

# Analysis

## (1) 0 Vorbemerkungen

### (1) 0.0 Abkürzungen, Vorbemerkungen, Beweismethoden

Abkürzungen, soweit sie sich nicht aus dem Zusammenhang erklären:

$\forall$  : für alle                     $\exists$ : es existiert                     $\exists_1$ : es existiert genau ein

Vor.: Voraussetzung                    Beh.: Behauptung                    Lös:Lösungen

Bew : Beweis                    Bez: Bezeichnung                    baf: beliebig, aber fest

Dx.x.x: Definitionx.x.x

Sx.x.x:Satz x.x.x                    (xxxx): Seite xxxx

$\wedge$  logische UND Verknüpfung

$\vee$  logische ODER Verknüpfung (evt enthält der Text noch unkorrigierte Verwechslungen von  $\wedge$  und  $\vee$ , sollte aus dem Kontext ersichtlich sein)

$$\sum_{k=1}^n k=1+2+\dots+n, \quad \sum_{k=0}^{\infty} a_k=a_0+a_1+\dots$$

#...# : eigene Überlegungen

//kursiv// : kursiver Inhalt zum Ersparen des Zurückblätterns! Falls doch: Seitennr in Klammern.

Fast alle Lemmas oder Hilfssätze habe ich als Sätze bezeichnet. Das wird evt nochmals überarbeitet und rückgängig gemacht.

Manche Aufgaben habe ich ohne Lösungen aufgenommen.

Mengen in Großbuchstaben K,R,M...

$b_x$  bedeutet meist, dass b von x abhängt

----- Hinweise auf Strukturen in den Gedankengängen

$<$ : 5 ist kleiner als 10     $>$ : 10 ist größer als 5

Bsp  $x \leq 5$ : x ist kleiner als 5 oder x ist gleich 5

Bsp  $x \geq 6$ : x ist größer als 5 oder x ist gleich 5

$6|24$ : 6 ist Teiler von 24, d.h. 24 geteilt durch 6 ist 4 Rest 0

$\neg B$  eine Aussage B ist nicht wahr,

Bsp A: Kuh ist ein Säugetier, B: Kuh gibt Milch

$\neg B$  : Kuh gibt keine Milch,  $\neg A$  : Kuh ist kein Säugetier

A  $\Rightarrow$  B : Aus A folgt B, oder A impliziert B, oder  
Aussage                    Aussage

A ist hinreichend für B, oder B ist notwendig für A  
(denn, wenn B nicht gilt, dann kann A auch nicht gelten)

A ist äquivalent zu B, A gilt genau dann, wenn B gilt, A ist notwendig und hinreichend für B.

$A \Rightarrow B$  und  $B \Rightarrow A$

Genauer später zu:

N natürliche Zahlen 1,2,3,...  $N_0$  0,1,2,3..

Z ..., -3, -2, -1, 0, +1, +2, ...

Q rationale Zahlen  $1/3$ ,  $17/33$  usw

R irrationale Zahlen  $\sqrt{2}$ ,  $\sin 0,17$  usw

Beweismethoden

Gegeben seien 2 Aussagen A und B. Es soll die Implikation  $A \Rightarrow B$ , d.h. ein Satz mit Vor. A und Beh. B bewiesen werden.

Schema: Satz Vor. A, Beh. B, Beweis.

a) Direkter Beweis

Man leitet aus A, mittels früher bewiesener wahrer Aussagen, B direkt aus A her.

Definitionen und Sätze für Schritte zu folgenden Bsp werden erst später behandelt. Die Schritte sind aber trotzdem aus „Schulwissen“ einleuchtend. Es kommt hier nur auf das Verstehen der Beweismethoden an.

Bsp: A: Sei  $p \geq 5$  eine Primzahl (d.h. natürliche Zahl, die durch keine natürliche Zahl  $q$  mit  $2 \leq q \leq p-1$  teilbar ist)

$B_{(.)}$  :  $8 \mid (p^2-1)$

$B_{(..)}$  :  $3 \mid (p^2-1)$

$B_{(...)}$  :  $24 \mid (p^2-1)$

Bew:  $p \geq 5$ ,  $p$  Primzahl,  $\neg (2 \mid p)$ ,  $\neg (3 \mid p)$

(.) Sei  $p$  ungerade  $\Rightarrow 2 \mid p-1$  und  $2 \mid p+1 \Rightarrow p-1=2q$ ,  $p+1=2q+2=2(q+1)$ .

Wenn  $q$  gerade oder ungerade  $\Rightarrow p-1$  oder  $p+1$  durch 4 teilbar  
 $\Rightarrow 8 \mid (p-1)(p+1)=p^2-1$

(..) Annahme 3 teilt nicht  $p \Rightarrow 3 \mid p-1$  oder  $3 \mid p+1$  (denn 3 teilt eine der Zahlen  $n-1, n, n+1$ ,  $n$  natürlich)  $\Rightarrow 3 \mid (p^2-1)$ .

(...) Ist  $(p^2-1)$  auch durch  $3 \times 8 = 24$  teilbar?

