

Mathematik I

1. Semester

Vorlesung vom 21. Januar 2015

Inhaltsverzeichnis

I. Grundlagen	1
1. Elementare Mengenlehre	2
1.1. Mengen	2
1.1.1. Beschreibung von Mengen	3
1.2. Operationen auf Mengen	14
1.2.1. Vereinigungsmenge	14
1.2.2. Schnittmenge	15
	iii
2. Die komplexen Zahlen	76
2.1. Definition und Rechenregeln	76
2.1.1. Konstruktion der komplexen Zahlen	77
2.1.2. Gesetze eines (Zahl-)Körpers (Körperaxiome)	78
2.2. Operationen auf komplexen Zahlen	85
2.2.1. Komplex-Konjugation	85
2.2.2. Betrag	91
2.2.3. Multiplikativ Inverses	94
2.2.4. Inverses und Komplex-Konjugiertes	97

Dozent

Peter Ullrich

peter.ulrich@fh-deg.de

Mitschrift

Christoph Stephan

chn.stephan@outlook.com

2.3.	Darstellungen komplexer Zahlen	98
2.3.1.	Algebraische (kartesische) Form	98
2.3.2.	Trigonometrische Form	100
2.3.3.	Eulersche Form	104
2.3.4.	Exponentialform	104
2.4.	Komplexe Wurzeln	112
2.5.	Komplexe Exponential- und Logarithmusfunktion	123
2.5.1.	Komplexe Exponentialfunktion	123
2.5.2.	Komplexe Logarithmusfunktion	125
2.6.	Anwendung auf Schwingungen	130
2.6.1.	Überlagerung (=Superposition) der beiden Schwingungen	132
2.6.2.	A als Zeiger	134
2.6.3.	B als Zeiger	135
2.6.4.	Überlagerung (Superposition)	136
2.6.5.	Zusammenfassung	138
3.	Logik	140
3.1.	Aussagen	140

1.4.	Stellenwertsysteme	217
1.4.1.	Umrechnen Dezimaldarstellung in b -adische Darstellung	222
2.	Gleichungen und Ungleichungen	228
2.1.	Definitionen	228
2.2.	Lineare Gleichungen und Ungleichungen	256
2.3.	Algebraische Gleichungen und Ungleichungen	275
2.3.1.	Eine Unbestimmte x	275
2.3.2.	Zwei Unbestimmte x_1, x_2 (x, y)	309
2.4.	Bruchgleichungen und Bruchungleichungen	318
2.5.	Wurzelgleichungen	327
2.6.	Exponential- und Logarithmusgleichungen	332
2.7.	Goniometrische Gleichungen	343
2.8.	Das Newton-Raphson-Verfahren	352

3.2.	Verknüpfung von Aussagen, Aussagenlogik	142
3.2.1.	Schaltalgebra	152
3.2.2.	Boolesche Funktion/Schaltfunktion	161
3.3.	Formeln über R bzw. C, Quantoren	165
3.4.	Vollständige Induktion	178
3.4.1.	Vollständige Induktion	179
4.	Intervalle	186
4.1.	Uneigentliche Intervalle	187
II.	Algebra und Arithmetik	189
1.	Zahlen	190
1.1.	Ganze Zahlen und Teilbarkeit	190
1.2.	Euklidischer Algorithmus	199
1.3.	Modulare Arithmetik, endliche Körper	205

III.	Analysis einer Veränderlichen	355
1.	Folgen und Reihen	356
1.1.	Grundbegriffe	356
1.2.	Grenzwerte und Konvergenzkriterien	361
1.2.1.	Rechenregeln für Grenzwerte	365
1.2.2.	Konvergenzkriterien für Reihen	369
2.	Stetigkeit von Funktionen	373
3.	Differentiation	378
3.1.	Differenzierbarkeit	378
3.2.	Ableitung erster und höherer Ordnung	385
3.3.	Ableitungsregeln	387
3.3.1.	Ableitung elementarer Funktionen	388
3.4.	Ableitung der Umkehrfunktion	389
3.5.	Extremwerte und Krümmung	393

4. Elementare Funktionen und Kurven	406
4.1. Potenzfunktionen	406
4.2. Ganzrationale Funktionen	412
4.3. gebrochen rationale Funktionen	420
4.4. Exponential- und Logarithmusfunktionen	435
4.5. Trigonometrischen Funktionen	441
4.6. Hyperbelfunktionen	453

5. Integration	462
5.1. Bestimmtes Integral	462
5.2. Hauptsatz der Differenzial- und Integralrechnung (HDI)	471
5.3. Stammfunktionen	475
5.4. Berechnen von bestimmten Integralen	478
5.5. Integrationsmethoden	482
5.5.1. Elementare Integrationsregeln	482
5.5.2. Integration durch Substitution:	484
5.5.3. Integration durch Partialbruchzerlegung (PBZ)	487
5.5.4. Partielle Integration (Produktintegration)	497
5.6. Uneigentliche Integrale	498
5.7. Anwendungen	500

1. Elementare Mengenlehre

1.1. Mengen

Definition: (Naive) Unter einer Menge verstehen wir jede Zusammenfassung von bestimmten wohl unterschiedenen Objekten x unserer Anschauung ohne unseres Denkens zu einem Ganzen. (*Cantor, 1845-1918*)

Die Objekte der Menge heißen Elemente.

Die Menge ohne Elemente heißt leere Menge, i.Z. \emptyset bzw. $\{\}$

Beachte: Uneingeschränkter Gebrauch obiger Definition führt zu Widersprüchen.
 \Rightarrow Zermelo-Fraenkelsche Mengenlehre

Definition: Gehört ein Objekt x zu einer Menge M , so schreiben wir $[x \in M]$, andernfalls schreiben wir $[x \notin M]$.

Bemerkung: In einer Menge kann ein Element höchstens einmal enthalten sein.
 \Rightarrow keine Mehrfachnennungen

1.1.1. Beschreibung von Mengen

Beschreibung von Mengen durch

1. Aufzählung

$$M = \{x_1; x_2; \dots\} = \{x_1, x_2, \dots\}$$

- 3 -

$$4. \mathbb{Q} = \{x \mid x = \frac{p}{q}, p \in \mathbb{Z}, q \in \mathbb{N}\}$$

Beachte: $\frac{-p}{q} = \frac{p}{-q} = -\frac{p}{q}$

$$5. d^2 = 1^2 + 1^2 = 2$$

$$d = \sqrt{2}$$

Es existiert ein mathematischer Beweis für: $d \notin \mathbb{Q}$

$$d = \sqrt{2} \in \mathbb{R}, \sqrt{2} \notin \mathbb{Q}$$

$\mathbb{R} = \{x \mid x \text{ ist reelle Zahl}\}$ Menge der reellen Zahlen

$\mathbb{R}^+ = \{x \mid x \in \mathbb{R}, x > 0\}$ positive reelle Zahlen

$\mathbb{R}_0^+ = \{x \mid x \in \mathbb{R}, x \geq 0\}$ nicht negative reelle Zahlen

$\mathbb{R}^- = \{x \mid x \in \mathbb{R}, x < 0\}$ negative reelle Zahlen

- 5 -

(Reihenfolge der Elemente spielt keine Rolle)

2. Angabe einer Eigenschaft A

$$M = \{x \mid x \text{ hat Eigenschaft } A\} = \{x : x \text{ hat Eigenschaft } A\}$$

Beispiele:

$$1. M = \{1, \nabla, A, \{\alpha, \beta\}\} \quad 1 \in M, \nabla \in M, A \in M, \{\alpha, \beta\} \in M, \alpha \notin M, \beta \notin M$$

Auch Mengen können Elemente in Mengen sein.

$$2. \mathbb{N} = \{1, 2, 3, 4, \dots\}$$
 Menge der Natürlichen Zahlen

$$\mathbb{N}_0 = \{0, 1, 2, 3, 4, \dots\}$$

$$\mathbb{N}_{\text{gerade}} = \{2, 4, 6, 8, \dots\} = \{n \mid n \in \mathbb{N}, 2 \text{ teilt } n\}$$

$$\mathbb{N}_{\text{ungerade}} = \{1, 3, 5, 7, \dots\} = \{n \mid n \in \mathbb{N}, 2 \text{ teilt } n + 1\} = \{\dots, \frac{n+1}{2} \in \mathbb{N}\}$$

$$3. \mathbb{Z} = \{0, \pm 1, \pm 2, \dots\}$$
 Menge der ganzen Zahlen

- 4 -

$\mathbb{R}_0^- = \{x \mid x \in \mathbb{R}, x \leq 0\}$ nicht positive reelle Zahlen

6. $\mathbb{C} = \{x \mid x \text{ ist komplexe Zahl}\}$ Menge der komplexen Zahlen

$$i = \sqrt{-1} \notin \mathbb{R}, i \in \mathbb{C}$$

$$i^2 = -1 \quad i = \text{imaginäre Zahl/Einheit}$$

$$5i + 3i = 8i, \quad \frac{1}{i} = -i$$

Definition:

1. Zwei Mengen M und N heißen gleich, wenn sie dieselben Elemente besitzen, i.Z. $M = N$

2. Ist jedes Element einer Menge M auch Element einer Menge N , so heißt M Teilmenge von N ; i.Z. $M \subseteq N$; (N heißt dann Obermenge von M). Gilt zudem $M \neq N$, so heißt M echte Teilmenge von N ; i.Z. $M \subset N$; (N heißt dann echte Obermenge von M).

- 6 -

Eigenschaften der Teilmengenrelation

- i) $M \subseteq N$ Reflexivität
- ii) $M \subseteq N$ und $N \subseteq M$ dann $M = N$ Antisymmetrie
- iii) $L \subseteq M$ und $M \subseteq N$ dann $L \subseteq N$ Transitivität

Beispiele:

1. $\{1, 2\} \subseteq \{1, 2, 3, 4\}$
es gilt sogar $\{1, 2\} \subset \{1, 2, 3, 4\}$
2. $\mathbb{N} \subset \mathbb{Z} \subset \mathbb{Q} \subset \mathbb{R} \subset \mathbb{C}$
3. $\emptyset \subset \{a, b\}$
 \emptyset ist Teilmenge jeder Menge M
 $\emptyset \subseteq M$ auch $\emptyset \subseteq \emptyset$

- 7 -

Definition: Für eine Menge M heißt

$$\begin{aligned}\mathcal{P}(M) &= \{A \mid A \text{ ist Teilmenge von } M\} \\ &= \{A \mid A \subseteq M\}\end{aligned}$$

die Potenzmenge von M .

Bemerkung: $A \subseteq M \Leftrightarrow A \in \mathcal{P}(M)$

Beispiel: $M = \{1, 2, 3\}$

$$\mathcal{P}(M) = \{\emptyset, \{1\}, \{2\}, \{3\}, \{1, 2\}, \{1, 3\}, \{2, 3\}, \{1, 2, 3\}\}$$

Definition: Die Anzahl der Elemente einer Menge M heißt Mächtigkeit (oder Kardinalität) von M , i.Z. $|M|$

- 9 -

4. $\{1, 2\} \subseteq \{1, 2\}$
aber $\{1, 2\} \not\subseteq \{1, 2\}$
5. Bestimmen Sie alle Teilmengen von $\{1, 2, 3\}$

$\{\}$	(0-elementige Teilmengen)
$\{1\}$	
$\{2\}$	(1-elementige Teilmengen)
$\{3\}$	
$\{1, 2\}$	
$\{1, 3\}$	(2-elementige Teilmengen)
$\{2, 3\}$	
$\{1, 2, 3\}$	(3-elementige Teilmengen)

\Rightarrow es gibt genau 8 Teilmengen von $\{1, 2, 3\}$

Mengen können auch Mengen als Elemente besitzen.

- 8 -

Besitzt M unendlich viele Elemente, so schreibt man $|M| = \infty$

Beispiele:

1. $|\{1, \nabla, A, \{\alpha, \beta\}\}| = 4$
2. $|\mathbb{N}| = \infty$
3. für $M = \{1, 2, 3\}$ gilt $|\mathcal{P}(M)| = 8$

Satz: Ist M eine endliche Menge, $n = |M|$, so gilt
 $|\mathcal{P}(M)| = 2^n$

Beweis: $M = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$

$$A \subseteq M$$

- 10 -

A	0	1	\dots	\dots	1	
M	x_1	x_2	\dots	x_i	\dots	x_n

\Rightarrow 1:1-Korrespondenz

Teilmengen von $M \xrightarrow{1:1} (0|1)$ -Folgen der Länge n

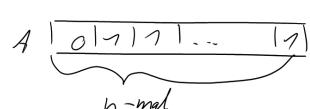


Abbildung 1.1. – Veranschaulichung von A

Es gilt genau $\underbrace{2 \cdot 2 \cdot \dots \cdot 2}_{n\text{-mal}} = 2^n$

(0|1)-Folgen der Länge n

- 11 -

$$1. M = \{1, 2, 3\}; n = |M| = 3$$

#2-elementige Teilmengen von $M = \binom{3}{2} = \frac{3!}{2!(3-2)!} = \frac{3!}{2!1!} = \frac{1 \cdot 2 \cdot 3}{1 \cdot 2 \cdot 1} = 3$

$$2. M = \{1, 2, 3, 4, 5\}; n = |M| = 5$$

#3-elementige Teilmengen von $M = \binom{5}{3} = \frac{5!}{3!(5-3)!} = \frac{5!}{3!2!} = \frac{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 2} = 10$

Bemerkung: Aus beiden Sätzen folgt: $\binom{n}{0} + \binom{n}{1} + \binom{n}{2} + \dots + \binom{n}{n} = 2^n$

Definition: Für $n \in \mathbb{N}$ und $0 \leq k \leq n$ ($k \in \mathbb{Z}$) heißt

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$$

spricht «n über k» oder «k aus n»

Binominialkoeffizient. TR $\cong \binom{n}{r}$

Das heißt $[n! = 1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot n]$ die Fakultät von n , sprich «n Fakultät».

$$(0! = 1)$$

Satz: Eine endliche Menge M , $n = |M|$, besitzt genau $\binom{n}{k}$ k-elementige Teilmengen.

Beispiele:

- 12 -

1.2. Operationen auf Mengen

M, N sind Mengen

1.2.1. Vereinigungsmenge

$$M \cup N = \{x \mid x \in M \text{ oder } x \in N\}$$

«inklusives oder»

$$= \{x \mid x \in M \vee x \in N\}$$

$$M_1 \cup M_2 \cup M_3 \cup \dots \cup M_r = \bigcup_{i=1}^r M_i$$

- 14 -

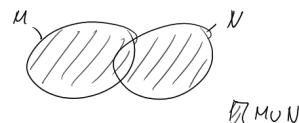


Abbildung 1.2. – Venn-Diagramm zu einer Vereinigungsmenge

1.2.2. Schnittmenge

$$\begin{aligned} M \cap N &= \{x \mid x \in M \text{ und } x \in N\} \\ &= \{x \mid x \in M \wedge x \in N\} \end{aligned}$$

- 15 -

1.2.3. Differenzmenge - Komplementärmenge

$$M \setminus N = \{x \mid x \in M \wedge x \notin N\}$$

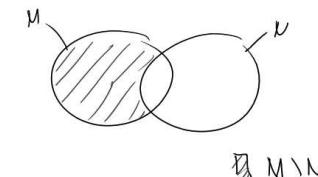
Beachte: $M \setminus N = M \setminus (M \cap N)$ 

Abbildung 1.4. – Venn-Diagramm zu einer Differenzmenge

- 17 -

$$M_1 \cap M_2 \cap M_3 \cap \dots \cap M_r = \bigcap_{i=1}^r M_i$$

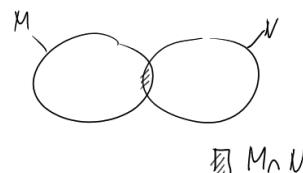


Abbildung 1.3. – Venn-Diagramm zu einer Schnittmenge

- 16 -

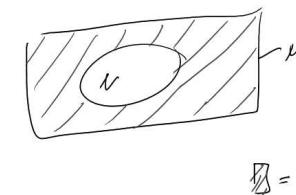
Beachte: gilt $N \subseteq M$, so schreibt man statt $M \setminus N$ einfach \overline{N}^M oder einfach \overline{N} , falls M bekannt ist. \overline{N} heißt das Komplement (oder die Komplementärmenge) von N (in M).

Abbildung 1.5. – Venn-Diagramm zu einer Komplementärmenge

- 18 -

1.2.4. Symmetrische Differenzmenge

$$M \Delta N = \{x \mid x \in M \oplus x \in N\}$$

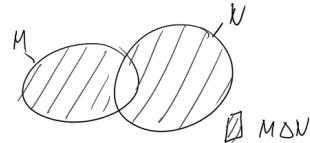


Abbildung 1.6. – Venn-Diagramm zu einer symmetrischen Differenzmenge

- 19 -

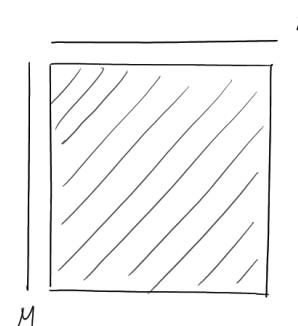


Abbildung 1.7. – Venn-Diagramm zu einer kartesischen Produktmenge

Beispiel: $M = \{1, 3, 5\}, N = \{2, 3, 5\}, \Omega = \{1, 2, 3, 4, 5\}$

1. $M \cup N = \{1, 2, 3, 5\}$
2. $M \cap N = \{3, 5\}$

- 21 -

1.2.5. Kartesische Produktmenge

$$M \times N = \{(x, y) \mid x \in M, y \in N\}$$

geordnetes Paar

= 2-Tupel

$$[(x, y) = (a, b) \Leftrightarrow x = a \wedge y = b]$$

$$M_1 \times M_2 \times \dots \times M_r = \underbrace{\{(x_1, x_2, \dots, x_r) \mid x_1 \in M_1, \dots, x_r \in M_r\}}_{r\text{-Tupel}}$$

$$M^r = \underbrace{M \times M \times \dots \times M}_{r\text{-mal}}$$

- 20 -

3. $M \setminus N = \{1\}$
 $N \setminus M = \{2\}$
 $\Omega \setminus M = \overline{M} = \{2, 4\}$
 $\Omega \setminus N = \overline{N} = \{1, 4\}$
4. $M \Delta N = \{1, 2\}$
5. $M \times N = \{(1, 2), (1, 3), (1, 5), (3, 2), (3, 3), (3, 5), (5, 2), (5, 3), (5, 5)\}$
 $M^2 = M \times M = \{(1, 1), (1, 3), (1, 5), (3, 1), (3, 3), (3, 5), (5, 1), (5, 3), (5, 5)\}$
 $M^3 = M \times M \times M = \{(1, 1, 1), \dots, (5, 5, 5)\}$

Beispiele: $\mathbb{R}^1 = \mathbb{R} \xrightarrow{1:1} \text{Zahlengerade} \quad (\text{Korrespondenz})$

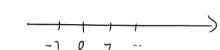


Abbildung 1.8.

- 22 -

reelle Zahl $\hat{=}$ Punkt auf der Zahlengeraden

\mathbb{R} heißt deshalb auch das Kontinuum

$\mathbb{R}^2 = \mathbb{R} \times \mathbb{R} = \{(x, y) \mid x \in \mathbb{R}, y \in \mathbb{R}\} \xleftrightarrow{1:1}$ Ebene

$(x, y) \hat{=}$ Punkt in der Ebene

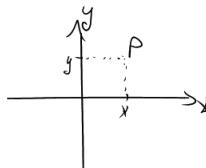


Abbildung 1.9.

$\mathbb{R}^3 = \mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R} = \{(x, y, z) \mid x \in \mathbb{R}, y \in \mathbb{R}, z \in \mathbb{R}\} \xleftrightarrow{1:1}$ Raum

$(x, y, z) \hat{=}$ Punkt im Raum

- 23 -

$i, j \leq r$) gilt.

$$\bigcup_{i=1}^r M_i = M_1 \cup \dots \cup M_r$$

disjunkte Vereinigung

Zudem heißt M_1, \dots, M_r eine Zerlegung von $M = \bigcup_{i=1}^r M_i$

- 25 -

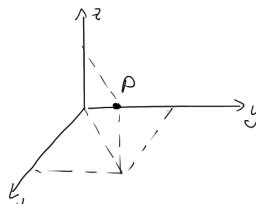


Abbildung 1.10.

Definition:

1. Zwei Mengen M und N heißen disjunkt, wenn $M \cap N = \emptyset$ gilt.
2. Eine Folge M_1, \dots, M_r heißt paarweise disjunkt, wenn $M_i \cap M_j = \emptyset$ für alle $i \neq j$ ($1 \leq i, j \leq r$) gilt.

- 24 -

Beispiel:

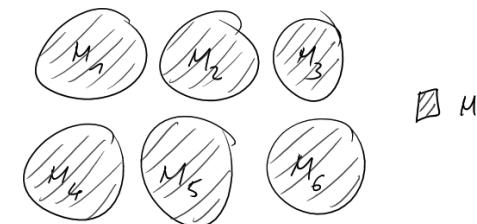


Abbildung 1.11.

Bemerkung: Für zwei Mengen M_1, M_2 ist «paarweise disjunkt» dasselbe wie «disjunkt».

Beachte: Es gibt Mengen M_1, M_2, M_3 für die $M_1 \cap M_2 \cap M_3 = \emptyset$ gilt, die aber nicht paarweise disjunkt sind.

- 26 -

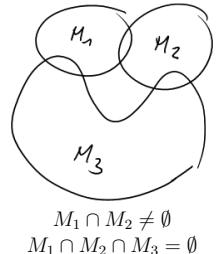


Abbildung 1.12.

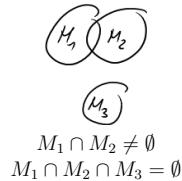


Abbildung 1.13.

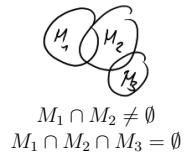


Abbildung 1.14.

- 27 -

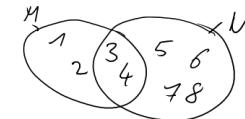


Abbildung 1.15.

$$\begin{array}{ll} M = \{1, 2, 3, 4\} & |M| = 4 \\ N = \{3, 4, 5, 6, 7, 8\} & |N| = 6 \\ M \cup N = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\} & |M \cup N| = 8 \\ M \cap N = \{3, 4\} & |M \cap N| = 2 \\ |M \cup N| = |M| + |N| - |M \cap N| & \\ 8 = 4 + 6 - 2 & \end{array}$$

Beispiel: zu 2.

- 29 -

Für endliche Mengen M, N gilt:

1. $|M \cup N| = |M| + |N| - |M \cap N|$
 sind M und N disjunkt, so gilt $|M \cup N| = |M| + |N|$ (Umkehrung gilt ebenso; als Beweis für disjunkt)

Satz:

Subadditivität:

$$\left| \bigcup_{i=1}^r M_i \right| \leq \sum_{i=1}^r |M_i|$$

$$|M_1 \cup \dots \cup M_r| \leq |M_1| + \dots + |M_r|$$

Gleichheit gilt genau dann, wenn M_1, \dots, M_r paarweise disjunkt sind.

2. Für $M \subseteq N$ gilt: $|N \setminus M| = |N| - |M|$
3. $|M \times N| = |M| \cdot |N|$

Beispiel: zu 1.

- 28 -

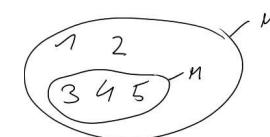


Abbildung 1.16.

$$\begin{array}{l} N = \{1, 2, 3, 4, 5\} \\ M = \{3, 4, 5\} \\ N \setminus M = \{1, 2\} \end{array}$$

sind M, N beliebig, so gilt: $|N \setminus M| = |N| - |M \cap N|$,
 da $N \setminus M = N \setminus (M \cap N)$ und $M \cap N \subseteq N$.**Beispiel:** zu 3.

- 30 -

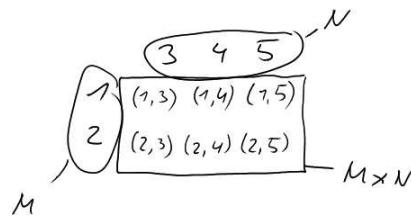


Abbildung 1.17.

$$|M| = 2$$

$$|N| = 3$$

$$|M \times N| = 6 = 2 \cdot 3 = |M| \cdot |N|$$

$$\left| \bigtimes_{i=1}^r M_i \right| = \prod_{i=1}^r |M_i|$$

$$|M_1 \times \dots \times M_r| = |M_1| \cdot \dots \cdot |M_r|$$

- 31 -

2. $r = 4$

$$|M_1 \cup M_2 \cup M_3 \cup M_4| = \underbrace{|M_1| + |M_2| + |M_3| + |M_4|}_{k=1} - \underbrace{|M_1 \cap M_2| - |M_1 \cap M_3| - |M_1 \cap M_4| - |M_2 \cap M_3| - |M_2 \cap M_4| - |M_3 \cap M_4|}_{k=2} + \underbrace{|M_1 \cap M_2 \cap M_3| + |M_1 \cap M_2 \cap M_4| + |M_1 \cap M_3 \cap M_4| + |M_2 \cap M_3 \cap M_4|}_{k=3} - \underbrace{|M_1 \cap M_2 \cap M_3 \cap M_4|}_{k=4}$$

$$\text{Anzahl} = \binom{r}{k}$$

$$k = 1 : \binom{4}{1} = 4 \quad k = 2 : \binom{4}{2} = 6$$

$$k = 3 : \binom{4}{3} = 4 \quad k = 4 : \binom{4}{4} = 1$$

- 33 -

Prinzip der Inklusion und Exklusion, Siebformel**Theorem:**

$$|M_1 \cup \dots \cup M_r| = \sum_{k=1}^r (-1)^{k-1} \sum_{1 \leq i_1 < \dots < i_k \leq r} \left| \bigcap_{\nu=1}^k M_{i_\nu} \right|$$

$$= \sum_{k=1}^r (-1)^{k-1} \sum_{1 \leq i_1 < \dots < i_k \leq r} |M_{i_1} \cap \dots \cap M_{i_k}|$$

Beispiele:1. $r = 3$

$$|M_1 \cup M_2 \cup M_3| = \underbrace{|M_1| + |M_2| + |M_3|}_{k=1} - \underbrace{|M_1 \cap M_2| - |M_1 \cap M_3| - |M_2 \cap M_3|}_{k=2} + \underbrace{|M_1 \cap M_2 \cap M_3|}_{k=3}$$

- 32 -

Die Mengenoperatoren:

- Vereinigung \cup - Schnitt \cap - Differenz \setminus - Komplement \neg - Produkt \times

genügen gewissen Rechenregeln.

Die Operatoren bilden zusammen mit den Mengen die sogenannte Mengenalgebra.Rechenregeln: $A, B \subseteq \Omega$

- 34 -

$$\begin{aligned}1. A \cap B &= B \cap A \\A \cup B &= B \cup A\end{aligned}$$

Kommutativität

$$\begin{aligned}2. A \cap (B \cap C) &= (A \cap B) \cap C \\A \cup (B \cup C) &= (A \cup B) \cup C\end{aligned}$$

Assoziativität

$$\begin{aligned}3. A \cap (B \cup C) &= (A \cap B) \cup (A \cap C) \\A \cup (B \cap C) &= (A \cup B) \cap (A \cup C)\end{aligned}$$

Distributivität

$$\begin{aligned}4. A \cap (A \cup B) &= A \\A \cup (A \cap B) &= A\end{aligned}$$

Absorption

$$\begin{aligned}5. A \cap A &= A \\A \cup A &= A\end{aligned}$$

Idempotenz

$$6. \overline{\overline{A}} = A \quad (\overline{A} = \Omega \setminus A)$$

$$\begin{aligned}7. \overline{A \cap \overline{B}} &= \overline{A} \cup \overline{B} \\ \overline{A \cup \overline{B}} &= \overline{A} \cap \overline{B}\end{aligned}$$

Gesetze von de Morgan

$$\begin{aligned}(M \cup N) \setminus (M \cap N) &= (M \cup N) \cap \overline{(M \cap N)} \\&= (M \cup N) \cap (\overline{M} \cup \overline{N}) \\&= [(M \cup N) \cap \overline{M}] \cup [(M \cup N) \cap \overline{N}] \\&= [\underbrace{(M \cap \overline{M})}_{\emptyset} \cup (N \cap \overline{M})] \cup [(M \cap \overline{N}) \cup \underbrace{(N \cap \overline{N})}_{\emptyset}] \\&= [N \cap \overline{M}] \cup [M \cap \overline{N}] \\&= (N \setminus M) \cup (M \setminus N) \\&= (M \setminus N) \cup (N \setminus M) \\&= M \Delta N\end{aligned}$$

$$2. \text{ Vereinfachen Sie } \overline{A \cap \overline{B}} \cup (B \cap C)$$

$$\begin{aligned}8. A \cup \emptyset &= A, \quad A \cap \Omega = A \\A \cap \emptyset &= \emptyset, \quad A \cup \Omega = \Omega\end{aligned}$$

Neutralität

$$9. A \cap \overline{A} = \emptyset, \quad A \cup \overline{A} = \Omega$$

Beachte: $(A, B \subseteq \Omega, \overline{B} = \Omega \setminus B)$

$$A \setminus B = A \cap \overline{B}$$

Beispiele:

$$1. \text{ Zeigen Sie } M \Delta N = (M \cup N) \setminus (M \cap N)$$

$$M \Delta N = (M \setminus N) \cup (N \setminus M)$$

$$\begin{aligned}\overline{A \cap \overline{B}} \cup (B \cap C) &= (\overline{A} \cup B) \cup (B \cap C) \\&= \overline{A} \cup \underbrace{[B \cup (B \cap C)]}_B \\&= \overline{A} \cup B\end{aligned}$$

1.4. Relationen und Abbildungen/Funktionen

1.4.1. Relationen

Definition: M, N Mengen

Eine (binäre) Relation auf $M \times N$ ist eine Teilmenge $R \subseteq M \times N$; ist $M = N$, so heißt R Relation auf M .

Statt $(x; y) \in R$ schreibt man auch xRy

R ist eine Menge von Paaren $(x; y); x \in M, y \in N$; ist $(x; y) \in R$, so stehen x und y in Relation (bezüglich R) zueinander.

Beispiele:

- 39 -

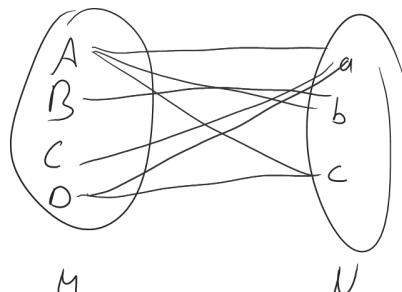


Abbildung 1.18. – Beispiel-Relation

1. In Abbildung 1.18 ist folgende Relation gezeigt:

$$R = \{(A; a), (A; b), (A; c), (B; b), (C; a), (D; a), (D; c)\}$$

2. Ordnungsrelation R_{\leq} auf \mathbb{R}

$$R_{\leq} = \{(x; y) \mid x, y \in \mathbb{R} \text{ und } x \leq y\}$$

- 40 -

statt $xR_{\leq}y$ schreibt man $x \leq y$

3. Teilmengenrelation R_{\subseteq} auf $\mathcal{P}(M)$ (M Menge)

$$R_{\subseteq} = \{(A; B) \mid A, B \subseteq M, A \subseteq B\}$$

statt $AR_{\subseteq}B$ schreibt man $A \subseteq B$

4. Teilbarkeitsrelation $R_{|}$ auf \mathbb{N}

$$R_{|} = \{(u; m) \mid u, m \in \mathbb{N} \text{ } u \mid m\}$$

« n teilt m » bzw. « m ist durch n teilbar»

5. Elementrelation R_{\in} auf $M \times \mathcal{P}(M)$

$$R_{\in} = \{(x, A) \mid x \in M, A \in \mathcal{P}(M) \text{ und } x \in A\}$$

statt $xR_{\in}M$ schreibt man $x \in M$.

- 41 -

Bemerkung: Zu einer Relation definiert man i.d.R. ein Relationszeichen \square und schreit $x\square y$ statt xRy

Definition: R sei eine Relation auf einer Menge M . Dann heißt R

- reflexiv, wenn xRx
- symmetrisch, wenn $xRy \Rightarrow yRx$
- antisymmetrisch, wenn xRy und $yRx \Rightarrow x = y$
- transitiv, wenn xRy und $yRz \Rightarrow xRz$

für alle $x, y, z \in M$ gilt.

Satz: Die Ordnungsrelation R_{\leq} auf \mathbb{R} ist reflexiv, antisymmetrisch und transitiv.

- 42 -

Definition: Eine Relation \preceq auf einer Menge M , die reflexiv, antisymmetrisch und transitiv ist, heißt partielle Ordnung auf M ; die Menge M heißt dann partiell geordnet.

Sind je zwei Elemente $x, y \in M$ bezüglich \preceq vergleichbar, so heißt \preceq totale (lineare, vollständige) Ordnung auf M und M heißt total geordnet.

Beispiele:

1. \leq auf \mathbb{R} ist eine totale Ordnung
2. \subseteq auf $\mathcal{P}(M)$ ist eine partielle Ordnung, die i.a. nicht total ist.

$$M = \{1, 2\}$$

$$\mathcal{P}(M) = \{\emptyset, \underbrace{\{1\}}, \underbrace{\{2\}}, \{1, 2\}\}$$

$A \not\subseteq B$ und $B \not\subseteq A \Rightarrow$ keine totale Ordnung (nur partiell)

Hasse-Diagramm

- 43 -



Abbildung 1.19. – Hasse-Diagramm

Definition: Eine Relation R auf einer Menge M heißt Äquivalenzrelation, wenn R

- reflexiv

- 44 -

- symmetrisch

- transitiv

ist. Statt xRy schreibt man auch $x \sim_R y$ oder einfach $x \sim y$, falls R «klar ist».

Für $x \in M$ heißt $[x] = \{y \mid y \in M \text{ und } y \sim x\}$

Äquivalenzklasse von x , und x heißt Vertreter oder Repräsentant der Äquivalenzklasse $[x]$.

Beispiele:

1. $\text{Auto1} \sim \text{Auto2} \iff \text{Auto1 hat dieselbe Farbe wie Auto2}$
2. Geraden $g, h: g \sim h \iff g \parallel h$
3. Definiere Relation \sim_n ($n \in \mathbb{N}$) auf \mathbb{N}

$x \sim_n y : \iff n \mid (x - y)$, d.h. $x - y$ ist durch n teilbar (« n teilt $x - y$ »)

- 45 -

\sim_n ist eine Äquivalenzrelation

Satz: Sei M eine Menge und \sim eine Äquivalenzrelation auf M .

- i) Für $x, y \in M$ gilt: $[x] \cap [y] \neq \emptyset \iff [x] = [y]$
(d.h. für beliebige $x, y \in M$ sind die zugehörigen Äquivalenzklassen $[x], [y]$ entweder disjunkt oder gleich)
- ii) Für jedes $y \in [x]$ gilt $[x] = [y]$, d.h. jedes Element aus $[x]$ ist ein Repräsentant der Äquivalenzklasse $[x]$.
- iii) Sind $[x_1], [x_2], \dots$ alle Äquivalenzklassen der Äquivalenzrelation \sim , so gilt

$$M = \bigcup_i [x_i] = [x_1] \cup [x_2] \cup \dots$$

Äquivalenzklassen von \sim ;

man nennt dann x_1, x_2, \dots ein vollständiges Repräsentantensystem.

- 46 -

Beispiel: Äquivalenzrelation $x \sim_3 y$ auf \mathbb{N}

$$x \sim_3 y \iff 3 \mid (x - y)$$

Äquivalenzklassen $[0], [1], [2]$

Daher ist $0, 1, 2$ ein vollständiges Repräsentantsystem von \sim_3

Statt $x \sim_3 y$ schreibt man auch $x \equiv y \pmod{3}$

« x ist kongruent zu y modulo 3»

$x \sim_3 y \iff x$ und y haben bei Division durch 3 den selben Rest.

$$x = 3a + r \quad 0 \leq r \leq 2$$

$$y = 3b + s \quad 0 \leq s \leq 2$$

$$x - y = 3a + r - 3b - s$$

$$x - y = 3(a - b) + (r - s)$$

- 47 -

$$\underbrace{x - y}_{\text{durch drei teilbar}} = \underbrace{-3(a - b)}_{\text{durch drei teilbar}} = \underbrace{r - s}_{-2 \leq r - s \leq 2}$$

$$r - s = 0, \text{ d.h. } r = s$$

↪ ok

$[0], [1], [2]$

$[3], [4], [5]$

$[6], [7], [8]$

$\vdots \vdots \vdots$

- 48 -

1.4.2. Abbildungen/Funktionen

Definition: M, N Mengen

1. Eine Abbildung/Funktion f von M nach N ist eine Relation $R_f \subseteq M \times N$, so dass gilt:
zu jedem $x \in M$ gibt es genau ein $y \in N$
mit $(x, y) \in R_f$

i.Z. $f : M \rightarrow N, x \mapsto f(x)$ (bzw. $M \xrightarrow{f} N$)



Abbildung 1.20.

x : Dummy-Variable (Platzhalter für den «Eingang» der Funktion)

- 49 -

Das durch $x \in M$ eindeutig bestimmte $y \in N$ mit $(x, y) \in R_f$ wird mit $f(x)$ bezeichnet (d.h. $y = f(x)$) und heißt das Bild von x unter f oder Funktionswert von f in x ; x heißt Urbild von $y = f(x)$

2. Ist $f : M \rightarrow N$ eine Abbildung, so heißt

a) $D_f = D(f) := M$

Definitionsmenge/-bereich von f

b) N

Ziel- oder Wertemenge

c) $f(M) = \{f(x) \mid x \in M\}$

Bildmenge/Bild von f

allgemein in $A \subseteq M$ heißt $f(A) = \{f(x) \mid x \in A\}$ das Bild/Bildmenge von A unter f

d) $G_f = \{(x, y) \mid x \in M, y = f(x)\} (= R_f)$

Graph von f

Beispiele:

- 50 -

1. $f : \{1, 2, 3, 4\} \rightarrow \{a, b, c, d, e\}$

$$\begin{array}{ll} 1 \mapsto a & f(1) = a \\ 2 \mapsto a & f(1) = a \\ 3 \mapsto c & f(1) = c \\ 4 \mapsto b & f(1) = b \\ x \mapsto f(x) & \end{array}$$

$$D(f) = \{1, 2, 3, 4\}$$

- | | |
|------------------------------|--------------------------------|
| a ist Bild von 1 unter f | 1 ist Urbild von a unter f |
| a ist Bild von 2 unter f | 2 ist Urbild von a unter f |
| c ist Bild von 3 unter f | 3 ist Urbild von c unter f |
| b ist Bild von 4 unter f | 4 ist Urbild von b unter f |

Beachte: Zuordnungen der Form

- 51 -

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

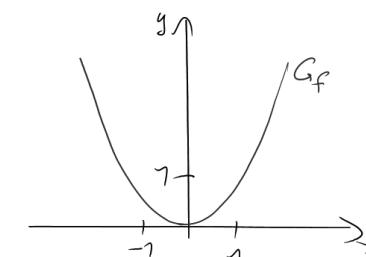


Abbildung 1.22.

$$\begin{aligned} D(f) &= \mathbb{R} \\ f(\mathbb{R}) &= \mathbb{R}_0^+ \end{aligned}$$

$$g : \mathbb{R}_0^+ \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto x^2 (= g(x))$$

- 53 -

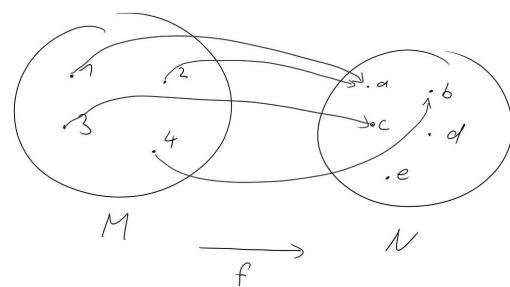


Abbildung 1.21.

$$x \mapsto y_1 \quad x \mapsto y_2 \quad (y_1 \neq y_2)$$

sind bei Abbildungen verboten (bei Relationen jedoch erlaubt)

$$G_f = \{(1, a), (2, a), (3, c), (4, b)\}$$

Bild von f : $f(M) = \{f(1), f(2), f(3), f(4)\} = \{a, b, c\}$

- 52 -

$$\begin{aligned} D(g) &= \mathbb{R}_0^+ \\ g(\mathbb{R}_0^+) &= \mathbb{R}_0^+ \end{aligned}$$

$$h : \mathbb{R}_0^+ \rightarrow \mathbb{R}_0^+, x \mapsto x^2 (= h(x))$$

- 54 -

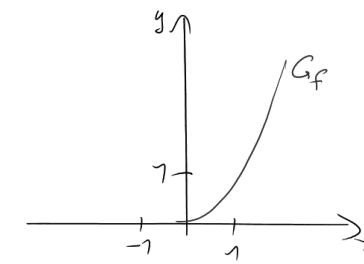


Abbildung 1.23.

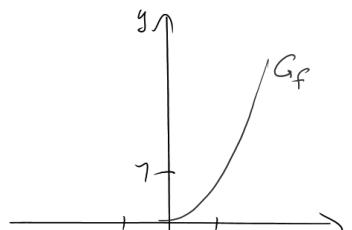


Abbildung 1.24.

Graph wie bei g

$$\begin{aligned} D(h) &= \mathbb{R}_0^+ \\ h(\mathbb{R}_0^+) &= \mathbb{R}_0^+ \end{aligned}$$

$$f \neq g, f \neq h, g \neq h$$

$$k : [-1; 1] \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto x^2 (= k(x))$$

- 55 -

$$4. \quad g : \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, (x, y) \mapsto x \cdot y$$

$$\begin{aligned} D(g) &= \mathbb{R} \times \mathbb{R} = \mathbb{R}^2 \\ g(\mathbb{R}^2) &= \mathbb{R} \end{aligned}$$

Definition: (Komposition von Abbildungen)

Sind $f : L \rightarrow M$ und $g : M \rightarrow N$ Abbildungen, so ist auch

$$h : L \rightarrow N, x \mapsto g(f(x)) (= h(x))$$

eine Abbildung, h heißt Komposition (Verkettung, Hintereinanderausführung) von f und g
i.Z. $h = g \circ f$ (sprich: « g nach f »)

$$\begin{aligned} L &\xrightarrow{f} M \xrightarrow{g} N \\ g \circ f \end{aligned}$$

$$(g \circ f)(x) = g(f(x))$$

- 57 -

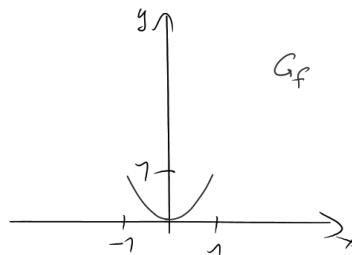


Abbildung 1.25.

$$\begin{aligned} D(k) &= [-1; 1] \\ k([-1; 1]) &= [0; 1] \end{aligned}$$

$$3. \quad f : \mathbb{N}_0 \rightarrow \{0, 1, 2, \dots, n-1\}$$

$$x \mapsto x \bmod n \quad (= \text{Rest der Division } x : n)$$

- 56 -

Hashfunktion

Bemerkung: Damit die Komposition $g \circ f$ gebildet werden kann, muss
 $f(L) \subseteq D_g$
Ausgang von $f \subseteq$ Eingang von g
Bild von $f \subseteq$ Definitionsmenge von g

Beispiel:

$$\begin{aligned} f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto x^2 &\quad f(\mathbb{R}) = \mathbb{R}_0^+ \\ g : \mathbb{R}_0^+ \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto \sqrt{x} &\quad D_g = \mathbb{R}_0^+ \\ f(\mathbb{R}) \subseteq D_g \end{aligned}$$

$$g \circ f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto (g \circ f)(x) = g(f(x)) = g(x^2) = \sqrt{x^2}$$

Definition: Eine Abbildung $f : M \rightarrow N$ heißt

- injektiv, wenn für alle $x_1, x_2 \in M, x_1 \neq x_2$ gilt: $f(x_1) \neq f(x_2)$

- surjektiv, wenn es für jedes $y \in N$ ein $x \in M$ mit $y = f(x)$ gibt

- 58 -

- bijektiv, wenn f injektiv und surjektiv ist

Bemerkung: f ist

- nicht injektiv, wenn $x_1 \mapsto y, x_2 \mapsto y$ für gewisse $x_1 \neq x_2$ gilt.
- nicht surjektiv, wenn gewisse $y \in N$ «übrigbleiben»

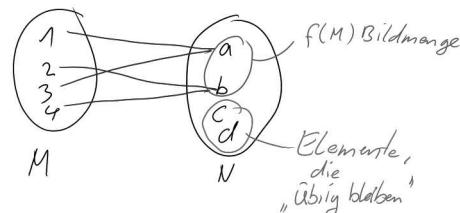


Abbildung 1.26.

- 59 -

Beispiele:

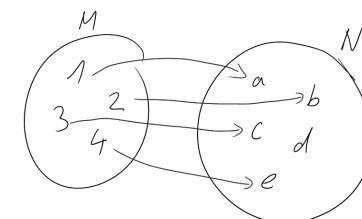


Abbildung 1.27. – injektiv, aber nicht surjektiv

- 61 -

$$f(M) \neq N$$

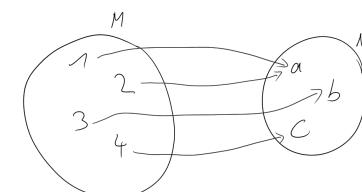


Abbildung 1.28. – surjektiv, aber nicht injektiv

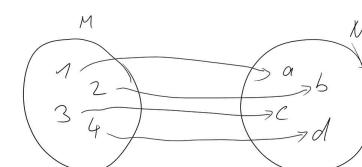


Abbildung 1.29. – injektiv und surjektiv, also bijektiv

- 60 -

- 62 -

Definition: Ist $f : M \rightarrow N$ bijektiv, so existiert die Umkehrabbildung/-funktion

$$f^{-1} : N \rightarrow M$$

für diese gilt:

$$x = f^{-1}(y) \Leftrightarrow f(x) = y$$

Ist f nicht bijektiv, so existiert auch keine Umkehrabbildung.

