } x \in [-1, 0]. \end{cases}$$

Diese Funktion ist nicht stetig und nicht monoton. Sie ist aber umkehrbar. Es gilt sogar, dass $f^{\text{inv}} = f$.



Beispiel 12.2. Die Niederländische und auch die Norwegische Polizei wenden seit Jahren den Mittelwertsatz und die Existenz einer Umkehrfunktion an bei einem Typ von Geschwindigkeitskontrollen, der sogenannte „Trajectcontrole“. Setze die Fahrzeit t als Funktion der Distanz s : $t = T(s)$, und die Umkehrfunktion $S = T^{\text{inv}}$ gibt die Distanz als Funktion der Zeit. Dann gilt für die Geschwindigkeit

$$v(t) = v(T(s)) = S'(T(s)) = \frac{1}{T'(s)}.$$

Mit digitalen Kameras werden die Zeiten gemessen an zwei Kontrollstellen a und b mit einer genau bekannten Entfernung von mehreren Kilometern. Die Software identifiziert passierende Nummernschilder und kombiniert diese mit den Zeiten. Der Mittelwertsatz liefert den Beweis, dass es eine Stelle gibt, wo die Geschwindigkeit gleich

$$v = \frac{1}{\frac{T(b)-T(a)}{b-a}} = \frac{b-a}{T(b)-T(a)}$$

war. Ist v etwas größer als angegeben, bekommt man ein Schreiben.

**12.2.1 Der Logarithmus als berühmte Umkehrfunktion**

Die Funktion $\exp : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ ist stetig und streng wachsend und hat also eine stetige streng wachsende Umkehrfunktion. Weil $\exp(\mathbb{R}) = \mathbb{R}^+$, ist die Umkehrfunktion definiert auf \mathbb{R}^+ .

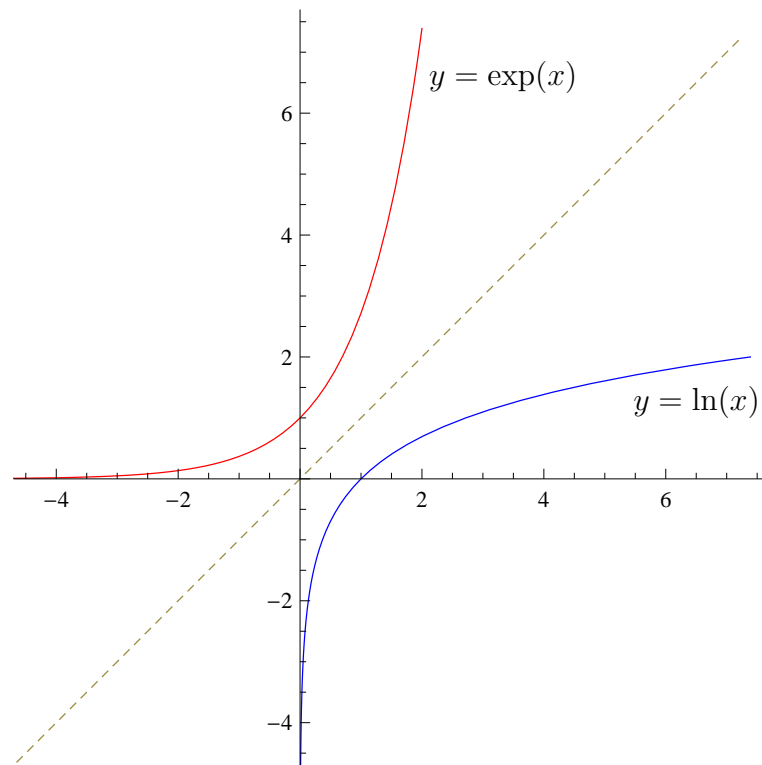
Definition 12.10 *Der natürliche Logarithmus*

$$\ln : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R} \text{ mit } \ln(x) = \exp^{\text{inv}}(x).$$

Oft schreibt man auch $\log(x)$ statt $\ln(x)$.

Man findet

$$\ln'(x) = \frac{1}{\exp'(\ln(x))} = \frac{1}{\exp(\ln(x))} = \frac{1}{x} \text{ für } x \in \mathbb{R}^+.$$



Eine Eigenschaft des Logarithmus, die sich oft verwenden lässt, ist:

Lemma 12.11 Für $a, b \in \mathbb{R}^+$ gilt

$$\ln(ab) = \ln(a) + \ln(b).$$

Beweis. Man benutzt

$$ab = \exp(\ln(a)) \exp(\ln(b)) = \exp(\ln(a) + \ln(b))$$

und nochmals die Umkehrfunktion. ■

Schlussendlich definieren wir noch:

Definition 12.12 Für $a \in \mathbb{R}^+$ und $z \in \mathbb{C}$:

$$a^z = \exp(z \ln a).$$

Man hat

$$\begin{aligned} a^0 &= \exp(0 \ln a) = \exp(0) = 1, \\ a^1 &= \exp(1 \ln a) = \exp(\ln a) = a, \\ a^z a^w &= \exp(z \ln a) \exp(w \ln a) = \exp((z+w) \ln a) = a^{z+w}, \\ a^z b^z &= \exp(z \ln a) \exp(z \ln b) = \exp(z \ln a + z \ln b) = \\ &= \exp(z \ln(ab)) = (ab)^z, \end{aligned}$$

und findet so die alt-bekannteren Regeln für Exponentenrechnung und auch, dass diese letzte Definition $z \mapsto a^z$ dem schon bekannten Exponenten für $z \in \mathbb{R}$ nicht widerspricht.

12.2.2 Die zyklometrischen Funktionen oder Arcusfunktionen als Umkehrfunktionen

Der Arcussinus

Der Sinus ist nicht monoton und nicht injektiv. Er hat also keine Umkehrfunktion. Die sogenannte Inverse, die man oft sieht, ist dann auch nicht die Inverse zu $x \mapsto \sin(x) : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, sondern eine Umkehrfunktion zu $x \mapsto \sin(x) : [-\frac{1}{2}\pi; \frac{1}{2}\pi] \rightarrow \mathbb{R}$. Diese Einschränkung vom Sinus kann man auch beschreiben durch $\sin_{[-\pi/2; \pi/2]}$. Diese letzte Funktion ist strikt monoton, also auch injektiv, und hat deshalb eine Umkehrfunktion.

Definition 12.13 *Der Arcussinus ist definiert durch:*

$$\arcsin : [-1, 1] \rightarrow \mathbb{R} \text{ mit } \arcsin(x) = (\sin_{[-\pi/2; \pi/2]})^{\text{inv}}(x).$$

Man findet

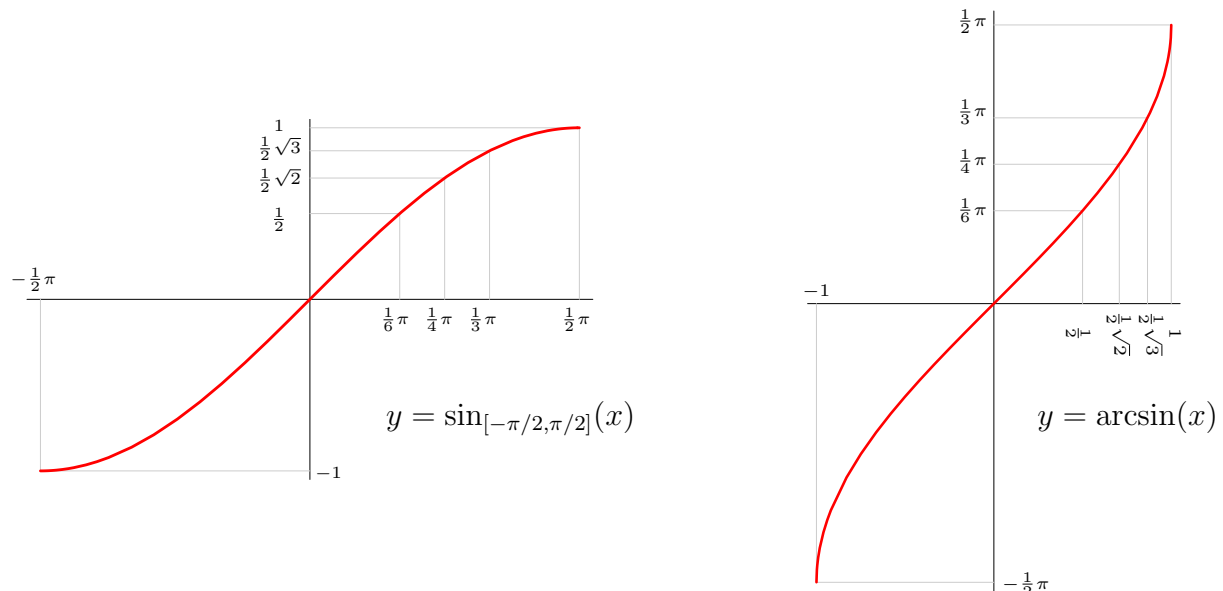
$$\arcsin'(x) = \frac{1}{\sin'(\arcsin(x))} = \frac{1}{\cos(\arcsin(x))} \text{ für } x \in (-1, 1).$$

Aus $(\cos(y))^2 + (\sin(y))^2 = 1$ folgt

$$\cos(y) = \pm \sqrt{1 - (\sin(y))^2}.$$

Weil man sich aber beschränkt auf $y \in [-\frac{1}{2}\pi; \frac{1}{2}\pi]$, wo der Cosinus größer gleich 0 ist, gilt $\cos(y) = \sqrt{1 - (\sin(y))^2}$ und es folgt

$$\arcsin'(x) = \frac{1}{\sqrt{1 - (\sin(\arcsin(x)))^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - x^2}} \text{ für } x \in (-1, 1).$$



Der Arcuscosinus

Wie beim Sinus muss man auch die Cosinus Funktion einschränken, insofern es ihr Definitionsgebiet betrifft, wenn man eine Umkehrfunktion haben möchte.

Definition 12.14 *Der Arcuscosinus ist definiert durch:*

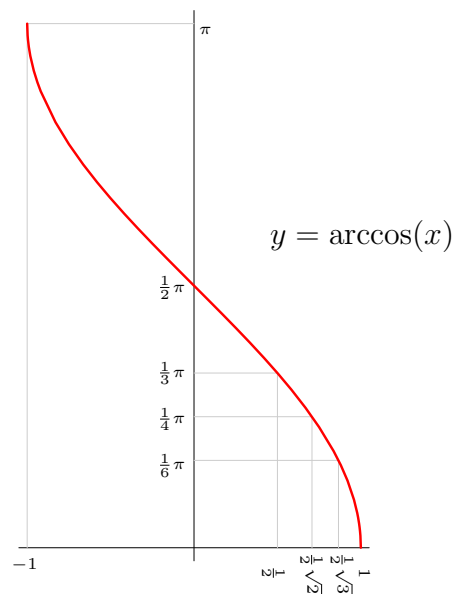
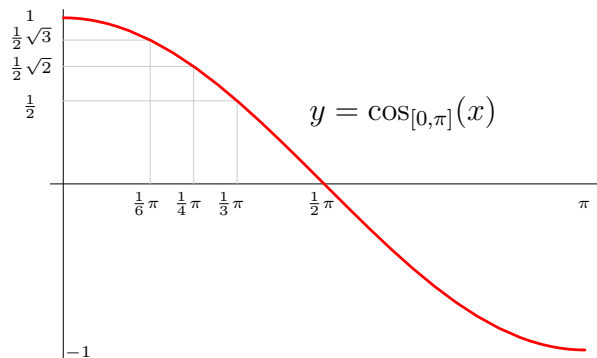
$$\arccos : [-1, 1] \rightarrow \mathbb{R} \text{ mit } \arccos(x) = (\cos_{[0, \pi]})^{\text{inv}}(x).$$

Ähnlich wie beim Arcussinus findet man

$$\arccos'(x) = \frac{-1}{\sqrt{1-x^2}} \text{ für } x \in (-1, 1).$$

Dieses Ergebnis folgt übrigens auch aus $\arccos(x) = \frac{1}{2}\pi - \arcsin(x)$ für alle $x \in [-1, 1]$. Das letzte folgt wiederum aus

$$\cos(y) = \sin\left(\frac{1}{2}\pi - y\right) \text{ für alle } y \in \mathbb{R}.$$

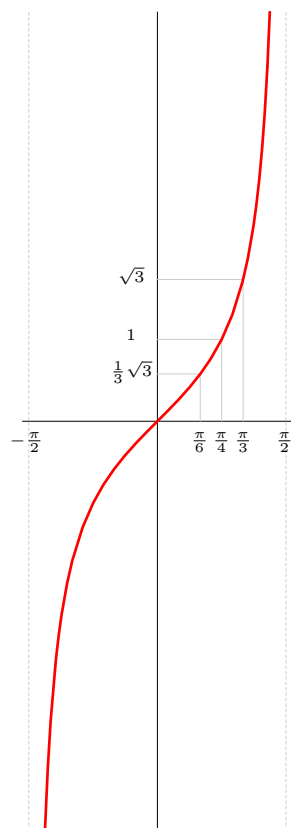


Der Arcustangens

Und ebenso hat der Tangens ein Problem, wenn man sein Definitionsgebiet nicht einschränkt.

Definition 12.15 *Der Arcustangens ist definiert durch:*

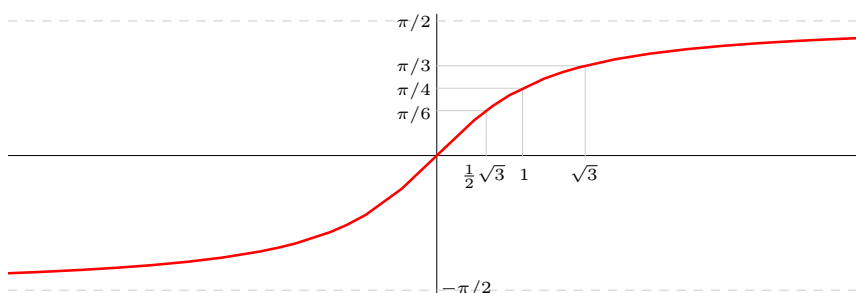
$$\arctan : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \text{ mit } \arctan(x) = (\tan_{(-\pi/2, \pi/2)})^{inv}(x).$$



Man hat für alle $x \in \mathbb{R}$:

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

Links findet man eine Skizze zu $y = \tan_{(-\pi/2, \pi/2)}(x)$ und unten eine zu $y = \arctan(x)$.



Es gibt auch einen Arcuscotangens und der ist meistens definiert durch

$$\operatorname{arccot} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \text{ mit } \operatorname{arccot}(x) = (\cot_{(0,\pi)})^{\operatorname{inv}}(x).$$

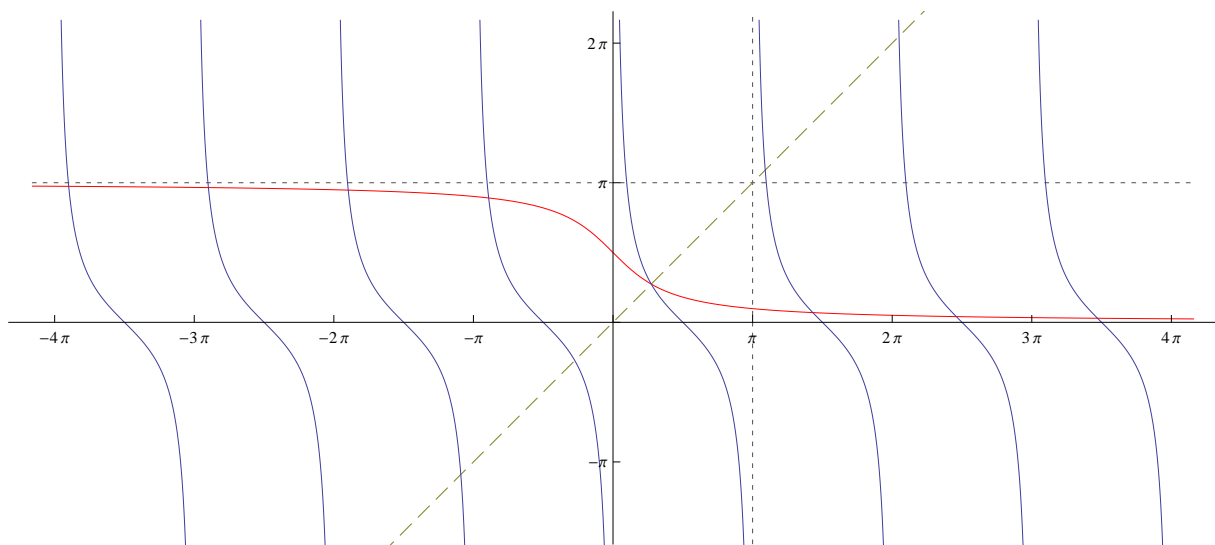


Abbildung 12.1: In blau \cot und in rot arccot

Skizziert man $f(x) := \operatorname{arccot}(\cot(x))$, so findet man eine π -periodische Funktion, die auf $\mathbb{R} \setminus (\pi\mathbb{N})$ definiert ist, und für die $f(x) = x$ auf $(0, \pi)$ gilt. Mathematica verwendet jedoch eine andere Inverse (welche?), denn das Bild in Abbildung 12.2 sieht anders aus.

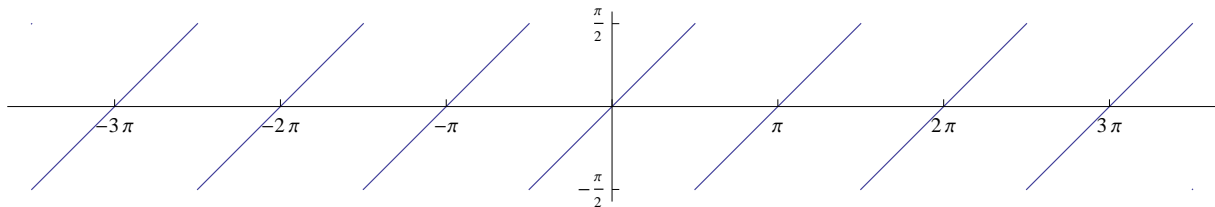


Abbildung 12.2: So skizziert Mathematica $x \mapsto \operatorname{arccot}(\cot x)$.

12.2.3 Die Areafunktionen als Umkehrfunktionen

Der Arcosinus hyperbolicus

Der Sinus hyperbolicus ist streng wachsend: $x \mapsto \exp(x)$ und $x \mapsto -\exp(-x)$ sind streng wachsend und so auch

$$x \mapsto \sinh(x) = \frac{\exp(x) - \exp(-x)}{2}.$$

Setzen wir $y = \sinh(x)$ und multiplizieren mit $2 \exp(x)$, dann findet man

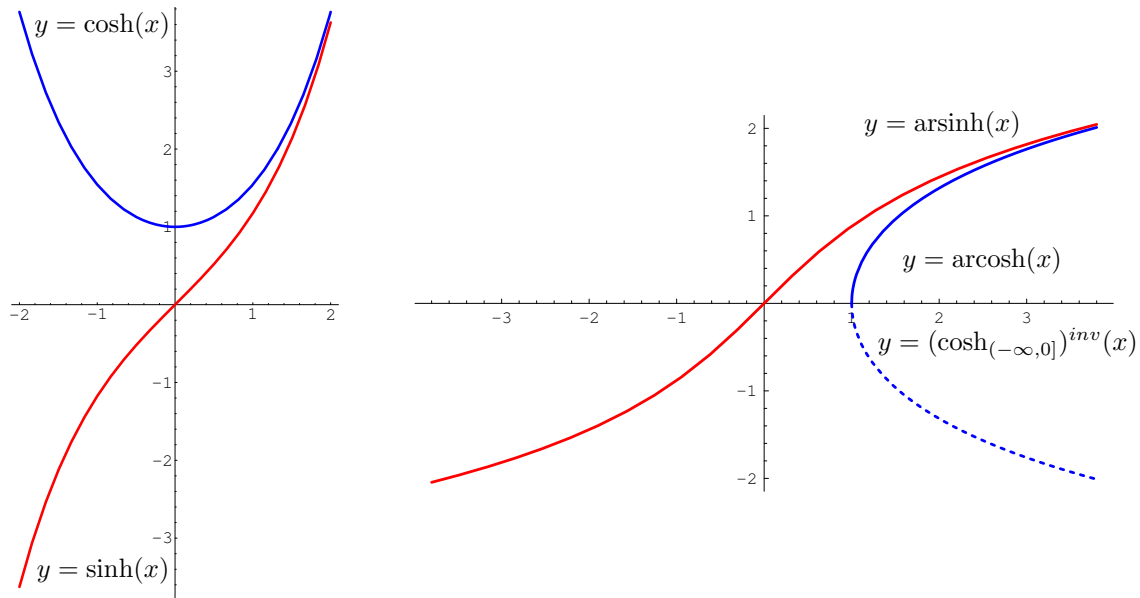
$$2ye^x = (e^x)^2 - 1 \Leftrightarrow (e^x - y)^2 = y^2 + 1 \Leftrightarrow e^x = y \pm \sqrt{y^2 + 1}.$$

Weil $e^x > 0$ findet man $e^x = y + \sqrt{y^2 + 1}$ und

$$x = \ln\left(y + \sqrt{y^2 + 1}\right).$$

Die Umkehrfunktion der Sinus hyperbolicus nennt man den Areasinus hyperbolicus:

$$\operatorname{arsinh} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \text{ mit } \operatorname{arsinh}(x) = \ln \left(x + \sqrt{x^2 + 1} \right).$$



Der Areacosinus hyperbolicus

Der Cosinus hyperbolicus ist monoton, wenn beschränkt auf \mathbb{R}_0^+ oder \mathbb{R}_0^- . Man hat

$$\cosh(x) = \frac{\exp(x) + \exp(-x)}{2}$$

und es folgt

$$y = \cosh(x) \Leftrightarrow 2ye^x = (e^x)^2 + 1 \Leftrightarrow e^x = y \pm \sqrt{y^2 - 1}.$$

Man definiert den Areacosinus hyperbolicus durch $(\cosh_{[0, \infty)})^{\text{inv}}$, das heißt

$$\operatorname{arcosh} : [1, \infty) \rightarrow \mathbb{R} \text{ mit } \operatorname{arcosh}(x) = \ln \left(x + \sqrt{x^2 - 1} \right).$$

Die linke Hälfte hat auch eine inverse Funktion:

$$(\cosh_{(-\infty, 0]})^{\text{inv}} : [1, \infty) \rightarrow \mathbb{R} \text{ mit } (\cosh_{(-\infty, 0]})^{\text{inv}} = \ln \left(x - \sqrt{x^2 - 1} \right).$$

Übrigens gilt

$$\ln \left(x - \sqrt{x^2 - 1} \right) = -\ln \left(x + \sqrt{x^2 - 1} \right) \text{ für } x \geq 1.$$

Der Areatangens hyperbolicus

Der Tangens hyperbolicus ist streng monoton wachsend auf \mathbb{R} , denn

$$\tanh'(x) = \left(\frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \right)' = \frac{4}{(e^x + e^{-x})^2} > 0$$

und hat horizontale Asymptoten:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \tanh(x) = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} = 1 \text{ und } \lim_{x \rightarrow -\infty} \tanh(x) = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} = -1.$$

Man setzt

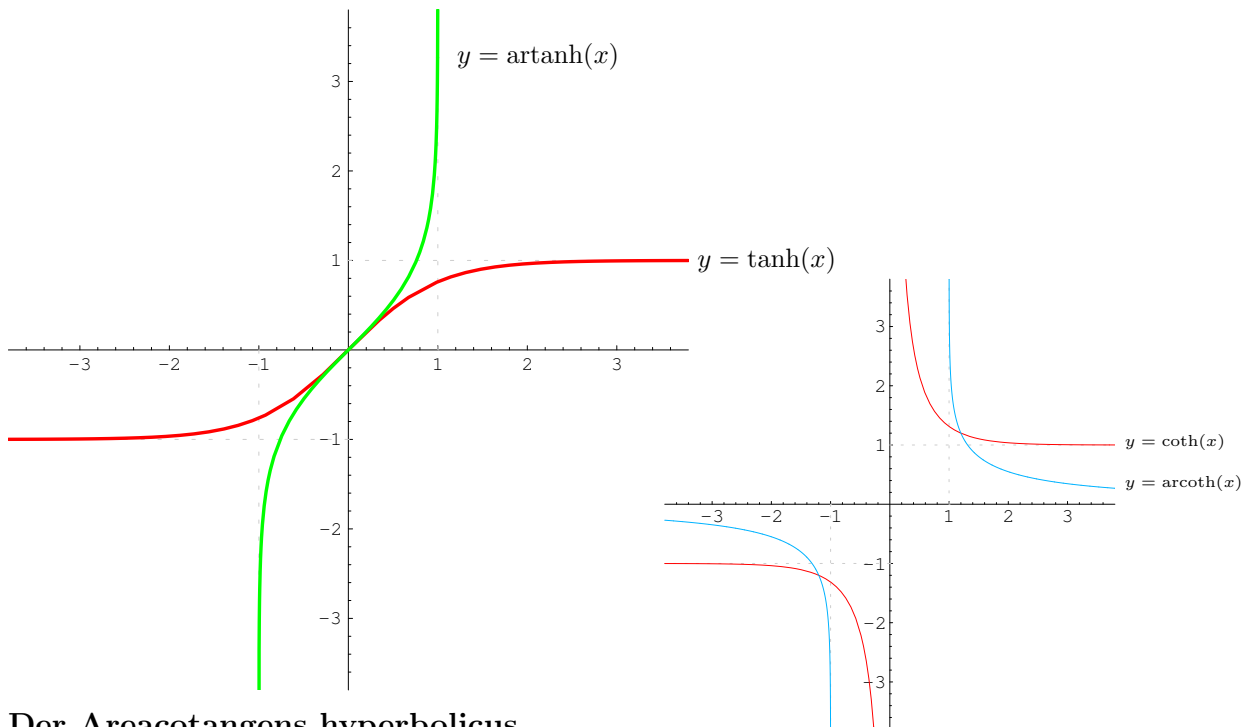
$$y = \tanh(x) = \frac{\sinh(x)}{\cosh(x)} = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}, \quad (12.2)$$

und kann die Gleichung in (12.2) nach x lösen:

$$\begin{aligned} y = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} &\Leftrightarrow (e^x + e^{-x})y = e^x - e^{-x} \Leftrightarrow \\ (e^{2x} + 1)y &= e^{2x} - 1 \Leftrightarrow 1 + y = e^{2x}(1 - y) \\ &\Leftrightarrow x = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 + y}{1 - y} \right). \end{aligned}$$

Bemerken Sie, dass $y = \tanh(x) \in (-1, 1)$ impliziert, dass $1 - y > 0$ und $1 + y > 0$. Die Umkehrfunktion zu \tanh ist:

$$\operatorname{artanh} : (-1, 1) \rightarrow \mathbb{R} \text{ mit } \operatorname{artanh}(x) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 + x}{1 - x} \right).$$



Der Areacotangens hyperbolicus

existiert auch noch. Die Liebhaber dürfen ihn selber studieren.

