

Skript zur Vorlesung
Analysis I
bei Prof. Dr. Dirk Hundertmark

Karlsruher Institut für Technologie

Wintersemester 2023/24

Dieses Skript ist inoffiziell. Es besteht kein
Anspruch auf Vollständigkeit oder Korrektheit.

Inhaltsverzeichnis

1	Aussagenlogik	4
2	Mengen	5
2.1	Eigenschaften von Mengen	5
2.2	Operationen mit Mengen	5
2.3	Quantoren	7
2.4	Kartesisches Produkt und Relationen	7
2.5	Funktionen	9
2.6	Geordnete Mengen	10
3	Die Axiome der Reellen Zahlen	11
3.1	Algebraische Axiome	11
3.2	Die Anordnungsaxiome	13
3.3	Das Vollständigkeitsaxiom	15
4	Die natürlichen Zahlen \mathbb{N} und vollständige Induktion	17
4.1	Induktive Mengen	17
4.2	Vollständige Induktion	18
5	Summe, Produkt, Wurzeln	21
5.1	Summenzeichen, Produktzeichen	21
5.2	Binomischer Lehrsatz	21
5.3	Bernoullische Ungleichung	23
5.4	Wurzeln	24
5.5	Absolutbetrag	24
6	[*] Folgen und Grenzwerte	26
6.1	Konvergenz	26
6.2	Geometrische Bedeutung der Konvergenz	26
6.3	Eigenschaften von Folgen und Konvergenzen	27
6.4	[*] Monotone Konvergenz	30
6.5	Häufungswerte und Teilfolgen	36
6.6	Größter und kleinster Häufungswert - Limes superior und Limes inferior	38
6.7	Das Konvergenzkriterium von Cauchy	42
7	Dichtheit von \mathbb{Q} in \mathbb{R}	44
7.1	Dichtheit im Allgemeinen	44
7.2	Dichtheits-Begriff für rationale und reelle Zahlen	44
8	[*] Reihen (und Konvergenz von Reihen)	46
8.1	[*] Konvergenz-Kriterien für Reihen	46
8.2	[*] Absolut konvergente Reihen und Umordnungen	56
9	[*] \mathbb{R}^d, Konvergenz im \mathbb{R}^d, die komplexen Zahlen \mathbb{C} und der Norm in \mathbb{C} (Noch in Bearbeitung)	
9.1	[*] Normen und mehrdimensionale Konvergenz	(Noch in Bearbeitung)
9.2	[*] Die Komplexen Zahlen	(Noch in Bearbeitung)

0 *Inhaltsverzeichnis*

Alle mit [*] markierten Kapitel sind noch nicht korrektur gelesen und bedürfen eventuell noch Änderungen.

1 Aussagenlogik

Definition 1.1.1 (Aussage). Eine Aussage ist eine Behauptung sprachlich oder mittels Formeln, welche entweder wahr oder falsch ist.

Beispiel 1.1.2 (Zulässige Aussagen).

- (i) Bielefeld existiert (w)
- (ii) $2 + 2 = 5$ (f)
- (iii) Es gibt unendlich viele Primzahlen (w)

Definition 1.1.3 (Aussageform). Eine Aussage, die von mindestens einer Variablen abhängt, nennt sich Aussageform. Wir schreiben zum Beispiel $H(x)$ für eine Aussage für die Variable x .

Beispiel 1.1.4 (Mögliche Aussageformen).

- (i) $H(x) :\Leftrightarrow (x^2 - 3x + 2 = 0)$
- (ii) $G(x) :\Leftrightarrow (x = 1 \vee x = 2)$

Konzept 1.1.5 (Beweisstruktur).

$$\begin{array}{ccc} p & & q \\ \text{Voraussetzung} & \Rightarrow & \text{Behauptung} \\ \text{hinreichend für } q & & \text{notwendig für } p \end{array}$$

Beweis: $p \Rightarrow r_1 \Rightarrow r_2 \Rightarrow r_3 \Rightarrow \dots \Rightarrow r_n \Rightarrow q$. (r_1, \dots, r_n sind bereits bekannte wahre Aussagen oder Axiome)

Satz 1.1.6 (Regeln der Aussagenlogik). Seien p, q, r Aussagen. Dann sind folgende Aussagen wahr:

- (i) $p \vee \neg p$ (Tertium non datur)
- $p \Rightarrow p$
- $\neg(p \wedge \neg p)$
- (ii) $p \wedge q \Leftrightarrow q \wedge p$ (Kommutativität)
- $p \vee q \Leftrightarrow q \vee p$
- (iii) $(p \wedge q) \wedge r \Leftrightarrow p \wedge (q \wedge r)$ (Assoziativität)
- $(p \vee q) \vee r \Leftrightarrow p \vee (q \vee r)$
- (iv) $\neg(p \wedge q) \Leftrightarrow \neg p \vee \neg q$ (De Morgan)
- $\neg(p \vee q) \Leftrightarrow \neg p \wedge \neg q$
- (v) $p \Rightarrow q \Leftrightarrow \neg p \vee q$ (Definition der Implikation)
- (vi) $(p \Leftrightarrow q) \Leftrightarrow (p \Rightarrow q) \wedge (q \Rightarrow p)$ (Definition der Äquivalenz)
- $(p \Leftrightarrow q) \Leftrightarrow (p \wedge q) \vee (\neg p \wedge \neg q)$
- (vii) $(p \Leftrightarrow q) \wedge (q \Leftrightarrow r) \Rightarrow (p \Leftrightarrow r)$ (Transitivität)

2 Mengen

2.1 Eigenschaften von Mengen

Notation 2.1.1 (Konkrete Beschreibung von Mengen). Eine Menge ist informell formuliert eine Ansammlung von Objekten. Um diese Objekte konkret anzugeben, schreiben wir $M = \{1, 2, 3\}$. Eine andere Möglichkeit, eine Menge anzugeben ist über die Eigenschaften der Elemente. Wir schreiben: $M = \{x \mid H(x)\}$. Das bedeutet, dass ein Element x genau dann ein Element der Menge ist, wenn $H(x)$ gilt. Wir schreiben $x \in M \Leftrightarrow H(x)$.

Beispiel 2.1.2 (Mengendeklaration über Aussagenform).

$$\begin{aligned} H(x) &:= (x^2 - 3x + 2 = 0) \\ \Rightarrow \{x \mid H(x)\} &= \{1, 2\} \end{aligned}$$

Definition 2.1.3 (Eigenschaften von Mengen). Allgemein gilt für Mengen:

1. 2 Mengen sind gleich, wenn sie die selben Elemente enthalten.
2. Die leere Menge (\emptyset) ist die einzige Menge, die keine Elemente enthält
3. Wenn für jedes $x \in A$ auch $x \in B$ folgt, dann ist A eine Teilmenge von B . ($A \subseteq B$)
4. Ist $A \subseteq B$ und $A \neq B$, dann nennen wir A eine echte Teilmenge von B . ($A \subsetneq B$)
5. A und B sind disjunkt, falls aus $x \in A$ folgt, dass $x \notin B$.

Bemerkung 2.1.4. Allgemein gilt für zwei Mengen A und B , dass $A \subseteq B \wedge B \subseteq A \Leftrightarrow A = B$.¹

2.2 Operationen mit Mengen

Definition 2.2.1 (Mengenoperationen). Seien A, B Mengen. Dann gilt:

$$\begin{aligned} A \cap B &:= \{x \mid x \in A \wedge x \in B\} && \text{(Schnitt)} \\ A \cup B &:= \{x \mid x \in A \vee x \in B\} && \text{(Vereinigung)} \\ A \setminus B &:= \{x \mid x \in A \wedge x \notin B\} && \text{(Differenz)} \end{aligned}$$

$$\text{Wenn } A \subseteq M : A^C = A_M^C := M \setminus A \quad \text{(Komplement)}$$

Allgemein gilt: A und B disjunkt $\Leftrightarrow A \cap B = \emptyset$

Visualisierung 2.2.2 (Darstellung von Mengen als Venn-Diagramm). Die Operationen auf zwei Mengen A und B lassen sich mittels eines Venn-Diagramms veranschaulichen:

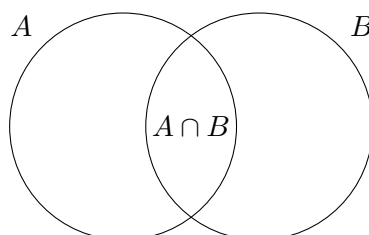


Abbildung 1: Schnittmenge zweier Mengen als Venn-Diagramm

¹Diese Äquivalenz wird insbesondere in Beweisen häufig eingesetzt, indem durch das Zeigen, dass zwei Mengen gegenseitige Teilmengen sind, deren Gleichheit gezeigt wird.

Lemma 2.2.3 (Kommutativität des Schnitts). $A \cap B = B \cap A$

Beweis.

$$\begin{aligned} A \cap B &= \{x \mid x \in A \wedge x \in B\} \\ &= \{x \mid x \in B \wedge x \in A\} \\ &= B \cap A \end{aligned} \quad \square$$

Lemma 2.2.4 (Distributivität). $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$

Beweis.

$$\begin{aligned} x \in A \cup (B \cap C) &\Leftrightarrow x \in A \vee x \in B \cap C \\ &\Leftrightarrow x \in A \vee (x \in B \wedge x \in C) \\ &\Leftrightarrow (x \in A \vee x \in B) \wedge (x \in A \vee x \in C) \\ &\Leftrightarrow x \in A \cup B \wedge x \in A \cup C \\ &\Leftrightarrow x \in (A \cup B) \cap (A \cup C) \end{aligned} \quad \square$$

Definition 2.2.5 (Familie von Mengen). Sei J eine Indexmenge mit $J \neq \emptyset$. Die Mengenfamilie ist gegeben durch Mengen A_j für jedes $j \in J$. Wir schreiben $\{A_j\}_{j \in J}$

Definition 2.2.6 (Schnitt und Vereinigung über mehrere Mengen). Für eine Mengenfamilie $\{A_j\}_{j \in J}$ gilt:

$$\begin{aligned} \bigcap_{j \in J} A_j &:= \{x \mid \forall j \in J : x \in A_j\} \\ \bigcup_{j \in J} A_j &:= \{x \mid \exists j \in J : x \in A_j\} \end{aligned}$$

2.3 Quantoren

Definition 2.3.1 (Quantoren). Wir definieren drei unterschiedliche Quantoren:

- (i) \forall : „Für alle“
- (ii) \exists : „Es existiert ein“
- (iii) $\exists!$: „Es existiert genau ein“

Es seien A, B Mengen und $H(x, y)$ eine Aussageform mit $x \in A$ und $y \in B$. Dann gilt:

$$\forall x \in A \exists y \in B : H(x, y) \Leftrightarrow \text{Für alle } x \in A \text{ existiert ein } y \in B, \text{ so dass } H(x, y) \text{ wahr ist}$$

Folgerung 2.3.2 (Negation von Quantoren). Es seien A, B Mengen und $H(x, y)$ Aussageform mit $x \in A$ und $y \in B$. Dann gilt:

$$\begin{aligned} \neg(\forall x \in A : H(x)) &\Leftrightarrow \exists x \in A : \neg H(x) \\ \neg(\exists x \in A : H(x)) &\Leftrightarrow \forall x \in A : \neg H(x) \\ \neg(\forall x \in A \exists y \in B : H(x, y)) &\Leftrightarrow \exists x \in A : \neg(\exists y \in B : H(x, y)) \\ &\Leftrightarrow \exists x \in A \forall y \in B : \neg H(x, y) \end{aligned}$$

Definition 2.3.3 (Potenzmenge). Sei A eine Menge, so heißt $\mathcal{P}(A) := \{N \mid N \subseteq A\}$ Potenzmenge von A . Eine Teilmenge $A \subseteq \mathcal{P}(A)$ heißt Mengensystem über A .

Bemerkung 2.3.4 (Russels Paradoxon). Russel definiert: $R := \{M \mid M \text{ ist Menge und } M \notin M\}$. Falls R eine Menge, dann kann man fragen, ob $R \in R$ oder nicht.

1. Fall: $R \notin R \Rightarrow R \in R$ (Widerspruch)

2. Fall: $R \in R \Rightarrow R \notin R$ (Widerspruch)

Lösung: R ist keine Menge, sondern eine Klasse

2.4 Kartesisches Produkt und Relationen

Definition 2.4.1 (Tupel). Seien A und B Mengen. Für $x \in A$ und $y \in B$ ist $(a, b) := \{a, \{a, b\}\}$ das geordnete Paar oder Tupel bestehend aus a und b .

Zwei Tupel (a_1, b_1) und (a_2, b_2) mit $a_1, a_2 \in A, b_1, b_2 \in B$ sind genau dann gleich, wenn ihr jeweils erstes und zweites Element gleich ist:

$$(a_1, b_1) = (a_2, b_2) \Leftrightarrow a_1 = a_2 \wedge b_1 = b_2$$

Definition 2.4.2 (Kartesisches Produkt). Somit ist $A \times B := \{(a, b) \mid a \in A \wedge b \in B\}$ wieder eine Menge genannt das Kartesische Produkt von A und B .

Beispiel 2.4.3.

$$\begin{aligned} M &:= \{1, 2, 3\} \\ N &:= \{3, 4\} \\ M \times N &= \{(1, 3), (1, 4), (2, 3), (2, 4), (3, 3), (3, 4)\} \end{aligned}$$

Definition 2.4.4 (Relation). Seien A, B Mengen. Eine Relation $R = (A, B, G)$ besteht aus einer Menge A , einer Menge B und einer Menge $G \subseteq A \times B$.

G ist der Graph von R , auch geschrieben als G_R . Ist $(a, b) \in G$ so sagt man „ a ist R -verwandt zu b “. Wir schreiben aRb (Infix-Schreibweise).

A ist die Definitionsmenge von R und B ist die Zielmenge von R .

Seien $R_1 = (A_1, B_1, G_1)$ und $R_2 = (A_2, B_2, G_2)$ Relationen. Dann gilt:

$$R_1 = R_2 \Leftrightarrow A_1 = A_2 \wedge B_1 = B_2 \wedge G_1 = G_2$$

Wir können eine Umkehrrelation R^{-1} wie folgt definieren:

$$\begin{aligned} R^{-1} &:= (B, A, G_{R^{-1}}) \\ G_{R^{-1}} &:= \{(b, a) \mid (a, b) \in G_R\} \end{aligned}$$

Beispiel 2.4.5 (Kleiner-Relation). Es sei $A = \{1, 2, 3, 4\}$. Wir definieren die Kleiner-Relation $R = \{A, A, G_{<}\}$.

Dann gilt: $a_1 < a_2 \Leftrightarrow (a_1, a_2) \in G_{<}$ und somit $G_{<} = \{(1, 2), (1, 3), (1, 4), (2, 3), (2, 4), (3, 4)\}$

Definition 2.4.6 (Äquivalenzrelation). Sei $R = (A, A, G)$ eine Relation. Dann definieren wir unterschiedliche Eigenschaften, die die Relation haben kann:

- (i) R ist reflexiv: $\forall a \in A : aRa \quad (\forall a \in A : (a, a) \in G)$
- (ii) R ist symmetrisch: $\forall a_1, a_2 \in A : a_1Ra_2 \Leftrightarrow a_2Ra_1$
- (iii) R ist transitiv: $\forall a_1, a_2, a_3 \in A : a_1Ra_2 \wedge a_2Ra_3 \Rightarrow a_1Ra_3$

Eine Äquivalenzrelation ist eine reflexive, symmetrische und transitive Relation auf A .

Ist R eine Äquivalenzrelation und a_1Ra_2 so nennt man a_1 äquivalent zu a_2 bezüglich R .

Notation 2.4.7 (Äquivalenzklassen). Sei R Äquivalenzrelation auf A . Dann gilt:

$$[a]_R := \{b \in A \mid aRb\}$$

ist die Äquivalenzklasse von a . Wir schreiben auch $a \sim_R b$ für aRb oder $a = b$ modulo R .

Beobachtung 2.4.8. Allgemein gilt für Äquivalenzklassen damit:

- (i) $\forall a \in A : [a]_R \neq \emptyset$
- (ii) $aRa \Rightarrow a \in [a]_R$
- (iii) $a_1, a_2 \in [a]_R \Rightarrow a_1 \sim_R a, a_2 \sim_R a \xRightarrow{\text{sym.}} a_1 \sim_R a, a \sim_R a_2 \xRightarrow{\text{trans.}} a_1 \sim_R a_2$

Lemma 2.4.9. Sei R Äquivalenzrelation auf A . Für $a_1, a_2 \in A$ ist entweder $[a_1]_R = [a_2]_R$ oder $[a_1]_R \cap [a_2]_R = \emptyset$.

Beweis. Da $[a_1]_R, [a_2]_R \neq \emptyset$ reicht es zu zeigen, dass: $[a_1]_R \cap [a_2]_R \neq \emptyset \Rightarrow [a_1]_R = [a_2]_R$.

$$\begin{aligned} \text{Sei } b \in [a_1]_R \cap [a_2]_R \text{ und } c \in [a_1]_R \\ \Rightarrow b \sim_R a_1 \wedge c \sim_R a_1 \xRightarrow{\text{trans.}} c \sim_R b \end{aligned}$$

Da $b \sim_R a_2$ muss nach der Transitivität gelten:

$$c \sim_R a_2 \Rightarrow [a_1]_R \subseteq [a_2]_R$$

Symmetrisch lässt sich argumentieren, dass $[a_2]_R \subseteq [a_1]_R$. □

2 Mengen

Korollar 2.4.10. Es sei R eine Äquivalenzrelation auf $A \neq \emptyset$. Dann sind $a_1, a_2 \in A$ entweder äquivalent oder sie gehören zu disjunkten Äquivalenzklassen.

Definition 2.4.11 (Zerlegung einer Menge). Sei $A \neq \emptyset$ eine Menge. Dann ist eine Zerlegung $F = \{A_j\}_{j \in J}, A_j \subseteq A$ mit folgenden Eigenschaften definiert:

1. $\forall j \in J: A_j \neq \emptyset$
2. $j_1, j_2 \in J, j_1 \neq j_2: A_{j_1} \cap A_{j_2} = \emptyset$
3. $\bigcup_{j \in J} A_j = A$

Notation 2.4.12 (Quotient). Es sei R Äquivalenzrelation auf A .

$$F := \{[a]_R \mid a \in A\}$$

ist eine Zerlegung von A (bezüglich der Äquivalenzrelation R). Wir schreiben $F = A/R$. A/R ist der „Quotient“ von A bezüglich R

Beispiel 2.4.13 (Restklassendefinition über Äquivalenzrelationen). Es sei $A = \mathbb{N}_0 = \{0, 1, 2, 3, 4, \dots\}$ und $p \in \mathbb{N}$. $m, n \in \mathbb{N}_0$ seien genau dann äquivalent, wenn $m = n + kp$ für ein $k \in \mathbb{Z}$:

$$R_p = \{(m, n) \in \mathbb{N}_0 \times \mathbb{N}_0 \mid \exists k \in \mathbb{Z} \text{ mit } m = n + kp\}$$

So definieren wir die Restklassen von \mathbb{N}_0 bezüglich Division mit p .

$$m \in [j]_R \Leftrightarrow m = j + kp \text{ für ein } k \in \mathbb{Z}$$

2.5 Funktionen

Bemerkung 2.5.1 (Moralische Definition einer Funktion). Gegeben Mengen A, B , eine Relation f von A nach B . f ist eine Funktion, wenn es jedem Element in A genau ein Element in B zuordnet.

Notation 2.5.2 (Pfeilnotation). Wir schreiben $f: A \rightarrow B, \quad a \mapsto f(a)$

Folgerung 2.5.3. Zu $a \in A$ gibt es $f(a) \in B \rightsquigarrow \text{Tupel}(a, f(a)) \in A \times B \Rightarrow \{(a, f(a)) : a \in A\} \subseteq A \times B$

Definition 2.5.4 (Funktion). Eine Relation $R = (A, B, G_R)$ heißt Funktion (oder Abbildung), wenn

$$\forall a \in A \exists! b \in B : (a, b) \in G_f.$$

Wir setzen dann $f(a) := b$

Beispiel 2.5.5 (Mögliche Funktionen).

$$\begin{aligned} f: \mathbb{Z} &\rightarrow \mathbb{R}, & n &\mapsto 3n^2 + 7 \\ g: \mathbb{Z} &\rightarrow \mathbb{Z}, & n &\mapsto 3n^2 + 7 \\ h: [0, \infty) &\rightarrow \mathbb{R}, & n &\mapsto x^2 + 3x + 4 \\ j: \mathbb{R} &\rightarrow \mathbb{R}, & n &\mapsto x^2 + 3x + 4 \end{aligned}$$

Bemerkung 2.5.6. f und g haben zwar die gleiche Funktionsvorschrift, sind aber dennoch unterschiedliche Funktionen, da diese wie Relationen auch über Definitionsmenge und Zielmenge definiert sind.

Notation 2.5.7 (Bild und Urbild). Sei $f : A \rightarrow B$ eine Funktion. Dann gilt

$$\begin{aligned} M \subseteq A : \quad & f(M) := \{b \in B \mid \exists x \in M : b = f(x)\} && \text{(Bild von } M \text{ unter } f) \\ N \subseteq B : \quad & f^{-1}(N) := \{a \in A \mid f(a) \in N\} && \text{(Urbild von } N \text{ unter } f) \end{aligned}$$

Außerdem ist das gesamte Bild von f definiert als

$$\text{Bild}(f) := f(A)$$

Definition 2.5.8 (Einschränkungen von Funktionen). Sei $f : A \rightarrow B$ eine Funktion und $M \subseteq A$. Dann ist die Einschränkung (oder Restriktion) von f auf M definiert als

$$f|_M : M \rightarrow B, \quad x \mapsto f(x)$$

Definition 2.5.9 (Besondere Eigenschaften von Funktionen). Es sei $f : A \rightarrow B$ eine Funktion.

- (i) f ist injektiv, falls $\forall a_1, a_2 \in A : f(a_1) = f(a_2) \Rightarrow a_1 = a_2$.
- (ii) f ist surjektiv, falls $\text{Bild}(f) = B$
- (iii) f ist bijektiv, falls es injektiv und surjektiv ist

2.6 Geordnete Mengen

Definition 2.6.1 (Ordnungsrelation und teilweise geordnete Menge). Es sei A eine Menge und R eine Relation auf A . R heißt Ordnungsrelation (geschrieben „ \prec “), falls

- (i) $\forall a \in A : a \prec a$ (Reflexivität)
- (ii) $\forall a_1, a_2, a_3 \in A : a_1 \prec a_2 \wedge a_2 \prec a_3 \Rightarrow a_1 \prec a_3$ (Transitivität)
- (iii) $\forall a_1, a_2 \in A : a_1 \prec a_2 \wedge a_2 \prec a_1 \Rightarrow a_1 = a_2$ (Antisymmetrie)

(A, \prec) heißt **teilweise** geordnete Menge. Nicht alle Paare a_1, a_2 müssen vergleichbar sein.

Notation 2.6.2. Wir schreiben $a_1 \prec a_2$ als $a_1 R a_2$ oder $(a_1, a_2) \in R$.

Definition 2.6.3 (Kette). $T \subseteq A$ heißt Kette (oder geordnete Menge), falls

$$a_1, a_2 \in T \Rightarrow a_1 \prec a_2 \vee a_2 \prec a_1$$

Beispiel 2.6.4 (Ordnungsrelation). Ordnungsrelation auf $\mathcal{P}(A)$:

$$M, N \subseteq A \quad M \prec N, \text{ falls } M \subseteq N$$

Ordnungsrelation auf \mathbb{N} :

$$(\mathbb{N}, \prec) : n \prec m, \text{ falls } n \text{ teilt } m$$

2 und 3 sind dabei nicht vergleichbar, aber 2 und 4 sind vergleichbar.