Ist $f : M \rightarrow N$ bijektiv und $f^{-1} : N \rightarrow M$ die Umkehrabbildung, so gilt:

$$1. f^{-1} \circ f = id_M$$

$$2. f \circ f^{-1} = id_N$$

Satz:

wobei $id_M : M \rightarrow M, x \mapsto x$ und $id_N : N \rightarrow N, y \mapsto y$ die sogenannten identischen Abbildungen sind.

- 63 -

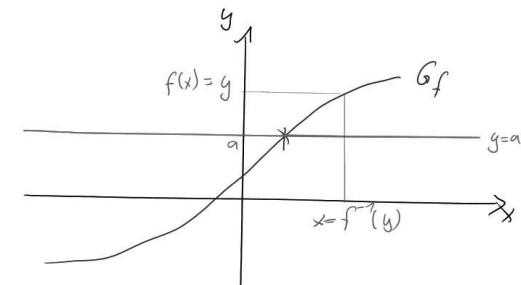


Abbildung 1.30.

- 65 -

Bemerkung:

zu 1: $(f^{-1} \circ f)(x) = f^{-1}(f(x)) = id_M(x) = x$

zu 2: $(f \circ f^{-1})(y) = f(f^{-1}(y)) = id_N(y) = y$

(f und f^{-1} «löschen sich gegenseitig aus»)

Für $M, N \subseteq \mathbb{R}$ gilt:

Satz:

$f : M \rightarrow N$ ist genau dann bijektiv, wenn jede Parallele $y = a$ mit $a \in N$ (Parallele schneidet y-Achse bei a) den Graph von f genau einmal schneidet.

- 64 -

Beispiele:

$$1. f : \mathbb{R}_0^+ \rightarrow \mathbb{R}_0^+, x \mapsto x^2$$

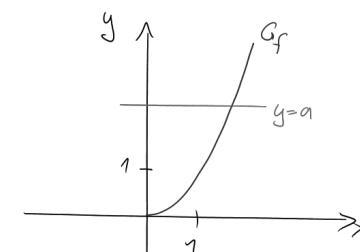


Abbildung 1.31.

f ist bijektiv

$$\text{Umkehrfunktion } f^{-1} : \mathbb{R}_0^+ \rightarrow \mathbb{R}_0^+$$

- 66 -

$$\begin{aligned}
 x &= f^{-1}(y) \Leftrightarrow y = f(x) \\
 y &= x^2 \mid \begin{array}{l} + \\ (-)\sqrt{x} \end{array} (x \geq 0) \\
 &\Leftrightarrow \begin{array}{l} + \\ (-)\sqrt{y} \end{array} = x (\geq 0) \\
 &\Leftrightarrow x = \sqrt{y} = f^{-1}(y) \\
 (f^{-1} \circ f)(x) &= f^{-1}(f(x)) = f^{-1}(x^2) = \sqrt{x^2} = x \text{ (da } x \geq 0\text{)} \\
 (f \circ f^{-1})(y) &= f(f^{-1}(y)) = f(\sqrt{y}) = \sqrt{y^2} = y
 \end{aligned}$$

- 67 -

$$\begin{aligned}
 y &= b^x = f(x) \Leftrightarrow x = f^{-1}(y) = \log_b(y) \\
 (f^{-1} \circ f)(x) &= f^{-1}(f(x)) = f^{-1}(b^x) = \boxed{\log_b(b^x) = x} \\
 (f \circ f^{-1})(y) &= f(f^{-1}(y)) = f(\log_b(y)) = \boxed{b^{\log_b(y)} = y}
 \end{aligned}$$

- 69 -

2. $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^+, x \mapsto b^x (b > 1)$

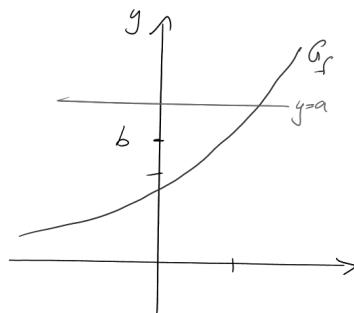


Abbildung 1.32.

 f ist bijektiv \Rightarrow Umkehrfunktion $f^{-1}(y) = \log_b(y)$

- 68 -

3. $f : \{x \geq 1\} \rightarrow \{y \geq 1\}, x \mapsto (x-1)^2 + 1$

Scheitelpunktform einer Parabel: $y = a(x - x_s)^2 + y_s$
 Scheitel $S(x_s \mid y_s)$

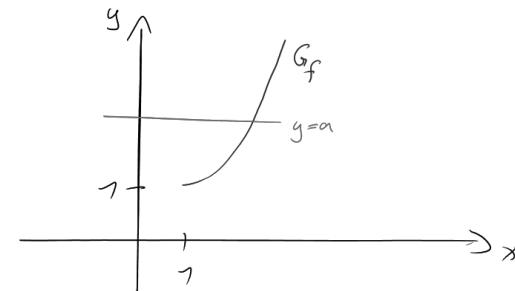


Abbildung 1.33.

- 70 -

f ist bijektiv

\Rightarrow Umkehrfunktion: $f^{-1} : \{y \geq 1\} \rightarrow \{x \geq 1\}$

$$y = f(x) \Leftrightarrow y = (x - 1)^2 + 1 \mid -1$$

$$\Leftrightarrow y - 1 = (x - 1)^2 \mid \pm\sqrt{}$$

$$\Leftrightarrow \pm\sqrt{y - 1} = x - 1 \ (\geq 0) \ (x \geq 1, \text{ d.h. } x - 1 \geq 0)$$

$$\Leftrightarrow x = \sqrt{y - 1} + 1 \ (= f^{-1}(y))$$

\Rightarrow Umkehrfunktion $g^{-1} : \{y \geq 1\} \rightarrow \{x \leq 1\}$

$$y = g(x) \Leftrightarrow y = (x - 1)^2 + 1 \mid -1$$

$$y - 1 = (x - 1)^2 \mid \pm\sqrt{}$$

$$\pm\sqrt{y - 1} = x - 1 \ (\leq 0) \ (x \leq 1, \text{ d.h. } x - 1 \leq 0)$$

$$x = -\sqrt{y - 1} + 1$$

- 71 -

- 73 -

4. $g : \{x \leq 1\} \rightarrow \{y \geq 1\}, x \mapsto (x - 1)^2 + 1$

Prüfe, ob g bijektiv ist und bestimme ggf. g^{-1} !

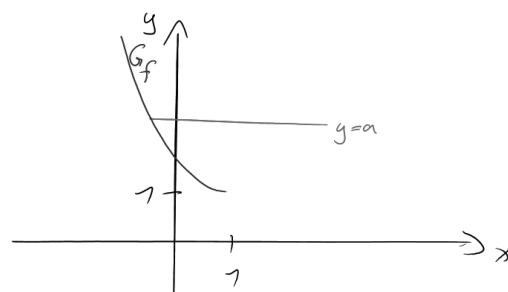


Abbildung 1.34.

g ist bijektiv

- 72 -

Definition: Ist $f : M \rightarrow N, x \mapsto f(x)$ eine Abbildung und $D \subseteq M$ eine Teilmenge, so heißt

$$f|_D : D \rightarrow N, x \mapsto f(x)$$

die Einschränkung von f auf D .

Bemerkung: Ist f nicht injektiv, so ist oftmals die Einschränkung $f|_D$ auf eine geeignete Teilmenge D injektiv.

(Einschränkung der Zielmenge «liefert Surjektivität»)

Beispiel:

$$f|_D : D \rightarrow N \text{ ist bijektiv}$$

- 74 -

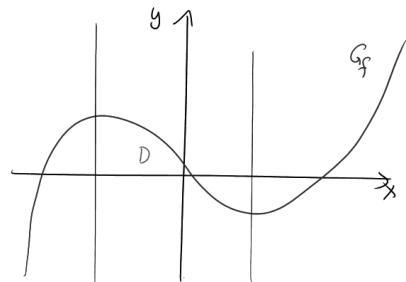


Abbildung 1.35.

formal:

$$\begin{aligned}x^2 + 1 &= 0 \\x^2 &= -1 \\x_{1/2} &= \pm\sqrt{-1} \in \mathbb{R}\end{aligned}$$

Kann man den Zahlenbereich \mathbb{R} derart erweitern, dass $x^2 + 1$ darin eine Nullstelle hat?

2.1.1. Konstruktion der komplexen Zahlen

Definiere auf der Menge $\mathbb{R}^2 = \mathbb{R} \times \mathbb{R} = \{(x, y) \mid x, y \in \mathbb{R}\}$ wie folgt Addition und Multiplikation:

Für $z_1 = (x_1, y_1)$ und $z_2 = (x_2, y_2)$ sei

- 75 -

- 77 -

$$\begin{aligned}z_1 + z_2 &= (x_1, y_1) + (x_2, y_2) := (x_1 + x_2, y_1 + y_2) \\z_1 \cdot z_2 &= (x_1, y_1) \cdot (x_2, y_2) := (x_1 x_2 - y_1 y_2, x_1 y_2 + x_2 y_1)\end{aligned}$$

Definition: \mathbb{R}^2 zusammen mit obiger Definition von Addition und Multiplikation erfüllen die Gesetze eines sogenannten Zahlenkörpers (oder Körpers); man schreibt hierfür $\mathbb{R}^2 = \mathbb{C}$ und nennt \mathbb{C} (den Körper der) komplexen Zahlen;

für $z = (x, y) \in \mathbb{C}$ heißt

$x = \Re(z)$ der Realteil ($\text{Re}(z)$)

$y = \Im(z)$ der Imaginärteil ($\text{Im}(z)$)

von z .

2. Die komplexen Zahlen

2.1. Definition und Rechenregeln

Problem: Die quadratische Funktion $f(x) = x^2 + 1$ hat in \mathbb{R} keine Nullstelle.
 $(x^2 + 1 > 0)$

2.1.2. Gesetze eines (Zahl-)Körpers (Körperaxiome)

1. $a + b = b + a$

$a \cdot b = b \cdot a$

Kommutativgesetze

2. $a + (b + c) = (a + b) + c$
 $a \cdot (b \cdot c) = (a \cdot b) \cdot c$
- Assoziativgesetze
3. $a \cdot (b + c) = ab + ac$
- Distributivgesetz
4. Es existiert ein Element 0 mit $a + 0 = 0 + a = a$ für jedes a
(Existenz eines additiven neutralen Elements)
5. Es existiert ein Element 1 mit $a \cdot 1 = 1 \cdot a = a$ für jedes a
(Existenz eines multiplikativen neutralen Elements)
6. Zu jedem a gibt es ein Element $-a$ mit $a + (-a) = (-a) + a = 0$
(Existenz eines additiven inversen Elements)
7. Zu jedem a ($a \neq 0$) gibt es ein Element a^{-1} ($= \frac{1}{a}$) mit $a^{-1} \cdot a = a \cdot a^{-1} = 1$
(Existenz eines multiplikativen inversen Elements)

Die Abbildung $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}; c \mapsto (x; 0)$ ist injektiv und verträglich mit den Additionen und Multiplikationen in \mathbb{R} und \mathbb{C} .

- 79 -

Behauptung:

$$\begin{aligned} i^2 &= -1 \\ &= (0; 1) \cdot (0; 1) \\ &= (0 - 1; 0 \cdot 1 + 1 \cdot 0) \\ &= (-1; 0) \\ &= -1 \end{aligned}$$

kartesische Darstellung

Satz: Jede komplexe Zahl $z \in \mathbb{C}$ kann eindeutig geschrieben werden in der Form

$$z = x + iy \quad (x, y \in \mathbb{R})$$

es gilt $x = \Re z$ und $y = \Im z$

- 81 -

Beweis:

$$\begin{aligned} z &= (x; y) \\ x + iy &= (x; 0) + (0; 1) \cdot (y; 0) \\ &= (x; 0) + (0 \cdot y - 1 \cdot 0; 0 \cdot 0 + 1 \cdot y) \\ &= (x; 0) + (0; y) \\ &= (x; y) \\ &= z \end{aligned}$$

Geometrische Interpretation (Gaußsche Zahlenebene)

$$z = x + iy \stackrel{\Delta}{=} \text{Punkt } P(x; y) \text{ bzw. Vektor } \vec{v} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

\Rightarrow Betrachte \mathbb{R} als Teilmenge von \mathbb{C} ($\mathbb{R} \subseteq \mathbb{C}$)

$$\begin{aligned} \mathbb{R} &\subseteq \mathbb{C} \\ x &\stackrel{\Delta}{=} (x; 0) \\ \mathbb{R} &= \{z \in \mathbb{C} \mid \Im z = 0\} \end{aligned}$$

Definition: Die imaginäre Zahl $i \in \mathbb{C}$ ist definiert durch $i = (0; 1)$

Beispiele:

- 80 -

- 82 -

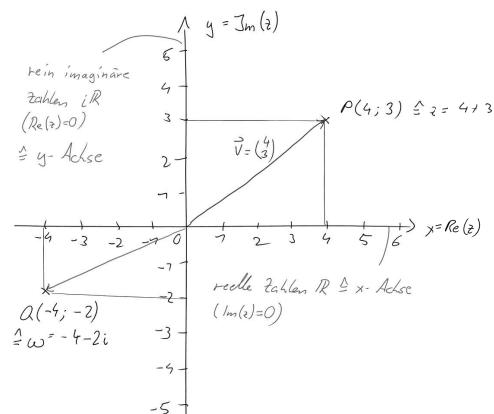


Abbildung 2.1.

$$\begin{aligned} 1. \quad & -2 + 3i + 4 - 8i \\ &= 2 - 5i \end{aligned}$$

- 83 -

2.2. Operationen auf komplexen Zahlen

2.2.1. Komplex-Konjugation

Definition: Für eine komplexe Zahl $z = x + iy$ heißt

$$\bar{z} = x - iy$$

die Komplex-Konjugierte von z ; die Abbildung $\bar{\cdot} : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}, z \mapsto \bar{z}$ heißt Komplex-Konjugation.

Geometrische Interpretation: \bar{z} entsteht aus z durch Spiegelung an der reellen Achse.

- 85 -

$$\begin{aligned} 2. \quad & (-2 + 3i) \cdot (4 - 8i) \\ &= -8 + 16i + 12i - 24 \underbrace{i^2}_{-1} \\ &= -8 + 28i + 24 \\ &= 16 + 28i \\ 3. \quad & (-2 + 3i)^2 = (-2)^2 + 2 \cdot (-2) \cdot 3i + (3i)^2 \\ &= 4 - 12i + 3^2 \underbrace{i^2}_{-1} \\ &= 4 - 12i - 9 \\ &= -5 - 12i \end{aligned}$$

- 84 -

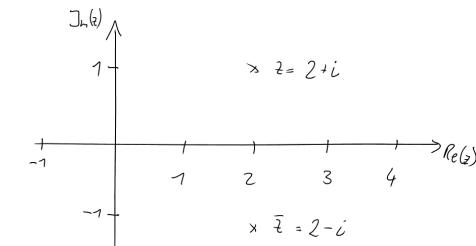


Abbildung 2.2.

- 86 -

Eigenschaften der Komplex-Konjugation**Satz:**

1. $\bar{\bar{z}} = z$

2. $\overline{z_1 \pm z_2} = \overline{z_1} \pm \overline{z_2}$

3. $\overline{z_1 \cdot z_2} = \overline{z_1} \cdot \overline{z_2}$

4. $\overline{\left(\frac{z_1}{z_2}\right)} = \frac{\overline{z_1}}{\overline{z_2}}$

5. $\Re(z) = \frac{1}{2}(z + \bar{z})$

6. $\Im(z) = \frac{1}{2i}(z - \bar{z})$

7. $z \in \mathbb{R} \iff z = \bar{z}$

8. $z \in i\mathbb{R} \iff z = -\bar{z}$

Beweis: HÜ

- 87 -

- 89 -

1. $z = x + iy, \bar{z} = x - iy, \overline{\bar{z}} = x - (-iy) = x + iy = z$

2. $z_1 = x_1 + iy_1, z_2 = x_2 + iy_2$

$\bar{z}_1 = x_1 - iy_1, \bar{z}_2 = x_2 - iy_2$

$$\begin{aligned}\overline{z_1 + z_2} &= \overline{(x_1 + iy_1) + (x_2 + iy_2)} \\&= \overline{x_1 + x_2 + i(y_1 + y_2)} \\&= x_1 + x_2 - i(y_1 + y_2) \\ \overline{z_1 + z_2} &= (x_1 - iy_1) + (x_2 - iy_2) \\&= x_1 + x_2 - iy_1 - iy_2 \\&= x_1 + x_2 - i(y_1 + y_2)\end{aligned}$$

Beispiele:

1. $\overline{4+3i} = \overline{4-3i} = 4+3i$

- 88 -

$$\begin{aligned}2. \quad \overline{(7-3i) + (-8+5i)} &= \overline{(7-3i)} + \overline{(-8+5i)} \\&= 7+3i + (-8-5i) \\&= 7+3i-8-5i \\&= -1-2i\end{aligned}$$

3. $\bar{i} = \overline{0+i} = 0-i = -i$

$$\begin{aligned}4. \quad \overline{(1-2i) \cdot (2-3i)} &= \overline{(1-2i)} \cdot \overline{(2-3i)} \\&= (1+2i)(2+3i) \\&= 2+3i+4i+6i^2 \\&= 2+7i-6 \\&= -4+7i\end{aligned}$$

5. $\Re(5-2i) = 5; \Im(5-2i) = -2$

$$\begin{aligned}\frac{1}{2}(z + \bar{z}) &= \frac{1}{2}(5-2i+5+2i) \\&= \frac{1}{2} \cdot 10 \\&= 5\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{1}{2i}(z - \bar{z}) &= \frac{1}{2i}(5-2i-(5+2i)) \\&= \frac{1}{2i}(5-2i-5-2i) \\&= \frac{1}{2i}(-4i) \\&= -\frac{4i}{2i} \\&= -2\end{aligned}$$

- 90 -

2.2.2. Betrag

Definition: Für $z = x + iy \in \mathbb{C}$ heißt

$$|z| = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{z \cdot \bar{z}}$$

der Betrag von z .

Bemerkung: Im Spezialfall $z = x \in \mathbb{R}$ gilt

$$|z| = \sqrt{x^2} = |x|$$

neue Definition des Betrags einer komplexen Zahl «alte Definition» des Betrags einer reellen Zahl

Geometrische Interpretation des Betrags:

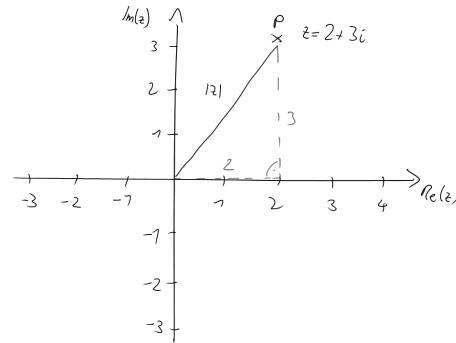


Abbildung 2.3.

$$z = 2 + 3i \triangleq \text{Punkt } P(2; 3)$$

$$\text{bzw. Vektor } \vec{v} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$|z| = \text{Abstand von } P \text{ zum Ursprung}$

= Länge des Vektors \vec{v}

Beispiele:

$$1. |2 + 3i| = \sqrt{2^2 + 3^2} = \sqrt{4 + 9} = \sqrt{13}$$

$$2. |-4 + 5i| = \sqrt{(-4)^2 + 5^2} = \sqrt{16 + 25} = \sqrt{41}$$

$$3. |i| = \sqrt{0^2 + 1^2} = \sqrt{1} = 1$$

Bemerkung: $z = x + iy$

$$z \cdot \bar{z} = (x + iy)(x - iy) = x^2 - (iy)^2 = x^2 - i^2y^2 = x^2 - (-y^2) = x^2 + y^2$$

$$= \frac{1}{z} \cdot \frac{\bar{z}}{\bar{z}} = \frac{\bar{z}}{z\bar{z}} = \frac{\bar{z}}{x^2 + y^2} = \frac{\bar{z}}{|z|^2}$$

$$x^2 + y^2 = |z|^2$$

Bemerkung: i.a. ist $|z|^2 \neq |z^2|$

2.2.3. Multiplikativ Inverses

Formel für multiplikatives Inverses

Satz: Für $z = x + iy \in \mathbb{C}, z \neq 0$ gilt:

$$z^{-1} = \frac{1}{z} = \frac{\bar{z}}{z \cdot \bar{z}} = \frac{\bar{z}}{x^2 + y^2} = \frac{\bar{z}}{|z|^2}$$

Beweis: «mit \bar{z} erweitern»

$$z^{-1} = \frac{1}{z} = \frac{\bar{z}}{z \cdot \bar{z}} = \frac{\bar{z}}{x^2 + y^2} = \frac{\bar{z}}{|z|^2}$$

$$z \cdot \bar{z} = (x + iy)(x - iy)$$

$$= x^2 - ixy + ixy - i^2y^2$$

$$= x^2 + y^2$$

Beispiele:

$$1. \ i^{-1} = \frac{1}{i} = \frac{\bar{i}}{i \cdot \bar{i}} = \frac{-i}{x^2 + y^2} = \frac{-i}{0^2 + 1^2} = -i$$

$$i = 0 + 1i$$

$$\bar{i} = 0 - 1i$$

$$= -i$$

Probe: $\frac{1}{i}i = (-i)i = -i^2 = 1$

$$2. \ (2i)^{-1} = \frac{1}{2i} = \frac{\bar{2i}}{|2i|^2} = \frac{-2i}{0^2 + 2^2} = \frac{-2i}{4} = -\frac{1}{2}i$$

Probe: $\frac{1}{2i}2i = (-\frac{1}{2}i)2i = -\frac{1}{2}2i^2 = 1$

- 95 -

Alternative Berechnung:

$$(2i)^{-1} = \frac{1}{2i} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{i} = -\frac{1}{2}i$$

$$3. \ (1+2i)^{-1} = \frac{1}{1+2i} = \frac{1}{1+2i} \cdot \frac{1-2i}{1-2i} = \frac{1-2i}{1^2+2^2} = \frac{1-2i}{5} = \frac{1}{5} - \frac{2}{5}i$$

Probe: $\frac{1}{1+2i}(1+2i) = (\frac{1}{5} - \frac{2}{5}i)(1+2i) = \frac{1}{5} + \frac{2}{5}i - \frac{2}{5}i - \frac{4}{5}i^2 = \frac{1}{5} + \frac{4}{5} = 1$

- 96 -

2.2.4. Inverses und Komplex-Konjugiertes

Inverses und Komplex-Konjugiertes

Satz:

$$\boxed{z^{-1} = \overline{\left(\frac{1}{z}\right)} = \frac{1}{\bar{z}} = (\bar{z})^{-1}}$$

Beweis: $\overline{z^{-1}} = \overline{\left(\frac{1}{z}\right)} = \overline{\left(\frac{\bar{z}}{|z|^2}\right)} = \frac{\bar{z}}{|z|^2} = \frac{\bar{z}}{|\bar{z}|^2} = (\bar{z})^{-1}$

$$\begin{aligned} |z|^2 &= x^2 + y^2 \\ |\bar{z}|^2 &= x^2 + (-y)^2 = x^2 + y^2 \end{aligned}$$

Bemerkung: $\overline{\left(\frac{z_1}{z_2}\right)} = \overline{\left(z_1 \cdot \frac{1}{z_2}\right)} = \overline{z_1} \cdot \overline{\left(\frac{1}{z_2}\right)} = \overline{z_1} \cdot \frac{1}{\overline{z_2}} = \frac{\overline{z_1}}{\overline{z_2}}$

- 97 -

2.3. Darstellungen komplexer Zahlen

2.3.1. Algebraische (kartesische) Form

$$z = x + iy$$

$$(x, y \in \mathbb{R})$$

- 98 -

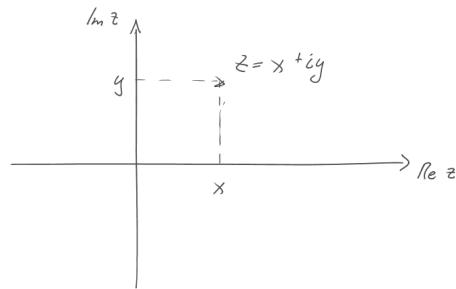


Abbildung 2.4.

- 99 -

$$z \neq 0$$

$$r > 0, r \in \mathbb{R}$$

$$-\pi < \varphi \leq \pi, \varphi \in \mathbb{R}$$

$$\frac{x}{r} = \cos \varphi \Rightarrow x = r \cos \varphi$$

$$\frac{y}{r} = \sin \varphi \Rightarrow y = r \sin \varphi$$

$$z = x + iy$$

$$\Rightarrow z = x + iy = r \cos \varphi + ir \sin \varphi = r(\cos \varphi + i \sin \varphi)$$

Polardarstellung (trigonometrische Form)

$$z = r \cos \varphi + ir \sin \varphi = r(\cos \varphi + i \sin \varphi) =$$

Kartesische Koordinaten \leftrightarrow Polarkoordinaten

$$(x, y) \leftrightarrow (r; \varphi)$$

$$x = r \cos \varphi \in \mathbb{R}$$

$$y = r \sin \varphi \in \mathbb{R}$$

- 101 -

2.3.2. Trigonometrische Form

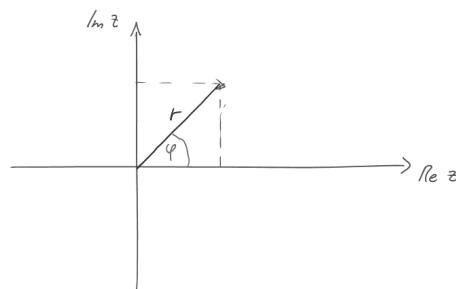
Polarkoordinaten $(r; \varphi)$ 

Abbildung 2.5.

- 100 -

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} = |z|$$

$$\varphi = \begin{cases} \arccos\left(\frac{x}{r}\right), & \text{falls } y \geq 0 \\ -\arccos\left(\frac{x}{r}\right), & \text{falls } y < 0 \end{cases}$$

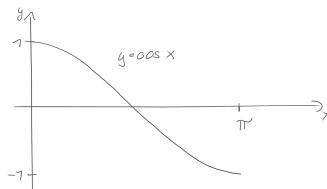
 $\varphi = \operatorname{Arg}(z) =$ (Hauptwert des) Argument(s) von z

$$-\pi < \varphi \leq \pi$$

$$z = x + iy$$

Polarkoordinaten $r = |z|, \varphi = \operatorname{Arg}(z)$ Bemerkung: $(\arccos x)$

- 102 -



\Downarrow Spiegelung an $x=y$

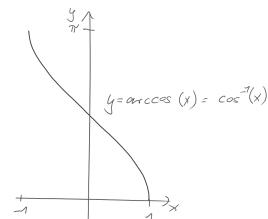


Abbildung 2.6.

- 103 -

Bemerkung: Verwende in der Exponentialform φ nur im Bogenmaß (als Vielfaches von π)

$$\cancel{\cancel{\cancel{z=4e^{i30^\circ}}}} \Rightarrow e^{i\frac{\pi}{4}}$$

Beispiel: $z = 2 + 2i$ (kartesische Form)

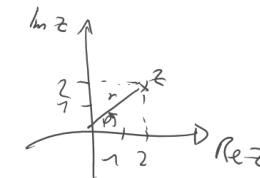


Abbildung 2.7.

- 105 -

2.3.3. Eulersche Form

$$e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi \quad (\text{komplexe Exponentialfunktion})$$

2.3.4. Exponentialform

$z \in \mathbb{C}, z \neq 0$

$z = r \cdot e^{i\varphi}$	$r = z > 0$
	$\varphi = \operatorname{Arg}(z), -\pi < \varphi \leq \pi$

Folgt aus trigonometrischer Form

$$z = r \cdot (\cos \varphi + i \sin \varphi)$$

und der Eulerschen Formel

$$e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi$$

- 104 -

Polarkoordinaten $(r; \varphi)$:

$$\begin{aligned} r &= |z| = \sqrt{2^2 + 2^2} = \sqrt{8} = 2\sqrt{2} \\ \varphi &= \operatorname{Arg}(z) \quad y \geq 0 \\ &= \arccos\left(\frac{x}{r}\right) \\ &= \arccos\left(\frac{2}{2\sqrt{2}}\right) \\ &= \arccos\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \\ &= \frac{\pi}{4} \end{aligned}$$

Gradmaß	Bogenmaß
α	x
180°	π
α	x

$$\boxed{\frac{\alpha}{180^\circ} = \frac{x}{\pi}}$$

- 106 -

trigonometrische Form
 $z = 2\sqrt{2}(\cos \frac{\pi}{4} + i \sin \frac{\pi}{4})$

Exponential Form
 $z = 2\sqrt{2} \cdot e^{i\frac{\pi}{4}}$

Eigenschaften von $e^{i\varphi}$

$\varphi, \psi \in \mathbb{R}$

1. $e^{i\varphi}e^{i\psi} = e^{i(\varphi+\psi)}$

Satz:

2. $e^{-i\varphi} = \frac{1}{e^{i\varphi}}$

3. $(e^{i\varphi})^n = e^{in\varphi} \quad (n \in \mathbb{Z})$

4. $|e^{i\varphi}| = 1 \quad \Re(e^{i\varphi}) = \cos \varphi \quad \Im(e^{i\varphi}) = \sin \varphi$

- 107 -

Durchläuft φ das Intervall $[0; 2\pi]$ bzw. $[-\pi; \pi]$, so durchläuft $z = e^{i\varphi}$ alle Punkte auf dem Einheitskreis $|z| = 1$.

Satz von de Moivre

Satz:

$(\cos \varphi + i \sin \varphi)^n = \cos(n\varphi) + i \sin(n\varphi) \quad (n \in \mathbb{N}, \varphi \in \mathbb{R})$

Beweis:

$(\cos \varphi + i \sin \varphi)^n = (e^{i\varphi})^n = e^{in\varphi} = \cos(n\varphi) + i \sin(n\varphi)$

Anwendungsbeispiel:

1. Es gilt:

$\cos(2\varphi) = \cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi$
 $\sin(2\varphi) = 2\cos\varphi \sin\varphi$

- 108 -

Beweis:

$$\begin{aligned} \cos(2\varphi) + i \sin(2\varphi) &\stackrel{\text{de Moivre}}{=} (\cos \varphi + i \sin \varphi)^2 \\ &= \cos^2 \varphi + 2 \cos \varphi i \sin \varphi + \underbrace{(i \sin \varphi)^2}_{-\sin^2 \varphi} \\ &= \cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi + i 2 \cos \varphi \sin \varphi \end{aligned}$$

vergleiche die Real- und Imaginärteile

$\cos(2\varphi) = \cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi$

$\sin(2\varphi) = 2 \cos \varphi \sin \varphi$

2. Additionstheoreme für $\sin(x)$ und $\cos(x)$

- 109 -

$\cos(\varphi + \psi) = \cos \varphi \cos \psi - \sin \varphi \sin \psi$
 $\sin(\varphi + \psi) = \cos \varphi \sin \psi + \sin \varphi \cos \psi$

Beweis:

$$\begin{aligned} \cos(\varphi + \psi) + i \sin(\varphi + \psi) &= e^{i(\varphi+\psi)} = e^{i\varphi}e^{i\psi} \\ &= (\cos \varphi + i \sin \varphi)(\cos \psi + i \sin \psi) \\ &= \cos \varphi \cos \psi + \cos \varphi i \sin \psi + i \sin \varphi \cos \psi + i^2 \sin \varphi \sin \psi \\ &= \cos \varphi \cos \psi - \sin \varphi \sin \psi + i(\cos \varphi \sin \psi + \sin \varphi \cos \psi) \end{aligned}$$

vergleiche die Real- und Imaginärteile

- 110 -

Behauptung: s.o.

Im Spezialfall $w = 1$ heißen die Lösungen der Gleichung $z^n = 1$ n -te (Komplexe) Einheitswurzeln.

$$\zeta_{k,n} = e^{i \frac{2\pi k}{n}} \quad (k = 0, 1, 2, \dots, n-1)$$

Beweis:

$$\begin{aligned} (z_k)^n &= \left(r^{\frac{1}{n}} \cdot e^{i(\frac{\varphi}{n} + \frac{2\pi k}{n})} \right)^n \\ &= \left(r^{\frac{1}{n}} \right)^n \cdot \left(e^{i(\frac{\varphi}{n} + \frac{2\pi k}{n})} \right)^n \\ &= r \cdot e^{i(\varphi + 2\pi k)} \\ &= r \cdot e^{i\varphi + i2\pi k} \\ &= r \cdot e^{i\varphi} \cdot e^{i2\pi k} = w \\ e^{i2\pi k} &= (e^{i2\pi})^k = (1)^k = 1 \end{aligned}$$

- 111 -

- 113 -

2.4. Komplexe Wurzeln

Definition: Sei $w \in \mathbb{C}$. Jede komplexe Zahl $z \in \mathbb{C}$, die die Gleichung $z^n = w$ erfüllt, heißt n -te komplexe Wurzel von w .

Reelle Zahlen

$$\begin{aligned} x^n &= a \quad (a \geq 0) \quad x \geq 0 \\ x &= \sqrt[n]{a} \geq 0 \end{aligned}$$

Zu jedem $0 \neq w \in \mathbb{C}$ gibt es genau n verschiedene n -te komplexe Wurzeln. Diese sind wie folgt gegeben:

Satz: Ist $w = r e^{i\varphi}$ die Exponentialform von w , so sind

$$z_k = r^{\frac{1}{n}} \cdot e^{i(\frac{\varphi}{n} + \frac{2\pi k}{n})} \quad (k = 0, 1, \dots, n-1)$$

alle n -ten komplexen Wurzeln von w .

Bemerkung: $z_k = r^{\frac{1}{n}} \cdot e^{i(\frac{\varphi}{n} + \frac{2\pi k}{n})}$
 $= r^{\frac{1}{n}} \cdot e^{i\frac{\varphi}{n}} \cdot e^{i\frac{2\pi k}{n}} \quad (k = 0, 1, \dots, n-1)$
 $= z_0 \cdot e^{i\frac{2\pi k}{n}}$
 $= z_0 \cdot \zeta_{n,k}$
 $\boxed{z_k = z_0 \cdot \zeta_{n,k}}$

z_0 : eine spezielle n -te Wurzel von w
 $\zeta_{n,k}$: n -te Einheitswurzel

$$\begin{aligned} w &= r \cdot e^{i\varphi} \\ \Rightarrow z_0 &= r^{\frac{1}{n}} \cdot e^{i\frac{\varphi}{n}} \\ (z_0 &= w^{\frac{1}{n}}) \\ (r \cdot e^{i\varphi})^{\frac{1}{n}} &= r^{\frac{1}{n}} (e^{i\varphi})^{\frac{1}{n}} \end{aligned}$$

Allgemein gilt: Multiplikation einer komplexen Zahl z mit $e^{i\psi}$ bedeutet geometrisch «Drehung des Vektors z um den Winkel ψ ».

- 112 -

- 114 -

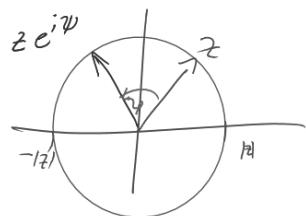


Abbildung 2.8.

1. Bestimme die 2-ten Wurzeln von $w = i$
d.h. Lösung von $z^2 = i$!

Exponentialform von $w = i \quad w = r \cdot e^{i\varphi}$
 $w = e^{i\frac{\pi}{2}}$ $r = |w| = 1$ $\varphi = \text{Arg}(w) = \frac{\pi}{2}$

- 115 -

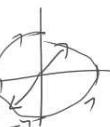


Abbildung 2.10.

2. Bestimme die 2-ten Wurzeln von $w = 1 + i$, d.h.
Lösungen von $z^2 = 1 + i$

$$w = \sqrt{2}e^{i\frac{\pi}{4}}$$

$$z_0 = \sqrt{2}^{\frac{1}{2}} e^{i\frac{\pi}{8}} = \sqrt[4]{2} e^{i\frac{\pi}{8}}$$

$$z_1 = z_0 \zeta_{n,k} = z_0 e^{i\frac{2\pi k}{n}} = z_0 e^{i\pi} = \sqrt[4]{2} e^{i\frac{\pi}{8}} e^{i\pi} = 2^{\frac{1}{4}} e^{i\frac{9}{8}\pi}$$

- 117 -



Abbildung 2.9.

spezielle 2-te Wurzel

$$z_0 = 1^{\frac{1}{2}} e^{i\frac{\pi}{4}} = e^{i\frac{\pi}{4}}$$

$$z_k = z_0 e^{i\frac{2\pi k}{n}}$$

$$z_1 = z_0 e^{i\frac{2\pi}{2}1} = e^{i\frac{\pi}{4}} e^{i\pi} = e^{i\frac{5}{4}\pi}$$

- 116 -

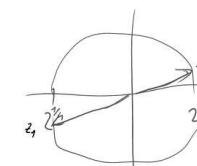


Abbildung 2.11.

3. Bestimme die 3-ten Wurzeln von $w = -1$

$$x^3 = -1$$

$$w = 1 e^{i\pi} = e^{i\pi}$$

- 118 -

$$z_0 = r^{\frac{1}{n}} e^{i\frac{\varphi}{n}} = 1^{\frac{1}{3}} e^{i\frac{\pi}{3}}$$

$$z_1 = 1^{\frac{1}{3}} e^{i\frac{\pi}{3}} \underbrace{e^{i\frac{2\pi}{3}}}_{\text{Drehung } 120^\circ} = e^{i\pi}$$

$$z_2 = e^{i\frac{\pi}{3}} e^{i\frac{2\pi}{3}2} = e^{i\frac{5}{3}\pi}$$

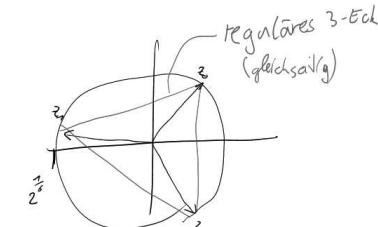


Abbildung 2.13.

5. Bestimme die 5-ten Wurzeln von $w = -32$ 4. Bestimme die 3-ten Wurzeln von $w = -1 + i$

$$w = \sqrt{2} e^{i\frac{3}{4}\pi}$$

$$z_0 = r^{\frac{1}{n}} e^{i\frac{\varphi}{n}} = \sqrt{2}^{\frac{1}{3}} e^{i\frac{3\pi}{4}} = 2^{\frac{1}{6}} e^{i\frac{\pi}{4}}$$

- 119 -

$$w = 32 e^{i\pi}$$

$$z_0 = 32^{\frac{1}{5}} e^{i\frac{\pi}{5}}$$

- 121 -

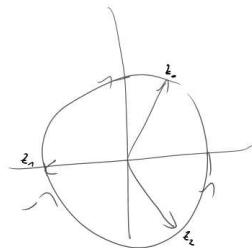


Abbildung 2.12.

$$z_1 = 2^{\frac{1}{6}} e^{i\frac{\pi}{4}} e^{i\frac{2}{5}\pi} = 2^{\frac{1}{6}} e^{i\frac{11}{12}\pi}$$

$$z_2 = 2^{\frac{1}{6}} e^{i\frac{11}{12}\pi} e^{i\frac{2}{5}\pi} = 2^{\frac{1}{6}} e^{i\frac{19}{12}\pi}$$

- 120 -

$$z_1 = z_0 e^{i\frac{2\pi}{5}} = 32^{\frac{1}{5}} e^{i\frac{\pi}{5}} e^{i\frac{2}{5}\pi} = 32^{\frac{1}{5}} e^{i\frac{3}{5}\pi}$$

$$z_2 = z_1 e^{i\frac{2\pi}{5}} = 32^{\frac{1}{5}} e^{i\frac{3}{5}\pi} e^{i\frac{2}{5}\pi} = 32^{\frac{1}{5}} e^{i\pi}$$

$$z_3 = z_2 e^{i\frac{2\pi}{5}} = 32^{\frac{1}{5}} e^{i\pi} e^{i\frac{2}{5}\pi} = 32^{\frac{1}{5}} e^{i\frac{7}{5}\pi}$$

$$z_4 = z_3 e^{i\frac{2\pi}{5}} = 32^{\frac{1}{5}} e^{i\frac{7}{5}\pi} e^{i\frac{2}{5}\pi} = 32^{\frac{1}{5}} e^{i\frac{9}{5}\pi}$$

- 122 -

2.5. Komplexe Exponential- und Logarithmusfunktion

2.5.1. Komplexe Exponentialfunktion

Bisher wurde e^z für $z = \varphi$ durch $e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi$ «definiert». Nun folgt die allgemeine Definition.

Definition: (komplexe Exponentialfunktion)

Für $z = x + iy$ definiert man

$$e^z = e^x \cdot e^{iy} = e^x (\cos y + i \sin y)$$

und nennt die Funktion $\exp : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}, z \mapsto e^z = \exp(z)$ komplexe Exponentialfunktion.

Beispiel:

$$e^{-2+4i} = e^{-2}e^{4i} = \frac{1}{e^2}(\cos 4 + i \sin 4) = \frac{1}{e^2} \cos 4 + i \frac{1}{e^2} \sin 4 = -0,09 - i \cdot 0,1$$

- 123 -

2.5.2. Komplexe Logarithmusfunktion

Definition: Sei $w \in \mathbb{C}, w \neq 0$, eine beliebige komplexe Zahl.

Jede komplexe Zahl $z \in \mathbb{C}$ mit $e^z = w$ heißt (komplexer) natürlicher Logarithmus von w .

Bemerkung: Mit $z \in \mathbb{C}$ ist auch jede komplexe Zahl, $z + i2\pi k$ ($k \in \mathbb{Z}$) ein (komplexer) natürlicher Logarithmus von w .

$$\begin{aligned} e^z &= w \Rightarrow e^{z+i2\pi k} \\ &= e^{x+iy+i2\pi k} \\ &= e^{x+i(y+2\pi k)} \\ &= e^x e^{iy} \underbrace{e^{i2\pi k}}_{=1} \quad (k \in \mathbb{Z}) \\ &= e^{x+iy} = e^z = w \end{aligned}$$

- 125 -

Eigenschaften von e^z

Satz:

1. $e^{z_1+z_2} = e^{z_1} \cdot e^{z_2}$
2. $e^{zn} = e^{nz} \quad (n \in \mathbb{Z})$
3. $e^{-z} = \frac{1}{e^z}$
4. $\Re(e^z) = e^x \cos y \quad (z = x + iy)$
5. $\Im(e^z) = e^x \sin y$
6. wenn e^z auf dem Einheitskreis liegt, d.h. $|e^z| = 1 \Leftrightarrow x = \Re(z) = 0$
7. $|e^z| = e^x > 0 \Rightarrow e^z$ besitzt in \mathbb{C} keine Nullstellen

Für je zwei (komplexe) natürliche Logarithmen z_1 und z_2 von w gilt $z_1 - z_2 = i2\pi k$ für ein $k \in \mathbb{Z}$.

Sei $S = \{z \in \mathbb{C} \mid -\pi < \Im z \leq \pi\}$

S ist ein Streifen in der Gaußschen Zahlenebene.

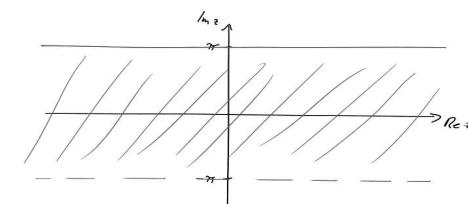


Abbildung 2.14.

$$e^x = a$$

$$x = \ln(a)$$

$$e^z = w$$

- 124 -

Die komplexe Exponentialfunktion $\exp : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C} \setminus \{0\}$ ist nicht injektiv da z.B. $e^z = e^{z+2\pi i} = w \quad z_1 \mapsto w, z_2 \mapsto w$ aber surjektiv.

- 126 -

Satz:

Die Einschränkung der Exponentialfunktion auf den Streifen S

$$\exp : S \rightarrow \mathbb{C} \setminus \{0\}$$

ist bijektiv. Die Umkehrfunktion

$$\ln : \mathbb{C} \setminus \{0\} \rightarrow S$$

heißt Hauptzweig des (komplexen, natürlichen) Logarithmus; es gilt:

$$\boxed{\ln(w) = \ln|w| + i \operatorname{Arg}(w)} \quad (-\pi < \operatorname{Arg}(w) \leq \pi)$$

hierbei ist $\ln|w|$ der reelle natürliche Logarithmus $\ln(w)$ heißt Hauptwert des (komplexen) Logarithmus.

Beweis:

$$\begin{aligned} e^{\ln(w)} &= e^{\ln|w|+i\operatorname{Arg}(w)} \\ &= e^{\ln|w|}e^{i\operatorname{Arg}(w)} \\ &= |w|e^{i\operatorname{Arg}(w)} = w \end{aligned}$$

- 127 -

$$= i\pi$$

$$3. \ln(-8 + 6i) =$$

$$|w| = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{8^2 + 6^2} = \sqrt{100} = 10$$

$$\operatorname{Arg}(w) = \underbrace{\arccos\left(\frac{x}{r}\right)}_{y \geq 0} = \arccos\left(\frac{-8}{10}\right) = 2,49 \quad (-143,1^\circ) = \frac{143,1^\circ}{180^\circ} - \pi = 0,795\pi$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \ln(-8 + 6i) &= \ln|w| + i \operatorname{Arg}(w) \\ &= \ln 10 + 2,49i \end{aligned}$$

- 129 -

2.6. Anwendung auf Schwingungen

Zwei Schwingungen mit gleicher Schwingungsdauer T (Frequenz $f = \frac{1}{T}$).

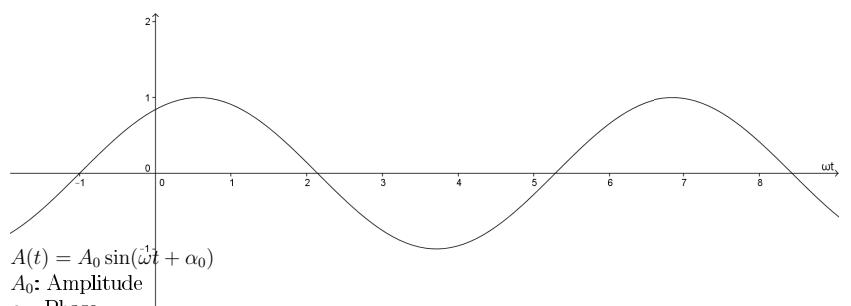


Abbildung 2.15.