12.3 Taylorpolynome

12.3.1 Aussagen und Heuristik

Bei der Definition von der Ableitung einer Funktion haben wir gesehen, welches Polynom von Grad kleiner oder gleich 1 „am besten passt“, wenn man eine Funktion $x \mapsto f(x)$ um a approximieren möchte, nämlich $x \mapsto p_1(x) = f(a) + (x - a)f'(a)$. Mit „am besten“ war gemeint

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

Frage: Können wir auch ein Polynom p_2 vom Grad kleiner oder gleich 2 finden, so dass

$$\lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x) - p_2(x)}{(x - a)^2} = 0 ? \quad (12.3)$$

Das einzige Polynom p_2 vom Grad 2 oder kleiner, bei dem die nullten, ersten und zweiten Ableitungen von f und p_2 für $x = a$ identisch sind, wäre

$$p_2(x) = f(a) + (x - a) f'(a) + \frac{1}{2} (x - a)^2 f''(a),$$

denn nur so gilt

$$\begin{aligned} p_2(a) &= [f(a) + (x - a) f'(a) + \frac{1}{2} (x - a)^2 f''(a)]_{x=a} = f(a), \\ p_2'(a) &= [f'(a) + (x - a) f''(a)]_{x=a} = f'(a), \\ p_2''(a) &= [f''(a)]_{x=a} = f''(a). \end{aligned}$$

Wir werden zeigen, dass wenn f zweimal differenzierbar ist, p_2 tatsächlich so ist, dass die Identität in (12.3) gilt. Man kann auf ähnliche Art n -mal differenzierbare Funktionen bis Ordnung n durch Polynome höchstens n -ten Grades approximieren:

Theorem 12.16 (Satz von Taylor) Sei I ein Intervall, $a \in I^\circ$ und $n \in \mathbb{N}^+$. Nehme an, die Funktion $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ ist n mal differenzierbar in I° , und setze

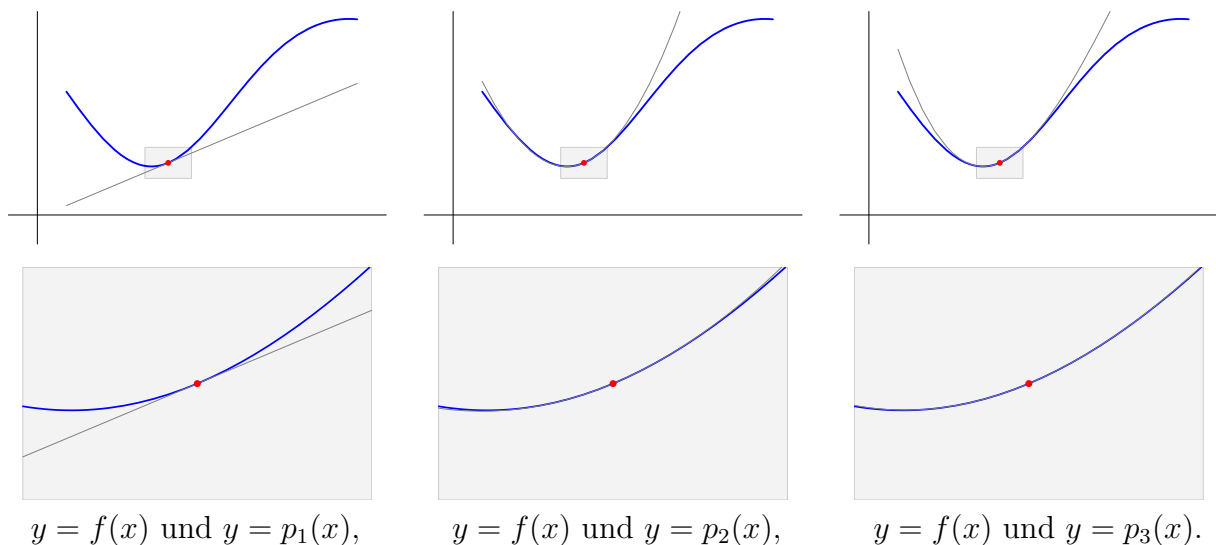
$$p_n(x) = \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(a)}{k!} (x - a)^k. \quad (12.4)$$

Dann gilt

$$\lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x) - p_n(x)}{(x - a)^n} = 0. \quad (12.5)$$

Der Beweis folgt in Abschnitt 12.3.2.

Bemerkung 12.16.1 Das Polynom in (12.4) heißt das n -te Taylorpolynom von f bezüglich der Stelle a .



Bemerkung 12.16.2 Anders formuliert: p_n ist das einzige Polynom vom Grad kleiner gleich n , wobei in der Grafik der vertikale Unterschied zwischen $y = f(x)$ und $y = p_n(x)$ für $x \rightarrow a$ schneller nach 0 geht als $|x - a|^n$.

Korollar 12.17 Sei I ein Intervall und $a \in I^\circ$. Nehme an, die Funktionen $f, g : I \rightarrow \mathbb{R}$ sind n -mal differenzierbar in I° und

$$f^{(k)}(a) = g^{(k)}(a) = 0 \text{ für } k = 0, 1, 2, \dots, n-1.$$

Falls $g^{(n)}(a) \neq 0$, gilt

$$\lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x)}{g(x)} = \frac{f^{(n)}(a)}{g^{(n)}(a)}.$$

Beweis. Schreiben wir $p_{f,n}$ und $p_{g,n}$ für die n -ten Taylorpolynome von f und g bezüglich der Stelle a . Weil $f^{(k)}(a) = 0$ für $k = 0, 1, 2, \dots, n-1$ hat man $p_{f,n}(x) = \frac{1}{n!} (x-a)^n f^{(n)}(a)$ und $p_{g,n}(x) = \frac{1}{n!} (x-a)^n g^{(n)}(a)$. Mit dem Theorem 12.16 hat man

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x)}{g(x)} &= \lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x) - p_{f,n}(x) + \frac{1}{n!} (x-a)^n f^{(n)}(a)}{g(x) - p_{g,n}(x) + \frac{1}{n!} (x-a)^n g^{(n)}(a)} = \\ &= \frac{\lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x) - p_{f,n}(x)}{(x-a)^n} + \frac{1}{n!} f^{(n)}(a)}{\lim_{x \rightarrow a} \frac{g(x) - p_{g,n}(x)}{(x-a)^n} + \frac{1}{n!} g^{(n)}(a)} = \frac{0 + \frac{1}{n!} f^{(n)}(a)}{0 + \frac{1}{n!} g^{(n)}(a)} = \frac{f^{(n)}(a)}{g^{(n)}(a)}. \quad \blacksquare \end{aligned}$$

Bemerkung 12.17.1 Korollar 12.17 kann man oft statt des Satzes von de l'Hôpital verwenden. Sowohl dieses Korollar als auch der Satz von de l'Hôpital sind mit Vorsicht zu genießen. Betrachten wir als Beispiel

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin(x)}{x}.$$

Mit $f(x) = \sin(x)$ und $g(x) = x$, findet man, wenn man weiß, dass $\sin'(0) = \cos(0) = 1$ gilt,

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin(x)}{x} = \frac{\cos(0)}{1} = 1.$$

Woher wissen wir, dass $\sin'(0) = \cos(0) = 1$? Dazu betrachten wir die Ableitung vom Sinus in 0:

$$\sin'(0) = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin(x) - \sin(0)}{x - 0} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin(x)}{x}.$$

Also $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin(x)}{x} = 1$, weil $\sin'(0) = 1$, weil $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin(x)}{x} = 1$, weil $\sin'(0) = 1$, weil $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin(x)}{x} = 1$

Theorem 12.18 (Satz von Taylor mit dem Restglied von Lagrange) Sei I ein Intervall, $a \in I^\circ$ und $n \in \mathbb{N}^+$. Nehme an, die Funktion $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ ist $n+1$ mal differenzierbar in I° und sei p_n wie in (12.4). Dann gibt es θ_x zwischen x und a , so dass

$$f(x) = p_n(x) + \frac{f^{(n+1)}(\theta_x)}{(n+1)!} (x-a)^{n+1}. \quad (12.6)$$

Bemerkung 12.18.1 Wenn $f^{(n+1)}(\theta_x)$ beschränkt ist in einer Umgebung von a und man nicht die genaue Formel braucht, wird auch das **große Landau-Symbol** \mathcal{O} (groß-O) verwendet:

$$f(x) = p_n(x) + \mathcal{O}((x-a)^{n+1}) \text{ für } x \rightarrow a.$$

Dies bedeutet: es gibt $\delta > 0$ und $M \in \mathbb{R}$ derart, dass

$$|x-a| < \delta \implies |f(x) - p_n(x)| \leq M |(x-a)^{n+1}|.$$

Bemerkung 12.18.2 Übrigens existiert auch das **kleine Landau-Symbol** \mathfrak{o} (klein-O). Schreibt man $f(x) = p_n(x) + \mathfrak{o}((x-a)^n)$ für $x \rightarrow a$, dann heißt das:

$$\lim_{x \rightarrow a} \frac{|f(x) - p_n(x)|}{|(x-a)^n|} = 0.$$

12.3.2 Beweis des Taylorschen Satzes

Wir beweisen erst folgendes Lemma:

Lemma 12.19 Sei $n \in \mathbb{N}^+$ und $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ stetig und f differenzierbar auf (a, b) . Dann gibt es für jedes $x \in (a, b)$ ein $\xi_x \in (a, x)$ mit

$$\frac{f(x) - f(a)}{(x - a)^n} = \frac{f'(\xi_x)}{n(\xi_x - a)^{n-1}}.$$

Beweis von Lemma 12.19. Wir setzen $(x - a)^n = y$ und $g(y) = f(a + \sqrt[n]{y})$. Dann folgt

$$\frac{f(x) - f(a)}{(x - a)^n} = \frac{g(y) - g(0)}{y}.$$

Weil $g : [0, (b - a)^n] \rightarrow \mathbb{R}$ stetig ist und g auf $(0, (b - a)^n)$ differenzierbar ist, können wir den Mittelwertsatz anwenden und finden, dass es $c \in (0, y)$ gibt mit

$$\frac{g(y) - g(0)}{y} = g'(c) = f'(a + \sqrt[n]{c}) \frac{1}{n} c^{\frac{1-n}{n}}.$$

Definieren wir $\xi_x = a + \sqrt[n]{c}$, dann folgt $\xi_x \in (a, x)$ und

$$\frac{f(x) - f(a)}{(x - a)^n} = g'(c) = \frac{f'(\xi_x)}{n(\xi_x - a)^{n-1}}.$$

■

Beweis von Theorem 12.16. Wenn wir dieses Theorem beweisen können für $x > a$, dann folgt via $\tilde{f}(-x) = f(x)$ auch das Ergebnis für $x < a$. Ohne Verlust der Allgemeinheit dürfen wir uns also beschränken auf den Fall $x > a$.

Wenn $x > a$ benutzen wir Lemma 12.19 für $f(x) - p_n(x)$. Weil $f(a) = p_n(a)$ gibt es $x_1 \in (a, x)$, so dass

$$\frac{f(x) - p_n(x)}{(x - a)^n} = \frac{(f(x) - p_n(x)) - (f(a) - p_n(a))}{(x - a)^n} = \frac{f'(x_1) - p'_n(x_1)}{n(x_1 - a)^{n-1}}.$$

Wenn $n > 1$ gibt es, weil $f'(a) = p'_n(a)$ gilt, $x_2 \in (a, x_1)$, so dass

$$\frac{f'(x_1) - p'_n(x_1)}{(x_1 - a)^{n-1}} = \frac{(f'(x_1) - p'_n(x_1)) - (f'(a) - p'_n(a))}{(x_1 - a)^{n-1}} = \frac{f''(x_2) - p''_n(x_2)}{(n-1)(x_2 - a)^{n-2}}.$$

Wenn $n > 2$ gibt es, weil $f''(a) = p''_n(a)$ gilt, $x_3 \in (a, x_2)$, so dass

$$\frac{f''(x_2) - p''_n(x_2)}{(x_2 - a)^{n-2}} = \frac{(f''(x_2) - p''_n(x_2)) - (f''(a) - p''_n(a))}{(x_2 - a)^{n-2}} = \frac{f'''(x_3) - p'''_n(x_3)}{(n-2)(x_3 - a)^{n-3}},$$

usw. Ein gediegener Beweis würde hier vollständige Induktion benutzen.

Nach $n - 1$ Schritten haben wir $x_{n-1} \in \mathbb{R}$ gefunden mit

$$a < x_{n-1} < x_{n-2} < \dots < x_1 < x,$$

so dass

$$\begin{aligned} \frac{f(x) - p_n(x)}{(x - a)^n} &= \frac{1}{n(n-1)(n-2)\dots 2} \frac{f^{(n-1)}(x_{n-1}) - p_n^{(n-1)}(x_{n-1})}{x_{n-1} - a} \\ &= \frac{1}{n!} \frac{f^{(n-1)}(x_{n-1}) - \left(f^{(n-1)}(a) + (x_{n-1} - a) f^n(a) \right)}{x_{n-1} - a}. \end{aligned} \quad (12.7)$$

Weil $f^{(n-1)}$ differenzierbar ist in a , gilt

$$\lim_{x \rightarrow a} \frac{f^{(n-1)}(x) - \left(f^{(n-1)}(a) + (x-a) f^{(n)}(a) \right)}{x-a} = 0$$

und wegen (12.7) also auch

$$\lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x) - p_n(x)}{(x-a)^n} = 0. \quad \blacksquare$$

Beweis von Theorem 12.18. Statt wie im vorhergehenden Beweis werden wir jetzt

$$\frac{f(x) - p_n(x)}{(x-a)^{n+1}}$$

betrachten. Bemerke, dass im Nenner jetzt die Potenz $n+1$ statt n steht. Ähnlich wie vorher haben wir nach n Schritten ein $\tilde{x}_n \in (a, x)$ gefunden so, dass statt (12.7) folgendes gilt:

$$\frac{f(x) - p_n(x)}{(x-a)^{n+1}} = \frac{1}{(n+1)!} \frac{f^{(n)}(\tilde{x}_n) - p_n^{(n)}(x_n)}{\tilde{x}_n - a} = \frac{1}{(n+1)!} \frac{f^{(n)}(\tilde{x}_n) - f^{(n)}(a)}{\tilde{x}_n - a}.$$

Der Mittelwertsatz liefert die Existenz von $\theta_x \in (a, \tilde{x}_n)$ derart, dass

$$\frac{f(x) - p_n(x)}{(x-a)^{n+1}} = \frac{1}{(n+1)!} \frac{f^{(n)}(\tilde{x}_n) - f^{(n)}(a)}{\tilde{x}_n - a} = \frac{1}{(n+1)!} f^{(n+1)}(\theta_x).$$

Diese letzte Identität liefert genau (12.6). ■

12.4 Taylorreihen

Wir haben Potenzreihen verwendet, um einige Funktionen einzuführen. Dann kann man sich auch die folgende Frage stellen:

Ist jede Funktion als Potenzreihe zu schreiben?

Die einfache Antwort lautet nein, wenn wir nicht zusätzlich die Bedingung stellen, dass so eine Funktion unendlich oft differenzierbar sein soll. Denn, wenn eine Potenzreihe einen positiven Konvergenzradius hat, dann ist sie innerhalb des dazugehörigen Kreises unendlich oft differenzierbar.

Wenn wir annehmen, dass f unendlich oft differenzierbar ist in a und wenn wir p_n wie in (12.4) nehmen, folgt

$$\begin{aligned} p_n(x) &= \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(a)}{k!} (x-a)^k \\ &= f(a) + (x-a) f'(a) + \frac{1}{2} (x-a)^2 f''(a) + \frac{1}{3!} (x-a)^3 f'''(a) + \dots + \frac{1}{n!} (x-a)^n f^{(n)}(a). \end{aligned}$$

Mit Theorem 12.18 findet man

$$\lim_{n \rightarrow \infty} p_n(x) = f(x) \Leftrightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f^{(n+1)}(\theta_x)}{(n+1)!} (x-a)^{n+1} = 0,$$

wobei θ_x zwar existiert und sogar zwischen a und x liegt, aber nicht konstruktiv gegeben ist. Konstruktiv, aber nicht sehr scharf, ist folgendes Ergebnis:

Lemma 12.20 Sei I ein Intervall in \mathbb{R} mit $a \in I$. Sei $r > 0$ und $f : (a - r, a + r) \rightarrow \mathbb{R}$ unendlich oft differenzierbar. Nehme an, es gibt $c, M \in \mathbb{R}^+$, so dass

$$|f^{(n)}(x)| \leq c M^n \text{ für alle } x \text{ mit } |x - a| < r \text{ und } n \in \mathbb{N}.$$

Dann gilt für die Taylorpolynome p_n aus (12.4), dass

$$\lim_{n \rightarrow \infty} p_n(x) = f(x) \text{ für alle } x \text{ mit } |x - a| < r. \quad (12.8)$$

Bemerkung 12.20.1 Wenn wir bei der Reihe $\{p_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ die dubiose Schreibweise p_∞ benutzen, dann heißt (12.8)

$$\sum_{k=0}^{\infty} \frac{f^{(k)}(a)}{k!} (x - a)^k = f(x) \text{ für alle } x \in (a - r, a + r). \quad (12.9)$$

Die Reihe auf der linken Seite von (12.9) heißt die **Taylorreihe** von f an der Stelle a . Eigentlich sollte man aber $\{p_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ schreiben.

Beweis. Wenn $|f^{(k)}(x)| \leq c M^k$ für alle $x \in (a - r, a + r)$ und $k \in \mathbb{N}$, dann gilt mit Theorem 12.18

$$|f(x) - p_n(x)| \leq \left| \frac{f^{(n+1)}(\theta_x)}{(n+1)!} (x - a)^{n+1} \right| \leq \frac{c M^{n+1} r^{n+1}}{(n+1)!} \rightarrow 0 \text{ für } n \rightarrow \infty$$

und so die Konvergenz für $x \in (a - r, a + r)$. ■

Bemerke die verschiedenen Konvergenzarten in (12.5) und (12.8). In (12.5), und genauer in (12.6), findet man eine Abschätzung für $p_n(x) - f(x)$ wenn $x \rightarrow a$ bei festem n . In (12.8) steht die Konvergenz der Taylorpolynome $p_n \rightarrow f$ auf $(a - r, a + r)$, wenn $n \rightarrow \infty$.

12.4.1 Zusammenhang zwischen Taylor- und Potenzreihen

Manche Funktion kann man als Taylorreihe schreiben. Wir haben auch Funktionen, die als Potenzreihe definiert wurden.

f	\dashrightarrow	Taylorreihe
f	\longleftarrow	Potenzreihe

Haben Taylorreihen und Potenzreihen etwas miteinander zu tun?

Die Antwort lautet ja. Wenn f als eine Potenzreihe (mit einem positiven Spektralradius R) definiert ist, sagen wir

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n (x - a)^n \text{ für } |x - a| < R,$$

dann wissen wir aus Theorem 11.10, dass

$$f^{(k)}(x) = \sum_{n=k}^{\infty} c_n \frac{n!}{(n-k)!} (x - a)^{n-k} \text{ für } |x - a| < R,$$

und so folgt, dass

$$f^{(k)}(a) = c_k k! .$$

Die Taylorreihe um $x = a$ für f wird so

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(a)}{n!} (x-a)^n = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{c_n n!}{n!} (x-a)^n = \sum_{n=0}^{\infty} c_n (x-a)^n.$$

Umgekehrt, wenn die Taylorreihe $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(a)}{n!} (x-a)^n$ nach $f(x)$ konvergiert für $x \in (a-\delta, a+\delta)$ und irgendein $\delta > 0$, dann ist diese Taylorreihe selbstverständlich formal eine Potenzreihe. Jede Potenzreihe hat einen Konvergenzradius R , der so ist, dass diese Reihe innerhalb vom Radius absolut konvergiert und sie außerhalb divergiert. Damit folgt $R \geq \delta$, also dass

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(a)}{n!} (z-a)^n \text{ konvergiert für } z \in \mathbb{C} \text{ mit } |z-a| < \delta.$$

Ein kleiner Haken verbirgt sich hinter der Bedingung:

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(a)}{n!} (x-a)^n \text{ konvergiert nach } f(x).$$

Es gibt Taylorreihen, die zwar konvergieren, aber nicht unbedingt nach $f(x)$. Ein Beispiel folgt.

Beispiel 12.3. Die Funktion $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit

$$f(x) = \begin{cases} \exp(-x^{-2}) & \text{für } x \neq 0, \\ 0 & \text{für } x = 0, \end{cases}$$

ist unendlich differenzierbar, denn außerhalb von 0 ist sie die Zusammensetzung bekannter differenzierbarer Funktionen und in 0 verwendet man

$$f^{(n)}(x) = \begin{cases} q_n\left(\frac{1}{x}\right) \exp(-x^{-2}) & \text{für } x \neq 0, \\ 0 & \text{für } x = 0, \end{cases}$$

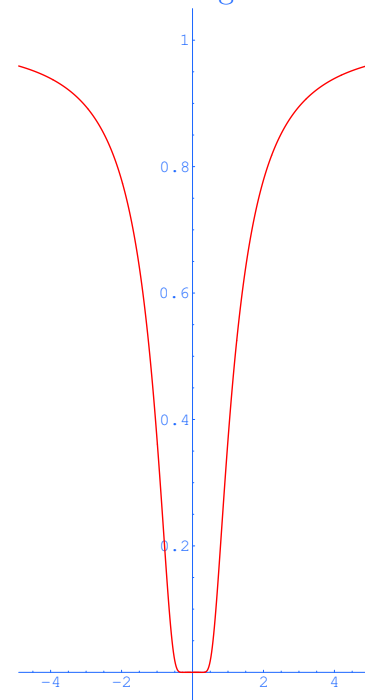
für irgendwelche Polynome q_n vom Grad $3n$, und

$$\lim_{x \rightarrow 0} x^{-k} \exp(-x^{-2}) = \lim_{y \rightarrow \infty} \frac{y^{k/2}}{e^y} = 0 \text{ für jedes } k \in \mathbb{N}.$$

Jedes Taylorpolynom bezüglich 0 wird so

$$p_n(x) = \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(0)}{k!} x^k = 0.$$

Es möge deutlich sein, dass die Taylorreihe gleich 0 ist und, außer für $x = 0$, nicht nach $f(x)$ konvergiert. Ein Bild zu $y = f(x)$ steht hier rechts. Man sieht, dass f bei 0 sehr flach verläuft (aber nicht gleich 0 ist!), obwohl die Achsen sogar unterschiedlich skaliert sind.



Beispiel 12.4. Hat $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $f(x) = 2^x$ eine konvergente Taylorreihe um $x = 0$?