Division mit Rest

(Euklidischer Divisionalgorithmus, wird genauer später behandelt  
 $p=q \cdot t+r$ , Bsp:  $47=15 \cdot 3+2 \dots 0 \leq r < 3 \cdot 15=45$ )

Ansatz  $q$  so, dass  $p^2-1 = 8 \cdot 3q+r$  mit  $0 \leq r < 3 \cdot 8=24$ , oder auch  $0 \leq r \leq 23$

(.)  $8 \mid (p^2-1) \stackrel{(.),(.)}{=} 8 \mid (8 \cdot 3q+r) \stackrel{0 \leq r < 24}{=} \begin{matrix} 8 \mid 8 \cdot 3q \\ 8 \mid r \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} r=0, 8, 16 \\ 8 \mid r \end{matrix}$

$\wedge$

(..)  $3 \mid (p^2-1) \stackrel{3 \mid (8 \cdot 3q)}{=} 3 \mid (8 \cdot 3q+r) \stackrel{0 \leq r < 24}{=} \begin{matrix} 3 \mid 8 \cdot 3q \\ 3 \mid r \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} r=r=0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 \\ 8 \mid r \end{matrix}$   
 $\Rightarrow r=0 \Rightarrow 3 \cdot 8q=24 \mid (p^2-1)$

b) Indirekter Beweis

Man leitet aus der Negation von B die Negation von A her:

$\neg B \Rightarrow \neg A$  ist logisch äquivalent mit  $A \Rightarrow B$ .

Bsp: A: Seien  $a, b$  ganze Zahlen mit  $3 \mid (a^2+b^2)$ .

B:  $3 \mid a$  oder  $3 \mid b$

Bew:  $\neg B : 3 \text{ nicht} | a \text{ und } 3 \text{ nicht} | b,$   
 $3 \text{ teilt eine der Zahlen } a-1, a, a+1 \text{ bzw. } b-1, b, b+1 \Rightarrow$   
 $3 | (a-1)(a+1) \text{ und } 3 | (b-1)(b+1) \Rightarrow 3 | (a^2-1) + (b^2-1) \Rightarrow$   
 $3 | a^2 + b^2 - 2 \Rightarrow \exists \text{ ganzes } q \text{ mit } a^2 + b^2 - 2 = 3q \Rightarrow a^2 + b^2 = 3q + 2$   
 $\Rightarrow 3 \text{ nicht} | a^2 + b^2 \text{ da sonst } 3 | 2 \text{ gelten müsste, d.h. } \Rightarrow \neg A$

c) Widerspruchsbeweis

Ausgehend von den Aussagen A und  $\neg B$  leitet man einen Widerspruch zu bereits bewiesenen (wahren!) Aussagen her.

Also kann  $\neg B$  nicht wahr sein, d.h. B ist wahr (tertium non datur)

Bsp:

A:  $\sqrt{2}$  sei die positive Lösung von  $x^2=2$ ,

B:  $\sqrt{2}$  ist nicht rational, d.h.  $\sqrt{2} \neq p/q$  mit natürlichen Zahlen  $p, q, q \neq 0$ .

Bew:  $\neg B : (\sqrt{2})^2=2$  und  $x = \sqrt{2} = p/q$  mit teilerfremden  $p, q$

$$A \text{ und } \neg B \Rightarrow x^2 = \frac{p^2}{q^2} = 2 \Rightarrow p^2 = 2q^2 \Rightarrow 2 | p^2 \Rightarrow p \text{ gerade,}$$

denn falls p ungerade d.h.  $p=2l+1 \Rightarrow p^2=4l^2+4l+1=2q^2$  d.h.

$$p^2 = \underbrace{(2l^2+2l)+1}_{\text{ungerade}} \neq \underbrace{2q^2}_{\text{gerade}}$$

$$\Rightarrow p=2m \Rightarrow p^2=4m^2=2q^2 \Rightarrow 2m^2=q^2 \Rightarrow q \text{ gerade} \Rightarrow 2 | p \text{ und } 2 | q.$$

Widerspruch zur Annahme teilerfremd (oder durch Wiederholung  $\Rightarrow$  p und q sind durch 2 mit beliebig großem teilbar).

d)  $A \Leftrightarrow B : A \Rightarrow B$  und  $B \Rightarrow A$  wie bei a), b), c)

e) Man zeige über Zwischenaussagen  $A_1, \dots, A_n$  (die wahr sind!)

$$A \Leftrightarrow A_1 \Leftrightarrow A_2 \Leftrightarrow \dots \Leftrightarrow A_n \Leftrightarrow B$$

Bsp: siehe Bew. zu  $f^{-1}(\cup_{M \in S} M) = \cup_{M \in S} f^{-1}(M)$  Seite 20

# Bem:  $(A \Rightarrow B \wedge \neg A \Rightarrow \neg B) \Rightarrow (A \Leftrightarrow B)$

f) Beweis durch Induktion siehe P1.5

**0.1 Mengen (3)**

**D0.1.1 (3)**

Zusammenfassung M, von bestimmten, wohlunterschiedenen Objekten unserer Anschauung oder unseres Denkens, welche die Elemente von M genannt werden, zu einem Ganzen.

Bem: bestimmt  $\rightarrow$  für jedes Objekt muss entscheidbar sein, ob es zur Menge gehört oder nicht

wohlunterschieden  $\rightarrow$  jedes Objekt kommt höchstens 1x in M vor

Obige Definition ist unbefriedigend, wird aber im folgenden benutzt, da eine genauere axiomatische Begründung der Mengenlehre den Rahmen sprengen würde.

Bez:  $x \in M \Leftrightarrow$  Objekt x ist Element von M

$x \notin M \Leftrightarrow$  Objekt x ist kein (nicht)Element von M.