$\omega = \frac{2\pi}{T}$: Winkelgeschwindigkeit = Kreisfrequenz

Beispiele:

$$1. \ln(3e^{i\frac{\pi}{2}}) = \ln|w| + i \operatorname{Arg}(w)$$

$$= \ln 3 + i\frac{\pi}{2}$$

$$2. \ln(-1) = \ln\underbrace{|-1|}_{1} + i\underbrace{\operatorname{Arg}(-1)}_{\pi}$$

- 128 -

- 130 -

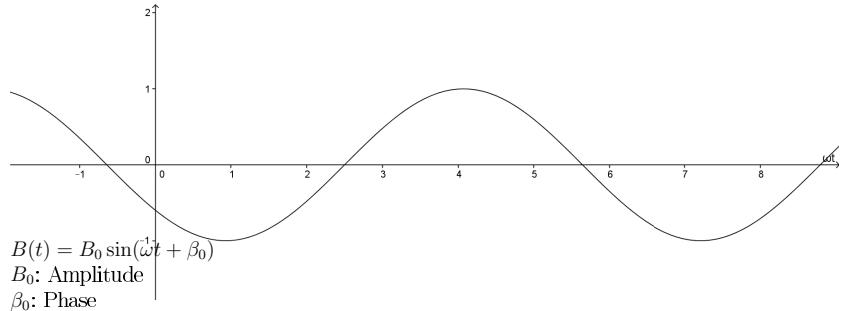


Abbildung 2.16.

- 131 -

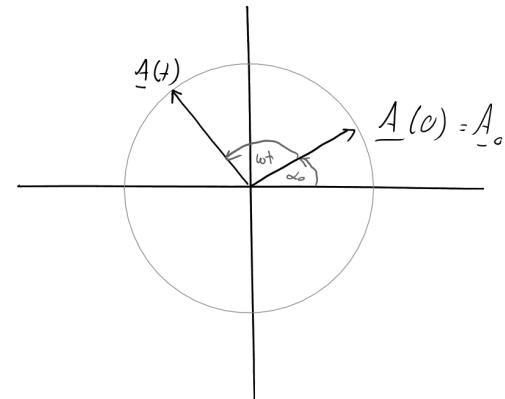


Abbildung 2.17.

- 133 -

2.6.1. Überlagerung (=Superposition) der beiden Schwingungen

$$C(t) = A(t) + B(t)$$

$C(t)$ ist wieder von der Form $C(t) = C_0 \sin(\omega t + \gamma_0)$. Wie können C_0 und γ_0 bestimmt werden?

Schreibe $A(t)$ und $B(t)$ als Imaginärteile von komplexen Schwingungen (rotierende Vektoren/Zeiger).

- 132 -

2.6.2. A als Zeiger

$$\underline{A}(t) = A_0 e^{i \omega t}$$

komplexe Schwingung mit komplexer Amplitude \underline{A}_0

$$\begin{aligned} \underline{A}(t) &= \underline{A}_0 e^{i \omega t} = A_0 e^{i \alpha_0} e^{i \omega t} \\ &\Rightarrow A_0 e^{i(\omega t + \alpha_0)} \end{aligned}$$

$$\underline{A}(t) = A_0 (\cos(\omega t + \alpha_0) + i \sin(\omega t + \alpha_0)) = A_0 \cos(\omega t + \alpha_0) + i \underbrace{\sin(\omega t + \alpha_0)}_{A(t)}$$

$$\underbrace{\underline{A}(t)}_{\text{reelle Schwingung}} = \Im(\underbrace{\underline{A}(t)}_{\text{komplexe Schwingung}})$$

$$|A_0| = A_0 \text{ (reelle Amplitude)}$$

$$\text{Arg}(\underline{A}_0) = \alpha_0 \text{ (Phase)}$$

$$\Rightarrow \boxed{\underline{A}_0 = A_0 e^{i \alpha_0}}$$

$\underline{A}(t)$: Zeiger zum Zeitpunkt t

- 134 -

Zeiger, der Länge A_0 rotiert mit Winkelgeschwindigkeit ω gegen den Uhrzeigersinn.

$$A(t) = A_0 \sin(\omega t + \alpha_0) \longrightarrow \underline{A}(t) = A_0 e^{i(\omega t + \alpha_0)}$$

$$A(t) = \Re(\underline{A}(t)) \longleftarrow \underline{A}(t)$$

2.6.3. B als Zeiger

$$\underline{B}(t) = \underline{B}_0 e^{i\omega t}$$

$$\underline{B}_0 = B_0 e^{i\beta_0}$$

$$B(t) = \Re(\underline{B}(t))$$

- 135 -

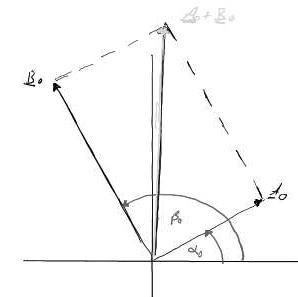


Abbildung 2.18. – Parallelogrammregel

- 137 -

2.6.4. Überlagerung (Superposition)

$$\begin{aligned} C(t) &= A(t) + B(t) \\ &= \Re(\underline{A}(t)) + \Re(\underline{B}(t)) \\ &= \Re(\underbrace{\underline{A}(t) + \underline{B}(t)}_{\underline{C}(t)}) \\ &= \Re(\underline{C}(t)) \end{aligned}$$

D.h. für die Superposition $C(t)$ gilt

$$C(t) = \Re(\underline{C}(t))$$

mit

$$\begin{aligned} \underline{C}(t) &= \underline{A}(t) + \underline{B}(t) \\ &= A_0 e^{i\omega t} + B_0 e^{i\omega t} \\ &= (A_0 + B_0) e^{i\omega t} \\ \boxed{\underline{C}(t) = \underline{C}_0 e^{i\omega t}} \end{aligned}$$

wobei $\boxed{\underline{C}_0 = \underline{A}_0 + \underline{B}_0}$ (Addition der komplexen Amplituden).

- 136 -

2.6.5. Zusammenfassung

Geg: $A(t) = A_0 \sin(\omega t + \alpha_0), B(t) = B_0 \sin(\omega t + \beta_0)$
(+ evtl. weitere Schwingungen → analoge Vorgehensweise)

Ges: C_0, γ_0 , sodass $A(t) + B(t) = C(t) = C_0 \sin(\omega t + \gamma_0)$ gilt (C_0 = Amplitude, γ_0 = Phase der Überlagerung)

1. Schritt: komplexe Darstellung der Schwingungen

$$\begin{aligned} \underline{A}(t) &= \underline{A}_0 e^{i\omega t}, \underline{B}(t) = \underline{B}_0 e^{i\omega t} \\ \text{mit komplexen Amplituden } \underline{A}_0 &= A_0 e^{i\alpha_0}, \underline{B}_0 = B_0 e^{i\beta_0} \end{aligned}$$

2. Schritt: Addiere die komplexen Amplituden

$$\begin{aligned} \underline{C}_0 &= \underline{A}_0 + \underline{B}_0 (\rightarrow \text{Rechne } \underline{A}_0 \text{ und } \underline{B}_0 \text{ zunächst in kartesische Form um}) \text{ und} \\ &\text{schreibe } \underline{C}_0 \text{ in Exponentialform} \\ \underline{C}_0 &= C_0 e^{i\gamma_0}, \text{ d.h. berechne } C_0 = |\underline{C}_0| \text{ und } \gamma_0 = \text{Arg}(\underline{C}_0) \end{aligned}$$

3. Schritt: Reelle Beschreibung der Superposition

$$C(t) = C_0 \sin(\omega t + \gamma_0)$$

- 138 -

(Hinweis: Bei mehr als zwei Schwingungen müssen entsprechend mehrere komplexe Amplituden addiert werden.)

2. 3 ist Teiler von 10 (f)
 3. DEG liegt in Niederbayern (w)
 4. Jede gerade Zahl größer als 2 ist eine Summe aus zwei Primzahlen (Goldbachsche Vermutung)
(→ wahr oder falsch, jedoch weiß man es bis heute nicht, daher «Vermutung»)
 5. $x^2 + y^2 = z^2$
bewiesen durch Andrew Wiles
 6. Poincare-Vermutung
bewiesen durch Perelman
 7. P-NP Problem noch nicht bewiesen
- Fermat'sche «Vermutung»

- 139 -

- 141 -

3.2. Verknüpfung von Aussagen, Aussagenlogik

Sind A und B Aussagen, so definiert man wie folgt neue Aussagen:

1. Konjunktion $A \wedge B$ (« A und B »)

$A \wedge B$ ist genau wahr, wenn A und B wahr sind.

	A	B	$A \wedge B$
Wahrheitstabelle:	w	w	w
	w	f	f
	f	w	f
	f	f	f

3. Logik

3.1. Aussagen

Definition: Eine Aussage ist ein sprachliches Gebilde, welches entweder wahr (w) oder falsch (f) ist. Aussagen werden mit großen Buchstaben A, B, C, \dots bezeichnet.

Beispiele:

1. 5 ist größer als 3 (w)

2. Disjunktion $A \vee B$ («A oder B») «inklusives oder»

$A \vee B$ ist genau dann wahr, wenn A oder B wahr ist (d.h. mindestens eine der beiden Aussagen wahr ist)

	A	B	$A \vee B$
	w	w	w
Wahrheitstabelle:	w	f	w
	f	w	w
	f	f	f

3. Negation $\neg A$ («nicht A»)

$\neg A$ ist genau dann wahr, wenn A falsch ist

	A	$\neg A$
Wahrheitstabelle:	w	f
	f	w

- 143 -

Definition:

a) Aus Aussagen A, B, C, \dots und dessen Verknüpfungen $\wedge, \vee, \neg, \rightarrow, \leftrightarrow$ können beliebige, neue Aussagen gebildet werden. Betrachtet man A, B, C, \dots als Variablen (oder Platzhalter) für Aussagen, so spricht man Formeln für Aussagen oder Aussagenformeln oder aussagenlogische Formel.

b) Zwei Aussageformeln P und Q heißen äquivalent, i.Z. $P \equiv Q$ (bzw. $P \leftrightarrow Q$) wenn sie für jede Belegung ihrer Variablen mit wahren oder falschen Aussagen übereinstimmende Wahrheitswerte besitzen.

c) Eine Aussageformel P heißt Tautologie bzw. Kontradiktion wenn sie für jede Belegung ihrer Variablen mit wahren oder falschen Aussagen, stets den Wahrheitswert w (bzw. f) liefert.

Beispiele:

$$1. \neg(A \vee B) \equiv \neg A \wedge \neg B$$

- 145 -

4. Implikation $A \rightarrow B$ («A impliziert B», «aus A folgt B»)

	A	B	$A \rightarrow B$
	w	w	w
Wahrheitstabelle:	w	f	f
	f	w	w
	f	f	w

5. Äquivalenz $A \leftrightarrow B$ («A äquivalent B», «aus A folgt B und aus B folgt A»)

$A \leftrightarrow B$ ist genau dann wahr, wenn A und B denselben Wahrheitswert besitzen.

	A	B	$A \leftrightarrow B$
	w	w	w
Wahrheitstabelle:	w	f	f
	f	w	f
	f	f	w

Bemerkung:

\neg bindet stärker als $\wedge, \vee, \rightarrow, \leftrightarrow$

\wedge, \vee binden stärker als $\rightarrow, \leftrightarrow$

- 144 -

	A	B	$A \vee B$	$\neg(A \vee B)$
	w	w	w	f
	w	f	w	f
	f	w	w	f
	f	f	f	w

	A	B	$\neg A$	$\neg B$	$\neg A \wedge \neg B$
	w	w	f	f	f
	w	f	f	w	f
	f	w	w	f	f
	f	f	w	w	w

$$2. A \vee \neg A$$

	A	$\neg A$	$A \vee \neg A$
	w	f	w
	f	w	w

$\Rightarrow A \vee \neg A$ ist eine Tautologie

- 146 -

3. $A \wedge \neg A$

A	$\neg A$	$A \wedge \neg A$
w	f	f
f	w	f

$\Rightarrow A \wedge \neg A$ ist eine Kontradiktion

4. $A \rightarrow B \equiv \neg(A \wedge \neg B) \equiv \neg A \vee B$

A	B	$A \rightarrow B$	$\neg(A \wedge \neg B)$	$\neg A \vee B$
w	w	w	w	w
w	f	f	f	f
f	w	w	w	w
f	f	w	w	w

Für Aussagenvariablen A, B, C gilt:

Satz:

F = Kontradiktion

W = Tautologie

8. $A \vee F \equiv A, \quad A \wedge W \equiv A$

9. $A \wedge \neg A \equiv F, \quad A \vee \neg A \equiv W$

10. $A \wedge F \equiv F, \quad A \vee W \equiv W$

11. $A \rightarrow B \equiv \neg A \vee B$

$A \rightarrow B \equiv \neg B \rightarrow \neg A$

$A \leftrightarrow B \equiv (A \rightarrow B) \wedge (B \rightarrow A) \equiv (\neg A \vee B) \wedge (\neg B \vee A)$

$A \leftrightarrow B \equiv \neg A \leftrightarrow \neg B$

Beispiel: Zeigen Sie, dass die Aussageformeln $A \rightarrow (B \rightarrow \neg C)$ und $\neg(A \wedge B \wedge C)$ äquivalent sind durch

a) Umformungen (Äquivalenzumformungen)

b) Erstellen einer Wertetabelle

1. $A \wedge B \equiv B \wedge A$

$A \vee B \equiv B \vee A$

Kommutativität

2. $A \wedge (B \wedge C) \equiv (A \wedge B) \wedge C$

$A \vee (B \vee C) \equiv (A \vee B) \vee C$

Assoziativität

3. $A \wedge (B \vee C) \equiv (A \wedge B) \vee (A \wedge C)$

$A \vee (B \wedge C) \equiv (A \vee B) \wedge (A \vee C)$

Distributivität

4. $A \wedge (A \vee B) \equiv A$

$A \vee (A \wedge B) \equiv A$

Absorption

5. $A \wedge A \equiv A$

$A \vee A \equiv A$

Idempotenz

6. $\neg(\neg A) \equiv A$

7. $\neg(A \wedge B) \equiv \neg A \vee \neg B$

$\neg(A \vee B) \equiv \neg A \wedge \neg B$

Gesetze von de Morgan

zu a)

$$A \rightarrow (B \rightarrow \neg C) \equiv \neg A \vee (\neg B \vee \neg C)$$

$$\equiv \neg(A \wedge \neg(\neg B \vee \neg C))$$

$$\equiv \neg(A \wedge (B \wedge C))$$

$$\equiv \neg(A \wedge B \wedge C)$$

zu b)

A	B	C	$\neg(A \wedge B \wedge C)$	$B \rightarrow \neg C$	$A \rightarrow (B \rightarrow \neg C)$
w	w	w	f	f	f
w	w	f	w	w	w
w	f	w	w	w	w
w	f	f	w	w	w
f	w	w	w	f	w
f	w	f	w	w	w
f	f	w	w	w	w
f	f	f	w	w	w

- 151 -

Für die atomaren Formeln $x_1 \wedge x_2, x_1 \vee x_2, \neg x_1$ gilt

Bezeichnung	logische	Symbol im Schaltbild (IEC)	Wahrheitstabelle
UND(AND)-Gatter	$x_1 \wedge x_2$		$x_1 \quad x_2 \quad x_1 \wedge x_2$
			1 1 1
			1 0 0
			0 1 0
ODER(OR)-Gatter	$x_1 \vee x_2$		$x_1 \quad x_2 \quad x_1 \vee x_2$
			1 1 1
			1 0 1
			0 1 1
NICHT(NOT)-Gatter	$\neg x_1$		$x_1 \quad \neg x_1$
			1 0
			0 1

- 153 -

3.2.1. Schaltalgebra

Der Erfolg der modernen Digitaltechnik gründet auf der Möglichkeit

- Informationen in Einheiten von «Bits» (der kleinsten digitalen Informationseinheit) darzustellen bzw. zu speichern
- Informationen durch logische Verknüpfungen zu verarbeiten

Die der Schaltalgebra zugrunde liegende (Schalt-)Logik ist zur Aussagenlogik (bzw. Booleschen Algebra) äquivalent. Man verwendet analoge Formeln, jedoch anstatt der Aussagevariablen A, B, C, \dots nun Variablen x_1, x_2, x_3, \dots (mit Werten 0 oder 1), welche die (digitalen) Eingänge der logischen Schaltungen repräsentieren.

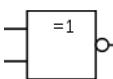
Jede logische Formel hat eine entsprechende Darstellung im Schaltplan.

- 152 -

Man unterscheidet noch weitere Gatter

Bezeichnung	logische	Symbol im Schaltbild (IEC)	Wahrheitstabelle
NAND-Gatter	$\neg(x_1 \wedge x_2)$		$x_1 \quad x_2 \quad \neg(x_1 \wedge x_2)$
			1 1 0
			1 0 1
			0 1 1
NOR-Gatter	$\neg(x_1 \vee x_2)$		$x_1 \quad x_2 \quad \neg(x_1 \vee x_2)$
			1 1 0
			1 0 0
			0 1 0
XOR-Gatter	$x_1 \oplus x_2$ $\equiv (x_1 \wedge \neg x_2) \vee (\neg x_1 \wedge x_2)$		$x_1 \quad x_2 \quad x_1 \oplus x_2$
			1 1 0
			1 0 1
			0 1 1
			0 0 0

- 154 -

XNOR-Gatter	$\neg(x_1 \oplus x_2)$		x_1	x_2	$\neg(x_1 \oplus x_2)$
			1	1	1
			1	0	0
			0	1	0
			0	0	1

c) $(\neg x_1 \oplus x_2) \vee (\neg x_1 \wedge x_2)$

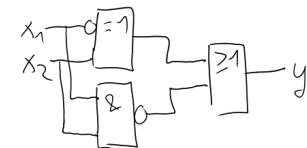


Abbildung 3.3.

2. Bestimmen Sie die zugehörigen logische Formel

a) $(x_1 \wedge x_2) \oplus (\neg x_1 \vee \neg x_2)$

b) $((x_1 \oplus x_2) \vee \neg x_3) \wedge x_1$

Beispiele:

1. Zeichnen Sie das zugehörige Schaltbild

a) $\neg x_1 \wedge x_2$



Abbildung 3.1.

b) $(x_1 \vee \neg x_2) \wedge x_3$



Abbildung 3.2.

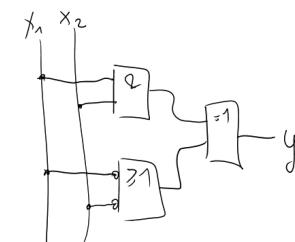


Abbildung 3.4.

c) $C = x_1 \wedge x_2$

$S = x_1 \oplus x_2 = (x_1 \wedge \neg x_2) \vee (\neg x_1 \wedge x_2)$

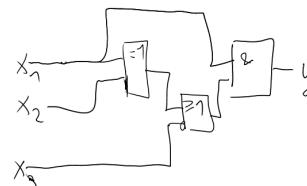


Abbildung 3.5.

- 159 -

Definition: Unter einer Booleschen Funktion (Schaltfunktion) versteht man eine (beliebige) Funktion

$$f : \{0; 1\}^n \rightarrow \{0; 1\}^m, (x_1, \dots, x_n) \mapsto (y_1, \dots, y_m)$$

$$f(x_1, \dots, x_n) = (\underbrace{f_1(x_1, \dots, x_n)}_{y_1}, \underbrace{f_2(x_1, \dots, x_n)}_{y_2}, \dots, \underbrace{f_m(x_1, \dots, x_n)}_{y_m})$$

$$f_j(x_1, \dots, x_n) \in \{0; 1\} \quad (j = 1, \dots, m)$$

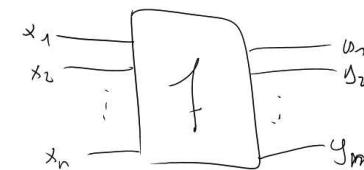


Abbildung 3.8.

- 161 -

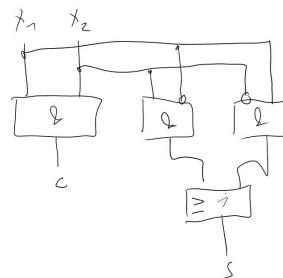


Abbildung 3.6. – Halbadddierer

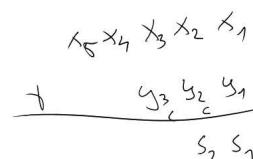


Abbildung 3.7.

- 160 -

Jede logische Formel $\varphi(x_1, \dots, x_n)$ in den Variablen x_1, \dots, x_n definiert eine Boolesche Funktion

$$f_\varphi : \{0; 1\}^n \rightarrow \{0; 1\}, (x_1, \dots, x_n) \mapsto \begin{cases} 0, & \text{falls } \varphi(x_1, \dots, x_n) \text{ falsch} \\ 1, & \text{falls } \varphi(x_1, \dots, x_n) \text{ wahr} \end{cases}$$



Abbildung 3.9.

Beispiel: $\varphi = x_1 \vee x_2$

$$f_\varphi : \{0, 1\}^2 \rightarrow \{0, 1\}, (x_1, x_2) \mapsto x_1 \vee x_2 = y$$

- 162 -

Beispiel: $\varphi = x_1 \wedge x_2$

$$f_\varphi : \{0, 1\}^2 \rightarrow \{0, 1\}, (x_1, x_2) \mapsto x_1 \wedge x_2 = y$$

Hauptsatz der Schaltalgebra:

Satz:

Jede Boolesche Funktion $f : \{0, 1\}^n \rightarrow \{0, 1\}$ lässt sich durch eine Formel $\varphi(x_1, \dots, x_n)$, die durch die drei logischen Operatoren UND, ODER, NEG gegeben ist, darstellen.

Man bezeichnet deshalb die logischen Operatoren UND, ODER, NEG als vollständiges Logiksystem (Basissystem).

Weitere vollständige Logiksysteme (Basissysteme)

1. \wedge UND, \neg NEG

$$x_1 \vee x_2 \equiv \neg(\neg x_1 \wedge \neg x_2)$$

2. \vee ODER, \neg NEG

$$x_1 \wedge x_2 \equiv \neg(\neg x_1 \vee \neg x_2)$$

- 163 -

3. NAND

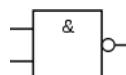


Abbildung 3.10. – NAND

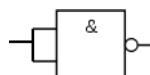


Abbildung 3.11. – NEG

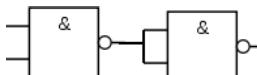


Abbildung 3.12. – AND

4. NOR

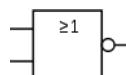


Abbildung 3.13. – NOR

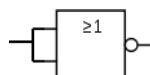


Abbildung 3.14. – NEG

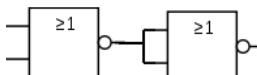


Abbildung 3.15. – OR

- 164 -

3.3. Formeln über R bzw. C, Quantoren

Wir betrachten Terme und Formeln über den reellen bzw. komplexen Zahlen (\mathbb{R} bzw. \mathbb{C}). Terme und Formeln sind Gegenstand einer sogenannten formalen Sprache. Bison, Yacc

Zunächst definiert man das Alphabet der formalen Sprache:
es besteht aus

1. Zeichen für Variablen x_1, x_2, x_3, \dots (über den komplexen Zahlen verwenden wir z_1, z_2, \dots)
2. Zeichen für Konstanten c ($c \in \mathbb{R}$ bzw. $c \in \mathbb{C}$)
3. Zeichen für Addition, Multiplikation, Division $+, \cdot, -, :, /$ (bzw. \square)
4. logische Zeichen $\neg, \wedge, \vee, \rightarrow, \leftrightarrow$
5. Relations- bzw. Funktionszeichen $=, \leq, \geq, <, >$ (bei \mathbb{R}), $f(z.B. \sin, \cos, \dots)$
6. Quantoren

- 165 -

\forall (für alle) All-Quantor

\exists (es existiert) Existenz-Quantor

7. Hilfszeichen $(,),[],\{\}$

Definition:

(Term) induktive Definition

1. Variablen und Konstanten sind Terme (atomare Terme, Induktionsanfang)
2. Sind T_1 und T_2 Terme, so sind auch $T_1 + T_2, T_1 - T_2, T_1 \cdot T_2, T_1 : T_2, \frac{T_1}{T_2}$ und $(T), [T], \{T\}$ Terme (Induktionsschritt)
3. Sind T_1, \dots, T_r Terme und ist f ein r-stelliges Funktionszeichen, so ist auch $f(T_1, \dots, T_r)$ ein Term.
4. Keine weiteren Zeichenketten sind Terme.

- 166 -

Definition:

(Formel) induktive Definition

1. Sind T_1 und T_2 Terme, so ist $T_1 = T_2$ eine Formel (bei Formeln über \mathbb{R} sind auch $T_1 \leq T_2, T_1 \geq T_2, T_1 < T_2, T_1 > T_2$ Formeln)
(Induktionsanfang, atomare Formeln)
2. Sind φ, ψ Formeln, so sind auch $\neg\varphi$ (bzw. $\bar{\varphi}$), (φ) , $[\varphi]$, $\{\varphi\}$, $\varphi \wedge \psi$, $\varphi \vee \psi$, $\varphi \rightarrow \psi$, $\varphi \leftrightarrow \psi$ und $\forall x\varphi, \exists x\varphi$ Formeln
3. Keine weiteren Zeichenketten sind Formeln

- 167 -

Beispiel: für Formeln

$$\begin{aligned} 2x_1 - 3 &= 1; & x_1^2 + x_2^2 &< 1; & \frac{1}{x_1^2 + 1} &< x_2^2 \\ z_1 \cdot \bar{z}_2 &< 4; & (5x_1 + 6x_2 = 1) \wedge (x_1^2 + x_2^2 = 1) \\ \neg(4x_1 + 3x_2 &> 5); \\ \forall x_1 \quad x_1 &\geq 0 \quad (x_1 \text{ gebundene Variable}) \\ \exists x_1 \quad 5x_1^2 + 2x_2^2 &= 1 \quad (x_1 \text{ gebunden}, x_2 \text{ frei}) \end{aligned}$$

Definition:

1. Sind die freien Variablen einer Formel φ in der Menge $\{x_1, \dots, x_n\}$ enthalten, so schreibt man auch $\varphi(x_1, \dots, x_n)$ statt φ .
2. Für eine Formel $\varphi(x_1, \dots, x_n)$ bzw. $\varphi(z_1, \dots, z_n)$ definiert man die Erfüllungsmenge durch $M_\varphi = \{(a_1, \dots, a_n) \in \mathbb{R}^n \mid \varphi(a_1, \dots, a_n) \text{ ist in } \mathbb{R} \text{ wahr}\}$ (falls φ eine Formel über \mathbb{R} ist)

$$M_\varphi = \{(a_1, \dots, a_n) \in \mathbb{C}^n \mid \varphi(a_1, \dots, a_n) \text{ ist in } \mathbb{C} \text{ wahr}\} \quad (\text{falls } \varphi \text{ eine Formel über } \mathbb{C} \text{ ist})$$

- 169 -

Definition:

(Quantoren)

Die Symbole \forall und \exists heißen Quanotoren; speziell heißt \forall All-Quantor und \exists heißt Existenzquantor.

Ist x eine Variable, so bedeutet $\forall x$ «für alle x »

$\exists x$ «es existiert (gibt) ein x »

In den Formeln $\forall x\varphi$ und $\exists x\varphi$ liegt die Variable x im Wirkungsbereich eines Quantors und wird als gebundene Variable der Formel bezeichnet; ansonsten heißt die Variable frei (für die Formel).

Beispiel: für Terme

$$x_1 \cdot x_2 - 1, \quad x_1^2 + \sqrt{2}, \quad 2x_1^2 + 4x_1 + 9, \quad \frac{x_1}{x_1^2 + 1} \quad (\text{in } \mathbb{R})$$

speziell in \mathbb{C} : $z_1^3 - 5i$ (Konstante $i \in \mathbb{C}$)

- 168 -

Bemerkung: Besitzt eine Formel keine freien Variablen, so stellt sie eine Aussage dar, die in \mathbb{R} (bzw. \mathbb{C}) wahr oder falsch ist.

- 170 -

Beispiel: Erfüllungsmengen für Formeln über \mathbb{R} , Aussagen über \mathbb{R}

$$1. \varphi(x_1) := (x_1 \geq 0) \quad (x_1 \in \mathbb{R}, \text{ d.h. } \varphi \text{ ist eine Formel über } \mathbb{R})$$

x_1 freie Variable

$$M_\varphi = \{a_1 \in \mathbb{R} \mid a_1 \geq 0 \text{ ist wahr in } \mathbb{R}\} = \mathbb{R}_0^+$$

$$2. \varphi(x_1) := (4x_1 - 2 = 0) \quad (x_1 \in \mathbb{R})$$

x_1 freie Variable

$$M_\varphi = \left\{\frac{1}{2}\right\}$$

$$3. \varphi(x_1, x_2) := ((2x_1 - x_2 = 4) \wedge (-x_1 + x_2 = 2))$$

x_1, x_2 freie Variablen

$$\begin{array}{rcl} 2x_1 - x_2 < 4 & & (\text{I}) \\ -x_1 + x_2 < 2 & & (\text{II}) \\ \hline 2x_1 - 4 < x_2 & & (\text{I}) \\ x_2 < x_1 + 2 & & (\text{II}) \\ \hline 2x_1 - 4 < x_2 < x_1 + 2 & & \end{array}$$

M_φ = siehe Zeichnung

- 171 -

- 173 -

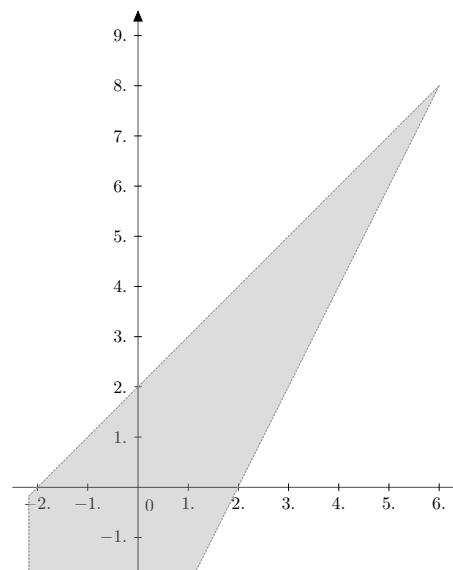
$$\begin{array}{rcl} 2x_1 - x_2 = 4 & & (\text{I}) \\ -x_1 + x_2 = 2 & & (\text{II}) \\ \hline x_1 = 6 & & (\text{I}) + (\text{II}) \\ x_2 = 2 + x_1 = 8 & & \text{in (II)} \end{array}$$

$$M_\varphi = \{(6, 8)\}$$

$$4. \varphi(x_1, x_2) := ((2x_1 - x_2 < 4) \wedge (-x_1 + x_2 < 2))$$

x_1, x_2 freie Variablen

- 172 -



- 174 -

5. $\varphi(x_1) := \exists x_2 ((2x_1 - x_2 < 4) \wedge (-x_1 + x_2 < 2))$
 x_1 frei, x_2 gebunden

$$M_\varphi = \{x_1 \in \mathbb{R} \mid x_1 < 6\} =] - \infty; 6[$$

6. $\exists x_1 \forall x_2 \quad x_1 = x_2^2 \quad (\text{f})$ (über \mathbb{R})
7. $\forall x_1 \exists x_2 \quad x_1 = x_2^2 \quad (\text{f})$ (über \mathbb{R})
 $\forall x_1 \exists x_2 \quad x_1 \geq 0 \rightarrow x_1 = x_2^2 \quad (\text{w})$ (über \mathbb{R})
8. $\forall x_1 \exists x_2 \quad x_2 = x_1^2 \quad (\text{w})$ (über \mathbb{R})

$$M_\varphi = \{z_1 \in \mathbb{C} \mid |z_1| = 2\}$$

4. $\varphi(z_1, z_2) := (z_1 \cdot \overline{z_1} = z_2 \cdot \overline{z_2})$

$$\begin{aligned} M_\varphi &= \{(z_1, z_2) \in \mathbb{C}^2 \mid |z_1| = |z_2|\} \\ &= \{(z_1, z_2) \in \mathbb{C}^2 \mid z_1 \text{ und } z_2 \text{ liegen auf dem selben Kreis mit Mittelpunkt } 0 \in \mathbb{C}\} \\ 5. \quad \exists z_1 \forall z_2 \quad z_1 = z_2^2 &\quad (\text{f}) \text{ (über } \mathbb{C}) \\ 6. \quad \forall z_1 \exists z_2 \quad z_1 = z_2^2 &\quad (\text{w}) \text{ (über } \mathbb{C}) \\ 7. \quad \forall z_1 \exists z_2 \quad z_2 = z_1^2 &\quad (\text{w}) \text{ (über } \mathbb{C}) \end{aligned}$$

Beispiel: Erfüllungsmengen für Formeln über \mathbb{C} , Aussagen über \mathbb{C}

1. $\varphi(z_1) := (z_1^2 + 1 = 0)$

$$M_\varphi = \{\iota, -\iota\}$$

2. $\varphi(z_1) := (z_1^3 + 8e^{i\frac{\pi}{4}} = 0)$

$$\begin{aligned} z_1^3 &= -8e^{i\frac{\pi}{4}} \\ -1 &= e^{i\pi} \\ z_1^3 &= 8e^{i\pi}e^{i\frac{\pi}{4}} \\ z_1^3 &= 8e^{i\frac{5}{4}\pi} \end{aligned}$$

$$M_\varphi = \{2e^{i\frac{5}{12}\pi}; 2e^{i\frac{13}{12}\pi}; 2e^{i\frac{7}{4}\pi}\}$$

3. $\varphi(z_1) := (z_1 \cdot \overline{z_1} = 4)$

Induktionsaxiom (5. Peano-Axiom)

Für eine Teilmenge $M \subseteq \mathbb{N}$ der natürlichen Zahlen gelte:

1. $1 \in M$

2. $n \in M \rightarrow n + 1 \in M$

Dann folgt $M = \mathbb{N}$

Bemerkung: Das Induktionsaxiom ist Bestandteil der Definition der natürlichen Zahlen (Peano-Axiome) und beschreibt eine bestimmte Eigenschaft der natürlichen Zahlen.

3.4.1. Vollständige Induktion

Wir betrachten eine (unendliche) Folge von Aussagen $A(n)$ ($n \in \mathbb{N}$) und möchten zeigen, dass $A(n)$ für jedes $n \in \mathbb{N}$ wahr ist.

Mittels vollständiger Induktion kann man dies in zwei Schritten zeigen:

1. Induktionsanfang ($n = 1$)

Zeige, dass $A(1)$ wahr ist.

2. Induktionsschritt ($n \rightarrow n + 1$)

Unter der Annahme, dass $A(n)$ wahr ist (Induktionsannahme), zeige man, dass auch $A(n + 1)$ wahr ist, d.h. zeige $A(n) \rightarrow A(n + 1)$

Mithilfe des Induktionsaxioms der natürlichen Zahlen gilt dann

$$M = \{n \in \mathbb{N} \mid A(n) \text{ ist wahr}\} = \mathbb{N}$$

d.h. $A(n)$ ist für jedes $n \in \mathbb{N}$ wahr.

- 179 -

3. $\#k$ -elementige Teilmengen einer n -elementigen Menge ($k \leq n$) ist gleich $\binom{n}{k}$

4. Bernoullische Ungleichung

$$(1 + x)^n \geq 1 + nx \quad (x \in \mathbb{R}, 1 + x \geq 0, n \in \mathbb{N})$$

5. Binomischer Lehrsatz

$$(a + b)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} a^{n-k} b^k$$

zu 1) $A(n) := \left(\sum_{k=0}^n k = \frac{n(n+1)}{2} \right) \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$

Induktionsanfang: ($n = 0$)

Zeige, dass $A(0)$ wahr ist.

- 181 -

Bemerkung: Modifikation

Aussagen $A(n)$, $n \in \mathbb{Z}$, $n \geq n_0$

1. Induktionsanfang: ($n = n_0$)

Zeige, dass $A(n_0)$ wahr ist

2. Induktionsschritt ($n \rightarrow n + 1$)

Zeige: $A(n) \rightarrow A(n + 1)$

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^n k &= 0 \\ \frac{n(n+1)}{2} &= 0 \end{aligned}$$

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

Induktionsannahme $A(n)$ ist wahr, d.h. es gelte $\sum_{k=0}^n k = \frac{n(n+1)}{2}$

zeige $A(n + 1)$ ist wahr d.h.

Beispiel: Zeigen Sie mittels vollständiger Induktion:

$$1. \sum_{k=0}^n k = \frac{n(n+1)}{2}$$

$$2. \sum_{\substack{k=0 \\ k \text{ ungerade}}}^{2n-1} k = n^2$$

- 180 -

- 182 -

$$\begin{aligned}
 \sum_{k=0}^{n+1} k &= \frac{(n+1)(n+2)}{2} \\
 \underbrace{\sum_{k=0}^n k}_{\frac{n(n+1)}{2}} + (n+1) &= \frac{n(n+1)}{2} + (n+1) \\
 &= \frac{n(n+1) + 2(n+1)}{2} \\
 &= \frac{(n+1)(n+2)}{2}
 \end{aligned}$$

zu 2) $A(n) := ((1+x)^n \geq 1+nx)$ ($n = 1, 2, 3, \dots$)

Induktionsanfang: ($n=1$)

Zeige, dass $A(1)$ wahr ist.

- 183 -

$$\begin{aligned}
 (1+x)^{n+1} &\stackrel{!}{\geq} 1 + (n+1)x \\
 (1+x)^{n+1} &= \underbrace{(1+x)^n}_{\geq 1+nx} (1+x) \\
 \underbrace{(1+x)^n}_{\geq 1+nx} (1+x) &\geq (1+nx)(1+x) \\
 (1+x)^n (1+x) &\geq 1 + nx + nx^2 + x = 1 + (n+1)x + \underbrace{nx^2}_{\geq 0} \geq 1 + (n+1)x
 \end{aligned}$$

$\xrightarrow{(\forall x)^n > \forall x}$ $\exists x$
 $\Rightarrow (\forall x)^n (\forall x) \geq (\forall n_x) (\forall x)$
 $\forall x \geq 0$

Abbildung 3.16.

- 185 -

$$(1+x)^1 = 1+x$$

$$1+1x = 1+x$$

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

Induktionsannahme: $A(n)$ ist wahr, d.h. $(1+x)^n \geq 1+nx$

Zeige, dass $A(n+1)$ wahr ist, d.h.

- 184 -

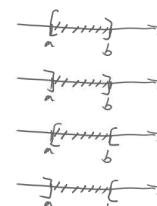
4. Intervalle

abgeschlossene Intervalle $[a; b] = \{x \leq x \leq b\}$

halboffene Intervalle $]a; b] = \{a < x \leq b\}$

$[a; b[= \{a \leq x < b\}$

offene Intervalle $]a; b[= \{a < x < b\}$



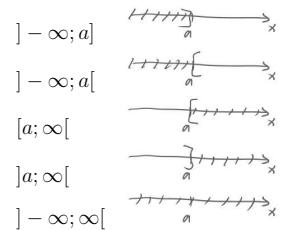
186

statt $]a; b]$ schreibt man auch $(a; b]$

statt $[a; b[$ schreibt man auch $[a; b)$

statt $]a; b[$ schreibt man auch $(a; b)$

4.1. Uneigentliche Intervalle



statt $] - \infty; a]$ schreibt man auch $(-\infty; a]$

statt $] - \infty; a[$ schreibt man auch $(-\infty; a)$

- 187 -

Teil II.

Algebra und Arithmetik

189

statt $[a; \infty[$ schreibt man auch $[a; \infty)$

statt $]a; \infty[$ schreibt man auch $(a; \infty)$

statt $] - \infty; \infty[$ schreibt man auch $(-\infty; \infty)$

1. Zahlen

1.1. Ganze Zahlen und Teilbarkeit

$\mathbb{Z} = \{0, \pm 1, \pm 2, \dots\}$ Menge der ganzen Zahlen

Definition: $t \in \mathbb{Z}$ heißt Teiler von $a \in \mathbb{Z}$ (und a Vielfaches von t), wenn es ein $q \in \mathbb{Z}$ gibt mit $a = q \cdot t$

man schreibt dann $t|a$ ($\ll t$ teilt a) oder $\ll t$ ist Teiler von a)

- 188 -

190

Bemerkung: 1 und $a \in \mathbb{Z}$ sind stets Teiler von a ; sie heißen triviale (unechte) Teiler von a ; Teiler $t \neq 1, a$ heißen echte Teiler von a .

Division mit Rest: Für beliebige $a, b \in \mathbb{Z}, b \neq 0$, gibt es eindeutige ganze Zahlen $q, r \in \mathbb{Z}$ mit

$$a = q \cdot b + r \quad \text{und } 0 \leq r < |b|$$

r heißt Rest der Division von a durch b man schreibt $r = a \bmod b$.

In \mathbb{Q} gilt dann: $\left[\frac{a}{b} \right] = q + \frac{r}{b}$ (echter Bruch $r < |b|$, q : ganzzahliger Anteil)

$$q = \left[\frac{a}{b} \right]$$

$\lfloor x \rfloor$ = untere Gauß-Klammer von x = größte ganze Zahl $\leq x$

Beispiele: $\lfloor 4,6 \rfloor = 4$ $\lfloor -2,7 \rfloor = -3$

- 191 -

Beispiele:

1. $a = 14, b = 5$

$$14 = 2 \cdot 5 + 4$$

$$\frac{14}{5} = 2 + \frac{4}{5}$$

2. $a = -8, b = 3$

$$-8 = -3 \cdot 3 + 1$$

$$\frac{-8}{3} = -3 + \frac{1}{3}$$

Beachte: Für den Rest r muss stets $r \geq 0$ gelten ($0 \leq r < |b|$)

3. $a = 16, b = -7$

$$16 = -2 \cdot (-7) + 2$$

$$\frac{16}{-7} = -2 + \frac{2}{-7}$$

4. $a = -18, b = -15$

$$-18 = -2 \cdot (-15) + 12$$

$$\frac{-18}{-15} = -2 + \frac{12}{-15}$$

5. $a = 328, b = 14$

- 192 -

$$\begin{array}{r} \overbrace{328}^{328} : \overbrace{14}^{14} = 23 \ R 6 \\ -28 \\ \hline 48 \\ -42 \\ \hline 6 \end{array}$$

$$328 = 23 \cdot 14 + 6$$

$$\frac{328}{14} = 23 + \frac{6}{14}$$

6. $a = -1024, b = 23$

$$\begin{array}{r} \overbrace{1024}^{1024} : \overbrace{23}^{23} = 44 \ R 12 \\ -92 \\ \hline 104 \\ -92 \\ \hline 12 \end{array}$$

$$1024 = 44 \cdot 23 + 12$$

$$-1024 = -44 \cdot 23 - 12$$

$$-1024 = -45 \cdot 23 + 11$$

$$\frac{-1024}{23} = -45 + \frac{11}{23}$$

- 193 -

Definition: Eine Primzahl ist eine natürliche Zahl $p \geq 2$, die keine echten Teiler besitzt.

Beispiel: Primzahlen

2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, ...

Euklid

Satz:

Es gibt unendlich viele Primzahlen

Hauptsatz der elementaren Zahlentheorie

Jede ganze Zahl $a \in \mathbb{Z}, a \neq 0, \pm 1$ kann eindeutig als Produkt von Primzahlen geschrieben werden, d.h.

$$a = \epsilon \cdot p_1^{e_1} \cdot \dots \cdot p_k^{e_k}$$

mit $\epsilon \in \{\pm 1\}$ und Primzahlen $p_1 < p_2 < \dots < p_k$ und Exponenten $e_1, \dots, e_k \in \mathbb{N}$

Theorem:

- 194 -

Beispiele:

1. $12 = 2^2 \cdot 3$
2. $-28 = -2^2 \cdot 7$
3. $-1024 = -2^{10}$
4. $47293129 = 13^2 \cdot 23^4$

Definition:

1. t heißt größter gemeinsamer Teiler von a und b (i.Z. $t = \text{ggT}(a, b)$, gcd), wenn t ein Teiler von a und b , und $t'|t$ für jeden gemeinsamen Teiler t' von a und b gilt.
2. s heißt kleinstes gemeinsames Vielfaches von a und b , (i.Z. $s = \text{kgV}(a, b)$, scm), wenn s ein Vielfaches von a und b ist, und $s|s'$ für jedes gemeinsame Vielfache s' von a und b gilt.

- 195 -

3. ggT und kgV von mehr als zwei Zahlen sind analog definiert und es gilt:

$$\text{ggT}(a_1, \dots, a_n) = \text{ggT}(\text{ggT}(a_1, \dots, a_{n-1}), a_n)$$

$$\text{kgV}(a_1, \dots, a_n) = \text{kgV}(\text{kgV}(a_1, \dots, a_{n-1}), a_n)$$

Bemerkung: ggT und kgV sind bis auf das Vorzeichen eindeutig bestimmt, z.B. sind 5 und -5 größte gemeinsame Teiler von 15 und 20;
oftmals bezeichnet man nur $t > 0$ (bzw. $s > 0$) als ggT (bzw. kgV)

Bemerkung: $\text{kgV}(a_1, a_2) = \frac{a_1 \cdot a_2}{\text{ggT}(a_1, a_2)}$

Seien $a, b \in \mathbb{Z}, a, b \neq 0, \pm 0$; wir schreiben

$$a = \epsilon p_1^{e_1} \cdot \dots \cdot p_n^{e_n} \text{ und}$$

$$b = \eta p_1^{f_1} \cdot \dots \cdot p_n^{f_n}$$

mit $e, f \geq 0$ und Primzahlen $p_1 < \dots < p_n$

Satz:

Dann gilt:

$$\text{ggT}(a, b) = p_1^{\min(e_1, f_1)} \cdot \dots \cdot p_n^{\min(e_n, f_n)}$$

$$\text{kgV}(a, b) = p_1^{\max(e_1, f_1)} \cdot \dots \cdot p_n^{\max(e_n, f_n)}$$

Beispiele:

1. $a = 12, b = 18$

$$12 = 2^2 \cdot 3$$

$$18 = 2 \cdot 3^2$$

$$\text{ggT}(12, 18) = 2 \cdot 3 = 6$$

$$\text{kgV}(12, 18) = 2^2 \cdot 3^2 = 36$$

2. $a = 1400, b = 1452$

- 197 -

$$1400 = 2^3 \cdot 5^2 \cdot 7 = 2^3 \cdot 3^0 \cdot 5^2 \cdot 7 \cdot 11^0$$

$$1452 = 2^2 \cdot 3 \cdot 11^2 = 2^2 \cdot 3 \cdot 5^0 \cdot 7^0 \cdot 11^2$$

$$\text{ggT}(a, b) = 2^2 \cdot 3^0 \cdot 5^0 \cdot 7^0 \cdot 11^0 = 4$$

$$\text{kgV}(a, b) = 2^3 \cdot 3 \cdot 5^2 \cdot 7 \cdot 11^2 = 508200$$

Definition: $a, b \in \mathbb{Z}, a, b \neq 0$, heißen teilerfremd, wenn $\text{ggT}(a, b) = 1$ gilt, d.h. wenn a und b keine gemeinsamen echten Teiler besitzen.