3 Die Axiome der Reellen Zahlen

Es gibt eine Menge \mathbb{R} , genannt Reelle Zahlen, die 3 Gruppen von Axiomen erfüllt:

1. Algebraische Axiome
2. Anordnungsaxiome
3. Das Vollständigkeitsaxiom

3.1 Algebraische Axiome

In \mathbb{R} gibt es 2 Operationen:

1. Addition „+“
2. Multiplikation „ \cdot “

Folgerung 3.1.1. $a, b \in \mathbb{R} \Rightarrow a + b \in \mathbb{R}$ und $a \cdot b \in \mathbb{R}$

Definition 3.1.2 (Eigenschaften eines Körpers).

- (I.1) $(a + b) + c = a + (b + c)$ *Assoziativität der Addition*
- (I.2) $a + b = b + a$ *Kommutativität der Addition*
- (I.3) Es gibt genau eine Zahl genannt Null, geschrieben 0, mit $\forall a \in \mathbb{R} : a + 0 = a$ *Existenz eines neutralen Elements der Addition*
- (I.4) $\forall a \in \mathbb{R} \exists! b \in \mathbb{R} : a + b = 0$, geschrieben $b = -a$ *Existenz eines inversen Elements der Addition*
- (I.5) $(a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c)$ *Assoziativität der Multiplikation*
- (I.6) $a \cdot b = b \cdot a$ *Kommutativität der Multiplikation*
- (I.7) $\forall a \in \mathbb{R}, a \neq 0$ gibt es ein eindeutiges $b \neq 0$ mit $a \cdot b = 1$. Wir schreiben $b = a^{-1} = \frac{1}{a}$ *Existenz eines inversen Elements der Multiplikation*
- (I.8) Es gibt genau eine Zahl Eins, geschrieben 1, die von 0 verschieden ist, mit $\forall a \in \mathbb{R} : a \cdot 1 = a$ *Existenz eines neutralen Elements der Multiplikation*
- (I.9) $a \cdot (b + c) = a \cdot b + a \cdot c$ *Distributivität*

Jede Menge \mathbb{K} , welche (I.1) bis (I.9) erfüllt, heißt **Körper**.

Bemerkung 3.1.3. Dass die Eindeutigkeit von 0 und 1 durch die Axiome gefordert wird, ist nicht unbedingt erforderlich.²

Bemerkung 3.1.4. Das inverse Element bezüglich Addition und Multiplikation ist eindeutig.

Beweis. Annahme: $a + b = 0$ und $a + b' = 0$

$$\begin{aligned}\Rightarrow b + 0 &= b + (a + b') = b' + (a + b) = b' + 0 \\ \Rightarrow b &= b'\end{aligned}$$

□

²Seien $0, 0'$ neutrale Elemente bezüglich der Addition. $\Rightarrow 0 = 0 + 0' = 0' + 0 = 0'$

Notation 3.1.5.

$$a - b := a + (-b) \quad (\text{Differenz})$$

$$\frac{a}{b} := a \cdot b^{-1} \quad (\text{Quotient})$$

Satz 3.1.6 (Abgeleitete Regeln). Es gilt (I.10)

$$-(-a) = a \quad (1)$$

$$(-a) + (-b) = -(a + b) \quad (2)$$

$$(a^{-1})^{-1} = a \quad (3)$$

$$a^{-1} \cdot b^{-1} = (a \cdot b)^{-1} \quad (4)$$

$$a \cdot 0 = 0 \quad (5)$$

$$a \cdot (-b) = -(a \cdot b) \quad (6)$$

$$(-a) \cdot (-b) = a \cdot b \quad (7)$$

$$a \cdot (b - c) = a \cdot b - a \cdot c \quad (8)$$

(I.11) Ist $a \cdot b = 0$ so ist mindestens eine der Zahlen a oder b gleich Null.*Beweis zu (I.10.5).* Zu zeigen: $a \cdot 0 = 0$

$$\begin{aligned} a \cdot 0 + a \cdot 0 &= a \cdot (0 + 0) \\ &= a \cdot 0 \\ \Rightarrow (a \cdot 0 + a \cdot 0) + (-a \cdot 0) &= a \cdot 0 + (-a \cdot 0) \\ \Rightarrow a \cdot 0 + (a \cdot 0 + (-a \cdot 0)) &= 0 \\ \Rightarrow a \cdot 0 + 0 &= 0 \\ \Rightarrow a \cdot 0 &= 0 \quad \square \end{aligned}$$

Beweis zu (I.11). Sei $a \cdot b = 0$.Ist $a \neq 0 \Rightarrow b = 1 \cdot b = a^{-1} \cdot a \cdot b = a^{-1} \cdot (a \cdot b) = a^{-1} \cdot 0 = 0$ Ist $b \neq 0$, so gilt analog, dass $a = 0$. \square **Übung 3.1.7.** Beweisen Sie die verbleibenden Regeln aus (I.10).**Satz 3.1.8** (Regeln des Bruchrechnens).

(I.12) Es gilt:

$$\frac{a}{b} + \frac{c}{d} = \frac{ad + cb}{bd} \quad b, d \neq 0 \quad (1)$$

$$\frac{a}{b} \cdot \frac{c}{d} = \frac{ac}{bd} \quad b, d \neq 0 \quad (2)$$

$$\frac{\frac{a}{b}}{\frac{c}{d}} = \frac{ad}{bc} \quad b, c, d \neq 0 \quad (3)$$

Übung 3.1.9. Beweisen Sie Satz 3.1.8.

3.2 Die Anordnungsaxiome

Allgemein gilt: $a, b \in \mathbb{R} \Rightarrow a = b \vee a \neq b$.

Ist $a \neq b$, besteht eine Anordnung „ $<$ “, die verlangt, dass genau eine der Relationen $a < b$ oder $b < a$ gilt. Das heißt $\forall a, b \in \mathbb{R}$ gilt genau eine der Aussagen $a < b, b < a, a = b$

Diese Anordnung genügt folgenden Axiomen:

Axiom 3.2.1 (Anordnungsaxiome).

(II.1) $a < b \wedge b < c \Rightarrow a < c$ (Transitivität)

(II.2) $a < b, c \in \mathbb{R} \Rightarrow a + c < b + c$

(II.3) $a < b, c > 0 \Rightarrow ac < bc$

Notation 3.2.2.

- $a < b$: a ist (echt) kleiner als b
- $b > a$: b ist größer als a
- $a \leq b$: $a = b$ oder $a < b$
- $a \in \mathbb{R}$ ist positiv, wenn $a > 0$; negativ, wenn $a < 0$; nicht-negativ, wenn $a \geq 0$; nicht-positiv, wenn $a \leq 0$

Beispiel 3.2.3. $a < b \Leftrightarrow b - a > 0$

Beweis.

$$\begin{aligned} a &< b \\ \Rightarrow 0 &= a + (-a) < b + (-a) = b - a \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b - a &> 0 \\ \Rightarrow a &< a + (b - a) = b \end{aligned}$$

□

Satz 3.2.4 (Aus den Anordnungsaxiomen abgeleitete Regeln).

(II.4) $a < b \Leftrightarrow b - a > 0$

(II.5) $a < 0 \Leftrightarrow -a > 0$ und $a > 0 \Leftrightarrow -a < 0$

(II.6) $a < b \Leftrightarrow -b < -a$

(II.7) $a < b \wedge c < d \Leftrightarrow a + c < b + d$

(II.8) $ab > 0 \Leftrightarrow (a > 0 \wedge b > 0) \vee (a < 0 \wedge b < 0)$ und $ab < 0 \Leftrightarrow (a > 0 \wedge b < 0) \vee (a < 0 \wedge b > 0)$

(II.9) $a \neq 0 \Rightarrow a^2 > 0$ (Insbesondere $1 > 0$)

(II.10) $a < b \wedge c < 0 \Rightarrow ac > bc$

(II.11) $a > 0 \Leftrightarrow \frac{1}{a} > 0$

(II.12) $a^2 < b^2 \wedge a > 0 \wedge b > 0 \Rightarrow a < b$

Beweis.

$$(II.4) \text{ Sei } a < b \Rightarrow 0 = a + (-a) \stackrel{(II.2)}{<} b + (-a) = b - a.$$

$$\text{Ist } b - a > 0 \stackrel{(II.2)}{\Rightarrow} a < a + (b - a) = b$$

$$(II.5) \text{ Setze } b := 0 \text{ in (II.4)} \Rightarrow b - a = -a > 0.$$

$$\text{2ter Teil: Ersetze } a \text{ durch } -a \text{ in (II.5). } (a > 0 \Rightarrow -a < 0 \Leftrightarrow -(-a) > 0 \Leftrightarrow a > 0)$$

$$(II.6) \text{ (II.6) folgt aus (II.5), da } a < b \Leftrightarrow b - a > 0 \Leftrightarrow (-a) - (-b) > 0 \Leftrightarrow -b < -a$$

$$(II.7) \text{ Sei } a < b \wedge c < d \stackrel{(II.2)}{\Rightarrow} a + c < b + c \wedge b + c < b + d \stackrel{(II.1)}{\Rightarrow} a + c < b + d$$

$$(II.8) \text{ } a, b > 0 \stackrel{(II.3)}{\Rightarrow} ab > 0 \cdot b = 0 \text{ und } a, b < 0 \stackrel{(II.5)}{\Rightarrow} -a, -b > 0 \Rightarrow (-a)(-b) > 0 \Rightarrow ab > 0.$$

Umkehrung: Sei $ab > 0 \Rightarrow a \neq 0 \wedge b \neq 0$. Wäre $a > 0 \wedge b < 0 \stackrel{(II.5)}{\Rightarrow} -b > 0$. Wie gerade gezeigt folgt $a(-b) > 0 \Rightarrow -ab > 0 \stackrel{(II.5)}{\Rightarrow} ab < 0$ (Widerspruch zur Annahme).

Genauso zeigt man, dass die Annahme $a < 0 \wedge b > 0$ falsch ist.

(Zweite Behauptung lässt sich analog zeigen).

$$(II.9) \text{ } a \neq 0 \Leftrightarrow a > 0 \vee a < 0 \stackrel{(II.8)}{\Rightarrow} a^2 = a \cdot a > 0. \text{ Ferner ist } 1 \neq 0 \Rightarrow 1 = 1 \cdot 1 > 0$$

$$(II.10) \text{ Sei } c < 0 \Rightarrow -c > 0 \text{ und aus } a < b \text{ folgt } (-c) \cdot a < (-c) \cdot b \Rightarrow -c \cdot a < -c \cdot b \Rightarrow c \cdot b < c \cdot a$$

$$(II.11) \text{ } a \cdot a^{-1} = 1 > 0 \text{ (falls } a \neq 0) \stackrel{(II.8)}{\Rightarrow} a^{-1} > 0 \text{ sofern } a > 0 \text{ ist und aus } a^{-1} > 0 \text{ folgt } a > 0$$

$$(II.12) \text{ Sei } a^2 < b^2, a > 0, b > 0. \text{ Angenommen } a < b \text{ ist falsch, d.h. } a \geq b \Rightarrow a^2 \geq a \cdot a \geq a \cdot b \geq b \cdot b = b^2 \Rightarrow a^2 \geq b^2 \text{ (Widerspruch)}$$

□

3.3 Das Vollständigkeitsaxiom

Axiom 3.3.1 (Vollständigkeitsaxiom). Jede nicht-leere Teilmenge $M \subseteq \mathbb{R}$, welche nach oben beschränkt ist, besitzt eine kleinste obere Schranke, genannt das Supremum von M .

Notation 3.3.2 (Supremum). Das Supremum einer Menge M schreiben wir als $\sup M$

Definition 3.3.3 (Beschränktheit von Mengen). Sei $M \subseteq \mathbb{R}, M \neq \emptyset$.

- (i) M heißt **nach oben beschränkt**, falls ein $k \in \mathbb{R}$ existiert mit $\forall x \in M : x \leq k$. Jede solche Zahl k heißt obere Schranke von M .
- (ii) M heißt **nach unten beschränkt**, falls ein $k \in \mathbb{R}$ existiert mit $\forall x \in M : x \geq k$. Jede solche Zahl k heißt untere Schranke von M .
- (iii) M heißt **beschränkt**, falls ein $k \geq 0$ existiert mit $-k \leq x \leq k \quad \forall x \in M$

Definition 3.3.4 (Kleinste obere und größte untere Schranke). Eine Zahl $k \in \mathbb{R}$ heißt kleinste obere (größte untere) Schranke, falls

1. es eine obere (untere) Schranke ist und
2. es keine kleinere obere (größere untere) Schranke für M gibt

Folgerung 3.3.5. Allgemein gilt

$$x \leq k \Leftrightarrow -k \leq -x$$

das heißt für eine Menge $M \neq \emptyset$ gilt

$$\begin{aligned} & k \text{ ist eine obere Schranke für } M \\ \Leftrightarrow & -k \text{ ist eine untere Schranke für } -M := \{-x \mid x \in M\} \end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned} & k \text{ ist kleinste obere Schranke für } M \\ \Leftrightarrow & -k \text{ ist die größte untere Schranke für } -M \end{aligned}$$

Das heißt das Anordnungsaxiom ist äquivalent zum *Anordnungsaxiom*⁻¹ (Jede nicht-leere Teilmenge $M \subseteq \mathbb{R}$, welche nach unten beschränkt ist, besitzt eine größte untere Schranke, genannt das Infimum von M . Wir schreiben $\inf M$).

Beispiel 3.3.6.

$$\begin{aligned} M &:= [0, 1] = \{x \mid 0 \leq x \leq 1\} \\ \sup M &= 1 \quad \inf M = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A &:= (0, 1) = \{x \mid 0 < x < 1\} \\ \sup A &= 1 \quad \inf A = 0 \end{aligned}$$

Notation 3.3.7. Sei $M \subseteq \mathbb{R}, M \neq \emptyset$

Wir schreiben $\sup M < \infty$, falls M nach oben beschränkt ist, andernfalls setzen wir

$$\sup M := \infty$$

Falls M nach unten beschränkt ist, schreiben wir $\inf M > -\infty$, andernfalls setzen wir

$$\inf M := -\infty$$

Satz 3.3.8 (Eigenschaften des Supremums). Sei $M \subseteq \mathbb{R}$

- (i) Ist $\sup M < \infty$, so folgt $\forall \varepsilon > 0 \exists x \in M$ mit $\sup(M) - \varepsilon < x$
- (ii) Ist $\sup M = \infty$, so gilt $\forall k \geq 0 \exists x \in M$ mit $x > k$

Beweis.

1. Wir setzen $a := \sup M$. Sei $a < \infty$. Wäre (i) falsch, so folgt $\exists \varepsilon > 0 \forall x \in M : a - \varepsilon > x$. Das heißt $a - \varepsilon$ ist eine obere Schranke für M . Aber $a - \varepsilon < a$; (Widerspruch)
2. Ist $a = \infty$, so hat M keine obere Schranke. Nach Def. folgt für jedes $k \in \mathbb{R}$ existiert ein $x \in M : x > k$ □

Satz 3.3.9 (Eigenschaften des Infimums). Sei $M \subseteq \mathbb{R}$

- (i) Ist $\inf M > -\infty$, so folgt $\forall \varepsilon > 0 \exists x \in M$ mit $x < \inf(M) + \varepsilon$
- (ii) Ist $\inf M = -\infty$, so gilt $\forall k \geq 0 \exists x \in M$ mit $x < -k$

Beweis. Wende Satz 3.3.8 auf $-M := \{-x \mid x \in M\}$ an und beachte $\sup(-M) = \inf(M)$ □

Definition 3.3.10 (Maximum und Minimum). Es sei $M \subseteq \mathbb{R}, M \neq \emptyset$

$m \in M$ heißt größtes Element von M (Maximum), geschrieben $\max M$, falls $x \leq m \forall x \in M$.

Entsprechend: $m \in M$ heißt kleinstes Element von M (Minimum), geschrieben $\min M$, falls $x \geq m \forall x \in M$

Beispiel 3.3.11. Sei M beschränkt, $M \neq \emptyset$

$$\begin{aligned} M &:= \{x \mid 0 \leq x < 1\} \\ \sup M &= 1 \\ \inf M &= \min M = 0 \\ M &\text{ hat kein Maximum} \end{aligned}$$

4 Die natürlichen Zahlen \mathbb{N} und vollständige Induktion

Frage: Was sind die natürlichen Zahlen? (zum Beispiel $1, 2 := 1 + 1, 3 := 2 + 1, 4 := 3 + 1$, usw.)

4.1 Induktive Mengen

Definition 4.1.1 (Induktive Menge). Eine Teilmenge $A \subseteq \mathbb{R}$ heißt induktiv, falls

1. $1 \in A$ und
2. Ist $x \in A$ so ist auch $x + 1 \in A$

Beispiel 4.1.2.

$$\begin{aligned} [0, \infty) &= \{x \mid x \geq 0\} \text{ und} \\ [1, \infty) &= \{x \mid x \geq 1\} \text{ sind induktiv} \end{aligned}$$

Beobachtung 4.1.3 (Schnittmengen von induktiven Mengen). Ist $J \neq \emptyset$ Indexmenge und A_j induktive Teilmenge von \mathbb{R} für jedes $j \in J$. Dann folgt daraus: $A := \bigcap_{j \in J} A_j$ ist induktiv. Anders formuliert: Beliebige Schnittmengen von induktiven Mengen sind induktiv.

Beweis.

$$\begin{aligned} x \in A &\Leftrightarrow \forall j \in J : x \in A_j \\ &\Rightarrow x + 1 \in A_j \quad \forall j \in J \\ &\Rightarrow x + 1 \in \left(\bigcap_{j \in J} A_j \right) = A \end{aligned} \quad \square$$

Definition 4.1.4 (Definition von \mathbb{N}). Sei $\bar{f} := \{A \subseteq \mathbb{R} \mid A \text{ ist induktiv}\}$.

$$\begin{aligned} \mathbb{N} &:= \text{kleinste induktive Teilmenge von } \mathbb{R} \\ &:= \bigcap_{A \in \bar{f}} A \end{aligned}$$

d. h. $\mathbb{N} \subseteq A$, falls A induktiv ist.

Satz 4.1.5 (Induktionsprinzip). Ist $M \subseteq \mathbb{N}$ induktiv $\Rightarrow M = \mathbb{N}$

Beweis. Nach Voraussetzung ist $M \subseteq \mathbb{N}$ und aus der Definition von \mathbb{N} als Schnitt aller induktiven Teilmengen von \mathbb{R} ist auch $\mathbb{N} \subseteq M \Rightarrow \mathbb{N} = M$. \square

4.2 Vollständige Induktion

Satz 4.2.1 (Induktionsbeweis). Für jedes $n \in \mathbb{N}$ sei eine Aussage B_n gegeben derart, dass folgendes gilt:

1. B_1 ist wahr.
2. Aus der Annahme, dass B_n ($n \in \mathbb{N}$) wahr ist folgt, dass B_{n+1} wahr ist.

Dann ist B_n wahr $\forall n \in \mathbb{N}$.

Beweis. Definiere: $M := \{n \in \mathbb{N} \mid B_n \text{ ist wahr}\} \subseteq \mathbb{N}$.

Zu zeigen: $M = \mathbb{N}$. Also reicht es nach Satz 4.1.5 zu zeigen, dass M induktiv ist.

1. $1 \in \mathbb{N}$, da B_1 wahr ist.
2. Ist $n \in M$ dann ist B_n wahr $\Rightarrow B_n + 1$ ist wahr $\Rightarrow n + 1 \in M \Rightarrow M$ ist induktiv $\Rightarrow M = \mathbb{N}$ □

Bemerkung 4.2.2 (Starke Induktion). Die starke Induktion ist eine Variante der vollständigen Induktion. Bei dieser beweist man folgendes:

1. B_1 ist wahr.
2. für alle $n \in \mathbb{N}$ gilt $B_1, B_2, B_3, \dots, B_n$ ist wahr $\Rightarrow B_{n+1}$ ist wahr.

Beispiel 4.2.3. Zu zeigen ist: $B_n : n < 2^n$

Beweis.

I-Anfang B_1 ist wahr, da $1 < 2^1 = 2$

I-Schritt Induktionsannahme B_n ist wahr für ein $n = k$, d.h. $k < 2^k$. Und Schluß zu zeigen:
 $k + 1 < 2^{k+1} \Rightarrow 2^{k+1} = 2 \cdot 2^k > 2k \geq k + 1$ □

Übung 4.2.4. Zeigen Sie, dass $2k \geq k + 1$ für alle $k \in \mathbb{N}$ gilt.

Beispiel 4.2.5 (Gaußsche Summenformel). Zu zeigen: $1 + 2 + 3 + \dots + n = \frac{n \cdot (n+1)}{2} \quad \forall n \in \mathbb{N}$

Beweis. $B_n : 1 + 2 + \dots + n = \frac{n \cdot (n+1)}{2}$

I-Anfang $B_1 : 1 = \frac{1 \cdot (1+1)}{2} = \frac{2}{2} = 1$

I-Schritt B_n ist wahr für ein $k \in \mathbb{N}$, d.h. $1 + 2 + \dots + k = \frac{k \cdot (k+1)}{2}$

$$\begin{aligned} 1 + 2 + \dots + k + (k + 1) &= \frac{k \cdot (k + 1)}{2} + (k + 1) \\ &= (k + 1) \cdot \left(\frac{k}{2} + 1 \right) \\ &= \frac{(k + 1) \cdot (k + 2)}{2} \end{aligned}$$

Also ist B_n wahr für $n = k + 1$. Nach dem Prinzip der vollständigen Induktion folgt $\forall n \in \mathbb{N} : B_n$ ist wahr, d.h. $1 + 2 + \dots + n = \frac{n \cdot (n+1)}{2}$ □

4 Die natürlichen Zahlen \mathbb{N} und vollständige Induktion

Satz 4.2.6 (Eigenschaften von \mathbb{N}).

1. $n \geq 1 \quad \forall n \in \mathbb{N}$
2. $n + m \in \mathbb{N} \quad \forall n, m \in \mathbb{N}$
3. $n \cdot m \in \mathbb{N} \quad \forall n, m \in \mathbb{N}$
4. Für $n \in \mathbb{N}$ gilt entweder $n = 1$ oder $n - 1 \in \mathbb{N}$
5. $(n - m) \in \mathbb{N} \quad \forall n, m \in \mathbb{N}$ mit $m < n$

Beweis (1.)

I-Anfang $n \geq 1$ gilt für $n = 1$

I-Schritt Nach Anfang: $n \geq 1$ ist wahr für ein $n = k$.

Da $k + 1 > k \Rightarrow k + 1 > k \geq 1 \Rightarrow k + 1 \geq 1$

□

Beweis (2.) Fixiere $m \in \mathbb{N}$ für $n \in \mathbb{N}$. Behauptung: $B_n : m + n \in \mathbb{N}$

I-Anfang $B_1 : m + 1 \in \mathbb{N}$, da \mathbb{N} induktiv ist.

I-Schritt Nach Anfang: B_n ist wahr für $n = k$, d.h. $(m + k) \in \mathbb{N}$. Somit für $k + 1 : m + (k + 1) = (m + k) + 1 \in \mathbb{N} \Rightarrow B_n$ ist wahr $\forall n \in \mathbb{N}$

□

Beweis (3.) Fixiere $m \in \mathbb{N}$ für $n \in \mathbb{N}$. Behauptung: $B_n : m \cdot n \in \mathbb{N}$

I-Anfang $B_1 : m \cdot 1 = m \in \mathbb{N}$

I-Schritt Nach Anfang: B_n ist wahr für $n = k$, d.h. $m \cdot (k + 1) = mk + m \in \mathbb{N}$ gilt nach Satz 2.