Weil $2^x = \exp(x \ln 2)$, bekommt man $f^{(n)}(x) = (\ln 2)^n \exp(x \ln 2) = (\ln 2)^n 2^x$ und via $f^{(n)}(0) = (\ln 2)^n$ wird die Taylorreihe

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\ln 2)^n}{n!} x^n. \tag{12.10}$$

Weil für $|x| < K$ gilt

$$|f^{(n)}(x)| = |(\ln 2)^n 2^x| \leq 2^K (\ln 2)^n$$

konvergiert die Taylorreihe in (12.10) nach 2^x auf jedem Intervall $(-K, K)$, also auf \mathbb{R} . ■

Beispiel 12.5. Wir wollen Taylorpolynome und die Taylorreihe von $f : (-1, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ mit $f(x) = \ln(1+x)$ um $x = 0$ betrachten. Dazu erstmal die Ableitungen:

n	0	1	2	3	...	n
$f^{(n)}(x)$	$\ln(1+x)$	$\frac{1}{1+x}$	$\frac{-1}{(1+x)^2}$	$\frac{(-1)(-2)}{(1+x)^3}$...	$\frac{(-1)^{n-1}(n-1)!}{(1+x)^n}$
$f^{(n)}(0)$	0	1	-1	2	...	$(-1)^{n-1}(n-1)!$

$$p_0(x) = f(0) = 0$$

$$p_1(x) = f(0) + f'(0)x = 0 + x$$

$$p_2(x) = f(0) + f'(0)x + \frac{1}{2}f''(0)x^2 = 0 + x - \frac{1}{2}x^2$$

$$p_3(x) = f(0) + f'(0)x + \frac{1}{2}f''(0)x^2 + \frac{1}{3!}f'''(0)x^3 = 0 + x - \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{3}x^3$$

⋮

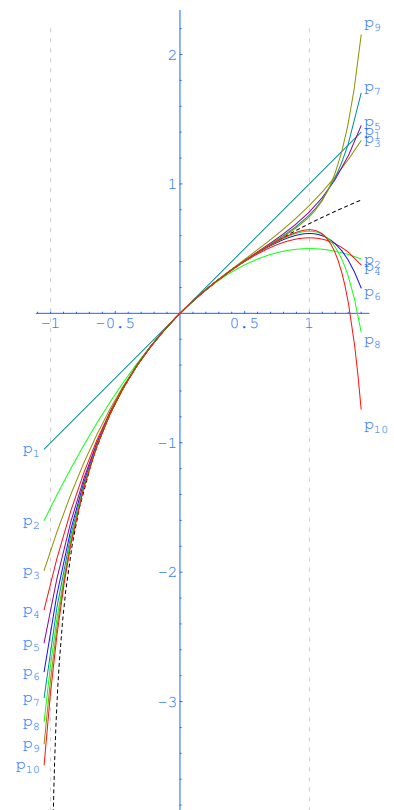
$$p_n(x) = \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(0)}{k!} x^k = \sum_{k=1}^n \frac{(-1)^{k-1}}{k} x^k = x - \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{3}x^3 - \frac{1}{4}x^4 + \dots + \frac{(-1)^{n-1}}{n} x^n.$$

Lemma 12.20 können wir nicht benutzen, jedoch hat man direkt

$$\left| \frac{f^{(n+1)}(\theta_x)}{(n+1)!} x^{n+1} \right| = \left| \frac{(-1)^n n!}{(1+\theta_x)^{n+1}} x^{n+1} \right| = \left| \frac{x}{1+\theta_x} \right|^{n+1} \frac{1}{n+1}$$

und dieser Ausdruck geht nach 0 für $n \rightarrow \infty$ dann, und nur dann, wenn $\left| \frac{x}{1+\theta_x} \right| < 1$. Weil wir nicht wissen wo θ_x genau liegt für jedes n (denn θ_x hängt auch von n ab!), bringt diese Bedingung uns wenig weiter, außer dass $x > -1$ notwendig ist für Konvergenz und $-\frac{1}{2} < x < 1$ reicht für Konvergenz.

Wenn man vergisst, woher sie kommt und man die Reihe an sich betrachtet, sieht man, dass sie konvergiert für $x \in (-1, 1]$. ■



Beispiel 12.6. Wir berechnen

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{e^x - 1 + \ln(1 - x)}{\frac{1}{2}x^2 \sin(2x)}.$$

Dazu verwenden wir die Taylorpolynome:

$$\begin{aligned} \text{für } e^x : & \quad p_n(x) = 1 + x + \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{6}x^3 + \dots + \frac{1}{n!}x^n, \\ \text{für } \ln(1 + x) : & \quad p_n(x) = x - \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{3}x^3 - \dots + \frac{(-1)^{n-1}}{n}x^n, \\ \text{für } \sin(x) : & \quad p_{2n+1}(x) = x - \frac{1}{6}x^3 + \frac{1}{120}x^5 - \dots + \frac{(-1)^n}{(2n+1)!}x^{2n+1}. \end{aligned}$$

Für $f(x) = e^x - 1 + \ln(1 - x)$ gilt

$$\begin{aligned} f(x) &= \left(1 + x + \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{6}x^3 + x^4 R_1(x)\right) - 1 - \left(x + \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{3}x^3 + x^4 R_2(x)\right) \\ &= -\frac{1}{6}x^3 + x^4 R_3(x), \end{aligned}$$

und für $g(x) = \frac{1}{2}x^2 \sin(2x)$ gilt

$$\frac{1}{2}x^2 \sin(2x) = x^3 + x^5 R_4(x).$$

Hier sind R_i irgendwelche Funktionen, die definiert sind als konvergente Potenzreihen um $x = 0$. Es reicht, um zu wissen, dass die dazugehörigen Konvergenzradien vererbt werden. Das heißt, für $R_1(\cdot)$ (von \exp) und $R_4(\cdot)$ (von \sin) sind die Konvergenzradien ∞ . Für $R_2(\cdot)$ (von $x \rightarrow \ln(1 + x)$) und $R_3(\cdot)$ (das Minimum von denen zu $R_1(\cdot)$ und $R_3(\cdot)$) sind die Konvergenzradien gleich 1. Wir finden so:

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{e^x - 1 + \ln(1 - x)}{\frac{1}{2}x^2 \sin(2x)} &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{-\frac{1}{6}x^3 + x^4 R_3(x)}{x^3 + x^5 R_4(x)} \\ &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{-\frac{1}{6} + x R_3(x)}{1 + x^2 R_4(x)} = \frac{-\frac{1}{6} + \lim_{x \rightarrow 0} x R_3(x)}{1 + \lim_{x \rightarrow 0} x^2 R_4(x)} = -\frac{1}{6}. \end{aligned}$$

Übrigens brauchen wir für dieses Ergebnis nicht mal Taylorreihen. Wenn man gut hinschaut, sieht man, dass Korollar 12.17 reicht. ■

Analysis 1, Woche 13

A1

Integralrechnung I

Bevor wir auf eine fundamentalere Weise Integrale betrachten werden, schauen wir uns mal an, was wir eigentlich möchten. In erster Instanz handelt es sich bei Integralen um Längen, Oberflächen, Inhalte und verwandte Sachen. Dafür möchten wir vernünftige mathematisch definierte Begriffe haben.

Ein Beispiel dazu ist der Flächeninhalt von einer Kreisscheibe mit Radius 1. Ist 2π der Umfang des Einheitskreises, wie folgt dann π als Flächeninhalt? Wenn man davon ausgeht, dass ein Rechteck mit Seitenlängen a und b den Flächeninhalt ab hat, dann lautet die Frage: wie können wir den Flächeninhalt von dieser Kreisscheibe mit dem eines Rechtecks vergleichen. Diese Quadratur des Kreises hat die Mathematik längere Zeit beschäftigt. In endlich vielen Schritten geht das nicht; in unendlich vielen und mit einem Limes jedoch schon.

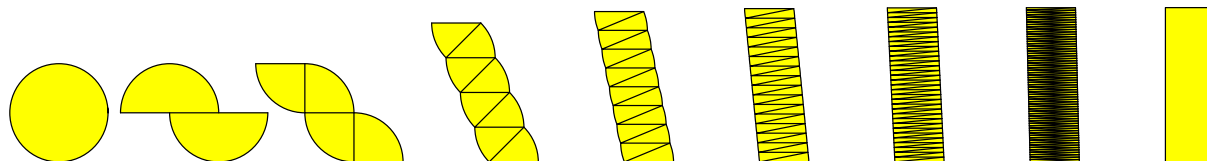


Abbildung 13.1: In ∞ -vielen Schritten kann man sich überzeugen, dass ein Kreis den gleichen Flächeninhalt hat wie das Rechteck.

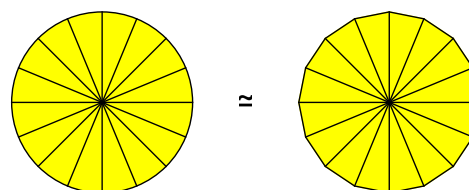
Solche Bilder lassen einen davon überzeugen, dass der Flächeninhalt A wohl π sein wird, aber sogar dieser geometrische „Beweis“ braucht $\lim_{x \downarrow 0} \sin(x)/x = 1$. Wieso wäre sonst die Länge von der längsten Seite des Rechtecks gleich π ?

Mit dem Winkel in Radialen gemessen ist π die erste positive Nullstelle vom Sinus und so die Länge vom halben Einheitskreis. Nach n -mal Halbieren hat man 2^n Tortenstücke und die Höhe eines Stücks ist für $n \geq 2$ gleich $\sin(2\pi/2^n)$.

Nimmt man die runde Seite eines Stücks gerade, dann hat eines solcher Dreiecke den Flächeninhalt

$$\frac{1}{2} \times \text{Breite} \times \text{Höhe} = \frac{1}{2} \times 1 \times \sin\left(\frac{2\pi}{2^n}\right) = \frac{1}{2} \sin(2^{1-n}\pi).$$

Man nimmt an, dass wenn die Stücke kleiner werden, also $n \rightarrow \infty$, der Flächeninhalt einer Torte aus 2^n Dreiecken dem Flächeninhalt der ursprünglichen runden Torte approximiert. Das heißt:



$$A = \lim_{n \rightarrow \infty} 2^n \frac{1}{2} \sin(2^{1-n}\pi) = \pi \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sin(2^{1-n}\pi)}{2^{1-n}\pi} = \pi \lim_{x \downarrow 0} \frac{\sin(x)}{x} = \pi.$$

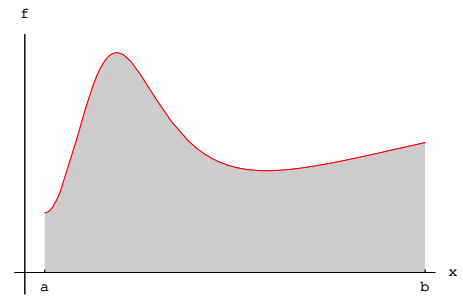
Ähnlich wollen wir auch Integrale durch Approximationen bestimmen.

13.1 Motivation

Wir sind hier interessiert am Flächeninhalt von einem zwei-dimensionalen Gebiet, beschrieben durch

$$\{(x, y) \in \mathbb{R}^2; a \leq x \leq b \text{ und } 0 \leq y \leq f(x)\} \quad (13.1)$$

mit f einer positiven Funktion und $a, b \in \mathbb{R}$ mit $a < b$.



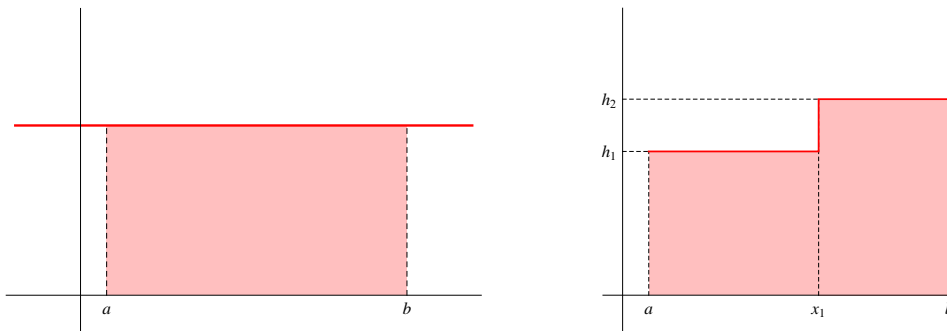
Wir wollen erst den Flächeninhalt unter einer positiven Funktion definieren und listen erst mal einige Eigenschaften auf, die wir haben möchten.

- Wenn f eine konstante Funktion ist, wollen wir den Flächeninhalt wie beim Rechteck haben. Für $f(x) = h \geq 0$ wäre das

$$A = h(b - a). \quad (13.2)$$

Auch für eine Funktion, die (nicht-stetig!) definiert ist durch $f(x) = h_1 \geq 0$ für $x \in [a, x_1]$ und $f(x) = h_2 \geq 0$ für $x \in (x_1, b]$, wenn $x_1 \in (a, b)$, will man den Flächeninhalt in (13.1) berechnen durch

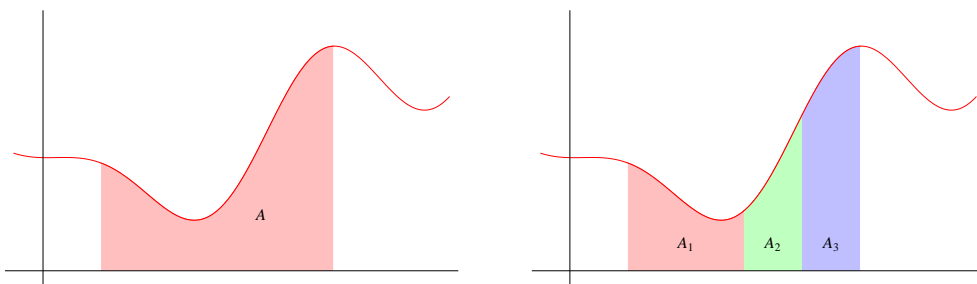
$$A = h_1(x_1 - a) + h_2(b - x_1).$$



Für allgemeine Funktionen möchte man die folgenden Eigenschaften:

- Nehmen wir an, wir haben $\{x_i\}_{i=1}^n \subset (a, b)$ mit $a = x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_n = b$. Wenn A_i der Flächeninhalt von $\{(x, y) \in \mathbb{R}^2; x_1 \leq x \leq x_{i+1} \text{ und } 0 \leq y \leq f(x)\}$ ist und A der von $\{(x, y) \in \mathbb{R}^2; x_1 \leq x \leq x_{i+1} \text{ und } 0 \leq y \leq f(x)\}$, dann wollen wir, dass

$$A = A_0 + A_1 + \dots + A_n. \quad (13.3)$$

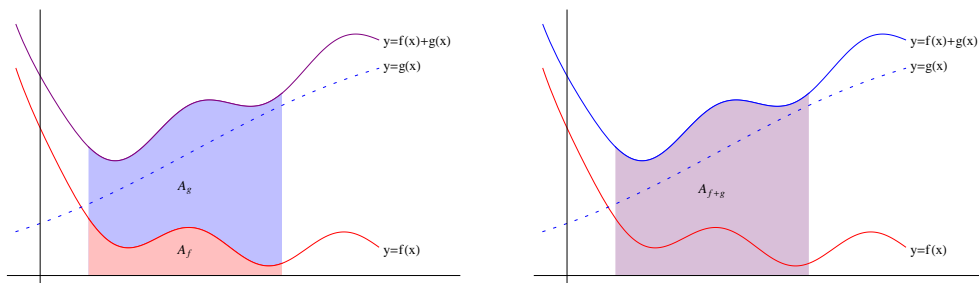


- Auch wollen wir, dass für $f(x), g(x) \geq 0$ für $x \in [a, b]$ gilt, für die dazugehörigen Flächeninhalte gilt

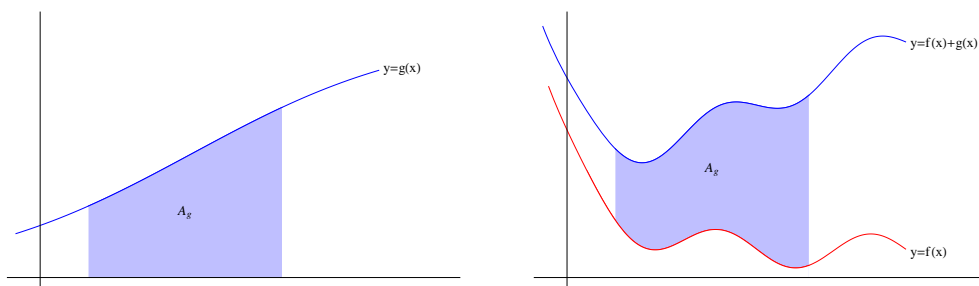
$$A_{f+g} = A_f + A_g. \quad (13.4)$$

Für eine positive Funktion h soll A_h der Flächeninhalt sein von

$$\{(x, y) \in \mathbb{R}^2; x_1 \leq x \leq x_{i+1} \text{ und } 0 \leq y \leq h(x)\}.$$



Insbesondere sollten der Flächeninhalt des Gebietes zwischen f und $f + g$ und der Flächeninhalt zwischen der x -Achse und g gleich sein.

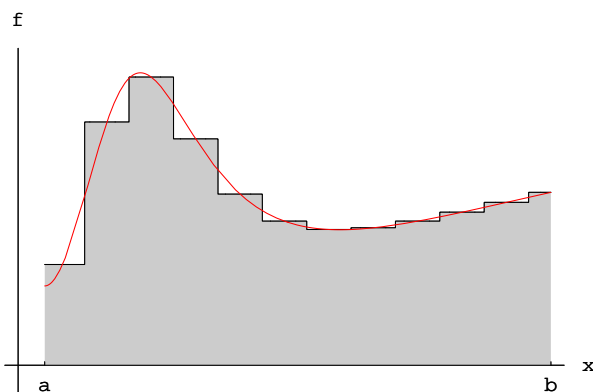


13.2 Riemann-Integrale

Im Rest dieses Kapitels betrachten wir das Intervall $[a, b]$ mit $a, b \in \mathbb{R}$ und $a < b$.

13.2.1 Definition für Treppenfunktionen

Für rechtwinklige Gebiete kann man die Oberfläche in Rechtecke teilen und so die gesamte Fläche berechnen. Für andere Gebiete können wir versuchen, die Fläche in (13.1) mit Rechtecken zu approximieren.



Dazu werden wir erst das Integral definieren für sogenannte Treppenfunktionen.

Definition 13.1 Die Funktion $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ heißt eine **Treppenfunktion**, wenn es $\{x_i\}_{i=1}^{n+1} \subset \mathbb{R}$ gibt mit

$$a = x_1 < x_2 < \dots < x_n < x_{n+1} = b$$

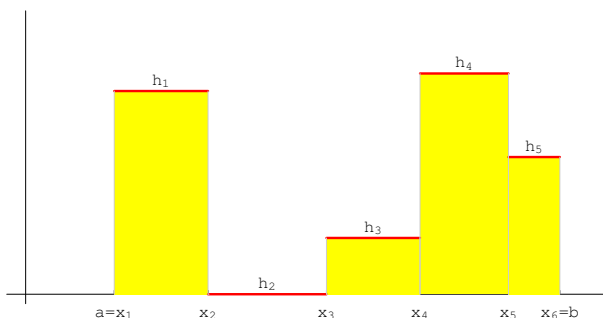
und $\{h_i\}_{i=1}^n \subset \mathbb{R}$, so dass

$$f(x) = h_i \text{ für } x \in (x_i, x_{i+1}) \text{ und } i \in \{1, 2, \dots, n\},$$

$$f(x) = 0 \text{ für } x < x_1$$

$$f(x) = 0 \text{ für } x > x_{n+1}.$$

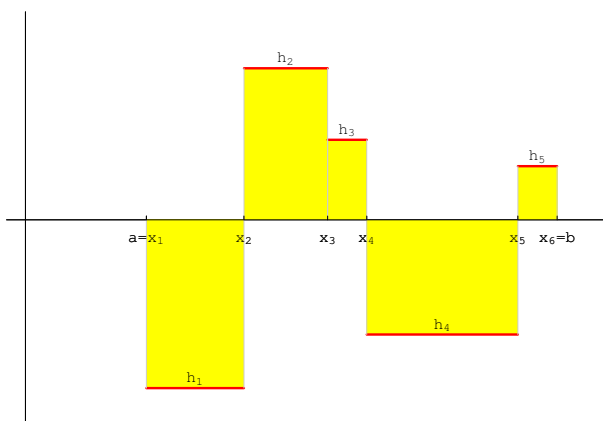
Bemerkung 13.1.1 Man bemerke, dass f nicht festgelegt wird für $x \in \{x_i\}_{i=1}^{n+1}$. Die Menge $\{[x_i, x_{i+1}]\}_{i=1}^n$ heißt eine **Zerlegung** von $[a, b]$. Es sei nochmals betont, dass diese Zerlegung nur endlich viele beschränkte Intervalle enthalten darf.



Definition 13.2 Sei f eine Treppenfunktion wie in Definition 13.1. Dann setzen wir

$$\int_a^b f(x) dx = \sum_{i=1}^n (x_{i+1} - x_i) h_i. \quad (13.5)$$

Bemerkung 13.2.1 Wir haben vorhin von Flächeninhalten geredet und positive Funktionen betrachtet. In Definition 13.2 sind auch negative Werte h_i erlaubt und dann ist „Flächeninhalt“ nicht länger zutreffend. In dem Fall steht in (13.5) „Flächeninhalt-obenhalb-x-Achse“ minus „Flächeninhalt-unterhalb-x-Achse“.



Proposition 13.3 Wenn $f, g : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ beides Treppenfunktionen sind und $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$, dann ist auch $\lambda f + \mu g : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ eine Treppenfunktion und

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

Beweis. Wenn $\{x_i\}_{i=1}^{n+1}$ eine Zerlegung gibt für f und $\{y_i\}_{i=1}^{m+1}$ eine Zerlegung für g , dann kombiniere man diese beiden Mengen für eine neue Zerlegung, die sowohl für f als auch für g passt. Der Rest ist elementare Buchführung. ■

Proposition 13.4 Wenn $f, g : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ alle beide Treppenfunktionen sind und $f(x) \leq g(x)$ auf $[a, b]$, dann gilt

$$\int_a^b f(x) dx \leq \int_a^b g(x) dx.$$

Beweis. Man benutzt Proposition 13.3 mit $\lambda = -1$ und $\mu = 1$:

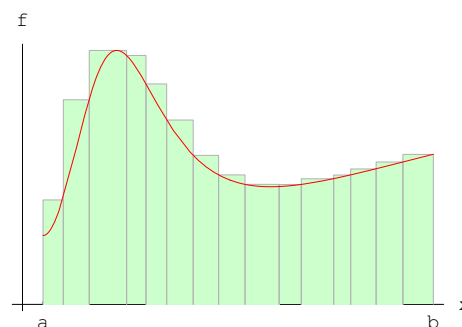
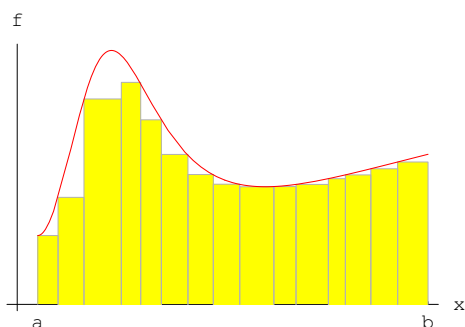
$$\int_a^b g(x) dx - \int_a^b f(x) dx = \int_a^b (g(x) - f(x)) dx$$

und $g(x) - f(x) \geq 0$ liefert nicht-negative „Höhen“ h_i in (13.5) und es folgt, dass $\int_a^b (g(x) - f(x)) dx \geq 0$. ■

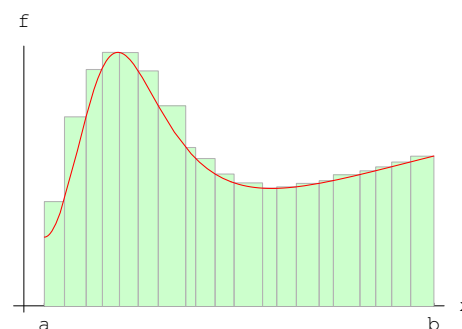
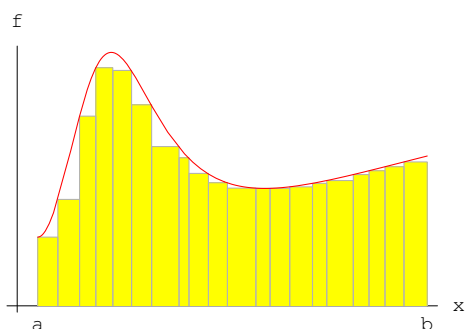
13.2.2 Definition für mehr allgemeine Funktionen

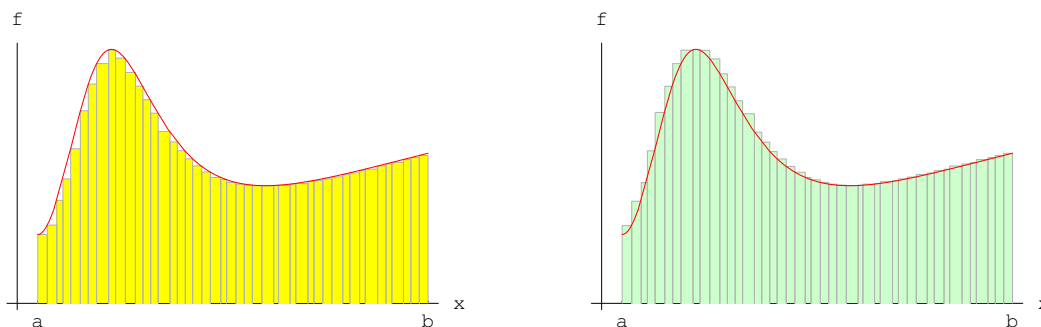
Wenn man den Flächeninhalt wie in dem Bild im Paragraphen 13.2.1 approximieren möchte, hat man nicht im Griff, wie nahe man herankommt. In dieser grauen Zone liegt sowohl etwas drüber als auch unterhalb des Graphen. Die Lösung dafür ist, nicht eine Approximierung wie in diesem Bild zu machen, sondern sowohl eine Approximierung von oben als auch eine Approximierung von unten zu machen. Für die Flächeninhalte würde man „geometrisch“ sagen:

$$A_{\text{untere Treppe}} \leq A_{\text{Funktion}} \leq A_{\text{obere Treppe}}.$$



Wenn man die Treppenstufen noch etwas schmaler macht, würde man erwarten, dass eine bessere Approximierung rauskäme.





Diese Idee werden wir verfolgen und diese geometrischen Überlegungen handfest machen. Dazu brauchen wir Unter- und Obersummen.

Definition 13.5 Sei $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion.

- Dann heißt $m \in \mathbb{R}$ eine *Untersumme* bezüglich f auf $[a, b]$, wenn es eine Treppenfunktion $t_{\text{unten}} : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ gibt, mit

$$t_{\text{unten}}(x) \leq f(x) \text{ für } x \in [a, b] \text{ und } \int_a^b t_{\text{unten}}(x) dx = m.$$

- Dann heißt $M \in \mathbb{R}$ eine *Obersumme* bezüglich f auf $[a, b]$, wenn es eine Treppenfunktion $t_{\text{oben}} : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ gibt, mit

$$f(x) \leq t_{\text{oben}}(x) \text{ für } x \in [a, b] \text{ und } \int_a^b t_{\text{oben}}(x) dx = M.$$

Lemma 13.6 Sei $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion und sei m und M respektive eine Unter- und eine Obersumme bezüglich f auf $[a, b]$. Dann gilt $m \leq M$.