Niemals gilt  $M \in M$

**D0.1.2 (4)**

$M_1$  und  $M_2$  heißen gleich,  $M_1=M_2:\Leftrightarrow$

Beide Mengen bestehen aus den gleichen Objekten, oder  $x\in M_1 \Leftrightarrow x\in M_2$   
( $\Leftrightarrow$  genau dann, wenn)

Bem: Eine Menge kann definiert sein durch

- 1.) eine Aufzählung ihrer Elemente, z.B.  $M = \{a, b, c, \dots, z\}$  oder
- 2.) durch Charakterisierung, bzw Beschreibung ihrer Elemente  $x$  durch eine Eigenschaft  $E(x)$ :

$$M = \{x | E(x)\} = \{x | x \text{ hat die Eigenschaft } E(x)\}$$

Bsp.: 1.)  $M = \{5, 6, 7, 8\} =$

$$\{x | x \text{ ist natürliche Zahl mit Bedingung } 4 < x < 9\}$$

2.)  $M = \{2, 3, 5\} = \{x | x \text{ ist Primzahl und Teiler von } 120\} =$   
Menge der Primteiler von 120

3.)  $\{5, 6, 6, 7, 8\}$  ist keine Menge

Im folgenden betrachten wir nur Mengen, deren Elemente mathematische Objekte sind, die jeweils zu einer festen Grundmenge gehören.

#### D0.1.3(4)

1.) Die Menge, die keine Elemente enthält, heißt leere Menge  $\emptyset$

2.) Eine Menge  $M_1$  ist Teilmenge einer Menge  $M_2:\Leftrightarrow$

$$\forall x \in M_1 \text{ gilt } x \in M_2 \quad \text{bzw} \quad \forall x \in M_1: x \in M_2 \text{ oder } x \in M_1 \Rightarrow x \in M_2$$

Bez:  $M_1 \subset M_2$  oder  $M_2 \supset M_1$

3.)  $M_1$  heißt echte Teilmenge von  $M_2:\Leftrightarrow M_1 \subset M_2$  und  $M_1 \neq M_2$

Bez:  $M \subsetneq M_2$ .

Bem: 1.) Für 2 Mengen  $M_1, M_2$  gilt:  $M_1 = M_2 \Leftrightarrow M_1 \subset M_2$  und  $M_2 \subset M_1$

2.) Für 2 beliebige Mengen  $M_1$  und  $M_2$  braucht nicht  
 $M_1 \subset M_2$  oder  $M_2 \subset M_1$  zu gelten.

Folgerungen: Für Mengen  $M_1, M_2, M_3$  gilt

1.)  $M_1 \subset M_2$  und  $M_2 \subset M_3$  kurz  $M_1 \subset M_2 \subset M_3$  Transitivität  $\Rightarrow M_1 \subset M_3$

2.)  $M_1 \subset M_1 \Rightarrow$  Reflexivität

3.)  $\emptyset \subset M_1$

#### (4) D0.1.4(4)

Seien  $M_1, M_2$  Mengen, dann heißt

1.)  $M_1 \cup M_2 := \{x | x \in M_1 \text{ oder } x \in M_2\}$  die Vereinigung von  $M_1$  und  $M_2$

Allgemeiner: Sind  $A_j$ , für  $j \in J$ , beliebig viele Mengen, so ist deren Vereinigung  $\bigcup_{j \in J} A_j = \{x: \exists j \in J, \text{ mit } x \in A_j\}$

( $J$  Indexmenge entsprechend der Zahl der Mengen)

2.)  $M_1 \cap M_2 := \{x | x \in M_1 \text{ und } x \in M_2\}$  der Durchschnitt von  $M_1$  und  $M_2$

Allgemeiner: Sind  $A_j$ , für  $j \in J$ , beliebig viele Mengen, so ist deren Durchschnitt  $\bigcap_{j \in J} A_j = \{x: x \in A_j \quad \forall j \in J\}$

3.)  $M_1 \setminus M_2 := \{x \mid x \in M_1 \text{ und } x \notin M_2\}$  die Differenz von  $M_1$  und  $M_2$  oder das Komplement von  $M_2$  relativ zu  $M_1$

4.)  $M_1$  und  $M_2$  disjunkt:  $\Leftrightarrow M_1 \cap M_2 = \emptyset$

### A0.1.1

a) Es seien  $A, B, C$  Mengen. Zeige:  $C \subset A \Leftrightarrow A \cup C = A$

#Vorbemerkung: Es wird wiederholt D0.1.3, Bem1 benutzt:

#  $M_1 = M_2 \Leftrightarrow M_1 \subset M_2 \text{ und } M_2 \subset M_1$

Bew: Z.z. (.)  $C \subset A \Rightarrow A \cup C = A$  (..)  $A \cup C = A \Rightarrow C \subset A$

(.)  $x \in A \Leftrightarrow x \in A \vee x \in C \Rightarrow x \in A \cup C \wedge x \in A \Rightarrow A \cup C \subset A$

$x \in A \overset{C \subset A}{\cup} C = x \in A \vee x \in C \Leftrightarrow x \in A \Rightarrow x \in A \cup C \wedge x \in A \Rightarrow A \cup C \subset A \Rightarrow$

$A \cup C \subset A \wedge A \cup C \subset A = A \cup C = A$

kürzer:  $x \in A \cup C \Leftrightarrow x \in A \text{ oder } x \in C \Leftrightarrow x \in A$

(..) Sei  $x \in C \Rightarrow x \in A \text{ oder } x \in C \Leftrightarrow x \in \underbrace{A \cup C}_{=A} \Rightarrow x \in A$ .