□

Beweis (4.) $B_n : n = 1 \vee n - 1 \in \mathbb{N}$

I-Anfang $B_1 : 1 = 1$

I-Schritt Nehmen an, für ein $n = k$ ist G_k wahr. Also ist entweder (a) $k = 1$ oder (b) $(k - 1) \in \mathbb{N}$. Für $n = k + 1$ gilt dann im Fall (a): $(k + 1) - 1 = k \in \mathbb{N}$

Im Fall (b): $(k + 1) - 1 = (k - 1) + 1$ und es gilt $(k - 1) \in \mathbb{N}$. Daraus folgt, dass $(k - 1) + 1 \in \mathbb{N}$, da \mathbb{N} induktiv ist.

□

Beweis (5.) $B_n : n - m \in \mathbb{N}$ für jedes $m, n \in \mathbb{N}$ mit $m < n$

I-Anfang B_1 leere Behauptung, da kein m existiert, mit $m < 1$ (nach (1.)).

I-Schritt B_n wahr für ein $n = k$. Das heißt $k - 1 \in \mathbb{N} \quad \forall m \in \mathbb{N}$ mit $m < k$.

Zu zeigen: $(k + 1) - m \in \mathbb{N} \quad \forall m < k + 1$. Ist $m = 1 \Rightarrow m - 1 = 0$ und $(k + 1) - m = k + 1 - m = k \in \mathbb{N}$.

Ist $m > 1 \xRightarrow{(4.)} m - 1 \in \mathbb{N}$. Da $m < k + 1 \Rightarrow m - 1 < k \Rightarrow (k + 1) - m = k - (m - 1) \in \mathbb{N}$ (nach Annahme).

□

Korollar 4.2.7. Es gibt kein $n \in \mathbb{N}$ mit $0 < n < 1$. Ferner gilt $\forall n \in \mathbb{N}$ gibt es keine natürliche Zahl $m \in \mathbb{N}$ mit $n < m < n + 1$ oder mit $n - 1 < m < n$.

Übung 4.2.8. Beweisen Sie das vorherige Korollar.

Notation 4.2.9 (Zahlenmengen).

$$\begin{aligned}
 \mathbb{N}_0 &:= \mathbb{N} \cup \{0\} \\
 -\mathbb{N} &:= \{-n \mid n \in \mathbb{N}\} \\
 \mathbb{Z} &:= \mathbb{N} \cup \{0\} \cup -\mathbb{N} && \text{(Menge der ganzen Zahlen)} \\
 \mathbb{Q} &:= \left\{ \frac{p}{q} \mid p \in \mathbb{Z}, q \in \mathbb{N} \right\} && \text{(Menge der rationalen Zahlen)} \\
 \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q} &&& \text{(Irrationale Zahlen)}
 \end{aligned}$$

Bemerkung 4.2.10. Sei für $n \in \mathbb{Z}$ B_n eine Aussage und $n_0 \in \mathbb{N}$.

Dann gilt $(\forall n \geq n_0 : B_n) \Leftrightarrow (B_{n_0} \text{ ist wahr}) \wedge (\text{Ist } B_n \text{ wahr für } n \geq n_0 \text{ so ist auch } B_{n+1} \text{ wahr})$

Satz 4.2.11. $n, k \in \mathbb{Z} \Rightarrow a + b \in \mathbb{Z}$ und $a \cdot b \in \mathbb{Z}$

Beweis. Folgt aus Satz 4.2.6 mit $-(-a) = a$ $a > 0 \Rightarrow -a < 0$ □

Satz 4.2.12 (Satz von Archimedes). $\forall x \in \mathbb{R} \exists n \in \mathbb{N} : x < n$. (Das heißt \mathbb{N} ist eine nach oben unbeschränkte Teilmenge von \mathbb{R})

Beweis. Angenommen die Aussage ist falsch. Das heißt $\exists x \in \mathbb{R}$ mit $n \leq x \quad \forall n \in \mathbb{N}$
 (Vollständ.) $\Rightarrow a := \sup \mathbb{N}$ existiert und $n < a \quad \forall n \in \mathbb{N}$

Es gilt $a + 1 > a \Rightarrow a - 1 < a$, das heißt $a - 1$ ist keine obere Schranke für \mathbb{N}

$\Rightarrow \exists n \in \mathbb{N} : a - 1 < n \Rightarrow a < n + 1 \in \mathbb{N}$. Widerspruch zu a ist obere Schranke für \mathbb{N} . □

Korollar 4.2.13. $\forall x \in \mathbb{R} \exists n \in \mathbb{N} : -n < x$

Beweis. Wende vorherigen Satz auf $-x$ an. $\Rightarrow \exists n \in \mathbb{N} : -x < n \Rightarrow x > -n$ □

Satz 4.2.14 (Wohlordnungsprinzip für \mathbb{N}). Jede nichtleere Menge natürlicher Zahlen hat ein kleinstes Element.

Beweis. Sei $M \subseteq \mathbb{N}, M \neq \emptyset$. Es gilt $\inf \mathbb{N} = 1 \Rightarrow a = \inf M \geq 1 > -\infty$. Zu zeigen: $a \in M$.

Annahme: $a \notin \mathbb{N} \Rightarrow a < m \quad \forall m \in \mathbb{N}$

Satz 3.3.9 besagt, dass $\forall \varepsilon > 0 \exists m \in M : m < a + \varepsilon$.

1) Wähle $\varepsilon = 1 \Rightarrow \exists m \in M : m < a + 1$.

2) Wähle $\varepsilon = a - m \Rightarrow \exists m' \in M : m' < a + \varepsilon = m$. Das heißt $m', m \in M$ mit $a < m' < m < a + 1$

$\Rightarrow 0 < m - m' < 1 \stackrel{(5.)}{\Rightarrow} m - m' \in \mathbb{N}$. Widerspruch zu Korollar 4.2.7 □

5 Summe, Produkt, Wurzeln

5.1 Summenzeichen, Produktzeichen

Definition 5.1.1. Seien $m \leq n$, $m, n \in \mathbb{N}_0$. Für jedes $k \in \mathbb{N}_0$, $m \leq k \leq n$, sei $a_k \in \mathbb{R}$. Dann setzt man:

$$\sum_{k=m}^n a_k = a_m + a_{m+1} + a_{m+2} + \cdots + a_n$$

und

$$\prod_{k=m}^n a_k = a_m \cdot a_{m+1} \cdot a_{m+2} \cdot \cdots \cdot a_n$$

Für $n \in \mathbb{N}_0$, $n < m$ setzt man $\prod_{k=m}^n a_k = 1$.

Definition 5.1.2 (Fakultät). Sei $n \in \mathbb{N}$, dann gilt:

$$n! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \cdots \cdot n$$

und wir definieren

$$0! = 1$$

Alternativ lässt sich rekursiv definieren:

$$\begin{aligned} 0! &:= 1 \\ n! &= (n-1)! \cdot n \end{aligned}$$

Satz 5.1.3. Die Anzahl aller möglichen Anordnungen einer n -elementigen Menge $\{A_1, \dots, A_n\}$ ist gleich $n!$.

Wenn wir beispielsweise die Menge $\{1, 2, 3\}$ betrachten. Mögliche Anordnungen: $\{1, 2, 3\}$, $\{1, 3, 2\}$, $\{2, 1, 3\}$, $\{2, 3, 1\}$, $\{3, 1, 2\}$, $\{3, 2, 1\}$. Somit gibt es 6 Möglichkeiten, was $3!$ entspricht.

Induktionsbeweis.

I-Anfang $n = 1$, es gibt eine Anordnung $\{A_1\}$ und es gilt $1! = 1$

I-Schritt Die Gesamtzahl aller Anordnungen von $\{A_1, \dots, A_{n+1}\}$ ist gleich

$$\begin{aligned} &(n+1) \cdot [\text{Gesamtzahl von Anordnungen von } \{A_1, \dots, A_n\}] \\ &\stackrel{\text{I-Ann}}{=} (n+1) \cdot n! = (n+1)! \end{aligned} \quad \square$$

5.2 Binomischer Lehrsatz

Definition 5.2.1 (Binomialkoeffizient). Für $n, k \in \mathbb{N}_0$ setzt man:

$$\binom{n}{k} := \frac{n \cdot (n-1) \cdot \cdots \cdot (n-k+1)}{k!} = \frac{n!}{k! \cdot (n-k)!} \quad (n \text{ über } k)$$

Bemerkung 5.2.2 (Spezielle Binomialkoeffizienten). $\binom{n}{0} = 1$, $\binom{n}{n} = 1$, $\binom{n}{k} = 0$ für $k > n$

Satz 5.2.3. Die Anzahl der k -elementigen Teilmengen einer n -elementigen Menge $\{A_1, \dots, A_n\}$ ist gleich $\binom{n}{k}$.

Lemma 5.2.4. $\forall k, n \in \mathbb{N}$ gilt $\binom{n}{k} = \binom{n-1}{k-1} + \binom{n-1}{k}$.

Beweis.

$$\begin{aligned}
 \binom{n-1}{k} + \binom{n-1}{k-1} &= \frac{(n-1)!}{k! \cdot (n-1-k)!} + \frac{(n-1)!}{(k-1)! \cdot (n-1-k+1)!} \\
 &= \frac{(n-1)! \cdot (n-k)}{k! \cdot (n-k)!} + \frac{(n-1)! \cdot k}{k! \cdot (n-k)!} \\
 &= \frac{(n-1)! \cdot [n-k+k]}{k! \cdot (n-k)!} \\
 &= \frac{n!}{k! \cdot (n-k)!} \stackrel{\text{Def.}}{=} \binom{n}{k} \quad \square
 \end{aligned}$$

Beweis von Satz 5.2.3 (Induktion nach n).

I-Anfang $n = 1, \{A_1\}$. Wenn $k = 0$, dann gibt es eine Möglichkeit und es gilt $\binom{1}{0} = 1$. Wenn $k = 1$, gibt es auch eine Möglichkeit und es gilt $\binom{1}{1} = 1$.

I-Schritt $n \rightarrow n+1$

Die Behauptung sei für $M_n = \{A_1, \dots, A_n\}$ schon bewiesen. Wir betrachten $M_n + 1 = \{A_1, \dots, A_{n+1}\}$. Für $k = 0$ und $k = n+1$ ist die Behauptung offensichtlich.

Für $1 \leq k \leq n$ gehört jede k -elementige Teilmenge von M_{n+1} zu genau einer der folgenden Klassen:

1. T_0 besteht aus k -elementigen Teilmengen, die A_{n+1} nicht enthalten.
2. T_1 besteht aus denjenigen Teilmengen, die A_{n+1} enthalten.

In T_0 gibt es nach Induktionsannahme $\binom{n}{k}$ Elemente.

In T_1 gibt es $\binom{n}{k-1}$ Elemente³.

Insgesamt:

$$\binom{n}{k} + \binom{n}{k-1} \stackrel{5.2.4}{=} \binom{n+1}{k} \quad \square$$

Satz 5.2.5 (Binomischer Lehrsatz). Sei $x, y \in \mathbb{R}$ und $n \in \mathbb{N}$. Dann gilt:

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

Beispiel 5.2.6 (Folgerung der binomischen Formel aus dem binomischen Lehrsatz). Es sei $n = 2$. Es gilt $\binom{2}{0} = 1$, $\binom{2}{1} = 2$, $\binom{2}{2} = 1$. Daraus folgt:

$$(x+y)^2 = x^2 + 2xy + y^2$$

Beweis von Satz 5.2.5.

IA: $n = 0$

$$\begin{aligned}
 (x+y)^0 &= 1 \\
 \sum_{k=0}^0 \binom{0}{k} \cdot x^k \cdot y^{0-k} &= \binom{0}{0} \cdot 1 \cdot 1 = 1
 \end{aligned}$$

³Wir wissen, dass A_{n+1} bereits ein Element der Teilmenge ist. Damit müssen wir noch $k-1$ aus n Elementen auswählen. Die Formel dafür folgt aus der Induktionsannahme

Induktionsschritt: $n \rightarrow n + 1$

$$\begin{aligned}
 (x+y)^{n+1} &= (x+y)^n \cdot (x+y) = (x+y)^n \cdot x + (x+y)^n \cdot y \\
 (x+y)^n \cdot x &\stackrel{\text{I-An}}{=} \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \cdot x^{n-k} \cdot y^k \cdot x \\
 &= 1 \cdot x^{n+1} + \sum_{k=1}^n \binom{n}{k} \cdot x^{n+1-k} \cdot y^k \\
 (x+y)^n \cdot y &= \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \cdot x^{n-k} \cdot y^{k+1} & (l := k+1) \\
 &= \sum_{l=1}^{n+1} \binom{n}{l-1} \cdot x^{n+1-l} \cdot y^l \\
 &= \sum_{k=1}^{n+1} \binom{n}{k-1} \cdot x^{n+1-k} \cdot y^k \\
 \Rightarrow (x+y)^{n+1} &= x^{n+1} + \sum_{k=1}^n \left[\binom{n}{k} + \binom{n}{k+1} \right] \cdot x^{n+1-k} \cdot y^k + y^{n+1} \\
 &\stackrel{5.2.4}{=} \sum_{k=0}^{n+1} \binom{n+1}{k} \cdot x^{n+1-k} \cdot y^k \quad \square
 \end{aligned}$$

Bemerkung 5.2.7. Sei $x > 0$, dann gilt $(1+x)^n = 1 + \underbrace{\binom{n}{1}x}_{n \cdot x} + \underbrace{\sum \dots}_{>0} > 1 + n \cdot x$

5.3 Bernoullische Ungleichung

Satz 5.3.1. Es sei $n \in \mathbb{N}$ und $a \in \mathbb{R}$, $a > -1$. Dann gilt

$$(1+a)^n \geq 1 + na$$

Beweis. Wir verwenden vollständige Induktion:

I-Anfang $n = 1 \Rightarrow 1 + a = 1 + a$

I-Schritt $n \rightarrow n + 1$

$$(1+a)^{n+1} = (1+a)^n \cdot (1+a) \stackrel{\text{I-Ann}}{\geq} (1+na) \cdot (1+a) = 1 + na + a + na^2 \geq 1 + (n+1) \cdot a \quad \square$$

5.4 Wurzeln

Satz 5.4.1 (Existenz und Eindeutigkeit der Quadratwurzel). Für jedes $c \in \mathbb{R}$, $c > 0$, gibt es genau ein $x > 0$, so dass $x^2 = c$ ist.

Beweis. Eindeutigkeit

$$x_1 > 0, x_2 > 0: (x_1)^2 = (x_2)^2 = c \Rightarrow 0 = ((x_1)^2 - (x_2)^2) = (x_1 - x_2) \cdot \underbrace{(x_1 + x_2)}_{>0} \Rightarrow x_1 = x_2$$

Existenz. Wir definieren $M := \{z \in \mathbb{R} \mid z \geq 0, z^2 \leq c\}$. Dann gilt $0 \in M \Rightarrow M \neq \emptyset$

M ist beschränkt, weil $(1+c)^2 = 1 + 2c + c^2 > c$, $z \in M \Rightarrow z < 1 + c$

Somit $\exists \sup M$ und wir definieren $x := \sup M$. Zu zeigen: $x^2 = c$

Wir nehmen an, dass $x^2 < c$ und setzen $\varepsilon := \min \left\{ 1, \frac{c-x^2}{2x+1} \right\} \Rightarrow 0 < \varepsilon \leq 1 \Rightarrow \varepsilon^2 < \varepsilon$

$$(x + \varepsilon)^2 = x^2 + 2\varepsilon x + \varepsilon^2 < x^2 + \varepsilon(2x + 1) \leq x^2 + c - x^2 = c$$

$$\Rightarrow x + \varepsilon \in M \text{ (Widerspruch)} \Rightarrow x^2 \geq c$$

Wir nehmen an, dass $x^2 > c$, $\varepsilon := \min \left\{ \frac{x^2 - c}{2x}, \frac{x}{2} \right\}$, $\varepsilon > 0$, $x - \varepsilon \geq x - \frac{x}{2} > 0$

$$(x - \varepsilon)^2 = x^2 - 2x\varepsilon + \varepsilon^2 > x^2 - 2x\varepsilon \geq x^2 - x^2 + c \Rightarrow (x - \varepsilon)^2 > c \Rightarrow x \neq \sup M \text{ (Widerspruch)}$$

$$\Rightarrow x^2 = c \quad \square$$

Bemerkung 5.4.2. $x = \sqrt{c}$, $x = c^{\frac{1}{2}}$, x ist die Quadratwurzel von c

Satz 5.4.3 (Existenz und Eindeutigkeit der Wurzel). Für $n \in \mathbb{N}$ und für jedes $c \in \mathbb{R}$, $c \geq 0$ gibt es genau ein $x \geq 0$, $x \in \mathbb{R}$, so dass $x^n = c$.

Beweis. Eindeutigkeit

$$x_1 > 0, x_2 > 0, (x_1)^n - (x_2)^n = c, 0 = ((x_1)^n - (x_2)^n) = (x_1 - x_2) \cdot \left(\sum_{k=0}^{n-1} (x_1)^{n-k-1} \cdot (x_2)^k \right) \\ \Rightarrow x_1 = x_2 \quad \square$$

Die Existenz ist Aufgabe auf dem Übungsblatt.

Definition 5.4.4 (Spezielle Potenzen). $m, n \in \mathbb{N}$ $x^{\frac{m}{n}} := \left(x^{\frac{1}{n}} \right)^m$, $x^0 = 1$, $0^m = 0$ mit $m \neq 0$, $0^0 = 1$

5.5 Absolutbetrag

Definition 5.5.1 (Betrag). $|a| := \begin{cases} a & a > 0 \\ 0 & a = 0 \\ -a & a < 0 \end{cases}$

Satz 5.5.2 (Eigenschaften des Betrags).

$$(i) \quad |a| \geq 0, |a| = 0 \Leftrightarrow a = 0$$

$$(ii) \quad |\lambda \cdot a| = |\lambda| \cdot |a|, \forall \lambda, a \in \mathbb{R}$$

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

Beweis von (iii).

$$\begin{aligned} |a + b|^2 &= (a + b)^2 = a^2 + 2ab + b^2 \\ &\leq |a|^2 + 2|a||b| + |b|^2 = (|a| + |b|)^2 \\ &\Rightarrow |a + b| \leq |a| + |b| \end{aligned} \quad \square$$

Definition 5.5.3 (Geometrische Betrachtung des Betrags). Man nennt $|a - b|$ den Abstand zweier Punkte $a, b \in \mathbb{R}$ auf der Zahlengerade.

Satz 5.5.4 (Eigenschaften von Differenzen im Betrag).

- (i) $|a - b| \geq 0, |a - b| = 0 \Leftrightarrow a = b$
- (ii) $|a - b| = |b - a|$
- (iii) $|a - b| \leq |a - c| + |b - c| \quad \forall c \in \mathbb{R}$

Beweis von (iii).

$$|a - b| = |a - c + c - b| \leq |a - c| + |c - b| = |a - c| + |b - c| \quad \square$$

Satz 5.5.5. $\forall a, b \in \mathbb{R}$ gilt $||a| - |b|| \leq |a - b|$

Beweis.

$$\begin{aligned} |a| &= |a - b + b| \leq |a - b| + |b| \\ \Rightarrow |a| - |b| &\leq |a - b| \\ |b| - |a| &\leq |b - a| = |a - b| \\ \Rightarrow |a - b| &\geq ||a| - |b|| \quad \square \end{aligned}$$

Folgerung 5.5.6.

- (i) $|a - b| \geq |a| - |b|$
- (ii) $|a + b| = |a - (-b)| \geq |a| - |-b|$

Bemerkung 5.5.7. Durch Induktion leitet man her, dass:

$$\left| \sum_{i=1}^n a_i \right| \leq \sum_{i=1}^n |a_i| \quad a_i \in \mathbb{R}$$

6 [*] Folgen und Grenzwerte

6.1 Konvergenz

Definition 6.1.1 (Reelle Folge). Eine reelle Folge ist eine Abbildung $\mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$. Alternative Notation: $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$, (a_1, a_2, \dots)

Beispiel 6.1.2. $a_n = \frac{1}{n}$, $n \geq 1$ $(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots)$

Definition 6.1.3 (Konvergenzkriterium). Sei $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge reeller Zahlen. Die Folge heißt konvergent gegen $a \in \mathbb{R}$, falls gilt:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists n_0 \in \mathbb{N} : |a_n - a| < \varepsilon \text{ für alle } n > n_0$$

a heißt Grenzwert von $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ und man schreibt

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

Beispiel 6.1.4 (Nachweis von Konvergenz). Es sei

$$(a_n)_{n \in \mathbb{N}} = 1 + \frac{(-1)^n}{2n}$$

wir definieren ε und n_0

$$\varepsilon > 0, \quad n_0 = \frac{1}{2\varepsilon}$$

und wenden das Konvergenzkriterium an

$$\begin{aligned} |a_n - 1| &= \left| 1 + \frac{(-1)^n}{2n} - 1 \right| = \left| \frac{(-1)^n}{2n} \right| < \frac{|(-1)^n|}{\left| \frac{2}{2\varepsilon} \right|} = \varepsilon \\ \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} a_n &= 1 \end{aligned}$$

Bemerkung 6.1.5 („Fast alle Elemente“). Wir sagen, dass fast alle Element der Folge $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Eigenschaft (E) haben, wenn es höchstens eine endliche Anzahl von a_n existiert, die die Eigenschaft (E) nicht erfüllen.

Definition 6.1.6 (Alternativ formuliertes Konvergenzkriterium). Sei $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge, dann heißt diese Folge konvergent gegen $a \in \mathbb{R}$, wenn $\forall \varepsilon > 0$ und für fast alle a_n gilt: $|a_n - a| < \varepsilon$

Definition 6.1.7 (Nullfolge). Eine Folge, die gegen 0 konvergiert, heißt Nullfolge.

Definition 6.1.8 (Divergenz). Eine nicht-konvergente Folge heißt divergent.

Definition 6.1.9 (ε -Umgebung). Für $\varepsilon > 0$, $a \in \mathbb{R}$ versteht man unter der ε -Umgebung von a das Intervall $]a - \varepsilon, a + \varepsilon[$

6.2 Geometrische Bedeutung der Konvergenz

Visualisierung 6.2.1.

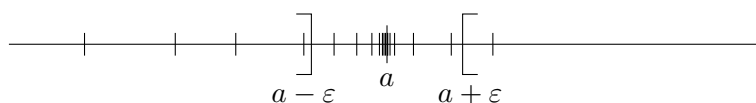


Abbildung 2: Geometrische Darstellung einer konvergenten Folge und ihrer ε -Umgebung

6.3 Eigenschaften von Folgen und Konvergenzen

Definition 6.3.1 (Beschränktheit von Folgen). Eine Folge $(a_n)_n$ heißt nach oben beschränkt, falls es ein $k \in \mathbb{R}$ gibt mit

$$\forall n \in \mathbb{N}: a_n \leq k \quad (k \text{ ist obere Schranke für } (a_n)_n)$$

Beschränktheit nach unten wird analog definiert.

$(a_n)_n$ heißt beschränkt, falls ein $k \geq 0$ existiert mit

$$\forall n \in \mathbb{N}: -k \leq a_n \leq k \quad \text{bzw.} \quad \forall n \in \mathbb{N}: |a_n| \leq k$$

Satz 6.3.2. Jede konvergente Folge $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ ist beschränkt.