Beweis. Seien t_{unten} und t_{oben} die Treppenfunktionen die m und M liefern. Dann gilt

$$t_{\text{unten}}(x) \leq f(x) \leq t_{\text{oben}}(x)$$

und wegen Proposition 13.4 folgt

$$m = \int_a^b t_{\text{unten}}(x) dx \leq \int_a^b t_{\text{oben}}(x) dx = M.$$

Damit bekommt man das gewünschte Ergebnis. ■

Dieses Lemma zeigt, dass jede Untersumme eine untere Schranke liefert für die Menge aller Obersummen. Ebenso liefert jede Obersumme eine obere Schranke für die Menge aller Untersummen. Weil jede nicht-leere, nach unten beschränkte Menge in \mathbb{R} ein Infimum hat, und weil jede nicht-leere, nach oben beschränkte Menge in \mathbb{R} ein Supremum hat, ist die folgende Definition gestattet.

Definition 13.7 Sei $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion und seien m und M respektive eine Unter- und eine Obersumme bezüglich f auf $[a, b]$.

- Man definiert das **obere Integral** von f auf $[a, b]$ durch

$$\int_a^b f(x) dx = \inf \{ M \in \mathbb{R}; M \text{ ist eine Obersumme bezüglich } f \text{ auf } [a, b] \}.$$

- Man definiert das **untere Integral** von f auf $[a, b]$ durch

$$\int_a^b f(x)dx = \sup \{m \in \mathbb{R}; m \text{ ist eine Untersumme bezüglich } f \text{ auf } [a, b]\}.$$

Definition 13.8 (Das Riemann-Integral) Falls oberes Integral und unteres Integral existieren in \mathbb{R} und gleich sind:

$$\int_a^b f(x)dx = \int_a^b f(x)dx =: \ell,$$

heißt f **Riemann-integrierbar** auf $[a, b]$ und man definiert das Integral von f auf $[a, b]$ durch

$$\int_a^b f(x)dx = \ell.$$

Bemerkung 13.8.1 Weil für jede Untersumme m und Obersumme M bezüglich f auf $[a, b]$ gilt $m \leq M$, folgt

$$\int_a^b f(x)dx \leq \int_a^b f(x)dx. \quad (13.6)$$

Bemerkung 13.8.2 Eine Funktion $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{C}$ heißt Riemann-integrierbar, falls $\operatorname{Re} f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ und $\operatorname{Im} f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ Riemann-integrierbar sind. Man setzt

$$\int_a^b f(x)dx = \int_a^b \operatorname{Re} f(x)dx + i \int_a^b \operatorname{Im} f(x)dx.$$

Die erste Frage, die man sich stellen sollte, wäre, ob diese neue Definition des Integrals mit der für Treppenfunktionen übereinstimmt.

Sei f eine Treppenfunktion mit „Treppenintegral“ $s = \sum_{i=1}^n (x_{i+1} - x_i) h_i$. Weil f eine Treppenfunktion ist, ist s sowohl Unter- als auch Obersumme für f bezüglich $[a, b]$ und man hat

$$s \leq \sup \{\text{Untersummen}\} = \int_a^b f(x)dx \leq \int_a^b f(x)dx = \inf \{\text{Obersummen}\} \leq s.$$

Diese Frage lässt sich also bejahen.

Als nächstes wollen wir mal schauen, ob die gewünschten Eigenschaften tatsächlich gelten. Mit integrierbar meinen wir ab hier immer Riemann-integrierbar.

Theorem 13.9 Seien $f, g : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ zwei Funktionen.

1. Angenommen f und g sind integrierbar auf $[a, b]$. Dann ist $\lambda f + \mu g$ integrierbar auf $[a, b]$ für alle $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$ und

$$\int_a^b (\lambda f(x) + \mu g(x)) dx = \lambda \int_a^b f(x)dx + \mu \int_a^b g(x)dx. \quad (13.7)$$

2. Sei $c \in (a, b)$. Es gilt: f auf $[a, b]$ ist integrierbar, dann und nur dann, wenn f auf $[a, c]$ und f auf $[c, b]$ integrierbar sind. Außerdem gilt

$$\int_a^b f(x)dx = \int_a^c f(x)dx + \int_c^b f(x)dx. \quad (13.8)$$

3. Wenn f und g integrierbar sind auf $[a, b]$ und $f(x) \leq g(x)$ gilt für $x \in [a, b]$, dann gilt auch

$$\int_a^b f(x)dx \leq \int_a^b g(x)dx. \quad (13.9)$$

Beweis. 1. Wenn $\lambda \geq 0$ und $\mu \geq 0$, dann kann man zu jedem Paar Obersummen M_f von f und M_g von g bezüglich $[a, b]$ eine gemeinsame Zerlegung zusammensetzen und eine Treppenfunktion zu $\lambda f + \mu g$ konstruieren mit der Obersumme $\lambda M_f + \mu M_g$. Ebenso benutzt man Untersummen und bekommt

$$\lambda m_f + \mu m_g \leq \int_a^b (\lambda f(x) + \mu g(x)) dx \leq \overline{\int}_a^b (\lambda f(x) + \mu g(x)) dx \leq \lambda M_f + \mu M_g.$$

Nimmt man das Infimum von M_f und von M_g , findet man

$$\overline{\int}_a^b (\lambda f(x) + \mu g(x)) dx \leq \lambda \int_a^b f(x)dx + \mu \int_a^b g(x)dx.$$

Auf ähnliche Art liefert das Supremum von m_f und von m_g , dass

$$\lambda \int_a^b f(x)dx + \mu \int_a^b g(x)dx \leq \int_a^b (\lambda f(x) + \mu g(x)) dx,$$

und weil so das obere Integral gleich dem unteren ist, ist man fertig.

Wenn $\lambda \geq 0$ und $\mu < 0$, geht man auf eine ähnliche Weise vor, aber vertauscht m_g und M_g : wenn M_g eine Obersumme bezüglich f auf $[a, b]$ ist, dann ist $-M_g$ eine Untersumme bezüglich $-g$ auf $[a, b]$. So hat man

$$\lambda m_f + \mu M_g \leq \int_a^b (\lambda f(x) + \mu g(x)) dx \leq \overline{\int}_a^b (\lambda f(x) + \mu g(x)) dx \leq \lambda M_f + \mu m_g,$$

und bekommt

$$\overline{\int}_a^b (\lambda f(x) + \mu g(x)) dx \leq \lambda \overline{\int}_a^b f(x)dx + \mu \int_a^b g(x)dx = \lambda \int_a^b f(x)dx + \mu \int_a^b g(x)dx,$$

usw.

2. (\Rightarrow) Wenn t_o (t_u) eine Treppenfunktion ist, die auf $[a, b]$ oberhalb (unterhalb) von f liegt, dann ist $t_{o|[a,c]}$ ($t_{u|[a,c]}$) eine Treppenfunktion, die auf $[a, c]$ oberhalb (unterhalb) von f liegt. So hat man schon eine endliche Ober- und Untersumme bezüglich f auf $[a, c]$. Man bekommt sogar, nachdem man c in die Zerlegung einfügt, dass

$$\begin{aligned} \int_a^c t_{o|[a,c]}(x)dx - \int_a^c t_{u|[a,c]}(x)dx &= \int_a^c (t_{o|[a,c]}(x) - t_{u|[a,c]}(x)) dx \\ &\leq \int_a^b (t_o(x) - t_u(x)) dx = \int_a^b t_o(x)dx - \int_a^b t_u(x)dx. \end{aligned} \quad (13.10)$$

Dann folgt aus (13.10), wenn wir das Infimum über alle solche t_o nehmen, dass

$$\begin{aligned} \overline{\int}_a^c f(x)dx - \int_a^c t_{u|[a,c]}(x)dx &\leq \inf_{t_o} \left\{ \int_a^c t_{o|[a,c]}(x)dx \right\} - \int_a^c t_{u|[a,c]}(x)dx \\ &\stackrel{(13.10)}{\leq} \inf_{t_o} \left\{ \int_a^b t_{o|[a,c]}(x)dx \right\} - \int_a^b t_{u|[a,c]}(x)dx = \int_a^b f(x)dx - \int_a^b t_{u|[a,c]}(x)dx. \end{aligned} \quad (13.11)$$

Das Supremum über passende h_u liefert mit (13.11), dass

$$\begin{aligned} \overline{\int_a^c} f(x)dx - \int_a^c f(x)dx &\leq \overline{\int_a^c} f(x)dx - \sup_{t_u} \left\{ \int_a^c t_{u|[a,c]}(x)dx \right\} \\ (13.11) \quad &\leq \int_a^b f(x)dx - \sup_{t_u} \left\{ \int_a^b t_{u|[a,c]}(x)dx \right\} = \int_a^b f(x)dx - \int_a^b f(x)dx = 0 \end{aligned}$$

und mit (13.6) folgt

$$\overline{\int_a^c} f(x)dx = \int_a^c f(x)dx,$$

und so die Integrierbarkeit. Ähnlich geht man vor auf $[c, b]$.

(\Leftarrow) Diese Richtung ist eher gradeaus. Man kombiniert eine Treppenfunktion t_1 oberhalb von f auf $[a, c]$ mit einer Treppenfunktion t_2 oberhalb von f auf $[c, b]$ und benutzt, dass (13.8) gilt für Treppenfunktionen:

$$\overline{\int_a^b} f(x)dx \leq \int_a^c t_1(x)dx + \int_c^b t_2(x)dx.$$

Nimmt man rechts das Infimum, dann erreicht man

$$\overline{\int_a^b} f(x)dx \leq \int_a^c f(x)dx + \int_c^b f(x)dx.$$

Ähnlich bekommt man

$$\underline{\int_a^b} f(x)dx \geq \int_a^c f(x)dx + \int_c^b f(x)dx$$

und das Ergebnis folgt mit der Abschätzung (13.6). Gleichzeitig hat man jetzt (13.8) bewiesen.

3. Jede Obersumme M_g bezüglich g auf $[a, b]$ ist eine Obersumme bezüglich f auf $[a, b]$. Also findet man

$$\int_a^b f(x)dx = \inf \{ \text{Obersummen für } f \} \leq \inf \{ \text{Obersummen für } g \} = \int_a^b g(x)dx. \quad \blacksquare$$

Definition 13.10 Sei $c \leq d$. Für $c < d$ definieren wir das Integral mit dem „falsch“-orientierten Intervall durch

$$\int_d^c f(x)dx := - \int_c^d f(x)dx. \quad (13.12)$$

Für $c = d$ definieren wir das Integral gleich 0.

Bemerkung 13.10.1 Nehme an, dass f auf $[a, b]$ integrierbar ist. Dann folgt aus (13.8) für $x_1, x_2, x_3 \in [a, b]$ mit $x_1 \leq x_2 \leq x_3$, dass

$$\int_{x_1}^{x_3} f(x)dx = \int_{x_1}^{x_2} f(x)dx + \int_{x_2}^{x_3} f(x)dx. \quad (13.13)$$

Mit Definition 13.10 kann man zeigen, dass (13.13) sogar für alle $x_1, x_2, x_3 \in [a, b]$ gilt, unabhängig davon wie sie geordnet sind.

13.3 Integrierbare Funktionen

Auch in diesem Abschnitt gilt $a, b \in \mathbb{R}$ mit $a < b$.

Proposition 13.11 Sei $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion.

- Es existiert eine Obersumme in \mathbb{R} bezüglich f auf $[a, b]$, dann und nur dann, wenn f nach oben beschränkt ist auf $[a, b]$.
- Es existiert eine Untersumme in \mathbb{R} bezüglich f auf $[a, b]$, dann und nur dann, wenn f nach unten beschränkt ist auf $[a, b]$.

Bemerkung 13.11.1 Bemerke, dass $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ bedeutet, dass für jedes $x \in [a, b]$ gilt $f(x) \in \mathbb{R}$ und $+\infty, -\infty$ können dann also nicht als Funktionswert auftreten. Das reicht jedoch nicht, denn zum Beispiel die Funktion $f : [-1, 1] \rightarrow \mathbb{R}$, definiert durch $f(x) = 0$ für $x \leq 0$ und $f(x) = 1/x$ für $x > 0$, ist nicht nach oben beschränkt.

Beweis. Wir zeigen nur den ersten Punkt. Das Argument für eine Untersumme ist ähnlich. (\Rightarrow) Wenn f nach oben beschränkt ist, sagen wir $f(x) \leq K$ für alle $x \in [a, b]$, dann ist $K(b-a)$ eine Obersumme.

(\Leftarrow) Wenn M eine Obersumme ist, dann gibt es eine Treppenfunktion t mit endlich vielen ‘Stufen’ h_i , passend zu der Zerlegung mit $a = x_1 < \dots < x_n < x_{n+1} = b$, und

$$f(x) \leq t(x) \leq K := \max \left\{ \max_{1 \leq i \leq n} h_i, \max_{1 \leq i \leq n+1} t(x_i) \right\}.$$

Man bemerke, dass $K \in \mathbb{R}$ gilt, weil es das Maximum endlich vieler Terme ist. ■

Proposition 13.12 Die Funktion $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ ist Riemann-integrierbar auf $[a, b]$, dann und nur dann, wenn es für jede $\varepsilon > 0$ eine Obersumme $M \in \mathbb{R}$ und eine Untersumme $m \in \mathbb{R}$ bezüglich f auf $[a, b]$ gibt mit $M - m < \varepsilon$.

Beweis. (\Rightarrow) Für jedes $\varepsilon > 0$ gibt es eine Obersumme $M \in \mathbb{R}$ mit $\int_a^b f(x) dx > M - \frac{1}{2}\varepsilon$ und eine Untersumme $m \in \mathbb{R}$ mit $\int_a^b f(x) dx < m + \frac{1}{2}\varepsilon$. Also folgt $M - \frac{1}{2}\varepsilon < m + \frac{1}{2}\varepsilon$.

(\Leftarrow) Weil eine Obersumme M_1 und eine Untersumme m_1 in \mathbb{R} existieren (das heißt: endlich sind), ist die Menge der Obersummen nach unten und die Menge der Untersummen nach oben beschränkt. Das heißt

$$\overline{\int_a^b f(x) dx} = \inf \{M \text{ Obersumme}\} \in \mathbb{R} \quad \text{und} \quad \underline{\int_a^b f(x) dx} = \sup \{m \text{ Untersumme}\} \in \mathbb{R}.$$

Außerdem haben wir angenommen, dass es für jedes $\varepsilon > 0$ eine Obersumme M_ε und eine Untersumme m_ε gibt derart, dass

$$0 \leq \overline{\int_a^b f(x) dx} - \underline{\int_a^b f(x) dx} \leq M_\varepsilon - m_\varepsilon < \varepsilon$$

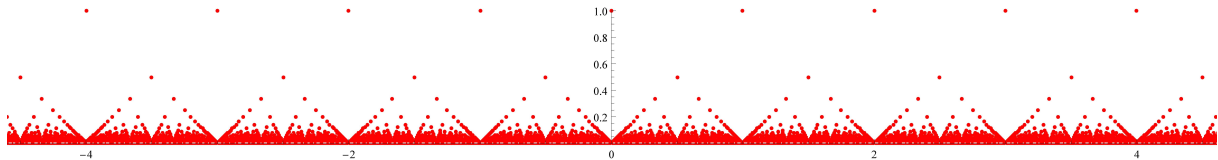
Weil diese Ungleichung gilt für jedes $\varepsilon > 0$, haben oberes und unteres Integral den gleichen Wert und es folgt so, dass f integrierbar ist. ■

Wir betrachten nochmals die Funktion in Beispiel 9.13.

Beispiel 13.1. Die Funktion $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, definiert durch

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{m} & \text{wenn } x = \frac{n}{m} \text{ mit } n \in \mathbb{Z}, m \in \mathbb{N}^+ \text{ und } \text{ggT}(|n|, m) = 1, \\ 0 & \text{wenn } x \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}, \end{cases}$$

ist auf keinem Intervall stetig. Diese Funktion ist aber Riemann-integrierbar auf jedem Intervall. Hier steht nochmals eine Skizze zu dieser Funktion:



Weil diese Funktion periodisch ist, ist sie auf jedem beschränkten Intervall $[a, b]$ integrierbar, wenn sie es ist auf $[0, 1]$. Wir werden uns die Integrierbarkeit auf $[0, 1]$ anschauen.

Die Funktion $t_u(x) = 0$ ist eine Treppenfunktion mit $t_u(x) \leq f(x)$. Damit findet man

$$0 \leq \int_0^1 t_u(x) dx \leq \int_0^1 f(x) dx.$$

Sei jetzt $k \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$. Man ordnet die Menge

$$Q_k = \left\{ \frac{n}{m}; \text{ mit } 0 \leq n \leq m \leq k \text{ und } n \in \mathbb{N}, m \in \mathbb{N}^+ \right\},$$

macht dazu eine Zerlegung und definiert

$$t_{o,k}(x) = \begin{cases} \frac{1}{k} & \text{falls } x \notin Q_k, \\ 1 & \text{falls } x \in Q_k. \end{cases}$$

Dann ist $t_{o,k}(x)$ für jedes $k \in \mathbb{N}^+$ eine Treppenfunktion (mit endlich vielen Stufen!) und es gilt $f(x) \leq t_{o,k}(x)$. So findet man

$$\int_0^1 f(x) dx \leq \inf_{k \in \mathbb{N}^+} \int_0^1 t_{o,k}(x) dx = \inf_{k \in \mathbb{N}^+} \frac{1}{k} = 0.$$

Weil das obere Integral und das untere übereinstimmen, ist f integrierbar auf $[0, 1]$. ■

Beispiel 13.2. Die Funktion $f : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ mit

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{x}} & \text{für } x > 0, \\ 0 & \text{für } x = 0, \end{cases}$$

erfüllt auf $[0, 1]$ nicht die Bedingungen aus Definition 13.8, denn die einzig mögliche Obersumme wäre ∞ . Weil man für die Zerlegung bei einer zugelassenen Treppenfunktion das Intervall nur in endlich viele Stücke teilen darf, gibt es ein Intervall $(0, \delta)$ mit $\delta > 0$. Die einzige Treppenstufe, die da passen würde, hätte eine unendliche Höhe. Dieses Ergebnis ist unbefriedigend und wir werden später sogenannte ‘uneigentliche Riemannintegrale’ definieren. ■

Beispiel 13.3. Die Funktion $f : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ mit

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{falls } x \in \mathbb{Q}, \\ 0 & \text{falls } x \in [0, 1] \setminus \mathbb{Q}, \end{cases}$$

erfüllt auf $[0, 1]$ auch nicht die Bedingungen aus Definition 13.8. Jetzt existieren zwar endliche Obersummen (und Untersummen), aber man findet

$$\int_0^1 f(x) dx = 0 \quad \text{und} \quad \overline{\int}_0^1 f(x) dx = 1.$$

Hier wird das uneigentliche Riemannintegral nicht helfen. Weil die Menge weg von 0 doch ziemlich dünn ist (abzählbar), möchte man die eigentlich ausschließen. Beim Lebesgue-Integral, das meistens in einer Vorlesung Analysis III betrachtet wird, passiert das. ■

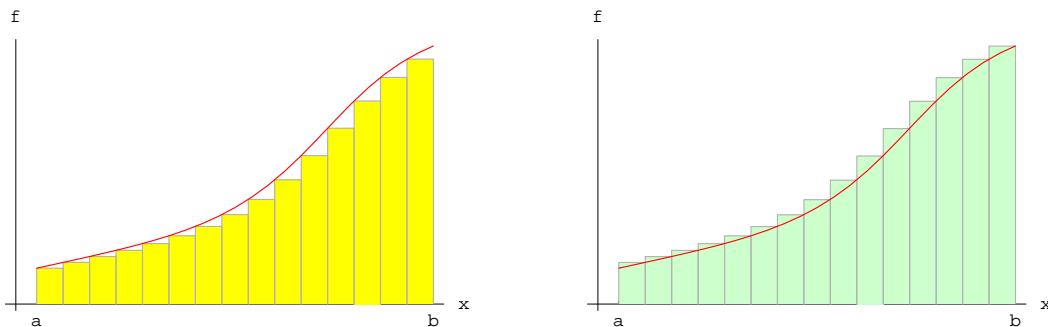
Theorem 13.13 Sei $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ eine monotone Funktion. Dann ist f auf $[a, b]$ integrierbar.

Beweis. Es reicht, wenn wir annehmen f ist wachsend. Erst klären wir mal, dass es eine endliche Obersumme und Untersumme hat. Weil f wächst, ist $(b-a)f(b)$ eine Obersumme und $(b-a)f(a)$ eine Untersumme.

Wenn wir zeigen können, dass es zu jeder $\varepsilon > 0$ eine Obersumme M und eine Untersumme m gibt derart, dass $M - m < \varepsilon$, dann hat man, dass f auf $[a, b]$ integrierbar ist. Wir wählen nun $k \in \mathbb{N}$ derart, dass

$$(b-a)(f(b) - f(a)) < k\varepsilon,$$

und betrachten die Zerlegung für $\left\{a + \frac{n}{k}(b-a)\right\}_{n=0}^k$.



Auf dem Intervall $\left[a + \frac{n}{k}(b-a), a + \frac{n+1}{k}(b-a)\right]$ gilt

$$f\left(a + \frac{n}{k}(b-a)\right) \leq f(x) \leq f\left(a + \frac{n+1}{k}(b-a)\right)$$

und wenn man genau diese Werte benutzt für eine Treppenfunktion $h_u \leq f$ und für eine Treppenfunktion $h_o \geq f$, hat man

- eine Untersumme $\int_a^b h_u(x) dx = \sum_{n=0}^{k-1} \frac{b-a}{k} f\left(a + \frac{n}{k}(b-a)\right)$, und
- eine Obersumme $\int_a^b h_o(x) dx = \sum_{n=0}^{k-1} \frac{b-a}{k} f\left(a + \frac{n+1}{k}(b-a)\right) = \sum_{n=1}^k \frac{b-a}{k} f\left(a + \frac{n}{k}(b-a)\right)$

Es folgt, dass

$$\begin{aligned} \int_a^b h_o(x) dx - \int_a^b h_u(x) dx &= \frac{b-a}{k} f\left(a + \frac{k}{k}(b-a)\right) - \frac{b-a}{k} f\left(a + \frac{0}{k}(b-a)\right) \\ &= \frac{b-a}{k} (f(b) - f(a)) < \varepsilon. \end{aligned}$$

Wir bekommen

$$\int_a^b f(x) dx \leq \overline{\int}_a^b f(x) dx \leq \underline{\int}_a^b f(x) dx + \varepsilon$$

und weil das für beliebige $\varepsilon > 0$ gilt, gleicht das obere Integral dem unteren. ■

Korollar 13.14 Sei $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion, die stückweise monoton ist. Dann ist f auf $[a, b]$ integrierbar.

Bemerkung 13.14.1 Die Funktion f heißt stückweise monoton auf $[a, b]$, wenn es eine Zerlegung mit $a = x_0 < x_1 < \dots < x_{n+1} = b$ gibt derart, dass $f|_{[x_i, x_{i+1}]}$ für $i \in \{0, n\}$ monoton ist.

Beweis. Benutze n -mal Theorem 13.9,2 und Theorem 13.13. ■

13.4 Stetigkeit und Integrierbarkeit

Beispiel 13.4. Stetigkeit alleine reicht nicht.

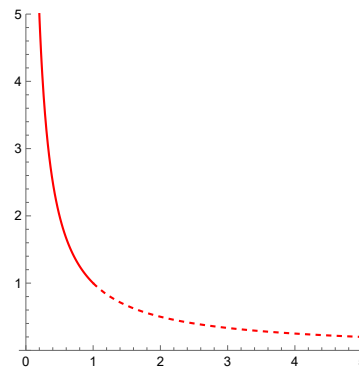
Die Funktion $f : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$, definiert durch

$$f(x) = x^{-1} \text{ für } x > 0$$

ist stetig auf \mathbb{R}^+ , jedoch weder auf $(0, 1]$ noch auf $[1, \infty)$ integrierbar.

- Auf $(0, 1]$ gibt es bei 0 keine Treppenfunktion oberhalb von f , denn sie müsste bei 0 notwendigerweise den „Wert“ ∞ haben.

- Auf $[1, \infty)$ wäre die letzte Stufe der Treppe ∞ lang und das ist auch nicht erlaubt. ■

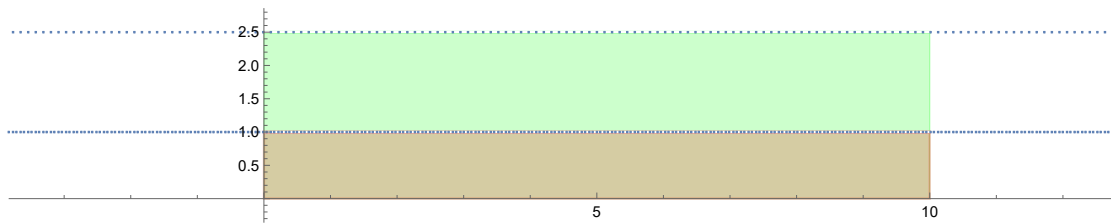


Das Beispiel legt die Vermutung nahe, dass für Integrierbarkeit ein beschränktes Intervall und eine beschränkte Funktion notwendig sind.