Also  $C \subset A$

b) Es seien  $A, B$  Mengen. Zeige:  $A \subset B \Leftrightarrow A \cap B = A$

Bew: z.z. (.)  $A \subset B \Rightarrow A \cap B = A$  (..)  $B \cap A = A \Rightarrow A \subset B$

(.) Unabhängig von  $A \subset B$  gilt wegen  $x \in B \cap A \Rightarrow x \in B \wedge x \in A \Rightarrow$

$x \in A \Rightarrow B \cap A \subset A$

$x \in A \overset{A \subset B}{\cap} B = x \in A \wedge x \in B \Leftrightarrow x \in A \wedge x \in B \cap A \Rightarrow B \cap A \supset A$

kürzer:  $x \in B \cap A \Leftrightarrow x \in A \wedge x \in B \Leftrightarrow x \in A$

(..)  $x \in A \Rightarrow x \in B \cap A \Leftrightarrow x \in B \wedge x \in A \Rightarrow x \in B$ . Also  $A \subset B$

andere Formulierung

(.) Es gilt für beliebige Mengen  $A, B: A \cap B \subset A$

(denn  $x \in A \cap B \Rightarrow x \in A$  und  $x \in B \Rightarrow x \in A$ )

Es sei  $A \subset B$ . Z.z. vgl oben:  $A \subset A \cap B$

Sei  $x \in A \subset B \Rightarrow x \in A$  und  $x \in B \Rightarrow x \in A \cap B \Rightarrow x \in A \cap B$

(..) Es gelte  $A \cap B = A$ . Z.z.:  $A \subset B$

Sei  $x \in A$  und  $x \in B \Rightarrow x \in A \cap B \Rightarrow x \in A$  und  $x \in B \Rightarrow x \in B$

(.) und (..)  $\Rightarrow$  Beh

### D0.1.5 (5)

Ist  $M_1 \subset M_2$ , so heißt  $M_1^C := M_2 \setminus M_1$  das Komplement von  $M_1$  in  $M_2$  oder von  $M_1$  bzgl  $M_2$  (Ober-, Grundmenge  $M_2$  muss bekannt sein)

### D0.1.6 (5)

Ist  $M$  eine Menge, so heißt  $\mathbf{P}(M) := \{A \mid A \subset M\}$  die Potenzmenge von  $M$

(= eine Menge von Mengen oder Menge aller Teilmengen von  $M$ , d.h. Elemente von  $\mathbf{P}(M)$  sind Teilmengen von  $M$ )

Bsp: 1.)  $M = \{5, 6, 7\}$

$\mathbf{P}(M) = \{\emptyset, \{5\}, \{6\}, \{7\}, \{5, 6\}, \{5, 7\}, \{6, 7\}, \{5, 6, 7\}\}$  Anzahl  $8 = 2^3$

2.)  $A = \{1, 2, 3\}$ ,  $\mathbf{P}(A) = \{A_j \mid 1 \leq j \leq 8\}$  mit

$A_1 = \emptyset$ ,  $A_2 = \{1\}$ ,  $A_3 = \{2\}$ ,  $A_4 = \{3\}$ ,  $A_5 = \{1, 2\}$ ,  $A_6 = \{1, 3\}$ ,  $A_7 = \{2, 3\}$ ,  $A_8 = \{1, 2, 3\}$

3.)  $M = \emptyset$ ,  $\mathbf{P}(\emptyset) = \{\emptyset\}$ ,  $\mathbf{P}(\mathbf{P}(\emptyset)) = \{\emptyset, \underbrace{\{\emptyset\}}_{\mathbf{P}(\emptyset)}\}$

$$P(P(P(\emptyset))) = \{ \emptyset, \underbrace{\{\emptyset\}}_{P(P(\emptyset))}, \underbrace{\{\{\emptyset\}\}}_{P(P(P(\emptyset)))}, \underbrace{\{\emptyset, \{\emptyset\}\}}_{P(P(P(\emptyset)))} \}$$

### D0.1.7(6)

Sind  $M_1$  und  $M_2$  Mengen, so heißt die Menge  $M_1 \times M_2 := \{(x, y) \mid x \in M_1 \text{ und } y \in M_2\}$  das kartesische Produkt von  $M_1$  mit  $M_2$

(=Menge aller geordneten Paare  $(x, y)$  aus  $x \in M_1, y \in M_2$ )

Beachte: Bei den Paaren kommt es auf die Reihenfolge an.  $(a, b) \neq (b, a)$ , ausser  $a=b$

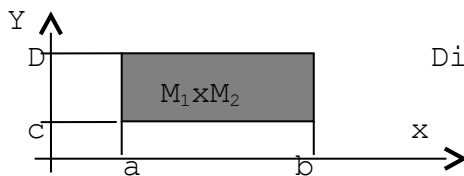
Allgemein:  $\prod_{i=1}^n A_i = A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n := \{(a_1, a_2, \dots, a_n) \mid a_i \in A_i, i=1, 2, \dots, n\}$

Falls ein  $A_i = \emptyset \Rightarrow \prod_{i=1}^n A_i = \emptyset$

Sind alle  $A_i$  gleich, ist das n-fache kartesische Produkt  $A^n := \prod_{i=1}^n A$