Beispiel: $a = 2^3 \cdot 5^2 = 200, b = 3^2 \cdot 7 = 63$

- 196 -

- 198 -

1.2. Euklidischer Algorithmus

Der euklidische Algorithmus ist ein effizientes Verfahren zur Bestimmung des größten gemeinsamen Teilers zweier ganzer Zahlen.

Euklidischer Algorithmus zur Berechnung von $\text{ggT}(a, b)$, $a, b \in \mathbb{Z}, b \neq 0$.

Man führt fortlaufend Divisionen mit Rest durch, bis zum ersten Mal die Division aufgeht, d.h. der zugehörige Rest Null ist.

- 199 -

- Der Algorithmus terminiert (d.h. endet irgendwann) da $|b| > r_1 > r_2 > r_3 > \dots > r_n \geq 0$ gilt und somit die Folge der Reste r_1, r_2, r_3, \dots irgendwann Null wird.
- Wegen $\text{ggT}(a, b) = \text{ggT}(b, r_1) = \text{ggT}(r_1, r_2) = \dots = \text{ggT}(r_{n-1}, r_n) = \text{ggT}(r_n, 0) = r_n$ ist der Algorithmus korrekt.

Beispiele:

- $\text{ggT}(56, 41)$

$$\begin{aligned} 56 &= 1 \cdot 41 + 15 \\ 41 &= 2 \cdot 15 + 11 \\ 15 &= 1 \cdot 11 + 4 \\ 11 &= 2 \cdot 4 + 3 \\ 4 &= 1 \cdot 3 + 1 \leftarrow \text{ggT}(56, 41) \\ 3 &= 3 \cdot 1 + 0 \end{aligned}$$

- 201 -

$$\begin{array}{ll} a = q_1 \cdot b + r_1 & 0 \leq r_1 < |b| \\ b = q_2 \cdot r_1 + r_2 & 0 \leq r_2 < r_1 \\ r_1 = q_3 \cdot r_2 + r_3 & 0 \leq r_3 < r_2 \\ \vdots & \\ r_{n-2} = q_n \cdot r_{n-1} + r_n & 0 \leq r_n < r_{n-1} \\ r_{n-1} = q_{n+1} \cdot r_n + 0 & 0 = r_{n+1} < r_n \end{array}$$

Division geht zum ersten Mal auf, d.h. $r_{n+1} = 0$

Dann gilt: $r_n = \text{ggT}(a, b)$

Bemerkung:

- 200 -

$\Rightarrow \text{ggT}(56, 41) = 1$, d.h. 56 und 41 sind teilerfremd.

- $\text{ggT}(9625, 9075)$

$$\begin{aligned} 9625 &= 1 \cdot 9075 + 550 \\ 9075 &= 16 \cdot 550 + 275 \leftarrow \text{ggT} \\ 550 &= 2 \cdot 275 + 0 \end{aligned}$$

$\Rightarrow \text{ggT}(9625, 9075) = 275$

Lineare Darstellung des ggT

Satz:

Zu $a, b \in \mathbb{Z}, b \neq 0$, gibt es stets ganze Zahlen $p, q \in \mathbb{Z}$ mit

$$pa + qb = \text{ggT}(a, b)$$

Der sogenannte erweiterte Euklidische Algorithmus bestimmt neben dem $\text{ggT}(a, b)$ zusätz-

- 202 -

lich ganze Zahlen $p, a \in \mathbb{Z}$ mit $pa + qb = \text{ggT}(a, b)$.

Man erhält die Koeffizienten p und q durch «Rückwärtseinsetzen» im Divisionsschema des Euklidischen Algorithmus.

Beispiele:

1. $\text{ggT}(56, 41)$

$$\begin{aligned} 56 &= 1 \cdot 41 + 15 \\ 41 &= 2 \cdot 15 + 11 \\ 15 &= 1 \cdot 11 + 4 \\ 11 &= 2 \cdot 4 + 3 \\ 4 &= 1 \cdot 3 + 1 \end{aligned} \quad \begin{aligned} 1 &= -4 \cdot 41 + 11 \cdot (56 - 1 \cdot 41) = 11 \cdot 56 - 15 \cdot 41 \\ 1 &= 3 \cdot 15 - 4 \cdot (41 - 2 \cdot 15) = -4 \cdot 41 + 11 \cdot 15 \\ 1 &= -1 \cdot 11 + 3 \cdot (15 - 1 \cdot 11) = 3 \cdot 15 - 4 \cdot 11 \\ 1 &= 4 - 1 \cdot (11 - 2 \cdot 4) = -1 \cdot 11 + 3 \cdot 4 \\ 1 &= 4 - 1 \cdot 3 \end{aligned}$$

2. $\text{ggT}(9625, 9075)$

- 203 -

$$\text{ggT}(9625, 9075)$$

$$\begin{aligned} 9625 &= 1 \cdot 9075 + 550 \Rightarrow 275 = 9075 - 16(9625 - 7 \cdot 9075); -76 \cdot 9625 + 17 \cdot 9075 \\ 9075 &= 16 \cdot 550 + 275 \Rightarrow 275 = 9075 - 16 \cdot 550 \end{aligned}$$

Abbildung 1.1.

1.3. Modulare Arithmetik, endliche Körper

Wir hatten bereits die Äquivalenzrelation \sim_n ($n \in \mathbb{N}$) auf \mathbb{Z} wie folgt definiert: $(a, b \in \mathbb{Z})$

$$a \sim_n b \leftrightarrow n|(a - b)$$

(d.h. n teilt $a - b$ bzw. $a - b$ ist durch n teilbar)

statt $a \sim_n b$ schreibt man $a \equiv b \pmod{n}$ und spricht « a kongruent b modulo n ».

Die Äquivalenzklassen $[a]$ ($a \in \mathbb{Z}$) (wir schreiben auch \bar{a} statt $[a]$) nennt man Kongruenz- oder Restklassen modulo n ; ein vollständiges Repräsentantensystem ist $[0], [1][2], \dots, [n-1]$; dabei besteht die Klasse $[r]$ ($=\bar{r}$) aus allen ganzen Zahlen, die bei Division durch n den Rest r ergeben.

- 205 -

$$[0] = \{k \cdot n \mid k \in \mathbb{Z}\}$$

$$[1] = \{1 + k \cdot n \mid k \in \mathbb{Z}\}$$

$$[2] = \{2 + k \cdot n \mid k \in \mathbb{Z}\}$$

:

$$[n-1] = \{n-1 + k \cdot n \mid k \in \mathbb{Z}\}$$

Für die Restklassen definiert man Addition und Multiplikation wie folgt: (Definition erfolgt repräsentantenweise)

- 204 -

- 206 -

$$\begin{aligned}[a] + [b] &:= [a + b] \quad (\text{bzw. } \bar{a} + \bar{b} = \overline{a + b}) \\ [a] \cdot [b] &:= [a \cdot b] \quad (\text{bzw. } \bar{a} \cdot \bar{b} = \overline{a \cdot b})\end{aligned}$$

Man kann zeigen, dass die Definitionen von der Wahl der Repräsentanten der Klassen nicht abhängen.

(\Rightarrow Addition und Multiplikation sind wohldefiniert)

Definition:

die Menge $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z} = \{[0], [1], \dots, [n-1]\}$ zusammen mit obiger Addition und Multiplikation ist ein sogenannter Ring und heißt Restklassenring modulo n .

Satz:

Die auf $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ definierte Arithmetik nennt man modulare Arithmetik (anschaulich manchmal auch «Zeigerarithmetik»)

- 207 -

- multiplikatives neutrales Element

es existiert ein Element $1 \in R$ mit $a \cdot 1 = 1 \cdot a = a$ für alle $a \in R$

5. Existenz additiver inverser Elemente

zu jedem $a \in R$ existiert ein additives inverses Element $-a$ mit $a + (-a) = (-a) + a = 0$

Definiere die Subtraktion durch $a - b := a + (-b)$

6. Existenz multiplikativer inverser Elemente

zu jedem $a \in R, a \neq 0$ existiert ein multiplikatives inverses Element $a^{-1} (= \frac{1}{a})$ mit $a \cdot a^{-1} = a^{-1} \cdot a = 1$ heißt R Körper.

Beispiel:

$(\mathbb{N}, +, \cdot)$ ist kein Ring (es fehlen die additiven inversen Elemente)

$(\mathbb{Z}, +, \cdot)$ ist ein Ring, aber kein Körper (es fehlen die multiplikativen inversen Elemente)

$(\mathbb{Q}, +, \cdot)$ ist ein Körper

$(\mathbb{R}, +, \cdot)$ ist ein Körper

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

- 209 -

$(\mathbb{Z}, +, \cdot) \triangleq$ Ring

Definition: Eine Menge R zusammen mit zwei Verknüpfungen $+ : R \times R \rightarrow R, (a, b) \mapsto a + b, \cdot : R \times R \rightarrow R, (a, b) \mapsto a \cdot b$ heißt (kommutativer) Ring (mit Eins), wenn folgendes gilt:

1. $a + b = b + a$
 $a \cdot b = b \cdot a$

Kommutativität

2. $a + (b + c) = (a + b) + c$
 $a \cdot (b \cdot c) = (a \cdot b) \cdot c$

Assoziativität

3. $a(b + c) = ab + ac$

Distributivität

4. Existenz neutraler Elemente

- additives neutrales Element

es existiert ein Element $0 \in R$ mit $a + 0 = 0 + a = a$ für alle $a \in R$

- 208 -

Beispiele:

1. $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z} = \{\bar{0}, \bar{1}\}$

$$\bar{0} + \bar{1} = \overline{0 + 1} = \bar{1}$$

$$\bar{1} + \bar{1} = \overline{1 + 1} = \bar{2} = \bar{0}$$

2. $\mathbb{Z}/12\mathbb{Z} = \{\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}, \bar{3}, \dots, \bar{11}\}$

$$\bar{2} + \bar{3} = \overline{2 + 3} = \bar{5}$$

$$\bar{2} + \bar{11} = \overline{2 + 11} = \bar{13} = \bar{1}$$

$$\bar{4} + \bar{10} = \overline{4 + 10} = \bar{14} = \bar{2}$$

- 210 -

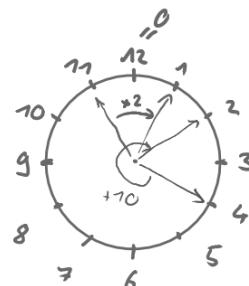


Abbildung 1.2. – «Zeigerarithmetik» Uhr

in $\mathbb{Z}/12\mathbb{Z}$ gibt es sogenannte Nullteiler (in \mathbb{Z} gibt es diese nicht)

$$\bar{3} \cdot \bar{4} = \bar{3} \cdot \bar{4} = \bar{12} = \bar{0} \quad (\bar{3} \text{ und } \bar{4} \text{ sind Nullteiler})$$

$\bar{3} \neq \bar{0}$ und $\bar{4} \neq \bar{0}$, jedoch ist das Produkt $\bar{3} \cdot \bar{4}$ gleich $\bar{0}$ (Vorsicht!)

d.h. aus $\bar{a} \cdot \bar{b} = \bar{0}$ folgt i.a. nicht $\bar{a} = 0$ oder $\bar{b} = 0$

- 211 -

aus linearer Darstellung des ggT folgt $sa + tp = 1$
für gewisse $s, t \in \mathbb{Z}$.

Bildet man die Restklassen, so folgt

$$\begin{aligned} \overline{sa + tp} &= \bar{1} \\ \overline{s} \cdot \bar{a} + \bar{t} \cdot \underbrace{\bar{p}}_{\bar{0}} &= \bar{1} \\ \overline{s} \cdot \bar{a} &= \bar{1} \end{aligned}$$

d.h. $\bar{s} = \bar{a}^{-1}$

Beispiele:

$$1. \mathbb{Z}/3\mathbb{Z} = \{\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}\}$$

- 213 -

Satz:

Für jede Primzahl p ist $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ ein Körper er heißt endlicher Körper (oder Galoiskörper) mit p Elementen und wird mit \mathbb{F}_p (oder $GF(p)$) bezeichnet.

Bemerkung: allgemein gibt es genau zu jeder Primzahlpotenz p^n genau einen endlichen Körper $GF(p^n)$ mit p^n Elementen ($GF(p^n) \neq \mathbb{Z}/p^n\mathbb{Z}$ für $n > 1$)

Bemerkung: In $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z} = \{\bar{0}, \bar{1}, \dots, \bar{p-1}\}$ gibt es zu $\bar{1}, \bar{2}, \dots, \bar{p-1}$ jeweils ein multiplikatives Inverses; diese erhält man mithilfe des erweiterten Euklidischen Algorithmus.

Satz:

Mithilfe des erweiterten Euklidischen Algorithmus findet man zu $\bar{a} \in \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}, \bar{a} \neq \bar{0}$ ganze Zahlen $s, t \in \mathbb{Z}$ mit

$$sa + tp = 1.$$

Dann ist \bar{s} das multiplikative Inverse zu \bar{a} , d.h. $\bar{s} = \bar{a}^{-1}$

Beweis: Da $\bar{a} \neq \bar{0}$ gilt, ist a durch p nicht teilbar

d.h. die Primzahl p kommt in der Primfaktorisierung von a nicht vor $\Rightarrow \text{ggT}(a, p) = 1$

- 212 -

$$\bar{1} \cdot \bar{1} = \bar{1} \cdot \bar{1} = \bar{1} \Rightarrow \bar{1}^{-1} = \bar{1}$$

$$\bar{2} \cdot \bar{2} = \bar{2} \cdot \bar{2} = \bar{4} = \bar{1} \Rightarrow \bar{2}^{-1} = \bar{2}$$

$$2. \mathbb{Z}/5\mathbb{Z} = \{\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}, \bar{3}, \bar{4}\}$$

$$\bar{1}^{-1} = \bar{1}$$

$$\bar{2} \cdot \bar{3} = \bar{2} \cdot \bar{3} = \bar{6} = \bar{1} \Rightarrow \bar{2}^{-1} = \bar{3}$$

$$\bar{4} \cdot \bar{4} = \bar{4} \cdot \bar{4} = \bar{16} = \bar{1} \Rightarrow \bar{4}^{-1} = \bar{4}$$

$$3. \mathbb{Z}/17\mathbb{Z} = \{\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}, \dots, \bar{16}\}$$

Bestimme das multiplikative Inverse von $\bar{15}$ (in $\mathbb{Z}/17\mathbb{Z}$)

- 214 -

$$\text{ggT}(17, 15) = 1 \xrightarrow{\text{erw. Eukl. Alg.}} s \cdot 15 + t \cdot 17 = 1; \bar{s} = \overline{15}^{-1}$$

$$\begin{aligned} 17 &= 1 \cdot 15 + 2 & \Rightarrow 1 = 15 - 7 \cdot (17 - 1 \cdot 15) = -7 \cdot 17 + 8 \cdot 15 \\ 15 &= 7 \cdot 2 + 1 \text{ ggT} & \Rightarrow 1 = 15 - 7 \cdot 2 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow 8 \cdot 15 - 7 \cdot 17 = 1 \text{ (lineare Darstellung des ggT)} \quad \bar{8} = \overline{15}^{-1} \quad \text{Probe: } \overline{8 \cdot 15} = \overline{120} = \overline{7 \cdot 17 + 1} = \overline{1}$$

4. $\mathbb{Z}/1013\mathbb{Z} = \{\overline{0}, \overline{1}, \overline{2}, \dots, \overline{1012}\}$

Bestimme das multiplikative Inverse von $\overline{1000}$ (in $\mathbb{Z}/1013\mathbb{Z}$)

- 215 -

1.4. Stellenwertsysteme

Stellenwertsystem = Zahlensystem, bei dem Zahlen durch eine Folge von Symbolen (Ziffern) dargestellt werden und die Wertigkeit eines Symbols auch von seiner Position (=Stelle) in der Folge abhängt.

b-adische Zahlensysteme sind spezielle Stellenwertsysteme ($b \in \mathbb{N}, b \geq 2$)

- b Ziffern: $0, 1, 2, \dots, 9, A, B, C, D, \dots$ (b -adische Ziffern)
- Wertigkeit der i -ten Ziffer an der j -ten Stelle (von rechts nach links gezählt) ist gleich $(i-1) \cdot b^{j-1}$ Wert der reinen Ziffer Gewicht der j -ten Stelle

- 217 -

$$\begin{aligned} 1013 &= 7 \cdot 1000 + 13 & 7 = -7 \cdot 1000 + 77(1013 - 7 \cdot 1000) = 77 \cdot 1013 - 77 \cdot 7000 \\ 1000 &= 76 \cdot 13 + 12 & 7 = 13 - 7 \cdot (1000 - 76 \cdot 13) = -7 \cdot 1000 + 27 \cdot 13 \\ 13 &= 1 \cdot 12 + 1 & 1 = 13 - 7 \cdot 12 \\ &\uparrow & & \uparrow \\ & \text{ggT} & & \text{ggT} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \overline{1000}^{-1} = \overline{-78} = \overline{-78} + \overline{0} = \overline{-78 + 1013} = \overline{935}$$

Probe: $\overline{935} \cdot \overline{1000} = \overline{935000} = \overline{923 \cdot 1013 + 1} = \overline{1}$

Abbildung 1.3.

- 216 -

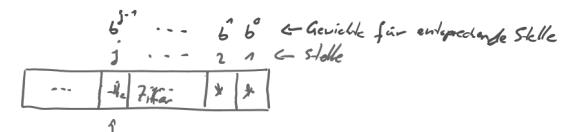


Abbildung 1.4.

Sei $b \in \mathbb{N}, b \geq 2$. Dann besitzt jede ganze Zahl $n \geq 1$ eine eindeutige Darstellung in der Form

$$(a_r a_{r-1} \dots a_0)_b$$

Satz: mit b -adischen Ziffern $a_0, \dots, a_r (a_r \neq 0)$; sie heißt b -adische Darstellung von n . Ihr Wert berechnet sich durch

$$n = \sum_{i=0}^r a_i \cdot b^i \quad a_i: \text{Wert der reinen Ziffer}$$

- 218 -

Beispiel:

1. Dualsystem (2-adisch)

Ziffern: 0, 1

$$\begin{aligned} (1011)_2 &= 1 \cdot 2^0 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^3 \\ &= 1 + 2 + 8 = \underline{\underline{11}} \end{aligned}$$

Abbildung 1.5.

2. Oktalsystem (8-adisch)

Ziffern: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7

«OCT 31 = DEC 25» (Joke)
Halloween = Weihnachten

- 219 -

$$(1A)_{16} = 1 \cdot 16^0 + 1 \cdot 16^1 = 26$$

$$(A1)_{16} = 1 \cdot 16^0 + 7 \cdot 16^1 = 167$$

$$(FF)_{16} = 255$$

Abbildung 1.8.

$$\begin{aligned} (31)_8 &= 7 \cdot 8^0 + 3 \cdot 8^1 \\ &= 7 + 24 = \underline{\underline{25}} \end{aligned}$$

Abbildung 1.6.

3. Dezimalsystem (10-adisch)

Ziffern: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9

$$(328)_{10} = 8 \cdot 10^0 + 2 \cdot 10^1 + 3 \cdot 10^2 = 328$$

Abbildung 1.7.

4. Hexadezimalsystem (16-adisch)

Ziffern: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E, F

- 220 -

1.4.1. Umrechnen Dezimaldarstellung in b-adische Darstellung

Fortlaufende Division durch b (mit Rest) liefert von rechts nach links die Ziffern der b -adischen Darstellung (aus den Resten der Division).

$$n = q_1 \cdot b + r_1 \quad 0 \leq r_1 < b$$

$$q_1 = q_2 \cdot b + r_2 \quad 0 \leq r_2 < b \quad q_1 \neq 0$$

$$q_2 = q_3 \cdot b + r_3 \quad 0 \leq r_3 < b \quad q_2 \neq 0$$

⋮

$$q_{s-2} = q_{s-1} \cdot b + r_{s-1} \quad 0 \leq r_{s-1} < b \quad q_{s-1} \neq 0$$

$$q_{s-1} = q_s \cdot b + r_s \quad 0 < r_s < b \quad q_s = 0$$

$$n \triangleq (r_s \dots r_1)_b$$

- 222 -

Algorithmus terminiert da

$$q_1 > q_2 > \dots > q_{s-1} > q_s = 0$$

Probe: $1 + 2 + 4 + 8 + 16 + 256 = 287$

2. $287 \rightarrow 8\text{-adisch}$

$$287 = 35 \cdot 8 + 7$$

$$35 = 4 \cdot 8 + 3$$

$$4 = 0 \cdot 8 + 4$$

$$\Rightarrow 287 = (437)_8$$

3. $287 \rightarrow 16\text{-adisch}$

- 223 -

- 225 -

Beispiele:

1. $287 \rightarrow 2\text{-adisch}$

$$287 = 143 \cdot 2 + 1$$

$$143 = 71 \cdot 2 + 1$$

$$71 = 35 \cdot 2 + 1$$

$$35 = 17 \cdot 2 + 1$$

$$17 = 8 \cdot 2 + 1$$

$$8 = 4 \cdot 2 + 0$$

$$4 = 2 \cdot 2 + 0$$

$$2 = 1 \cdot 2 + 0$$

$$1 = 0 \cdot 2 + 1$$

$$\Rightarrow 287 = (100011111)_2$$

$$287 = 17 \cdot 16 + 15$$

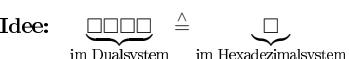
$$17 = 1 \cdot 16 + 1$$

$$1 = 0 \cdot 16 + 1$$

$$\Rightarrow 287 = (11F)_{16}$$

Bemerkung: In der Regel muss man/sollte man bei Umrechnungen von einem Zahlensystem in ein anderes den Weg über das Dezimalsystem wählen.

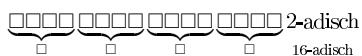
Ausnahme: 2-adisch \leftrightarrow 16-adisch

Idee: 

- 224 -

- 226 -

Zerlege (von rechts beginnend) die Dualzahl in Gruppen von jeweils 4 benachbarten Bits und rechne jeder 4er Gruppe in eine Hexadezimalziffer um.



Erzeuge aus jeder Ziffer aus dem Hexadezimalsystem ein 4-Bit-Muster und füge diese zu einer Dualzahl zusammen. Streiche führende Nullen.

- 227 -

- 229 -

2. Gleichungen und Ungleichungen

2.1. Definitionen

- Term (induktive Definition)

1. Variablen und Zahlen (=Konstanten) sind Terme (atomare Terme)
2. Sind T_1 und T_2 Terme, so sind $T_1 + T_2$, $T_1 - T_2$, $T_1 \cdot T_2$, $T_1 : T_2$, $\frac{T_1}{T_2}$, (T_1) Terme
3. Sind T_1, \dots, T_r Terme und ist f ein r -stelliges Funktionszeichen, so ist auch

$f(T_1, \dots, T_r)$ ein Term

4. Keine weiteren Zeichenketten sind Terme

Beispiel: $5, x_1, x_1 + x_2, \sin(5x_1 + x_2 - x_3), \sqrt{x_1^2 + x_2^2}$

Bezeichnung: Sind die Variablen eines Terms T in der Menge $\{x_1, \dots, x_n\}$ enthalten, so schreiben wir $T(x_1, \dots, x_n)$

- Äquivalenz zweier Terme

Zwei Terme $T_1(x_1, \dots, x_n)$ und $T_2(x_1, \dots, x_n)$ heißen äquivalent über einer Grundmenge $\mathbb{G} \subseteq \mathbb{R}^n$ (bzw. $\mathbb{G} \subseteq \mathbb{C}^n$) $T_1(a_1, \dots, a_n) = T_2(a_1, \dots, a_n)$ für alle $(a_1, \dots, a_n) \in \mathbb{G}$ gilt; i.Z. $T_1(x_1, \dots, x_n) \equiv_{\mathbb{G}} T_2(x_1, \dots, x_n)$ bzw. (unpräziser formuliert) $T_1(x_1, \dots, x_n) = T_2(x_1, \dots, x_n)$ (über \mathbb{G})

Beispiele:

1. $x^2 + 2x + 1 = (x + 1)^2$ über $\mathbb{G} = \mathbb{R}$
2. $\frac{x^2 + x}{2x} = \frac{x + 1}{2}$ über $\mathbb{G} = \mathbb{R} \setminus \{0\} = \{x \neq 0\}$
3. $\frac{x_1^2 + x_2}{x_1} = x_1 \cdot x_2$ über $\mathbb{G} = (\mathbb{R} \setminus \{0\}) \times \mathbb{R} \subseteq \mathbb{R}^2 = \{(x_1, x_2) \mid x_1 \neq 0\} = \{x \neq 0\}$
4. $\sqrt{x^2} = |x|$ über $\mathbb{G} = \mathbb{R}_0^+ = \{x \geq 0\}$
5. $e^{2 \ln(x)} = x^2$ über $\mathbb{G} = \mathbb{R}^+ = \{x > 0\}$

- Gleichung/Ungleichung

Eine Gleichung (bzw. Ungleichung) in den unbestimmten x_1, \dots, x_n über einer Grundmenge $\mathbb{G} \subseteq \mathbb{R}^n$ (oder $\mathbb{G} \subseteq \mathbb{C}^n$) ist ein formaler Ausdruck der Form $T_1(x_1, \dots, x_n) \square T_2(x_1, \dots, x_n)$ wobei $T_1(x_1, \dots, x_n)$ und $T_2(x_1, \dots, x_n)$ Terme sind und \square für $=$ (bzw. $\leq, \geq, <, >$) steht.

Eine Lösung obiger Gleichung (bzw. Ungleichung) ist ein n -Tupel $(a_1, \dots, a_n) \in \mathbb{G}$, so dass $T_1(a_1, \dots, a_n) \square T_2(a_1, \dots, a_n)$ eine wahre Aussage ist; mit $\mathbb{L} = \{(a_1, \dots, a_n) \in \mathbb{G} \mid (a_1, \dots, a_n) \text{ ist Lösung}\} \subseteq \mathbb{G}$ bezeichnen wir die Lösungsmenge der Gleichung (bzw. Ungleichung).

Bemerkung: \mathbb{L} hängt wesentlich von der Wahl der Unbestimmten x_1, x_2, \dots, x_n und der Grundmenge \mathbb{G} ab.

- 231 -

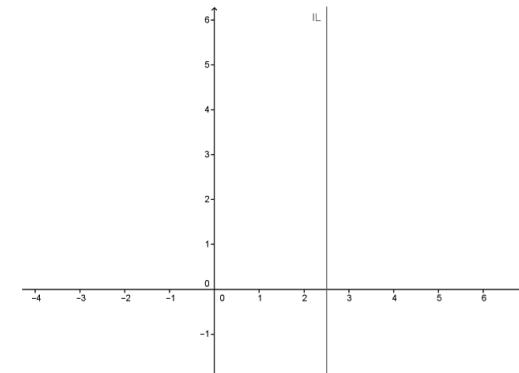


Abbildung 2.1.

- 233 -

Beispiele:

1. Gleichung $2x_1 = 5$ in x_1 über $\mathbb{G} = \mathbb{Z}$
 $\Rightarrow \mathbb{L} = \emptyset$
2. Gleichung $2x_1 = 5$ in x_1 über $\mathbb{G} = \mathbb{Q}$
 $\Rightarrow \mathbb{L} = \{\frac{5}{2}\}$
3. Gleichung $2x_1 = 5$ in x_1, x_2 über $\mathbb{G} = \mathbb{R}^2$
 $\Rightarrow \mathbb{L} = \{(x_1, x_2) \mid x_1 = \frac{5}{2}, x_2 \in \mathbb{R}\} \subseteq \mathbb{R}^2$

Definition: Zwei Gleichungen φ_1 und φ_2 in den Unbestimmten x_1, \dots, x_n über einer (gemeinsamen) Grundmenge \mathbb{G} heißen äquivalent, wenn sie übereinstimmende Lösungsmenge besitzen; i.Z. $\varphi_1 \Leftrightarrow \varphi_2$

- 232 -

- Äquivalenzumformungen

Äquivalenzumformung	Gleichung $T_1 = T_2$	Ungleichung $T_1 \leq T_2$ (analog für $T_1 \geq T_2, T_1 < T_2, T_1 > T_2$)
Vertauschen beider Seiten	$T_1 = T_2$ $\Leftrightarrow T_2 = T_1$	$T_1 \leq T_2$ $\Leftrightarrow T_2 \geq T_1$
Seite(n) durch (über \mathbb{G}) äquivalente Terme ersetzen ($T'_1 = T_1$ über \mathbb{G} $T'_2 = T_2$ über \mathbb{G})	$T_1 = T_2$ $\Leftrightarrow T'_1 = T'_2$	$T_1 \leq T_2$ $\Leftrightarrow T'_1 \leq T'_2$

- 234 -

Addition bzw. Subtraktion mit einem Term T

$$\begin{aligned} T_1 = T_2 &| \pm T \\ \Leftrightarrow T_1 \pm T &= T_2 \pm T \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_1 \leq T_2 &| \pm T \\ \Leftrightarrow T_1 \pm T &\leq T_2 \pm T \end{aligned}$$

Multiplikation mit bzw. Division durch eine Zahl $a \neq 0$

$$\begin{aligned} T_1 = T_2 &| \cdot : a \\ \Leftrightarrow \frac{T_1}{a} &= \frac{T_2}{a} \end{aligned}$$

$$a > 0$$

$$\begin{aligned} T_1 &\leq T_2 | \cdot : a \\ \Leftrightarrow T_1 \cdot a &\leq T_2 \cdot a \\ \Leftrightarrow \frac{T_1}{a} &\leq \frac{T_2}{a} \end{aligned}$$

$$a < 0$$

$$\begin{aligned} T_1 &\leq T_2 | \cdot : a \\ \Leftrightarrow T_1 \cdot a &\geq T_2 \cdot a \\ \Leftrightarrow \frac{T_1}{a} &\geq \frac{T_2}{a} \end{aligned}$$

- 235 -

- Umformungen, die i.a. keine Äquivalenzumformungen sind

1. Multiplikation mit bzw. Division durch einen Term

Da eine Division durch T einer Multiplikation mit $\frac{1}{T}$ entspricht, betrachten wir im folgenden nur die Multiplikation mit einem Term T .

Uneingeschränkter Gebrauch der Multiplikation mit einem Term kann zu Widersprüchen führen, wie z.B. $x - 1 = 0 | \cdot \frac{x-2}{x-1} (= T) \Leftrightarrow x - 2 = 0 \Rightarrow$ Vorsicht!!!

Gleichung $T_1 = T_2$ über \mathbb{G}

will man die Gleichung mit einem Term T multiplizieren, so ist dies nur dann eine Äquivalenzumformung, wenn T auf \mathbb{G} definiert (d.h. $\mathbb{G} \subseteq \mathbb{D}_T$ = Definitionsmenge von T) und $T \neq 0$ auf \mathbb{G} gilt.

Ansonsten sind Fallunterscheidungen nötig, bei der die Grundmenge \mathbb{G} unterschiedlich eingeschränkt wird.

$T_1 = T_2$ (über \mathbb{G}) (mit T multipliziert)

- 236 -

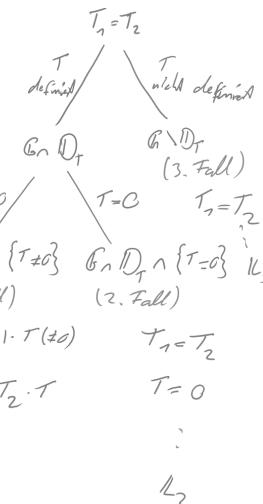


Abbildung 2.2.

- 237 -

Für die Lösungsmenge \mathbb{L} gilt:

$$\mathbb{L} = \mathbb{L}_1 \cup \mathbb{L}_2 \cup \mathbb{L}_3$$

Beispiele:

$$\begin{aligned} \text{a)} \quad x^2 &= 3x \text{ über } \mathbb{G} = \mathbb{R} \\ \text{mit } T &= \frac{1}{x} \text{ multiplizieren; } \mathbb{D}_T = \{x \neq 0\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{1.Fall: } \mathbb{G}_1 &= \mathbb{G} \cap \mathbb{D}_T \cap \{T \neq 0\} \\ &= \mathbb{R} \cap \{x \neq 0\} \cap \mathbb{R} \\ &= \{x \neq 0\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x^2 &= 3x | \cdot \frac{1}{x} \quad (\neq 0) \\ \Leftrightarrow x &= 3 \in \mathbb{G}_1 \\ \Rightarrow \mathbb{L}_1 &= \{3\} \end{aligned}$$

- 238 -

$$\begin{aligned} \underline{2. Fall: } \quad & \mathbb{G}_2 = \mathbb{G} \cap \mathbb{D}_T \cap \{T = 0\} \\ &= \mathbb{R} \cap \{x \neq 0\} \cap \emptyset \\ &= \emptyset \\ \Rightarrow & \mathbb{L}_2 = \emptyset \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{3. Fall: } \quad & \mathbb{G}_3 = \mathbb{G} \setminus \mathbb{D}_T \\ &= \mathbb{R} \setminus \{x \neq 0\} \\ &= \{x = 0\} \end{aligned}$$

$$x^2 = 3x$$

$x = 0$ in obige Gleichung eingesetzt $\Rightarrow 0 = 0$

\Rightarrow jedes Element aus \mathbb{G}_3 ist Lösung

$$\Rightarrow \mathbb{L}_3 = \{0\}$$

- 239 -

$$(x - 1 = 0 \mid \frac{x-2}{x-1} \Leftrightarrow x - 2 = 0, \text{ uneingeschränkter Gebrauch} \rightarrow \text{Widersprüche})$$

$$T = \frac{x-2}{x-1} \quad \mathbb{D}_T = \mathbb{R} \setminus \{1\} = \{x \neq 1\}$$

$$\begin{aligned} \underline{1. Fall: } \quad & \mathbb{G}_1 = \mathbb{G} \cap \mathbb{D}_T \cap \{T \neq 0\} \\ &= \mathbb{R} \cap \{x \neq 1\} \cap \{x \neq 2\} \\ &= \{x \neq 1, x \neq 2\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & x - 1 = 0 \mid \cdot \frac{x-2}{x-1} \quad (\neq 0) \\ \Leftrightarrow & x - 2 = 0 \\ \Leftrightarrow & x = 2 \notin \mathbb{G}_1 \\ \Rightarrow & \mathbb{L}_1 = \emptyset \end{aligned}$$

- 241 -

insgesamt:

$$\begin{aligned} \Rightarrow \mathbb{L} &= \mathbb{L}_1 \cup \mathbb{L}_2 \cup \mathbb{L}_3 \\ &= \{0; 3\} \end{aligned}$$

Bemerkung: Versuche Multiplikation mit bzw. Division durch einen Term zu vermeiden, z.B.

$$\begin{aligned} x^2 &= 3x \\ \Leftrightarrow x^2 - 3x &= 0 \\ \Leftrightarrow x(x-3) &= 0 \\ \Leftrightarrow x = 0 \vee x-3 &= 0 \\ \mathbb{L} &= \{0; 3\} \end{aligned}$$

b) $x - 1 = 0$ über $\mathbb{G} = \mathbb{R}$

Wir wollen unbedingt die Gleichung mit $\frac{x-2}{x-1}$ multiplizieren

- 240 -

$$\begin{aligned} \underline{2. Fall: } \quad & \mathbb{G}_2 = \mathbb{G} \cap \mathbb{D}_T \cap \{T = 0\} \\ &= \mathbb{R} \cap \{x \neq 1\} \cap \{x = 2\} \\ &= \{x = 2\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & x - 1 = 0 \\ & x = 2 \quad !!! \\ \Rightarrow & \mathbb{L}_2 = \emptyset \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{3. Fall: } \quad & \mathbb{G}_3 = \mathbb{G} \setminus \mathbb{D}_T \\ &= \mathbb{R} \setminus \{x \neq 1\} \\ &= \{x = 1\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & x - 1 = 0 \\ & x = 1 \text{ in obige Gleichung eingesetzt} \Rightarrow 0 = 0 \\ \Rightarrow & \text{jedes Element aus } \mathbb{G}_3 \text{ ist Lösung} \\ \Rightarrow & \mathbb{L}_3 = \{1\} \end{aligned}$$

- 242 -

insgesamt:

$$\Rightarrow \mathbb{L} = \mathbb{L}_1 \cup \mathbb{L}_2 \cup \mathbb{L}_3 \\ = \{1\}$$

- 243 -

Ungleichung $T_1 \leq T_2$ über \mathbb{G}

will man die Ungleichung mit einem Term T multiplizieren, so ist dies nur dann eine Äquivalenzumformung, wenn T auf \mathbb{G} definiert (d.h. $\mathbb{G} \subseteq \mathbb{D}_T$ = Definitionsmenge von T) und $T \neq 0$ auf \mathbb{G} gilt.

Ansonsten sind Fallunterscheidungen nötig, bei der die Grundmenge \mathbb{G} unterschiedlich eingeschränkt wird.

$T_1 \leq T_2$ (über \mathbb{G}) (mit T multipliziert)

- 244 -

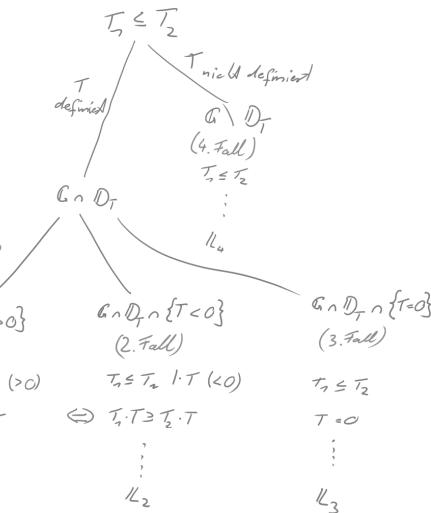


Abbildung 2.3.

- 245 -

Für die Lösungsmenge \mathbb{L} gilt:

$$\mathbb{L} = \mathbb{L}_1 \cup \mathbb{L}_2 \cup \mathbb{L}_3 \cup \mathbb{L}_4$$

Beispiele:

a) $\frac{x^2 - 3x + 2}{x-1} \geq 0$ über $\mathbb{G} = \mathbb{R} \setminus \{1\} = \{x \neq 1\}$
mit $T = x - 1$ multiplizieren; $\mathbb{D}_T = \mathbb{R}$

- 246 -

1.Fall: $\mathbb{G}_1 = \mathbb{G} \cap \mathbb{D}_T \cap \{T > 0\}$
 $= \{x \neq 1\} \cap \mathbb{R} \cap \{x > 1\}$
 $= \{x > 1\}$

$$\frac{x^2 - 3x + 2}{x - 1} \geq 0 \mid \cdot(x - 1) \quad (> 0)$$
 $\Leftrightarrow x^2 - 3x + 2 \geq 0$

Nullstelle von $x^2 - 3x + 2$

$$x_{1/2} = \frac{3 \pm \sqrt{9 - 4 \cdot 2}}{2}$$
 $= \frac{3 \pm 1}{2}$

$x_1 = 1, x_2 = 2$

$\Rightarrow \mathbb{L}_1 = \{x \geq 2\}$

- 247 -

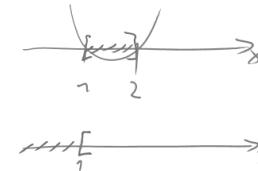


Abbildung 2.5.

$\Rightarrow \mathbb{L}_2 = \emptyset$

3.Fall: $\mathbb{G}_3 = \mathbb{G} \cap \mathbb{D}_T \cap \{T = 0\}$
 $= \{x \neq 1\} \cap \mathbb{R} \cap \{x = 1\}$
 $= \emptyset$

$\Rightarrow \mathbb{L}_3 = \emptyset$

- 249 -

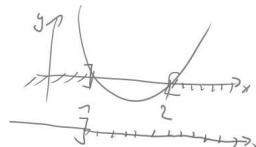


Abbildung 2.4.

2.Fall: $\mathbb{G}_1 = \mathbb{G} \cap \mathbb{D}_T \cap \{T < 0\}$
 $= \{x \neq 1\} \cap \mathbb{R} \cap \{x < 1\}$
 $= \{x < 1\}$

$$\frac{x^2 - 3x + 2}{x - 1} \geq 0 \mid \cdot(x - 1) \quad (< 0)$$
 $\Leftrightarrow x^2 - 3x + 2 \leq 0$

- 248 -

4.Fall: $\mathbb{G}_4 = \mathbb{G} \setminus \mathbb{D}_T$
 $= \{x \neq 1\} \setminus \mathbb{R}$
 $= \emptyset$

$\Rightarrow \mathbb{L}_4 = \emptyset$

insgesamt:

$$\Rightarrow \mathbb{L} = \mathbb{L}_1 \cup \mathbb{L}_2 \cup \mathbb{L}_3 \cup \mathbb{L}_4$$
 $= \{x \geq 2\}$

- 250 -

Bemerkung:

$$\begin{aligned} x^2 - 3x + 2 &= (x-1)(x-2) \\ \frac{x^2 - 3x + 2}{x-1} &\geq 0 \quad (x \neq 1) \\ \Leftrightarrow \frac{(x-1)(x-2)}{1 \cdot (x-1)} &\geq 0 \\ \Leftrightarrow x-2 &\geq 0 \\ \Leftrightarrow x &\geq 2 \end{aligned}$$

2. Anwenden einer Funktion $f(x)$ auf beiden Seiten der Gleichung/Ungleichung

Gleichung $T_1 = T_2$ über \mathbb{G}

Will man auf beiden Seiten der Gleichung eine Funktion anwenden $f(x)$, so ist dies nur dann eine Äquivalenzumformung, wenn $f(x)$ auf $T_1(\mathbb{G}) \cup T_2(\mathbb{G})$ (d.h. auf der linken und rechten Seite) definiert und injektiv (z.B. streng monoton steigend/fallend) ist.

- 251 -

Ungleichung $T_1 \leq T_2$ über \mathbb{G} (bzw. $T_1 < T_2$ über \mathbb{G})

Ist $f(x)$ auf $T_1(\mathbb{G}) \cup T_2(\mathbb{G})$ definiert und

- streng monoton steigend, so rechne wie folgt

$$T_1 \leq T_2 \mid f(\dots)$$

$$\Leftrightarrow f(T_1) \leq f(T_2)$$

bzw.

$$T_1 < T_2 \mid f(\dots)$$

$$\Leftrightarrow f(T_1) < f(T_2)$$

- streng monoton fallend, so rechne wie folgt

- 253 -

$T(\mathbb{G}) = \{T(a_1, \dots, a_n) \mid (a_1, \dots, a_n) \in \mathbb{G}\}$ Bildmenge von T

Ist $f(x)$ auf $T_1(\mathbb{G}) \cup T_2(\mathbb{G})$ definiert, aber nicht injektiv, so muss am Ende der Rechnung eine Probe durchgeführt werden.

$$\begin{aligned} T_1 &= T_2 \mid f(\dots) \\ \Rightarrow f(T_1) &= f(T_2) \dots \Rightarrow \mathbb{L} + \text{Probe!} \end{aligned}$$

Pfeil nur in eine Richtung da keine Äquivalenzumformung

Beispiel: $\sqrt{x}, \ln x, e^x$ sind streng monoton steigend

Beachte: \sqrt{x} ist nur für $x \geq 0$ und $\ln x$ ist nur für $x > 0$ definiert. x^2 ist für $x \geq 0$ streng monoton steigend und für $x \leq 0$ streng monoton fallend.

- 252 -

$$T_1 \leq T_2 \mid f(\dots)$$

$$\Leftrightarrow f(T_1) \geq f(T_2)$$

bzw.

$$T_1 < T_2 \mid f(\dots)$$

$$\Leftrightarrow f(T_1) > f(T_2)$$

- 254 -

Beispiel: $\underbrace{x^2}_{\geq 0} > \underbrace{4}_{\geq 0}$

\sqrt{x} ist auf $x \geq 0$ definiert und streng monoton steigend

$$\begin{aligned} x^2 &> 4 \mid \sqrt{\quad} \\ \Leftrightarrow \underbrace{\sqrt{x^2}}_{|x|} &> \sqrt{4} \\ \Leftrightarrow |x| &> 2 \\ \Leftrightarrow x &> 2 \vee x < -2 \end{aligned}$$

$\sqrt{x^2} = |x|$ $|x| =$ Abstand zur 0 auf dem Zahlenstrahl
 $\sqrt{x^2} = x$



Abbildung 2.6.

- 255 -

A) Lineare Gleichung/Ungleichung in einer Unbestimmten

Gleichung $a_1 x_1 = b$ in der Unbestimmten x_1 über $\mathbb{G} = \mathbb{R}$
 $(a_1 \neq 0)$

$$\begin{aligned} a_1 x_1 &= b \mid : a_1 \\ x_1 &= \frac{b}{a_1} \\ \Rightarrow \mathbb{L} &= \left\{ \frac{b}{a_1} \right\} \end{aligned}$$



Abbildung 2.7. – Punkt auf der Zahlengeraden

- 257 -

2.2. Lineare Gleichungen und Ungleichungen

Allgemeine Form:

$a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n = b$ Gleichung

$a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n \leq b$ Ungleichung (bzw. $\geq, <, >$)

(mindestens ein $a_i \neq 0$)Ist $a_i \neq 0$, so kann die Gleichung/Ungleichung nach x_i umgestellt werden. \Rightarrow explizite Form

$x_i = \frac{1}{a_i}(-a_1 x_1 - \dots - a_{i-1} x_{i-1} - a_{i+1} x_{i+1} - \dots - a_n x_n + b) \quad (*)$

bei Ungleichungen müssen die Fälle $a_i > 0$ und $a_i < 0$ unterschieden werden.In $(*)$ kann man $x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n$ als freie Parameter auffassen $\Rightarrow \infty$ -viele Lösungen \mathbb{L} ist eine sogenannte $(n-1)$ -dimensionale Untermannigfaltigkeit des \mathbb{R}^n .