Beweis. Sei a der Grenzwert von $(a_n)_n$ ($\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$).

Das heißt für $\varepsilon = 1 \Rightarrow \exists N \in \mathbb{N}: |a_n - a| < 1 \quad \forall n \geq N$

$$|a_n| = |a_n - a + a| \leq \underbrace{|a_n - a|}_{<1} + |a| < 1 + |a| \quad \forall n \geq N$$

Setze $k := \max(|a_1|, |a_2|, \dots, |a_{N-1}|, 1 + |a|) \geq 0$

$$\Rightarrow |a_n| \leq k \quad \forall n \in \mathbb{N} \quad \square$$

Satz 6.3.3 (Eindeutigkeit des Grenzwerts). Der Grenzwert einer konvergenten Folge $(a_n)_n$ ist eindeutig.

Beweis. Annahme: $a_n \rightarrow a$ und $a_n \rightarrow b$ mit $a \neq b$. Dann gilt o.B.d.A., dass $a < b$.

Wir setzen $\varepsilon = \frac{b-a}{2} > 0$.

$$\Rightarrow \exists N_1 \in \mathbb{N}: |a_n - a| < \varepsilon \quad \forall n \geq N_1$$

$$\Rightarrow \exists N_2 \in \mathbb{N}: |a_n - b| < \varepsilon \quad \forall n \geq N_2$$

$$N := \max(N_1, N_2)$$

$$\Rightarrow \forall n \geq N: a_n < a + \varepsilon = a + \frac{b-a}{2} = \frac{b+a}{2} = b - \varepsilon$$

$$\forall n \geq N: a_n > b - \varepsilon = \frac{b+a}{2}$$

$$\Rightarrow a_n < \frac{b+a}{2} < a_n \quad \forall n \geq N \quad (\text{Widerspruch}) \quad \square$$

Satz 6.3.4 (Eigenschaften von konvergenten Folgen). Seien $(x_n)_n, (y_n)_n$ konvergente reelle Folgen mit $x_n \rightarrow a, y_n \rightarrow b$ für $n \rightarrow \infty$. Dann gilt:

(a) $x_n + y_n \rightarrow a + b$ ($\lim(x_n + y_n) = \lim x_n + \lim y_n$).

(b) $x_n \cdot y_n \rightarrow a \cdot b$ ($\lim(x_n \cdot y_n) = \lim x_n \cdot \lim y_n$).

(c) $\lambda \cdot y_n \rightarrow \lambda \cdot b$ ($\lim(\lambda \cdot y_n) = \lambda \cdot \lim y_n$). ($\lambda \in \mathbb{R}$)

(d) Ist $b \neq 0$, so ist $y_n \neq 0$ für fast alle $n \in \mathbb{N}$ und $\frac{x_n}{y_n}$ ist für fast alle n definiert und

$$\lim\left(\frac{x_n}{y_n}\right) = \frac{\lim x_n}{\lim y_n} = \frac{a}{b}.$$

(e) $|x_n| \rightarrow |a|$ ($\lim_{n \rightarrow \infty} |x_n| = |\lim_{n \rightarrow \infty} x_n|$)

(f) Ist $x_n \leq y_n$ für fast alle $n \in \mathbb{N} \Rightarrow a = \lim_{n \rightarrow \infty} x_n \leq b = \lim_{n \rightarrow \infty} y_n$.

Beweis.

(a) Nach Satz 5.5.4 gilt

$$|x_n + y_n - (a + b)| = |x_n - a + (y_n - b)| \leq |x_n - a| + |y_n - b|$$

Aufgrund der Konvergenz der Folgen gilt

$$\begin{aligned} \forall \varepsilon > 0 \exists N_1 : |x_n - a| < \frac{\varepsilon}{2} \quad \forall n \geq N_1 \\ \forall \varepsilon > 0 \exists N_2 : |y_n - b| < \frac{\varepsilon}{2} \quad \forall n \geq N_2 \end{aligned}$$

Wir wählen $N = \max(N_1, N_2)$

$$\Rightarrow |(x_n + y_n) - (a + b)| \leq |x_n - a| + |y_n - b| \leq \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon \quad \forall n \geq N$$

(b) Umformen, um eine passende Ungleichung zu erreichen

$$\begin{aligned} x_n \cdot y_n - ab &= (x_n - a + a) \cdot y_n - ab \\ &= (x_n - a) \cdot y_n + a \cdot y_n - ab \\ &= (x_n - a) \cdot y_n + a \cdot (y_n - b) \\ \Rightarrow |x_n \cdot y_n - ab| &= |(x_n - a) \cdot y_n + a \cdot (y_n - b)| \\ &\leq |x_n - a| \cdot |y_n| + |a| \cdot |y_n - b| \end{aligned}$$

Nach Satz 6.3.2 ist y_n beschränkt

$$\exists k \geq 0 : |y_n| \leq k \quad \forall n \in \mathbb{N}$$

Nach der Konvergenz der Folgen gilt außerdem

$$\begin{aligned} \forall \varepsilon > 0 \exists N_1, N_2 : |x_n - a| < \frac{\varepsilon}{2(k+1)} \quad \forall n \geq N_1 \\ |y_n - b| < \frac{\varepsilon}{2(|a|+1)} \quad \forall n \geq N_2 \\ \Rightarrow \forall n \geq \max(N_1, N_2) : |x_n \cdot y_n - ab| &\leq \frac{\varepsilon}{2(k+1)} \cdot k + |a| \cdot \frac{\varepsilon}{2(|a|+1)} \leq \varepsilon \end{aligned}$$

(c) Setze $y_n = \lambda \rightarrow \lambda$ und verwende (b)

(d) Wir wählen $\varepsilon := \frac{|b|}{2}$

$$\exists N \in \mathbb{N} : |y_n - b| < \varepsilon = \frac{|b|}{2} \quad \forall n \geq N.$$

$$\begin{aligned} \forall n \geq N : |y_n| &= |y_n - b + b| = |b + (y_n - b)| \\ &\geq |b| - |y_n - b| > |b| - \frac{|b|}{2} = \frac{|b|}{2} \\ &> 0 \end{aligned}$$

$\Rightarrow y_n \neq 0$ für fast alle n und somit $\frac{x_n}{y_n}$ wohldefiniert für fast alle $n \in \mathbb{N}$

Wir betrachten den Spezialfall $x_n = 1$

$$\left| \frac{1}{y_n} - \frac{1}{b} \right| = \left| \frac{b - y_n}{y_n \cdot b} \right| = \frac{|b - y_n|}{|y_n| \cdot |b|}.$$

Wir wissen schon, dass $\exists N_1: |y_n| \geq \frac{|b|}{2} \quad \forall n \geq N_1$

$$\Rightarrow \forall n \geq N_1: \left| \frac{1}{y_n} - \frac{1}{b} \right| \leq \frac{|y_n - b|}{|y_n| \cdot |b|} \leq \frac{2 \cdot |y_n - b|}{|b| \cdot |b|}$$

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N_2: |y_n - b| < \frac{|b|^2}{2} \cdot \varepsilon$$

$$\Rightarrow \forall n \geq \max(N_1, N_2): \left| \frac{1}{y_n} - \frac{1}{b} \right| < \frac{2}{|b|^2} \cdot \frac{|b|^2}{2} \cdot \varepsilon = \varepsilon$$

Jetzt wenden wir (b) an und dann gilt

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n}{y_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(x_n \cdot \frac{1}{y_n} \right) = \lim x_n \cdot \lim \frac{1}{y_n} = a \cdot \frac{1}{b} = \frac{a}{b}$$

(e) Wir zeigen mit der Umkehrung der Dreiecksungleichung

$$\begin{aligned} ||x_n| - |a|| &\stackrel{\text{Dreiecks.}}{\leq} |x_n - a| \\ &\Rightarrow |x_n| \rightarrow |a| \end{aligned}$$

(f) Angenommen $a > b$. Wir wählen $\varepsilon = \frac{a-b}{2}$.

$$\Rightarrow \exists N_1: |x_n - a| < \varepsilon \quad \forall n \geq N_1$$

$$\Rightarrow \exists N_2: |y_n - b| < \varepsilon \quad \forall n \geq N_2$$

Für $n \geq \max(N_1, N_2)$ folgt

$$\begin{aligned} x_n &> a - \varepsilon = a + \frac{a-b}{2} = \frac{a+b}{2} = b + \frac{a-b}{2} = b + \varepsilon > y_n \\ &\Rightarrow x_n > y_n \end{aligned}$$

□

Satz 6.3.5 (Sandwich Satz). Seien $(a_n)_n$, $(b_n)_n$, $(c_n)_n$ Folgen mit $\lim a_n = a$, $\lim (b_n - a_n) = 0$ und $a_n \leq c_n \leq b_n$ für fast alle $n \in \mathbb{N}$.

Dann folgt, dass $(c_n)_n$ und $(b_n)_n$ jeweils gegen a konvergieren.

Beweis.

1. Schritt: $\lim b_n = a$.

Sei $\varepsilon > 0$. Da $a_n \rightarrow a$, $\exists N_1 : |a_n - a| < \frac{\varepsilon}{2} \quad \forall n \geq N_1$

$0 \leq b_n - a_n$ ist Nullfolge $\Rightarrow \exists N_2 : |b_n - a_n| < \frac{\varepsilon}{2} \quad \forall n \geq N_2$

$$\begin{aligned} |b_n - a| &= |b_n - a_n + a_n - a| \\ &\leq |b_n - a_n| + |a_n - a| \\ &\leq \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon \quad \forall n \geq \max(N_1, N_2) \end{aligned}$$

2. Schritt: $\lim c_n = a$.

$$\begin{aligned} \lim a_n = a &= \lim b_n \\ \Rightarrow \forall \varepsilon > 0 \exists N_1, N_2 : &|a_n - a| < \varepsilon \quad \forall n \geq N_1 \\ &\text{und } |b_n - a| < \varepsilon \quad \forall n \geq N_2 \\ a - \varepsilon < a_n < a + \varepsilon &\quad \forall n \geq N_1 \\ a - \varepsilon < b_n < a + \varepsilon &\quad \forall n \geq N_2 \end{aligned}$$

Auch gilt $a_n \leq c_n \leq b_n \quad \forall n \geq N_3$ und wir definieren $N := \max(N_1, N_2, N_3)$

$$\Rightarrow a - \varepsilon < a_n \leq c_n \leq b_n < a + \varepsilon \quad \forall n \geq N$$

Das heißt $|c_n - a| < \varepsilon \quad \forall n \geq N$. Das heißt $\lim c_n = a$

□

6.4 [*] Monotone Konvergenz

Wir sind bisher immer davon ausgegangen, dass wir den Grenzwert einer Folge bereits kennen. Das folgende Unterkapitel beschäftigt sich damit, die Konvergenz einer Folge nachzuweisen, wenn deren Grenzwert nicht bekannt ist.

Definition 6.4.1 (Monotonie). Eine reelle Folge $(a_n)_n$ heißt

- (i) monoton wachsend, wenn $a_n \leq a_{n+1} \quad \forall n \in \mathbb{N}$
- (ii) streng monoton wachsend, wenn $a_n < a_{n+1} \quad \forall n \in \mathbb{N}$
- (iii) monoton fallend, wenn $a_n \geq a_{n+1} \quad \forall n \in \mathbb{N}$
- (iv) streng monoton fallend, wenn $a_n > a_{n+1} \quad \forall n \in \mathbb{N}$

Wir nennen $(a_n)_n$ (streng) monoton, falls sie (streng) monoton wachsend oder fallend ist.

Satz 6.4.2 (Monotone Konvergenz). Eine monoton wachsende Folge $(a_n)_n$ konvergiert genau dann, wenn $(a_n)_n$ nach oben beschränkt ist.

Und eine monoton fallende Folge $(a_n)_n$ konvergiert genau dann, wenn sie nach unten beschränkt ist.

Lemma 6.4.3 (Hilfaussage für monotone Konvergenz). Jede nach oben (bzw. unten) beschränkte Folge besitzt eine kleinste obere (bzw. größte untere) Schranke.

Beweis. Sei $(a_n)_n$ nach oben beschränkt und $S := \{c \in \mathbb{R} \mid a_n \leq c \ \forall n\} \neq \emptyset^4$.

Dann ist S nach unten beschränkt, da $a_1 \leq c \ \forall c \in S$

$\Rightarrow a := \inf S$ existiert

Behauptung: a ist obere Schranke für $(a_n)_n$, das heißt $a \in S$.

Angenommen $a \notin S$ (a ist keine obere Schranke)

$\Rightarrow \exists n_0 \in \mathbb{N}: a_{n_0} > a$.

Wir setzen $\varepsilon := a_{n_0} - a > 0$. Und $\exists c \in S: c < a + \varepsilon = a + a_{n_0} - a = a_{n_0}$. Widerspruch zu $c \in S$.

Das heißt a ist obere Schranke für $(a_n)_n$. □

Beweis von Satz 6.4.2. Angenommen $(a_n)_n$ ist monoton wachsend und nach oben beschränkt.

$$a := \sup_{n \in \mathbb{N}} a_n$$

$$\Rightarrow a_n \leq a \quad \forall n \in \mathbb{N}$$

Sei $\varepsilon > 0 \Rightarrow a - \varepsilon$ keine obere Schranke für $(a_n)_n$ mehr.

$$\Rightarrow \exists N \in \mathbb{N}: a_N \geq a - \varepsilon$$

Sei $n \geq N$. Dann gilt:

$$a_N \leq a_{N+1} \leq a_{N+2} \leq \dots \leq a_{N+k} = a_n$$

$$\Rightarrow \forall n \geq N: a - \varepsilon < a_n$$

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

□

Alternativer Beweis. ⁵

Sei $(a_n)_n$ eine Folge mit $a_n = f(n), f: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$

$\text{Bild}(f) = f(\mathbb{N})$ nach oben beschränkt

$$a := \sup(f(\mathbb{N})) \geq a_n \quad \forall n \in \mathbb{N}$$

□

⁴Folgt aus der Beschränktheit

⁵Dieser Beweis bezieht sich laut Vorlesung auf Lemma 14, welches allerdings nicht existiert. Gemeint ist vermutlich Satz 14 (hier Satz 6.4.2) oder Lemma 15 (hier Lemma 6.4.3)

Beispiel 6.4.4.

1. Berechnen von \sqrt{c} für $c > 0$.

$$\begin{aligned} x^2 = c &\Leftrightarrow x = \frac{c}{x} \quad x > 0 \\ &\Leftrightarrow x = \frac{1}{2} \left(x + \frac{c}{x} \right) \end{aligned}$$

Folge x_n : Wählen $x_0 > 0$. Für $n \in \mathbb{N}$ sei $x_n = \frac{1}{2} \left(x_{n-1} + \frac{c}{x_{n-1}} \right)$

Behauptung 1: $x_n \geq \sqrt{c} \quad \forall n \in \mathbb{N}$

Bew.:

$$x_1 = \frac{1}{2} \left(x_0 + \frac{c}{x_0} \right)$$

haben AGM⁶: $\forall a, b \geq 0: ab \leq \left(\frac{a+b}{2} \right)^2$

$$0 \leq x^2 - 2xy + y^2 \Leftrightarrow xy \leq \frac{x^2 + y^2}{2}$$

Setzen $x = \sqrt{a}$ und $y = \sqrt{b}$, $\sqrt{ab} \leq \frac{ab}{2}$

$$\begin{aligned} (x_1)^2 &\geq \frac{1}{2} \left(x_0 - \frac{c}{x_0} \right)^2 \geq x_0 \cdot \frac{c}{x_0} = c \\ x_1 &\geq \sqrt{c} \end{aligned}$$

Falls

Behauptung 2: $(x_n)_n$ ist monoton fallend.

Beweis

$$x_{n+1} = \frac{1}{2} \left(x_n + \frac{c}{x_n} \right)$$

haben für $n \geq 1$: $(x_n)^2 = \left(\frac{1}{2} \left(x_{n+1} + \frac{c}{x_{n+1}} \right) \right)^2 \geq c$

$$\begin{aligned} &\Rightarrow x_n \geq \frac{c}{x_n} \\ &\Rightarrow x_{n+1} \geq \frac{1}{2} \left(x_n + \frac{c}{x_n} \right) \leq \frac{1}{2} (x_n + x_n) = x_n \end{aligned}$$

Nach dem Satz der monotonen Konvergenz ist $x := \lim_{n \rightarrow \infty} x_n$ entspricht?? $\geq \sqrt{c}$
 $= \lim_{n \rightarrow \infty} x_{n+1}$

$$\begin{aligned} x &= \lim x_n = \lim \frac{1}{2} \left(x_{n+1} + \frac{c}{x_{n+1}} \right) = \frac{1}{2} \left(x + \frac{c}{x} \right) \\ &\Leftrightarrow x = \sqrt{c} \end{aligned}$$

⁶Arithmetisch-geometrisches Mittel

2. $x_n = \frac{1}{n} \rightarrow 0$

$$\left| \frac{1}{n} - 0 \right| = \frac{1}{n}$$

geg. $\varepsilon > 0$ nach $n \in \mathbb{N}$, $N > \frac{1}{\varepsilon} \Leftrightarrow \varepsilon > \frac{1}{N}$

$$\Rightarrow \forall n \geq N: \left| \frac{1}{n} - 0 \right| = \frac{1}{n} \leq \frac{1}{N} < \varepsilon$$

Ähnlich funktioniert $x_n = \frac{1}{\sqrt{n}}$

3.

$$x_n := \frac{1 + 2 + 3 + \dots + n}{n^2} \rightarrow \frac{1}{2} \text{ für } n \rightarrow \infty$$

Mit Gaußscher Summenformel ($1 + 2 + 3 + \dots + n = \frac{n \cdot (n+1)}{2}$)

$$\Rightarrow x_n = \frac{\frac{n \cdot (n+1)}{2}}{n^2} = \frac{n^2 + n}{2n^2} = \frac{1 + \frac{1}{n}}{2} \rightarrow \frac{1}{2}$$

4. Sei $0 \leq q < 1$. $x_n := q^n \rightarrow 0$

Bew: Ist $q = 0 \Rightarrow x_n = 0^n = 0 \rightarrow 0$.

Also sei $0 < q < 1 \Rightarrow \frac{1}{q} > 1$

$$h := \frac{1}{q} - 1 > 0 \quad \frac{1}{q} = 1 + h, \quad q = \frac{1}{1+h}$$

$$\Rightarrow x_n = q^n \leq \left(\frac{1}{1+h} \right)^n = \frac{1}{(1+h)^n}$$

Nach Bernoulli: $(1+h)^n \geq 1 + nh$

$$\Rightarrow q^n = \frac{1}{(1+h)^n} \leq \frac{1}{1+nh}$$

5. Sei $-1 < q < 1 \Rightarrow x_n := q^n \rightarrow 0$. (Übung)

6. Sei $a > 0$, $x_n := a^{\frac{1}{n}} = \sqrt[n]{a} \rightarrow 1$

Bew: 1. Fall $a = 1 \Rightarrow x_n = 1$

2. Fall $a > 1 \Rightarrow a^{\frac{1}{n}} > a^{\frac{1}{n+1}} = 1$

$$h_n = a^{\frac{1}{n}} - 1 > 0 \text{ und } a + h_n = a^{\frac{1}{n+1}}$$

$$q = (a + h_n)^n \geq 1 + ab_1 \geq ab_1$$

$$\Rightarrow h_n < \frac{a}{n}$$

$$\left| a^{\frac{1}{n}} - 1 \right| = h_n < \frac{a}{n} \Rightarrow \lim a^{\frac{1}{n}} = 1$$

3. Fall $0 < a < 1$

$$b = \frac{1}{a} > 1$$

$$\Rightarrow \lim b^{\frac{1}{n}} = 1$$

$$= \lim \frac{1}{a^{\frac{1}{n}}}$$

$$\Rightarrow \lim a^{\frac{1}{n}} = 1$$

7. $x_n = \sqrt[n]{n} = n^{\frac{1}{n}} \rightarrow 1$

$$n \geq 2 \Rightarrow \frac{1}{n} > 1 \quad h_n := n^{\frac{1}{n}} - 1$$

$$\Rightarrow n = \left(n^{\frac{1}{n}} \right)^n = (1 + h_n)^n \geq 1 + n \cdot h_n > n \cdot h_n \Rightarrow h_n \leq \frac{h}{n} = 1$$

Aber: Binomialsatz

$$\begin{aligned}
 (1+h_n)^n &= \underbrace{\sum_{k=0}^n \binom{n}{k} (h_n)^k}_{\geq 0} \geq \binom{n}{0} \cdot (h_n)^0 \binom{n}{1} \cdot (h_n)^1 + \binom{n}{2} \cdot (h_n)^2 \\
 &= 1 + n \cdot h_n + \frac{n \cdot (n+1)}{2} (h_n)^2 \\
 &> \frac{n(n+1)}{2} \cdot h_n^2 \\
 \Rightarrow h_n^2 &< \frac{2n}{n(n+1)} = \frac{2}{n+1} \\
 0 < h_n &< \sqrt{\frac{2}{n+1}} \rightarrow 0 \\
 \Rightarrow \lim h_n &= 0 \Leftrightarrow \lim n^{\frac{1}{n}} = 1
 \end{aligned}$$

Definition 6.4.5. Eine reelle Folge $(x_n)_n$ strebt gegen unendlich, falls $\forall k \geq 0 \exists N \in \mathbb{N}: x_n \geq k \quad \forall n > N$
 $(\Leftrightarrow \forall k \geq 0$ ist $x_n < k$ für endlich viele $n \in \mathbb{N}$).
 $(x_n)_n$ strebt gegen $-\infty$, falls $(-x_n)_n$ gegen ∞ strebt.

$x_n = n$ divergiert gegen ∞

Satz 6.4.6. Falls $x_n \rightarrow \infty$ folgt $\frac{1}{x_n} \rightarrow 0$.

Ist $(x_n)_n$ Nullfolge mit $x_n > 0$ für fast alle $n \in \mathbb{N}$, so ist $\frac{1}{x_n} \rightarrow \infty$

Falls $x_n < 0$ für fast alle n , so folgt $\frac{1}{x_n} \rightarrow -\infty$

Beweis. Sei $x_n \rightarrow \infty$

$$\begin{aligned}
 &\Rightarrow \forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N}: x_n > \frac{1}{\varepsilon} \quad \forall n \geq N \\
 &\Rightarrow 0 < \frac{1}{x_n} < \varepsilon \quad \forall n \geq N, \text{ das heißt } \frac{1}{x_n} \rightarrow 0
 \end{aligned}$$

(Rest Übung) □

Beispiel 6.4.7. $\frac{n}{2^n} \rightarrow 0$ (Sogar $\forall k \in \mathbb{N}: \frac{n^k}{2^n} \rightarrow 0$)

Beweis. Zu zeigen: $x_n = \frac{2^n}{n} \rightarrow \infty$

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

$$\sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \geq \binom{n}{2} = \frac{n(n-1)}{2}$$

$$\Rightarrow x_n = \frac{2^n}{n} \geq \frac{n(n-1)}{2} = \frac{1}{2}(n-1)$$

$$\Rightarrow x_n \rightarrow \infty, \frac{1}{x_n} \rightarrow 0 \quad \square$$

Beispiel 6.4.8 (Die Eulersche Zahl).