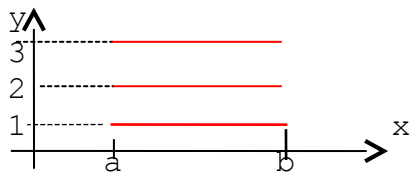
Bem: 1.)  $(x_1, y_1), (x_2, y_2) \in M_1 \times M_2$ . Dann gilt  $(x_1, y_1) = (x_2, y_2) : \Leftrightarrow x_1 = x_2 \text{ und } y_1 = y_2$   
 2.)  $(x, y) \neq (y, x)$  für  $x, y \in M_1 \times M_2, x \neq y$

Bsp: 1.)  $M_1 = [a, b], M_2 = [c, d]$  Bem\*:  $[a, b] = \{x \mid a \leq x \leq b\}$



Die Randlinien gehören dazu

2.)  $M_1 = \{1, 2, 3\}, M_2 = [a, b]$



### A0.1.2

Finde diejenige Menge  $A$ , deren Potenzmenge so wenig Elemente enthält wie nur möglich

Lös: Die Potenzmenge einer Menge ist niemals leer, denn sie enthält immer die Teilmengen  $\emptyset$  und  $A$ ; diese sind genau dann gleich, wenn  $A$  die leere Menge ist. Also gilt: Ist  $A \neq \emptyset$ , so hat  $P(A)$  Mindestens 2 Elemente. Daher ist die gesuchte Menge  $A = \emptyset$

### A0.1.3

Charakterisiere alle Mengen  $A$ , deren Potenzmenge genau 2 Elemente hat

### A0.1.4

Charakterisiere alle Mengen  $A$ , deren Potenzmenge nur endlich viele Elemente hat

### A0.1.5

Seien  $A = \{a_1, a_2\}, B = \{b_1, b_2\}$  und  $M = A \times B = \{(a_i, b_j), i, j=1, 2\}$ .

Bestimme die Potenzmenge von M.

**A0.1.6**

Seien  $A_j$  Mengen mit  $n_j$  Elementen für  $1 \leq j \leq n$ . Bestimme die Anzahl der Elemente von  $A_1 * \dots * A_n$ .

**A0.1.7**

In der linearen Algebra wird  $\mathbb{R}^n$  meist als Menge der Spaltenvektoren der Länge n definiert. Wieso ist die streng genommen nicht gleich dem kartesischen Produkt  $\mathbb{R} * \dots * \mathbb{R}$  (mit n Faktoren)?

**A0.1.8**

Zeige: Die Menge aller reellen Matrizen mit n Zeilen und m Spalten kann man als kartesisches Produkt von  $\mathbb{R}^n$  mit sich selber (m mal) auffassen.

**A0.1.9**

Es seien A, B Mengen. Zeige:

a)  $P(A) \cap P(B) = P(A \cap B)$

// D0.1.6 (5)  $P(M) := \{A \mid A \subseteq M\}$  //

Bew:  $M \in P(A) \cap P(B) \Leftrightarrow M \in P(A) \wedge M \in P(B) \stackrel{D0.1.6}{\Leftrightarrow} M \subseteq A \wedge M \subseteq B \Leftrightarrow$

$M \subseteq A \cap B \stackrel{D0.1.6}{\Leftrightarrow} M \in P(A \cap B)$

„ $\Rightarrow$ “ Sei  $x \in M \stackrel{D0.1.6}{\Rightarrow} x \in A \wedge x \in B \Rightarrow x \in M \wedge x \in A \cap B \Rightarrow x \in M \in P(A \cap B)$

„ $\Leftarrow$ “ Sei  $x \in M \stackrel{M \subseteq A \cap B}{\Rightarrow} x \in A \cap B \Rightarrow x \in A \wedge x \in B \Rightarrow x \in M \subseteq A \cap B$

b)  $P(A) \cup P(B) \subseteq P(A \cup B)$

// D0.1.4 (4) 1.)  $M_1 \cup M_2 := \{x \mid x \in M_1 \text{ oder } x \in M_2\}$  //

// D0.1.6 (5)  $P(M) := \{A \mid A \subseteq M\}$  //

Bew:  $M \in P(A) \cup P(B) \stackrel{D0.1.4 1.)}{\Leftrightarrow} M \in P(A) \vee M \in P(B) \stackrel{D0.1.6}{\Leftrightarrow} M \subseteq A \vee M \subseteq B \stackrel{*}{\Leftrightarrow}$

(Umkehrung stimmt nicht, siehe c)

$M \subseteq A \cup B \stackrel{D0.1.6}{\Leftrightarrow} M \subseteq P(A \cup B)$

\*  $x \in M \Rightarrow x \in A \vee x \in B \Rightarrow x \in A \cup B$

c)  $P(A) \cup P(B) = P(A \cup B)$  gilt im allgemeinen nicht (anhand eines Gegenbeispiels)

Lös:  $A = \{a\}, B = \{b\}, a \neq b, A \cup B = \{a, b\}$

$P(A) \cup P(B) = \{\emptyset, \{a\}\} \cup \{\emptyset, \{b\}\} = \{\emptyset, \{a\}, \{b\}\} \neq \{\emptyset, \{a\}, \{b\}, \{a, b\}\} = P(A \cup B)$ . Also  $P(A) \cup P(B) \neq P(A \cup B)$

**A0.1.10** Seien  $A_1, A_2, B_1, B_2$  Mengen. Zeige:

a)  $(A_1 \times A_2) \cap (B_1 \times B_2) = (A_1 \cap B_1) \times (A_2 \cap B_2)$