- 256 -

Ungleichung $a_1 x_1 \leq b$ in der Unbestimmten x_1 über $\mathbb{G} = \mathbb{R}$
 $(a_1 \neq 0)$

$a_1 > 0$

$$\begin{aligned} a_1 x_1 &\leq b \mid : a_1 \quad (> 0) \\ x_1 &\leq \frac{b}{a_1} \\ \Rightarrow \mathbb{L} &= \left] -\infty; \frac{b}{a_1} \right] \end{aligned}$$

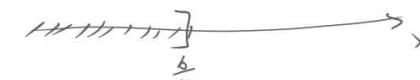


Abbildung 2.8.

- 258 -

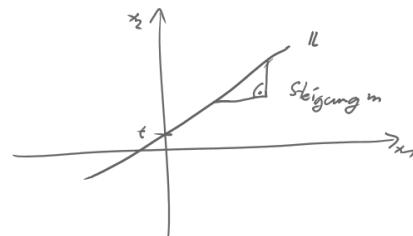


Abbildung 2.11. – Gerade mit Steigung $m = -\frac{a_1}{a_2}$ und x_2 -Abschnitt $t = \frac{b}{a_2}$

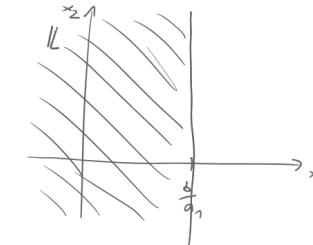


Abbildung 2.12. – \mathbb{L} ist eine sogenannte Halbebene

- 263 -

- 265 -

Ungleichung $a_1x_1 + a_2x_2 \leq b$ über $\mathbb{G} = \mathbb{R}^2$

$a_2 = 0$ Dann ist $a_1 \neq 0$

$a_1 > 0$

$$a_1x_1 \leq b \mid : a_1 \quad (> 0)$$

$$\Leftrightarrow x_1 \leq \frac{b}{a_1}$$

$$\Rightarrow \mathbb{L} = \{(x_1; x_2) \mid x_1 \leq \frac{b}{a_1}, x_2 \in \mathbb{R}\}$$

$a_1 < 0$

$$a_1x_1 \leq b \mid : a_1 \quad (> 0)$$

$$\Leftrightarrow x_1 \geq \frac{b}{a_1}$$

$$\Rightarrow \mathbb{L} = \{(x_1; x_2) \mid x_1 \geq \frac{b}{a_1}, x_2 \in \mathbb{R}\}$$

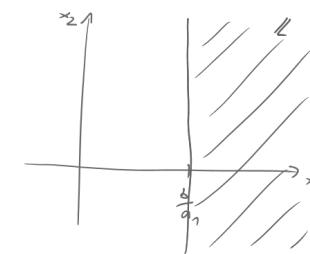


Abbildung 2.13. – \mathbb{L} ist eine sogenannte Halbebene

- 264 -

- 266 -

$$\begin{array}{l} a_2 \neq 0 \\ a_2 > 0 \end{array}$$

$$\begin{aligned} a_1x_1 + a_2x_2 &\leq b \mid -a_1x_1 \\ \Leftrightarrow a_2x_2 &\leq b - a_1x_1 \mid : a_2 \quad (> 0) \\ \Leftrightarrow x_2 &\leq -\frac{a_1}{a_2}x_1 + \frac{b}{a_2} \\ \Rightarrow \mathbb{L} &= \{(x_1; x_2) \mid x_2 \leq -\frac{a_1}{a_2}x_1 + \frac{b}{a_2}, x_1 \in \mathbb{R}\} \end{aligned}$$

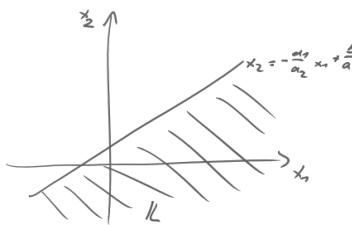


Abbildung 2.14. – untere Halbebene mit Rand

- 267 -

$$a_2 < 0$$

$$\begin{aligned} a_1x_1 + a_2x_2 &\leq b \mid -a_1x_1 \\ \Leftrightarrow a_2x_2 &\leq b - a_1x_1 \mid : a_2 \quad (< 0) \\ \Leftrightarrow x_2 &\geq -\frac{a_1}{a_2}x_1 + \frac{b}{a_2} \\ \Rightarrow \mathbb{L} &= \{(x_1; x_2) \mid x_2 \geq -\frac{a_1}{a_2}x_1 + \frac{b}{a_2}, x_1 \in \mathbb{R}\} \end{aligned}$$

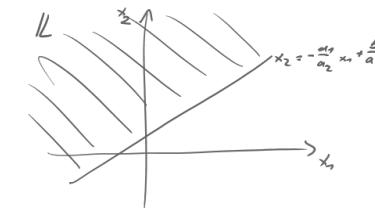


Abbildung 2.15. – obere Halbebene mit Rand

- 269 -

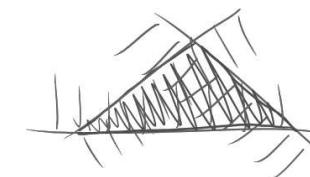
Bemerkung: Ungleichungssysteme

Abbildung 2.16.

- 268 -

- 270 -

C) Lineare Gleichungen und Ungleichungen in drei Unbestimmten

Gleichung $a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 = b$ über $\mathbb{G} = \mathbb{R}^3$

$(a_1 \neq 0 \vee a_2 \neq 0 \vee a_3 \neq 0)$

$a_3 = 0$

$$a_1x_1 + a_2x_2 = b$$

$$\Rightarrow \mathbb{L} = \{(x_1; x_2; x_3) \mid a_1x_1 + a_2x_2 = b, x_3 \in \mathbb{R}\}$$

$a_3 \neq 0$

$$a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 = b \mid -a_1x_1 - a_2x_2$$

$$\Leftrightarrow a_3x_3 = b - a_1x_1 - a_2x_2 \mid : a_3 \quad (\neq 0)$$

$$\Leftrightarrow \underbrace{x_3}_{\text{abhängig}} = -\frac{a_1}{a_3} \underbrace{x_1}_{\text{frei}} - \frac{a_2}{a_3} \underbrace{x_2}_{\text{frei}} + \frac{b}{a_3} \quad (\text{explizite Form})$$

wählbar wählbar

$$\Rightarrow \mathbb{L} = \{(x_1; x_2; x_3) \mid x_3 = -\frac{a_1}{a_3}x_1 - \frac{a_2}{a_3}x_2 + \frac{b}{a_3}, x_1 \in \mathbb{R}, x_2 \in \mathbb{R}\}$$

Ungleichung $a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 \leq b$ über $\mathbb{G} = \mathbb{R}^3$

Die Lösungsmenge \mathbb{L} ist ein sogenannter Halbraum der von der Ebene $a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 = b$ (halbseitig) begrenzt wird.

- 271 -

- 273 -

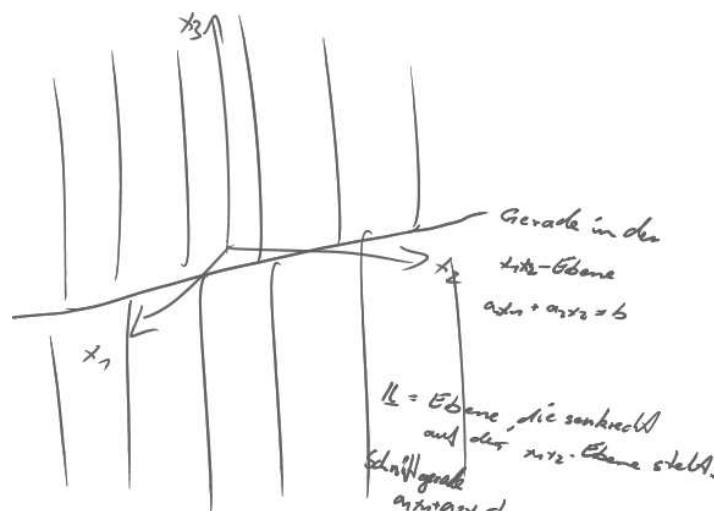


Abbildung 2.17.

- 272 -

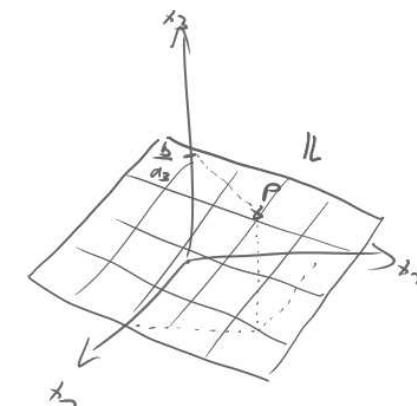


Abbildung 2.18.

- 274 -

2.3. Algebraische Gleichungen und Ungleichungen

2.3.1. Eine Unbestimmte x

Definition: Eine algebraische Gleichung/Ungleichung in der Unbestimmten x ist eine Gleichung/Ungleichung der Form

$$a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0 = 0 \quad (\text{bzw. } \geq, \leq, >, <)$$

mit $a_n \neq 0, a_0, \dots, a_n \in \mathbb{R}$ (oder \mathbb{C}).

n heißt Grad der algebraischen Gleichung/Ungleichung; der Term

$$P(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0$$

($a_n \neq 0$) heißt Polynom vom Grad n in der Unbestimmten x .

a_0, \dots, a_n heißen Koeffizienten des Polynoms; $a_n x^n$ Leitform und a_0 konstanter Term.

Algebraische Gleichungen/Ungleichungen (bzw. Polynome) vom Grad $n = 1, 2, 3, \dots$ heißen lineare, quadratische, kubische, ... Gleichungen/Ungleichungen (bzw. Polynome).

- 275 -

Quadratische Gleichung/Ungleichung

A) Quadratische Gleichung

$$\begin{aligned} a_2 x^2 + a_1 x + a_0 &= 0 & (a_2 \neq 0) \\ (ax^2 + bx + c) &= 0 \end{aligned}$$

Lösungsformel (für $ax^2 + bx + c = 0$)

$$x_{1/2} = \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2a}$$

$D = b^2 - 4ac$ heißt Diskriminante

$$\begin{aligned} D > 0 : \quad & \text{Zwei verschiedene (einfache) reelle Lösungen} \\ & x_1 \neq x_2, \quad x_1, x_2 \in \mathbb{R} \end{aligned}$$

- 276 -

$$\begin{aligned} D = 0 : \quad & \text{Eine (zweifache) reelle Lösungen} \\ & x_1 = x_2 \in \mathbb{R} \end{aligned}$$

Keine reelle Lösungen, aber zwei (einfache)

$$\begin{aligned} D < 0 : \quad & \text{konjugierte-komplexe-Lösungen} \\ & x_{1/2} = z_{1/2} = \frac{-b \pm \sqrt{|D|}}{2a} \end{aligned}$$

- 277 -

Geometrische Interpretation

Die Lösungen der quadratischen Gleichung sind bei den Nullstellen der Parabel $y = ax^2 + bx + c$; a heißt Öffnungsfaktor der Parabel.

$S(x_s, y_s)$ heißt Scheitel der Parabel.

$$\begin{aligned} \text{Es gibt } x_s &= -\frac{b}{2a} \\ y_s &= P(x_s) \text{ mit } P(x) = ax^2 + bx + c \end{aligned}$$

$$\text{Normalform: } P(x) = ax^2 + bx + c$$

$$\text{Scheitelform: } P(x) = a(x - x_s)^2 + y_s \quad S(x_s, y_s) \text{ Scheitel}$$

$$\text{Linearfaktorform: } P(x) = a(x - x_1)(x - x_2)$$

$$\text{mit } x_{1/2} = \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2a}$$

- 278 -

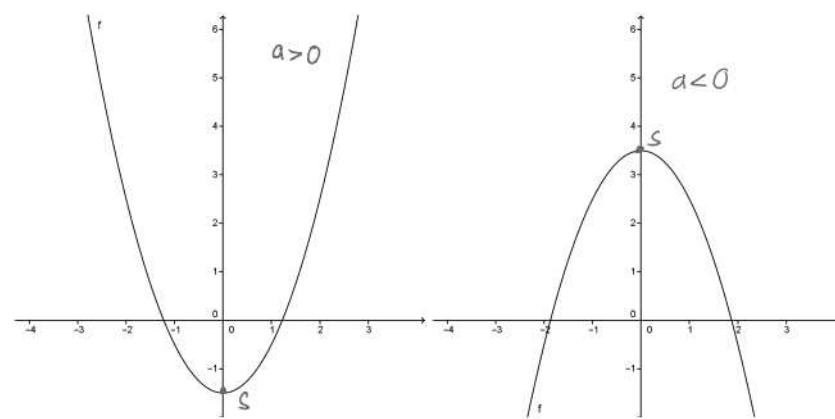


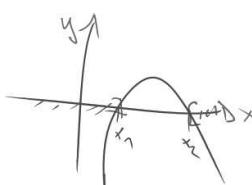
Abbildung 2.19.

Abbildung 2.20.

- 279 -

B) Quadratische Ungleichung

$$ax^2 + bx + c \leq 0 \quad (a \neq 0)$$

Abbildung 2.21. $- D > 0, \quad a < 0$

$$\begin{aligned} \mathbb{L} &= \{x \in \mathbb{R} \mid x \leq x_1 \vee x \geq x_2\} \\ &=]-\infty; x_1] \cup [x_2; \infty[\end{aligned}$$

- 280 -

2. Methode: Faktorisieren und Vorzeichentabelle (VZT)

$$ax^2 + bx + c = a(x - x_1)(x - x_2)$$

$$\text{mit } x_{1/2} = \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2a} \quad (\text{falls } D \geq 0)$$

Für $D < 0$ ist $ax^2 + bx + c$ (über \mathbb{R}) unzerlegbar und hat für alle $x \in \mathbb{R}$ ein konstantes Vorzeichen (= Vorzeichen von c)

Für $D = 0$: $x_1 = x_2$

$$ax^2 + bx + c = a \underbrace{(x - x_1)^2}_{\geq 0}$$

VZT:	$-\infty < x < x_1$	$x = x_1$	$x_1 < x < \infty$
Faktoren			
a	VZ	VZ	VZ
$(x - x_1)^2$	+	0	+
$f(x)$	VZ	0	VZ

Für $D > 0$: $x_1 < x_2$

- 281 -

$$ax^2 + bx + c = a(x - x_1)(x - x_2)$$

VZT:

VZT:	$-\infty < x < x_1$	$x = x_1$	$x_1 < x < x_2$	$x = x_2$	$x_2 < x < \infty$
Faktoren					
a	VZ	VZ	VZ	VZ	VZ
$x - x_1$	-	0	+	+	+
$x - x_2$	-	-	-	0	+
$f(x)$	VZ	0	VZ	0	VZ

- 282 -

Beispiele:

$$1. -2x^2 + 4x - 2 \geq 0$$

$$D = 16 - 4(-2)(-2) = 0$$

$$x_1 = x_2 = \frac{-b}{2a} = \frac{-4}{-4} = 1$$

$$\Rightarrow -2x^2 + 4x - 2 = -2(x - 1)^2$$

VZT:

Faktoren	$-\infty < x < 1$	$x = 1$	$1 < x < \infty$
-2	-	-	-
$(x - 1)^2$	+	0	+
$f(x)$	-	$\underbrace{0}_{\geq 0}$	-

$$\Rightarrow \mathbb{L} = \{1\}$$

$$2. -3x^2 + 6x - 2 \leq 0$$

- 283 -

$$\Rightarrow \mathbb{L} =] -\infty; 1 - \frac{1}{3}\sqrt{3}] \cup [1 + \frac{1}{3}\sqrt{3}; \infty[$$



Abbildung 2.22.

$$3. -x^2 + x - 1 > 0$$

$$D = 1 - 4(-1)(-1) = -3 < 0$$

$\Rightarrow -x^2 + x - 1$ (über \mathbb{R}) unzerlegbar

\Rightarrow konstantes VZ

$x = 0$ eingesetzt $\Rightarrow -x^2 + x - 1 < 0$ für alle $x \in \mathbb{R}$

$$\Rightarrow \mathbb{L} = \emptyset$$

- 285 -

$$D = 36 - 4(-3)(-2) = 12 > 0$$

$$\Rightarrow x_1 < x_2$$

$$x_{1/2} = \frac{-6 \pm \sqrt{12}}{-6} = \frac{-6 \pm 2\sqrt{3}}{-6} = 1 \pm \frac{1}{3}\sqrt{3}$$

$$\Rightarrow f(x) = -3(x - 1 + \frac{1}{3}\sqrt{3})(x - 1 - \frac{1}{3}\sqrt{3})$$

VZT:

Faktoren	$-\infty < x <$ $1 - \frac{1}{3}\sqrt{3}$	$x = 1 -$ $\frac{1}{3}\sqrt{3}$	$1 - \frac{1}{3}\sqrt{3} <$ $x < 1 + \frac{1}{3}\sqrt{3}$	$x = 1 +$ $\frac{1}{3}\sqrt{3}$	$1 + \frac{1}{3}\sqrt{3} <$ $x < \infty$
a	-	-	-	-	-
$x - 1 + \frac{1}{3}\sqrt{3}$	-	0	+	+	+
$x - 1 - \frac{1}{3}\sqrt{3}$	-	-	-	0	+
$f(x)$	$\underbrace{-}_{\leq 0}$	$\underbrace{0}_{\leq 0}$	+	$\underbrace{0}_{\leq 0}$	$\underbrace{-}_{\leq 0}$

- 284 -

3. Methode: Quadratische Ergänzung und nach x umstellen (direkte Methode)

Beispiel: $-3x^2 + 6x - 2 \leq 0$

Quadratische Ergänzung

$$\begin{aligned} -3x^2 + 6x &= -3(x^2 - 2x + 1^2 - 1^2) \\ a^2 - 2ab + b^2 &= (a - b)^2 \\ &= -3((x - 1)^2 - 1) \\ &= -3(x - 1)^2 + 3 \\ \Rightarrow -3x^2 + 6x - 2 &= -3(x - 1)^2 + 3 - 2 \\ &= -3(x - 1)^2 + 1 \end{aligned}$$

- 286 -

$$\begin{aligned} -3x^2 + 6x - 2 &\leq 0 \\ \Leftrightarrow -3(x-1)^2 + 1 &\leq 0 \mid -1 \\ -3(x-1)^2 &\leq -1 \mid :(-3) \\ \underbrace{(x-1)^2}_{\geq 0} &\leq \underbrace{\frac{1}{3}}_{\geq 0} \mid \sqrt{\quad} \\ \underbrace{|x-1|}_{\text{Abstand zwischen } x \text{ und } 1} &\leq \frac{1}{\sqrt{3}} \end{aligned}$$

Allgemein:

$$|x-a| = \text{Abstand von } x \text{ und } a$$

$$\Rightarrow \mathbb{L} =]-\infty; 1 - \frac{1}{3}\sqrt{3}] \cup [1 + \frac{1}{3}\sqrt{3}; \infty[$$

$$\begin{aligned} \underbrace{x^2}_{\geq 0} &= \underbrace{4}_{\geq 0} \mid \sqrt{\quad} \\ \sqrt{x^2} &= \sqrt{4} \\ |x| &= 2 \\ x &= \pm 2 \end{aligned}$$



Abbildung 2.25.

Gleichung/Ungleichung höheren Grades ($n \geq 3$)**A) Gleichung vom Grad n**

$$\underbrace{a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0}_{P(x)} = 0 \quad (a_n \neq 0)$$

Polynom vom Grad n

Bemerkung: Für $n \geq 5$ gibt es (prinzipiell) keine Lösungsformeln (\Rightarrow numerische Verfahren)

Spezialfall: Nullstelle $x = x_0$ sei bekannt**Bemerkung:**

- 287 -

- 289 -

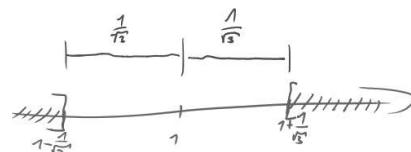


Abbildung 2.23.

a) $|x-a| \leq r \quad (\Leftrightarrow a-r \leq x \leq a+r)$

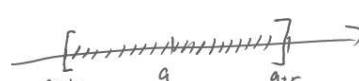


Abbildung 2.24.

b) $|x-a| \geq r \quad (\Leftrightarrow x \leq a-r \quad \vee \quad x \geq a+r)$

$$\Rightarrow \text{Polynomdivision } \underbrace{P(x)}_{\substack{\text{Polynom} \\ \text{vom} \\ \text{Grad } n}} : (x - x_0) = \underbrace{Q(x)}_{\substack{\text{Polynom} \\ \text{vom} \\ \text{Grad } n-1}}$$

 \Rightarrow Faktorisierung $P(x) = (x - x_0) \cdot Q(x) \triangleq \text{«Linearfaktor } (x - x_0) \text{ abspalten»}$ Gilt wiederum $Q(x_0) = 0$, so kann mittels Polynomdivision wieder der Linearfaktor $(x - x_0)$ abgespalten werden.

$$Q(x) = (x - x_0) \cdot Q_2(x)$$

$$\Rightarrow P(x) = (x - x_0)^2 \cdot Q_2(x)$$

Verfahren kann solange fortgesetzt werden, bis $P(x) = (x - x_0)^m \cdot Q_m(x)$ mit $Q_m(x_0) \neq 0$ gilt.Der Exponent m heißt Vielfachheit der Nullstelle x_0 von $P(x)$.

- 288 -

- 290 -

Beispiel: $P(x) = x^3 - 4x^2 + 5x - 2$ (alle Teiler von $-2 : \pm 1, \pm 2$ als Nullstelle ausprobieren)

\Rightarrow z.B. $x = 1$ ist Nullstelle

Polynomdivision:

$$\begin{array}{r} (x^3 - 4x^2 + 5x - 2) : (x - 1) = x^2 - 3x + 2 \\ - (x^3 - x^2) \\ \hline / -3x^2 + 5x \\ - (-3x^2 + 3x) \\ \hline / 2x - 2 \\ - (2x - 2) \\ \hline / / \end{array}$$

Abbildung 2.26. – Polynomdivision

- 291 -

$$\underbrace{x^3 - 4x^2 + 5x - 2}_{P(x)} = (x - 1)^2 \underbrace{(x - 2)}_{Q_2(x)} \quad (\text{vollständige Faktorisierung})$$

Nullstellen von $P(x)$ $x_1 = 1$ (2-fach)
 $x_2 = 2$ (1-fach)

$$x^3 - 4x^2 + 5x - 2 = (x - 1)^2(x - 2)$$

x^3 : Leiterterm, bestimmt das Verhalten im Unendlichen



vollständige Faktorisierung

Satz:

Jedes reelle Polynom (vom Grad ≥ 0) ist darstellbar als Produkt von Faktoren der Form

- 293 -

$$\underbrace{x^3 - 4x^2 + 5x - 2}_{P(x)} = (x - 1) \underbrace{(x^2 - 3x + 2)}_{Q(x)}$$

Polynomdivision:

$$\begin{array}{r} (x^2 - 3x + 2) : (x - 1) = x - 2 \\ - (x^2 - x) \\ \hline / -2x + 2 \\ - (-2x + 2) \\ \hline / / \end{array}$$

Abbildung 2.27. – Polynomdivision

- 292 -

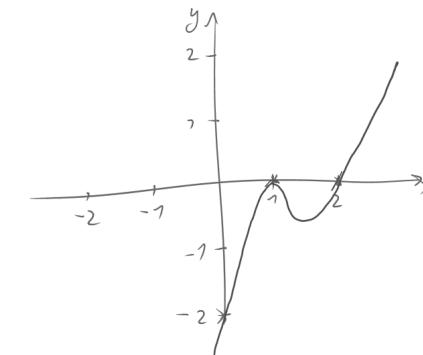


Abbildung 2.28. – Graph/Skizze

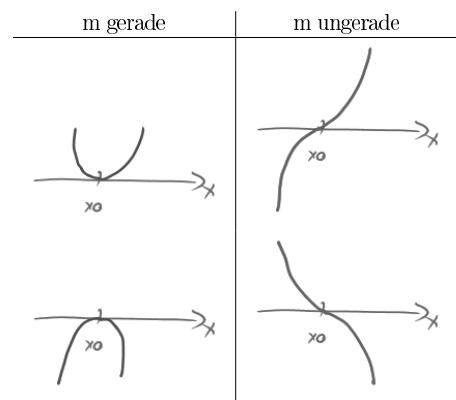
1. a ($a \in \mathbb{R}$) Konstante

2. $(x - b)$ ($b \in \mathbb{R}$) Linearfaktor

3. $(x - c)^2 + d^2$ ($c, d \in \mathbb{R}; d \neq 0$) quadratischer Faktor, (über \mathbb{R}) unzerlegbar $D < 0$

- 294 -

m-fache Nullstelle x_0

Abbildung 2.29. – m-fache Nullstelle x_0

- 295 -

Beispiele:

$$1. -2x^2 + 8x - 6 \leq 0$$

Vollständige Faktorisierung: $ax^2 + bx + c = a(x - x_1)(x - x_2)$

$$x_{1/2} = \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2a}; \quad x_1 = 1, \quad x_2 = 3$$

$$\Rightarrow -2x^2 + 8x - 6 = -2(x - 1)(x - 3)$$

VZT:

Faktoren	$-\infty < x < 1$	$x = 1$	$1 < x < 3$	$x = 3$	$3 < x < \infty$
-2	-	-	-	-	-
$x - 1$	-	0	+	+	+
$x - 3$	-	-	-	0	+
$P(x)$	$\underbrace{-}_{\leq 0}$	$\underbrace{0}_{\leq 0}$	+	$\underbrace{0}_{\leq 0}$	$\underbrace{-}_{\leq 0}$

$$\Rightarrow \mathbb{L} =] -\infty; 1] \cup [3; \infty[$$

- 297 -

Bemerkung: Über den komplexen Zahlen \mathbb{C} können die Faktoren $(x - c)^2 + d^2$ in 2 Linearfaktoren $(x - z_1)(x - z_2)$ zerlegt werden. ($z_1, z_2 \in \mathbb{C}; \quad \bar{z}_1 = z_2$)
 $z_{1/2} = c \pm id$

B) Ungleichung vom Grad n

$$\underbrace{a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0}_{P(x) \quad \text{Polynom vom Grad } n} \leq 0 \quad (a_n \neq 0)$$

- 296 -



Abbildung 2.30.

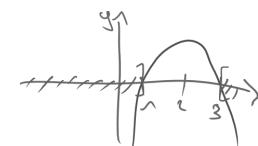


Abbildung 2.31.

- 298 -

$$2. \underbrace{-x^3 + 3x^2 - 3x + 2}_{P(x)} > 0$$

Vollständige Faktorisierung: Nullstellen erraten \Rightarrow Teiler des konstanten Glieds $\pm 1, \pm 2$

$$P(2) = 0$$

Polynomdivision: $P(x) : (x - 2)$

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

Abbildung 2.32.

- 299 -

$$3. -4(x+2)^3x^5(x-1)^2(x-2)(\underbrace{2x^2 - 2x + 3}) \leq 0$$

$$D = b^2 - 4ac < 0$$

\Rightarrow (über \mathbb{R}) unzerlegbar

$P(x) = -4(x+2)^3x^5(x-1)^2(x-2)(2x^2 - 2x + 3)$ ist bereits vollständig faktorisiert.

Nullstellen: $-2, 0, 1, 2$

VZT:

Faktoren	$-\infty < x < -2$	$x = -2$	$-2 < x < 0$	$x = 0$	$0 < x < 1$	$x = 1$	$1 < x < 2$	$x = 2$	$2 < x < \infty$
-4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$(x+2)^3$	-	0	+	+	+	+	+	+	+
x^5	-	-	-	0	+	+	+	+	+
$(x-1)^2$	+	+	+	+	+	0	+	+	+
$x-2$	-	-	-	-	-	-	-	0	+
$2x^2 - 2x + 3$	+	+	+	+	+	+	+	+	+
$P(x)$	+	$\underbrace{0}_{\leq 0}$	$\underbrace{-}_{\leq 0}$	$\underbrace{0}_{\leq 0}$	+	$\underbrace{0}_{\leq 0}$	+	$\underbrace{0}_{\leq 0}$	$\underbrace{-}_{\leq 0}$

- 301 -

$$\Rightarrow P(x) = -x^3 + 3x^2 - 3x + 2 = (x-2)(\underbrace{-x^2 + x - 1}_{\text{weiter zerlegbar?}})$$

$$D = 1^2 - 4(-1)(-1) = 1 - 4 = -3 < 0$$

\Rightarrow (über \mathbb{R}) unzerlegbar

VZT:

Faktoren	$-\infty < x < 2$	$x = 2$	$2 < x < \infty$
-2	-	-	-
$x-2$	-	0	+
$-x^2 + x - 1$	-	-	-
$P(x)$	$\underbrace{+}_{>0}$	0	-

$$\Rightarrow \mathbb{L} =]-\infty; 2[= \{x < 2\}$$

- 300 -

$$\Rightarrow \mathbb{L} = [-2; 0] \cup \{1\} \cup [2; \infty[$$

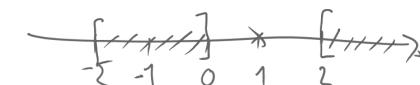


Abbildung 2.33.

- 302 -

$$4. x^4 - (a+1)x^2 + a < 0 \quad (a \in \mathbb{R})$$

Vollständig Faktorisieren: $x^4 - (a+1)x^2 + a = 0$ (biquadratische Gleichung)

Substitution: $u = x^2$

$$u^2 - (a+1)u + a = 0$$

$$D = (a+1)^2 - 4 \cdot 1 \cdot a = (a+1)^2 - 4a = a^2 + 2a + 1 - 4a = a^2 - 2a + 1 = (a-1)^2 \geq 0$$

$$\Rightarrow u_{1/2} = \frac{a+1 \pm \sqrt{(a-1)^2}}{2} = \frac{a+1 \pm |a-1|}{2} = \frac{a+1 \pm (a-1)}{2}$$

$$\Rightarrow x_1 = a, \quad x_2 = 1$$

$$u^2 - (a+1)u + a = 0 = (u-a)(u-1)$$

Rücksubstitution: $x^2 = u$

$$x^4 - (a+1)x^2 + a = (x^2 - a)(x^2 - 1) = (x^2 - a)(x-1)(x+1)$$

$(x^2 - a)$ weiter zerlegbar? (ja, in Abhängigkeit von a)

1. Fall: $a < 0$

- 303 -

$$\Rightarrow x^2 - a \text{ (über } \mathbb{R} \text{) unzerlegbar (da } -a > 0 \text{)}$$

VZT:

Faktoren	$-\infty < x < -1$	$x = -1$	$-1 < x < 1$	$x = 1$	$1 < x < \infty$
$x^2 - a$	+	+	+	+	+
$x + 1$	-	0	+	+	+
$x - 1$	-	-	-	0	+
$P(x)$	+	0	$\underbrace{-}_{<0}$	0	+

$$\Rightarrow \mathbb{L} =] -1; 1[= \{ -1 < x < 1 \}$$

2. Fall: $a = 0$

$$\Rightarrow x^4 - (a+1)x^2 + a = x^2(x-1)(x+1) \text{ (vollständig faktorisiert)}$$

VZT:

- 304 -

Faktoren	$-\infty <$ $x < -1$	$x = -1$	$-1 < x < 0$	$x = 0$	$0 < x < 1$	$x = 1$	$1 <$ $x < \infty$
x^2	+	+	+	+	+	+	+
$x + 1$	-	-	-	-	-	0	+
$x - 1$	-	-	-	0	+	+	+
$P(x)$	+	0	$\underbrace{-}_{<0}$	0	$\underbrace{-}_{<0}$	0	+

$$\Rightarrow \mathbb{L} =] -1; 0[\cup] 0; 1[$$

3. Fall: $a > 0$

$$\Rightarrow x^4 - (a+1)x^2 + a = (x - \sqrt{a})(x + \sqrt{a})(x-1)(x+1) \text{ (vollständig faktorisiert)}$$

Nullstellen: $\pm 1, \pm \sqrt{a}$

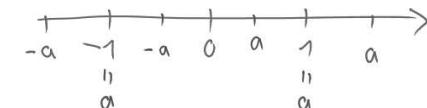


Abbildung 2.34.

- 305 -

$$\Rightarrow x^2 - a \text{ (über } \mathbb{R} \text{) unzerlegbar (da } -a > 0 \text{)}$$

VZT:

(0 <) $\sqrt{a} < 1$:

VZT:

Faktoren	$-\infty <$ $x < -1$	$x = -1$	$-1 <$ $x < -\sqrt{a}$	$x = -\sqrt{a}$	$-\sqrt{a} <$ $x < \sqrt{a}$	$x = \sqrt{a}$	$\sqrt{a} <$ $x < 1$	$x = 1$	$1 <$ $x < \infty$
$x + 1$	-	0	+	+	+	+	+	+	+
$x + \sqrt{a}$	-	-	-	0	+	+	+	+	+
$x - \sqrt{a}$	-	-	-	-	-	0	+	+	+
$x - 1$	-	-	-	-	-	-	-	0	+
$P(x)$	+	0	$\underbrace{-}_{<0}$	0	+	0	$\underbrace{-}_{<0}$	0	+

$$\Rightarrow \mathbb{L} =] -1; -\sqrt{a} [\cup] \sqrt{a}; 1[$$

$\sqrt{a} = 1$:

$$\Rightarrow (x-1)^2(x+1)^2 \geq 0$$

- 306 -

$$\Rightarrow \mathbb{L} = \emptyset$$

$$\sqrt{a} > 1:$$

VZT:

Faktoren	$-\infty < x < -\sqrt{a}$	$-\sqrt{a} < x < -1$	$x = -1$	$-1 < x < 1$	$x = 1$	$1 < x < \sqrt{a}$	$x = \sqrt{a}$	$\sqrt{a} < x < \infty$
$x + \sqrt{a}$	+	0	+	+	+	+	+	+
$x + 1$	+	+	0	+	+	+	+	+
$x - 1$	+	+	+	+	0	+	+	+
$x - \sqrt{a}$	+	+	+	+	+	0	+	+
$P(x)$	+	0	$\underbrace{-}_{<0}$	0	+	$\underbrace{-}_{<0}$	0	+

$$\Rightarrow \mathbb{L} =]-\sqrt{a}; -1] \cup]1; \sqrt{a}[$$

- 307 -

2.3.2. Zwei Unbestimmte x_1, x_2 (x, y)

Quadratische Gleichung/Ungleichung

A) Quadratische Gleichung

$$a_1x_1^2 + a_2x_1x_2 + a_3x_2^2 + a_4x_1 + a_5x_2 + a_6 = 0$$

Die Lösungsmengen (als Teilmengen der Ebene \mathbb{R}^2) heißen Kegelschnitte (oder Quadriken)
zur Vereinfachung sei $a_2 = 0 \Rightarrow$ achsenparallele Kegelschnitte

Koordinaten x, y :

$$Ax^2 + By^2 + Cx + Dy + E = 0 \quad (A, B, C, D, E \in \mathbb{R}; \underbrace{A \neq 0 \vee B \neq 0}_{A^2 + B^2 \neq 0})$$

- 309 -

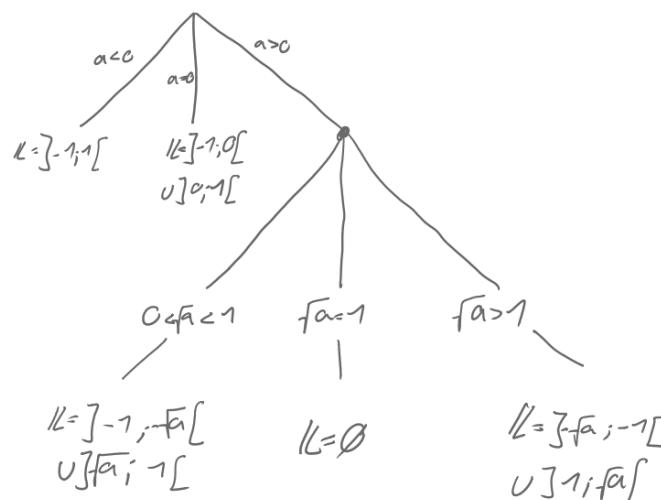


Abbildung 2.35. – Lösungsbaum

- 308 -

Kreis: $A = B$

Ellipse: $A \cdot B > 0 \wedge A \neq B$

Hyperbel: $A \cdot B < 0$

Parabel: $A = 0 \quad (\wedge B \neq 0) \quad \vee \quad B = 0 \quad (\wedge A \neq 0)$

Kreis = Menge aller Punkte P , für die $\overline{PM} = r = \text{const}$ gilt.

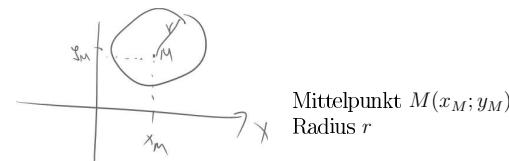


Abbildung 2.36.

Hauptform (allgemeine Kreisgleichung) $(x - x_M)^2 + (y - y_M)^2 = r^2$ (implizite Gleichung)

(implizite Gleichung)

- 310 -

Ellipse = Menge aller Punkte P , für die $\overline{PF_1} + \overline{PF_2} = 2a = \text{const}$ gilt.

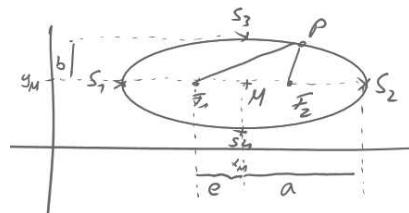


Abbildung 2.37.

Mittelpunkt $M(x_M; y_M)$
 a : (große) Halbachse
 b : (kleine) Halbachse
Brennpunkte: F_1, F_2
Brennweite: e (Exzentrizität)
Hauptscheitel S_1, S_2
Nebenscheitel S_3, S_4

$$\underbrace{a^2}_{\text{groß}} = e^2 + \underbrace{b^2}_{\text{klein}}$$

Hauptform (allgemeine Ellipsengleichung) $\frac{(x - x_M)^2}{a^2} + \frac{(y - y_M)^2}{b^2} = 1$ (implizite Gleichung)

- 311 -

chung)

zwei Asymptoten: $y = y_M \pm \frac{b}{a}(x - x_M)$ ($a, b > 0$)

Parabel = Menge aller Punkte P , für die $\overline{PF} = \overline{Pa}$ ($a = \text{Gerade}$) gilt.

Hauptform (allgemeine Parabolgleichung) $(y - y_S)^2 = 2p(x - x_S)$ (implizite Gleichung)

$p > 0$ so ist Parabel nach rechts geöffnet

$p < 0$ so ist Parabel nach links geöffnet

- 313 -

Hyperbel = Menge aller Punkte P , für die $|\overline{PF_1} - \overline{PF_2}| = 2a = \text{const}$ gilt.

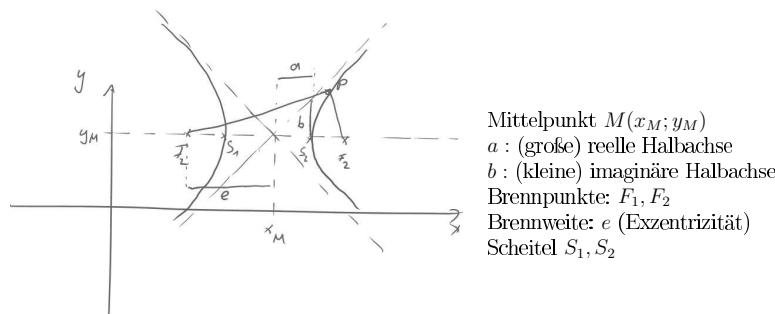


Abbildung 2.38.

Mittelpunkt $M(x_M; y_M)$
 a : (große) reelle Halbachse
 b : (kleine) imaginäre Halbachse
Brennpunkte: F_1, F_2
Brennweite: e (Exzentrizität)
Scheitel S_1, S_2

$$e^2 = a^2 + b^2$$

Hauptform (allgemeine Hyperbelgleichung) $\frac{(x - x_M)^2}{a^2} - \frac{(y - y_M)^2}{b^2} = 1$ (implizite Gleichung)

- 312 -

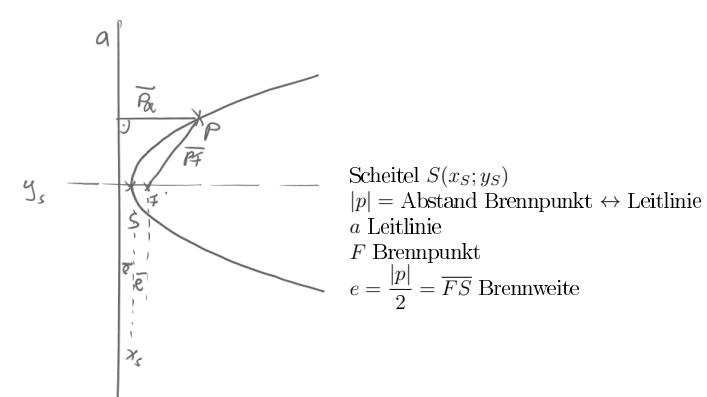


Abbildung 2.39.

Scheitel $S(x_S; y_S)$
 $|p|$ = Abstand Brennpunkt \leftrightarrow Leitlinie
 a Leitlinie
 F Brennpunkt
 $e = \frac{|p|}{2} = \overline{FS}$ Brennweite

- 314 -

Transformation: $Ax^2 + By^2 + Cx + Dy + E = 0 \rightarrow$ Hauptform

$$\underbrace{Ax^2 + Cx}_{\text{quadratische}} + \underbrace{By^2 + Dy}_{\text{quadratische}} + E = 0$$

Ergänzung Ergänzung
bezüglich x bezüglich y
(falls $C \neq 0$) (falls $D \neq 0$)

Wiederholung Quadratische Ergänzung:

⋮

B) Quadratische Gleichung

⋮

- 315 -

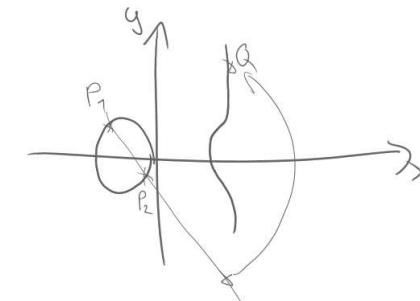


Abbildung 2.40. – Addition auf elliptischen Kurven $P_1 \oplus P_2 = Q$

- 317 -

Gleichung/Ungleichung höheren Grades ($n \geq 3$)

Die Lösungsmengen der algebraischen Gleichung

$$P(x, y) = 0$$

heissen algebraische Kurven.

$P(x, y) = \text{Polynom (multivariates)}$

Beispiel: $P(x, y) = y^2 - x^3 - ax - b$, d.h. $y^2 - x^3 - ax - b = 0 \Leftrightarrow y^2 = x^3 + ax + b$ (Lösung ist eine sogenannte elliptische Kurve)

(⇒ Kryptographie!)

- 316 -

2.4. Bruchgleichungen und Bruchungleichungen

Unbestimmte tritt (bzw. treten) im Nenner von Bruchtermen auf.