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

$$b_n := \left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n+1}$$

$$\Rightarrow a_n b_n \quad \forall n \in \mathbb{N}$$

Behauptung:

$$a_n < a_{n+1} \text{ und } b_n > b_{n+1} \quad \forall n$$

Beweis. Sei $n \geq 2$

$$\begin{aligned}
 \frac{a_n}{a_{n-1}} &= \frac{\left(1 + \frac{1}{n}\right)^n}{\left(1 + \frac{1}{n-1}\right)^{n-1}} \\
 &= \left(1 + \frac{1}{n-1}\right) \cdot \frac{\left(1 + \frac{1}{n}\right)^n}{\left(1 + \frac{1}{n-1}\right)^n} \\
 &= \frac{n}{n-1} \cdot \left(\frac{\frac{n+1}{n}}{\frac{n}{n-1}}\right)^n = \frac{n}{n-1} \cdot \left(\frac{(n+1)}{n}\right)^n \\
 &= \frac{n}{n-1} \cdot \left(\frac{n^2-1}{n^2}\right)^n \\
 &= \frac{n}{n-1} \cdot \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)^n \\
 &\geq \frac{n}{n-1} \cdot \left(1 - \frac{n}{n^2}\right) = \frac{n}{n-1} \cdot \left(1 - \frac{1}{n}\right) \\
 &= 1 \Rightarrow a_n > a_{n-1} \quad \forall n \geq 2 \\
 &???
 \end{aligned}$$

Mit dem Satz der monotonen Konvergenz folgt:

$$\begin{aligned}
 &\Rightarrow a_1 < a_2 < \dots < a_n < b_n < b_{n+1} < \dots < b_1 \\
 &\Rightarrow e := \lim a_n = \lim \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n \text{ existiert}
 \end{aligned}$$

$$b := \lim b_n \text{ existiert, sogar } b = e \text{ Da } 1 < \frac{b_n}{a_n} = \frac{\left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n-1}}{\left(1 + \frac{1}{n}\right)^n} = 1 + \frac{1}{n} \rightarrow 1$$

$$1 = \lim \frac{b_n}{a_n} = \frac{\lim b_n}{\lim a_n} = \frac{b}{e} \Rightarrow b = e$$

$$\left(1 + \frac{1}{n}\right)^n < e < \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{n-1}$$

□

6.5 Häufungswerte und Teilfolgen

Wir möchten eine Folge $(a_n)_n$ „massieren“.

$$a_n = f(n), \quad f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$$

Wir wollen die Folgeglieder umordnen oder auch beliebige weglassen. Wie machen wir das und wie lässt sich das ausdrücken?

Definition 6.5.1 (Umordnung). Sei $(a_n)_n$ eine reelle Folge. Eine Umordnung ist gegeben durch eine Bijektion

$$\begin{aligned} \sigma : \mathbb{N} &\rightarrow \mathbb{N} \\ b_n &:= a_{\sigma(n)} \end{aligned} \quad (\text{Umordnung von } a_n)$$

Definition 6.5.2 (Ausdünnung). Es sei $\kappa : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ streng monoton wachsend

$$b_n := a_{\kappa(n)} \quad (\text{Teilfolge von } a_n)$$

Satz 6.5.3 (Konvergenz von Teilfolgen und Umordnungen). Für jede konvergente reelle Folge $(a_n)_n$ konvergiert jede Umordnung und jede Teilfolge gegen den selben Grenzwert.

*Beweis*⁷. Sei a_n konvergent gegen a und $\kappa : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ monoton wachsend ($\kappa(n+1) > \kappa(n)$).
 $\Rightarrow \kappa(j) \geq j \quad \forall j \in \mathbb{N}$ ⁸

$$b_j := a_{\kappa(j)}$$

$a_n \rightarrow a$, das heißt

$$\begin{aligned} \forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N} : a - \varepsilon < a_n < a + \varepsilon \quad \forall n \geq N \\ \Rightarrow \forall j \geq N : a - \varepsilon < a_{\kappa(j)} < a + \varepsilon \quad \forall j \geq N \\ \Rightarrow \lim_{j \rightarrow \infty} a_{\kappa(j)} = a \quad \text{d.h.} \quad \lim_{j \rightarrow \infty} b_j = a \end{aligned}$$

Für Umordnung: Sei $\sigma : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ Bijektion.

$$b_j := a_{\sigma(j)}$$

Wir haben $\forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N} : a - \varepsilon < a_n < a + \varepsilon$ und betrachten das Urbild

$$A := \sigma^{-1}(\{1, 2, 3, \dots, N\}) \subseteq \mathbb{N}$$

A hat endlich viele Elemente

$$\begin{aligned} L &:= \max(\sigma^{-1}(1), \sigma^{-1}(2), \dots, \sigma^{-1}(N)) \\ j \geq L &\Rightarrow \sigma(j) \geq N \\ &\Rightarrow \forall j \geq L : a - \varepsilon < a_{\sigma(j)} < a + \varepsilon \\ &\Rightarrow \lim_{j \rightarrow \infty} a_{\sigma(j)} = a \end{aligned}$$

□

⁷Nachtrag vom 28. November 2023.

⁸Lässt sich per Induktion nachweisen

Übung 6.5.4. Weisen Sie nach, dass sich der Grenzwert einer Folge nicht verändert, wenn man endlich viele Elemente ändert.

Definition 6.5.5 (Häufungswert). Sei $(a_n)_n$ reelle Folge. Eine reelle Zahl a heißt Häufungswert (oder Häufungspunkt) von a_n , falls $\forall \varepsilon > 0$ unendlich viele a_n in $(a - \varepsilon, a + \varepsilon)$ liegen. Das heißt:

$$a - \varepsilon < a_n < a + \varepsilon \text{ für unendlich viele } n$$

Das heißt $\forall L \in \mathbb{N} \exists n > L: a - \varepsilon < a_n < a + \varepsilon$

Beispiel 6.5.6.

1. $a_n = \frac{1}{n}$ hat Häufungswert 0
2. $a_n = (-1)^n$ hat Häufungswerte 1, -1
3. $a_n = n$ hat keinen Häufungswert
4. $a_n = (-1)^n + \frac{1}{n}$ hat Häufungswerte 1, -1

Satz 6.5.7 (Häufungswertkriterium über Teilfolgen). Eine reelle Zahl a ist genau dann Häufungswert einer Folge $(a_n)_n$, wenn eine Teilfolge von a_n existiert, die gegen a konvergiert.

Beweis. „ \Rightarrow “: a sei Häufungswert von a_n . Das heißt

$$\forall \varepsilon > 0 \forall L \in \mathbb{N} \exists n > L: a - \varepsilon < a_n < a + \varepsilon$$

- 1) Wir wählen $\varepsilon = 1 \Rightarrow \exists n_1 \in \mathbb{N}: a - 1 < a_{n_1} < a + 1$
- 2) Wir wählen $\varepsilon = \frac{1}{2}, L = n_1 + 1 \Rightarrow \exists n_2 > L > n_1: a - \frac{1}{2} < a_{n_2} < a + \frac{1}{2}$
- 3) Wir wählen $\varepsilon = \frac{1}{3} \Rightarrow \exists n_3 > n_2: a - \frac{1}{3} < a_{n_3} < a + \frac{1}{3}$
- j) Wir wählen $\varepsilon = \frac{1}{j+1} \Rightarrow \exists n_{j+1} > n_j: a - \frac{1}{j+1} < a_{n_{j+1}} < a + \frac{1}{j+1} \Rightarrow n_j < n_{j+1} \quad \forall j \in \mathbb{N}$

Wir definieren $\kappa(j) := n_j$ und $b_j := a_{\kappa(j)}$ als eine Teilfolge von $(a_n)_n$. Es gilt

$$a - \frac{1}{j} < b_j < a + \frac{1}{j} \quad \forall j \in \mathbb{N}$$

und nach Satz 6.3.5 konvergiert $(b_j)_j$ gegen a . □

Übung 6.5.8. Beweisen Sie mittels Konvergenzkriterien und der Definition von Häufungswerten die Rückrichtung des vorherigen Satzes.

6.6 Größter und kleinster Häufungswert - Limes superior und Limes inferior

Es sei $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine beschränkte reelle Folge.

$$x_n := \sup_{l \geq n} a_l$$

ist monoton fallend, weil

$$\sup_{l \geq n} a_l = \max(a_n, \sup_{l \geq n+1} a_l) \geq \sup_{l \geq n+1} a_l = x_{n+1}$$

$(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ ist monoton fallend und nach unten beschränkt.

$$\stackrel{6.4.2}{\Rightarrow} x = \lim x_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \sup_{l \geq n} a_l = \inf_{l \geq n} \sup_{l \geq n} a_l$$

existiert.

Genauso: $y_n := \inf_{l \geq n} a_l \Rightarrow y_n < y_{n+1}$ und y_n ist nach oben beschränkt und damit existiert:

$$y = \lim y_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \inf_{l \geq n} a_l = \sup_{l \geq n} \inf_{l \geq n} a_l$$

Definition 6.6.1 (Limes superior und inferior). Sei $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine beschränkte reelle Folge.

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} a_n := \lim_{n \rightarrow \infty} \sup_{l \geq n} a_l = \inf_{l \geq n} \sup_{l \geq n} a_l \quad (\text{Limes superior})$$

$$\liminf_{n \rightarrow \infty} a_n := \lim_{n \rightarrow \infty} \inf_{l \geq n} a_l = \sup_{l \geq n} \inf_{l \geq n} a_l \quad (\text{Limes inferior})$$

Damit gilt außerdem

$$\begin{aligned} y_n < x_n \quad \inf_{l \geq n} a_l &\leq \sup_{l \geq n} a_l \\ \Rightarrow \liminf_{n \rightarrow \infty} a_n &\leq \limsup_{n \rightarrow \infty} a_n \end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned} \limsup_{n \rightarrow \infty} (-a_n) &= - \liminf_{n \rightarrow \infty} a_n \\ \liminf_{n \rightarrow \infty} (-a_n) &= - \limsup_{n \rightarrow \infty} a_n \end{aligned}$$

Beispiel 6.6.2.

$$\begin{aligned} a_n = (-1)^n \Rightarrow \liminf_{n \rightarrow \infty} a_n &= -1 \\ \limsup_{n \rightarrow \infty} a_n &= 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \limsup_{n \rightarrow \infty} (-a_n) &= - \liminf_{n \rightarrow \infty} a_n \\ \liminf_{n \rightarrow \infty} (-a_n) &= - \limsup_{n \rightarrow \infty} a_n \end{aligned}$$

Lemma 6.6.3 (Charakterisierung von \limsup und \liminf). Sei $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ beschränkte reelle Folge. Dann gilt:

$$\begin{aligned} a^* = \limsup a_n &\Leftrightarrow \forall \varepsilon > 0 \quad \begin{array}{l} \text{ist } a_n < a^* + \varepsilon \text{ für fast alle } n \\ \text{und } a_n > a^* - \varepsilon \text{ für unendlich viele } n \end{array} \\ a_* = \liminf a_n &\Leftrightarrow \forall \varepsilon > 0 \quad \begin{array}{l} \text{ist } a_n > a_* - \varepsilon \text{ für fast alle } n \\ \text{und } a_n < a_* + \varepsilon \text{ für unendlich viele } n \end{array} \end{aligned}$$

Beweis für ersten Teil des Lemmas, zweiter analog. „ \Rightarrow “:

$$a^* = \limsup a_n = \inf_{n \rightarrow \infty} \sup_{l \geq n} a_l$$

Angenommen $\exists \varepsilon > 0: a_l \geq a^* + \varepsilon$ für unendlich viele l

$$\begin{aligned} &\Rightarrow \forall n \in \mathbb{N}: \sup_{l \geq n} a_l \geq a^* + \varepsilon \\ &\Rightarrow a^* = \inf_{n \in \mathbb{N}} \sup_{l \geq n} a_l \geq a^* + \varepsilon \quad (\text{Widerspruch}) \end{aligned}$$

Angenommen $\exists \varepsilon > 0: a_n \leq a^* - \varepsilon$ für fast alle n

$$\begin{aligned} &\Rightarrow \sup_{l \geq n} a_l \leq a^* - \varepsilon_0 \\ &\Rightarrow a^* = \lim_{n \rightarrow \infty} \sup_{l \geq n} a_l \leq a^* - \varepsilon_0 \quad (\text{Widerspruch}) \end{aligned}$$

„ \Leftarrow “: Sei $a^* \in \mathbb{R}$

$$\begin{aligned} &\forall \varepsilon > 0: a_n < a^* + \varepsilon \text{ für fast alle } n \\ &\quad a_n > a^* - \varepsilon \text{ für unendlich viele } n \\ &\Rightarrow \exists k \in \mathbb{N}: a_l < a^* + \varepsilon \quad \forall l \geq k \\ &\Rightarrow \forall n \geq k: \sup_{l \geq n} a_l \leq a^* + \varepsilon \\ &\quad \sup_{l \geq n} a_l > a^* - \varepsilon \\ &\Rightarrow \forall n \geq k: a^* - \varepsilon < \sup_{l \geq n} a_l \leq a^* + \varepsilon \\ &\Rightarrow a^* - \varepsilon \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \sup_{l \geq n} a_l \leq a^* + \varepsilon \quad \forall \varepsilon > 0 \\ &\Rightarrow \limsup a_n = a^* \quad \square \end{aligned}$$

Satz 6.6.4 (Eigenschaften von \limsup und \liminf). Sei a_n eine beschränkte reelle Folge und $H(a_n)$ die Menge der Häufungspunkte von a_n . Dann gilt

$$\limsup a_n, \liminf a_n \in H(a_n) \quad (1)$$

Insbesondere ist $H(a_n) \neq \emptyset$. Ferner ist

$$\forall x \in H(a_n): \liminf a_n \leq x \leq \limsup a_n \quad (2)$$

6.6 Größter und kleinster Häufungswert - Limes superior und Limes inferior

Beweis von (1).

$$\begin{aligned}
 a^* &:= \limsup a_n \\
 &\stackrel{6.6.3}{\Rightarrow} \forall \varepsilon > 0: a_n < a^* + \varepsilon \text{ für fast alle } n \\
 &\quad a_n > a^* - \varepsilon \text{ für unendlich viele } n \\
 &\Rightarrow \forall \varepsilon > 0: a^* - \varepsilon < a_n < a^* + \varepsilon \text{ für unendlich viele } n \\
 &\Rightarrow a^* \text{ ist Häufungswert von } (a_n)_n \quad \square
 \end{aligned}$$

Analog lässt sich der Beweis auch für $\liminf a_n$ führen.

Beweis von (2). Sei a Häufungswert von $(a_n)_n$. Annahme: $a > a^* := \limsup a_n$:

$$\Rightarrow a - \varepsilon < a_n < a + \varepsilon \text{ für unendlich viele } n$$

Wähle $\varepsilon = \frac{a - a^*}{2}$

$$\begin{aligned}
 &\Rightarrow a - \frac{a - a^*}{2} < a_n < a + \frac{a - a^*}{2} \\
 &\Rightarrow a_n > a - \frac{a - a^*}{2} = \frac{a + a^*}{2} = a^* + \varepsilon \text{ für unendlich viele } n
 \end{aligned}$$

Widerspruch zu Lemma 6.6.3

$$\Rightarrow a \leq \limsup a_n \quad \square$$

Mit $-a_n$ lässt sich analog zeigen, dass $a \geq \liminf a_n \quad \forall$ Häufungspunkte a von $(a_n)_n$.

Notation 6.6.5 (Limes superior/inferior von unbeschränkten Folgen). Es sei a_n nicht nach oben beschränkt. Dann setzen wir

$$\limsup a_n := +\infty$$

Ist a_n nicht nach unten beschränkt. Dann setzen wir

$$\liminf a_n := -\infty$$

Korollar 6.6.6 (Konvergenzkriterium nach limes superior und limes inferior). Eine reelle Folge a_n konvergiert genau dann, wenn a_n beschränkt ist und $\limsup a_n = \liminf a_n$.

Beweis. „ \Rightarrow “:

Jede konvergente Folge ist beschränkt.

a_n konvergiert gegen a genau dann, wenn $H(a_n) = \{a\}$

$$\Rightarrow \liminf a_n = a = \limsup a_n$$

„ \Leftarrow “: Sei $\liminf a_n = \limsup a_n = a$

$$\stackrel{6.6.3}{\Rightarrow} \forall \varepsilon > 0: a_n < a + \varepsilon \text{ für fast alle } n$$

und $a_n > a - \varepsilon$ für fast alle n

$$\Rightarrow \lim a_n = a \quad \square$$

Übung 6.6.7. Zeigen Sie: Wenn \liminf und \limsup als reelle Zahlen existieren, dann ist die Folge beschränkt.

Satz 6.6.8 (Satz von Bolzano-Weierstraß). Jede beschränkte reelle Folge a_n besitzt mindestens einen Häufungspunkt.

Beweis. $a^* := \limsup a_n$ ist ein Häufungspunkt von a_n nach Satz 6.6.4. □

Korollar 6.6.9. Jede beschränkte reelle Folge a_n hat eine konvergente Teilfolge.

Beweis. Nach Satz 6.6.8 ist $H(a_n) \neq \emptyset$ und nach Satz 6.5.7 gibt es zu jedem Häufungspunkt eine konvergente Teilfolge. □

6.7 Das Konvergenzkriterium von Cauchy

Definition 6.7.1 (Cauchy-Folge). Eine reelle Folge a_n heißt Cauchy-Folge, falls

$$\begin{aligned} & \forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N}: |a_n - a_m| < \varepsilon \quad \forall n, m \geq N \\ & (\Leftrightarrow \forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N}: |a_n - a_m| < \varepsilon \quad \forall n \geq m \geq N) \end{aligned}$$

Lemma 6.7.2. Jede konvergente reelle Folge a_n ist eine Cauchy-Folge.

Beweis. Es sei $(a_n)_n \rightarrow a$ eine reelle Folge.

$$\begin{aligned} & \forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N}: |a_n - a| < \frac{\varepsilon}{2} \quad \forall n \geq N \\ \Rightarrow & \text{Sei } n, m \geq N \Rightarrow |a_n - a_m| = |a_n - a + a - a_m| \\ & \leq |a_n - a| + |a - a_m| < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon \end{aligned} \quad \square$$

Lemma 6.7.3. Jede reelle Cauchy-Folge ist beschränkt.

Beweis. Es sei $\varepsilon = 1$

$$\begin{aligned} & \Rightarrow \exists N: |a_n - a_m| < 1 \quad \forall n, m \geq N \\ \Rightarrow & \forall n, m \geq N: |a_n| = |a_n - a_m + a_m| \\ & \leq |a_n - a_m| + |a_m| \\ & < 1 + |a_m| \end{aligned}$$

Da wir $m = N$ wählen können, gilt

$$\Rightarrow \forall n \geq N: |a_n| < 1 + |a_N|$$

Es gibt eine Schranke ab dem N -ten Folgenglied und damit gilt

$$\Rightarrow |a_n| \leq \max(|a_1|, |a_2|, \dots, |a_{N-1}|, 1 + |a_N|) \quad \square$$

Lemma 6.7.4. Eine reelle Cauchy-Folge a_n konvergiert genau dann, wenn sie eine konvergente Teilfolge hat.

Beweis.

„ \Rightarrow “: Klar, weil nach Satz 6.5.3 jede Teilfolge einer konvergenten Folge konvergiert.

„ \Leftarrow “: Sei b_j eine Teilfolge von a_n mit $b_j = a_{n_j}$ und $n_1 < n_2 < \dots < n_j < n_{j+1} < \dots$

Es sei $a := \lim b_j$. Behauptung: $\lim a_n = a$

Wir wissen:

$$\begin{aligned} & \forall \varepsilon > 0 \exists N_1 \in \mathbb{N}: |a - a_{n_j}| < \frac{\varepsilon}{2} \quad \forall j \geq N_1 \\ & \exists N_2 \in \mathbb{N}: |a_n - a_m| < \frac{\varepsilon}{2} \quad \forall m \geq n \geq N_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow & |a_n - a| = |a_n - a_{n_j} + a_{n_j} - a| \\ & \leq |a_n - a_{n_j}| + |a_{n_j} - a| \end{aligned}$$

Wir wählen $j \geq \max(N_1, N_2)$

$$\begin{aligned} \Rightarrow & |a_n - a| \leq |a_n - a_{n_j}| + |a_{n_j} - a| \\ & < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon \quad \forall n \geq N \\ \Rightarrow & \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a \end{aligned} \quad \square$$

Satz 6.7.5. Jede reelle Folge konvergiert genau dann, wenn sie eine Cauchy-Folge ist.

Beweis. „ \Rightarrow “: Folgt direkt aus Lemma 6.7.2

„ \Leftarrow “: Sei $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Cauchy-Folge $\xRightarrow{\text{Lemma 6.7.3}}$ $(a_n)_n$ ist beschränkt $\xRightarrow{\text{Satz 6.6.8}}$ $(a_n)_n$ hat eine konvergente Teilfolge $\xRightarrow{\text{Lemma 6.7.4}}$ $(a_n)_n$ ist konvergent \square

7 Dichtigkeit von \mathbb{Q} in \mathbb{R}

7.1 Dichtigkeit im Allgemeinen

Wir kennen bereits folgende Mengen:

$$\mathbb{Q} := \left\{ \frac{m}{n} \mid m \in \mathbb{Z} \wedge n \in \mathbb{N} \right\} \quad (\text{Rationale Zahlen})$$

$$\mathbb{Q} \subseteq \mathbb{R} \quad \mathbb{Q} \neq \mathbb{R}, \text{ da } \sqrt{2} \notin \mathbb{Q}$$

$$\mathbb{R} \setminus \mathbb{Q} \quad (\text{Irrationale Zahlen})$$

Bemerkung 7.1.1 (Größenvergleich der irrationalen und rationalen Zahlen). $\mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}$ ist sehr viel größer als \mathbb{Q} . (Wird später noch behandelt)

Definition 7.1.2 (Dichte Teilmenge). Sei $A \subseteq B (\subseteq \mathbb{R})$. A heißt dicht in B , falls

$$\forall b \in B \exists (a_n)_{n \in \mathbb{N}}, (a_n \in A \forall n \in \mathbb{N}) \text{ mit } \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = b$$

Das heißt für jedes $b \in B$ existiert eine Folge in A , die gegen b konvergiert.

Notation 7.1.3. Statt $\forall n \in \mathbb{N}: a_n \in A$ schreiben wir auch $(a_n)_n \subseteq A$.

7.2 Dichtheits-Begriff für rationale und reelle Zahlen

Wir wollen nun zeigen, dass \mathbb{Q} dicht in \mathbb{R} ist. Ziel:

$$\forall x \in \mathbb{R} \exists (a_n)_{n \in \mathbb{N}}, a_n \in \mathbb{Q} \text{ mit } \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = x$$

Lemma 7.2.1 (Zwischenwerte von reellen Zahlen).

(i) $\forall x, y \in \mathbb{R}$ mit $y - x > 1 \exists m \in \mathbb{Z}$ mit $x < m < y$

(ii) $\forall x, y \in \mathbb{R}$ mit $y > x \exists q \in \mathbb{Q}: x < q < y$

Beweis.