Beispiel 13.5. Eine beschränkte Funktion auf einem beschränkten Intervall alleine reicht nicht für integrierbar. Wenn man die Funktion

$$g(x) = \begin{cases} 2.5 & \text{für } x \in \mathbb{Q}, \\ 1 & \text{für } x \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}, \end{cases}$$

betrachtet auf $[0, 10]$, dann ist die kleinste Treppenfunktion oberhalb gleich 2.5 auf dem Intervall und die größte Treppenfunktion unterhalb gleich 1. Als kleinste Obersumme findet man $25 = 10 \times 2.5$ und als größte Untersumme $10 = 10 \times 1$.



Lemma 13.15 Sei $a < b$ und sei $f : [a, b] \subset \mathbb{R}$ eine gleichmäßig stetige Funktion. Dann ist f integrierbar auf $[a, b]$.

Beweis. Sei $\varepsilon > 0$. Weil f gleichmäßig stetig ist, gibt es $\delta > 0$ derart, dass

$$|x - y| < \delta \implies |f(x) - f(y)| < \varepsilon.$$

Man nehme dann eine Zerlegung $\{[x_i, x_{i+1}]\}_{i=0}^n$ mit $|x_{i+1} - x_i| < \delta$. Eine solche Zerlegung ist möglich für $n = \lceil (b - a) / \delta \rceil + 1$. Auf jedem Intervall $[x_i, x_{i+1}]$ nimmt man für die Obersumme

$$h_i^o = \max \{f(x); x \in [x_i, x_{i+1}]\}$$

und für die Untersumme

$$h_i^u = \min \{f(x); x \in [x_i, x_{i+1}]\}.$$

Dann gibt es $x_i^o, x_i^u \in [x_i, x_{i+1}]$ mit $h_i^o = f(x_i^o)$ und $h_i^u = f(x_i^u)$. Weil $|x_i^u - x_i^o| < \delta$, folgt $h_i^u \geq h_i^o - \varepsilon \geq h_i^u - \varepsilon$ und, dass die Differenz zwischen Ober- und Untersumme höchstens $(b - a)\varepsilon$ ist. Weil man ε beliebig klein nehmen kann, folgt die Behauptung. ■

Theorem 13.16 Sei $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ eine stetige Funktion. Dann ist f auch gleichmäßig stetig auf $[a, b]$.

Bemerkung 13.16.1 Wesentlich ist die Annahme, dass das Intervall abgeschlossen und beschränkt ist. Die Funktion $f(x) = \sin\left(\frac{1}{x}\right)$ ist stetig auf $(0, 1]$ aber nicht gleichmäßig stetig. Die Funktion $g(x) = \sin(x^2)$ ist stetig auf \mathbb{R} aber nicht gleichmäßig stetig.

Beweis. Wir geben einen indirekten Beweis und nehmen an, dass f stetig aber nicht gleichmäßig stetig ist auf $[a, b]$. Nicht gleichmäßig stetig bedeutet, dass es ein $\varepsilon > 0$ gibt, wobei zu jedem $\delta > 0$ es x und y gibt mit $|x - y| < \delta$ und $|f(x) - f(y)| \geq \varepsilon$. Sei $\varepsilon > 0$ derartig. Dann kann man auch zu jedem $n \in \mathbb{N}^+$ Zahlen $x_n, y_n \in [a, b]$ finden mit $|x_n - y_n| < \frac{1}{n}$. Wegen des Satzes von Bolzano-Weierstraß (Theorem 5.20) gibt es eine konvergente Teilfolge $\{x_{n_k}\}_{k=1}^\infty$, sagen wir $x_{n_k} \rightarrow \bar{x}$. Weil das Intervall abgeschlossen ist, gilt $\bar{x} \in [a, b]$. Weil man $|x_{n_k} - y_{n_k}| < \frac{1}{n_k}$ hat, konvergiert auch $\{y_{n_k}\}_{k=1}^\infty$ nach \bar{x} . Anschließend verwendet man die Stetigkeit von f in \bar{x} , und es gibt $K_1, K_2 \in \mathbb{N}$ so, dass

$$k > K_1 \implies |f(x_{n_k}) - f(\bar{x})| < \frac{1}{2}\varepsilon \quad \text{und} \quad k > K_2 \implies |f(y_{n_k}) - f(\bar{x})| < \frac{1}{2}\varepsilon.$$

Für $k > \max(K_1, K_2)$ gilt dann

$$\varepsilon \leq |f(x_{n_k}) - f(y_{n_k})| \leq |f(x_{n_k}) - f(\bar{x})| + |f(\bar{x}) - f(y_{n_k})| < \varepsilon,$$

ein Widerspruch. ■

Aus Lemma 13.15 und Theorem 13.16 folgt:

Korollar 13.17 Eine stetige Funktion $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ ist Riemann-integrierbar auf $[a, b]$.

Eine Funktion $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$, die nur stetig ist auf (a, b) , jedoch zusätzlich beschränkt ist, ist auch Riemann-integrierbar auf $[a, b]$. Man betrachte für $\delta > 0$, aber genügend klein, getrennt die drei Intervalle

$$[a, a + \delta], [a + \delta, b - \delta] \text{ und } [b - \delta, b].$$

Mit $|f(x)| \leq M$ findet man zu den Randintervallen Ober- und Untersummen, die höchstens $2\delta M$ verschieden sind. Im mittleren Intervall $[a + \delta, b - \delta]$ verwendet man die (gleichmäßige) Stetigkeit.

Beispiel 13.6. Die Funktion $f : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$, definiert durch

$$f(x) = \begin{cases} \sin\left(\frac{1}{x}\right) & \text{für } x \in (0, 1], \\ \frac{1}{5} & \text{für } x = 0, \end{cases}$$

ist nicht (gleichmäßig) stetig, aber doch integrierbar auf $[0, 1]$. Siehe auch Beispiel 9.14. ■

13.5 Eigenschaften von Integralen

Ganz formell kann man das Integral betrachten als eine Abbildung $\mathcal{I} : R[a, b] \rightarrow \mathbb{R}$. Mit $R[a, b]$ werden die Riemann-integrierbaren Funktionen auf $[a, b]$ gemeint, und \mathcal{I} ist jetzt

$$\mathcal{I}(f) = \int_a^b f(x) dx \text{ für alle } f \in R[a, b].$$

Eine Abbildung, die definiert ist auf Funktionen, wird meistens ‘Operator’ genannt. Der Operator \mathcal{I} heißt *linear*, wenn

$$\mathcal{I}(\lambda f + \mu g) = \lambda \mathcal{I}(f) + \mu \mathcal{I}(g) \text{ für alle } f, g \in E_1 \text{ und } \lambda, \mu \in \mathbb{R} \text{ (oder } \mathbb{C}). \quad (13.14)$$

Theorem 13.9-1 sagt genau, dass dieses \mathcal{I} ein linearer Operator ist. Diese lineare Eigenschaft ist gültig für $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$ und auch für $\lambda, \mu \in \mathbb{C}$.

Bemerkung 13.17.1 Wenn man $\lambda \in \mathbb{R}$ ersetzt durch eine Funktion in (13.14), bekommt man fast immer Unsinn, denn für fast alle Funktionen und $b \neq a$ hat man

$$\int_a^b f(x)g(x)dx \neq f(x) \int_a^b g(x)dx,$$

(links ist x nur Notationshilfe und rechts auch noch Variable?) und auch

$$\int_a^b f(x)g(x)dx \neq \int_a^b f(x)dx \int_a^b g(x)dx.$$

Die Versuche, in Klausuren und Übungsaufgaben trotzdem angeblich existierende Identitäten in dieser Richtung zu verwenden, führen bei dem Unterrichtspersonal für eine miese Stimmung beim Korrigieren!

Obwohl es beim Integral des Produkts zweier Funktionen keine direkte Rechenbeziehung gibt zu den beiden einzelnen Integralen, kann man schon etwas sagen:

Proposition 13.18 Wenn $f, g : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ integrierbar sind auf $[a, b]$, dann ist auch $f \cdot g$ integrierbar auf $[a, b]$.

Beweis. Wenn f integrierbar ist, dann ist f beschränkt (Proposition 13.11), sagen wir $|f(x)| \leq F \in \mathbb{R}$ für $x \in [a, b]$. Ebenso darf man annehmen, dass $|g(x)| \leq G$ für $x \in [a, b]$.

Für jedes $\varepsilon > 0$ gibt es Untersummen m_f, m_g und Obersummen M_f, M_g für f und g derart, dass

$$M_f - m_f < \frac{\varepsilon}{4G + 1} \quad \text{und} \quad M_g - m_g < \frac{\varepsilon}{4F + 1}. \quad (13.15)$$

Nennen wir die dazugehörigen Treppenfunktionen $h_{u,f}, h_{o,f}, h_{u,g}$ und $h_{o,g}$. Wir dürfen annehmen, dass

$$-F \leq h_{u,f}(x) \leq f(x) \leq h_{o,f}(x) \leq F$$

und auch

$$-G \leq h_{u,g}(x) \leq g(x) \leq h_{o,g}(x) \leq G$$

Leider kann man nicht einfach die beiden unteren Treppenfunktionen multiplizieren, um eine Treppenfunktion unterhalb von $f \cdot g$ zu bekommen. Das Vorzeichen kann da Probleme verursachen. Deshalb benutzen wir einen Trick. Wir werden nicht $f \cdot g$, sondern $(f + F) \cdot (g + G)$ betrachten. Sowohl $f + F$ als $g + G$ sind positiv. Dann haben wir nicht-negative Treppenfunktionen $(h_{u,f} + F) \cdot (h_{u,g} + G)$ und $(h_{o,f} + F) \cdot (h_{o,g} + G)$ mit

$$0 \leq (h_{u,f} + F)(h_{u,g} + G) \leq (f + F)(g + G) \leq (h_{o,f} + F)(h_{o,g} + G).$$

Mit den in (13.15) gewählten Ober- und Untersummen für f und g hat man nun eine Obersumme M^* und eine Untersumme m^* für $(f + F) \cdot (g + G)$ derart, dass

$$\begin{aligned} M^* - m^* &= \int_a^b (h_{o,f} + F)(h_{o,g} + G) dx - \int_a^b (h_{u,f} + F)(h_{u,g} + G) dx \\ &\quad (\text{bei Treppenfunktionen darf man neu kombinieren}) \\ &= \int_a^b (h_{o,f} + F)(h_{o,g} - h_{u,g}) dx + \int_a^b (h_{o,f} - h_{u,f})(h_{u,g} + G) dx \\ &\quad (\text{positive Glieder und Abschätzen bei Treppenfunktionen}) \\ &\leq \int_a^b 2F(h_{o,g} - h_{u,g}) dx + \int_a^b (h_{o,f} - h_{u,f}) 2G dx \\ &= 2F(M_g - m_g) + 2G(M_f - m_f) \\ &\leq 2F \frac{\varepsilon}{4F + 1} + 2G \frac{\varepsilon}{4G + 1} < \varepsilon. \end{aligned}$$

Proposition 13.12 liefert, dass $(f + F)(g + G)$ integrierbar ist. Jetzt brauchen wir noch ein Argument, damit $f \cdot g$ integrierbar ist. Weil

$$f \cdot g = (f + F)(g + G) - Fg - Gf - FG \quad (13.16)$$

und weil F und G Konstanten sind, können wir Theorem 13.9 verwenden. Weil die rechte Seite von (13.16) nur integrierbare Funktionen enthält, steht auch links eine integrierbare Funktion. ■

Proposition 13.19 Wenn $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ integrierbar ist auf $[a, b]$, dann ist auch $|f|$ integrierbar auf $[a, b]$. Außerdem gilt

$$\left| \int_a^b f(x) dx \right| \leq \int_a^b |f(x)| dx. \quad (13.17)$$

Beweis. Definieren wir für $x \in [a, b]$,

$$f^+(x) = \max(0, f(x)) \quad \text{und} \quad f^-(x) = -\min(0, f(x)).$$

Die Funktionen f^+ und f^- sind nicht-negativ und man hat $f = f^+ - f^-$ und $|f| = f^+ + f^-$.

Wenn h_o und h_u Treppenfunktionen oberhalb und unterhalb von f sind, dann sind $\max(0, h_o)$ und $\max(0, h_u)$ passende Treppenfunktionen für f^+ . Für die dazugehörigen Ober- und Untersummen zeigt man

$$M_{f^+} - m_{f^+} \leq M_f - m_f.$$

Wenn man $M_f - m_f$ beliebig klein bekommt, wird auch $M_{f^+} - m_{f^+}$ beliebig klein. Also ist f^+ Riemann-integrierbar.

Für f^- sind $-\min(0, h_u)$ und $-\min(0, h_o)$ passende Treppenfunktionen oberhalb und unterhalb (in dieser Reihenfolge!). Die Integrierbarkeit von $|f| = f^+ + f^-$ folgt dann aus Proposition 13.12.

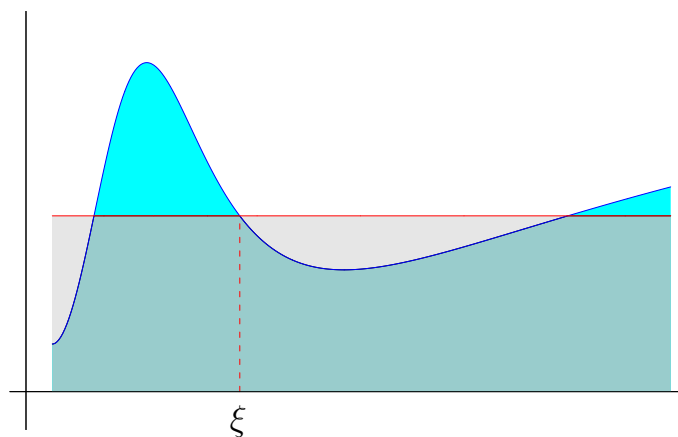
Weil $-|f(x)| \leq f(x) \leq |f(x)|$, folgt aus Theorem 13.9.3 und der Linearität des Integrals, dass

$$-\int_a^b |f(x)| dx = \int_a^b -|f(x)| dx \leq \int_a^b f(x) dx \leq \int_a^b |f(x)| dx$$

und so auch (13.17). ■

Theorem 13.20 (Mittelwertsatz für Integrale) Wenn $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ stetig ist auf $[a, b]$, dann gibt es $\xi \in [a, b]$ mit

$$\int_a^b f(x) dx = (b - a) f(\xi).$$



Die rote Linie gibt die mittlere Höhe.

Beweis. Weil $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ stetig ist, existiert wegen Theorem 10.15

$$m_1 = \min \{f(x); x \in [a, b]\} \quad \text{und} \quad m_2 = \max \{f(x); x \in [a, b]\}.$$

Es folgt, dass

$$m_1 (b - a) \leq \int_a^b f(x) dx \leq m_2 (b - a)$$

und dann auch, dass $(b - a)^{-1} \int_a^b f(x) dx \in (m_1, m_2)$.

Seien x_1 und x_2 derart, dass $m_1 = f(x_1)$ und $m_2 = f(x_2)$. Der Zwischenwertsatz (Korollar 10.14) für f ergibt, dass für jede Zahl $c \in (m_1, m_2)$ ein ξ zwischen x_1 und x_2 existiert mit $f(\xi) = c$. ■

Wenn $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ integrierbar ist auf $[a, b]$, dann ist f auch integrierbar auf $[a, x]$ für jedes $x \in [a, b]$. Also ist die Funktion $F : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ mit

$$F(x) = \int_a^x f(s) ds \quad (13.18)$$

wohldefiniert.

Theorem 13.21 Wenn $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ Riemann-integrierbar ist auf $[a, b]$, dann ist $F : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$, definiert in (13.18), stetig und sogar Lipschitz-stetig.

Beweis. Weil $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ Riemann-integrierbar ist, gibt es $M \in \mathbb{R}$ mit $|f(x)| \leq M$. Sei $x_0 \in [a, b]$. Dann gilt für $x \in (x_0, b]$, dass

$$|F(x) - F(x_0)| = \left| \int_a^x f(s) ds - \int_a^{x_0} f(s) ds \right| = \left| \int_{x_0}^x f(s) ds \right| \leq \int_{x_0}^x |f(s)| ds \leq M(x - x_0).$$

Eine ähnliche Abschätzung folgt für $x \in [a, x_0)$. Dann ist F Lipschitz-stetig mit Lipschitz-Konstante M . Lipschitz-stetig impliziert stetig. ■

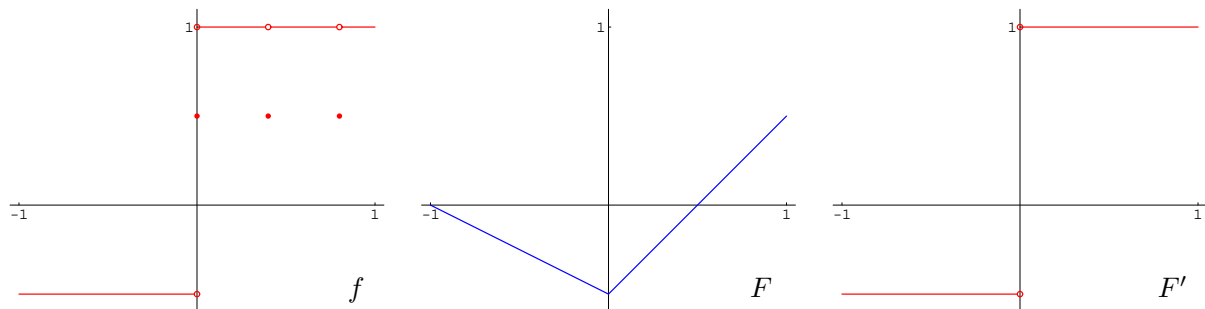
Beispiel 13.7. Nehmen wir $f : [-1, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ mit

$$f(x) = \begin{cases} -\frac{1}{2} & \text{für } x \in [-1, 0), \\ \frac{1}{2} & \text{für } x \in \{0, \frac{2}{5}, \frac{4}{5}\}, \\ 1 & \text{sonst} \end{cases}$$

dann findet man

$$F(x) := \int_{-1}^x f(s) ds = \begin{cases} -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}x & \text{für } x \in [-1, 0), \\ -\frac{1}{2} + x & \text{für } x \in [0, 1]. \end{cases}$$

Es gilt $F'(x) = f(x)$ für $x \in (-1, 1) \setminus \{0, \frac{2}{5}, \frac{4}{5}\}$ und $F'(x) \neq f(x)$ für $x \in \{0, \frac{2}{5}, \frac{4}{5}\}$. In 0 existiert F' nicht.



Analysis 1, Woche 14

Integralrechnung II



14.1 Der Hauptsatz der Integralrechnung

In der letzten Woche haben wir angeschaut, wie man das Integral definieren kann. Damit lässt sich zwar ein Flächeninhalt approximieren, aber einfache Rechenregeln fehlen noch. Durch Erfahrungen aus früheren Zeiten vermutet man, dass Integrieren etwas mit Rückwärts-Differenzieren zu tun hat. Das mag vielleicht sein, aber es sei hier betont, dass Integrieren mehr als nur das Finden einer Stammfunktion ist. Dieser Zusammenhang zwischen Integral und Stammfunktion wird beschrieben in dem Hauptsatz der Integralrechnung, den es in zwei Versionen gibt.

Theorem 14.1 (Hauptsatz der Integralrechnung I) Sei $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ integrierbar auf $[a, b]$, und definiere $F : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ durch

$$F(x) = \int_a^x f(s) ds. \quad (14.1)$$

Wenn f stetig ist in $c \in (a, b)$, dann ist F differenzierbar in c und $F'(c) = f(c)$.

Bemerkung 14.1.1 Man kann sogar folgendes beweisen:

- Wenn f rechtsstetig ist in $c \in [a, b)$, dann ist F rechtsdifferenzierbar in c und

$$F'_+(c) = f(c).$$

- Wenn f linksstetig ist in $c \in (a, b]$, dann ist F linksdifferenzierbar in c und

$$F'_-(c) = f(c).$$

Bemerkung 14.1.2 Wenn f stetig ist auf $[a, b]$, dann ist F differenzierbar in (a, b) , rechtsdifferenzierbar in a und linksdifferenzierbar in b , und $F'(x) = f(x)$ für $x \in (a, b)$, $F'_+(a) = f(a)$ und $F'_-(b) = f(b)$.

Beweis. Wir beweisen die erste Aussage in Bemerkung 14.1.1. Die zweite Aussage zeigt man fast genau so. Kombiniert man beide Ergebnisse, dann hat man einen Beweis von Theorem 14.1.

Für einen Beweis dieser ersten Aussage müssen wir zeigen, dass

$$\lim_{x \downarrow c} \frac{F(x) - F(c)}{x - c} - f(c) = \lim_{h \downarrow 0} \frac{F(c+h) - F(c)}{h} - f(c) = 0.$$

Bemerkt man, dass $f(c) = \frac{1}{h} \int_c^{c+h} f(s) ds$, dann folgt aus den Eigenschaften, die wir in Theorem 13.9 aufgelistet haben, dass

$$\begin{aligned} \frac{F(c+h) - F(c)}{h} - f(c) &= \frac{\int_a^{c+h} f(s) ds - \int_a^c f(s) ds}{h} - \frac{1}{h} \int_c^{c+h} f(c) ds \\ &= \frac{1}{h} \int_c^{c+h} (f(s) - f(c)) ds. \end{aligned} \quad (14.2)$$

Wenn f rechtsstetig ist in c , dann gibt es für jedes $\varepsilon > 0$ ein $\delta_{f,\varepsilon} > 0$ derart, dass für alle $x \in (c, c + \delta)$ gilt

$$|f(x) - f(c)| < \varepsilon.$$

Nehmen wir $h \in [0, \delta_{f,\varepsilon})$ dann haben wir, mit (14.2) und Proposition 13.19, dass

$$\left| \frac{F(c+h) - F(c)}{h} - f(c) \right| \leq \frac{1}{h} \int_c^{c+h} |f(s) - f(c)| ds \leq \frac{1}{h} \int_c^{c+h} \varepsilon ds = \varepsilon.$$

Also gibt es für jedes $\varepsilon > 0$ ein $\delta > 0$ (um eine starke Ungleichung zu bekommen zum Beispiel $\delta := \delta_{f,\varepsilon/2}$), so dass

$$0 < h < \delta \Rightarrow \left| \frac{F(c+h) - F(c)}{h} - f(c) \right| \leq \varepsilon/2 < \varepsilon.$$

Das liefert, dass F rechts-differenzierbar ist in c und $F'_+(c) = f(c)$ für $c \in [a, b)$. Linksdifferenzierbar für $c \in (a, b]$ geht ähnlich. ■

Definition 14.2 Sei (a, b) ein Intervall in \mathbb{R} . Nehme an $f, F : (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$ (oder \mathbb{C}) sind Funktionen und F ist differenzierbar in (a, b) . Wenn

$$F'(x) = f(x) \text{ für alle } x \in (a, b)$$

dann nennt man F eine Stammfunktion zu f .

Lemma 14.3 Wenn F und $G : (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$ (oder \mathbb{C}) beide eine Stammfunktion zu f sind, dann gibt es eine Konstante $k \in \mathbb{R}$ (oder \mathbb{C}) derart, dass

$$F(x) = G(x) + k \text{ für alle } x \in (a, b).$$

Beweis. Nehme $x_1, x_2 \in (a, b)$ mit $x_1 < x_2$. Dann sind F und G stetig auf $[x_1, x_2]$, und der Mittelwertsatz besagt, dass es $\xi \in (x_1, x_2)$ gibt mit

$$\frac{(F(x_2) - G(x_2)) - (F(x_1) - G(x_1))}{x_2 - x_1} = F'(\xi) - G'(\xi) = f(\xi) - f(\xi) = 0.$$

Setzen wir $k = F(x_0) - G(x_0)$ für irgendein $x_0 \in (a, b)$, so folgt $F(x) - G(x) = k$ für jedes $x \in (a, b)$. ■

Bemerkung 14.3.1 Es wird oft gesagt, dass $\ln|x|$ eine Stammfunktion zu $\frac{1}{x}$ ist. Diese Aussage ist nicht sehr genau. Wenn man die Funktion $x \mapsto \frac{1}{x} : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$ betrachtet, dann ist $x \mapsto \ln|x| : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$ eine Stammfunktion. Wenn man die Funktion $x \mapsto \frac{1}{x} : \mathbb{R}^- \rightarrow \mathbb{R}$ betrachtet, dann ist $x \mapsto \ln|x| : \mathbb{R}^- \rightarrow \mathbb{R}$ eine Stammfunktion. Die Formeln sind zwar gleich, aber weil Stammfunktionen auf einem zusammenhängenden Intervall definiert sind, sollte man nicht sagen: $x \mapsto \frac{1}{x} : \mathbb{R} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{R}$ hat $x \mapsto \ln|x| : \mathbb{R} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{R}$ als Stammfunktion.

Oben sahen wir, wie man zu f formell eine „Stammfunktion“ F findet. Das Komplement zu diesem Theorem ist, wie eine Stammfunktion bei Berechnen des Integrals hilfreich ist.