// D0.1.4 (4) 2.)  $M_1 \cap M_2 := \{x \mid x \in M_1 \wedge x \in M_2\}$  //

// D0.1.7 (5)  $M_1 * M_2 := \{(x, y) \mid x \in M_1 \wedge y \in M_2\}$  //

Bew:  $(x_1, x_2) \in (A_1 \times A_2) \cap (B_1 \times B_2) \stackrel{D0.1.4 2.)}{\Leftrightarrow} (x_1, x_2) \in A_1 \times A_2 \wedge (x_1, x_2) \in B_1 \times B_2 \stackrel{D0.1.7}{\Leftrightarrow}$

$(x_1 \in A_1 \wedge x_2 \in A_2) \wedge (x_1 \in B_1 \wedge x_2 \in B_2) \Leftrightarrow$

$(x_1 \in A_1 \wedge x_1 \in B_1) \wedge (x_2 \in A_2 \wedge x_2 \in B_2) \stackrel{D0.1.4 2.)}{\Leftrightarrow}$

$x_1 \in A_1 \cap B_1 \wedge x_2 \in A_2 \cap B_2 \stackrel{D0.1.7}{\Leftrightarrow} (x_1, x_2) \in (A_1 \cap B_1) \times (A_2 \cap B_2)$

b)  $(A_1 \times A_2) = \emptyset \Leftrightarrow A_1 = \emptyset \wedge A_2 = \emptyset$

//D0.1.7 (5)  $M1 * M2 := \{(x, y) \mid x \in M_1 \wedge y \in M_2\}$  //

dazu äquivalente Aussage  $(A_1 \times A_2) \neq \emptyset \Leftrightarrow A_1 \neq \emptyset \wedge A_2 \neq \emptyset$

Bew:  $(A_1 * A_2) \neq \emptyset \Leftrightarrow \exists (a_1, a_2) \in A_1 * A_2 \stackrel{D0.1.7}{\Leftrightarrow} \exists a_1 \in A_1 \wedge \exists a_2 \in A_2 \Leftrightarrow$

$$A_1 \neq \emptyset \wedge A_2 \neq \emptyset$$

Andere Formulierung:

„ $\Rightarrow$ “ Sei  $(A_1 * A_2) = \emptyset$ . Annahme:  $A_1 \neq \emptyset \wedge A_2 \neq \emptyset \Rightarrow \exists a_1 \in A_1 \wedge \exists a_2 \in A_2 \Rightarrow (a_1, a_2) \in A_1 \times A_2$  Widerspruch da  $(A_1 \times A_2) = \emptyset \Rightarrow$  Annahme falsch  $\Rightarrow A_1 = \emptyset \vee A_2 = \emptyset$

„ $\Leftarrow$ “ Sei  $A_1 = \emptyset \vee A_2 = \emptyset$ . Annahme:  $(A_1 \times A_2) \neq \emptyset \Rightarrow (a_1, a_2) \in A_1 \times A_2 \Rightarrow \exists a_1 \in A_1 \wedge \exists a_2 \in A_2 \Rightarrow A_1 \neq \emptyset \wedge A_2 \neq \emptyset$ .

Widerspruch, also Annahme falsch, d.h.  $(A_1 \times A_2) = \emptyset$ .

c)  $(.) A_1 \subset B_1 \wedge A_2 \subset B_2 \Rightarrow A_1 \times A_2 \subset B_1 \times B_2$ ;

$(..) A_1 \times A_2 \subset B_1 \times B_2 \stackrel{A_1 \times A_2 \neq \emptyset}{\Leftrightarrow} A_1 \subset B_1 \wedge A_2 \subset B_2$ .

Bew:  $(.) (A_1 \subset B_1 \wedge A_2 \subset B_2) \wedge \text{sei } (x_1, x_2) \in A_1 \times A_2 \Rightarrow x_1 \in A_1 \wedge x_2 \in A_2 \stackrel{A_1 \subset B_1 \wedge A_2 \subset B_2}{\Rightarrow}$

$$x_1 \in B_1 \wedge x_2 \in B_2 \Rightarrow (x_1, x_2) \in B_1 \times B_2 \Rightarrow A_1 \times A_2 \subset B_1 \times B_2$$

$(..) \text{Sei } x_1 \in A_1 \stackrel{\Rightarrow}{=} \exists x_2 \in A_2 \Rightarrow (x_1, x_2) \in A_1 * A_2 \stackrel{\Rightarrow}{=} (x_1, x_2) \in B_1 * B_2 \Rightarrow$

$$x_1 \in B_1 \wedge x_2 \in B_2 \Rightarrow x_1 \in A_1 \wedge x_1 \in B_1 \Rightarrow A_1 \subset B_1$$

Bew von  $A_2 \subset B_2$  analog

### Rechenregeln, Folgerungen zu Mengen (9)

1.) Für jeweils beliebige Mengen  $M_1, M_2, M_3$  gelten die

a) Kommutativgesetze

$$M_1 \cup M_2 = M_2 \cup M_1 \qquad M_1 \cap M_2 = M_2 \cap M_1$$

b) Assoziativgesetze

$$(M_1 \cup M_2) \cup M_3 = M_1 \cup (M_2 \cup M_3), \quad (M_1 \cap M_2) \cap M_3 = M_1 \cap (M_2 \cap M_3)$$

c) Distributivgesetze

$$M_1 \cap (M_2 \cup M_3) = (M_1 \cap M_2) \cup (M_1 \cap M_3), \quad M_1 \cup (M_2 \cap M_3) = (M_1 \cup M_2) \cap (M_1 \cup M_3)$$