(i) Sei $y > x + 1$. Wir definieren

$$A := \{p \in \mathbb{Z} \mid p > x\} \subseteq \mathbb{Z}$$

A ist nach unten beschränkt und nach Satz 4.2.12 gilt $A \neq \emptyset$. Nach Satz 4.2.14 erweitert auf \mathbb{Z} folgt

$$\begin{aligned} &\Rightarrow m := \min(A) \text{ existiert, } m \in A \\ &\Rightarrow m - 1 \notin A, \quad m - 1 \in \mathbb{Z} \\ &\Rightarrow x < m, \quad m - 1 \leq x \\ &\Rightarrow m \leq x + 1 < x + (y - x) = y \\ &\Rightarrow x < m < y \end{aligned}$$

(ii) Sei $y > x \Leftrightarrow y - x > 0$

$$\begin{aligned} &\stackrel{4.2.12}{\Rightarrow} \exists n \in \mathbb{N}: n \cdot (y - x) > 1 \\ &\stackrel{(i)}{\Rightarrow} \exists m \in \mathbb{Z}: nx < m < ny \\ &\Leftrightarrow x < \frac{m}{n} < y \\ &\text{Wähle } q = \frac{m}{n} \end{aligned}$$

□

7 Dichtigkeit von \mathbb{Q} in \mathbb{R}

Folgerung 7.2.2 (Dichtheit von \mathbb{Q} in \mathbb{R}). Anwendung: $\forall x \in \mathbb{R} \exists (a_n)_n \in \mathbb{Q}$ mit $q_n \rightarrow x$

Beweis. Für $n \in \mathbb{N}$ wähle $y = x + \frac{1}{n}$

$$\begin{aligned} \stackrel{\text{Lemma 7.2.1}}{\Rightarrow} \exists q_n \in \mathbb{Q}: x < q_n < y = x + \frac{1}{n} \\ x < q_n < x + \frac{1}{n} \quad (\rightarrow x) \end{aligned}$$

Nach dem Sandwich-Satz (6.3.5) gilt

$$\Rightarrow q_n \rightarrow x \quad \square$$

Lemma 7.2.3. $\forall x \in \mathbb{R} \forall n \in \mathbb{N} \exists m_n \in \mathbb{Z}$:

$$\frac{m_n - 1}{n} \leq x < \frac{m_n}{n}$$

Übung 7.2.4. Beweisen Sie das vorherige Lemma.

Hinweis: Betrachte $A_n := \{p \in \mathbb{Z} \mid p > nx\} \subseteq \mathbb{Z}$. Behauptung: $m_n := \min A_n$ ermöglicht den Beweis.

Bemerkung 7.2.5 (Definition von irrationalen Exponenten über Folgen. Siehe Walter: Analysis 1, Kapitel 3.8 und 4.8). Sei $a > 0$

$$\Rightarrow \forall n \in \mathbb{N}: a^{\frac{1}{n}} = \sqrt[n]{a} \text{ existiert}$$

Da $a^n := \prod_{j=1}^n a$ $a^{-n} := \frac{1}{a^n}$ $a^0 := 1$ für $n \in \mathbb{N}$ gilt

$$a^m \text{ definiert} \quad \forall m \in \mathbb{Z}$$

Definiere: $m \in \mathbb{Z}$, $n \in \mathbb{N}$, $a^{\frac{m}{n}} := \left(a^{\frac{1}{n}}\right)^m$

Überprüfe Wohldefiniertheit. Das heißt ist $q = \frac{m_1}{n_1} = \frac{m_2}{n_2}$ muss gelten

$$\left(a^{\frac{1}{n}}\right)^{m_2} = a^{\frac{m_1}{n_1}} = a^{\frac{m_2}{n_2}} = \left(a^{\frac{1}{n_2}}\right)^{m_2}$$

Wir haben also eine Definition für rationale Exponenten. Um auch irrationale Exponenten abbilden zu können, gehen wir wie folgt vor. Für $x \in \mathbb{R}$ wähle $(q_n)_n \subseteq \mathbb{Q}$, $q_n \rightarrow x$ und definiere

$$a^x := \lim_{n \rightarrow \infty} a^{q_n}$$

Überprüfe: $a^x \cdot a^y = a^{x+y}$, $a^x b^x = (ab)^x$, $a^{-x} = \frac{1}{a^x}$ usw.

8 [*] Reihen (und Konvergenz von Reihen)

Bedeutung von endlichen Summen ist klar.

Frage: Gegeben eine reelle Folge a_n . Was ist $(a_1 + a_2 + a_3 + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} a_n)$?

8.1 [*] Konvergenz-Kriterien für Reihen

Definition 8.1.1 (Reihen als Partialsummen). Das Symbol

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n \quad (\text{Sei } a_n \text{ eine reelle Folge})$$

wird folgendermaßen verwendet:

- a) Es steht für die Folge der Partialsummen:

$$s_n := \sum_{j=1}^n a_j \quad \forall n \in \mathbb{N}$$

- b) Die Reihe $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ konvergiert, falls der Grenzwert der Partialsummen $\lim_{n \rightarrow \infty} s_n$ existiert. Wir setzen

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n := \lim_{n \rightarrow \infty} s_n$$

- c) Konvergiert $(s_n)_n$ nicht, so heißt $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ divergent. Falls s_n bestimmt divergiert so setzen wir

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n := \infty \quad (\text{Wenn } \lim_{n \rightarrow \infty} s_n = \infty)$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n := -\infty \quad (\text{Wenn } \lim_{n \rightarrow \infty} s_n = -\infty)$$

Satz 8.1.2 (Monotone Konvergenz für Reihen). Sei a_n eine reelle Folge mit $\forall n: a_n \geq 0$. Dann konvergiert die Reihe $\sum_{j=1}^{\infty} a_j$ genau dann, wenn die Folge der Partialsummen s_n nach oben beschränkt ist.

Beweis. Betrachte

$$s_{n+1} = \sum_{j=1}^{n+1} a_j = \sum_{j=1}^n a_j + a_{n+1} \geq \sum_{j=1}^n a_j = s_n$$

und wende Satz 6.4.2 an. □

Korollar 8.1.3. Für eine Reihe $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ mit $a_n \geq 0$ gilt entweder

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n < \infty \quad \text{oder} \quad \sum_{n=1}^{\infty} a_n = \infty$$

Beweis. Folgt direkt aus Satz 8.1.2. □

Bemerkung 8.1.4. Oft hat man Reihen der Form

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n = a_0 + a_1 + a_2 + \dots$$

$$s_n := \sum_{j=0}^n a_j \quad (n \in \mathbb{N}_0)$$

oder

$$s_n := a_0 + \sum_{j=1}^{\infty} a_j \quad (n \in \mathbb{N})$$

Sofern ein Limes existiert, gilt dann

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n := \lim s_n$$

Allgemein für $v \in \mathbb{Z}$ $a_v, a_{v+1}, a_{v+2}, \dots$

$$\sum_{n=v}^{\infty} a_n = a_v + a_{v+1} + \dots$$

$$s_n := \sum_{j=v}^n a_j \text{ def. Folge } (s_n)_{n \geq v}$$

Beispiel 8.1.5 (Geometrische Folge und Reihe).⁹

$$q \neq 1 \Rightarrow \sum_{j=0}^n q^j = \frac{1 - q^{n+1}}{1 - q} \quad \forall n \in \mathbb{N}_0$$

$$\text{Ist } |q| < 1: \sum_{n=0}^{\infty} q^n \text{ konvergiert und } \sum_{n=0}^{\infty} q^n = \frac{1}{1 - q} \quad (\text{geometrische Reihe})$$

Zum Beispiel $q = \frac{1}{2}$

$$\sum_{j=0}^n q^j = \frac{1 - q^{n+1}}{1 - q}$$

$$\Leftrightarrow (1 - q) \cdot \sum_{j=0}^n q^j = 1 - q^{n+1}$$

$$\frac{1}{2} \sum_{j=0}^n \left(\frac{1}{2}\right)^j = 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{n+1}$$

$$\Rightarrow 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{n+1} = \sum_{j=0}^n \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^j$$

$$= \sum_{j=0}^n \left(\frac{1}{2}\right)^{j+1} = \sum_{j=1}^{n+1} \left(\frac{1}{2}\right)^j$$

⁹Wir setzen $0^0 = 1$

Das heißt es sollte gelten

$$\sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{2}\right)^j = 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^n \quad \forall n \in \mathbb{N}$$

Dass dieser Zusammenhang gelten muss, lässt sich einfach veranschaulichen. Die linke Seite der Gleichung kann als Summe über Teilflächen des Einheitsquadrats¹⁰ visualisiert werden.

Erst wird eine Hälfte, dann ein Viertel, dann ein Achtel (usw.) des Quadrats hinzugefügt. Der zurückbleibende Flächeninhalt ist immer genauso groß wie das zuletzt hinzugefügte Stück. Dieser Term wird durch den rechten Teil der Gleichung beschrieben.

Beweis der Reihenformel.

$$\begin{aligned} s_n &:= \sum_{j=0}^n q^j \\ q \cdot s_n &= q \cdot \sum_{j=0}^n q^j = \sum_{j=0}^n q^{j+1} \\ &= \sum_{j=1}^{n+1} q^j && \text{(Indexshift)} \\ \Rightarrow (1-q) \cdot s_n &= s_n - q \cdot s_n = \sum_{j=0}^n q^j - \sum_{j=1}^{n+1} q^j && \text{(Reißverschlusssumme)} \\ &= q^0 - q^{n+1} = 1 - q^{n+1} \\ \Rightarrow s_n &= \frac{1 - q^{n+1}}{1 - q} && \square \end{aligned}$$

Beweis der Konvergenz für $|q| < 1$.

$$\begin{aligned} s_n &:= \sum_{j=0}^n q^j = \frac{1 - q^{n+1}}{1 - q} \\ \lim_{n \rightarrow \infty} q^n &= 0 = \lim_{n \rightarrow \infty} q^{n+1} && \text{(Weil } |q| < 1) \\ \stackrel{6.3.4}{\Rightarrow} \lim s_n &= \frac{1 - \lim_{n \rightarrow \infty} q^{n+1}}{1 - q} = \frac{1 - 0}{1 - q} = \frac{1}{1 - q} && \square \end{aligned}$$

Bemerkung 8.1.6. Ist $|q| \geq 1$, dann ist $1 + \underbrace{q}_{\geq 1} + \underbrace{q^2}_{\geq 1} + \underbrace{q^3}_{\geq 1} + \cdots + \underbrace{q^n}_{\geq 1} \geq 1 + n \rightarrow \infty$.

¹⁰Original: „Kuchen“

Beispiel 8.1.7 (Harmonische Reihe).

$$s_n := \sum_{j=1}^n \frac{1}{j}$$

$(s_n)_n$ ist monoton wachsend, aber nicht nach oben beschränkt. Das heißt $\lim_{n \rightarrow \infty} s_n = \infty \Rightarrow \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} = \infty$.

Beweis.

$$\begin{aligned} s_{2n} - s_n &= \sum_{j=n+1}^{2n} \frac{1}{j} \geq \sum_{j=n+1}^n \frac{1}{2n} = n \cdot \frac{1}{2n} = \frac{1}{2} \\ \Rightarrow s_2 - s_1 &\geq \frac{1}{2} \\ \Rightarrow s_2 &\geq s_1 + \frac{1}{2} = 1 + \frac{1}{2} > \frac{1}{2} \\ s_4 - s_2 &\geq \frac{1}{2} \\ \Rightarrow s_4 &\geq s_2 + \frac{1}{2} > \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1 \\ s_8 - s_4 &\geq \frac{1}{2} \\ \Rightarrow s_8 &\geq s_4 + \frac{1}{2} \geq \frac{3}{2} \\ \text{Induktion} \Rightarrow s_{(2^j)} &> \frac{j}{2} \quad \forall j \in \mathbb{N} \end{aligned}$$

Also ist $s_{(2^j)}$ nicht nach oben beschränkt $\Rightarrow (s_n)_n$ nicht nach oben beschränkt.

$$\stackrel{6.4.2}{\Rightarrow} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} s_n = +\infty \quad \square$$

Satz 8.1.8. Seien $\sum_{n=1}^{\infty} a_n, \sum_{n=1}^{\infty} b_n$ konvergente Reihen. Dann ist

$$\forall \lambda, \mu \in \mathbb{R}: \sum_{n=1}^{\infty} (\lambda \cdot a_n + \mu \cdot b_n)$$

konvergent und es gilt

$$\sum_{n=1}^{\infty} (\lambda \cdot a_n + \mu \cdot b_n) = \lambda \cdot \sum_{n=1}^{\infty} a_n + \mu \cdot \sum_{n=1}^{\infty} b_n$$

Beweis.

$$\begin{aligned} s_n &:= \sum_{j=1}^n a_n \quad t_n := \sum_{j=1}^n b_n \\ d_n &:= \sum_{j=1}^n (\lambda \cdot a_n + \mu \cdot b_n) = \lambda \cdot \sum_{n=1}^n a_n + \mu \cdot \sum_{n=1}^n b_n \\ &= \lambda \cdot s_n + \mu \cdot t_n \rightarrow \lambda \cdot s + \mu \cdot t \end{aligned} \quad (\text{Mit } s \text{ und } t \text{ als Limes})$$

\square

Satz 8.1.9 (Majoranten-Kriterium). Gegeben zwei Folgen $0 \leq a_n \leq b_n \quad \forall n \in \mathbb{N}$. Konvergiert

$$\sum_{n=1}^{\infty} b_n \quad \text{so konvergiert auch} \quad \sum_{n=1}^{\infty} a_n$$

und es gilt

$$0 \leq \sum_{n=1}^{\infty} a_n \leq \sum_{n=1}^{\infty} b_n$$

Beweis.

$$\begin{aligned} s_n &= \sum_{j=1}^n a_j & t_n &= \sum_{j=1}^n b_j \\ \Rightarrow s_{n+1} &= s_n + a_{n+1} \geq s_n \\ t_{n+1} &= t_n + b_{n+1} \geq t_n \\ \Rightarrow (s_n)_n, (t_n)_n &\text{ sind monoton wachsend} \end{aligned}$$

Mit der Konvergenz von $(t_n)_n$ und $(t_n)_n$ monoton wachsend folgt mit Satz 8.1.2

$$\begin{aligned} &\Rightarrow (t_n)_n \text{ ist beschränkt} \\ &\Rightarrow \exists M \geq 0: t_n \leq M \quad \forall n \in \mathbb{N} \\ 0 \leq a_n \leq b_n &\Rightarrow 0 \leq s_n \leq t_n \leq M \quad \forall n \in \mathbb{N} \\ &\Rightarrow (s_n)_n \text{ ist nach oben beschränkt und monoton wachsend} \\ &\stackrel{8.1.2}{\Rightarrow} \lim_{n \rightarrow \infty} s_n \text{ existiert} \\ s &:= \lim_{n \rightarrow \infty} s_n \leq \lim_{n \rightarrow \infty} t_n = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \end{aligned} \quad \square$$

Außerdem gilt:

$$t_n - s_n = \sum_{j=1}^n b_j - \sum_{j=1}^n a_j = \sum_{j=1}^n (b_j - a_j) \geq 0$$

Satz 8.1.10 (Minoranten-Kriterium). Sei $0 \leq b_n \leq a_n \quad \forall n \in \mathbb{N}$ und

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} b_n &= \infty \\ \Rightarrow \sum_{n=1}^{\infty} a_n &\text{ divergiert auch bestimmt gegen } \infty \end{aligned}$$

Beweis.

$$t_n = \sum_{j=1}^n b_n \quad s_n = \sum_{j=1}^n a_n$$

Analog zum Beweis des Majoranten-Kriteriums gilt:

$$(s_n)_n, (t_n)_n \text{ sind monoton wachsend und } t_n \leq s_n \quad \forall n \in \mathbb{N}$$

Dann lässt sich folgern

$$\begin{aligned}
 \sum_{n=1}^{\infty} b_n = \infty &\Leftrightarrow (t_n)_n \text{ wächst über alle Grenzen} \\
 &\Rightarrow (s_n)_n \text{ wächst über alle Grenzen} \\
 &\Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} s_n = \infty = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \quad \square
 \end{aligned}$$

Beispiel 8.1.11 (Anwendung des Minoranten-Kriteriums). Es sei

$$a_n \geq \frac{c}{n} \quad \forall n \in \mathbb{N} \quad (c > 0)$$

Nach Minorantenkriterium und der Divergenz der harmonischen Reihe gilt

$$\Rightarrow \sum_{n=1}^{\infty} a_n = \infty$$

Beispiel 8.1.12 (Anwendung des Majoranten-Kriteriums). Es sei wieder $c > 0$. Dann folgt aus

$$0 \leq a_n \leq c \cdot q^n \wedge 0 \leq q < 1$$

nach Majoranten-Kriterium und dem Konvergenzkriterium der geometrischen Reihe, dass

$$\Rightarrow \sum_{n=1}^{\infty} a_n \text{ konvergiert} \quad (b_n = c \cdot q^n)$$

Bemerkung 8.1.13 (Abgeschwächtes Majoranten-Kriterium). Die Konvergenz/Divergenz von Reihen (und Folgen) ändert sich nicht, wenn man endlich viele Summanden (Folgeglieder) abändert. Für das Majoranten-Kriterium reicht also, dass $0 \leq a_n \leq b_n$ für fast alle $n \in \mathbb{N}$, damit

$$\sum_{n=1}^{\infty} b_n \text{ konvergiert} \Rightarrow \sum_{n=1}^{\infty} a_n \text{ konvergiert}$$

Das gleiche gilt analog für das Minoranten-Kriterium

Satz 8.1.14 (Cauchyscher Verdichtungssatz). Sei $(a_n)_n$ eine monoton fallende Nullfolge. Dann gilt

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{\infty} a_n \text{ konvergiert} \\ \Leftrightarrow \sum_{n=0}^{\infty} 2^n \cdot a_{(2^n)} \text{ konvergiert} \end{aligned} \quad (\text{Verdichtete Reihe})$$

Beweis. „ \Leftarrow “ 1. Schritt. Zu zeigen: $a_n \geq 0 \quad \forall n \in \mathbb{N}$.

$$\begin{aligned} a_n \geq a_{n+1} \geq a_{n+2} \geq \dots \geq a_{n+l} \rightarrow 0 \text{ für } l \rightarrow \infty \\ \Rightarrow a_n \geq 0 \quad \forall n \in \mathbb{N} \end{aligned}$$

2. Schritt:

$$\begin{aligned} s_n &:= \sum_{j=0}^n a_j \\ t_n &:= \sum_{\nu=0}^n 2^\nu \cdot a_{(2^\nu)} \end{aligned}$$

Jedes $\bar{n} \in \mathbb{N}$ können wir eindeutig schreiben als $\bar{n} = 2^\nu + l$ mit $\nu \in \mathbb{N}_0$, $0 \leq l < 2^\nu$ ¹¹.
Sei $1 \leq n < 2^k$ für ein $k \in \mathbb{N}_0$

$$\begin{aligned} s_n &= \sum_{j=0}^n a_j = a_0 + \sum_{j=1}^n a_j \\ &\leq a_0 + \sum_{j=1}^{2^k-1} a_j = a_0 + \sum_{\nu=0}^{k-1} \left(\sum_{l=0}^{2^\nu-1} \underbrace{a_{(2^\nu+l)}}_{\leq a_{(2^\nu)}} \right) \\ &\leq a_0 + \sum_{\nu=0}^{k-1} \left(\sum_{l=0}^{2^\nu-1} a_{(2^\nu)} \right) \\ &= a_0 + \sum_{\nu=0}^{k-1} 2^\nu \cdot a_{(2^\nu)} \\ &= a_0 + t_{k-1} \\ \Rightarrow \forall n < 2^k \text{ gilt } s_n &\leq a_0 + t_{k-1} \end{aligned}$$

Angenommen

$$\begin{aligned} \sum_{\nu=0}^{\infty} 2^\nu \cdot a_{2^\nu} \text{ konvergent} &\Leftrightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} t_n = t \text{ existiert} \\ \Rightarrow s_n &\leq a_0 + \lim_{k \rightarrow \infty} t_{k-1} = a_0 + t \quad \forall n \in \mathbb{N} \end{aligned}$$

Somit ist $a_0 + t$ eine obere Schranke von $(s_n)_n$. Da $s_n \leq s_{n+1} \xrightarrow{6.4.2} \lim_{n \rightarrow \infty} s_n$ existiert

$$\Rightarrow \sum_{n=0}^{\infty} a_n \text{ konvergent}$$

¹¹Es lässt sich zeigen, dass l und ν in diesem Fall eindeutig sind.

„ \Rightarrow “ Sei $n \geq 2^k$

$$\begin{aligned}
 s_n &= \sum_{j=0}^n a_j \geq \sum_{j=0}^{2^k} a_j \\
 &= \sum_{\nu=0}^k \left(\sum_{l=0}^{2^\nu-1} \underbrace{a_{(2^\nu+l)}}_{\geq a_{(2^\nu+1)}} \right) \\
 &\geq \sum_{\nu=0}^k \left(\sum_{l=0}^{2^\nu-1} a_{(2^\nu+1)} \right) = \sum_{\nu=0}^k 2^\nu \cdot a_{(2^\nu)} + 1 \\
 &= \sum_{\nu=1}^{k+1} 2^{\nu-1} a_{(2^\nu)} = \frac{1}{2} \sum_{\nu=1}^{k+1} 2^\nu a_{(2^\nu)} \\
 &= \frac{1}{2} \left(\sum_{\nu=0}^{k+1} 2^\nu a_{(2^\nu)} - a_0 \right) \\
 &= t_{k+1} - a_0 \\
 \Rightarrow t_k &\leq t_{k+1} \leq s_n + a_0 \quad \forall 2^k \geq n \\
 \Rightarrow t_k &\leq \lim_{n \rightarrow \infty} s_n + a_0 = s + a_0 < \infty
 \end{aligned}$$

sofern $\sum_{n=0}^{\infty} a_0$ konvergiert

Da $t_k < t_{k+1}$ konvergiert, konvergiert auch $\sum_{\nu=0}^{\infty} 2^\nu \cdot a_{2^\nu}$ □

Beispiel 8.1.15 (Cauchyscher Verdichtungssatz als Konvergenzkriterium). Es sei

$$\begin{aligned}
 a_n &= \frac{1}{n^\alpha} \\
 2^n \cdot a_{(2^\nu)} &= \frac{2^n}{(2^n)^\alpha} = \frac{2^n}{2^{n \cdot \alpha}} \\
 &= 2^{n-n \cdot \alpha} = 2^{(1-\alpha) \cdot n} = (2^{1-\alpha})^n = q^n
 \end{aligned}$$

Damit q^n und damit auch $(a_n)_n$ konvergiert muss wie bereits gezeigt gelten

$$q := 2^{1-\alpha} < 1 \Leftrightarrow 1 - \alpha < 0 \Leftrightarrow \alpha > 1$$

Es sei

$$\begin{aligned}
 a_n &= \frac{1}{n} \\
 2^n \cdot a_{(2^\nu)} &= 2^n \cdot \frac{1}{2^n} = 1 \Rightarrow (a_n)_n \text{ konvergiert}
 \end{aligned}$$

Definition 8.1.16 (Alternierende Reihe). Sei $(a_n)_n$ eine reelle Folge nicht-negativer reeller Zahlen. Dann heißt

$$\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \cdot a_n = a_1 - a_2 + a_3 - a_4 \dots$$

alternierende Reihe. Alternativ $a_n \geq 0$, $n \in \mathbb{N}_0$.

$$\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \cdot a_n = a_0 - a_1 + a_2 - a_3 \dots$$

Satz 8.1.17 (Leibniz-Kriterium). Sei $(a_n)_n$ eine monoton fallende Nullfolge. Dann konvergiert

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

Beweis. Idee: Wir unterscheiden zwischen geraden und ungeraden n .

$$\begin{aligned} s_n &:= \sum_{j=1}^n (-1)^{j+1} \cdot a_j \\ s_{2(n+1)} &= \sum_{j=1}^{2n+2} (-1)^{j+1} \cdot a_j \\ &= \sum_{j=1}^{2n} (-1)^{j+1} \cdot a_j + (-1)^{(2n+1)+1} \cdot a_{2n+1} + (-1)^{(2n+2)+1} \cdot a_{2n+2} \\ &= s_{2n} + \underbrace{a_{2n+1} - a_{2n+2}}_{\geq 0} \\ &\geq s_{2n} \end{aligned}$$

Also ist $(s_{2n})_n$ monoton wachsend

$$\begin{aligned} s_{2(n+1)+1} &= s_{2n+3} = \sum_{j=1}^{2n+3} (-1)^{j+1} \cdot a_j \\ &= s_{2n+1} + (-1)^{(2n+2)+1} \cdot a_{2n+2} + (-1)^{(2n+3)+1} \cdot a_{2n+3} \\ &= s_{2n+1} + \underbrace{-a_{2n+2} + a_{2n+3}}_{\leq 0} \\ &\leq s_{2n+1} \end{aligned}$$

Also ist $(s_{2n+1})_n$ ist monoton fallend und

$$\begin{aligned} s_{2n+1} - s_{2n} &= \sum_{j=1}^{2n+1} (-1)^{j+1} \cdot a_j - \sum_{j=1}^{2n} (-1)^{j+1} \cdot a_j \\ &= (-1)^{(2n+1)+1} \cdot a_{2n+1} = a_{2n+1} \geq 0 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow |s_{2n+1} - s_{2n}| = a_{2n+1} \text{ und } s_{2n+1} \geq s_{2n}$$

$$0 \leq a_1 - a_2 = s_2 \leq s_{2n} \leq s_{2n+1} \leq s_1 = a_1$$

$$\stackrel{6.4.2}{\Rightarrow} s_g := \lim_{n \rightarrow \infty} s_{2n} \text{ existiert}$$

$$s_u := \lim_{n \rightarrow \infty} s_{2n-1} \text{ existiert}$$

$$\text{und } s_g = s_u$$

$$\Rightarrow (s_n)_n \text{ konvergiert gegen } s = s_g = s_u$$

□

Übung 8.1.18. Weisen Sie nach, dass eine Folge konvergiert, wenn die Teilfolgen der geraden und der ungeraden Folgenglieder konvergieren und die Differenz eine Nullfolge ist.