Lösungsstrategie:

1. Gleichungen/Ungleichungen mit Hauptnenner (HN) multiplizieren (\Rightarrow Fallunterscheidung! $HN > 0$, $HN < 0$ bei Ungleichungen)
2. Nennerfreie Gleichung/Ungleichung lösen
3. Probe (erforderlich, falls Grundmenge \mathbb{G} nicht bestimmt ist)

Wiederholung Bruchregeln

⋮

- 318 -

Beispiele:

$$1. \frac{2}{x^2} + \frac{3}{2x} = 0 \quad \mathbb{G} = \mathbb{R} \setminus \{0\} = \{x \neq 0\}$$

Nenner	EF (Erweiterungsfaktor)
x^2	2
$2x$	x
$\text{HN} - 2x^2$	$\text{HN} \neq 0 \text{ auf } \mathbb{G}$

$$2. \frac{x^2}{4x-8} = \frac{5-x^2}{x-2} \quad \mathbb{G} = \mathbb{R} \setminus \{2\} = \{x \neq 2\}$$

Nenner	EF (Erweiterungsfaktor)
$4x-8 = 4(x-2)$	1
$x-2$	4
$\text{HN} = 4(x-2)$	

- 319 -

- 321 -

$$\begin{aligned} & \frac{2}{x^2} + \frac{3}{2x} = 0 \\ \Leftrightarrow & \frac{4}{\text{HN}} + \frac{3x}{\text{HN}} = 0 \\ \Leftrightarrow & \frac{4+3x}{\text{HN}} = 0 \mid \cdot \text{HN} (\neq 0) \\ \Leftrightarrow & 4+3x=0 \\ \Leftrightarrow & x = -\frac{4}{3} \in \mathbb{G} \end{aligned}$$

alternativ «Probe» durchführen

$$\begin{aligned} & \frac{x^2}{4x-8} = \frac{5-x^2}{x-2} \\ \Leftrightarrow & \frac{x^2}{\text{HN}} = \frac{4(5-x^2)}{\text{HN}} \mid \cdot \text{HN} (\neq 0) \\ \Leftrightarrow & x^2 = 4(5-x^2) \\ \Leftrightarrow & x^2 = 20-4x^2 \mid +4x^2 \\ \Leftrightarrow & 5x^2 = 20 \\ \Leftrightarrow & x^2 = 4 \\ \Leftrightarrow & x = \pm 2 \\ & \mathbb{G} = \{x \neq 2\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_1 &= 2 \notin \mathbb{G} \Rightarrow \text{keine Lösung der Bruchgleichung} \\ x_2 &= -2 \in \mathbb{G} \Rightarrow \text{Lösung der Bruchgleichung} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \mathbb{L} = \{-2\}$$

- 320 -

- 322 -

$$3. \frac{x^2}{4x-8} < \frac{5-x^2}{x-2} \quad \mathbb{G} = \mathbb{R} \setminus \{2\} = \{x \neq 2\}$$

HN=4(x-2) siehe 2)

$$\begin{aligned} \frac{x^2}{4x-8} &< \frac{5-x^2}{x-2} \\ \Leftrightarrow \frac{x^2}{\text{HN}} &< \frac{4(5-x^2)}{\text{HN}} \quad (\text{HN} \neq 0) \end{aligned}$$

1. Fall HN>0, d.h. 4(x-2)>0 $\Leftrightarrow x>2$

- 323 -



Abbildung 2.41. $-|x| < 2 \Leftrightarrow -2 < x < 2$



Abbildung 2.42. $-\mathbb{G} = \{x > 2\}$

2. Fall HN<0, d.h. 4(x-2)>0 $\Leftrightarrow x>2$

- 325 -

$$\begin{aligned} \frac{x^2}{\text{HN}} &< \frac{4(5-x^2)}{\text{HN}} \mid \cdot \text{HN}(>0) \\ \Leftrightarrow x^2 &< 4(5-x^2) \\ \Leftrightarrow x^2 &< 20-4x^2 \mid +4x^2 \\ \Leftrightarrow 5x^2 &< 20 \mid :5 \\ \Leftrightarrow \underbrace{x^2}_{\geq 0} &< \underbrace{4}_{\geq 0} \mid \sqrt{} \quad (\text{streng monoton steigend auf } x \geq 0) \\ \Leftrightarrow \sqrt{x^2} &< \sqrt{4} \\ \Leftrightarrow |x| &< 2 \\ \Leftrightarrow -2 &< x < 2 \\ \text{zudem gilt } \mathbb{G} &= \{x > 2\} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \mathbb{L}_1 = \emptyset$$

- 324 -

$$\begin{aligned} \frac{x^2}{\text{HN}} &< \frac{4(5-x^2)}{\text{HN}} \mid \cdot \text{HN}(<0) \\ \Leftrightarrow x^2 &> 4(5-x^2) \\ \Leftrightarrow x^2 &> 20-4x^2 \mid +4x^2 \\ \Leftrightarrow 5x^2 &> 20 \mid :5 \\ \Leftrightarrow \underbrace{x^2}_{\geq 0} &> \underbrace{4}_{\geq 0} \mid \sqrt{} \quad (\text{streng monoton steigend auf } x \geq 0) \\ \Leftrightarrow \sqrt{x^2} &> \sqrt{4} \\ \Leftrightarrow |x| &> 2 \\ \text{zudem gilt } \mathbb{G} &= \{x < 2\} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \mathbb{L}_2 = \{x < -2\}$$

insgesamt $\Rightarrow \mathbb{L} = \mathbb{L}_1 \cup \mathbb{L}_2 = \{x < -2\}$

- 326 -

Abbildung 2.43. $-|x| > 2$ Abbildung 2.44. $-\mathbb{G} = \{x < 2\}$

2.5. Wurzelgleichungen

Unbestimmte steht (bzw. stehen) unter einer Wurzel (bzw. in einem Term mit echt rationalen Exponenten)

Lösungsstrategie:

1. Wurzel (bzw. Term mit rationalem Exponenten) isolieren
2. Quadrieren (bzw. Potenzieren)
3. Falls noch Wurzelterme auftreten wiederhole 1. und 2.

- 327 -

4. Löse die wurzelfreie Gleichung

5. Probe

Beachte: Potenzieren mit geradzahligen Exponenten ist i.a. keine Äquivalenzumformung.

\Rightarrow zusätzliche (Schein-)Lösungen können auftreten

\Rightarrow Probe notwendig

- 328 -

Beispiel: $\sqrt{2x+8} - \sqrt{5+x} = 1$

$$2x+8 \geq 0 \Leftrightarrow x \geq -4$$

$$5+x \geq 0 \Leftrightarrow x \geq -5$$

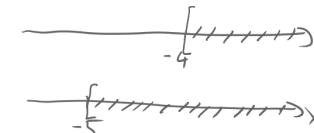


Abbildung 2.45.

$$\Rightarrow \mathbb{G} = [-4; \infty[= \{x \geq -4\}$$

- 329 -

$$\begin{aligned}
 \sqrt{2x+8} - \sqrt{5+x} &= 1 \mid +\sqrt{5+x} \\
 \Leftrightarrow \underbrace{\sqrt{2x+8}}_{\geq 0} &= \underbrace{1 + \sqrt{5+x}}_{\geq 0} \mid \square^2 \\
 \Leftrightarrow 2x+8 &= (1 + \sqrt{5+x})^2 \\
 \Leftrightarrow 2x+8 &= 1^2 + 2\sqrt{5+x} + 5 + x \\
 \Leftrightarrow x+2 &= 2\sqrt{5+x} \mid : 2 \\
 \Leftrightarrow \underbrace{\frac{1}{2}x+1}_{?} &= \underbrace{\sqrt{5+x}}_{\geq 0} \mid \square^2 \\
 \text{wurzelfreie Gleichung } \Rightarrow \left(\frac{1}{2}x+1\right)^2 &= 5+x \quad \text{keine Äquivalenzumformung, daher } \Rightarrow \\
 \Leftrightarrow \frac{1}{4}x^2 + x + 1 &= 5+x \mid -5-x \\
 \Leftrightarrow \frac{1}{4}x^2 - 4 &= 0 \\
 \Leftrightarrow \frac{1}{4}x^2 &= 4
 \end{aligned}$$

- 330 -

$$\Leftrightarrow x^2 = 16$$

$$\Leftrightarrow x = \pm 4$$

Lösung der wurzelfreien Gleichung

$$\pm 4 \in \mathbb{G}$$

Notiz: Wenn in der Form $ax^2 + bx + c = 0$ $c = 0$ oder $b = 0$ dann kann die Gleichung ohne Lösungsformel aufgelöst werden.

Probe:

$$x = 4 : \dots 1 = 1 \text{ Ok}$$

$$x = -4 : \dots -1 = 1 \text{ Geht nicht}$$

$$\Rightarrow \mathbb{L} = \{4\}$$

- 331 -

- 333 -

2.6. Exponential- und Logarithmusgleichungen

Unbestimmte steht (bzw. stehen) im Exponenten einer Potenz (Exponentialgleichung) bzw. im Argument eines Logarithmus (Logarithmusgleichung).

Lösungsstrategie: Exponentialgleichungen

1. Potenz(en) isolieren
2. Logarithmieren (beide Seiten)
3. Lösung bestimmen (auf \mathbb{G} achten)
4. (evtl.) Probe

Ist bei 1. Isolierung nicht möglich \Rightarrow Substitution

Wiederholung Potenzgesetze

:

- 332 -

Beispiele: Exponentialgleichung

$$1. \quad 5^x = 12$$

$$5^x = 12 \mid \ln(\square)$$

$$\Leftrightarrow \ln(5^x) = \ln(12)$$

(bzw. $\ln 5^x = \ln 12$)

$$\Leftrightarrow x \cdot \ln 5 = \ln 12$$

$$\Leftrightarrow x = \frac{\ln 12}{\ln 5}$$

- 334 -

$$\begin{aligned}\Leftrightarrow x \left(\ln \frac{25 \cdot 4}{4} \right) &= \ln \frac{5}{2} \\ \Leftrightarrow x \ln 25 &= \ln \frac{5}{2} \\ \Leftrightarrow x &= \frac{\ln \frac{5}{2}}{\ln 25}\end{aligned}$$

3. $5 \cdot 3^{2x} = 3^{x+3} - 34$

Potenzen können wegen Subtraktion (auf rechten Seite) nicht isoliert werden. \Rightarrow Substitution: $u = 3^x$

$3^{2x} = (3^x)^2 = u^2$

$3^{x+3} = 3^x \cdot 3^3 = 27u$

$\Rightarrow 5u^2 = 27u - 34$

\Rightarrow Lösungsformel $u_1 = 2; u_2 = 3,4$

- 337 -

- 335 -

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

$$\begin{aligned}\left(\frac{5}{2}\right)^{2x-1} &= \frac{1}{4^x} \\ \Leftrightarrow \left(\frac{5}{2}\right)^{2x-1} &= 4^{-x} \mid \ln \square\end{aligned}$$

Potenzen isoliert

$\Leftrightarrow \ln \left(\left(\frac{5}{2}\right)^{2x-1} \right) = \ln (4^{-x})$

$\Leftrightarrow (2x-1) \ln \frac{5}{2} = -x \ln 4$

$\Leftrightarrow 2x \ln \frac{5}{2} - \ln \frac{5}{2} = -x \ln 4 \mid +x \ln 4 + \ln \frac{5}{2}$

$\Leftrightarrow 2x \ln \frac{5}{2} + x \ln 4 = \ln \frac{5}{2}$

$\Leftrightarrow x \left(2 \ln \frac{5}{2} + \ln 4 \right) = \ln \frac{5}{2}$

$\Leftrightarrow x \left(\ln \frac{25}{4} + \ln 4 \right) = \ln \frac{5}{2}$

Rücksubstitution:

$u = 2 \quad (> 0)$

$u = 3^x$

$2 = 3^x$

$\ln 2 = \frac{x \ln 3}{\ln 2}$
 $x = \frac{\ln 2}{\ln 3}$

$u_2 = 3,4$

$u = 3^x$

$3,4 = 3^x$

$\ln 3,4 = x \ln 3$
 $x = \frac{\ln 3,4}{\ln 3}$

$\Rightarrow \mathbb{L} = \left\{ \frac{\ln 2}{\ln 3}; \frac{\ln 3,4}{\ln 3} \right\}$

- 336 -

- 338 -

Lösungsstrategie: Logarithmusgleichung

1. Logarithmus(-men) isolieren (\Rightarrow sonst Substitution)
2. In den Exponenten heben (beide Seiten)
3. Lösungen bestimmen (auf \mathbb{G} achten)
4. (evtl.) Probe

$$1 - x > 0 \Leftrightarrow x < 1$$

$$1 - 4x > 0 \Leftrightarrow x < \frac{1}{4}$$

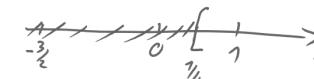
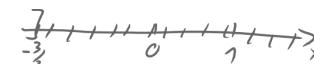


Abbildung 2.46.

- 339 -

- 341 -

Beispiele:

$$1. \log_3(2x) = 2 \quad \mathbb{G} = \{x > 0\}$$

$$\begin{aligned} \log_3(2x) &= 2 \mid 3^{\square} && (\text{log bereits isoliert}) \\ \Leftrightarrow 3^{\log_3(2x)} &= 3^2 \\ \Leftrightarrow 2x &= 9 \\ \Leftrightarrow x &= \frac{9}{2} \end{aligned}$$

Probe: ... 2 Ok

$$\Rightarrow \mathbb{L} = \left\{ \frac{9}{2} \right\}$$

$$2. \ln(2x + 3) + \ln(1 - x) = \ln(1 - 4x) \quad \mathbb{G} =] -\frac{3}{2}, \frac{1}{4}[$$

\mathbb{G} bestimmen: $2x + 3 > 0 \Leftrightarrow x > -\frac{3}{2}$

$$\begin{aligned} \ln(2x + 3) + \ln(1 - x) &= \ln(1 - 4x) \\ \Leftrightarrow \ln[(2x + 3)(1 - x)] &= \ln(1 - 4x) \mid e^{\square} \\ \Leftrightarrow (2x + 3)(1 - x) &= 1 - 4x \\ \Leftrightarrow 2x^2 - 3x - 2 &= 0 \\ x_{1/2} &= \frac{3 \pm 5}{4} \\ \Rightarrow x_1 &= 2 \notin \mathbb{G} \\ x_2 &= -\frac{1}{2} \in \mathbb{G} \end{aligned}$$

- 340 -

- 342 -

2.7. Goniometrische Gleichungen

Die Unbestimmte(n) tritt (treten) im Argument einer Winkelfunktion (trigonometrischen Funktion) auf.

Wiederholung Winkelfunktionen

⋮

Es gilt:

$$\cos \alpha = \sin \beta = \sin(90^\circ - \alpha)$$

$$\sin \alpha = \cos \beta = \cos(90^\circ - \alpha)$$

$$\tan \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \frac{\cos \beta}{\sin \beta} = \cot \beta = \cot(90^\circ - \alpha) = \frac{1}{\tan(90^\circ - \alpha)}$$

Gleichungen der Form $\sin x = a, \cos x = a$:

- 343 -

Lösung im I. Quadrant

$$x_1 = \arcsin a = \sin^{-1} a > 0$$

Lösung im II. Quadrant

$$x_2 = \pi - x_1$$

allgemeine Lösungen:

$$x_1 + k2\pi$$

$$x_2 + k2\pi \quad (k \in \mathbb{Z})$$

$$\cos x = a$$

Lösung im I. Quadrant

$$x_1 = \arccos a = \cos^{-1} a > 0$$

Lösung im IV. Quadrant

$$x_2 = 2\pi - x_1$$

allgemeine Lösungen:

$$x_1 + k2\pi$$

$$x_2 + k2\pi \quad (k \in \mathbb{Z})$$

- 345 -

Beachte: dass $-1 \leq \sin x \leq 1$ und $-1 \leq \cos x \leq 1$ gilt.

D.h. Gleichungen der Form $\sin x = a$ bzw. $\cos x = a$ haben für $|a| > 1$ keine Lösungen.

a = 0:

$$\sin x = 0 \Leftrightarrow x = 0 + k\pi = k\pi \quad (k \in \mathbb{Z})$$

$$\cos x = 0 \Leftrightarrow x = \frac{\pi}{2} + k\pi \quad (k \in \mathbb{Z})$$

a = 1:

$$\sin x = 1 \Leftrightarrow x = \frac{\pi}{2} + k2\pi \quad (k \in \mathbb{Z})$$

$$\cos x = 1 \Leftrightarrow x = 0 + k2\pi = k2\pi \quad (k \in \mathbb{Z})$$

a = -1:

$$\sin x = -1 \Leftrightarrow x = \frac{3}{2}\pi + k2\pi \quad (k \in \mathbb{Z})$$

$$\cos x = -1 \Leftrightarrow x = \pi + k2\pi \quad (k \in \mathbb{Z})$$

0 < a < 1:

$$\sin x = a$$

- 344 -

-1 < a < 0:

$$\sin x = a$$

Lösung im III. Quadrant

$$x_1 = \arcsin a = \sin^{-1} a < 0$$

Lösung im IV. Quadrant

$$x_2 = \pi - x_1$$

allgemeine Lösungen:

$$x_1 + k2\pi$$

$$x_2 + k2\pi \quad (k \in \mathbb{Z})$$

$$\cos x = a$$

Lösung im II. Quadrant

$$x_1 = \arccos a = \cos^{-1} a > 0$$

Lösung im III. Quadrant

$$x_2 = 2\pi - x_1$$

allgemeine Lösungen:

- 346 -

$$\begin{aligned}x_1 + k2\pi \\x_2 + k2\pi \quad (k \in \mathbb{Z})\end{aligned}$$

Beachte:

$$\begin{aligned}0 \leq \arccos a \leq \pi \text{ (I. oder II. Quadrant)} \\-\frac{\pi}{2} \leq \arccos a \leq \frac{\pi}{2} \text{ (I. oder IV. Quadrant)}\end{aligned}$$

Goniometrische Beziehungen:Additionstheoreme:

$$\begin{aligned}\sin(x_1 \pm x_2) &= \sin x_1 \cos x_2 \pm \cos x_1 \sin x_2 \\\cos(x_1 \pm x_2) &= \cos x_1 \cos x_2 \mp \sin x_1 \sin x_2\end{aligned}$$

Doppelter Winkel:

$$\begin{aligned}\sin 2x &= 2 \sin x \cos x \\\cos 2x &= \cos^2 x - \sin^2 x = 1 - 2 \sin^2 x = 2 \cos^2 x - 1\end{aligned}$$

- 347 -

Summen und Differenzen:

$$\begin{aligned}\sin x_1 \pm \sin x_2 &= 2 \sin \frac{x_1 \mp x_2}{2} \cos \frac{x_1 \mp x_2}{2} \\\cos x_1 \pm \cos x_2 &= 2 \cos \frac{x_1 \pm x_2}{2} \cos \frac{x_1 - x_2}{2} \\\cos x_1 - \cos x_2 &= -2 \sin \frac{x_1 + x_2}{2} \sin \frac{x_1 - x_2}{2}\end{aligned}$$

Trigonometrischer Pythagoras:

$$\sin^2 x + \cos^2 x = 1$$

Beispiele: Goniometrische Gleichungen

$$1. \sin x = \frac{1}{2} \quad \mathbb{G} = \mathbb{R}$$

Lösung im

$$\begin{aligned}\text{I. Quadranten } x_1 &= \arcsin \frac{1}{2} = \frac{\pi}{6} \\\text{II. Quadranten } x_2 &= \pi - x_1 = \pi - \frac{\pi}{6} = \frac{5}{6}\pi\end{aligned}$$

allgemeine Lösungen:

$$x_1 = \frac{\pi}{6} + k2\pi$$

- 348 -

$$x_2 = \frac{5}{6}\pi + k2\pi \quad (k \in \mathbb{Z})$$

$$2. \sin 2x = \sin x \quad \mathbb{G} = [0; 2\pi[$$

$$\begin{aligned}\underbrace{\sin 2x}_{2 \sin x \cos x} &= \sin x \\ \Leftrightarrow 2 \sin x \cos x &= \sin x \mid -\sin x \\ \Leftrightarrow 2 \sin x \cos x - \sin x &= 0 \\ \Leftrightarrow \sin x(2 \cos x - 1) &= 0 \\ \Leftrightarrow \sin x = 0 \vee \underbrace{2 \cos x - 1}_{\cos x = \frac{1}{2}} &= 0\end{aligned}$$

- 349 -

$$\begin{aligned}\sin x = 0 &\Leftrightarrow x = 0 \vee x = \pi \\\cos x = \frac{1}{2} &\Leftrightarrow x = \frac{\pi}{3} \vee x = \frac{5}{3}\pi\end{aligned}$$

$$\Rightarrow \mathbb{L} = \{0; \frac{\pi}{3}; \pi; \frac{5}{3}\pi\}$$

- 350 -

$$3. \quad 2 \cos^2 x = 1 - \sin x \quad \mathbb{G} = [0; 2\pi[$$

$$\begin{aligned} 2 \cos^2 x &= 1 - \sin x \\ \Leftrightarrow 2(1 - \sin^2 x) &= 1 - \sin x \mid u = \sin x \\ \Leftrightarrow 2(1 - u^2) &= 1 - u \\ \Leftrightarrow 2(1 - u)(1 + u) - (1 - u) &= 0 \\ \Leftrightarrow (1 - u)(2(1 + u) - 1) &= 0 \\ \Leftrightarrow (1 - u)(1 + 2u) &= 0 \\ \Leftrightarrow u = 1 \vee u = -\frac{1}{2} & \end{aligned}$$

$$\begin{array}{l|l} \sin x = u & u = 1 : \sin x = 1 \Leftrightarrow x = \frac{\pi}{2} \\ \hline u = 1 : \sin x = -\frac{1}{2} & \Leftrightarrow x = \frac{11}{6}\pi \vee x = \frac{7}{6}\pi \end{array}$$

$$\Rightarrow \mathbb{L} = \left\{ \frac{\pi}{2}; \frac{11}{6}\pi; \frac{7}{6}\pi \right\}$$

- 351 -

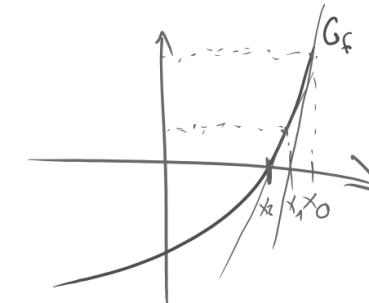


Abbildung 2.47.

- Konstruiere die Tangente an G_f durch $P_0(x_0; \underbrace{y_0}_{f(x_0)})$
- Tangentengleichung $y = f'(x_0)(x - x_0) + f(x_0)$

- 353 -

$$4. \quad \sqrt{2} \sin^2(2x) - \sin(2x) = 0 \quad \mathbb{G} = [0; 2\pi[$$

$$5. \quad \cos^4 x - 3 \cos^2 x \sin 2x = 0 \quad \mathbb{G} = [0; 2\pi[$$

2.8. Das Newton-Raphson-Verfahren

Für viele Gleichungen ist es oftmals unmöglich eine exakte Lösung zu bestimmen \Rightarrow Näherungslösungen (approximative Lösungen)!

Beispiel:

Gesucht ist eine Lösung der Gleichung $f(x) = 0$

Starte mit beliebigem Punkt x_0

- 352 -

- diese schneidet bei $x = x_1$ die x -Achse

$$0 = f'(x_0)(x - x_0) + f(x_0) \Leftrightarrow x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)}$$

- Wiederholt man die Konstruktion, so erhält man eine Folge $x_0, x_1, x_2, x_3, \dots$ durch

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

Gilt für den Startwert x_0 die sogenannte Lipschitz-Bedingung

$$\left| \frac{f(x_0) \cdot f''(x_0)}{(f'(x_0))^2} \right| < 1,$$
 (hinreichendes Konvergenzkriterium)
so konvergiert die Folge $x_0, x_1, x_2, x_3, \dots$ gegen eine Nullstelle von $f(x).$

- 354 -

Teil III.

Analysis einer Veränderlichen

355

- 357 -

Definition: Sind $(a_n), (b_n)$ Folgen und $\alpha \in \mathbb{R}$ (bzw. $\alpha \in \mathbb{C}$), so definiert man

- a) $(a_n) \pm (b_n) = (a_n \pm b_n)$
- b) $(a_n) \cdot (b_n) = (a_n \cdot b_n)$
- c) $(a_n) : (b_n) = (a_n : b_n)$
- d) $\alpha \cdot (a_n) = (\alpha \cdot a_n)$

$$1. a_n = 2n \quad (n \geq 0) \quad (a_n) = (0, 2, 4, 6, 8, \dots)$$

$$2. a_n = n^2 \quad (n \geq 0) \quad (a_n) = (0, 1, 4, 9, \dots)$$

3. Rekursive Definiton

$$a_0 = 1, a_1 = 4, a_2 = 10$$

$$a_n = \frac{1}{2}(a_{n-3} + a_{n-2} - 2a_{n-1}) \quad (n \geq 3)$$

$$a_3 = \frac{1}{2}(a_0 + a_1 - 2a_2) = \dots = -7,5 \quad a_4 = \frac{1}{2}(a_1 + a_2 - 2a_3) = \dots = 14,5$$

Definition: Eine unendliche, reelle (bzw. komplexe) Reihe ist ein formaler Ausdruck der Form

$$\sum_{k=0}^{\infty} a_k = a_0 + a_1 + a_2 + \dots$$

wobei (a_k) eine Folge ist.

1. Folgen und Reihen

1.1. Grundbegriffe

Definition: Eine reelle (bzw. komplexe) Folge ist eine Abbildung $\mathbb{N}_0 \rightarrow \mathbb{R}$ (bzw. $\mathbb{N}_0 \rightarrow \mathbb{C}$), $n \mapsto a_n$ (bzw. $n \mapsto z_n$); für Folge schreibt man auch $(a_n)_{n \in \mathbb{N}_0}$ (bzw. $(z_n)_{n \in \mathbb{N}_0}$) oder einfach nur (a_n) (bzw. (z_n)).

Beispiel:

$$1. \sum_{k=0}^{\infty} k = 0 + 1 + 2 + \dots$$

$$2. \sum_{k=0}^{\infty} q^k = q^0 + q^1 + q^2 + \dots$$

Definition: Sind $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ und $\sum_{k=0}^{\infty} b_k$ Reihen, $\alpha \in \mathbb{R}$, so definiert man:

$$a) \sum_{k=0}^{\infty} a_k \pm \sum_{k=0}^{\infty} b_k = \sum_{k=0}^{\infty} (a_k \pm b_k)$$

356

- 358 -

$$\text{b) } \sum_{k=0}^{\infty} a_k \cdot \sum_{k=0}^{\infty} b_k = \sum_{k=0}^{\infty} c_k$$

mit $c_k = \sum_{m=0}^k a_m \cdot b_{k-m}$ (Cauchy-Produkt)

$$\text{c) } \alpha \cdot \left(\sum_{k=0}^{\infty} a_k \right) = \sum_{k=0}^{\infty} \alpha \cdot a_k$$

Bemerkung: zu b) Cauchy-Produkt

$$(a_0 + a_1 + a_2 + a_3 + \dots) \cdot (b_0 + b_1 + b_2 + b_3 + \dots)$$

	b_0	b_1	b_2	b_3	\dots
a_0	$a_0 b_0$	$a_0 b_1$	$a_0 b_2$	$a_0 b_3$	\dots
a_1	$a_1 b_0$	$a_1 b_1$	$a_1 b_2$	$a_1 b_3$	\dots
a_2	$a_2 b_0$	$a_2 b_1$	$a_2 b_2$	$a_2 b_3$	\dots
a_3	$a_3 b_0$	$a_3 b_1$	$a_3 b_2$	$a_3 b_3$	\dots

$$c_0 = \sum_{m=0}^0 a_m b_{0-m} = a_0 b_0$$

$$c_1 = \sum_{m=0}^1 a_m b_{1-m} = a_0 b_1 + a_1 b_0$$

$$c_2 = \sum_{m=0}^2 a_m b_{2-m} = a_0 b_2 + a_1 b_1 + a_2 b_0$$

$$c_3 = \sum_{m=0}^3 a_m b_{3-m} = a_0 b_3 + a_1 b_2 + a_2 b_1 + a_3 b_0$$

1.2. Grenzwerte und Konvergenzkriterien

Definition:

- Eine (reelle) Folge (a_n) heißt Konvergent, wenn es ein $a \in \mathbb{R}$, so dass gilt:
Zu jedem $\epsilon > 0$ existiert ein $n_0 \in \mathbb{N}$, so dass $|a_n - a| < \epsilon$ für alle $n \geq n_0$

wir schreiben dann

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a \quad (\text{bzw. } a_n \rightarrow a \text{ für } n \rightarrow \infty)$$

und nennen a den Grenzwert der Folge (a_n) ; ist a_n nicht konvergent, so heißt die Folge divergent.

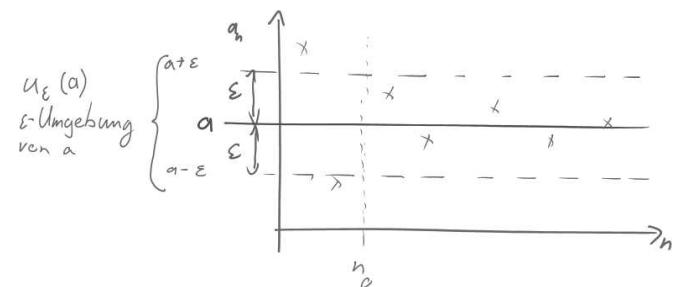


Abbildung 1.1.

$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$ bedeutet, dass es zu jeder noch so kleinen ϵ -Umgebung $U_\epsilon(a)$ stets eine Schranke $n_0 \in \mathbb{N}$ gibt, so dass alle a_n mit $n \geq n_0$ in $U_\epsilon(a)$ liegen.

Analog definiert man Konvergenz auch für komplexe Folgen (z_n) ; hierbei ist $|z_n - z|$ der Betrag für komplexe Zahl. Geometrisch ist $|z_n - z|$ der Abstand von z_n zu z in der Gaußschen Zahlenebene.

2. Eine Folge (a_n) heißt bestimmt divergent mit uneigentlichem Grenzwert $\pm\infty$, wenn es zu jedem $M \in \mathbb{R}$ ein $n_0 \in \mathbb{N}$ gibt mit

$a_n > M$ für alle $n \geq n_0$ (bzw. $a_n < M$ für alle $n \geq n_0$)

wir schreiben dann

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

ansonsten heißt (a_n) unbestimmt divergent.

- 363 -

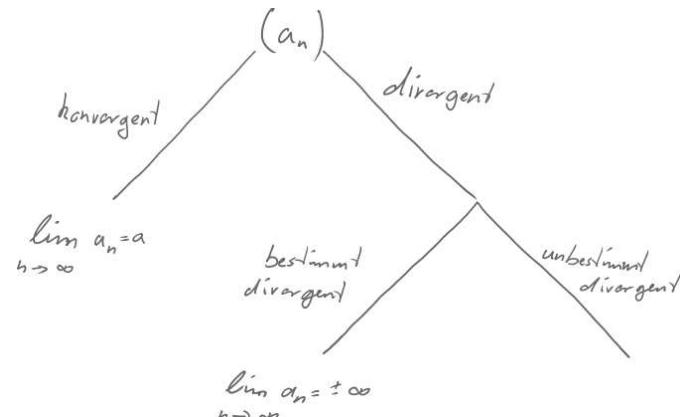


Abbildung 1.2.

Bemerkung: Eine komplexe Folge (z_n) , $z_n = a_n + ib_n$ ist genau dann konvergent, wenn Realteil (a_n) und Imaginärteil (b_n) konvergente Folgen sind; dabei gilt

- 364 -

$$\lim_{n \rightarrow \infty} z_n = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n + ib_n = a + ib \quad \text{mit } \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a, \lim_{n \rightarrow \infty} b_n = b$$

a) $\lim_{n \rightarrow \infty} (1 + \frac{1}{n})^n = e$ (Eulersche Zahl $e = 2,71\dots$)
bzw. $\lim_{n \rightarrow \infty} (1 + \frac{x}{n})^n = e^x$ (konvergent)

$$|a_n - e^x| < 10^{-8} \text{ maximaler Fehler}$$

$$\Rightarrow n \geq n_0$$

b) $\lim_{n \rightarrow \infty} 2^n = \infty$ (bestimmt divergent)

c) $\lim_{n \rightarrow \infty} (\frac{1}{2})^n = 0$ (konvergent)

d) $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a} = 1 \quad (a > 0)$

1.2.1. Rechenregeln für Grenzwerte

$(a_n), (b_n)$ Folgen mit $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a, \lim_{n \rightarrow \infty} b_n = b$

- 365 -

1. $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n \pm b_n = a \pm b$
2. $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n \cdot b_n = a \cdot b$
3. Falls $b \neq 0$ und $b_n \neq 0$ gilt $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = \frac{a}{b}$
4. $\lim_{n \rightarrow \infty} \alpha \cdot a_n = \alpha \cdot a \quad (\alpha \in \mathbb{R})$

Sandwich-Lemma: sind $(a_n), (b_n), (c_n)$ Folgen und gilt

1. $a_n \leq b_n \leq c_n$ «Sandwich»
2. $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} c_n$

Dann ist (b_n) konvergent und es gilt $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} c_n$

Beispiel: $b_n = \frac{\sin(n)}{n} \quad (n > 0)$

- 366 -

Es gilt:

$$\begin{aligned} -1 \leq \sin(n) \leq 1 \mid: n \\ \Leftrightarrow \underbrace{-\frac{1}{n}}_{a_n \rightarrow 0} \leq \underbrace{\frac{\sin(n)}{n}}_{b_n} \leq \underbrace{\frac{1}{n}}_{c_n \rightarrow 0} \end{aligned}$$

\Rightarrow Sandwich-Lemma $b_n = \frac{\sin(n)}{n}$ ist konvergent und $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sin(n)}{n} = 0$

Definition:

- a) Eine (unendliche) Reihe $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ heißt konvergent, wenn es ein $a \in \mathbb{R}$ gibt, so dass Folge (s_n) der Partialsummen

$$s_n = \sum_{k=0}^n a_k$$

gegen a konvergiert, d.h. $a = \lim_{n \rightarrow \infty} s_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n a_k$, wir schreiben dann

- 367 -

2. $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2} = \frac{\pi^2}{6}$

3. $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} = \infty$ (harmonische Reihe)

4. $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k(k+1)} = 1$

Bemerkung: Eine absolut konvergente Reihe ist auch konvergent (absolut konvergent \Rightarrow konvergent). Die Umkehrung gilt i.a. nicht.

1.2.2. Konvergenzkriterien für Reihen

hinreichende Kriterien

1. Quotientenkriterium (D'Almbert)

- 369 -

$$\sum_{k=0}^{\infty} a_k = a$$

und nennen a den Grenzwert der Reihe; ist die Reihe nicht konvergent, so heißt sie divergent.

- b) $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ heißt absolut konvergent, wenn $\sum_{k=0}^{\infty} |a_k|$ konvergent ist.

- c) $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ heißt bestimmt divergent, wenn die Folge $s_n = \sum_{k=0}^n a_k$ der Partialsummen bestimmt divergent ist; wir schreiben dann

$$\sum_{k=0}^{\infty} a_k = \pm\infty$$

ansonsten heißt die Reihe unbestimmt divergent; $\pm\infty$ heißt uneigentlicher Grenzwert.

Beispiel:

1. $\sum_{k=0}^{\infty} q^k = q^0 + q^1 + q^2 + \dots = \frac{1}{1-q} \quad (0 \leq q < 1)$ (geometrische Reihe)

- 368 -

Gilt $\lim_{k \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{k+1}}{a_k} \right| = q \begin{cases} < 1 \\ > 1 \end{cases}$, so ist $\sum_{k=0}^{\infty} a_k \begin{cases} \text{konvergent} \\ \text{divergent} \end{cases}$.

2. Wurzelkriterium (Cauchy)

Gilt $\lim_{k \rightarrow \infty} \sqrt[k]{|a_k|} = q \begin{cases} < 1 \\ > 1 \end{cases}$, so ist $\sum_{k=0}^{\infty} a_k \begin{cases} \text{konvergent} \\ \text{divergent} \end{cases}$.

3. Majorantenkriterium

Ist $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ konvergent und $|b_k| \leq a_k$ für alle $k \geq N$, so ist auch $\sum_{k=0}^{\infty} b_k$ konvergent.

Ebenso gilt: Ist $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ divergent und gilt $b_k \geq a_k$ für alle $k \geq N$, so ist auch $\sum_{k=0}^{\infty} b_k$ divergent.

4. Kriterium für alternierende Reihen (Leibniz)

Ist (a_n) eine monoton fallende Folge, d.h. $a_0 \geq a_1 \geq a_2 \geq \dots$ mit $\lim_{k \rightarrow \infty} a_k = 0$, so konvergiert die Reihe $\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k a_k$.

- 370 -

Bemerkung: Notwendiges Kriterium für Konvergenz (Bedingung)

Ist die Reihe $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ konvergent, so ist (a_k) eine sogenannte Nullfolge, d.h. $\lim_{k \rightarrow \infty} a_k = 0$.

Implikation $A \rightarrow B$ «aus A folgt B », « A impliziert B »

Die Gültigkeit der Bedingung A ist hinreichend für die Gültigkeit von B
d.h. A ist eine hinreichende Bedingung/Kriterium für B .

Die Gültigkeit der Bedingung B ist notwendig für die Gültigkeit von A
d.h. B ist eine notwendige Bedingung/Kriterium für A .

«Reihe $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ konvergiert» \rightarrow « (a_k) ist Nullfolge»

Rechenregeln für konvergente Reihen

Es seien $\sum_{k=0}^{\infty} a_k = a$ und $\sum_{k=0}^{\infty} b_k = b$ konvergente Reihen, $\alpha \in \mathbb{R}$.

- 371 -

Dann sind auch die Reihen $\sum_{k=0}^{\infty} (a_k \pm b_k)$ und $\sum_{k=0}^{\infty} \alpha a_k$ konvergent und es gilt

$$\sum_{k=0}^{\infty} (a_k \pm b_k) = a \pm b$$

$$\sum_{k=0}^{\infty} \alpha a_k = \alpha a$$

Sind insbesondere $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ und $\sum_{k=0}^{\infty} b_k$ absolut konvergent, so ist auch das Cauchy-Produkt

$$\sum_{k=0}^{\infty} \sum_{m=0}^k a_m b_{k-m}$$

absolut konvergent und es gilt

$$\sum_{k=0}^{\infty} c_k = a \cdot b$$

- 372 -

2. Stetigkeit von Funktionen

Definition: Grenzwerte bei Funktionen

Sei $f : \mathbb{D} \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion ($\mathbb{D} \subseteq \mathbb{R}$) und $a \in \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$. Man schreibt

a) $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = c$ ($c = \underline{\text{Grenzwert}}$ von $f(x)$ für $x \rightarrow a$) falls für jede Folge $(x_n), x_n \in \mathbb{D}$, mit $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$ $\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = c$ gilt.

b) $\lim_{x \rightarrow a^{\pm}} f(x) = c$ ($c = \text{rechts-/linksseitiger Grenzwert von } f(x) \text{ für } x \rightarrow a^{\pm}$) falls für jede Folge $(x_n), x_n \in \mathbb{D}, x_n > a$, mit $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$ $\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = c$ gilt.

373

Bemerkung: Der Grenzwert $c = \lim_{x \rightarrow a} f(x)$ existiert genau dann, wenn die einseitigen Grenzwerte $\lim_{x \rightarrow a^{\pm}} f(x)$ existieren und übereinstimmen. In diesem Fall gilt
 $\lim_{x \rightarrow a^{\pm}} f(x) = \lim_{x \rightarrow a} f(x)$.

Beispiel: $\text{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & \text{falls } x > 0 \\ 0 & \text{falls } x = 0 \\ -1 & \text{falls } x < 0 \end{cases}$ Signum-Funktion (Signum \triangleq Vorzeichen)

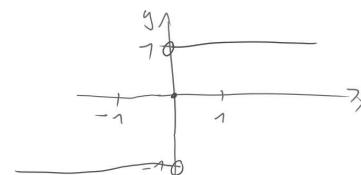


Abbildung 2.1.

- 374 -

$$\lim_{x \rightarrow 0^-} f(x) = \lim_{x \rightarrow 0^-} \operatorname{sgn}(x) = -1$$

\neq

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) = \lim_{x \rightarrow 0^+} \operatorname{sgn}(x) = 1$$

$\Rightarrow \lim_{x \rightarrow 0} \operatorname{sgn}(x)$ existiert nicht, obwohl die einseitigen Grenzwerte existieren.

Definition: Stetigkeit

Sei $f : D \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion, $a \in D$. Die Funktion f heißt stetig in a , falls $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = f(a)$

gilt; ansonsten heißt f unstetig in a . f heißt stetig (in D), falls f in jedem $a \in D$ stetig ist; ansonsten heißt f unstetig.

- 375 -

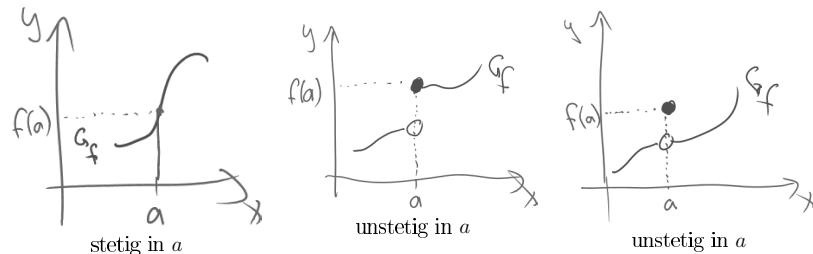


Abbildung 2.2.

Bemerkung:

1. f ist stetig in a , wenn der Graph von f bei $x = a$ keinen «Sprung» macht.
2. Alle ganzrationalen und gebrochenrationalen Funktionen sind stetig,
alle Potenzfunktionen und Exponentialfunktionen sind stetig,
alle trigonometrischen Funktionen sind stetig,
alle Logarithmusfunktionen sind stetig.

- 376 -

3. $\epsilon - \delta$ -Kriterium der Stetigkeit

f ist stetig in $a \in D \Leftrightarrow \forall \epsilon > 0 \exists \delta > 0 \forall x \in D |x - a| < \delta \rightarrow |f(x) - f(a)| < \epsilon$

Zwischenwertsatz

Satz:

Sei $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ stetig und es gelte $f(a) \cdot f(b) < 0$.

Dann existiert ein $x_0 \in]a, b[$ mit $f(x_0) = 0$.

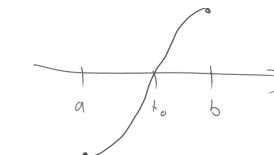


Abbildung 2.3.

- 377 -

3. Differentiation

3.1. Differenzierbarkeit

Problem: Bestimmung der Steigung der Tangente an den Graphen von f in Punkt $P(x_0; f(x_0))$

$$\text{Sekantensteigung } m_{s,\Delta x} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x}$$

378

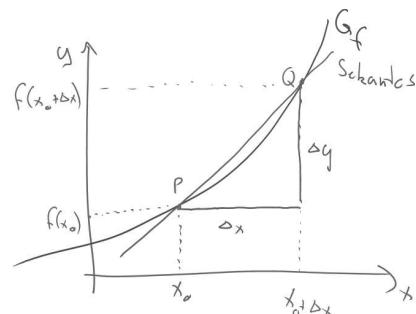


Abbildung 3.1.

Für $\Delta x \rightarrow 0$ geht die Sekante in die Tangente t über (im Grenzfall)

Für die Steigung m_t der Tangente t gilt dann

$$m_t = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} m_{s, \Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} \quad (\text{falls der Grenzwert sprich die Tangente existiert})$$

- 379 -

Satz:

Ist $f :]a; b[\rightarrow \mathbb{R}$ differenzierbar und gilt $f'(x) < 0$ in $]a; b[$, so ist f streng monoton
 $\left\{ \begin{array}{l} \text{steigend} \\ \text{fallend} \end{array} \right\}$ auf $]a; b[$.

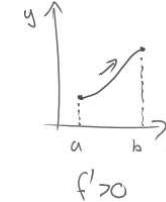


Abbildung 3.2.

Beachte: Die Voraussetzung im obigen Satz, dass $\mathbb{D} =]a; b[$ ein Intervall ist, ist wesentlich, denn z.B. gilt für $f : \mathbb{R} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto \frac{1}{x}$ folgendes:
 $f'(x) = -\frac{1}{x^2} < 0$, jedoch ist f nicht streng monoton fallend.

- 381 -

Definition:

a) $f : \mathbb{D} \rightarrow \mathbb{R}$ heißt differenzierbar in $x_0 \in \mathbb{D}$, wenn der Grenzwert

$$f'(x_0) := \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x}$$

existiert; $f'(x_0)$ heißt Differentialquotient in x_0 oder Ableitung von f in x_0 ; man schreibt

auch

$$f'(x_0) = \frac{df}{dx}(x_0) \quad (\text{Leibniz-Schreibweise})$$

(df und dx heißen Differentiale)

b) $f : \mathbb{D} \rightarrow \mathbb{R}$ heißt differenzierbar (in \mathbb{D}), wenn f differenzierbar in jedem $x_0 \in \mathbb{D}$ ist.

Bemerkung: $f : \mathbb{D} \rightarrow \mathbb{R}$ ist genau dann in $x_0 \in \mathbb{D}$ differenzierbar, wenn die einseitigen Grenzwerte $\lim_{\Delta x \rightarrow 0^\pm} \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x}$ existieren und übereinstimmen.

Satz:

Ist $f : \mathbb{D} \rightarrow \mathbb{R}$ in $x_0 \in \mathbb{D}$ differenzierbar, so ist f in x_0 stetig
 «Differenzierbarkeit» → «Stetigkeit».

- 380 -

Auf dem jeweiligen Intervall $]-\infty; 0[$ bzw. $]0; \infty[$ ist f streng monoton fallend, jedoch nicht auf $\mathbb{R} \setminus \{0\}$.

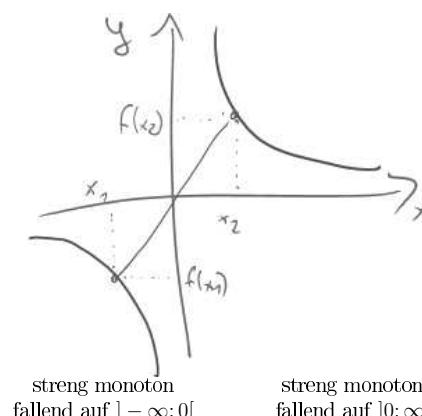


Abbildung 3.3.

- 382 -

Regel von L'Hospital

Satz: Führt die Betrachtung von $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)}$ auf einen unbestimmten Ausdruck der Form « $\frac{0}{0}$ » bzw. « $\frac{\infty}{\infty}$ », so gilt $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f'(x)}{g'(x)}$. Die Regel ist wiederholt anwendbar.

Anwendung der L'Hospitalschen Regel auf weitere unbestimmte Ausdrücke durch vorherige Transformation.

$\varphi(x)$	$\lim_{x \rightarrow x_0} \varphi(x)$ führt zu unbekanntem Ausdruck	Transformation
$f(x) \cdot g(x)$	« $0 \cdot \infty$ », « $0 \cdot -\infty$ »	$\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{\frac{1}{g(x)}} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{g(x)}{\frac{1}{f(x)}}$
$f(x) - g(x)$	« $\infty - \infty$ »	$\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{\frac{1}{g(x)} - \frac{1}{f(x)}}{\frac{1}{f(x) \cdot g(x)}}$
$f(x)^{g(x)}$	« 0^0 », « ∞^0 », « $1^{\pm\infty}$ »	$\lim_{x \rightarrow x_0} e^{g(x) \ln(f(x))} \quad (f(x) > 0)$

Beispiel:

1. Die Betragsfunktion $| \dots | : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto |x|$ ist in $x = 0$ nicht differenzierbar.

$$|x| = \begin{cases} x, & \text{falls } x \geq 0 \\ -x, & \text{falls } x < 0 \end{cases}$$

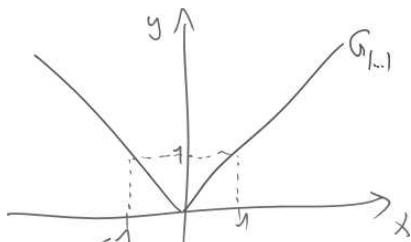


Abbildung 3.4.