Bew:  $x \in M_1 \cap (M_2 \cup M_3) \Leftrightarrow x \in M_1 \wedge (x \in M_2 \vee x \in M_3) \Leftrightarrow$

$$(x \in M_1 \wedge x \in M_2) \vee (x \in M_1 \wedge x \in M_3) \Leftrightarrow x \in (M_1 \cap M_2) \cup (M_1 \cap M_3).$$

2.) Für beliebige Mengen  $M_1, M_2$  gilt

a)  $M_1 \cup M_2 = M_2 \Rightarrow M_1 \subset M_2$

Bew: A0.1.1

b)  $M_1 \cup \emptyset = M_1, \quad M_1 \cap \emptyset = \emptyset$

c)  $M_1 \subset M_2 \Rightarrow (M_1^c)^c = M_1$

d)  $(M_1 \cup M_2)^c = M_1^c \cap M_2^c \quad (M_1 \cap M_2)^c = M_1^c \cup M_2^c$  Morgansche Regeln

$$\text{Bew: } x \in (M_1 \cup M_2)^c \Leftrightarrow x \notin (M_1 \cup M_2) \Leftrightarrow x \notin M_1 \wedge x \notin M_2 \Leftrightarrow x \in M_1^c \cap M_2^c.$$

Allgemeiner:



Sind  $A_j$ , für  $j \in J$ , eine beliebige Anzahl von Teilmengen einer festen Grundmenge  $X$ , so gelten:

$$X / (\cup_{j \in J} A_j) = \cap_{j \in J} (X \setminus A_j), \quad X \setminus (\cap_{j \in J} A_j) = \cup_{j \in J} (X \setminus A_j)$$

Das Komplement einer Vereinigung ist der Durchschnitt der Komplemente....

Bew: Sei  $x \notin X / (\cup_{j \in J} A_j)$ , d.h.,  $x \in A_j$  für mindestens ein  $j \in J$ .

Das ist gleichbedeutend mit  $x \notin X \setminus A_j$  für dieses  $j$ , also

$$x \notin \cap_{j \in J} (X \setminus A_j), \text{ und somit ist } X / (\cup_{j \in J} A_j) = \cap_{j \in J} (X \setminus A_j).$$

Zweiter Teil analog

$$e) M_1 \subset M_2 \subset M_3 \Leftrightarrow M_2^c \subset M_1^c.$$

Bem: Dualitätsprinzip. Bei Komplementbildung finden folgende Vertauschungen statt:

$$\cup \rightarrow \cap, \quad \cap \rightarrow \cup, \quad \subset \rightarrow \supset, \quad \supset \rightarrow \subset, \quad M \rightarrow M^c, \quad M^c \rightarrow M^{cc} = M.$$

**A0.1.11** Setze  $B_j = X \setminus A_j \quad \forall j \in J$  und führe die zweite de Morgansche Regel auf die erste zurück:  $M_1 \subset M_2 \subset M_3 \Leftrightarrow M_2^c \subset M_1^c$

**A0.1.12** Es seien  $A, B, C$  Mengen. Zeige:  $C \subset A \Leftrightarrow (A \cap B) \cup C = A \cap (B \cup C)$

//Distributivgesetze (8):  $M_1 \cup (M_2 \cap M_3) = (M_1 \cup M_2) \cap (M_1 \cup M_3)$  //

//D0.1.4 (4) 2.)  $M_1 \cap M_2 = \{x / x \in M_1 \text{ und } x \in M_2\}$  //

$$\text{Bew: } \Rightarrow (A \cap B) \cup C = (A \cup C) \cap (B \cup C) = A \cap (B \cup C)$$

Distributivgesetz = A, da  $C \subset A$

$$\text{„}\Leftarrow\text{“ Sei } x \in C \Rightarrow x \in A \cap B \quad \forall x \in C \Leftrightarrow x \in (A \cap B) \cup C$$

$$\Leftrightarrow x \in A \wedge x \in (B \cup C) \Rightarrow x \in A \Rightarrow C \subset A$$

D0.1.4.2 2.)

Widerspruchsbeweis:

Annahme  $C \not\subset A$  trotzdem  $(A \cap B) \cup C = A \cap (B \cup C) \dots?$

$$C \not\subset A \Rightarrow x \in C \wedge x \notin A \Rightarrow \neg (x \in A \wedge x \in (B \cup C)) \Rightarrow x \notin (A \cap (B \cup C))$$

$$\Rightarrow x \in A \vee x \in (B \cup C) \Rightarrow x \in (A \cap (B \cup C))$$

$$\Rightarrow (A \cap B) \cup C \neq A \cap (B \cup C) \text{ Widerspruch zu}$$

$$(A \cap B) \cup C = A \cap (B \cup C)$$

$$\Rightarrow x \in C \wedge x \notin A \Rightarrow C \not\subset A$$

**A0.1.13** (Siehe auch Distributivgesetze)

Seien  $A, B$  und  $C$  Mengen. Zeige:

$$a) A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$$

$$\text{Lös: } x \in A \cup (B \cap C) \Leftrightarrow x \in A \vee x \in B \cap C \Leftrightarrow x \in A \vee (x \in B \wedge x \in C)$$

$$\Leftrightarrow (x \in A \vee x \in B) \wedge (x \in A \vee x \in C) \Leftrightarrow x \in (A \cup B) \wedge x \in (A \cup C) \Leftrightarrow$$

$$x \in (A \cup B) \cap (A \cup C)$$

b)  $(A \cup B) \cap C = (A \cap C) \cup (B \cap C)$

**A0.1.14**

Es seien A, B und C Teilmengen einer Menge  $X \neq \emptyset$ . Zeige:

a)  $A \subset B \Leftrightarrow B^c \subset A^c$ .