Beispiel 8.1.19.

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \cdot \frac{1}{\sqrt{n}} & \text{ konvergiert} \\ \text{aber } \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{n}} & \text{ divergiert} \\ \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \frac{1}{n} & \text{ konvergiert} \\ \sum_{n=2}^{\infty} (-1)^n \cdot \frac{1}{\log(n)} & \text{ konvergiert} \end{aligned}$$

Satz 8.1.20 (Cauchy-Kriterium). Sei $(a_n)_n$ eine Folge reeller Zahlen. Dann konvergiert

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n$$

genau dann, wenn

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N_\varepsilon \in \mathbb{N}: \left| \sum_{j=n+1}^m a_j \right| < \varepsilon \quad \forall m > n \geq N_\varepsilon$$

Beweis.

$$s_n := \sum_{j=1}^n a_j$$

$(s_n)_n$ konvergiert nach Satz 6.7.5 genau dann, wenn es eine Cauchy-Folge ist. Das heißt

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N_\varepsilon \in \mathbb{N}: |s_m - s_n| < \varepsilon \quad \forall m > n \geq N_\varepsilon$$

$$\begin{aligned} |s_m - s_n| &= \sum_{j=1}^m a_j - \sum_{j=1}^n a_j \\ &= \sum_{j=n+1}^m a_j \end{aligned}$$

□

Korollar 8.1.21. Ist die reelle Reihe $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ konvergent, so ist $(a_n)_n$ eine Nullfolge.

Beweis. Nach Satz 8.1.20 \Rightarrow

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N_\varepsilon \in \mathbb{N}: \left| \sum_{j=n+1}^{n+p} a_j \right| < \varepsilon \quad \forall n \geq N_\varepsilon, p \in \mathbb{N}$$

Wähle $p = 1$

$$\begin{aligned} \sum_{j=n+1}^{n+1} a_j &= a_{n+1} \\ \Rightarrow |a_{n+1}| &< \varepsilon \quad \forall n \geq N_\varepsilon \\ \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} a_{n+1} &= 0 \\ \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} a_n &= 0 \end{aligned}$$

□

8.2 [*] Absolut konvergente Reihen und Umordnungen

Definition 8.2.1 (Absolute Konvergenz). Eine Reihe $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ heißt absolut konvergent, falls

$$\sum_{n=1}^{\infty} |a_n|$$

konvergiert. Das heißt falls

$$\sum_{n=1}^{\infty} |a_n| < \infty$$

Satz 8.2.2 (Absolute Konvergenz als Konvergenzkriterium). Ist eine Folge $\sum_n^{\infty} a_n$ absolut konvergent, so ist sie auch konvergent und

$$\left| \sum_{n=1}^{\infty} a_n \right| \leq \sum_{n=1}^{\infty} |a_n|$$

Beweis. Wir haben für $m > n$

$$\left| \sum_{j=n+1}^m a_j \right| \leq \sum_{j=n+1}^m |a_j|$$

Wir nehmen an, dass $\sum_{n=1}^{\infty} |a_n|$ konvergiert. Das heißt Cauchy ist erfüllt.

$$\begin{aligned} \Rightarrow \forall \varepsilon > 0 \exists N_{\varepsilon}: \sum_{j=n+1}^m |a_j| < \varepsilon \quad \forall m > n \geq N_{\varepsilon} \\ \Rightarrow \left| \sum_{j=n+1}^m a_j \right| < \varepsilon \quad \forall m > n \geq N_{\varepsilon} \\ \Rightarrow \sum_{j=1}^{\infty} a_j \text{ konvergiert} \end{aligned}$$

□

Beispiel 8.2.3 (Konvergenz ohne absolute Konvergenz).

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

ist konvergent, aber nicht absolut konvergent.

Definition 8.2.4 (Majorante). Die Reihe

$$\sum_{n=1}^{\infty} c_n \quad c_n \geq 0 \quad \forall n \in \mathbb{N}$$

ist eine Majorante der Reihe $\sum_n^{\infty} a_n$ falls

$$|a_n| \leq c_n \text{ für fast alle } n \in \mathbb{N}$$

Das heißt

$$\exists n_0 \in \mathbb{N}: |a_n| < c_n \quad \forall n \geq n_0$$

Satz 8.2.5 (Majoranten-Konvergenz-Kriterium für Reihen). Hat die Reihe $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ eine konvergente Majorante $\sum_{n=1}^{\infty} c_n$, so ist diese Reihe absolut konvergent und somit auch konvergent.

Beweis. Folgt aus Satz 8.2.2 und Satz 8.1.9. □

Satz 8.2.6 (Quotientenkriterium). Sei

$$s_n := \sum_{n=0}^{\infty} a_n$$

eine Reihe mit $a_n \neq 0$. Ferner gebe es ein $0 \leq q < 1$ so dass

$$\begin{aligned} \frac{|a_{n+1}|}{|a_n|} &\leq q \text{ für fast alle } n \in \mathbb{N} \\ \Rightarrow \sum_{n=0}^{\infty} a_n &\text{ absolut konvergent} \end{aligned}$$

Beweis. Wir haben $n_0 \in \mathbb{N}$

$$\begin{aligned} \frac{|a_{n+1}|}{|a_n|} &\leq q \quad \forall n \geq n_0 \\ |a_{n+1}| &\leq q \cdot |a_n| \leq q^2 \cdot |a_{n-1}| \leq q^3 \cdot |a_{n-2}| \\ &\leq \dots \leq q^{p+1} \cdot |a_{n_0}| = q^{n-n_0+1} \cdot |a_{n_0}| \quad (p \in \mathbb{N}, n = n_0 + p) \\ &= q^{n+1} \cdot q^{-n_0} \cdot |a_{n_0}| \\ \Rightarrow |a_n| &\leq \underbrace{q^n \cdot K}_{=: c_n} \quad (K := q^{-n_0} \cdot |a_{n_0}|) \\ \Rightarrow |a_n| &\leq c_n \quad \forall n \geq n_0 \end{aligned}$$

und

$$\sum_{n=0}^{\infty} c_n = \sum_{n=0}^{\infty} K \cdot q^n = K \cdot \sum_{n=0}^{\infty} q^n < \infty$$

Da $0 < q < 1$

$$\Rightarrow \sum_{n=c}^{\infty} a_n \text{ hat die konvergente Majorante } K \cdot \sum_{n=c}^{\infty} q^n$$

Damit lässt sich aus Satz 8.2.5 folgern, dass die Reihe konvergiert. □

Bemerkung 8.2.7 (Quotientenkriterium über \limsup und \liminf).

- (i) Ist $\limsup_{n \rightarrow \infty} \frac{|a_{n+1}|}{|a_n|} < 1 \Leftrightarrow$ Quotientenkriterium
- (ii) Ist $\liminf_{n \rightarrow \infty} \frac{|a_{n+1}|}{|a_n|} > 1 \Rightarrow \sum_{n=0}^{\infty} a_n$ divergent
- (iii) Ist $\limsup_{n \rightarrow \infty} \frac{|a_{n+1}|}{|a_n|} = 1 \Rightarrow$ Keine Aussage über absolute Konvergenz von $\sum_{n=0}^{\infty} a_n$ möglich

Beweis (ii).

$$\begin{aligned} \text{Ist } \bar{q} &:= \liminf_{n \rightarrow \infty} \frac{|a_{n+1}|}{|a_n|} > 1 \\ \Rightarrow \forall \varepsilon > 0 \exists n_0: \frac{|a_{n+1}|}{|a_n|} &\geq \bar{q} - \varepsilon = \frac{\bar{q} + 1}{2} \geq q > 1 && (\text{Wähle } \varepsilon = \frac{\bar{q}-1}{2} > 0) \\ \Rightarrow \frac{|a_{n+1}|}{|a_n|} &\geq q > 1 \quad \forall n \geq n_0 \end{aligned}$$

Wir wenden ein ähnliches Prinzip wie im vorherigen Beweis an

$$\begin{aligned} \Rightarrow |a_{n+1}| &\geq q^{n+1} \cdot q^{-n_0} \cdot |a_{n_0}| \\ \Rightarrow |a_n| &\geq q^n \cdot K && (K = q^{-n_0} \cdot |a_{n_0}|) \\ \Rightarrow \sum a_j &\text{divergiert nach Korollar 8.1.21} \quad \square \end{aligned}$$

Beispiel 8.2.8 (Divergenz bei nicht-eindeutigem Quotientenkriterium). $a_n := \frac{1}{n}$

$$\frac{|a_{n+1}|}{|a_n|} = \frac{a_{n+1}}{a_n} = \frac{n}{n+1} = 1 + \frac{1}{n} \rightarrow 1$$

Und

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \text{divergiert (Harmonische Reihe)}$$

Beispiel 8.2.9 (Konvergenz bei nicht-eindeutigem Quotientenkriterium). $a_n := \frac{1}{n^2}$

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

Aber

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n$$

konvergiert absolut:

$$\begin{aligned} \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2 &= 1 - \frac{2}{n+1} + \left(\frac{1}{n+1}\right)^2 \\ &= 1 - \frac{2}{n+1} \cdot \left(1 - \frac{1}{2(n+1)}\right) \\ &\leq 1 - \frac{s-\delta}{n+1} && (\text{Für } \delta > 0 \text{ und fast alle } n) \end{aligned}$$

Beispiel 8.2.10 (Eulersche Zahl über Reihendarstellung). Die Reihe

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

ist absolut konvergent.

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

$$\frac{a_{n+1}}{a_n} = \frac{n!}{(n+1)!} = \frac{1}{n+1} \rightarrow 0$$

Behauptung:

$$e' := \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} = e \quad (\text{Eulersche Zahl})$$

Beweis. Wir wenden die bereits gezeigte Formel für e an:

$$e = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n$$

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n &= \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \left(\frac{1}{n}\right)^k \\ &= \sum_{k=0}^n \frac{n \cdot (n-1) \cdot (n-k+1)}{k! \cdot n^k} \\ &= \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} \cdot \prod_{j=0}^{k-1} \frac{n-j}{n} \\ &\leq \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} \leq \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \\ \Rightarrow e &\leq \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \end{aligned}$$

Noch zu zeigen: $e' \leq e$

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n &= \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} \cdot \prod_{j=0}^{k-1} \left(1 - \frac{j}{n}\right) \\ &\geq \sum_{k=0}^m \frac{1}{k!} \cdot \prod_{j=0}^{k-1} \left(1 - \frac{j}{n}\right) \end{aligned} \quad (\forall n > m)$$

Wir halten $m \in \mathbb{N}$ fest

$$\begin{aligned}
\Rightarrow e &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n \geq \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^m \frac{1}{k!} \cdot \prod_{j=0}^{k-1} \left(1 - \frac{j}{n}\right) \\
&= \sum_{k=0}^m \frac{1}{k!} \cdot \prod_{j=0}^{k-1} \underbrace{\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{j}{n}\right)}_{=1} \\
&= \sum_{k=0}^m \frac{1}{k!} \quad (\forall m \in \mathbb{N}) \\
\Rightarrow e &\geq \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^m \frac{1}{k!} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} = e \\
\Rightarrow e &\leq e' \wedge e' \leq e \\
\Rightarrow e &= e' \quad \square
\end{aligned}$$

Bemerkung 8.2.11 (Ännäherung von e über Reihen).

$$\begin{aligned}
s_n &:= \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} \\
r_{n,p} &:= \sum_{k=n+1}^{n+p} \frac{1}{k!} \\
r_{n,p} &= \sum_{k=n+1}^{n+p} \frac{1}{k!} = \frac{1}{(n+1)!} + \frac{1}{(n+2)!} + \cdots + \frac{1}{(n+p)!} \\
&= \frac{1}{(n+1)!} \cdot \left[1 + \frac{1}{n+2} + \frac{1}{(n+2) \cdot (n+3)} + \cdots + \frac{1}{(n+2) \cdot (n+3) \cdot \dots \cdot (n+p)} \right] \\
&> \frac{1}{(n+1)!}
\end{aligned}$$

Wir betrachten den zweiten Faktor

$$\begin{aligned}
&1 + \frac{1}{n+2} + \frac{1}{(n+2) \cdot (n+3)} + \cdots + \frac{1}{(n+2) \cdot (n+3) \cdot \dots \cdot (n+p)} \\
&< 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2 \cdot 3} + \cdots + \frac{1}{2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot p} \\
&= \sum_{k=0}^p \frac{1}{k!} - 1 < \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} - 1 = e - 1
\end{aligned}$$

Wir kombinieren die Abschätzung über beide Faktoren und erhalten

$$\begin{aligned}
\Rightarrow \frac{1}{(n+1)!} &< r_{n,p} < \frac{e-1}{(n+1)!} \\
\Leftrightarrow \frac{1}{(n+1)!} &< s_{n+p} - s_n < \frac{e-1}{(n+1)!} \\
s_{n+p} - s_n &\rightarrow e - s_n \text{ für } p \rightarrow \infty \\
\Rightarrow \frac{1}{(n+1)!} &\leq e - s_n \leq \frac{e-1}{(n+1)!}
\end{aligned}$$

Wir erhalten also ein Verfahren, um einen Näherungswert für e zu bestimmen

$$\begin{aligned} 2,5 &\leq e \leq 3 \quad (n=1) \\ 2,66 &\leq e \leq 2,8 \quad (n=2) \\ &\vdots \\ e &= 2,71828182\dots \end{aligned}$$

Bemerkung 8.2.12 (Ausblick: Definition von Exponentialfunktionen über Reihen).

$$\begin{aligned} a_n &:= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} \\ \frac{|a_{n+1}|}{|a_n|} &= \left| \frac{x^{n+1} \cdot n!}{(n+1)! \cdot x^n} \right| = \frac{|x|}{n+1} \rightarrow 0 \end{aligned}$$

Diese Konvergenz werden wir in einem späteren Kapitel nutzen, um die Exponentialfunktion über

$$\exp(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^k}{k!} = e^x$$

zu definieren.

Satz 8.2.13 (Nach Lambert 1707). Die eulersche Zahl e ist irrational.

Beweis. Wir haben

$$\frac{1}{(n+1)!} \leq e - s_n \leq \frac{e-1}{(n+1)!} < \frac{2}{(n+1)!}$$

Angenommen $e = \frac{p}{q}$ $p, q \in \mathbb{N}$. Wir nehmen $p = q \cdot m$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \frac{1}{(q+1)!} &\leq \frac{p}{q} - s_q < \frac{2}{(q+1)!} \\ 0 &< \frac{1}{q+1} \leq \frac{p}{q} \cdot q! - q! \cdot s_q < \frac{2}{q+1} < 1 \end{aligned}$$

Es lässt sich zeigen, dass der dritte Term eine ganze Zahl ist:

$$\begin{aligned} \frac{p}{q} \cdot q! &= p \cdot (q-1)! \in \mathbb{N} \\ q! \cdot s_q &= q! \cdot \sum_{k=0}^q \frac{1}{k!} \in \mathbb{N} \end{aligned}$$

Damit ergibt sich ein Widerspruch, weil keine ganze Zahl zwischen 0 und 1 liegt. □

Satz 8.2.14 (Wurzelkriterium). Sei $(a_n)_n$ eine reelle Folge.

- (i) Ist $\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} < 1$, dann konvergiert $\sum_{n=0}^{\infty} a_n$ absolut.
- (ii) Ist $\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} > 1$, dann ist $\sum_{n=0}^{\infty} a_n$ divergent.
- (iii) Ist $\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = 1$, so ist keine Aussage möglich.

Beweis (iii).

$$\begin{aligned}
 a_n &:= \frac{1}{n^p} \\
 \sqrt[n]{|a_n|} &= \left(\frac{1}{\sqrt[n]{n}} \right)^p \rightarrow \left(\frac{1}{1} \right)^p = 1 \quad (n \rightarrow \infty) \\
 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^p} &\text{divergiert f\"ur } p = 1 \text{ und konvergiert f\"ur } p > 1 \\
 &\Rightarrow \text{keine Aussage m\"oglich} \quad \square
 \end{aligned}$$

Beweis (i). Sei

$$\hat{q} := \limsup \sqrt[n]{|a_n|} < 1$$

Wähle $\varepsilon := \frac{1-\hat{q}}{2} > 0$

$$\begin{aligned}
 &\stackrel{6.6.3}{\Rightarrow} \sqrt[n]{|a_n|} < \hat{q} + \varepsilon = \frac{1+\hat{q}}{2} \text{ f\"ur fast alle } n \\
 &\Rightarrow \exists n_0 \in \mathbb{N}: \sqrt[n]{|a_n|} \leq q \quad \forall n \geq n_0 \\
 &\Leftrightarrow |a_n| \leq q^n \quad \forall n \geq n_0
 \end{aligned}$$

Das heißt $\sum_{n=0}^{\infty} q^n$ ist eine konvergente Majorante für $\sum a_n$

$$\Rightarrow \sum_{n=0}^{\infty} a_n \text{ ist absolut konvergent} \quad \square$$

Beweis (ii). Sei

$$\begin{aligned}
 \hat{q} &:= \limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} > 1 \\
 \varepsilon &:= \frac{\hat{q} - 1}{2} > 0 \\
 q &:= \hat{q} - \varepsilon = \frac{1+\hat{q}}{2} > 1 \\
 &\Rightarrow \sqrt[n]{|a_n|} > \hat{q} - \varepsilon =: q > 1 \quad (\text{für unendlich viele } n) \\
 &\Rightarrow |a_n| > q^n \quad (\text{für unendlich viele } n) \\
 &\Rightarrow (a_n)_n \text{ keine Nullfolge}
 \end{aligned}$$

Somit konvergiert $\sum a_n$ nicht. \square

Definition 8.2.15 (Umordnung von Reihen). Seien

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n \quad \sum_{n=0}^{\infty} b_n$$

Reihen mit Gliedern $a_n, b_n \in \mathbb{R}$, $n \in \mathbb{N}_0$. Wir nennen $\sum_{n=0}^{\infty} b_n$ eine Umordnung von $\sum_{n=0}^{\infty} a_n$, falls eine Bijektion

$$\sigma : \mathbb{N}_0 \rightarrow \mathbb{N}_0$$

existiert mit $b_n = a_{\sigma(n)} \quad \forall n \in \mathbb{N}_0$.

Ähnlich für Reihen

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n \quad \sum_{n=1}^{\infty} b_n$$

$\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ Umordnung von $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$, falls Bijektion $\sigma : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ existiert mit $b_n = a_{\sigma(n)}$.

Definition 8.2.16 (Unbedingte Konvergenz). Eine Reihe $\sum_{n=0}^{\infty} a_n$ heißt unbedingt konvergent, falls jede Umordnung $\sum_{n=0}^{\infty} b_n$ von dieser Reihe ebenfalls konvergiert und die selbe Summe hat. Andernfalls heißt $\sum_{n=0}^{\infty} a_n$ bedingt konvergent.

Satz 8.2.17 (Direcklet 1837). Eine Reihe $\sum_{n=0}^{\infty} a_n$, $a_n \in \mathbb{R}$ ist absolut konvergent genau dann, wenn sie unbedingt konvergiert.

Beweis. „ \Rightarrow “ Sei

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{\infty} a_n \text{ absolut konvergent} \\ \Rightarrow \sum_{n=0}^{\infty} |a_n| \text{ konvergent} \\ \Leftrightarrow \sum_{n=0}^{\infty} |a_n| < \infty \end{aligned}$$

Wir wenden das Cauchy-Kriterium an

$$\begin{aligned} \forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N}: \sum_{j=n+1}^{n+p} |a_j| < \varepsilon \quad \forall n \geq N, p \in \mathbb{N} \\ \Rightarrow \sum_{j=n+1}^{\infty} |a_j| = \lim_{p \rightarrow \infty} \sum_{j=n+1}^{n+p} |a_j| \leq \varepsilon \quad \forall n \geq N \end{aligned} \quad (3)$$

Wir definieren

$$\begin{aligned} s_n &:= \sum_{j=0}^{\infty} a_j \quad \sum_{n=0}^{\infty} b_n \text{ Umordnung von } s_n \\ b_n &= a_{\sigma(n)} \quad \sigma : \mathbb{N}_0 \rightarrow \mathbb{N}_0 \text{ Bijektion} \\ t_n &:= \sum_{j=0}^n b_j \end{aligned}$$

(Noch in Bearbeitung)

8.2 [*] Absolut konvergente Reihen und Umordnungen

Wir wissen $s_n \rightarrow s$. Zu zeigen: $t_n \rightarrow s$

$$\{1, 2, \dots, N\} \subseteq \{\sigma(1), \sigma(2), \dots, \sigma(M)\} \\ (\text{Nehmen } M \in \mathbb{N})$$

Ist dann $n \geq M$, dann ist

$$\{a_1, a_2, a_3, \dots, a_N\} \subseteq \{b_1, b_2, \dots, b_M\} = \{a_{\sigma(1)}, a_{\sigma(2)}, \dots, a_{\sigma(M)}\} \\ \Rightarrow \text{Alle Glieder } a_1, \dots, a_n \text{ in der Summe } s_n \text{ treten in } t_n = t_1 + t_2 + \dots + t_n \text{ auf} \\ \Rightarrow \text{Diese Terme heben sich in } s_n - t_n \text{ gegenseitig auf, sofern } n \geq M \text{ ist}$$

$$\Rightarrow |s_n - t_n| \leq \sum_{j \geq N+1, j=\sigma k \text{ für ein } k \in \{1, \dots, M\}} |a_j| \\ \leq \sum_{j=??}^{\infty} |a_j| \leq \varepsilon \\ \Rightarrow s_n - t_n \rightarrow 0 \text{ für } n \rightarrow \infty$$

Da $(s_n)_n$ gegen s konvergiert, konvergiert auch $(t_n)_n$ gegen s . Somit konvergiert $\sum_{n=0}^{\infty} b_n$ und hat die selbe Summe wie $\sum_{n=0}^{\infty} a_n$.