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0^-} \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0^-} \frac{|\Delta x| - 0|}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0^-} \frac{-\Delta x}{\Delta x} = -1$$

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0^+} \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0^+} \frac{|\Delta x| - 0|}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0^+} \frac{\Delta x}{\Delta x} = +1$$

⇒ einseitige Grenzwerte existieren, stimmen jedoch nicht überein.

$$2. f(x) = \begin{cases} (x-1)^2, & \text{falls } x < 0 \\ (x+1)^2, & \text{falls } x \geq 0 \end{cases}$$

Behauptung: f ist in $x = 0$ nicht differenzierbar (HÜ)

3.2. Ableitung erster und höherer Ordnung**Definition:**

- a) Ist $f : \mathbb{D} \rightarrow \mathbb{R}$ differenzierbar (in \mathbb{D}), so heißt die Funktion $f' : \mathbb{D} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto f'(x)$ die Ableitung von f .

- b) Ist die Ableitung $f' : \mathbb{D} \rightarrow \mathbb{R}$ differenzierbar (in \mathbb{D}), so heißt $f''(x) = (f'(x))'$ die

zweite Ableitung von f ;

analog definiert man die k -te Ableitung durch
 $f^{(k)}(x) = (f^{(k-1)}(x))'$,
falls $f^{(k)}$ existiert.

Beispiel:

1. $f(x) = x^2, f'(x) = 2x, f''(x) = 2$
2. $f(x) = \sin(x), f'(x) = \cos(x), f''(x) = -\sin(x)$
3. $f(x) = e^x, f'(x) = e^x, f''(x) = e^x$
4. $f(x) = \ln x, f'(x) = \frac{1}{x}, f''(x) = -\frac{1}{x^2}$

3.3. Ableitungsregeln

Es seien u, v differenzierbare Funktionen, $\alpha \in \mathbb{R}$.

a) Summenregel $(u \pm v)' = u' \pm v'$

b) Faktorregel $(\alpha u)' = \alpha \cdot u'$ (α = multiplikative Konstante)

c) Produktregel $(u \cdot v)' = u' \cdot v + u \cdot v'$

Satz:

d) Quotientenregel $\left(\frac{u}{v}\right)' = \frac{u' \cdot v - u \cdot v'}{v^2}$

e) Kettenregel $(u \circ v)' = (u' \circ v) \cdot v'$ Nachdifferenzieren = Multiplikation mit v'

bzw. $u(v(x))' = u'(v(x)) \cdot v'(x)$

bzw. $\frac{du}{dx} = \frac{du}{dv} \cdot \frac{dv}{dx}$

3.3.1. Ableitung elementarer Funktionen

$f(x)$	$f'(x)$
x^n	nx^{n-1} ($n \in \mathbb{R}$)
$\sin x$	$\cos x$
$\cos x$	$-\sin x$
$\tan x$	$\frac{1}{\cos^2 x}$
$\cot x$	$-\frac{1}{\sin^2 x}$
e^x	e^x
a^x	$a^x \cdot \ln a$
$\ln x$	$\frac{1}{x}$
$\log_a x$	$\frac{1}{x \cdot \ln a}$
\sqrt{x}	$\frac{1}{2\sqrt{x}}$

Bemerkung: Mehrfaches Nachdifferenzieren

$u(v(w(x)))' = u'(v(w(x))) \cdot v(w(x))' = u'(v(w(x))) \cdot v'(w(x)) \cdot w'(x)$

bzw. $\frac{du}{dx} = \frac{du}{dv} \cdot \frac{dv}{dw} \cdot \frac{dw}{dx}$

Beispiel: $[\sin(\sqrt{x^2 + 1})]' = \cos(\sqrt{x^2 + 1}) \cdot \frac{1}{2\sqrt{x^2 + 1}} \cdot 2x$

3.4. Ableitung der Umkehrfunktion

Es sei $f : \mathbb{D} \rightarrow E$ eine differenzierbare, bijektive Funktion. Dann ist auch die Umkehrfunktion $f^{-1} : E \rightarrow \mathbb{D}$ differenzierbar und es gilt

Satz: $f^{-1}'(x) = \frac{1}{f'(f^{-1}(x))}$

Beispiel:

1. $e^x : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^+$ ist bijektiv.

Umkehrfunktion $\ln x : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$.

$$(\ln x)' = \frac{1}{e^{\ln x}} = \frac{1}{x}$$

2. $\sin : [-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}] \rightarrow [-1; 1]$ bijektiv

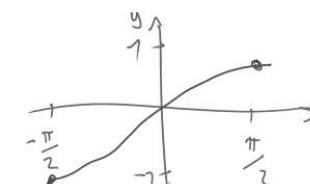


Abbildung 3.5.

Umkehrfunktion $\arcsin (= \sin^{-1}) : [-1; 1] \rightarrow [-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}]$

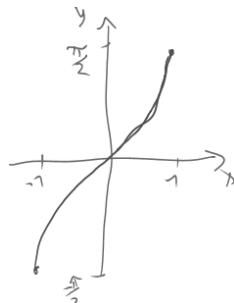


Abbildung 3.6.

$$\arcsin(x)' = \frac{1}{\cos(\arcsin(x))}$$

trigonometrischer Pythagoras: $\cos^2 x + \sin^2 x = 1$
 $\Leftrightarrow \cos^2 x = 1 - \sin^2 x$

- 391 -

$$\underset{\cos x \geq 0}{\Leftrightarrow} \cos x = \sqrt{1 - \sin^2 x}$$

$$\cos(\arcsin(x)) > 0 \quad (-\frac{\pi}{2} \leq \arcsin x \leq \frac{\pi}{2})$$

$$\Rightarrow \arcsin(x)' = \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2(\arcsin(x))}} = \frac{1}{\sqrt{1 - x^2}}$$

3. Ableitung $\arccos(x)$ HÜ

- 392 -

Definition: $f : [a; b] \rightarrow \mathbb{R}$ besitzt bei $x_0 \in]a; b[$ ein (isoliertes) $\begin{cases} \text{lokales Maximum} \\ \text{lokales Minimum} \end{cases}$, wenn $\begin{cases} f(x) < f(x_0) \\ f(x) > f(x_0) \end{cases}$ für alle $x \in U_\epsilon(x_0) \setminus \{x_0\}$ gilt (für ein $\epsilon > 0$).
 $U_\epsilon(x_0) =]x_0 - \epsilon, x_0 + \epsilon[$ « ϵ -Umgebung von x_0 »

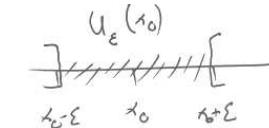


Abbildung 3.7.

- 393 -

Der Punkt $P(x_0; f(x_0))$ heißt dann $\begin{cases} \text{Hochpunkt (HP)} \\ \text{Tiefpunkt (TP)} \end{cases}$. Ein lokales Maximum/Minimum heißt auch lokales Extremum.

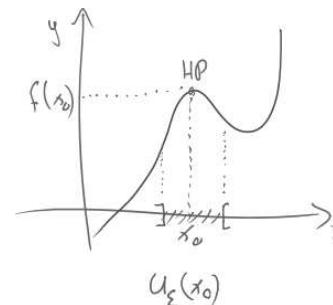


Abbildung 3.8. – lokales Maximum

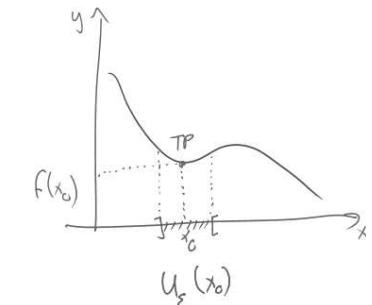


Abbildung 3.9. – lokales Minimum

- 394 -

f hat bei $x_0 \in [a; b]$ ein $\begin{cases} \text{globales Maximum} \\ \text{globales Minimum} \end{cases}$, wenn $\begin{cases} f(x) \leq f(x_0) \\ f(x) \geq f(x_0) \end{cases}$ für alle $x \in [a; b]$ gilt.

$f(x_0)$ heißt dann globales Maximum bzw. Minimum (von f).

Bemerkung: hat f bei x_1, \dots, x_n alle lokalen Extrema, so gilt:

globales Maximum/Minimum = Max/Min $\{f(a), f(x_1), \dots, f(x_n), f(b)\}$ Ränder des Intervalls berücksichtigen!

Definition: Hat $f : [a; b] \rightarrow \mathbb{R}$ bei $x = a$ oder $x = b$ (Ränder des Intervalls) ein globales Maximum/Minimum, so nennt man $f(x_0)$ ein Randmaximum/Randminimum.

- 395 -

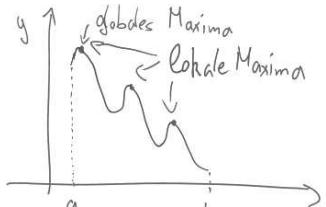


Abbildung 3.10.

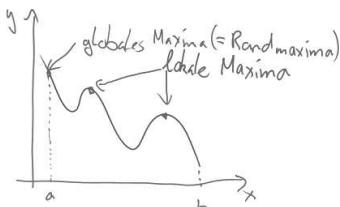


Abbildung 3.11.

Satz:

f sei differenzierbar; $x_0 \in]a; b[$
 f hat bei x_0 ein lokales $\begin{cases} \text{Maximum} \\ \text{Minimum} \end{cases}$
 $\Leftrightarrow f'$ wechselt bei x_0 das Vorzeichen $\begin{cases} \text{von + nach -} \\ \text{von - nach +} \end{cases}$.

- 396 -

notwendiges Kriterium für Extremum

Satz: f sei stetig differenzierbar, d.h. differenzierbar und f' sei stetig.
 Besitzt f bei $x_0 \in]a; b[$ ein lokales Extremum, so gilt $f'(x_0) = 0$

hinreichendes Kriterium für Extremum

Satz: f sei zweimal stetig differenzierbar, d.h. f'' existiert und ist stetig.
 Gilt dann $f'(x_0) = 0$ und $\begin{cases} f''(x_0) > 0 \\ f''(x_0) < 0 \end{cases}$ für ein $x_0 \in]a; b[$, so hat f bei x_0 ein (isoliertes) $\begin{cases} \text{lokales Minimum} \\ \text{lokales Maximum} \end{cases}$.

Beispiel:

1. $f(x) = -2(x - 3)^2 + 4$
 $f'(x) = -4(x - 3) = -4x + 12$

- 397 -

$$\begin{aligned} f''(x) &= -4 < 0 \\ f'(x) = 0 &\Leftrightarrow -4(x - 3) = 0 \Leftrightarrow x = 3 \\ \Rightarrow f \text{ hat bei } x = 3 \text{ ein lokales Maximum} \end{aligned}$$

2. $f(x) = x^4$
 $f'(x) = 4x^3$
 $f''(x) = 12x^2$
 $f'(x) = 0 \Leftrightarrow 4x^3 = 0 \Leftrightarrow x = 0$

Jedoch ist $f''(0) = 0 \Rightarrow$ Kriterium nicht anwendbar.
 $f'(x) = 4x^3$ hat aber bei $x = 0$ einen Vorzeichenwechsel von $-$ nach $+$ $\Rightarrow f$ hat bei $x = 0$ ein lokales Minimum.

3. $f(x) = |x|$
 $f'(x) = \begin{cases} +1, & \text{für } x > 0 \\ -1, & \text{für } x < 0 \end{cases}$
 $f'(0)$ existiert nicht.
 $f'(x) = \text{sgn}(x) \quad (x \neq 0)$
 $f'(x)$ hat bei $x = 0$ einen Vorzeichenwechsel von $-$ nach $+$ $\Rightarrow f$ hat bei $x = 0$ ein

- 398 -

lokales Minimum.

Definition: f heißt in einer Umgebung $U_\epsilon(x_0)$ von x_0 (oder bei x_0 (mit kleiner Umgebung)) linksgekrümmt $\left\{ \begin{array}{l} \text{linksgekrümmt} \\ \text{rechtsgekrümmt} \end{array} \right\}$, wenn die Ableitung f' auf $U_\epsilon(x_0)$ streng monoton steigt $\left\{ \begin{array}{l} \text{streng monoton steigt} \\ \text{streng monoton fällt} \end{array} \right\}$.

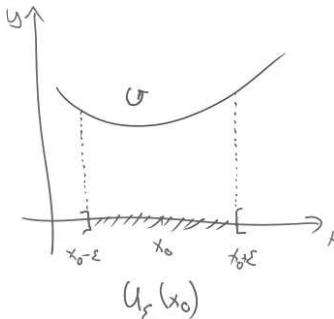


Abbildung 3.12. – linksgekrümmt

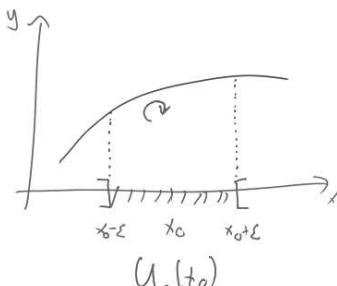


Abbildung 3.13. – rechtsgekrümmt

- 399 -

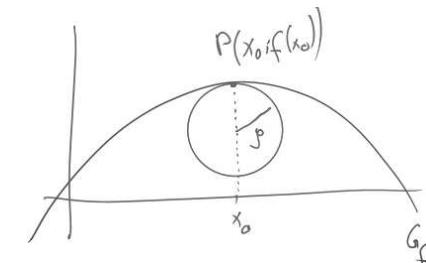


Abbildung 3.14. – ρ = Krümmungsradius

Beispiel: Behauptung: Ein Kreis mit Radius R hat konstante Krümmung $|\kappa| = \frac{1}{R}$.

$$x^2 + y^2 = R^2$$

Kreisgleichung nach y umstellen

- 401 -

f sei zweimal stetig differenzierbar. Dann gilt:

Satz: f ist bei x_0 linksgekrümmt $\left\{ \begin{array}{l} \text{linksgekrümmt} \\ \text{rechtsgekrümmt} \end{array} \right\}$ genau dann, wenn $\left\{ \begin{array}{l} f''(x_0) > 0 \\ f''(x_0) < 0 \end{array} \right\}$ gilt.

Definition: Der Zahlenwert $\kappa = \frac{y''(x_0)}{(1 + y'(x_0)^2)^{\frac{3}{2}}}$ heißt Krümmung der Kurve $y = f(x)$ im

Punkt $P(x_0; f(x_0))$

Mit $\rho = \frac{1}{|\kappa|}$ bezeichne man den Krümmungsradius.

Bemerkung: ρ ist der Radius des Krümmungskreises (Schmiegerkreis) an die Kurve $y = f(x)$ im Punkt $P(x_0; f(x_0))$.

- 400 -

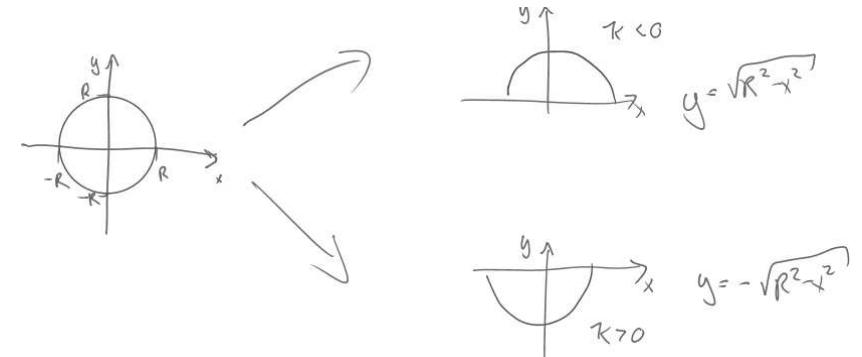


Abbildung 3.15.

$$\begin{aligned} x^2 + y^2 &= R^2 \\ \Leftrightarrow y^2 &= R^2 - x^2 \mid \pm \sqrt{} \\ \Leftrightarrow y &= \pm \sqrt{R^2 - x^2} \end{aligned}$$

Berechne Krümmung κ für oberen Halbkreis:

$$\begin{aligned}y &= \sqrt{R^2 - x^2} \\y' &= \frac{1}{2\sqrt{R^2 - x^2}} \cdot (-2x) = \frac{-x}{\sqrt{R^2 - x^2}} \\y'' &= \frac{-\sqrt{R^2 - x^2} + x \cdot \frac{-x}{\sqrt{R^2 - x^2}}}{R^2 - x^2} = H\end{aligned}$$

Definition: $W(x_0; f(x_0))$ heißt Wendepunkt von $f : \mathbb{D} \rightarrow \mathbb{R}, x_0 \in \mathbb{D}$, wenn f bei x_0 das Krümmungsverhalten wechselt.

Gleichwertig mit dem Wechsel des Krümmungsverhaltens ist der Wechsel des Vorzeichens der zweiten Ableitung f'' bei $x = x_0$.

- 403 -

Bemerkung: Ist z.B. $f'''(x_0) = 0$, so kann obiges Kriterium nicht verwendet werden → Vorzeichenwechsel von f''' bei $x = x_0$ nachweisen.

- 405 -

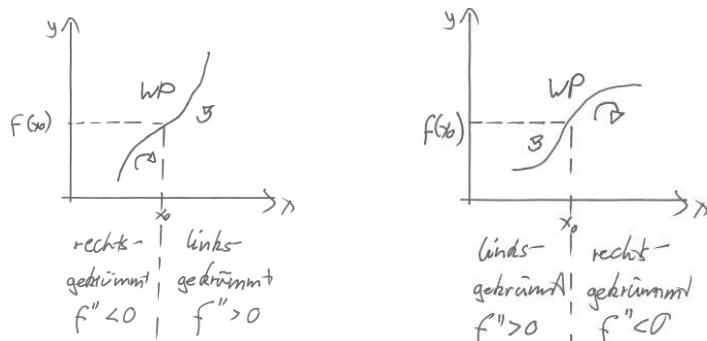


Abbildung 3.16.

hinreichendes Kriterium für WP

Satz: f sei 3-mal differenzierbar und f''' sei in x_0 stetig.
 $x_0 \in]a; b[$.
Gilt dann $f''(x) = 0$ und $f'''(x) \neq 0$, so hat f bei x_0 einen Wendepunkt.

- 404 -

4. Elementare Funktionen und Kurven

4.1. Potenzfunktionen

Definition: Funktionen der Form $f(x) = a \cdot x^r$ ($a, r \in \mathbb{R}$) heißen Potenzfunktionen.

406

A) Ganzzahlige Exponenten $r = n \in \mathbb{Z}$

$$n > 0 \quad (\mathbb{D} = \mathbb{R})$$

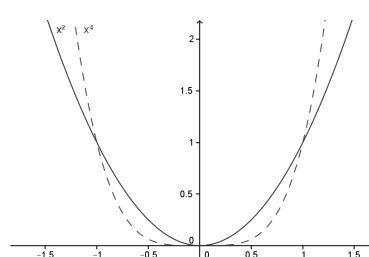


Abbildung 4.1. – n gerade (Achsen-symmetrisch)

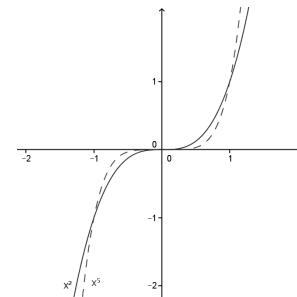


Abbildung 4.2. – n ungerade (Punkt-symmetrisch)

B) Rationale Exponenten $r = \frac{p}{q}, p \in \mathbb{Z}, q \in \mathbb{N}, r \notin \mathbb{Z}$

$$n > 0 \quad (\mathbb{D} = \mathbb{R}_0^+)$$

$$x^{\frac{p}{q}} = \sqrt[q]{x^p}$$

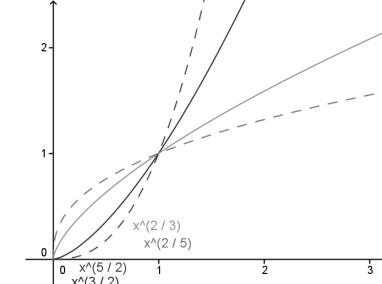


Abbildung 4.5.

$$n < 0 \quad (\mathbb{D} = \mathbb{R}^+)$$

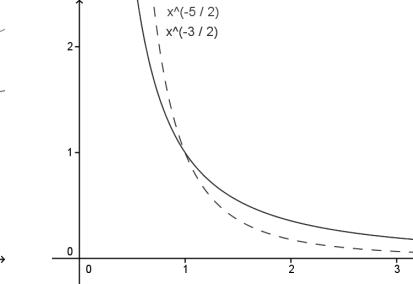


Abbildung 4.6.

$$n < 0 \quad (\mathbb{D} = \mathbb{R} \setminus \{0\})$$

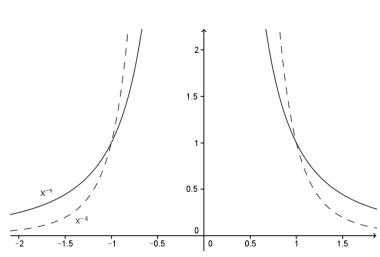


Abbildung 4.3. – n gerade (Achsen-symmetrisch)

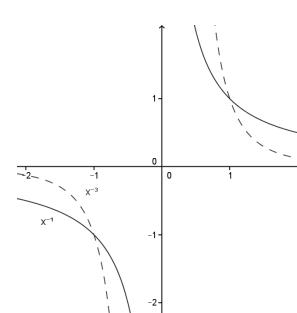


Abbildung 4.4. – n ungerade (Punkt-symmetrisch)

C) Irrationaler Exponent z.B. $r = \sqrt{2} = 1,4142\dots$

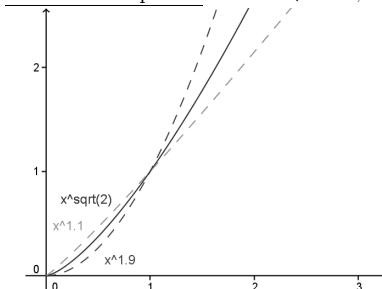


Abbildung 4.7.

Umkehrfunktion zu $f(x) = x^r$ ist $f^{-1}(x) = x^{\frac{1}{r}}$
 $G_{f^{-1}}$ durch Spiegelung von G_f an der Winkelhalbierenden $y = x$.

Ableitung: $(x^r)' = rx^{r-1}$ ($r \in \mathbb{R}$)

Grenzwerte: für $x \rightarrow \pm\infty$

$$\lim_{x \rightarrow \pm\infty} x^r = \begin{cases} +\infty & , \text{falls } r \text{ gerade} \\ \pm\infty & , \text{falls } r \text{ ungerade} \end{cases} \quad r \in \mathbb{Z}, r > 0$$

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} x^r = +\infty \text{ für } r \notin \mathbb{Z}, r > 0$$

$$\lim_{x \rightarrow \pm\infty} x^r = 0 \text{ für } r \in \mathbb{Z}, r < 0$$

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} x^r = 0 \text{ für } r \notin \mathbb{Z}, r < 0$$

- 411 -

Ist x_0 eine Nullstelle einer ganzrationalen Funktion $f(x)$ vom Grad n so kann $f(x)$ geschrieben werden als

$$\boxed{f(x) = (x - x_0)^r \cdot g(x)}$$

mit $g(x_0) \neq 0$; $g(x)$ ist eine ganzrationale Funktion vom Grad $n - r$

r heißt Vielfachheit der Nullstelle x_0 von f

Bemerkung: Die Darstellung erhält man durch (sukzessive) Polynomdivision.

Hauptsatz der (reellen) Algebra

Jede ganzrationale Funktion $f(x)$ vom Grad $n \geq 1$ besitzt eine Darstellung der Form

$$\boxed{f(x) = a \cdot (x - x_1)^{e_1} \cdot (x - x_2)^{e_2} \cdots (x - x_r)^{e_r} \cdot q_1 \cdots q_s}$$

vorbei x_1, \dots, x_r die Nullstellen von $f(x)$ mit Vielfachheiten e_1, \dots, e_r , $a \in \mathbb{R}$ und q_1, \dots, q_s (Unzerlegbare, d.h. Diskriminante $D < 0$) quadratische ganzrationale Funktionen sind. Obige Darstellung heißt vollständige Faktorisierung von $f(x)$. Die Faktoren $(x - x_i)$ heißen Linearfaktoren ($i = 1, \dots, r$).

- 413 -

4.2. Ganzrationale Funktionen

Definition: Funktionen der Form

$$f(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0$$

$(a_0, \dots, a_n \in \mathbb{R}, a_n \neq 0)$ heißen ganzrationale Funktionen, n ist der Grad von f ; $n = \text{grad}(f)$.

- $n = 1$: $f(x) = a_1 x + a_0$ lineare Funktionen

- $n = 2$: $f(x) = a_2 x^2 + a_1 x + a_0$ quadratische Funktionen

- $n = 3$: $f(x) = a_3 x^3 + a_2 x^2 + a_1 x + a_0$ kubische Funktionen

Nullstellen mit Vielfachheiten

Folgerung: Eine ganzrationale Funktion $f(x)$ vom Grad $n \geq 1$ besitzt (mit Vielfachheiten gezählt) höchstens n Nullstellen.

Beispiel: $f(x) = 2x^5 - 4x^4 + 2x^3 + 2x^2 - 4x + 2$

Finde Nullstellen von $f(x)$ durch «Probieren» Teste alle Teiler des «konstanten Glieds», hier 2:

$$\pm 1; \pm 2 \Rightarrow f(1) = 0$$

\Rightarrow Polynomdivision $f(x) : (x - 1) = 2x^4 - 2x^3 + 0x^2 + 2x - 2$

$$f(x) : (x - 1) = 2x^4 - 2x^3 + 0x^2 + 2x - 2 \quad | \cdot (x - 1)$$

$$f(x) = \underbrace{(x - 1)}_{\text{Linearfaktor}} \cdot \underbrace{(2x^4 - 2x^3 + 0x^2 + 2x - 2)}_{f_1(x)}$$

$$f_1(1) = 0 \quad \Rightarrow \text{Polynomdivision } f_1(x) : (x - 1) = 2x^3 + 0x^2 + 0x + 2$$

$$f_1(x) = (x - 1) \cdot (2x^3 + 2) = 2 \cdot \underbrace{(x - 1)}_{\text{Linearfaktor}} \cdot \underbrace{(x^3 + 1)}_{f_2(x)}$$

$$f(x) = 2 \cdot (x - 1)^2 \cdot \underbrace{(x^3 + 1)}_{f_2(x)}$$

- 412 -

- 414 -

Wegen $f_2(1) \neq 0$ kann kein weiterer Linearfaktor $(x - 1)$ durch Polynomdivision abgespalten werden.

Da $f_2(-1) = 0 \Rightarrow$ Polynomdivision $f_2(x) : (x + 1) = x^2 - x + 1$

$$f_2(x) = \underbrace{(x + 1)}_{\text{Linearfaktor}} \cdot \underbrace{(x^2 - x + 1)}_{f_3(x)}$$

Für $f(x)$ folgt: $f(x) = 2 \cdot (x - 1)^2(x + 1)(x^2 - x + 1)$ (*)

Die quadratische Funktion $x^2 - x + 1$ ist (über \mathbb{R}) unzerlegbar, da für die Diskriminante $D = 1 - 4 < 0$ gilt.

\Rightarrow (*) ist vollständige Faktorisierung von $f(x)$

$f(x)$ hat die Nullstellen:

$x_1 = 1$ (2-fach)

$x_2 = -1$ (1-fach)

Der quadratische Faktor $x^2 - x + 1$ ist stets positiv, d.h. $x^2 - x + 1 > 0$ für alle $x \in \mathbb{R}$

- 415 -

VZT für $f(x)$:

	$-\infty < x < -1$	$x = -1$	$-1 < x < 1$	$x = 1$	$1 < x < \infty$
2	+	+	+	+	+
$x + 1$	-	0	+	+	+
$(x - 1)^2$	+	+	+	0	+
$x^2 - x + 1$	+	+	+	+	+
$f(x)$	-	0	+	0	+

Skizze: $f(0) = 2$

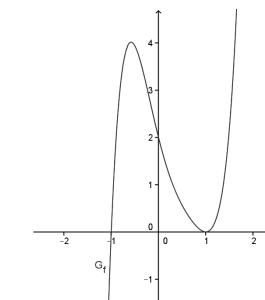


Abbildung 4.8.

- 417 -

Verlauf von G_f in der Nähe von einer Nullstelle x_0 mit Vielfachheit r .

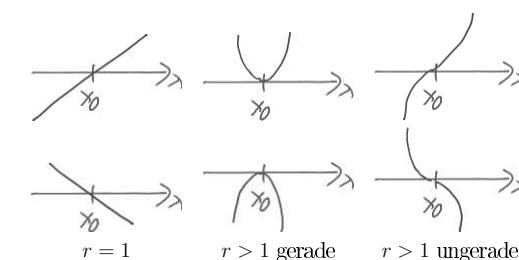


Abbildung 4.9.

Umkehrfunktion: meist nur stückweise definiert (auf Intervallen, in denen f streng monoton steigt/fällt).

Ableitung: $f'(x) = n a_n x^{n-1} + (n-1) a_{n-1} x^{n-2} + \dots + a_2 2x + a_1$

- 416 -

- 418 -

Grenzwerte: $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0 = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} a_n x^n$

Der Term $a_n x^n$ heißt Leitterm von $f(x) = a_n x^n + \dots + a_0$. Das Verhalten von $f(x)$ im Unendlichen wird durch das Verhalten des Leitterms im Unendlichen bestimmt.

Beweis: $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} a_n x^n + \dots + a_0 = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} (a_n x^n) \left(1 + \underbrace{\frac{a_{n-1}}{a_n} \frac{1}{x} + \frac{a_{n-2}}{a_n} \frac{1}{x^2} + \dots + \frac{a_1}{a_n} \frac{1}{x^{n-1}} + \frac{a_0}{a_n} \frac{1}{x^n}}_{\rightarrow 1} \right) = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} a_n x^n$

- [Hebbare Definitionslücken]

x_0 ist Polstelle von $f(x) = \frac{Z(x)}{N(x)}$, wenn $|f(x)|$ (=Betrag von $f(x)$) in einer Umgebung $U_\epsilon(x_0)$ unbegrenzt wächst, d.h. falls

$$\lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x) = \pm\infty, \lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x) = \pm\infty$$

x_0 ist hebbare Definitionslücke von $f(x) = \frac{Z(x)}{N(x)}$, wenn

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = c < \infty$$
 gilt.

hinreichendes Kriterium für Polstelle

Satz: Gilt $Z(x_0) \neq 0$ und $N(x_0) = 0$, so hat $f(x) = \frac{Z(x)}{N(x)}$ bei $x = x_0$ einen Pol, d.h. x_0 ist eine Polstelle.

Allgemeine Vorgehensweise zur Bestimmung der Polstellen (mit entsprechender Ordnung) von

- 419 -

- 421 -

4.3. gebrochen rationale Funktionen

Definition: Funktionen der Form

$$f(x) = \frac{Z(x)}{N(x)}$$

wobei $Z(x), N(x)$ ganzrationale Funktionen sind, heißen gebrochen-rationale Funktionen.

Ist $\text{grad}(Z(x)) < \text{grad}(N(x))$, so heißt $f(x)$ echt gebrochen-rational, ansonsten unecht gebrochen-rational.

Maximale Definitionsmenge: $\mathbb{D} = \mathbb{R} \setminus \{x \mid N(x) = 0\}$

Nullstellen: x_0 ist Nullstelle von $f(x)$

$$\Leftrightarrow Z(x_0) = 0 \text{ und } x_0 \in \mathbb{D}$$

$$\Leftrightarrow Z(x_0) = 0 \text{ und } N(x_0) \neq 0$$

Definitionslücken: Definitionslücken = Nullstellen des Nenners $N(x)$

- [Polstellen]

- 420 -

$$f(x) = \frac{Z(x)}{N(x)}$$

1. Zerlege $Z(x)$ und $N(x)$ vollständig in lineare und (unzerlegbare) quadratische Faktoren (vollständige Faktorisierung)

2. Kürze anschließend gleiche Faktoren von Zähler und Nenner \Rightarrow neuer Zähler $Z^*(x)$, neuer Nenner $N^*(x)$

$Z^*(x)$ und $N^*(x)$ haben keine gemeinsamen (reellen) Nullstellen und es gilt:

$$f(x) = \frac{Z(x)}{N(x)} = \frac{Z^*(x)}{N^*(x)} \quad (\text{auf } \mathbb{D})$$

Die Polstellen von $f(x)$ sind genau die Nullstellen von $N^*(x)$, die Vielfachheiten der Nullstelle von $N^*(x)$ sind die sogenannten Ordnungen der Polstellen (oder Pole).

Bemerkung: Ist x_0 eine hebbare Definitionslücke, d.h. $N(x_0) = 0$ und x_0 ist keine Polstelle, so besitzt der Graph von f an der Stelle $L(x_0; y_0)$ ein «Loch».

- 422 -

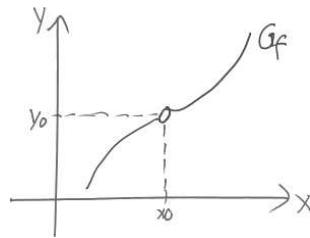


Abbildung 4.10.

Dabei gilt:

$$y_0 = \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{Z(x)}{N(x)} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{Z^*(x)}{N^*(x)} = \frac{Z^*(x_0)}{N^*(x_0)}$$

also:

$$y_0 = \frac{Z^*(x_0)}{N^*(x_0)}$$

$N^*(x_0) \neq 0$, da x_0 eine hebbare Definitionslücke ist.

- 423 -

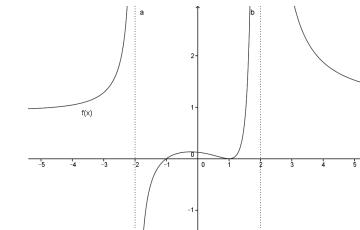


Abbildung 4.11.

- 425 -

Beispiel:

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

keine gemeinsamen Faktoren: $Z(x) = Z^*(x)$, $N(x) = N^*(x)$

$$\Rightarrow \frac{Z(x)}{N(x)} = \frac{Z^*(x)}{N^*(x)}$$

\Rightarrow Nullstellen:

$$x_1 = 1 \quad (2\text{-fach}) \text{ (kein VZW)}$$

$$x_2 = -1 \quad (1\text{-fach}) \text{ (VZW)}$$

\Rightarrow Polstellen:

$$x_{p1} = 2 \quad (\text{Ordnung } 2) \text{ (kein VZW)}$$

$$x_{p2} = -2 \quad (\text{Ordnung } 1) \text{ (VZW)}$$

alle Definitionslücken sind Polstellen \Rightarrow keine hebbaren Definitionslücken

- 424 -

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

Definitionslücke: $x_1 = 1 \Rightarrow$ maximale Definitionsmenge $\mathbb{D} = \mathbb{R} \setminus \{1\}$

\Rightarrow Bruchterm vollständig Kürzen:

$$f(x) = \frac{x+2}{(x-1)^2} = \frac{Z^*(x)}{N^*(x)}$$

\Rightarrow Nullstellen:

$$x_{n1} = -2 \quad (1\text{-fach}) \text{ (VZW)}$$

\Rightarrow Polstellen:

$$x_{p1} = 1 \quad (2. \text{ Ordnung}) \text{ (kein VZW)}$$

- 426 -

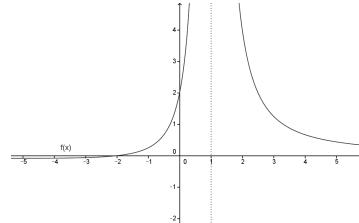


Abbildung 4.12.

- 427 -

$$y_{h2} = \lim_{x \rightarrow x_{h2}} f(x) = \lim_{x \rightarrow x_{h2}} \frac{Z(x)}{N(x)} = \lim_{x \rightarrow x_{h2}} \frac{Z^*(x)}{N^*(x)} = \lim_{x \rightarrow x_{h2}} \frac{Z^*(2)}{N^*(2)} = 0$$

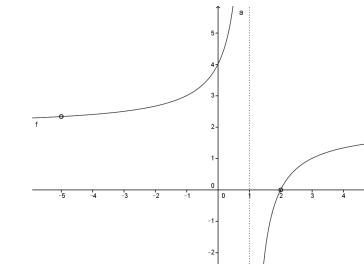


Abbildung 4.13.

- 429 -

$$3. f(x) = \frac{2(x-2)^2(x+5)}{(x-1)(x-2)(x+5)}$$

Definitionsbrüche: $x_1 = -5, x_2 = 1, x_3 = 2$ \Rightarrow maximale Definitionsmenge $\mathbb{D} = \mathbb{R} \setminus \{-5; 1; 2\}$

Bruchterm vollständig kürzen:

$$f(x) = \frac{2(x-2)}{x-1} = \frac{Z^*(x)}{N^*(x)}$$

 \Rightarrow Nullstellen: $Z^*(x) = 0 \Leftrightarrow x = 2 \notin \mathbb{D} \Rightarrow f$ hat keine Nullstellen \Rightarrow Polstellen:

$$x_{p1} = 1 \quad (1. \text{ Ordnung}) \text{ (VZW)}$$

Hebbare Definitionsbrüche: $x_{h1} = -5; x_{h2} = 2 \quad (\Rightarrow 2 \text{ Löcher im Graphen})$

$$y_{h1} = \lim_{x \rightarrow x_{h1}} f(x) = \lim_{x \rightarrow x_{h1}} \frac{Z(x)}{N(x)} = \lim_{x \rightarrow x_{h1}} \frac{Z^*(x)}{N^*(x)} = \lim_{x \rightarrow x_{h1}} \frac{Z^*(-5)}{N^*(-5)} = \frac{-14}{-6} = \frac{7}{3}$$

- 428 -

Asymptoten:

- senkrechte Asymptoten:

Ist x_0 eine Polstelle von $f(x) = \frac{Z(x)}{N(x)}$, so ist die senkrechte Gerade $x = x_0$ eine Asymptote von $f(x)$.

- Asymptoten im Unendlichen:

Eine Funktion $p(x)$ heißt Asymptote von $f(x)$ für $x \rightarrow \pm\infty$, wenn

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) - p(x) = 0 \text{ bzw. } \lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) - p(x) = 0$$

Satz:1. Ist $f(x) = \frac{Z(x)}{N(x)}$ eine echt gebrochen-rationale Funktion, so gilt $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{Z(x)}{N(x)} = 0$,d.h. die Gerade $y = 0$ ($\hat{=} x$ -Achse) ist Asymptote für $f(x) = \frac{Z(x)}{N(x)}$ für $x \rightarrow +\infty$ und für $x \rightarrow -\infty$.2. Ist $f(x) = \frac{Z(x)}{N(x)}$ eine unecht gebrochen-rationale Funktion, d.h. $\text{grad}(Z(x)) \geq$

- 430 -

$\text{grad}(N(x))$, so erhält man aus der Polynomdivision (mit Rest) $Z(x) : N(x)$ eine ganz-rationale Funktion $p(x)$ und eine echt gebrochen-rationale Funktion $\frac{R(x)}{N(x)}$
 mit $\frac{Z(x)}{N(x)} = p(x) + \frac{R(x)}{N(x)}$ ($R(x)$ = Rest der Polynomdivision)

Dann ist $p(x)$ Asymptote für $f(x) = \frac{Z(x)}{N(x)}$ für $x \rightarrow +\infty$ und für $x \rightarrow -\infty$, denn
 $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} f(x) - p(x) = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{Z(x)}{N(x)} - p(x) = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{R(x)}{N(x)} = 0$ (siehe 1.)

Die Nullstellen von $\frac{R(x)}{N(x)}$ sind genau die Schnittpunkte (= x-Koordinaten der Schnittpunkte) von $f(x)$ mit der Asymptote $p(x)$.

Beispiel: $f(x) = \frac{\frac{1}{2}x^3 - \frac{3}{2}x + 1}{x^2 + 3x + 2}$ (unecht gebrochen-rationale Funktion)

$$\begin{aligned} Z(x) &= \frac{1}{2}x^3 - \frac{3}{2}x + 1 = \frac{1}{2}(x^3 - 3x + 1) \\ Z(1) &= 0 \end{aligned}$$

- 431 -

$$\Rightarrow (x^3 - 3x + 2) : (x - 1) = x^2 + x - 2$$

$$\Rightarrow Z(x) = \frac{1}{2}(x^2 + x - 2)(x - 1)$$

$$\begin{aligned} x^2 + x - 2 &\text{ weiter zerlegen: Diskriminante } D = 1 - 4(-2) = 9 > 0 \\ x_{1/2} &= \frac{-1 \pm 3}{2} \quad x_1 = -2, x_2 = 1 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow Z(x) = \frac{1}{2}(x + 2)(x - 1)^2$$

Analog für Nennerpolynom: $N(x) = x^2 + 3x + 2 = (x + 1)(x + 2)$

Somit folgt:

$$f(x) = \frac{Z(x)}{N(x)} = \frac{\frac{1}{2}(x - 1)^2(x + 2)}{(x + 1)(x + 2)} = \frac{\frac{1}{2}(x - 1)^2}{x + 1} = \frac{(x - 1)^2}{2(x + 1)} = \frac{Z^*(x)}{N^*(x)}$$

Definitionslöcher: $x_1 = -1, x_2 = -2$

maximale Definitionsmenge: $\mathbb{D} = \mathbb{R} \setminus \{-2; -1\}$

Nullstellen: $x_n = 1 \in \mathbb{D}$ (2-fach)

- 432 -

Polstellen: $x_p = -1$ (1. Ordnung) (VZW)

hebbare Definitionslücke: $x_h = -2$
 $y_h = \lim_{x \rightarrow x_h} f(x) = \frac{Z^*(-2)}{N^*(-2)} = -4,5$

Asymptoten:

senkrechte Asymptote: $x = -1$

Asymptote im Unendlichen: Polynomdivision $Z(x) : N(x)$ bzw. $Z^*(x) : N^*(x) = (x - 1)^2 : 2(x + 1)$

$$(x^2 - 2x + 1) : (2x + 2) = \frac{1}{2}x - \frac{3}{2} \quad R(x) = 4$$

$$\Rightarrow f(x) = \frac{1}{2}x - \frac{3}{2} + \frac{4}{2x + 2} = \frac{1}{2}x - \frac{3}{2} + \frac{2}{x + 1}$$

\Rightarrow Asymptote für $x \rightarrow \pm\infty$

$$p(x) = \frac{1}{2}x - \frac{3}{2}$$

- 433 -

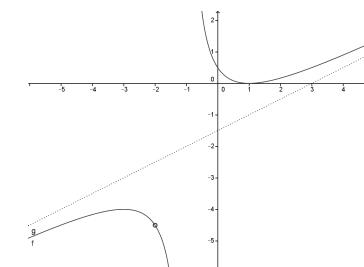


Abbildung 4.14.

- 434 -

4.4. Exponential- und Logarithmusfunktionen

Definition: Funktionen der Form $f(x) = a^x$ ($a > 0, a \neq 1$) (oder allgemein $f(x) = c \cdot a^x, c \in \mathbb{R}, c \neq 0$) heißen Exponentialfunktionen ($\mathbb{D} = \mathbb{R}$)

$a > 1$:

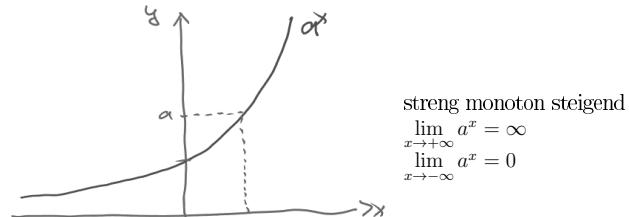


Abbildung 4.15.

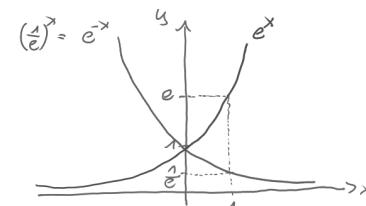


Abbildung 4.17.

Ableitung: $(a^x)' = a^x \cdot \ln(a)$ (insbesondere $(e^x)' = e^x$)

$0 < a < 1$:

- 435 -

Definition: Funktionen der Form $f(x) = \log_a(x)$ ($a > 0, a \neq 1$) heißen Logarithmusfunktionen ($\mathbb{D} = \mathbb{R}^+$)

- 437 -

$a > 0$:

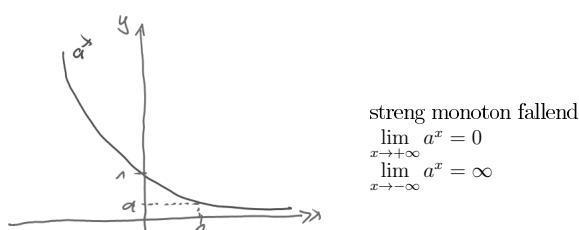
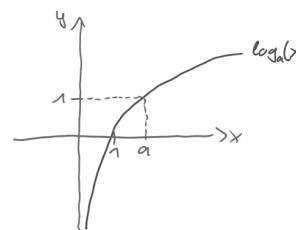


Abbildung 4.16.



streng monoton fallend
 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \log_a(x) = 0$
 $\lim_{x \rightarrow -\infty} \log_a(x) = -\infty$

Abbildung 4.18.

$0 < a < 0$:

$(a > 0, a \neq 0)$

Satz:

$$y = a^x \Leftrightarrow x = \log_a(y)$$

d.h. $\log_a(x) = f^{-1}(x)$ ist die Umkehrfunktion von $a^x = f(x)$

- 436 -

- 438 -

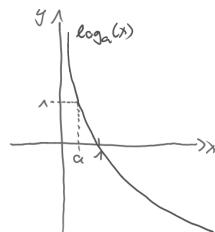
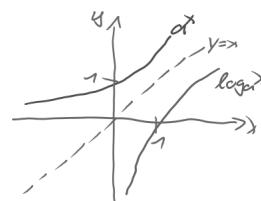


Abbildung 4.19.

streng monoton fallend
 $\lim_{x \rightarrow \infty} \log_a(x) = -\infty$
 $\lim_{x \rightarrow 0^+} \log_a(x) = \infty$

Ableitung: $(\log_a x)' = \frac{1}{x \cdot \ln a}$ (insbesondere $(\ln x)' = \frac{1}{x}$)

$$\log_b(x) = \frac{\log_a(x)}{\log_a(b)}$$

Abbildung 4.20. $-a > 1$

4.5. Trigonometrischen Funktionen

Definition: Als trigonometrischen Funktionen bezeichnet man die Funktionen $\sin x$, $\cos x$, $\tan x$ und $\cot x$.

