

2. Natürliche Zahlen

Definition (Induktionsmengen)

Sei $M \subseteq \mathbb{R}$. M heißt eine **Induktionsmenge** (IM) : \iff

- (1) $1 \in M$
- (2) Aus $x \in M$ folgt stets $x + 1 \in M$

Beispiel

\mathbb{R} , $[1, \infty)$, und $\{1\} \cup [2, \infty)$ sind Induktionsmengen.

$J := \{A \subseteq \mathbb{R} : A \text{ ist eine IM}\}$; $\mathbb{N} := \bigcap_{A \in J} A$ heißt die Menge der **natürlichen Zahlen**.

Satz 2.1 (Induktionsmengen)

- (1) $\mathbb{N} \in J$
- (2) $\mathbb{N} \subseteq A \forall A \in J$
- (3) \mathbb{N} ist *nicht* nach oben beschränkt.
- (4) $\forall x \in \mathbb{R} \exists n \in \mathbb{N} : n > x$
- (5) *Prinzip der vollständigen Induktion*: Ist $A \subseteq \mathbb{N}$ und $A \in J \implies A = \mathbb{N}$

Beweis

- (1) $1 \in A \forall A \in J \implies x + 1 \in A \forall x \in A \forall A \in J \implies x + 1 \in \mathbb{N} \forall x \in \mathbb{N}$
- (2) folgt aus der Definition von \mathbb{N}
- (3) Annahme: \mathbb{N} ist nach oben beschränkt. **(A15)**: $s := \sup \mathbb{N}$. 1.3 $\implies \exists n \in \mathbb{N} : n > s - 1$;
(1) $\implies n + 1 \in \mathbb{N} \implies n + 1 > s$; Widerspruch
- (4) folgt aus (3)
- (5) $A \overset{\text{Vor.}}{\subseteq} \mathbb{N} \overset{(2)}{\subseteq} A \implies A = \mathbb{N}$ ■

Satz 2.2 (Beweisverfahren durch vollständige Induktion)

Für jedes $n \in \mathbb{N}$ sei eine Aussage $A(n)$ gemacht. Es gelte: (I) $A(1)$ ist wahr und (II) aus $n \in \mathbb{N}$ und $A(n)$ wahr folgt stets $A(n + 1)$ ist wahr.

Behauptung: $A(n)$ ist wahr für **jedes** $n \in \mathbb{N}$.

2. Natürliche Zahlen

Beweis

$A := \{n \in \mathbb{N} : A(n) \text{ ist wahr}\}$. Dann: $A \subseteq \mathbb{N}$, aus (I) und (II) folgt $A \in J$. ■

Beispiele:

- (1) $A(n) := n \geq 1$. $A(n) \forall n \in \mathbb{N}$. Beweis (induktiv):

Induktionsanfang (IA): $1 \geq 1$, also ist $A(1)$ wahr.

Induktionsvoraussetzung (IV): Sei $n \in \mathbb{N}$ und $A(n)$ wahr (also $n \geq 1$)

Induktionsschritt (IS, $n \leadsto n+1$): $n+1 \stackrel{(IV)}{\geq} 1+1 \geq 1$, also $A(n+1)$ wahr.

- (2) Für $n \in \mathbb{N}$ sei $A_n := (\mathbb{N} \cap [1, n]) \cup [n+1, \infty)$.

Behauptung: $\underbrace{A_n \text{ ist eine Induktionsmenge}}_{A(n)} \forall n \in \mathbb{N}$

- (3) Sei $n \in \mathbb{N}, x \in \mathbb{R}$ und $n < x < n+1$. Behauptung: $x \notin \mathbb{N}$. Beweis: Annahme: $x \in \mathbb{N}$. Sei A_m wie im oberen Beispiel (2) $\implies A_m \in J \implies \mathbb{N} \subseteq A_m \implies x \in A_m \implies x \leq m$ oder $x \geq m+1$, Widerspruch!

- (4) Behauptung: $\underbrace{1+2+\dots+n}_{A(n)} = \frac{n(n+1)}{2} \quad \forall n \in \mathbb{N}$

Beweis: (induktiv)

IA: $\frac{1+1}{2} = 1 \implies A(1)$ ist wahr.

IV: Sei $n \in \mathbb{N}$ und $1+2+\dots+n = \frac{n(n+1)}{2}$.

IS: $(n \leadsto n+1)$

$$1+2+\dots+n+(n+1) \stackrel{(IV)}{=} \frac{n(n+1)}{2} + (n+1)(IV) = (n+1)\left(\frac{n}{2}+1\right) = \frac{(n+1)(n+2)}{2} \implies A(n+1) \text{ ist wahr}$$

Definition (Summen- und Produktzeichen)

- (1) Seien $a_1, a_2, \dots, a_n \in \mathbb{R}, n \in \mathbb{N}$.

$$\sum_{k=1}^n a_k := a_1 + a_2 + \dots + a_n$$

$$\prod_{k=1}^n a_k := a_1 \cdot a_2 \cdot \dots \cdot a_n$$

- (2) $\mathbb{N}_0 := \mathbb{N} \cup \{0\}$,

$\mathbb{Z} := \mathbb{N}_0 \cup \{-n : n \in \mathbb{N}\}$ (*ganze Zahlen*),

$\mathbb{Q} = \{\frac{p}{q} : p \in \mathbb{Z}, q \in \mathbb{N}\}$ (*rationale Zahlen*).

Satz 2.3 (Ganze Zahlen)

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

- (1) Ist $M \subseteq \mathbb{N}$, so existiert $\min M$

- (2) Ist $M \subseteq \mathbb{Z}$ nach oben beschränkt, so existiert $\max M$; ist $M \subseteq \mathbb{Z}$ nach unten beschränkt, so existiert $\min M$.

- (3) Ist $a \in \mathbb{R}$, so existiert genau ein $k \in \mathbb{Z} : k \leq a < k + 1$. Bezeichnung: $[a] := k$.
- (4) Sind $x, y \in \mathbb{R}$ und $x < y$, so existiert ein $r \in \mathbb{Q} : x < r < y$.

Beweis

- (1) $1 \leq n \ \forall n \in M \implies M$ ist nach unten beschränkt. 1.2 $\implies \exists \alpha = \inf M$ mit $\alpha + 1$ ist keine untere Schranke von M . $\implies \exists m \in M : m < \alpha + 1$. Sei $n \in M$. Annahme: $n < m \implies n < m < \alpha + 1 \leq n + 1 \implies n < m < n + 1$. Da $n \in \mathbb{N}$: Widerspruch.
- (2) Zur Übung
- (3) $M := \{z \in \mathbb{Z} : z \leq a\}$. Annahme: $M = \emptyset \implies z > a \ \forall z \in \mathbb{Z} \implies -n > a \ \forall n \in \mathbb{N} \implies n < -a \ \forall n \in \mathbb{N}$. Widerspruch zu 2.1(3); also: $M \neq \emptyset$. (2) $\implies \exists k := \max M$.
- (4) $y - x > 0 \xrightarrow{2.1(4)} \exists n \in \mathbb{N} : n > \frac{1}{y-x} \implies \frac{1}{n} < y - x \implies x + \frac{1}{n} < y$
 $m := [nx] \in \mathbb{Z} \implies m < nx < m + 1 \implies \frac{m}{n} \leq x < \frac{m+1}{n} = \frac{m}{n} + \frac{1}{n} \leq x + \frac{1}{n} \implies$
 $x < \overset{:=r}{\frac{m+1}{n}} < y$ ■