„ \Leftarrow “ Angenommen $\sum_{n=0}^{\infty} a_n$ ist unbedingt konvergent, aber nicht absolut konvergent.

$$p_n := (a_n)_+ := \max(0, a_n) \\ q_n := (a_n)_- := \max(0, -a_n) = -\min(0, a_n) \\ \Rightarrow |a_n| = p_n + q_n \quad \forall n \in \mathbb{N}_0$$

Wir haben $\sum_{n=0}^{\infty} |a_n|$ konvergiert, aber $\sum_{n=0}^{\infty} p_n = \infty$

Behauptung: $\sum_{n=0}^{\infty} p_n = \infty$ und $\sum_{n=0}^{\infty} q_n = \infty$. Angenommen $0 \leq \sum_{n=0}^{\infty} p_n < \infty$.

$$\Rightarrow \sum_{n=0}^{\infty} (p_n - a_n) \text{ konvergiert} \\ \Rightarrow \sum_{n=0}^{\infty} a_n < \infty$$

Da $|a_n| = p_n + q_n$

$$\Rightarrow \sum_{n=0}^{\infty} |a_n| = \sum_{n=0}^{\infty} (p_n + q_n) = \sum_{n=0}^{\infty} p_n + \sum_{n=0}^{\infty} q_n < \infty$$

Widerspruch zu $\sum_{n=0}^{\infty} b_n$ ist nicht absolut konvergent

Jetzt setze $r_0 = 0$ und bestimme induktiv $(r_n)_n$ $r_n < r_{n+1}$ mit $p_0 + p_1 + \dots + p_{r_n} > n + q_0 + q_1 + \dots + q_n \quad \forall n \in \mathbb{N}$. $r_q :=$ kleinste natürliche Zahl mit $p_0 + p_q + \dots + p_{r_1} > 1 + q_0 + q_1 + q_2$.

$r_2 :=$ kleinste natürliche Zahl $\geq r_1 + 1$: $p_0 + \dots + p_{r_2} > 2 + q_0 + q_1 + q_2$.

Machen induktiv weiter: Gegeben r_n wähle $r_{n+1} =$ kleinste natürliche Zahl $\geq r_n + 1$ mit $p_0 + p_1 + \dots + p_{r_{n+1}} > n + q_0 + q_1 + \dots + q_n$.

Umordnung $p_0 - q_0 + p_1 + \dots + p_{r_1} - q_1 + p_{r_1+1} + \dots + p_{r_2} - q_2 + p_{r_2+1} + \dots + p_{r_3} - q_3 + \dots$. Diese Umordnung divergiert gegen $+\infty$. \square

(Noch in Bearbeitung)

Satz 8.2.18 (Nach Riemann 1854). Ist $\sum_n a_n$ konvergent, aber nicht absolut konvergent. Dann gibt es zu jedem $c \in \mathbb{R}$ eine Umordnung $\sum_n b_n$ von $\sum_n a_n$ so, dass $\sum_n b_n$ konvergiert und den Wert c hat ($\sum_n b_n = c$).

Beweis. (Später)

□

9 [*] \mathbb{R}^d , Konvergenz im \mathbb{R}^d , die komplexen Zahlen \mathbb{C} und der Raum \mathbb{C}^d

9.1 [*] Normen und mehrdimensionale Konvergenz

Definition 9.1.1.

$$\begin{aligned}\mathbb{R}^d &:= \text{Vektorraum der reellen d-Tupel} \\ &= \{(x_1, x_2, \dots, x_d) \mid x_j \in \mathbb{R}, j = 1, \dots, d\}\end{aligned}$$

Notation 9.1.2 (Linearkombination von Vektoren). Es sei

$$\begin{aligned}x &= (x_1, \dots, x_d) \\ y &= (y_1, \dots, y_d)\end{aligned}$$

und $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$, dann gilt

$$\alpha x + \beta y := (\alpha x_1 + \beta y_1, \alpha x_2 + \beta y_2, \dots, \alpha x_d + \beta y_d)$$

Notation 9.1.3 (Vektorschreibweise).

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_d \end{pmatrix}$$

Definition 9.1.4 (Euklidische Länge eines Vektors). Für $d = 2$ gilt für die euklidische Länge $\|x\|$ eines Vektors $x \in \mathbb{R}^2$

$$\begin{aligned}\|x\|^2 &= (x_1)^2 + (x_2)^2 \\ \|x\| &= \sqrt{(x_1)^2 + (x_2)^2}\end{aligned}$$

Allgemein gilt

$$\|x\| := \sqrt{\left(\sum_{j=1}^d (x_j)^2\right)} \quad (x \in \mathbb{R}^d)$$

Wir schreiben auch

$$\|x\|_2 := \sqrt{\left(\sum_{j=1}^d (x_j)^2\right)} \quad (x \in \mathbb{R}^d)$$

Bemerkung 9.1.5 (Alternative Normen).

$$\|x\|_1 := \sum_{j=1}^d |x_j| \quad (\text{Manhattan-Norm})$$

$$\|x\|_\infty := \max_{1 \leq j \leq d} |x_j| \quad (\text{Maximums-Norm})$$

(Noch in Bearbeitung)

9 [*] \mathbb{R}^d , Konvergenz im \mathbb{R}^d , die komplexen Zahlen \mathbb{C} und der Raum \mathbb{C}^d

Bemerkung 9.1.6 (Äquivalenz von Normen). Wir zeigen, dass $\|\cdot\|_\infty$ und $\|\cdot\|_2$ äquivalent sind.

$$\begin{aligned} \|\cdot\|_1, \|\cdot\|_\infty, \|\cdot\| & \text{ sind äquivalent} \\ |x_k| & \leq \sqrt{\sum_{j=1}^d |x_j|^2} = \|x\|_2 \quad (1 \leq k \leq d) \\ \Rightarrow \|x\|_\infty & = \max_{k=1,\dots,d} |x_k| \leq \|x\|_2 \end{aligned}$$

Umgekehrt

$$\begin{aligned} \|x\|_2^2 & = \sum_{j=1}^d |x_j|^2 \leq \sum_{j=1}^d \left(\max_{k=1,\dots,d} (|x_k|) \right)^2 = d \cdot \|x\|_\infty^2 \\ \|x\|_\infty & \leq \|x\|_2 \leq \sqrt{d} \cdot \|x\|_\infty \\ \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{d}} \cdot \|x\|_2 & \leq \|x\|_2 \leq \|x\|_\infty \leq \|x\|_2 \end{aligned}$$

Ähnlich mit $\|x\|_1$ und $\|x\|_\infty$

Definition 9.1.7 (Norm). Eine Norm auf \mathbb{R}^d (oder einem reellen Vektorraum) ist eine Abbildung

$$\|\cdot\| : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$$

mit folgenden Eigenschaften

- a) $\|x\| \geq 0 \ \forall x \in \mathbb{R}^d$ sowie $\|x\| = 0 \Rightarrow x = 0$
- b) $\forall \lambda \in \mathbb{R}, x \in \mathbb{R}^d: \|\lambda x\| = |\lambda| \|x\|$
- c) $\forall x, y \in \mathbb{R}^d: \|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|$ (Dreiecksungleichung)

Bemerkung 9.1.8. Dass a), b) und c) für $\|\cdot\|_1$ und $\|\cdot\|_\infty$ gelten, ist einfach zu zeigen. Außerdem sind a) und b) für $\|\cdot\|_2$ einfach zu zeigen, c) ist tricky.

Bemerkung 9.1.9 (Abstand zwischen 2 Vektoren im \mathbb{R}^d). Zu jeder Norm auf \mathbb{R}^d (oder reellen Vektorräumen) definieren wir den Abstand von 2 Vektoren $x, y \in \mathbb{R}^d$ als $\|x - y\|$

$$d(x, y) := \|x - y\|$$

Mit z als weiterem Vektor gilt

$$\begin{aligned} \|x - y\| &= \|x - z + z - y\| \\ &\leq \|x - z\| + \|z - y\| \\ \|x - y\| &= \|-(y - x)\| = |-1| \cdot \|y - x\| = \|y - x\| \end{aligned}$$

Folgerung 9.1.10 (Mehrdimensionale ε -Umgebung). Bisher basierte unser Konvergenz-Begriff auf dem Abstand von $(x_n)_n$ und x und somit auf einer eindimensionalen ε -Umgebung.

Wir verallgemeinern dieses Konzept für eine offene Kugel im \mathbb{R}^d mit $x \in \mathbb{R}^d$

$$B_\varepsilon(x) := \left\{ y \in \mathbb{R}^d \mid \|x - y\|_2 < \varepsilon \right\}$$

Visualisierung 9.1.11 (Zweidimensionale ε -Umgebung). Wir formen die Bedingung um

$$\begin{aligned} \|x - y\|_2 &< \varepsilon \\ \Rightarrow \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2} &< \varepsilon \\ \Rightarrow (x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 &< \varepsilon^2 \end{aligned}$$

In der Visualisierung erhalten wir einen offenen Ball um x mit Radius ε .

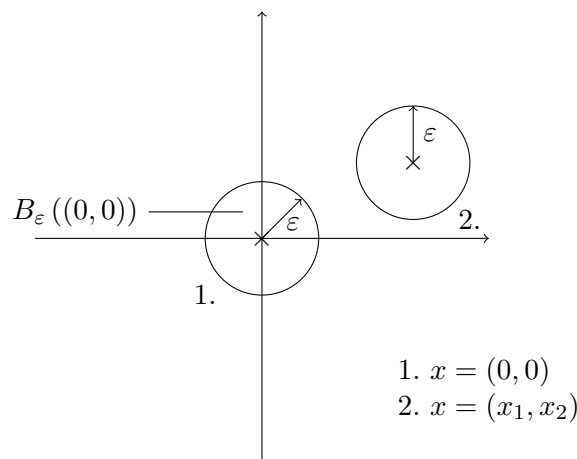


Abbildung 3: Zweidimensionale ε -Umgebungen

Definition 9.1.12 (Konvergenz im \mathbb{R}^d). Sei $(x_n)_n$ eine Folge in \mathbb{R}^d mit $x_n \in \mathbb{R}^d \forall n$. $(x_n)_n$ konvergiert gegen $x \in \mathbb{R}^d$, falls

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N}: \|x_n - x\|_2 < \varepsilon \quad \forall n \geq N$$

Das heißt

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N}: x_n \in B_\varepsilon(x) \quad \forall n \geq N$$

Beobachtung 9.1.13 (Konvergenz in \mathbb{R} vs \mathbb{R}^d). Es sei $x_n \in \mathbb{R}^d$ mit $x_n = (x_n^1, x_n^2, \dots, x_n^d)^{12}$. Damit ergeben sich die Folgen $(x_n^1)_n, (x_n^2)_n, \dots, (x_n^d)_n$ in \mathbb{R} . Angenommen $(x_n)_n$ konvergiert gegen $x \in \mathbb{R}^d$. Dann konvergieren alle Folgen $(x_n^l)_n$ in \mathbb{R} und $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n^l = x^l$

Beweis.

$$\begin{aligned} \left| x_n^l - x^l \right|^2 &\leq \sum_{j=1}^d |x_n^j - x^j|^2 = \|x_n - x\|_2^2 \quad \forall l = 1, \dots, d \\ \Rightarrow \left| x_n^l - x^l \right| &\leq \|x_n - x\|_2 \rightarrow 0 \text{ für } n \rightarrow \infty \end{aligned}$$

Also konvergiert (x_n^l) gegen x^l in \mathbb{R} für alle $l = 1, \dots, d$. □

Es gilt sogar die Umkehrung.

Satz 9.1.14 (Konvergenz im \mathbb{R}^d). Eine Folge $(x_n)_n$ in \mathbb{R}^d konvergiert genau dann, wenn jede der Koordinatenfolge $(x_n^l)_n$ in \mathbb{R} konvergiert $\forall l = 1, \dots, d$.

Beweis.

„ \Rightarrow “ Gerade gezeigt.

„ \Leftarrow “ Angenommen

$$\begin{aligned} \exists x^l &:= \lim_{n \rightarrow \infty} x_n^l \quad \forall l = 1, \dots, d \\ \Rightarrow \left| x_n^l - x^l \right| &\rightarrow 0 \text{ für } n \rightarrow \infty \quad \forall l = 1, \dots, d: \end{aligned}$$

Das heißt

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N_l \in \mathbb{N}: \left| x_n^l - x^l \right| < \frac{\varepsilon}{\sqrt{d}} \quad \forall n \geq N_l$$

Wir definieren

$$N := \max(N_1, N_2, \dots, N_d)$$

Dann gilt $\forall n > N$

$$\begin{aligned} \|x_n - x\|_2^2 &= \sum_{j=1}^d |x_n^j - x^j|^2 < \sum_{j=1}^d \left(\frac{\varepsilon}{\sqrt{d}} \right)^2 \\ &= d \cdot \frac{\varepsilon^2}{d} = \varepsilon^2 \\ \Rightarrow \|x_n - x\|_2 &< \varepsilon \quad \forall n \geq N \end{aligned}$$

Wir definieren den Grenzwert

$$x := (x^1, x^2, \dots, x^d) \quad x^j := \lim_{n \rightarrow \infty} x_n^j \quad \square$$

¹²Koordinaten von $(x_n)_n$

Bemerkung 9.1.15. 2 Normen $\|\cdot\|_a$ und $\|\cdot\|_b$ sind äquivalent, falls

$$\exists c_1, c_2: c_1 \cdot \|x\|_a \leq \|x\|_b \leq c_2 \|x\|_a \quad \forall x \in V$$

Bemerkung 9.1.16. Sei $(a_n)_n \in \mathbb{R}^d$ mit $a_n = (a_n^1, a_n^2, \dots, a_n^d)$. Reihe $\sum_{n=1}^{\infty} a_n = ??$. Wir betrachten die Partialsummen

$$s_n := \sum_{j=1}^n a_j$$

Definition 9.1.17. $\sum_n a_n$ konvergiert, falls $(s_n)_n$ im \mathbb{R}^d konvergiert

Satz 9.1.18 (Cauchy-Kriterium für Konvergenz im \mathbb{R}^d). Eine Folge $(x_n)_n$ ist genau dann im \mathbb{R}^d konvergent, wenn $(x_n)_n$ eine Cauchy-Folge ist. Das heißt

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N}: \|x_n - x_m\|_2 < \varepsilon \quad \forall n, m \geq N$$

Beweis. „ \Rightarrow “ Wie im Fall \mathbb{R} .

„ \Leftarrow “ Sei $(x_n)_n$ Cauchy-Folge.

\Rightarrow Alle Koordinaten $(x_n^j)_n$ sind Cauchy-Folgen in \mathbb{R} , weil

$$\begin{aligned} |x_n^j - x_m^j| &= \sqrt{|x_n^j - x_m^j|^2} \leq \sqrt{\sum_{l=1}^d |x_n^l - x_m^l|^2} \\ &= \|x_n - x_m\|_2 \\ \Rightarrow x_n &:= \lim_{n \rightarrow \infty} x_n^j \text{ existiert} \\ \Rightarrow x &= \lim_{n \rightarrow \infty} x_n \text{ existiert} \end{aligned}$$

□

2. *Beweis.* Wir wollen Satz 6.6.8 im \mathbb{R}^d zeigen: Jede beschränkte Folge $(x_n)_n$ in \mathbb{R}^d besitzt eine konvergente Teilfolge. ($(x_n)_n$ ist beschränkt, wenn $\exists R \geq 0: \|x_n\|_2 \leq R \quad \forall n \in \mathbb{N}$. Bzw., wenn $x_n \in \{y \in \mathbb{R}^d \mid \|y\|_2 \leq R\}$ (abgeschlossene Kugel mit Radius R um 0).).

$$\begin{aligned} \Rightarrow \forall j = 1, \dots, d: (x_n^j)_n &\text{ beschränkte Folge im } \mathbb{R}^d \\ \Rightarrow \exists \text{ Teilfolge } (x_{n_k}^1)_k &\text{ von } (x_n^1)_n, \text{ welche in } \mathbb{R} \text{ konvergiert} \\ \Rightarrow \text{Ausdünnung } \sigma: \mathbb{N} &\rightarrow \mathbb{N} \text{ mit } \sigma(k) < \sigma(k+1) \\ n_k &:= \sigma(k) \quad \text{Existenz des Grenzwerts } x_1 := \lim_{n \rightarrow \infty} x_{\sigma(k)} \end{aligned}$$

Genauso für $\lim(x_{n_k}^2)_k$

$$\stackrel{6.6.8}{\Rightarrow} \exists \kappa: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}: (x_{\kappa(k)}^2)_k \text{ konvergent}$$

Catch: $(x_{\sigma(k)}^1, x_{\sigma(k)}^2)_k$ ist im Allgemeinen keine Teilfolge von $(x_n^1, x_n^2)_n$. Lösung betrachte

$$\begin{aligned} &(x_{\sigma(k)})_k \text{ Teilfolge von } (x_n)_n \\ &= (x_{\sigma(k)}^1, x_{\sigma(k)}^2, x_{\sigma(k)}^3, \dots, x_{\sigma(k)}^d) \end{aligned}$$

(Noch in Bearbeitung)

9 [*] \mathbb{R}^d , Konvergenz im \mathbb{R}^d , die komplexen Zahlen \mathbb{C} und der Raum \mathbb{C}^d

Mache mit $(x_{\sigma(k)}^2)_k$ weiter

$\xrightarrow{6.6.8} \exists$ konvergente Teilfolge von $(x_{\sigma(k)}^2)_k$

\Rightarrow Ausdünnung $\sigma_2: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$

$\Rightarrow (x_{\sigma(\sigma_2(k))}^2)_k$ konvergent

$x_2 := \sigma \circ \sigma_2$

\Rightarrow Neue Teilfolge $(x_{\kappa_2(k)}) = (x_{\kappa_2(k)}^1, x_{\kappa_2(k)}^2, x_{\kappa_2(k)}^3, \dots, x_{\kappa_2(k)}^d)$

mit $\lim_{k \rightarrow \infty} x_{\kappa_2(k)}^1$ und $\lim_{k \rightarrow \infty} x_{\kappa_2(k)}^2$ existent

Mache induktiv so weiter, nach maximal d Schritten sind wir fertig.

Jede Cauchy-Folge in \mathbb{R}^d ist beschränkt.

Beweis.

$\varepsilon = 1$

$\Rightarrow \exists N: \|x_n - x_m\|_2 \leq 1 \quad \forall n, m \geq N$

$\Rightarrow \|x_n\|_2 = \|x_n - x_N + x_N\|_2 \leq \|x_n - x_N\|_2 + \|x_N\|_2 \quad \forall n \geq N$
 $< 1 + \|x_N\|_2$

$\Rightarrow \|x\|_2 \leq \max(\|x_1\|_2, \|x_2\|_2, \dots, \|x_{N-1}\|_2, 1 + \|x_N\|_2)$

□

Auch: Eine Cauchy-Folge im \mathbb{R}^d ist genau dann konvergent, wenn sie eine konvergente Teilfolge besitzt. (Beweis wie im Fall $d = 1$).

Alle bisherigen Konvergenz-Sätze, welche nicht die Anordnung im \mathbb{R} benötigen, übertragen sich auf \mathbb{R}^d .

Insbesondere: Reihe $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ ist absolut konvergent, falls $\sum_{n=1}^{\infty} \|a_n\|_2 < \infty$.

Ist eine Reihe $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ in \mathbb{R}^d konvergent, so konvergieren alle Umordnungen gegen den selben Wert. Und es gilt die Umkehrung! (Satz von Direcklet in \mathbb{R}^d) □

9.2 [*] Die Komplexen Zahlen

Was sind die komplexen Zahlen?

$x^2 + 1$ ist nie Null $\forall x \in \mathbb{R}$. Wir definieren eine Zahl i mit $i^2 = -1$.

Schreiben $x + iy$ mit $x, y \in \mathbb{R}$.

$$(x_1 + y_1 \cdot i) \cdot (x_2 + y_2 \cdot i) = x_1 \cdot x_2 + x_1 \cdot i \cdot y_2 + i \cdot y_1 \cdot x_2 + (i \cdot y_1) \cdot (i \cdot y_2)$$

$$= x_1 \cdot x_2 - y_1 \cdot y_2 + (x_1 \cdot y_2 + y_1 \cdot x_2) \cdot i$$

$$(x_1 + y_1 \cdot i) + (x_2 + y_2 \cdot i) = x_1 + x_2 + (y_1 + y_2) \cdot i$$

Betrachte $\mathbb{R}^2 = \{(x, y) \mid x, y \in \mathbb{R}\}$.

$$z = (x, y)$$

$$z_1 + z_2 := (x_1, y_1) + (x_2, y_2)$$

$$:= (x_1 + x_2, y_1 + y_2)$$

(Noch in Bearbeitung)

Wir definieren eine „seltsame“ Multiplikation

$$\begin{aligned} z_1 \cdot z_2 &:= (x_1, y_1) \cdot (x_2, y_2) \\ &:= (x_1 x_2 - y_1 y_2, x_1 y_2 + x_2 y_1) \end{aligned}$$

Wir definieren den Betrag

$$|z| := \text{Länge des Vektors } (x, y) = \sqrt{x^2 + y^2}$$

Wir nennen

$$\begin{aligned} x &= \text{Realteil von } z \\ y &= \text{Imaginärteil von } z \end{aligned}$$

Man rechnet einfach nach, dass Multiplikation und Addition Assoziativität, Kommutativität und Distributivität erfüllen.

$$\begin{aligned} (1, 0) \cdot (1, 0) &= (1, 0) \\ (0, 1) \cdot (0, 1) &= (0 - 1, 0) = -(1, 0) \\ z \cdot (1, 0) &= (x, y) \cdot (1, 0) = (x, y) = z \end{aligned}$$

in \mathbb{R}^2

$$\begin{aligned} (x, y) &= x \cdot e_1 + y \cdot e_2 & (e_1 = (1, 0), e_2 = (0, 1)) \\ (e_1)^2 &= e_1 & (e_2)^2 = -e_1 \end{aligned}$$

Wir schreiben 1 für e_1 und i für e_2 .

$$\begin{aligned} z = (x, y) &= x \cdot e_1 + y \cdot e_2 \\ &= x \cdot 1 + y \cdot i \\ &= x + y \cdot i \end{aligned}$$

$\mathbb{C} = \mathbb{R}^2$ mit obiger Multiplikation und Addition. Wir identifizieren \mathbb{R} mit $\mathbb{R} \times \{0\}$ als Teilmenge von \mathbb{C} .

Was ist das Inverse von $z = x + y \cdot i$?

Definition 9.2.1 (Komplexe Konjugation). $\bar{z} := \overline{x + yi} := x - yi$

$$\begin{aligned} z \cdot \bar{z} &= (x + yi) \cdot (x - yi) \\ &= (x^2 - (yi)^2) = x^2 + y^2 = |z|^2 \\ \Rightarrow |z| &= \sqrt{z \cdot \bar{z}} \\ \frac{1}{z} &= \frac{\bar{z}}{z \cdot \bar{z}} = \frac{\bar{z}}{|z|^2} = \frac{x - yi}{x^2 + y^2} = \frac{x}{x^2 + y^2} - \frac{y}{x^2 + y^2} \cdot i \end{aligned}$$