Theorem 14.4 (Hauptsatz der Integralrechnung II) Sei $F : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ stetig differenzierbar¹ auf $[a, b]$. Definiere $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ durch

$$f(x) = \begin{cases} F'_+(a) & \text{für } x = a, \\ F'(x) & \text{für } x \in (a, b), \\ F'_-(b) & \text{für } x = b. \end{cases} \quad (14.3)$$

Dann gilt

$$\int_y^x f(s)ds = F(x) - F(y) \text{ für alle } x, y \in [a, b].$$

Beweis. Fixiere $y \in [a, b]$. Weil F stetig differenzierbar ist auf $[a, b]$, ist f stetig auf $[a, b]$. Dann ist f auch integrierbar auf $[a, b]$ und $G : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ ist, siehe Bemerkung 13.10.1, durch

$$G(x) := \int_y^x f(s)ds = \int_a^x f(s)ds - \int_a^y f(s)ds$$

wohldefiniert unabhängig der Ordnung von x und y . Aus Theorem 14.1 folgt $G'(x) = f(x)$ und mit Lemma 14.3 findet man $F(x) = G(x) + k$ für alle $x \in [a, b]$. Nehmen wir $x = y$, so folgt $F(y) = G(y) + k = k$, und das heißt

$$F(x) = G(x) + F(y) = \int_y^x f(s)ds + F(y) \text{ für } x \in [a, b].$$

■

14.2 Partielle Integration

Proposition 14.5 Wenn $F, G : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ stetig differenzierbar sind mit $F'(x) = f(x)$ und $G'(x) = g(x)$ in (a, b) , dann gilt

$$\int_a^b f(x)G(x)dx = [F(x)G(x)]_{x=a}^{x=b} - \int_a^b F(x)g(x)dx.$$

Bemerkung 14.5.1 Hier wird die folgende kurze Notation benutzt:

$$[F(x)G(x)]_{x=a}^{x=b} = F(b)G(b) - F(a)G(a).$$

¹Die Funktion $F : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ heißt stetig differenzierbar auf dem abgeschlossenen Intervall $[a, b]$, wenn gilt: F ist stetig auf $[a, b]$, F ist differenzierbar in (a, b) , die rechte Ableitung $F'_+(a)$ und die linke Ableitung $F'_-(b)$ existieren, und $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ mit

$$f(x) = \begin{cases} F'_+(a) & \text{für } x = a, \\ F'(x) & \text{für } x \in (a, b), \\ F'_-(b) & \text{für } x = b, \end{cases}$$

ist stetig.

Beweis. Man kann ohne weiteres f und g erweitern wie in (14.3) und mit

$$(F \cdot G)'(x) = f(x)G(x) + F(x)g(x)$$

und Theorem 14.4 folgt

$$\int_a^b (f(x)G(x) + F(x)g(x)) dx = (F \cdot G)(b) - (F \cdot G)(a).$$

■

Beispiel 14.1. Berechne $\int_0^\pi x \sin(x) dx$.

Wir nennen $G(x) = x$ und $f(x) = \sin(x)$ und bekommen

$$\begin{aligned} \int_0^\pi x \sin(x) dx &= \left[x(-\cos(x)) \right]_{x=0}^{x=\pi} - \int_0^\pi 1(-\cos(x)) dx \\ &= -\pi \cos(\pi) + 0 \cos(0) + \int_0^\pi \cos(x) dx \\ &= \pi + [\sin(x)]_{x=0}^{x=\pi} = \pi. \end{aligned}$$

■

Beispiel 14.2. Berechne $\int_0^\pi e^x \sin(x) dx$.

Wir nennen $G(x) = e^x$ und $f(x) = \sin(x)$ und bekommen

$$\begin{aligned} \int_0^\pi e^x \sin(x) dx &= \left[e^x(-\cos(x)) \right]_{x=0}^{x=\pi} - \int_0^\pi e^x(-\cos(x)) dx \\ &= e^\pi + 1 + \int_0^\pi e^x \cos(x) dx. \end{aligned}$$

Nochmals, jetzt mit $G(x) = e^x$ und $f(x) = \cos(x)$,

$$\begin{aligned} \int_0^\pi e^x \cos(x) dx &= \left[e^x \sin(x) \right]_{x=0}^{x=\pi} - \int_0^\pi e^x \sin(x) dx \\ &= - \int_0^\pi e^x \sin(x) dx. \end{aligned}$$

Zusammen liefert es

$$\int_0^\pi e^x \sin(x) dx = e^\pi + 1 - \int_0^\pi e^x \sin(x) dx$$

und

$$\int_0^\pi e^x \sin(x) dx = \frac{e^\pi + 1}{2}.$$

■

14.3 Substitutionsregel

Proposition 14.6 Wenn $g : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ stetig differenzierbar ist und $f : g[a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ stetig ist, dann gilt

$$\int_a^b (f \circ g)(x) g'(x) dx = \int_{g(a)}^{g(b)} f(y) dy. \quad (14.4)$$

Man schreibt $g[a, b] = \{y \in \mathbb{R}; \exists x \in [a, b] \text{ mit } y = g(x)\}$.

Bemerkung 14.6.1 Grob gesagt: wenn $y = g(x)$ ersetzt wird, muss man auch dy ersetzen und zwar durch

$$dy = d(g(x)) = g'(x) dx.$$

Im Moment hat ein loses dy , $d(g(x))$ und dx ohne Integral keine Bedeutung. Als Trick funktioniert es.

Beweis. Sei $g_{\min} := \min \{g(x); x \in [a, b]\}$ und definiere $F : g[a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ durch

$$F(y) := \int_{g_a}^y f(s) ds = \int_{g_{\min}}^y f(s) ds - \int_{g_{\min}}^{g(a)} f(s) ds$$

und $H : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ durch

$$H(x) := (F \circ g)(x) = \int_{g(a)}^{g(x)} f(s) ds. \quad (14.5)$$

Wegen Theorem 14.1 ist F differenzierbar und $F' = f$, also ist wegen der Kettenregel auch H differenzierbar, und es gilt

$$H'(x) = F'(g(x)) g'(x) = (f \circ g)(x) g'(x).$$

Dann gilt mit Theorem 14.4, dass

$$H(x) = H(x) - H(a) = \int_a^x (f \circ g)(s) g'(s) ds. \quad (14.6)$$

Das Ergebnis folgt aus (14.5) und (14.6). ■

Bemerkung 14.6.2 Die Gleichung in (14.4) gilt auch, wenn $g(b) < g(a)$. Auch wird nicht verlangt, dass g injektiv ist. Möchte man das Intervall in der richtigen Orientierung haben, dann geht das bei monoton fallenden Funktionen g wie folgt: Es gilt $g'(x) \leq 0$ und $g[a, b] = [g(b), g(a)]$, und für das Integral schreibt man:

$$\begin{aligned} \int_{g(b)}^{g(a)} f(y) dy &= \int_b^a (f \circ g)(x) g'(x) dx \\ &= - \int_a^b (f \circ g)(x) g'(x) dx = \int_a^b (f \circ g)(x) |g'(x)| dx. \end{aligned}$$

Wenn g monoton wachsend ist, gilt $g'(x) \geq 0$ und $g[a, b] = [g(a), g(b)]$, und kann man ohne Weiteres $g'(x)$ ersetzen durch $|g'(x)|$ in (14.4).

Für monotone Funktionen g kann man (14.4) dann zusammenfassen in:

$$\int_{g([a, b])} f(y) dy = \int_{[a, b]} (f \circ g)(x) |g'(x)| dx. \quad (14.7)$$

Diese Notation mit dem Integrationsgebiet unter dem Integral ist üblich für Integrale in mehr Dimensionen. Diesen wird man im nächsten Semester begegnen. Da wird man nur einer Substitutionsregel für injektive Abbildungen g begegnen, die (14.7) generalisieren wird.

Beispiel 14.3. Berechne $\int_0^x se^{-s^2} ds$.

Man nimmt $g(x) = x^2$ und findet

$$\int_0^x se^{-s^2} ds = \frac{1}{2} \int_0^x e^{-s^2} 2s ds = \frac{1}{2} \int_0^{x^2} e^{-t} dt = \frac{1}{2} [-e^{-t}]_0^{x^2} = \frac{1 - e^{-x^2}}{2}.$$

Beispiel 14.4. Berechne $\int_{-1}^1 \sqrt{x^2 + x^4} dx$.

Man nimmt $g(x) = 1 + x^2$ und findet

$$\begin{aligned} \int_{-1}^1 \sqrt{x^2 + x^4} dx &= \int_{-1}^1 |x| \sqrt{1 + x^2} dx = 2 \int_0^1 x \sqrt{1 + x^2} dx \\ &= \int_1^2 \sqrt{y} dy = \left[\frac{2}{3} y^{3/2} \right]_1^2 = \frac{2}{3} 2^{3/2} - \frac{2}{3} = \frac{4}{3} \sqrt{2} - \frac{2}{3}. \end{aligned}$$

14.4 Kalkül bei Integralen

Bis vor 30 Jahren war das Berechnen von expliziten Formeln für Stammfunktionen ein wichtiger Bestandteil jedes Anfängerkurses in Mathematik. Heutzutage überlässt man diese Arbeit meistens Maple, Mathematica oder anderen Programmen in dieser Richtung. Diese Programme laufen übrigens nicht durch außerirdische Inspiration, wie einige zu vermuten scheinen, sondern werden entworfen mit mathematischer Transpiration. Aber wie schlau man auch programmieren mag, viele Funktionen haben keine Stammfunktion, die sich schreiben lässt als Zusammensetzung bekannter Funktionen. Ein erster Versuch, trotzdem explizit-aussehende Lösungen zu haben ist, weitere Funktionen zu definieren. Wir haben schon Sinus und Cosinus eingeführt und da könnte man noch mehrere definieren. Das Benennen von neuen Funktionen führt zu nichts, wenn man nicht gleichzeitig die Eigenschaften dieser Funktionen studiert. Dann sind wir wieder dort angekommen, wo wir schon waren: bei Analysis statt Calculus.

Wir werden in diesem Paragraphen einige Integrale vorstellen, bei welchen sich explizit eine Stammfunktion beschreiben lässt mit Hilfe bekannter Funktionen. Wenn wir auf irgendeine Art eine Stammfunktion mit Hilfe bekannter Funktionen finden können, können wir oft auch leichter Eigenschaften ableiten.

14.4.1 Integration von rationalen Funktionen

Wir erinnern uns noch mal daran, dass eine rationale Funktion r folgende Vorschrift hat:

$$r(x) = \frac{p(x)}{q(x)},$$

wobei p und q Polynome sind. In diesem Paragraphen möchten wir zeigen, wie man zu r eine Stammfunktion findet.

<pre>> int(x^2, x);</pre> $\frac{x^3}{3}$	<pre>In[1]:= Integrate[x^2, x]</pre> $\text{Out[1]}= \frac{x^3}{3}$
<pre>> int(sin(x), x);</pre> $-\cos(x)$	<pre>In[2]:= Integrate[Sin[x], x]</pre> $\text{Out[2]}= -\text{Cos}[x]$
<pre>> int(exp(-x^2), x);</pre> $\frac{1}{2} \sqrt{\pi} \operatorname{erf}(x)$	<pre>In[3]:= Integrate[Exp[-x^2], x]</pre> $\text{Out[3]}= \frac{1}{2} \sqrt{\pi} \operatorname{Erf}[x]$
<pre>> int(1/ln(x), x);</pre> $-\operatorname{Ei}(1, -\ln(x))$	<pre>In[4]:= Integrate[1 / Log[x], x]</pre> $\text{Out[4]}= \operatorname{LogIntegral}[x]$

Abbildung 14.1: Einige Stammfunktionen, die Maple (links) und Mathematica herausgeben. Ei hat nichts mit Huhn zu tun, sondern ist eine Abkürzung von ‘exponential integral’.

Bevor wir etwas integrieren, werden wir eine Erweiterung des Logarithmus definieren auf $\mathbb{C} \setminus (-\infty, 0]$. Dazu verwenden wir eine Argumentfunktion $\arg(z) : \mathbb{C} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{R}$

$$\arg(z) = \begin{cases} \operatorname{Arg}(z) & \text{für } \operatorname{Arg}(z) \in [0, \pi], \\ \operatorname{Arg}(z) - 2\pi & \text{für } \operatorname{Arg}(z) \in (\pi, 2\pi). \end{cases}$$

Das heißt, für $z = r(\cos(\varphi) + i \sin(\varphi))$ mit $\varphi \in (-\pi, \pi]$ und $r \in \mathbb{R}^+$ gilt $\arg(z) = \varphi$.

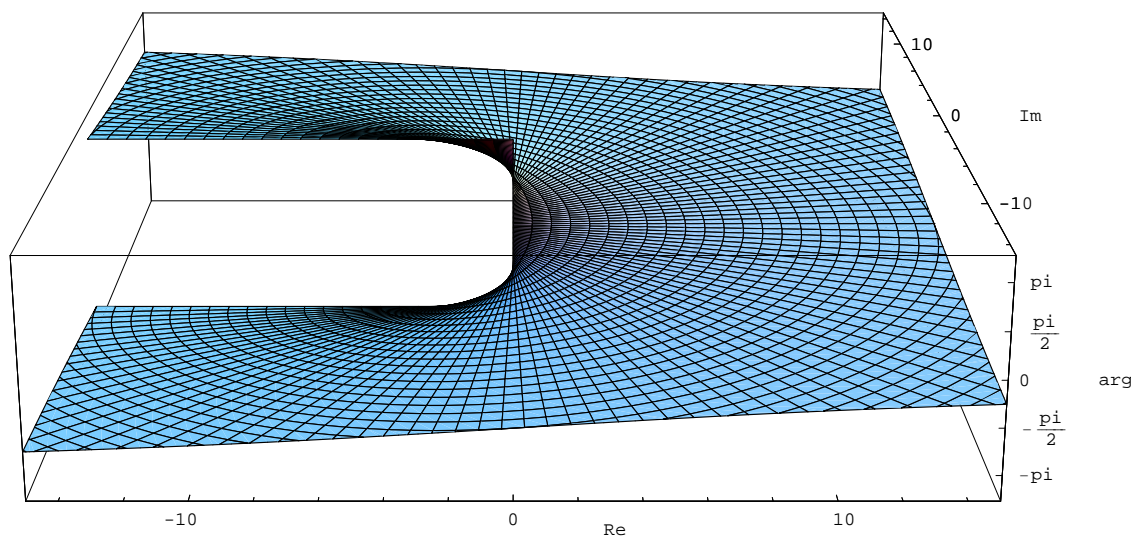


Abbildung 14.2: Eine Skizze zu der Funktion $\arg : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{R}$

Definition 14.7 Wir definieren $\operatorname{Log} : \mathbb{C} \setminus (-\infty, 0] \rightarrow \mathbb{C}$ durch

$$\operatorname{Log}(z) = \ln(|z|) + i \arg(z).$$

Dieser Log ist injektiv und weil $\operatorname{Log}(\mathbb{C} \setminus (-\infty, 0]) = \mathbb{R} + i(-\pi, \pi)$, gibt es eine Umkehrfunktion. Diese Funktion ist eine alte Bekannte. Weil

$$\exp(\operatorname{Log}(z)) = \exp(\ln(|z|)) \exp(i \arg(z)) = |z| (\cos(\arg(z)) + i \sin(\arg(z))) = z$$

gilt

$$\operatorname{Log}^{\operatorname{inv}}(z) = \exp|_{\mathbb{R} + i(-\pi, \pi)}(z).$$

So hat man

$$\operatorname{Log}'(z) = \frac{1}{\exp'(\operatorname{Log}(z))} = \frac{1}{\exp(\operatorname{Log}(z))} = \frac{1}{z}$$

und es gilt auch für die reelle Ableitung von $x \mapsto \operatorname{Log}(x+w) : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$, oder $x \mapsto \operatorname{Log}(x+w) : \mathbb{R} \setminus (-\infty, -w] \rightarrow \mathbb{C}$ falls $w \in \mathbb{R}$, dass

$$(\operatorname{Log}(x+w))' = \frac{1}{x+w}.$$

Lemma 14.8 Sei $w \in \mathbb{C} \setminus \mathbb{R}$ und $f(x) = (x+w)^{-1}$. Dann ist $F(x) = \operatorname{Log}(x+w)$ eine Stammfunktion.

Bemerkung 14.8.1 Eine genaue Formulierung dieses Lemmas müsste das Definitionsbereich der Funktion einschließen. Für $w \in \mathbb{C} \setminus \mathbb{R}$ ist sowohl f als auch F auf ganz \mathbb{R} definiert als Funktion von \mathbb{R} nach \mathbb{C} .

Bemerkung 14.8.2 Für $w \in \mathbb{R}$ kann man entweder die Funktion $f : (-w, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ oder die Funktion $f : (-\infty, -w) \rightarrow \mathbb{R}$ betrachten. Die Vorschriften der dazugehörigen Stammfunktionen sind $F(x) = \ln(x+w)$ und $F(x) = \ln|x+w|$.

Es ist nützlich, folgende Eigenschaft von diesem erweiterten Logarithmus festzuhalten.

Lemma 14.9 Für $z, w \in \mathbb{C} \setminus (-\infty, 0]$ mit $zw \notin \mathbb{R}^-$ gibt es $k \in \{-1, 0, 1\}$ derart, dass

$$\operatorname{Log}(zw) = \operatorname{Log}(z) + \operatorname{Log}(w) + 2k\pi i. \quad (14.8)$$

Beweis. Der Beweis ist geradeaus und verwendet, dass $\ln(|zw|) = \ln(|z|) + \ln(|w|)$ gilt, und, wenn $\arg(z) + \arg(w) \in (-\pi, \pi)$, dass

$$\arg(zw) = \arg(z) + \arg(w).$$

Wenn $\arg(z) + \arg(w) \in (-\pi, \pi)$, dann gilt sogar

$$\operatorname{Log}(zw) = \operatorname{Log}(z) + \operatorname{Log}(w). \quad (14.9)$$

Wenn $\arg(z) + \arg(w) \notin (-\pi, \pi)$, dann gilt $\arg(zw) = \arg(z) + \arg(w) \pm 2\pi$ und man bekommt (14.8). ■

Für $n \in \mathbb{N}$ mit $n \geq 2$ zeigt man, dass für $F : \mathbb{C} \setminus \{-w\} \rightarrow \mathbb{C}$ mit $F(z) = \frac{-1}{n-1} (z+w)^{-n+1}$ gilt $F'(z) = (z+w)^{-n}$. Solches gilt für die reelle Ableitung. Mit der Partialbruchzerlegung kann man jede rationale Funktion $p(x)/q(x)$ schreiben als eine Summe von einem Polynom und singulären Termen $c_i(x-w_i)^{-n_i}$. Wenn wir eine solche Zerlegung finden können, kennen wir also auch eine Stammfunktion.

Beispiel 14.5. Wir suchen eine Stammfunktion für $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $f(x) = \frac{1}{1+x^2}$. Wenn wir uns erinnern, dass $\arctan'(x) = \frac{1}{1+x^2}$, sind wir fertig. Wenn nicht, dann kann man wie folgt vorgehen:

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

Eine Stammfunktion findet man wie folgt:

$$\begin{aligned} F(x) &= \frac{1}{2}i \operatorname{Log}(x+i) - \frac{1}{2}i \operatorname{Log}(x-i) = \\ &= \frac{1}{2}i (\ln|x+i| + i \arg(x+i)) - \frac{1}{2}i (\ln|x-i| + i \arg(x-i)) = \\ &= -\frac{1}{2} \arg(x+i) + \frac{1}{2} \arg(x-i) = -\arg(x+i) = \\ &= -\left(\frac{\pi}{2} - \arctan(x)\right) = \arctan(x) - \frac{1}{2}\pi. \end{aligned}$$

Die letzten Gleichungen findet man, wenn man sich die Darstellung in \mathbb{C} anschaut. Selbstverständlich ist auch $F(x) = \arctan(x)$ eine Stammfunktion. ■

Man sieht in diesem Beispiel, dass der Umweg über komplexe Funktionen uns am Ende doch wieder zum Reellen zurückführt. Selbstverständlich soll das so sein, denn das Integral von einer reellen Funktion, wenn es existiert, ist definiert als eine reelle Zahl. Dass auch dieser Umweg da kein Problem ist, kann man verstehen, wenn man sich erinnert, dass komplexe Nullstellen mit nicht-trivialem Imaginärteil eines reellen Polynoms immer paarweise auftreten, in dem Sinne, dass die komplex Konjugierte einer Nullstelle auch eine Nullstelle ist. Das führt dazu, dass auch in der Partialbruchzerlegung einer rationalen Funktion mit reellen Koeffizienten die singulären Terme paarweise erscheinen:

$$\frac{p(x)}{q(x)} = \tilde{p}(x) + \frac{\alpha_1}{x-w_1} + \frac{\bar{\alpha}_1}{x-\bar{w}_1} + \dots$$

Rezeptur: Das Rezept für eine Stammfunktion einer rationalen Funktion $f(x) = \frac{p(x)}{q(x)}$, also p und q sind Polynome, ist dann wie folgt:

1. Partialbruchzerlegung (die immer existiert, jedoch nicht immer explizit zu berechnen ist);
2. Stammfunktionen von Polynomen und von $x \mapsto (x-w)^{-n}$ sind bekannt:

	$f(x)$	$F(x)$
$n \in \mathbb{N}$:	x^n	$\frac{1}{n+1}x^{n+1}$
	$(x-w)^{-1}$	$\operatorname{Log}(x-w)$
$n \in \mathbb{N}^+$:	$(x-w)^{-n-1}$	$\frac{-1}{n}(x-w)^{-n}$

3. Das Ergebnis wieder umrechnen nach einer reellen Stammfunktion.

14.4.2 Integration von trigonometrischen Polynomen

Ein trigonometrisches Polynom ist eine Verknüpfung von:

$$\begin{aligned} x &\mapsto (\cos(x), \sin(x)) \\ (s, t) &\mapsto \sum_{\substack{0 \leq k \leq m \\ 0 \leq n \leq m}} a_{n,k} s^k t^n \end{aligned}$$

mit $a_{n,k} \in \mathbb{C}$. Zum Beispiel

$$g(x) = 1 + \cos(x) + 3 \sin(x)^2 \cos(x)^2 \tag{14.10}$$

ist ein trigonometrisches Polynom.

Auch hier hilft der Weg über komplexe Funktionen. Erinnern wir uns, dass

$$\sin(x) = \frac{e^{ix} - e^{-ix}}{2i} \quad \text{und} \quad \cos(x) = \frac{e^{ix} + e^{-ix}}{2},$$

dann folgt sofort eine Stammfunktion für ein trigonometrisches Polynom, wenn wir eine Stammfunktion für eine bestimmte rationale Funktion finden können.

Für das Beispiel in (14.10) findet man eine Stammfunktion via

$$\begin{aligned} g(x) &= 1 + \frac{e^{ix} + e^{-ix}}{2} + 3 \left(\frac{e^{ix} - e^{-ix}}{2i} \right)^2 \left(\frac{e^{ix} + e^{-ix}}{2} \right)^2 \\ &= \frac{11}{8} + \frac{1}{2}e^{ix} + \frac{1}{2}e^{-ix} - \frac{3}{16}e^{4ix} - \frac{3}{16}e^{-4ix}, \end{aligned}$$

nämlich

$$\begin{aligned} G(x) &= \frac{11}{8}x - \frac{1}{2}ie^{ix} + \frac{1}{2}ie^{-ix} + \frac{3}{64}ie^{4ix} - \frac{3}{64}ie^{-4ix} \\ &= \frac{11}{8}x + \sin(x) - \frac{3}{32}\sin(4x). \end{aligned}$$

Man kann es auch ohne komplexe Schreibweise mit dem Exponent lösen, aber man muss sich dann gut auskennen bei den Eigenschaften von Sinus und Cosinus.

14.4.3 Integration von rationalen Funktionen mit Exponent

So eine Funktion mit Exponent, die wir meinen, ist eine Zusammenstellung von

$$\begin{aligned} x &\mapsto e^{ax} \\ y &\mapsto \frac{p(y)}{q(y)}. \end{aligned}$$

Hier sind p und q zwei Polynome. Also betrachten wir Funktionen vom Typ $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ mit

$$f(x) = \frac{p(e^{ax})}{q(e^{ax})}.$$

Wenn man bemerkt, dass die Substitutionsregel ergibt, dass

$$\int_0^x \frac{p(e^{at})}{q(e^{at})} dt = \frac{1}{a} \int_1^{e^{ax}} \frac{p(s)}{q(s)} \frac{1}{s} ds,$$

ist man zurück bei einer Stammfunktion für eine rationale Funktion.

Auch für eine Funktion mit der Vorschrift

$$g(x) = \frac{1}{\cos(x)}$$

kann man so eine explizite Stammfunktion finden auf $(-\frac{1}{2}\pi, \frac{1}{2}\pi)$:

$$\begin{aligned}
 \int_0^x \frac{1}{\cos(s)} ds &= \int_0^x \frac{2}{e^{is} + e^{-is}} ds = \int_0^x \frac{2e^{is}}{(e^{is})^2 + 1} ds = \frac{1}{i} \int_1^{e^{ix}} \frac{2}{t^2 + 1} dt \\
 &= \int_1^{e^{ix}} \left(\frac{1}{t+i} - \frac{1}{t-i} \right) dt = \left[\operatorname{Log}(t+i) - \operatorname{Log}(t-i) \right]_1^{e^{ix}} \\
 &= \operatorname{Log}(e^{ix} + i) - \operatorname{Log}(e^{ix} - i) - \operatorname{Log}(1+i) + \operatorname{Log}(1-i) \\
 &= \ln \left| \frac{e^{ix} + i}{e^{ix} - i} \frac{1-i}{1+i} \right| + 0i = \ln \left| \frac{e^{ix} + i}{e^{ix} - i} \right| \\
 &= \ln \left| \frac{\cos(x) + i(\sin(x) + 1)}{\cos(x) + i(\sin(x) - 1)} \right| \\
 &= \ln \left(\frac{\sqrt{\cos(x)^2 + (\sin(x) + 1)^2}}{\sqrt{\cos(x)^2 + (\sin(x) - 1)^2}} \right) \\
 &= \frac{1}{2} \ln \left(\frac{2 + 2\sin(x)}{2 - 2\sin(x)} \right) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 + \sin(x)}{1 - \sin(x)} \right).
 \end{aligned}$$

In der dritten Zeile haben wir (14.8) verwendet. Weil wir wissen, dass das Ergebnis reell sein muss, brauchen wir uns nicht zu kümmern um den Imaginärteil (ist sowieso Null). Auch gibt es noch eine komplexe Zahl als Grenze im Integral und das haben wir nicht definiert. Egal, beim Kalkül und in der Liebe ist alles erlaubt, wenn am Ende bloß alles richtig ist:

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

Im Prinzip kann man so auch eine Stammfunktion finden für

$$h(x) = \frac{1}{\cos(x)^2}.$$

Es wäre einfacher, wenn man sich an die Ableitung von $x \mapsto \tan(x)$ erinnern würde.