- $\sin x : \mathbb{R} \rightarrow [-1; 1]$, $\cos x : \mathbb{R} \rightarrow [-1; 1]$

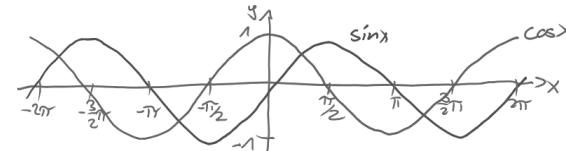


Abbildung 4.21.

Nullstellen:

$$\begin{aligned}\sin x = 0 \quad &x_k = k\pi \quad (k \in \mathbb{Z}) \\ \cos x = 0 \quad &x_k = \frac{\pi}{2}k\pi \quad (k \in \mathbb{Z})\end{aligned}$$

Periode: jeweils 2π

Ableitung:

$$\begin{aligned}(\sin x)' &= \cos x \\ (\cos x)' &= -\sin x\end{aligned}$$

Symmetrie:

$$\begin{aligned}\sin(-x) &= -\sin(x) \text{ (ungerade Funktion, punktsymmetrisch)} \\ \cos(-x) &= \cos(x) \text{ (gerade Funktion, achsensymmetrisch)}\end{aligned}$$

- allgemeine Sinusfunktion/Cosinusfunktion:

$$y = a \sin(bx + c), y = a \cos(bx + c)$$

$$[a > 0]$$

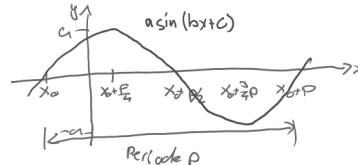


Abbildung 4.22.

(bei $a < 0$ Spiegelung an x -Achse)

Sinusschwingung: $y = a \sin(\omega t + \alpha_0)$

Cosinusschwingung: $y = a \sin(\omega t + \alpha_0)$

$t_0 = -\frac{\alpha_0}{\omega}$ «Startwert»

$T = \frac{2\pi}{\omega}$ Periode

$$\begin{aligned} bx_0 + c &= 0 \\ \Leftrightarrow x_0 &= -\frac{c}{b} \\ b(x_0 + p) + c &= 2\pi \\ \Leftrightarrow p &= \frac{2\pi - c}{b} - x_0 \\ \Leftrightarrow p &= \frac{2\pi}{b} - \frac{c}{b} + \frac{c}{b} \\ \Leftrightarrow p &= \frac{2\pi}{b} \end{aligned}$$

- 443 -

- $\tan x : \mathbb{D} \rightarrow \mathbb{R}$ $\mathbb{D} = \mathbb{R} \setminus \{\frac{\pi}{2} + k\pi \mid k \in \mathbb{Z}\}$

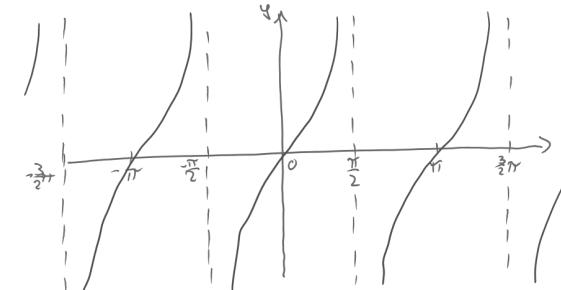


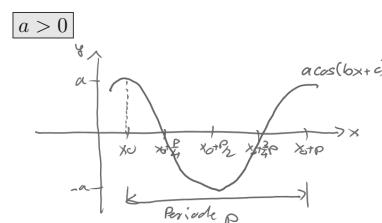
Abbildung 4.24.

Nullstellen:

$$x = k\pi \quad (k \in \mathbb{Z})$$

Polstellen:

- 445 -



$$\begin{aligned} \text{analog gilt:} \\ x_0 &= -\frac{c}{b} \\ p &= \frac{2\pi}{b} \end{aligned}$$

Abbildung 4.23.

(bei $a < 0$ Spiegelung an x -Achse)

- 444 -

$$x = \frac{\pi}{2} + k\pi \quad (k \in \mathbb{Z})$$

Periode: π

Ableitung:

$$(\tan x)' = \frac{1}{\cos^2 x}$$

Symmetrie:

$$\tan(-x) = -\tan x \quad (\text{ungerade Funktion, punktsymmetrisch})$$

- 446 -

- $\cot x : \mathbb{D} \rightarrow \mathbb{R}$ $\mathbb{D} = \mathbb{R} \setminus \{k\pi \mid k \in \mathbb{Z}\}$

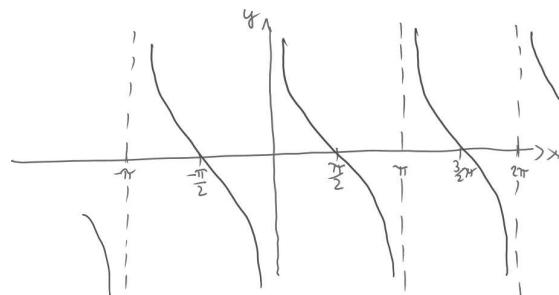


Abbildung 4.25.

Nullstellen:

$$x = \frac{\pi}{2} + k\pi \quad (k \in \mathbb{Z})$$

- 447 -

Zugehörige Umkehrfunktionen: Die trigonometrischen Funktionen sind nur auf entsprechenden Einschränkungen ihres Definitionsbereichs bijektiv (umkehrbar).

Funktion	Umkehrfunktion
Sinus <p>$\sin : [-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}] \rightarrow [-1; 1]$</p>	Arkussinus <p>$\arcsin : [-1; 1] \rightarrow [-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}]$</p>

- 449 -

Polstellen:

$$x = k\pi \quad (k \in \mathbb{Z})$$

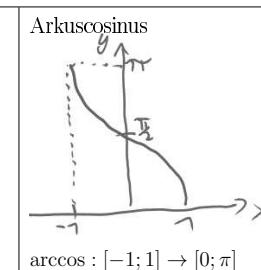
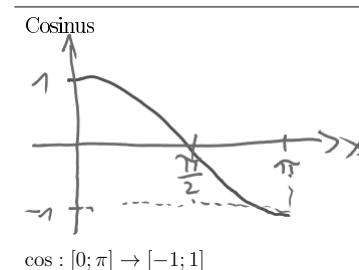
Periode: π Ableitung:

$$(\cot x)' = -\frac{1}{\sin^2 x}$$

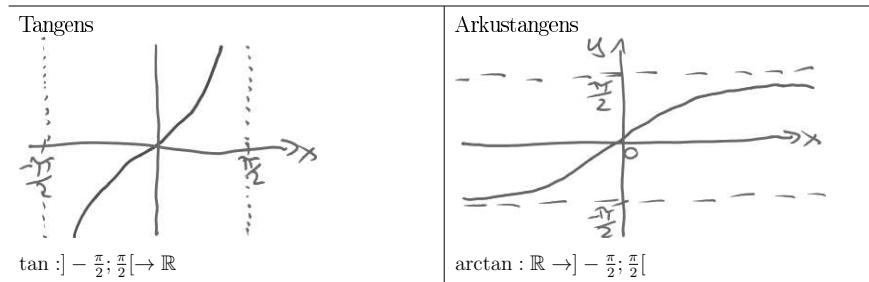
Symmetrie:

$$\cot(-x) = -\cot x \text{ (ungerade Funktion, punktsymmetrisch)}$$

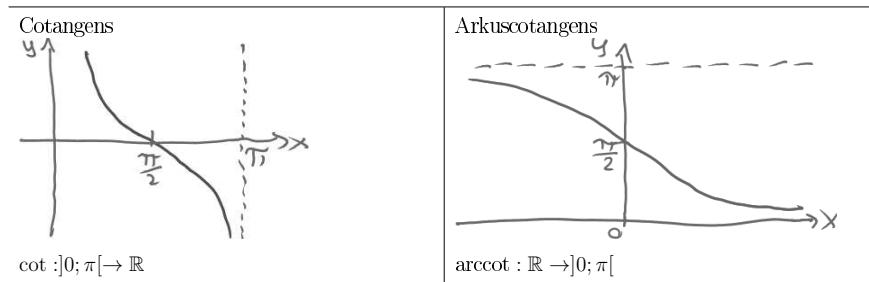
- 448 -



- 450 -



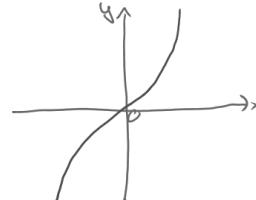
- 451 -



- 452 -

4.6. Hyperbelfunktionen**Definition:** Hyperbelfunktionen

a) Sinus hyperbolicus $\sinh(x) = \frac{1}{2}(e^x - e^{-x})$

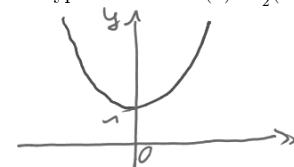


$\mathbb{D} = \mathbb{R}$

Asymptote für $x \rightarrow \pm\infty$: $y = \pm\frac{1}{2}e^{\pm x}$ Nullstelle: $x = 0$ Symmetrie: $\sinh(-x) = -\sinh(x)$ (ungerade Funktion, punktsymmetrisch)

- 453 -

b) Cosinus hyperbolicus $\cosh(x) = \frac{1}{2}(e^x + e^{-x})$



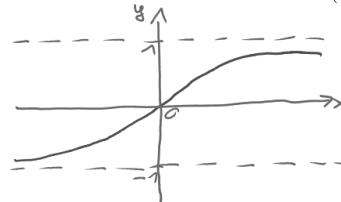
$\mathbb{D} = \mathbb{R}$

Asymptote für $x \rightarrow \pm\infty$: $y = \frac{1}{2}e^{\pm x}$

Nullstelle: keine

Symmetrie: $\cosh(-x) = \cosh(x)$ (gerade Funktion, achsensymmetrisch)

c) Tangens hyperbolicus $\tanh(x) = \frac{\sinh(x)}{\cosh(x)} = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$

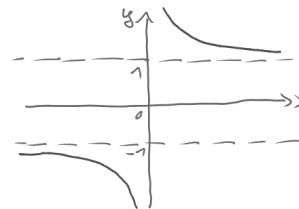


$\mathbb{D} = \mathbb{R}$

Asymptote für $x \rightarrow \pm\infty$: $y = \pm 1$ Nullstelle: $x = 0$ Symmetrie: $\tanh(-x) = -\tanh(x)$ (ungerade Funktion, punktsymmetrisch)

- 454 -

d) Cotangens hyperbolicus $\coth(x) = \frac{\cosh(x)}{\sinh(x)} = \frac{e^x + e^{-x}}{e^x - e^{-x}}$
 $\mathbb{D} = \mathbb{R} \setminus \{0\}$



Asymptote für $x \rightarrow \pm\infty$: $y = \pm 1$
 senkrechte Asymptote: $x = 0$
 Nullstelle: keine
 Polstelle: $x = 0$
 Symmetrie: $\coth(-x) = -\coth(x)$ (ungerade Funktion, punktsymmetrisch)

Ableitungen:

$$(\sinh x)' = \cosh x$$

$$(\cosh x)' = \sinh x$$

Additionstheoreme:

$$\sinh(x_1 \pm x_2) = \sinh x_1 \cosh x_2 \pm \cosh x_1 \sinh x_2$$

$$\cosh(x_1 \pm x_2) = \cosh x_1 \cosh x_2 \pm \sinh x_1 \sinh x_2$$

- 455 -

Hyperbolischer Pythagoras:

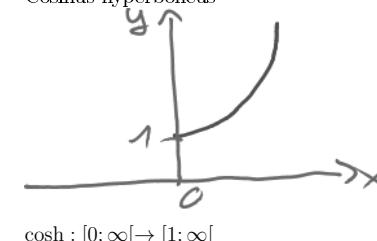
$$\cosh^2 x - \sinh^2 x = 1$$

- 456 -

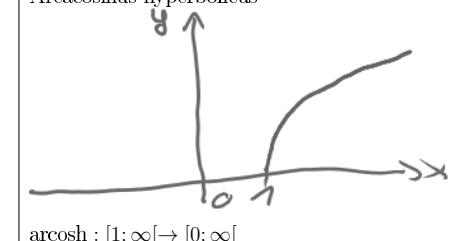
Zugehörige Umkehrfunktionen:

Funktion	Umkehrfunktion
Sinus hyperbolicus $\sinh : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$	Areasinus hyperbolicus $\text{arsinh} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$

- 457 -

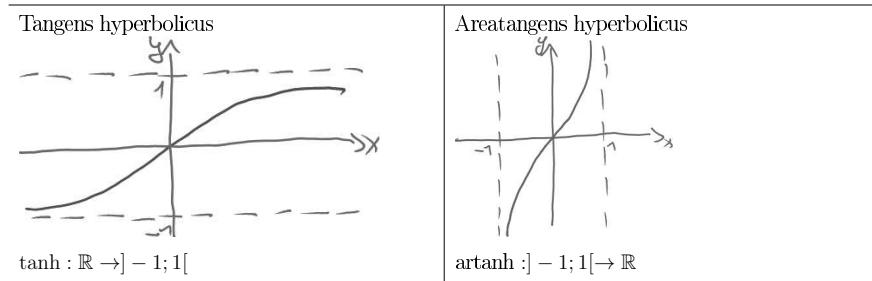
Cosinus hyperbolicus

$$\cosh : [0; \infty[\rightarrow [1; \infty[$$

Areacosinus hyperbolicus

$$\text{arcosh} : [1; \infty[\rightarrow [0; \infty[$$

- 458 -



- 459 -

Darstellung durch Logarithmusfunktionen:

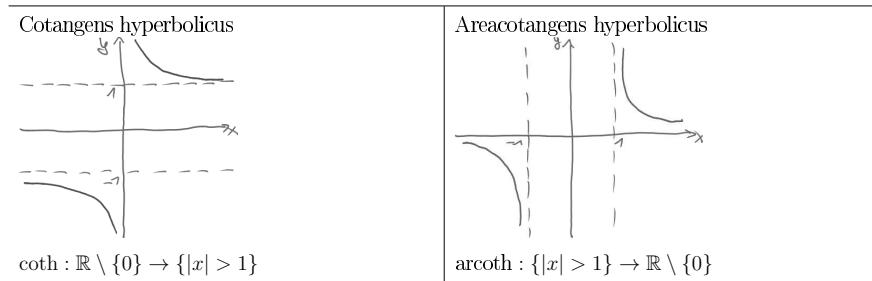
$$\text{arsinh}(x) = \ln(x + \sqrt{x^2 + 1}) \quad (-\infty < x < \infty)$$

$$\text{arcosh}(x) = \ln(x + \sqrt{x^2 - 1}) \quad (x \geq 1)$$

$$\text{artanh}(x) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+x}{1-x} \right) \quad (|x| < 1)$$

$$\text{arcoth}(x) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{x+1}{x-1} \right) \quad (|x| > 1)$$

- 461 -



- 460 -

5. Integration**5.1. Bestimmtes Integral**

Problem: Bestimmung des Flächeninhalts der Fläche zwischen dem Graphen G_f einer Funktion $f : [a; b] \rightarrow \mathbb{R}$ ($f \geq 0$) und der x -Achse.

Dazu betrachtet man Zerlegungen $Z : a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$ des Intervalls $[a; b]$. In jedem Teilintervall $[x_{i-1}; x_i]$ werde ein (beliebiges) ξ_i ausgewählt, $x_{i-1} \leq \xi_i \leq x_i$ ($i = 1, \dots, n$). Die Zahl

462

$$\sigma(Z) = \sum_{i=1}^n f(\xi_i) (\underbrace{x_i - x_{i-1}}_{\Delta x_i})$$

wird die zur Zerlegung Z und zur Wahl der ξ_i gehörenden Zwischensumme genannt.

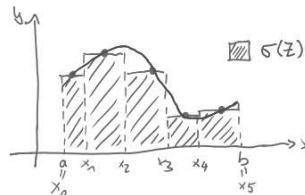


Abbildung 5.1. – Näherung für exakten Flächeninhalt A

Verfeinert man die Zerlegung Z des Intervalls $[a; b]$, d.h. fügt man weitere Punkte zur Zerlegung Z hinzu, so erhält man immer bessere Näherungen für den exakten Flächeninhalt A . Konvergieren die Zwischensummen $\sigma(Z)$ bei immer größerer Verfeinerung der Zerlegung Z

- 463 -

(unabhängig von der Auswahl der ξ_i) gegen einen festen Grenzwert I , so heißt die Funktion $f(x)$ über das Intervall $[a; b]$ (Riemann-)integrierbar und I heißt bestimmtes Integral von $f(x)$ über das Intervall $[a; b]$. In Analogie zur Bildung der Zwischensumme schreibt man

$$I = \int_a^b f(x) dx$$

x heißt Integrationsvariable, a bzw. b nennt man untere bzw. obere Integrationsgrenze, $f(x)$ heißt Integrand.

Bemerkung: Ist $f(x) > 0$ auf $]a; b[$, so ist $\int_a^b f(x) dx = A$ gleich dem Flächeninhalt A der Fläche zwischen dem Graphen von f und der x -Achse.

- 464 -

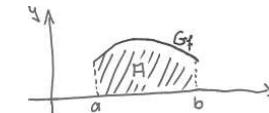


Abbildung 5.2.

Das Bestimmte Integral $I = \int_a^b f(x) dx$ wird über den Grenzwert von Zwischensummen auch

für Funktionen definiert, für die nicht stets $f(x) > 0$ gilt. In diesem Fall ist $I = \int_a^b f(x) dx$ gleich der Flächenbilanz der von dem Graphen von f und der x -Achse eingeschlossenen Flächenstücke; dabei werden Flächen oberhalb der x -Achse positiv und diejenigen unterhalb der x -Achse negativ gezählt.

- 465 -

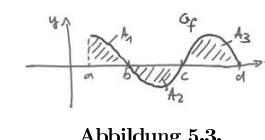


Abbildung 5.3.

$$\int_a^d f(x) dx = A_1 - A_2 + A_3$$

$$\int_a^b f(x) dx = A_1 > 0$$

$$\int_b^c f(x) dx = A_2 < 0$$

$$\int_c^d f(x) dx = A_3 > 0$$

Sei $f : [a; b] \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion. In folgenden Fällen ist $f(x)$ über $[a; b]$ integrierbar:

a) f ist auf $[a; b]$ stetig.

Satz: b) f ist beschränkt, d.h. $|f(x)| \leq M$ für alle $x \in [a; b]$ und f ist an nur endlich vielen Stellen unstetig.

c) f ist auf $[a; b]$ beschränkt und monoton.

- 466 -

Beispiel: $f : [0; 1] \rightarrow \mathbb{R}, f(x) = 1 - x^2$

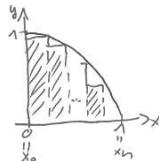


Abbildung 5.4.

Da f stetig ist, ist f integrierbar (über $[0; 1]$).

Um $I = \int_a^b f(x) dx$ zu berechnen, betrachten wir äquidistante Zerlegungen Z , d.h. Zerlegungen mit $\Delta x_i = \Delta x = \text{const}$. Für jedes $n \in \mathbb{N}$ sei Z_n die Zerlegung definiert durch $\Delta x = \frac{b-a}{n} = \frac{1-0}{n} = \frac{1}{n}$ und $x_i = x_0 + i \cdot \Delta x \quad (i = 1, \dots, n)$

- 467 -

$$\begin{aligned} &= 1 - \frac{1}{n^3} \sum_{i=1}^n i^2 \\ &= 1 - \frac{1}{n^3} \frac{n(n+1)(2n+1)}{6} \\ &= 1 - \frac{1}{6} \frac{n(n+1)(2n+1)}{n^3} \\ &= 1 - \frac{1}{6} \frac{n(n+1)}{n} \frac{2n+1}{n} \\ &= 1 - \frac{1}{6} \left(1 + \frac{1}{n}\right) \left(2 + \frac{1}{n}\right) \end{aligned}$$

Da $f(x)$ integrierbar ist, gilt

$$I = \int_a^b f(x) dx = \lim_{x \rightarrow \infty} \sigma(Z_n) = \lim_{x \rightarrow \infty} 1 - \frac{1}{6} \left(1 + \frac{1}{n}\right) \left(2 + \frac{1}{n}\right) = 1 - \frac{2}{6} = 1 - \frac{1}{3} = \frac{2}{3}$$

Eigenschaften des Bestimmten Integrals:

- 469 -

Für die ξ_i wählen wir

$$\xi_i = x_i = x_0 + i \cdot \Delta x = 0 + i \cdot \frac{1}{n} = \frac{i}{n}$$

Damit ergibt sich für die zugehörige Zwischensumme

$$\begin{aligned} \sigma(Z_n) &= \sum_{i=1}^n f(\xi_i) \Delta x_i \\ &= \sum_{i=1}^n f\left(\frac{i}{n}\right) \frac{1}{n} \\ &= \sum_{i=1}^n \left[1 - \left(\frac{i}{n}\right)^2\right] \cdot \frac{1}{n} \\ &= \frac{1}{n} \cdot \left[n - \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n i^2\right] \end{aligned}$$

- 468 -

1. $\int_a^b (f(x) + g(x)) dx = \int_a^b f(x) dx + \int_a^b g(x) dx$
2. $\int_a^b c \cdot f(x) dx = c \cdot \int_a^b f(x) dx \quad (c \in \mathbb{R})$
3. $\int_a^b f(x) dx = - \int_b^a f(x) dx$
4. $\int_a^b f(x) dx = \int_a^c f(x) dx + \int_c^b f(x) dx$

- 470 -

5.2. Hauptsatz der Differenzial- und Integralrechnung (HDI)

Definition: Für eine stetige Funktion $f(x)$ sei

$$I_a(x) := \int_a^x f(t) dt$$

$I_a(x)$ ist wiederum eine Funktion und heißt Integralfunktion.

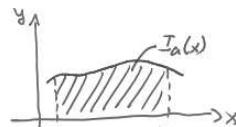


Abbildung 5.5.

- 471 -

$$= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} \int_x^{x+h} f(t) dt$$

Zur besseren Anschaulichkeit sei $f > 0$ und streng monoton steigend.

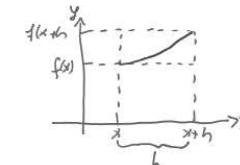


Abbildung 5.6.

- 473 -

Durch Flächenvergleich erhält man

Hauptsatz der Differential- und Integralrechnung (HDI)

Theorem:

Die Integralfunktion $I_a(x)$ ist differenzierbar und es gilt:

$$I'_a = f(x)$$

Beweis:

$$\begin{aligned} I'_a(x) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{I_a(x+h) - I_a(x)}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} \left[\int_a^{x+h} f(t) dt - \int_a^x f(t) dt \right] \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} \left[\int_a^x f(t) dt + \int_x^{x+h} f(t) dt \right] \end{aligned}$$

- 472 -

$$f(x) \cdot h \leq A \leq f(x+h) \cdot h$$

$$\text{aus } f(x) \cdot h \leq A \leq f(x+h) \cdot h \text{ folgt}$$

$$f(x) \leq \frac{1}{h} \cdot A \leq f(x+h)$$

Da $f(x)$ stetig ist, folgt (nach dem Sandwich-Lemma)

$$\lim_{h \rightarrow 0} f(x+h) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} \cdot A = f(x),$$

$$\text{d.h. } f(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} \cdot A = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} \int_x^{x+h} f(t) dt = I'_a(x)$$

□

Bemerkung: $I'_a(x) = f(x)$ bedeutet:

$$\frac{d}{dx} \int_a^x f(t) dt = f(x) \quad \text{«Integrieren = Umkehrung des Differenzierens»}$$

- 474 -

5.3. Stammfunktionen

Im folgenden sei I ein Intervall.

Definition: Eine differenzierbare Funktion $F : I \rightarrow \mathbb{R}$ heißt Stammfunktion von $f : I \rightarrow \mathbb{R}$, wenn

$$F' = f$$

gilt.

Bemerkung: Der HDI besagt, dass die Integralfunktion $I_a(x) = \int_a^x f(t) dt$ eine Stammfunktion von $f(x)$ ist.

Seien $F, G : I \rightarrow \mathbb{R}$ zwei Stammfunktionen von $f(x)$. Dann gilt

Satz:

$$F - G = \text{const.}$$

d.h. es gibt eine Konstante $C \in \mathbb{R}$ mit $F(x) - G(x) = C$ für alle $x \in I$.

- 475 -

Zusammenfassend gilt:

Je zwei Stammfunktionen einer Funktion $f(x)$ auf einem Intervall I unterscheiden sich nur durch eine Konstante.

- 477 -

Lemma:

Ist $H : I \rightarrow \mathbb{R}$ differenzierbar und gilt $H'(x) = 0$ für alle $x \in I$, so gibt es ein $C \in \mathbb{R}$ mit $H(x) = C$ für alle $x \in I$.

(folgt aus dem sogenannten Mittelwertsatz der Differentialrechnung)

Beachte: Die Voraussetzung « I ein Intervall» ist entscheidend, z.B.

$$H(x) = \begin{cases} +1 & , x > 0 \\ -1 & , x < 0 \end{cases}$$

ist differenzierbar ($\mathbb{D} = \mathbb{R} \setminus \{0\}$)

und $H'(x) = 0$ für alle $x \in \mathbb{D}$, jedoch ist $H(x) \neq \text{const.}$

Beweis des Satzes: $F, G : I \rightarrow \mathbb{R}$ Stammfunktionen von $f(x)$. Für $H(x) = F(x) - G(x)$ gilt dann $H'(x) = F'(x) - G'(x) = f(x) - f(x) = 0$

$\xrightarrow{\text{Lemma}} H(x) = \text{const.} = C$, d.h. $F(x) - G(x) = C$ für alle $x \in I$.

□

- 476 -

5.4. Berechnen von bestimmten Integralen

Berechnen von bestimmten Integralen

Sei $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ eine stetige Funktion, $a, b \in \mathbb{R}$.

Satz: Ist F eine beliebige Stammfunktion von f , so gilt

$$\int_a^b f(x) dx = F(b) - F(a) =: [F(x)]_a^b$$

Beweis: Da die Integralfunktion $I_a(x) = \int_a^x f(t) dt$ eine Stammfunktion von $f(x)$ ist (nach HDI), so gibt es eine Konstante C mit $F(x) - I_a(x) = C$ für alle $x \in I$.

- 478 -

Somit folgt: $F(x) = I_a(x) + C$

$$\begin{aligned} F(b) - F(a) &= \underbrace{I_a(b) + C}_{F(b)} - \underbrace{(I_a(a) + C)}_{F(a)} \\ &= I_a(b) = \int_a^b f(t) dt \end{aligned}$$

□

Bezeichnung: Ist $F(x)$ eine Stammfunktion von $f(x)$, so schreiben wir

$$\int f(x) dx = F(x) + C$$

und nennen $\int f(x) dx$ unbestimmtes Integral von $f(x)$.

(«unbestimmt», da keine Integrationsgrenzen abgegeben sind.)

Grundintegrale:

- 479 -

- 481 -

$$1. \int 0 dx = 1 + C$$

$$2. \int 1 dx = x + C$$

$$3. \int x^r dx = \frac{1}{r+1} x^{r+1} + C \quad (r \in \mathbb{R}, r \neq -1)$$

$$4. \int \frac{1}{x} dx = \ln|x| + C$$

$$5. \int e^x dx = e^x + C$$

$$6. \int a^x dx = \frac{a^x}{\ln a} + C$$

$$7. \int \cos x dx = \sin x + C$$

$$8. \int \sin x dx = -\cos x + C$$

- 480 -

$$9. \int \frac{1}{1+x^2} dx = \arctan x + C$$

$$10. \int \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} dx = \arcsin x + C$$

5.5. Integrationsmethoden

5.5.1. Elementare Integrationsregeln

- Faktorregel:

$$\int_a^b \lambda f(x) dx = \lambda \int_a^b f(x) dx \quad \lambda \in \mathbb{R}$$

- Summenregel:

$$\int_a^b f_1(x) + \dots + f_n(x) dx = \int_a^b f_1(x) dx + \dots + \int_a^b f_n(x) dx$$

- Vertauschungsregel:

$$\int_a^b f(x) dx = - \int_b^a f(x) dx$$

- 482 -

- Gleiche Integrationsgrenzen:

$$\int_a^a f(x) dx = 0$$

- Aufspalten der Integration:

$$\int_a^b f(x) dx = \int_a^c f(x) dx + \int_c^b f(x) dx$$

Beispiele:

$$1. \int_a^b 5x^2 dx = 5 \int_a^b x^2 dx = 5 \left[\frac{x^3}{3} \right]_a^b$$

$$2. \int_a^b x + x^2 dx = \left[\frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} \right]_a^b$$

- 483 -

- Führe Substitution $x = \varphi(t)$ durch

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \varphi'(t) \Leftrightarrow dx = \varphi'(t) dt \text{ wähle } t_a \text{ und } t_b \text{ mit } a = \varphi(t_a) \text{ und } b = \varphi(t_b) \\ \Rightarrow \int_a^b h(x) dx &= \int_{t_a}^{t_b} h(\varphi(t)) \varphi'(t) dt \end{aligned}$$

Beispiel: $\int_1^2 \frac{\cos(\sqrt{x})}{\sqrt{x}} dx$

- Substitution $u = \sqrt{x}$

$$\begin{aligned} \frac{du}{dx} &= u'(x) | \cdot dx \\ du &= \frac{1}{2\sqrt{x}} dx | \cdot 2\sqrt{x} \\ dx &= 2\sqrt{x} du \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \int_1^2 \frac{\cos(\sqrt{x})}{\sqrt{x}} dx &= \int_1^2 \frac{\cos(u)}{u} \underbrace{2u du}_{dx} = \int_1^2 2 \cos(u) du = 2 \cdot \int_1^2 \cos(u) du = 2 [\sin(u)]_1^2 = \end{aligned}$$

- 485 -

5.5.2. Integration durch Substitution:

$f : I \rightarrow \mathbb{R}$ sei stetig und $u : [a; b] \rightarrow \mathbb{R}$ sei stetig differenzierbar (d.h. u sei differenzierbar und u' stetig) mit $u([a; b]) \subseteq I$. Dann gilt:

Satz:

$$\int_a^b f(u(x))u'(x) dx = \int_{u(a)}^{u(b)} f(u) du$$

Bemerkung: $\int_a^b h(x) dx$ sei zu berechnen

- Führe Substitution $u = u(x)$ durch $\Rightarrow h(x) = f(u(x))$

$$du = u'(x) dx \Leftrightarrow dx = \frac{du}{u'(x)}$$

$$\Rightarrow \int_a^b h(x) dx = \int_{u(a)}^{u(b)} f(u) \cdot \frac{du}{g(u)} \quad u'(x) = g(u(x))$$

- 484 -

$$2(\sin \sqrt{2} - \sin 1)$$

- Substitution $x = t^2$ ($= x(t)$) $x(1) = 1, x(\sqrt{2}) = 2$

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= 2t | \cdot dt \\ dx &= 2t \cdot dt \\ \int_1^2 \frac{\cos \sqrt{x}}{\sqrt{x}} dx &= \int_{x(1)}^{x(\sqrt{2})} \frac{\cos \sqrt{x}}{\sqrt{x}} dx = \int_1^{\sqrt{2}} \frac{\cos \sqrt{t^2}}{\sqrt{t^2}} \underbrace{2t dt}_{dx} = \int_1^{\sqrt{2}} \frac{\cos t}{t} 2t dt = 2 \int_1^{\sqrt{2}} \cos t dt \end{aligned}$$

- 486 -

5.5.3. Integration durch Partialbruchzerlegung (PBZ)

Gebrochen-rationale Funktion $f(x) = \frac{Z(x)}{N(x)}$ mit $\text{grad}(Z(x)) < \text{grad}(N(x))$ (ansonsten Polynomdivision falls $\text{grad}(Z(x)) \geq \text{grad}(N(x))$)

Vorgehensweise: (PBZ)

- Für jede reelle Nullstelle a der Vielfachheit r von $N(x)$ mache den Teilansatz:

$$\frac{A_1}{x-a} + \frac{A_2}{(x-a)^2} + \dots + \frac{A_r}{(x-a)^r} \quad (A_i \text{ noch zu bestimmen})$$

- Für jeden unzerlegbaren (über \mathbb{R}) quadratischen Faktoren (d.h. keine reellen Nullstellen $D < 0$) $q(x) = (x-a)^2 + b^2$ von $N(x)$ der Vielfachheit r mache den Teilansatz:

$$\frac{B_1x+C_1}{q(x)} + \frac{B_2x+C_2}{q(x)^2} + \dots + \frac{B_rx+C_r}{q(x)^r}$$

- Addiere alle Teilansätze und setzte die Summe gleich $\frac{Z(x)}{N(x)}$

- 487 -

mit $\frac{Z(x)}{N(x)}$ gleichsetzen:

$$\begin{aligned} \frac{A}{x-1} + \frac{B}{x+1} &= \frac{5x+1}{x^2-1} \\ \frac{A(x+1)}{x^2-1} + \frac{B(x-1)}{x^2-1} &= \frac{5x+1}{x^2-1} | \cdot (x^2-1) \\ A(x+1) + B(x-1) &= 5x+1 \end{aligned}$$

$$Ax + A + Bx - B = 5x + 1$$

$$(A+B)x + A - B = 5x + 1$$

LGS (aus Koeffizientenvergleich):

$$(I) \quad A + B = 5$$

$$(II) \quad A - B = 1$$

$$\Rightarrow A = 3, B = 2$$

$$\Rightarrow \frac{3}{x-1} + \frac{2}{x+1} = \frac{5x+1}{x^2-1}$$

- 489 -

- Bilde den Hauptnenner HN beim Gesamtansatz und multipliziere beide Seiten mit dem Hauptnenner HN ($= N(x)$). Multipliziere den Zähler des Gesamtansatzes aus und führe einen Koeffizientenvergleich mit $Z(x)$ durch.
- Bestimme aus dem Koeffizientenvergleich ein LGS in den Konstanten A_i, B_j usw. und löse dieses.

Beispiel:

$$1. \frac{5x+1}{x^2-1} N(x) = x^2 - 1 = (x-1)(x+1) \\ \Rightarrow \text{zwei 1-fache reelle Nullstellen}$$

$$\text{Teilansatz für } x_1 = 1: \frac{A}{x-1}$$

$$\text{Teilansatz für } x_2 = -1: \frac{B}{x+1}$$

$$\text{Gesamtansatz: } \frac{A}{x-1} + \frac{B}{x+1}$$

- 488 -

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

$$\Rightarrow x_1 = 1 \text{ (2-fache Nullstelle)}$$

$$\Rightarrow x_2 = -1 \text{ (1-fache Nullstelle)}$$

$$\text{Teilansatz für } x_1 = 1: \frac{A_1}{x-1} + \frac{A_2}{(x-1)^2}$$

$$\text{Teilansatz für } x_2 = -1: \frac{B}{x+1}$$

$$\begin{aligned} \text{Gesamtansatz: } \frac{A_1}{x-1} + \frac{A_2}{(x-1)^2} + \frac{B}{x+1} &= \frac{2x+1}{(x-1)^2(x+1)} \\ \text{HN} = (x-1)^2(x+1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\Leftrightarrow \frac{A_1(x-1)(x+1) + A_2(x+1) + B(x-1)^2}{\text{HN}} = \frac{2x+1}{\text{HN}} | \cdot \text{HN} \\ &\Leftrightarrow A_1(x^2-1) + A_2(x+1) + B(x^2-2x+1) = 2x+1 \\ &\Leftrightarrow (A_1+B)x^2 + (A_2-2B)x - A_1 + A_2 + B = 2x+1 \end{aligned}$$

LGS (aus Koeffizientenvergleich):

- 490 -

$$(I) \quad A_1 + B = 0$$

$$(II) \quad A_2 - 2B = 2$$

$$(III) \quad -A_1 + A_2 + B = 1$$

$$\Rightarrow A_1 = \frac{1}{4}, A_2 = \frac{3}{2}, B = -\frac{1}{4}$$

$$\Rightarrow \frac{2x+3}{(x-1)^2(x+1)} = \frac{\frac{1}{4}}{x-1} + \frac{\frac{3}{2}}{(x-1)^2} - \frac{\frac{1}{4}}{x+1}$$

$$3. \quad \frac{7x^2 - 10x + 37}{x^3 - 3x^2 + 9 + 13}$$

$$N(x) = x^3 - 3x^2 + 9 + 13$$

$$N(-1) = 0 \Rightarrow \text{Polynomdivision } N(x) = (x+1) \underbrace{(x^2 - 4x + 13)}_{\text{unzerlegbar, da } D < 0}$$

\Rightarrow Nullstellen $x_1 = -1$ (1-fach)

unzerlegbarer, quadratischer Faktor $q(x) = x^2 - 4x + 13$

$$\text{Teilansatz f\"ur } x_1 = -1: \frac{A}{x+1}$$

- 491 -

$$\text{Teilansatz f\"ur } q(x) = x^2 - 4x + 13: \frac{Bx + C}{x^2 - 4x + 13}$$

$$\text{Gesamtansatz: } \frac{A}{x+1} + \frac{Bx + C}{x^2 - 4x + 13} = \frac{7x^2 - 10x + 37}{x^3 - 3x^2 + 9 + 13}$$

$$\text{HN} = (x+1)(x^2 - 4x + 13)$$

$$\Leftrightarrow \frac{A(x^2 - 4x + 13) + (Bx + C)(x+1)}{\text{HN}} = \frac{7x^2 - 10x + 37}{\text{HN}} \mid \cdot \text{HN}$$

$$\Leftrightarrow A(x^2 - 4x + 13) + Bx^2 + (B+C)x + C = 7^2 - 10x + 37$$

$$\Leftrightarrow (A+B)x^2 + (-4A+B+C)x + \dots = 7^2 - 10x + 37$$

LGS (aus Koeffizientenvergleich):

$$(I) \quad A + B = 7$$

$$(II) \quad -4A + B + C = -10$$

$$(III) \quad 13A + C = 37$$

$$\Rightarrow A = 3, B = 4, C = -2$$

$$\Rightarrow \frac{7x^2 - 10x + 37}{x^3 - 3x^2 + 9x + 13} = \frac{3}{x+1} + \frac{4x - 2}{x^2 - 4x + 13}$$

- 492 -

Integrale f\"ur PBZ

Um das Integral $\int \frac{Z(x)}{N(x)} dx$ zu l\"osen, verwendet man nachfolgende Integrale:

$$1. \quad \int \frac{A}{x-a} dx = A \int \frac{1}{x-a} dx = A \cdot \ln|x-a| + C$$

$$2. \quad \int \frac{A}{(x-a)^r} dx = A \int (x-a)^{-r} dx = A \cdot \frac{(x-a)^{-r+1}}{-r+1} + C \quad (r > 0)$$

$$3. \quad \int \frac{Bx + C}{(x-a)^2 + b^2} dx = \int \frac{Bx + C}{x^2 + px + q} dx = \int \frac{\frac{B}{2}(2x+p) + C - \frac{B}{2}p}{x^2 + px + q} dx$$

$$= \frac{B}{2} \underbrace{\int \frac{2x+p}{x^2 + px + q} dx}_{\ln|x^2+px+q|+C_1} + \int \frac{C - \frac{B}{2}p}{x^2 + px + q} dx$$

$$\int \frac{C - \frac{B}{2}p}{x^2 + px + q} dx = \int \frac{C - \frac{B}{2}p}{(x-a)^2 + b^2} dx = (C - \frac{B}{2}p) \int \frac{1}{(x-a)^2 + b^2} dx$$

$$\text{Substitution } u = \frac{x-a}{b} \Rightarrow dx = b \cdot du$$

- 493 -

$$= \frac{C - \frac{B}{2}p}{b} \arctan \frac{x-a}{b} + C_2$$

Beispiel:

$$1. \quad \int \frac{5x+1}{x^2-1} dx = \int \frac{3}{x-1} + \frac{2}{x+1} dx$$

$$= 3 \int \frac{1}{x-1} dx + 2 \int \frac{1}{x+1} dx = 3 \ln|x-1| + 2 \ln|x+1| + C$$

$$2. \quad \int \frac{2x+3}{(x-1)^2(x+1)} dx = \frac{1}{4} \int \frac{1}{x-1} dx + \frac{3}{2} \int \frac{1}{(x-1)^2} dx - \frac{1}{4} \int \frac{1}{x+1} dx$$

$$= \frac{1}{4} \ln|x-1| - \frac{3}{2} \frac{1}{x-1} - \frac{1}{4} \ln|x+1| + C$$

$$3. \quad \int \frac{7x^2 - 10x + 37}{x^3 - 3x^2 + 9x + 13} dx = 3 \underbrace{\int \frac{1}{x+1} dx}_{\ln|x+1|} + \int \frac{4x-2}{x^2 - 4x + 13} dx$$

$$\int \frac{4x-2}{x^2 - 4x + 13} dx = 2 \int \frac{2x-1}{x^2 - 4x + 13} dx = 2 \int \frac{(2x-4)+3}{x^2 - 4x + 13} dx$$

- 494 -

$$= 2 \underbrace{\int \frac{2x-4}{x^2-4x+13} dx}_{\ln|x^2-4x+13|+C_1} + 6 \int \frac{1}{x^2-4x+13} dx$$

$$f(x) = x^2 - 4x + 13$$

$$f'(x) = 2x - 4 = 0 \Leftrightarrow x = 2$$

$$y = f(2) = 3^2$$

$$\Rightarrow f(x) = (x-2)^2 + 3^2$$

$$\int \frac{1}{x^2-4x+13} dx = \int \frac{1}{(x-2)^2+3^2} dx = \frac{1}{3^2} \int \frac{1}{(\frac{x-2}{3})^2+1} dx$$

$$\text{Substitution } u = \frac{x-2}{3} \Rightarrow dx = 3 du$$

$$3^{\frac{1}{2}} \arctan\left(\frac{x-2}{3}\right) + C_2$$

$$\int \frac{4x-2}{x^2-4x+13} dx = 2 \ln|x^2-4x+13| + 2 \arctan\left(\frac{x-2}{3}\right) + C_3$$

insgesamt gilt:

- 495 -

$$\int \frac{7x^2-10x+37}{x^3-3x^2+9x+13} dx = 3 \ln|x+1| + 2 \ln|x^2-4x+13| + 2 \arctan\left(\frac{x-2}{3}\right) + C$$

- 496 -

5.5.4. Partielle Integration (Produktintegration)

Produktregel:

$$(u \cdot v)' = u' \cdot v + u \cdot v'$$

$$\Leftrightarrow u \cdot v' = (u \cdot v)' - u' \cdot v \mid \int \dots dx$$

$$\boxed{\int u \cdot v' dx = u \cdot v - \int u' \cdot v dx}$$

Beispiel:

$$\begin{aligned} a) \quad & \int xe^x dx = x \cdot e^x - \int 1 \cdot e^x dx \\ & = e^x(x-1) + C = e^x(x-1) + C \end{aligned}$$

$$b) \quad \int \ln x dx = \int \ln x \cdot 1 dx = \ln x \cdot x - \int \frac{1}{x} \cdot x dx = x(\ln x - 1) + C$$

$$\begin{aligned} c) \quad & \text{Rekursionsformel} \\ & \int x^n e^{ax} dx = x^n \cdot \frac{1}{a} \cdot e^{ax} - \int nx^{n-1} \cdot \frac{1}{a} e^{ax} dx = \frac{1}{a} x^n e^{ax} - \frac{n}{a} \int x^{n-1} e^{ax} dx \end{aligned}$$

- 497 -

5.6. Uneigentliche Integrale

Definition:

$$\begin{aligned} \int_a^\infty f(x) dx &:= \lim_{\lambda \rightarrow \infty} \int_a^\lambda f(x) dx \\ \int_a^{-\infty} f(x) dx &:= \lim_{\lambda \rightarrow -\infty} \int_\lambda^a f(x) dx \\ \int_{-\infty}^\infty f(x) dx &:= \int_a^\infty f(x) dx + \int_{-\infty}^a f(x) dx \end{aligned}$$

(falls die Grenzwerte existieren)

Beispiele:

- 498 -

$$1. \int_1^\infty \frac{1}{x^2} dx = \lim_{\lambda \rightarrow \infty} \int_1^\lambda x^{-2} dx = \lim_{\lambda \rightarrow \infty} \left[\frac{x^{-2+1}}{-2+1} \right]_1^\lambda = \lim_{\lambda \rightarrow \infty} \left[-\frac{1}{x} \right]_1^\lambda = \lim_{\lambda \rightarrow \infty} -\frac{1}{\lambda} + 1 = 1$$

$$2. \int_1^\infty \frac{1}{x} dx = \lim_{\lambda \rightarrow \infty} \int_1^\lambda \frac{1}{x} dx = \lim_{\lambda \rightarrow \infty} [\ln|x|]_1^\lambda = \lim_{\lambda \rightarrow \infty} \ln \lambda = \infty$$

- Volumenberechnung
Volumen eines Rotationskörpers
 $f : [a; b] \rightarrow \mathbb{R}$

$$V_x = \pi \int_a^b f(x)^2 dx$$

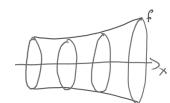


Abbildung 5.9.

- Kurvenlänge
 $f : [a; b] \rightarrow \mathbb{R}$, Kurve $\Gamma = G_f$

$$l_\Gamma = \int_a^b \sqrt{1 + f'(x)^2} dx$$

Abbildung 5.10.
- Kurve mit Länge l_Γ

- 499 -

- 501 -

5.7. Anwendungen

- Fläche zwischen Graph und x -Achse
 f habe in $]a; b[$ keine Nullstellen.

$$A = \left| \int_a^b f(x) dx \right|$$

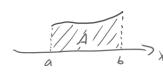


Abbildung 5.7.

- Fläche zwischen zwei Graphen
 f und g haben über $]a; b[$ keine gemeinsamen Schnittpunkte.

$$A = \left| \int_a^b f(x) - g(x) dx \right| = \left| \int_a^b g(x) - f(x) dx \right|$$

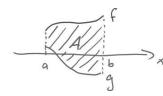


Abbildung 5.8.

- Mittelwerte
 $f : [a; b] \rightarrow \mathbb{R}$ stetig.

- lineares (arithmetisches) Mittel

$$\bar{f} = \frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx$$

- quadratisches Mittel (RMS, Effektivwert)

$$\bar{f}^q = \sqrt{\frac{1}{b-a} \int_a^b f(x)^2 dx}$$

- 500 -

- 502 -