Lös: (.) "⇒": Sei  $x \in B^c \Rightarrow x \notin B \Rightarrow x \notin A$  (sonst  $x \in A \Rightarrow x \in B$  Widerspruch)  $\Rightarrow x \in A^c \Rightarrow B^c \subset A^c$

(..) "⇐": Sei  $B^c \subset A^c \stackrel{()}{\Rightarrow} (A^c)^c \subset (B^c)^c \Rightarrow A \subset B$   
(.)

b)  $(A \cap B)^c = A^c \cup B^c$

Lös: Sei  $x \in (A \cap B)^c$  baf  $\Leftrightarrow x \notin (A \cap B) \Leftrightarrow x \notin A \vee x \notin B \Leftrightarrow x \in A^c \vee x \in B^c \Leftrightarrow x \in A^c \cup B^c$

**D0.1.8** (10) Sei  $S \neq \emptyset$  ein System von Mengen (= Menge von Mengen), dann heißt

- 1.) die Menge  $\bigcup_{M \in S} M := \{x \mid \exists M \in S: x \in M\}$   
die Vereinigung aller Mengen aus S
- 2.) die Menge  $\bigcap_{M \in S} M := \{x \mid \forall M \in S: x \in M\}$   
der Durchschnitt aller Mengen aus S
- 3.) das System S (paarweise) disjunkt:  $\Leftrightarrow \forall M_1, M_2 \in S, M_1 \neq M_2 : M_1 \cap M_2 = \emptyset$

Bem: Die Morgan'schen Regeln gelten für beliebige  $\cup, \cap$ , d.h., falls für ein System von Mengen  $S \neq \emptyset$  und eine Menge  $\overline{M}$  gilt:  $M \subset \overline{M} : \forall M \in S$  (.)  $(\bigcup_{M \in S} M)^c = \bigcap_{M \in S} M^c$ , (..)  $(\bigcap_{M \in S} M)^c = \bigcup_{M \in S} M^c$

RR 2c)  $M_1 \subset M_2 \Rightarrow (M_1^c)^c = M_1$

Bew: (.)  $x \in (\bigcup_{M \in S} M)^c \Leftrightarrow x \in \overline{M}$  und  $x \notin \bigcup_{M \in S} M \Leftrightarrow x \in \overline{M}$  und  $x \notin M \forall M \in S \Leftrightarrow x \in M^c \forall M \in S \Leftrightarrow x \in \bigcap_{M \in S} M^c$

(..)  $(\bigcap_{M \in S} M)^c \stackrel{RR 2c}{=} (\bigcap_{M \in S} (M^c)^c)^c = ((\bigcup_{M \in S} M^c)^c)^c \stackrel{()}{=} \bigcup_{M \in S} M^c$

Bem:  $S = \emptyset : \bigcup_{M \in S} M := \emptyset$

**A0.1.15** Beweise:  $A \setminus (B \setminus C) = (A \setminus B) \cup (A \cap C)$

#Lös:  $\forall x \in (A \setminus (B \setminus C))$  gilt:  $\{x \in A \wedge x \notin (B \setminus C)\} \Leftrightarrow \{x \in A \wedge (x \notin B \wedge x \in C)\} \Leftrightarrow \{x \in A \wedge (x \notin B) \wedge (x \in A \wedge x \in C)\} \Leftrightarrow x \in (A \setminus B) \cup (A \cap C)$

**A0.1.16**

Def:  $\Delta(Z) := \{(x, y) \in Z \mid x=y\} \subset Z^2$ , Zeige:  $X \subset Y \Leftrightarrow \Delta(X) \subset \Delta(Y)$

Bew: „⇒“ Sei  $X \subset Y$  &  $(a, b) \in \Delta(X) \Rightarrow (a, b) \in X^2 = X \times X, a=b \Rightarrow (a, b) \in \Delta(Y)$   
„⇐“ Sei  $\Delta(X) \subset \Delta(Y)$  &  $x \in X \Rightarrow (x, x) \in X^2 \Rightarrow (x, x) \in \Delta(X) \Rightarrow (x, x) \in \Delta(Y) \Rightarrow (x, x) \in Y^2 \Rightarrow x \in Y \Rightarrow x \in X \wedge x \in Y \Rightarrow X \subset Y$

//D0.1.6(5)

//Ist M eine Menge, so heißt  $P(M) := \{A \mid A \subset M\}$  die Potenzmenge von M

//(= eine Menge von Mengen oder Menge aller Teilmengen von M, d.h.  
//Elemente von  $\mathbf{P}(M)$  sind Teilmengen von M)

**D0.1.9(11) Partition**

Seien X eine Menge,  $P:=\{P_1, P_2, \dots\} \subseteq \mathbf{P}(M)$ ,  $P_1, P_2, \dots \neq \emptyset$ .

Falls  $X = \bigcup_i P_i \wedge ((P_i = P_j) \vee (P_i \cap P_j = \emptyset)) \forall P_i, P_j$ , heißt P Partition von X