Beispiel 14.6. Man suche eine Stammfunktion für

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

Formal hat man zum Beispiel als Stammfunktion auf $(0, \frac{1}{2}\pi)$ die folgende Funktion:

$$F(x) = \int_{\frac{1}{4}\pi}^x \frac{1}{\cos(s) \sin(s)^2} ds.$$

Wir versuchen diese Funktion zu vereinfachen:

$$\begin{aligned} \int_{\frac{1}{4}\pi}^x \frac{1}{\cos(s) \sin(s)^2} ds &= \int_{\frac{1}{4}\pi}^x \frac{\cos(s)^2 + \sin(s)^2}{\cos(s) \sin(s)^2} ds \\ &= \int_{\frac{1}{4}\pi}^x \left(\frac{\cos(s)^2}{\cos(s) \sin(s)^2} + \frac{\sin(s)^2}{\cos(s) \sin(s)^2} \right) ds \\ &= \int_{\frac{1}{4}\pi}^x \frac{\cos(s)}{\sin(s)^2} ds + \int_{\frac{1}{4}\pi}^x \frac{1}{\cos(s)} ds \\ &= \frac{-1}{\sin(x)} + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 + \sin(x)}{1 - \sin(x)} \right) + c. \end{aligned}$$

Was genau dieses c ist, ist nicht weiter wichtig. Wir suchen bloß eine Stammfunktion. Wenn man eine Konstante addiert, hat man wieder eine Stammfunktion. ■

14.4.4 Integration bei quadratischen Wurzeln aus Polynomen von Grad 2

Wir möchten erinnern an einige Umkehrfunktionen, denen wir schon begegnet sind.

- Der eingeschränkte Sinus $x \mapsto \sin_{[-\pi/2, \pi/2]}(x)$ hat als Umkehrfunktion den Arcussinus $\arcsin : [-1, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ und

$$\arcsin(x)' = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}.$$

- Der Sinus hyperbolicus $x \mapsto \sinh(x)$ hat als Umkehrfunktion den Areasinus hyperbolicus $\sinh^{inv} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $\sinh^{inv}(x) = \ln(x + \sqrt{x^2 + 1})$ und

$$\sinh^{inv}(x)' = \ln(x + \sqrt{x^2 + 1})' = \frac{1}{x + \sqrt{x^2 + 1}} \left(1 + \frac{x}{\sqrt{x^2 + 1}} \right) = \frac{1}{\sqrt{x^2 + 1}}.$$

- Der eingeschränkte Cosinus hyperbolicus $x \mapsto \cosh_{[0, \infty)}(x)$ hat als Umkehrfunktion $\cosh_{[0, \infty)}^{inv} : [1, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ mit $\cosh_{[0, \infty)}^{inv}(x) = \ln(x + \sqrt{x^2 - 1})$ und

$$\cosh_{[0, \infty)}^{inv}(x)' = \ln(x + \sqrt{x^2 - 1})' = \frac{1}{x + \sqrt{x^2 - 1}} \left(1 + \frac{x}{\sqrt{x^2 - 1}} \right) = \frac{1}{\sqrt{x^2 - 1}}.$$

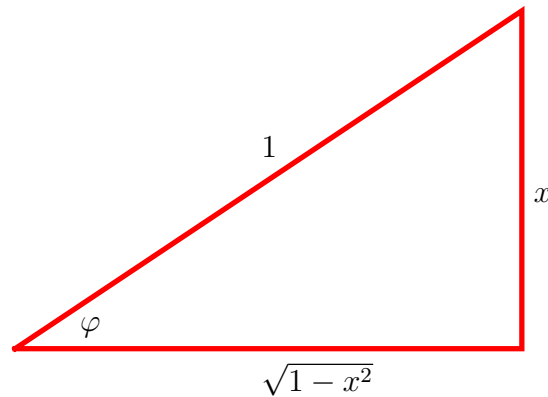
Wir finden so nicht nur Stammfunktionen für $\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$, $\frac{1}{\sqrt{1+x^2}}$ und $\frac{1}{\sqrt{x^2-1}}$, sondern wir finden vernünftige Substitutionen für eine ganze Reihe von Beispielen. Oft hilft es dabei sich die Termen in ein rechteckiges Dreieck anzugeben. Für

$$\int_0^t \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} dx$$

funktioniert es wie folgt:

Mit Hilfe des Dreiecks findet man

$$x = \sin(\varphi), \quad \sqrt{1-x^2} = \cos(\varphi) \quad \text{und} \quad \tan(\varphi) = \frac{x}{\sqrt{1-x^2}}.$$



Dies liefert uns „ $dx = \cos(\varphi) d\varphi$ “ und

$$\int_0^t \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} dx = \int_{\arcsin(0)}^{\arcsin(t)} \frac{1}{\cos(\varphi)} \cos(\varphi) d\varphi = \int_0^{\arcsin(t)} 1 d\varphi = \arcsin(t).$$

Beispiel 14.7. Man suche eine Stammfunktion für

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

Weil

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

scheint $y = \frac{2x+1}{\sqrt{3}}$ eine vernünftige Substitution zu sein. Ein Versuch kann nicht schaden:

$$\begin{aligned} \int_0^x \frac{s}{\sqrt{1+s+s^2}} ds &= \frac{\sqrt{3}}{2} \int_0^x \frac{\frac{2s+1}{\sqrt{3}} - \frac{1}{\sqrt{3}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{2s+1}{\sqrt{3}}\right)^2}} \frac{2}{\sqrt{3}} ds \\ &= \int_{\frac{1}{\sqrt{3}}}^{\frac{2x+1}{\sqrt{3}}} \left(\frac{1}{2} \sqrt{3} \frac{y}{\sqrt{1+y^2}} - \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{1+y^2}} \right) dy \\ &= \left[\frac{1}{2} \sqrt{3} \sqrt{1+y^2} - \frac{1}{2} \ln(y + \sqrt{y^2+1}) \right]_{\frac{1}{\sqrt{3}}}^{\frac{2x+1}{\sqrt{3}}} \\ &= \frac{1}{2} \sqrt{3} \sqrt{1 + \left(\frac{2x+1}{\sqrt{3}}\right)^2} - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{2x+1}{\sqrt{3}} + \sqrt{1 + \left(\frac{2x+1}{\sqrt{3}}\right)^2} \right) + c \\ &= \sqrt{1+x+x^2} - \frac{1}{2} \ln \left(x + \frac{1}{2} + \sqrt{1+x+x^2} \right) + \tilde{c}. \end{aligned}$$

Fast immer gibt es kürzere Wege zum Ziel. Bevor man den kürzesten Weg kennt, soll man aber mindestens einen Weg kennen. ■

Beispiel 14.8. Man suche eine Stammfunktion für

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

auf dem Intervall $(-1, 1)$. Ob man geradeaus zurückgreifen kann auf eine dieser oben genannten Funktionen ist nicht klar, aber man könnte an den Arcussinus denken. Das heißt $y = \arcsin(x)$ oder $x = \sin(y)$ setzen. Wir substituieren $\arcsin(s) = t$, also $s = \sin(t)$, in

$$\begin{aligned} \int_0^x (1-s^2)^{-\frac{3}{2}} ds &= \int_0^x \frac{1}{1-s^2} \frac{1}{\sqrt{1-s^2}} ds = \int_0^{\arcsin(x)} \frac{1}{1-\sin(t)^2} dt \\ &= \int_0^{\arcsin(x)} \frac{1}{\cos(t)^2} dt = \left[\tan(t) \right]_0^{\arcsin(x)} = \tan(\arcsin(x)) \\ &= \frac{\sin(\arcsin(x))}{\cos(\arcsin(x))} = \frac{x}{\sqrt{1-x^2}}. \end{aligned}$$

Auch hier gibt es Abkürzungen. Die Abkürzung durch den Hof des Nachbarn ist in einer Klausur nicht gestattet. ■

Beispiel 14.9. Man suche eine Stammfunktion für

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

auf dem Intervall $(4, \infty)$. Weil

$$\sqrt{x^2 - 4x} = \sqrt{(x-2)^2 - 4} = 2\sqrt{\left(\frac{x-2}{2}\right)^2 - 1}$$

könnte $\frac{x-2}{2} = \cosh(t)$ eine vernünftige Substitution sein. Denn durch

$$\sqrt{\left(\frac{x-2}{2}\right)^2 - 1} = \sqrt{\cosh(t)^2 - 1} = \sinh(t) \text{ für } t > 0$$

würde die Wurzel verschwinden. In diesem Beispiel werden wir auch mal eine übliche Schreibweise vorführen. Weil man bei einer Stammfunktion immer eine Konstante addieren kann, schreibt man das Integral ohne Integrationsgrenzen:

$$\begin{aligned} \int \frac{\sqrt{x^2 - 4x}}{x} dx &= 2 \int \frac{\sqrt{\left(\frac{x-2}{2}\right)^2 - 1}}{\frac{x-2}{2} + 1} d\left(\frac{x-2}{2}\right) \\ &= 2 \int \frac{\sinh(t)}{\cosh(t) + 1} d \cosh(t) = 2 \int \frac{\sinh(t)^2}{\cosh(t) + 1} dt \\ &= 2 \int \frac{\cosh(t)^2 - 1}{\cosh(t) + 1} dt = 2 \int (\cosh(t) - 1) dt. \end{aligned}$$

Das Gleichheitszeichen bedeutet hier: wenn wir $\frac{x-2}{2} = \cosh(t)$ annehmen, stimmen die Klassen der Stammfunktionen überein (also modulo Konstanten). Das letzte Integral

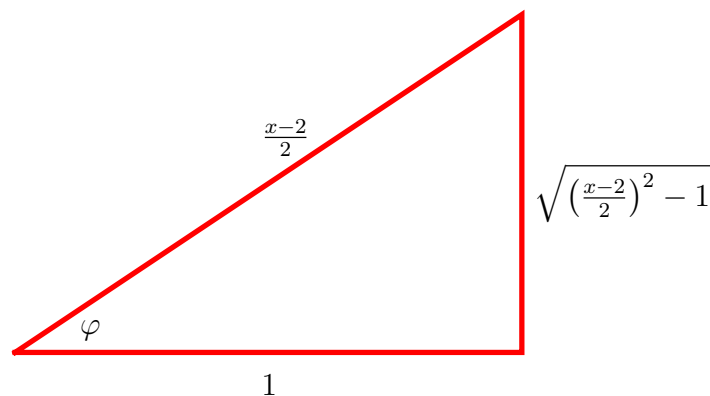
können wir explizit lösen:

$$\begin{aligned}
 2 \int_0^t (\cosh(\tau) - 1) d\tau &= 2 \sinh(t) - 2t = 2\sqrt{\cosh(t)^2 - 1} - 2t \\
 &= 2\sqrt{\left(\frac{x-2}{2}\right)^2 - 1} - 2\operatorname{arccosh}\left(\frac{x-2}{2}\right) \\
 &= 2\sqrt{\left(\frac{x-2}{2}\right)^2 - 1} - 2\ln\left(\frac{x-2}{2} + \sqrt{\left(\frac{x-2}{2}\right)^2 - 1}\right) \\
 &= \sqrt{x^2 - 4x} - 2\ln\left(x - 2 + \sqrt{x^2 - 4x}\right) + \ln(4).
 \end{aligned}$$

Eine Stammfunktion ist also

$$F(x) = \sqrt{x^2 - 4x} - 2\ln\left(x - 2 + \sqrt{x^2 - 4x}\right).$$

Als Alternative könnte man es auch mit einer Substitution trigonometrischer Funktionen versuchen, die man mit Hilfe des Dreiecks finden würde. In diesem Fall würde das heißen:



$$\begin{aligned}
 \sin(\varphi) &= \frac{\sqrt{\left(\frac{x-2}{2}\right)^2 - 1}}{\frac{x-2}{2}}, & \cos(\varphi) &= \frac{1}{\frac{x-2}{2}}, \\
 \tan(\varphi) &= \sqrt{\left(\frac{x-2}{2}\right)^2 - 1}.
 \end{aligned}$$

Man findet so

$$\begin{aligned}
 \int \frac{\sqrt{x^2 - 4x}}{x} dx &= 2 \int \frac{\sqrt{\left(\frac{x-2}{2}\right)^2 - 1}}{\frac{x-2}{2} + 1} d\left(\frac{x-2}{2}\right) = 2 \int \frac{\tan(\varphi)}{\frac{1}{\cos(\varphi)} + 1} d\left(\frac{1}{\cos(\varphi)}\right) = \\
 &= 2 \int \frac{\sin(\varphi)}{1 + \cos(\varphi)} \frac{\sin(\varphi)}{\cos(\varphi)^2} d\varphi = 2 \int \frac{1 - \cos(\varphi)}{\cos(\varphi)^2} d\varphi = 2 \int \left(\frac{1}{(\cos \varphi)^2} - \frac{1}{\cos(\varphi)}\right) d\varphi = \dots
 \end{aligned}$$

Stammfunktionen zu diesen beiden Termen hatten wir schon mal. ■

Analysis 1, Woche 15

Integralrechnung III

A1

15.1 Uneigentliche Integrale

Flächeninhalt und Umfang (die Länge des Umrisses) verhalten sich nicht gleich. Verdoppelt man die Längen, verdoppelt sich auch der Umfang; der Inhalt aber vervierfacht sich. Das gibt Anlass zu der Vermutung, dass Umfang U_G und Flächeninhalt A_G für (zweidimensionale) Gebiete sich verhalten als

$$U_G^2 \sim A_G.$$

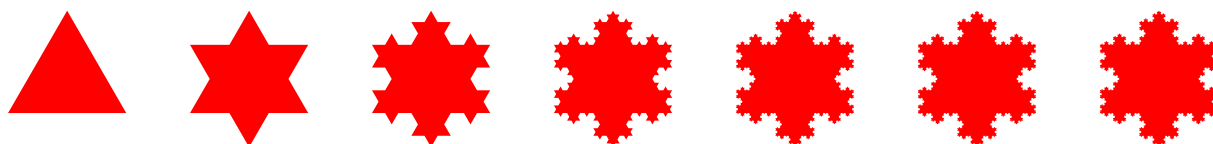
Wenn man dieses Verhältnis etwas länger betrachtet, dann sieht man, dass es so nicht stimmen kann. Zwar gilt

$$U_G^2 \geq 4\pi A_G$$

für jedes zweidimensionale Gebiet mit Gleichheit im Fall einer Kreisscheibe, aber es gibt keine Konstante, so dass eine umgekehrte Ungleichung stimmen würde. Ein einfaches Beispiel bekommt man bei Rechtecken. Setze $G_n = [0, n] \times [0, \frac{1}{n}]$ und man hat

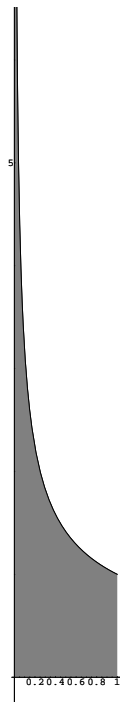
$$\begin{aligned} U_{G_n}^2 &= 2n + 2\frac{1}{n} \rightarrow \infty \text{ für } n \rightarrow \infty, \\ A_{G_n} &= n\frac{1}{n} = 1 \text{ für alle } n \in \mathbb{N}^+. \end{aligned}$$

Das Gebiet muss übrigens nicht mal den Anschein haben groß zu werden. Auch ein beschränktes Gebiet kann einen unendlich großen Rand haben. Ein bekanntes Beispiel ist „Koch’s snowflake“, die Limesfigur, die man bekommt, wenn man folgende Konstruktion ∞ fortsetzt:



Ähnliches gibt es bei Integralen. Die Definition des Riemann-Integrals erlaubt uns nur beschränkte Funktionen und beschränkte Intervalle. Es gibt aber beschränkte Flächeninhalte, ohne dass der Umfang beschränkt ist. Wir geben zwei Beispiele:

$$\begin{aligned} G_1 &= \{(x, y) \in \mathbb{R}^2; 0 \leq x \leq 1 \text{ und } 0 \leq y^2x \leq 1\}, \\ G_2 &= \{(x, y) \in \mathbb{R}^2; 1 \leq x \text{ und } 0 \leq x^2y \leq 1\}. \end{aligned}$$



Die Flächeninhalte dieser beiden Gebiete möchte man doch als Integral darstellen, das heißt, man möchte Riemann-Integrale so erweitern, dass auch

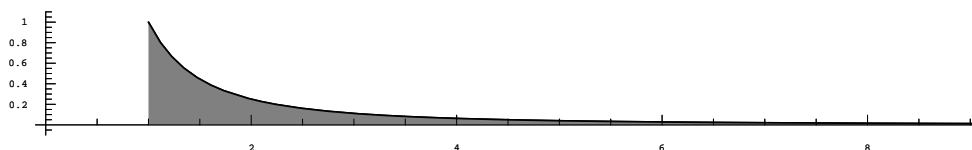
$$\int_0^1 \frac{1}{\sqrt{x}} dx \quad \text{und} \quad \int_1^\infty \frac{1}{x^2} dx$$

eine Bedeutung bekommen. Dies wird gemacht durch Limes und Integral zu kombinieren. Man setzt

$$\int_0^1 \frac{1}{\sqrt{x}} dx := \lim_{\delta \downarrow 0} \int_\delta^1 \frac{1}{\sqrt{x}} dx$$

und

$$\int_1^\infty \frac{1}{x^2} dx := \lim_{M \rightarrow \infty} \int_1^M \frac{1}{x^2} dx.$$



15.1.1 Das uneigentliche Riemann-Integral der ersten Sorte

Definition 15.1 Sei $a, b \in \mathbb{R}$ mit $a < b$ und $f : (a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion, die für jedes $\delta > 0$ Riemann-integrierbar ist auf $[a + \delta, b]$. Wenn

$$\ell := \lim_{\delta \downarrow 0} \int_{a+\delta}^b f(x) dx \text{ existiert,}$$

nennt man f *uneigentlich Riemann-integrierbar auf $[a, b]$* und man schreibt

$$\int_a^b f(x) dx = \ell.$$

Bemerkung 15.1.1 Wenn f unbeschränkt bei b wird, kann man bedenken, dass man f *uneigentlich Riemann-integrierbar auf $[a, b]$* nennt, wenn

$$\ell := \lim_{\delta \downarrow 0} \int_a^{b-\delta} f(x) dx \text{ existiert.}$$

Bemerkung 15.1.2 Wenn f an mehreren Stellen unendlich wird und man möchte *uneigentliche Riemann-Integrierbarkeit untersuchen*, soll jede Stelle abgedeutet betrachtet werden. Siehe auch die folgenden Beispiele:

Beispiel 15.1. Betrachte $f_\alpha : (0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ für $\alpha > 0$ mit

$$f_\alpha(x) = x^{-\alpha}.$$

Die Funktion f_α ist *uneigentlich Riemann-integrierbar auf $[0, 1]$* , dann und nur dann wenn $0 < \alpha < 1$. Denn für $\delta > 0$ gilt

$$\int_\delta^1 x^{-\alpha} dx = \begin{cases} \left[\frac{1}{1-\alpha} x^{1-\alpha} \right]_\delta^1 = \frac{1}{1-\alpha} (1 - \delta^{1-\alpha}) & \text{falls } \alpha \neq 1, \\ \left[\ln(x) \right]_\delta^1 = -\ln(\delta) & \text{falls } \alpha = 1, \end{cases}$$

und der Grenzwert existiert nur wenn $1 - \alpha > 0$.

Beispiel 15.2. Betrachte $f : \mathbb{R} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $f(x) = x^{-2}$.

Wenn $0 < a < b$ oder $a < b < 0$ ist f Riemann-integrierbar auf $[a, b]$ und

$$\int_a^b x^{-2} dx = \frac{1}{a} - \frac{1}{b}.$$

Wenn $a < 0 < b$ gilt, dann ist f nicht Riemann-integrierbar auf $[a, b]$, auch nicht im uneigentlichen Sinne, denn wenn f so sein würde, müsste sowohl

$$\lim_{\delta \downarrow 0} \int_a^{-\delta} x^{-2} dx \quad \text{als auch} \quad \lim_{\delta \downarrow 0} \int_{\delta}^b x^{-2} dx \quad \text{existieren.}$$

Man sieht sofort, dass

$$\lim_{\delta \downarrow 0} \int_a^{-\delta} x^{-2} dx = \lim_{\delta \downarrow 0} \left[\frac{-1}{x} \right]_a^{-\delta} = \lim_{\delta \downarrow 0} \frac{1}{\delta} + \frac{1}{a} = \infty.$$

Beispiel 15.3. Betrachte $f : \mathbb{R} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $f(x) = \frac{1}{x}$. Diese Funktion ist nicht uneigentlich Riemann-integrierbar auf $[-1, 1]$. Wenn sie Riemann-integrierbar auf $[-1, 1]$ wäre, sollte

$$\lim_{\delta \downarrow 0} \int_{-1}^{-\delta} \frac{1}{x} dx \quad \text{und} \quad \lim_{\delta \downarrow 0} \int_{\delta}^1 \frac{1}{x} dx \quad \text{existieren.}$$

Weil

$$\lim_{\delta \downarrow 0} \int_{\delta}^1 \frac{1}{x} dx = -\lim_{\delta \downarrow 0} \ln(\delta) = \infty$$

existiert das Integral auch nicht im uneigentlichen Sinne.

Sicher werden einige bemerkt haben, dass es so aussieht, als ob im letzten Beispiel links und rechts gleich große Flächeninhalte stehen würden und wegen des unterschiedlichen Vorzeichens man die doch eigentlich gegenseitig kürzen könnte. Dabei würde man $\infty - \infty$ gleich 0 setzen und das ist leider nicht sehr vernünftig. Was wäre denn $(1 + \infty) - \infty$ und $1 + (\infty - \infty)$? Weil es manchmal doch nützt, beide ‘Seiten’ zu vergleichen, wird folgendes definiert für eine Funktion, die bei zum Beispiel 0 Asymptoten nach $\pm\infty$ hat:

$$P.V. \int_{-1}^1 f(x) dx := \lim_{\delta \downarrow 0} \left(\int_{-1}^{-\delta} f(x) dx + \int_{\delta}^1 f(x) dx \right).$$

P.V. heißt „Cauchy’s Principal Value“ oder „Valeur Principal“ (*V.P.*). Dieser Hauptwert unterscheidet sich von dem uneigentlichen Integral. Man hat zum Beispiel:

- $\int_{-1}^1 \frac{1}{x} dx$ ist nicht uneigentlich Riemann-integrierbar,
- aber für den Cauchy Hauptwert:

$$\begin{aligned} P.V. \int_{-1}^1 \frac{1}{x} dx &= \lim_{\delta \downarrow 0} \left(\int_{-1}^{-\delta} \frac{1}{x} dx + \int_{\delta}^1 \frac{1}{x} dx \right) \\ &= \lim_{\delta \downarrow 0} \left(\left[\ln|x| \right]_{-1}^{-\delta} + \left[\ln(x) \right]_{\delta}^1 \right) = 0. \end{aligned}$$

Für $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ differenzierbar kann man zeigen, dass $\tilde{g} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit

$$\tilde{g}(x) = \begin{cases} \frac{g(x)-g(0)}{x} & \text{falls } x \neq 0, \\ g'(0) & \text{falls } x = 0, \end{cases}$$

stetig ist auf $[-1, 1]$ und so auch Riemann-integrierbar auf $[-1, 1]$. Sogar gilt:

$$P.V. \int_{-1}^1 \frac{g(x)}{x} dx = \int_{-1}^1 \frac{g(x) - g(0)}{x} dx.$$

Abschätzungen beim ersten uneigentlichen Integral

Beispiel 15.4. Ist $\cot : [0, \pi] \rightarrow \mathbb{R}$ uneigentlich Riemann-integrierbar? Sowohl in 0 als auch in π wird die Funktion unbeschränkt. Das heißt, um die Frage zu bejahen, soll sowohl

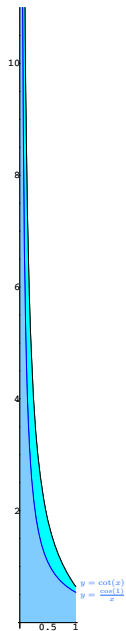
$$\ell_1 := \lim_{\delta \downarrow 0} \int_{\delta}^1 \cot(x) dx \quad \text{als auch} \quad \ell_2 := \lim_{\delta \downarrow 0} \int_1^{\pi-\delta} \cot(x) dx$$

existieren. Übrigens darf die Zahl 1 willkürlich gewählt werden innerhalb $(0, \pi)$. Weil für $x \in (0, 1]$ gilt

$$\cot(x) = \frac{\cos(x)}{\sin(x)} \geq \frac{\cos(1)}{\sin(x)} \geq \frac{\cos(1)}{x}$$

($\cos(1) > 0$) hat man

$$\int_{\delta}^1 \cot(x) dx \geq \int_{\delta}^1 \frac{\cos(1)}{x} dx = -\cos(1) \ln(\delta) \rightarrow \infty \text{ wenn } \delta \downarrow 0.$$



Also ist der Cotangens nicht (un)eigentlich Riemann-integrierbar auf $[0, \pi]$. Was bei π passiert, muss man nicht mal mehr betrachten. ■

Das letzte Beispiel führt zum nächsten Lemma:

Lemma 15.2 Sei $a, b \in \mathbb{R}$ mit $a < b$ und $f, g : (a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ Funktionen, die für jedes $\delta > 0$ Riemann-integrierbar sind auf $[a + \delta, b]$. Nehme an, dass

$$0 \leq f(x) \leq g(x) \text{ für } x \in (a, b].$$

Wenn g uneigentlich Riemann-integrierbar ist auf $[a, b]$, dann ist auch f uneigentlich Riemann-integrierbar auf $[a, b]$.

Beweis. Wenn $g \geq 0$ uneigentlich Riemann-integrierbar ist auf $[a, b]$, gilt

$$\int_{a+\delta}^b g(x) dx \leq \ell_g := \int_a^b g(x) dx < \infty.$$

Weil $f \geq 0$ auf $(a, b]$ hat man, dass $\int_{a+\delta}^b f(x)dx$ monoton zunimmt für $\delta \downarrow 0$. Auch ist $\int_{a+\delta}^b f(x)dx$ gleichmäßig beschränkt, denn es gilt

$$\int_{a+\delta}^b f(x)dx \leq \ell_g.$$

Die Monotonie und die Beschränktheit liefern, dass

$$\ell_f := \lim_{\delta \downarrow 0} \int_{a+\delta}^b f(x)dx$$

existiert. ■

15.1.2 Das uneigentliche Riemann-Integral der zweiten Sorte

Definition 15.3 Sei $a \in \mathbb{R}$ und $f : [a, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion, die für jedes $T > a$ Riemann-integrierbar ist auf $[a, T]$. Wenn

$$\ell := \lim_{T \rightarrow \infty} \int_a^T f(x)dx \text{ existiert,}$$

nennt man f uneigentlich Riemann-integrierbar auf $[a, \infty)$ und man schreibt

$$\int_a^\infty f(x)dx = \ell.$$

Beispiel 15.5. Betrachte $f_\alpha : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$ für $\alpha > 0$ mit

$$f_\alpha(x) = x^{-\alpha}.$$

Die Funktion f_α ist uneigentlich Riemann-integrierbar auf $[1, \infty)$, dann und nur dann wenn $1 < \alpha$. Denn für $T > 1$ gilt

$$\int_1^T x^{-\alpha} dx = \begin{cases} \left[\frac{1}{1-\alpha} x^{1-\alpha} \right]_1^T = \frac{1}{1-\alpha} (T^{1-\alpha} - 1) & \text{falls } \alpha \neq 1, \\ \left[\ln(x) \right]_1^T = \ln(T) & \text{falls } \alpha = 1, \end{cases}$$

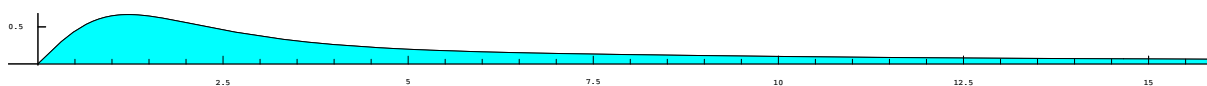
und der Grenzwert existiert nur, wenn $1 - \alpha < 0$. ■

Abschätzungen beim zweiten uneigentlichen Integral

Beispiel 15.6. Ist $g : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$ mit

$$g(x) = \frac{x}{x^2 + \cos(x)}$$

uneigentlich Riemann-integrierbar auf $[0, \infty)$?



Hoffnung auf eine explizite Stammfunktion existiert nicht. Wir vermuten, dass für große x diese Funktion sich fast verhält wie $\frac{1}{x}$. Weil $\frac{1}{x}$ auf $[10, \infty)$ nicht (un)eigentlich Riemann-integrierbar ist, wird g es auch nicht sein. Das wollen wir aber präziser haben.

Dazu zeigen wir, dass eine Teilmenge von

$$A = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2; x > 0 \text{ und } 0 \leq y \leq g(x)\}$$

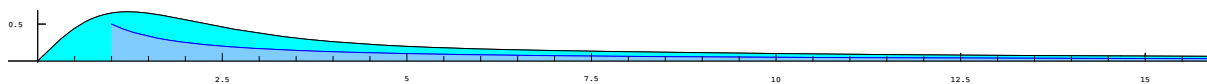
schon Flächeninhalt ∞ hat. Wir verwenden, dass für $x > 1$ gilt

$$\frac{x}{x^2 + \cos(x)} \geq \frac{x}{x^2 + 1} \geq \frac{x}{x^2 + x^2} = \frac{1}{2x},$$

und man also für $T > 1$ die folgende Abschätzung hat:

$$\begin{aligned} \int_0^T \frac{x}{x^2 + \cos(x)} dx &= \int_0^1 \frac{x}{x^2 + \cos(x)} dx + \int_1^T \frac{x}{x^2 + \cos(x)} dx \geq \\ &\geq \int_1^T \frac{x}{x^2 + \cos(x)} dx \geq \int_1^T \frac{1}{2x} dx = \frac{1}{2} \ln(T). \end{aligned}$$

Die Integrale $\int_0^{17} \frac{x}{x^2 + \cos(x)} dx$ und $\int_1^{17} \frac{1}{2x} dx$ sind hier abgebildet:



Weil $\frac{1}{2} \ln(T) \rightarrow \infty$ wenn $T \rightarrow \infty$, folgt

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T \frac{x}{x^2 + \cos(x)} dx = \infty.$$

Die Funktion g ist also nicht (un)eigentlich Riemann-integrierbar auf $[0, \infty)$. ■

Auch hier formulieren wir ein Lemma dazu.

Lemma 15.4 Sei $a \in \mathbb{R}$ und $f, g : [a, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ Funktionen, die für jedes $T > a$ Riemann-integrierbar sind auf $[a, T]$. Nehme an, dass

$$0 \leq f(x) \leq g(x) \text{ für } x \in [a, \infty).$$

Wenn g uneigentlich Riemann-integrierbar ist auf $[a, \infty)$, dann ist auch f uneigentlich Riemann-integrierbar auf $[a, \infty)$.

Beweis. Weil es ähnlich wie beim Beweis von Lemma 15.2 ist, überlassen wir es dem Leser. ■

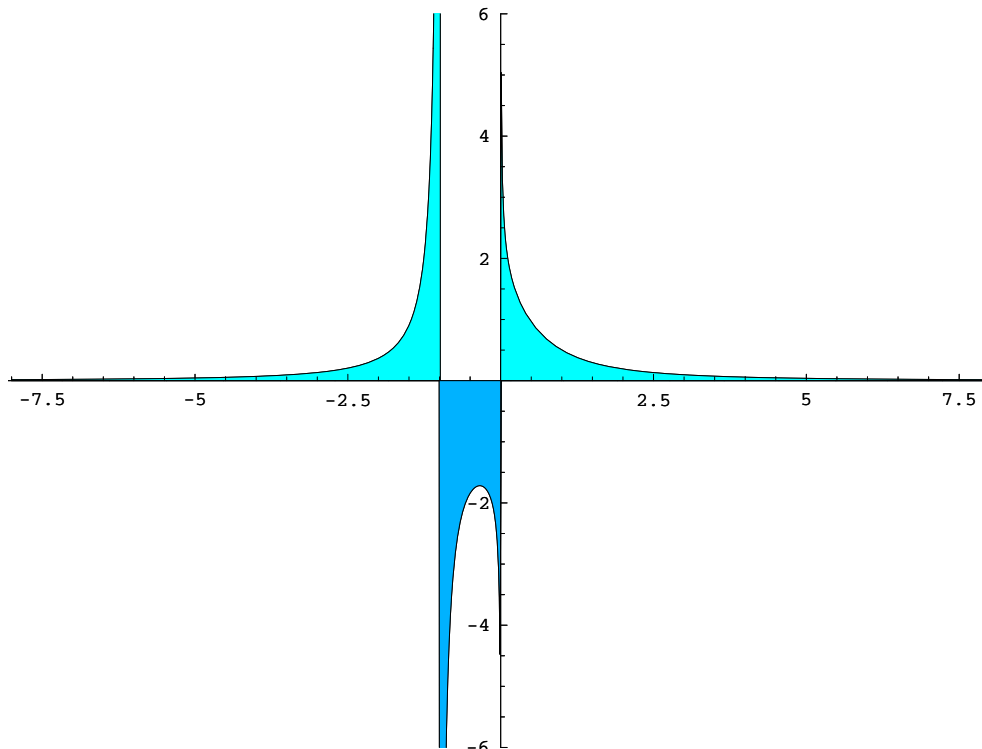
Beispiel 15.7. Ist $\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{x^2 + \sqrt[3]{x}} dx$ uneigentlich Riemann-integrierbar? Dann muss man erstens die Problemstellen inventarisieren. Neben $\pm\infty$ muss man dazu die Nullstellen vom Nenner bestimmen:

$$\begin{aligned} x^2 + \sqrt[3]{x} = 0 &\Leftrightarrow x^2 = -\sqrt[3]{x} \\ &\Downarrow \\ x(x^5 + 1) = 0 &\Leftrightarrow x^6 = -x \end{aligned}$$

Es gibt nur zwei reelle Nullstellen: $x = 0$ und $x = -1$. Insgesamt hat man so aber 6 uneigentliche Problemstellen:

$$\{-\infty, -1 \text{ links}, -1 \text{ rechts}, 0 \text{ links}, 0 \text{ rechts}, +\infty\}.$$

Wenn man Maple oder Mathematica die Funktion skizzieren lässt, erkennt man die Singularitäten:



Die Problemstellen muss man einzeln anschauen. Wenn aber eine davon schon dafür sorgt, dass das dazugehörige uneigentliche Integral nicht existiert, ist man fertig. Fangen wir rechts an:

- $\lim_{T \rightarrow \infty} \int_{10}^T \frac{1}{x^2 + \sqrt[3]{x}} dx$; für große x sollte man vergleichen können mit $\frac{1}{x^2}$ und das würde uneigentlich Riemann-integrierbar bedeuten.
- $\lim_{\delta \downarrow 0} \int_{\delta}^{10} \frac{1}{x^2 + \sqrt[3]{x}} dx$; falls $0 < x \ll 1$ sollte man vergleichen können mit $\frac{1}{\sqrt[3]{x}}$ und das würde uneigentlich Riemann-integrierbar bedeuten.
- $\lim_{\varepsilon \downarrow 0} \int_{-\frac{1}{2}}^{-\varepsilon} \frac{1}{x^2 + \sqrt[3]{x}} dx$; falls $-\frac{1}{2} \ll x < 0$ sollte man vergleichen können mit $\frac{-1}{\sqrt[3]{|x|}}$ (negativ!) und das würde uneigentlich Riemann-integrierbar bedeuten.
- $\lim_{\rho \downarrow 0} \int_{-1+\rho}^{-\frac{1}{2}} \frac{1}{x^2 + \sqrt[3]{x}} dx$; falls $-1 < x \ll -\frac{1}{2}$ sollte man vergleichen können mit $\frac{-1}{x+1}$ (negativ!) und das würde „nicht uneigentlich Riemann-integrierbar“ bedeuten. **Bingo!**
- $\lim_{\gamma \downarrow 0} \int_{-2}^{-1-\gamma} \frac{1}{x^2 + \sqrt[3]{x}} dx$ brauchen wir nicht mehr anzuschauen.
- $\lim_{S \rightarrow -\infty} \int_S^{-2} \frac{1}{x^2 + \sqrt[3]{x}} dx$ brauchen wir nicht mehr anzuschauen.

Wir versuchen „nicht uneigentlich Riemann-integrierbar“ hinzukriegen, und schauen uns $\lim_{\rho \downarrow 0} \int_{-1+\rho}^{-\frac{1}{2}} \frac{1}{x^2 + \sqrt[3]{x}} dx$ an. Um zu verstehen was bei $x = -1$ passiert, müssen wir die

Funktion $g(x) = x^2 + \sqrt[3]{x}$ untersuchen bei $x = -1$. Um abzuleiten schreiben wir

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

und finden so

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

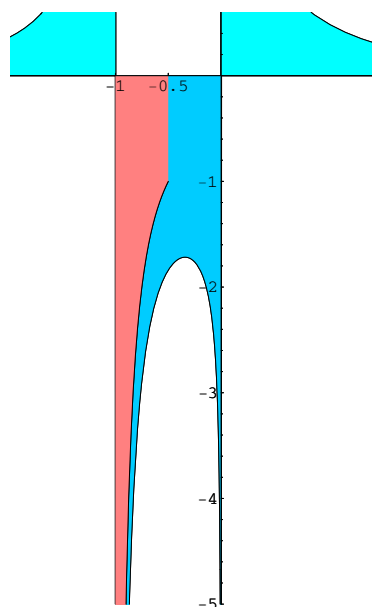
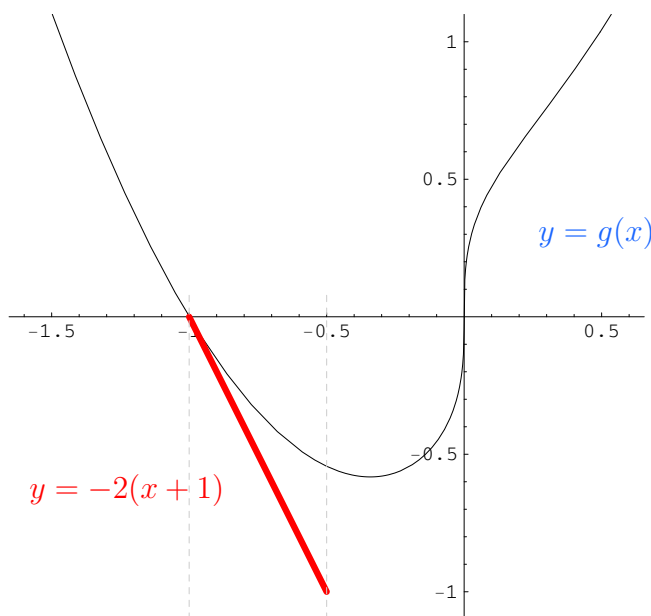
Dann folgt $g'(-1) = -2 + \frac{1}{3} = -\frac{5}{3} > -2$. Aus der Stetigkeit von g' auf $(-\infty, 0)$ finden wir, dass $g'(x) > -2$ in einer rechten Umgebung von $x = -1$ und mit dem Mittelwertsatz, dass in dieser rechten Umgebung gilt

$$g(x) - g(-1) = g'(\theta)(x - (-1)) > -2(x + 1).$$

Es ist nicht notwendig, aber man kann sogar die Umgebung abschätzen:

$$g(x) = g(x) - g(-1) > -2(x + 1) \text{ für } x \in (-1, -\frac{1}{2}).$$

Dies ist im linken Bild dargestellt durch die Gerade in Rot. Im rechten Bild steht in Rot der Flächeninhalt bei $\frac{1}{-2(x+1)}$ auf $(-1, -1/2)$, der schon $-\infty$ beim Integral geben wird.



Ausschnitt vom Bild auf Seite 201 mit der Abschätzung.

Dann gilt nämlich, dass

$$\frac{1}{g(x)} < \frac{1}{-2(x+1)} \text{ für } x \in (-1, -\frac{1}{2})$$

und das liefert

$$\int_{-1+\rho}^{-\frac{1}{2}} \frac{1}{x^2 + \sqrt[3]{x}} dx \leq \int_{-1+\rho}^{-\frac{1}{2}} \frac{1}{-2(x+1)} dx = \left[-\frac{1}{2} \ln(x+1) \right]_{-1+\rho}^{-\frac{1}{2}} = -\frac{1}{2} \ln\left(\frac{1}{2}\right) + \frac{1}{2} \ln(\rho).$$

Weil $\ln(\rho) \rightarrow -\infty$ für $\rho \downarrow 0$, folgt

$$\int_{-1+\rho}^{-\frac{1}{2}} \frac{1}{x^2 + \sqrt[3]{x}} dx \rightarrow -\infty \text{ für } \rho \downarrow 0$$

und $\int_{-1}^{-\frac{1}{2}} \frac{1}{x^2 + \sqrt[3]{x}} dx$ existiert nicht als uneigentliches Integral. ■

15.2 Reihen und uneigentliche Riemann-Integrale

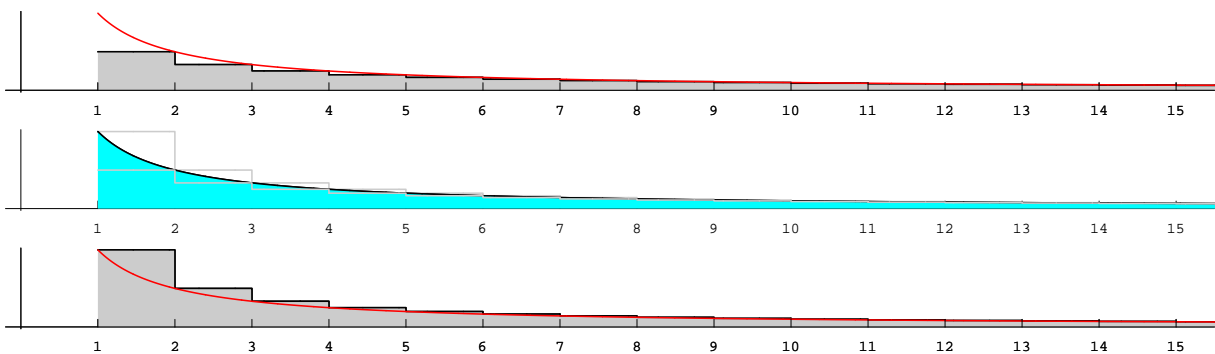
Manchmal lassen sich Reihen und uneigentliche Riemann-Integrale vergleichen.

Lemma 15.5 Wenn $f : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$ folgende Bedingungen erfüllt:

1. f ist positiv: $f(x) \geq 0$ für alle $x \in \mathbb{R}^+$;
2. f ist monoton fallend: $x > y > 0 \Rightarrow f(x) \leq f(y)$;
3. $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = 0$,

dann gilt für jede $N \in \mathbb{N}^+$

$$\sum_{n=2}^N f(n) \leq \int_1^N f(x) dx \leq \sum_{n=1}^{N-1} f(n) \quad (15.1)$$



Beweis. Man bemerke, dass für die Ganzzahlfunktion $x \mapsto [x]$ folgendes gilt:

$$[x] + 1 \geq x \geq [x].$$

Weil f monoton fallend ist, gilt

$$f([x] + 1) \leq f(x) \leq f([x]) \text{ für } x \geq 1.$$

So gilt auch

$$\sum_{n=2}^N f(n) = \int_1^N f([x] + 1) dx \leq \int_1^N f(x) dx \leq \int_1^N f([x]) dx = \sum_{n=1}^{N-1} f(n).$$

Die Bedingung $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = 0$ wird in dieser Abschätzung nicht benutzt. ■

Korollar 15.6 Sei f wie in Lemma 15.5. Dann gilt folgendes:

Die Reihe $\sum_{n=1}^{\infty} f(n)$ konvergiert, dann und nur dann, wenn $\int_1^{\infty} f(x) dx$ konvergiert.

Beweis. Man benutze die Abschätzung (15.1) aus Lemma 15.5. ■

Beispiel 15.8. So können wir nun sofort sehen, dass die harmonische Reihe divergiert:

$$\sum_{n=1}^N \frac{1}{n} \geq \int_1^N \frac{1}{x} dx = \ln(N) \rightarrow \infty \text{ wenn } N \rightarrow \infty.$$

Literaturverzeichnis

- [1] Amann, Herbert; Escher, Joachim. Analysis 1. Birkhäuser.
- [2] Bröcker, Theodor. Analysis 1. Bibliographisches Institut.
- [3] Forster, Otto. Analysis 1 Vieweg Studium.
- [4] Königsberger, Konrad. Analysis 1. Springer-Lehrbuch.
- [5] Spivak, Michael. Calculus. Publish or Perish Inc/Cambridge University Press.
- [6] Walter, Wolfgang. Analysis 1. Springer-Lehrbuch.

Index

- abgeschlossenes Intervall, 18
- Ableitung, 123, 124
- absolut konvergent, 82
- abzählbar, 10, 21
- Äquivalenzrelation, 14
- algebraische Gleichung, 27
- alternierende Gliedern, 85
- Antisymmetrie, 13
- Arcuscosinus, 148
- Arcusfunktionen, 148
- Arcussinus, 148
- Arcustangens, 149
- Areacosinus hyperbolicus, 151
- Areacotangens hyperbolicus, 152
- Areafunktionen, 150
- Areasinus hyperbolicus, 150
- Areatangens hyperbolicus, 151
- Argument, 25
- Asymptot, 113, 114, 116

- bedingt konvergent, 80
- Bernoullische Ungleichung, 5
- beschränkt, 14
 - nach oben, 14
- Betrag, 25
- bijektiv, 3
- Binomialkoeffizient, 7
- Binomialreihe, 93

- Cauchy-Folge, 18, 22, 45, 47
- Cosinus, 134
- Cosinus hyperbolicus, 138
- Cotangens, 137
- Cotangens hyperbolicus, 138

- Dedekindsche Schnitte, 19
- dicht, 22
- differenzierbar, 124
 - komplex, 125
- Differenzierbarkeit liefert Stetigkeit, 127
- divergent, 47
- Divisionsalgorithmus, 35, 65
- Einschließungslemma, 54

- einseitiger Limes, 99
- Eulersche Zahl, 133
- Exponentialfunktion, 133
- Exponentialreihe, 92

- Fakultät, 6
- Fermat
 - Kriterium von, 126
- Folgenlimes, 101
- folgenstetig, 109
- Fundamentalfolge, 18
- Fundamentalsatz der Algebra, 33
- Funktion, 3, 61

- gebrochen lineare Abbildung, 42
- geometrische Reihe, 76
- Gleichförmigkeitstransformation, 41
- Grenzwert, 47

- Häufungswert, 59
- höhere Ableitungen, 126
- harmonische Reihe, 76
- Hauptsatz der Algebra, 33
- Hauptsatz der Integralrechnung, 179, 181

- Imaginärteil, 25
- Induktionsprinzip, 5
- Infimum, 56
- injektiv, 3
- Integral, 167
- Integraleigenschaften, 167
- integrierbar, 167
- Intervallschachtelung, 20
- Inversion, 41
- isomorph, 20

- Körper, 9
- Kettenlinie, 139
- Kochschen Kurve, 195
- komplex differenzierbar, 125
- komplexe Konjugation, 25
- komplexer Logarithmus, 185
- konvergent, 22, 46
- konvergente Folge, 45

- Konvergenzradius, 91
- konvexe Funktion, 143
- Kriterium von Fermat, 126
- Kriterium von Leibniz, 85
- Lagrangesche Interpolationsformel, 63
- Landau-Symbol, 154
- Limes, 22, 47
- Limes einer Funktion, 97
- Limes inferior, 57, 118
- Limes superior, 57, 118
- linksdifferenzierbar, 125
- Lipschitz-stetig, 128
- Logarithmus, 146, 185
- Majorantenkriterium, 78
- Maximum, 55
- Minimum, 55
- Mittelwertsatz, 141
- Mittelwertsatz für Integrale, 177
- monoton fallend, 14
- monoton wachsend, 14
- monotone Folge, 45
- Nullstellensatz, 119
- obere Schranke, 14
- oberes Integral, 166
- oberhalb stetig, 119
- Obersumme, 166
- offenes Intervall, 18
- Ordnung, 13
- Partialbruchzerlegung, 65
- Partialsomme, 75
- partielle Integration, 181
- Pascalsches Dreieck, 7
- Polynom, 27, 62
- Potenz, 68, 96
- Potenzreihe, 91
- Primzahl, 4
- punktierte Umgebung, 99
- quadratische Ergänzung, 30
- Quotientenkriterium, 83
- rationale Funktion, 63
- Realteil, 25
- rechtsdifferenzierbar, 125
- Reflexivität, 13, 14
- Reihe, 75
 - geometrische, 76
 - harmonische, 76
- Restglied von Lagrange, 154
- Riemann-Integral, 163, 167
- Riemann-integrierbar, 167
- Riemann-Zeta-Funktion, 78
- Satz über Extremwerte stetiger Funktionen, 120
- Satz von Bolzano-Weierstrass, 59
- Satz von de l'Hôpital, 154
- Satz von Rolle, 141
- Satz von Taylor, 153, 154
- Satz zur Differenzierbarkeit von Potenzreihen, 130
- Satz zur Umkehrfunktion, 144
- Sinus, 134
- Sinus hyperbolicus, 138
- Stammfunktion, 180
- stetig, 105
 - gleichmäßig, 105
 - oberhalb, 119
 - unterhalb, 119
- stetig differenzierbar, 127
- stetige Funktion, 105
- Substitutionsregel, 183
- Supremum, 21, 56
- surjektiv, 3
- Symmetrie, 14
- Tangens, 137
- Tangens hyperbolicus, 138
- Taylorpolynom, 152, 153
- Taylorreihe, 156, 157
- Teilfolge, 45
- totale Ordnung, 13
- Transitivität, 13, 14
- Treppenfunktion, 164
- trigonometrische Funktionen, 134
- Umkehrfunktion, 144
- Umordnung, 80
- unbedingt konvergent, 80
- uneigentlicher Limes, 57, 114
- uneigentliches Riemann-Integral, 196, 199
- unendlich als Symbol, 18
- Ungleichung
 - Bernoulli, 5
- unteres Integral, 167
- unterhalb stetig, 119
- Untersumme, 166

vollständig, 21, 22

vollständige Induktion, 5

Vollständigkeit der reellen Zahlen, 22

Wurzel, 27

Wurzelkriterium, 84

Zahlen

ganze, 8

komplexe, 24

natürliche, 4

rationale, 8

reelle, 14

Zerlegung, 164

Zwischenwertsatz, 120

zyklometrische Funktionen, 148