

Zusammenfassung Höhere Mathematik

Paul Nykiel

11. Juli 2017

This Page exists solely for printing purposes — Schlagzahl erhöhen.

Inhaltsverzeichnis

I	HM 1 — Zusammenfassung	9
1	Vorkurs	10
1.1	Aussagenlogik	10
1.1.1	Definition Aussage	10
1.1.2	Verknüpfungen	10
1.1.3	Mehr zu Implikationen	11
1.1.4	Bezeichnung von Aussagen	11
1.1.5	Satz der Identität	11
1.2	Mengen	12
1.2.1	Defintion: Mengen nach Cantor	12
1.2.2	Begrifflichkeiten und Schreibweise	12
1.2.3	Leere Menge, Teilmengen	12
1.2.4	Transitivität u.a.	12
1.2.5	Verknüpfung von Mengen	13
1.2.6	Potenzmenge	13
1.2.7	Rechenregeln für Mengen	13
1.2.8	Komplement	14
1.2.9	Bemerkung	14
1.2.10	Verknüpfungen über mehrere Elemente	14
1.2.11	Wichtige Zusammenhänge	14
1.3	Vollständige Induktion	14
1.3.1	Summen und Produktzeichen	14
1.3.2	Prinzip der Vollständigen Induktion	15
1.3.3	Rechenregeln für Summen	15
1.3.4	Doppelsummen	16
1.3.5	Fakultät und Binomialkoeffizient	16
1.3.6	Rechenregeln für den Binomialkoeffizienten	16
1.3.7	Binomischer Lehrsatz	16
1.3.8	Definition Betrag	16
1.3.9	Dreiecksungleichung	17
1.4	Funktion und Differentiation	17
1.4.1	Injektivität, Surjektivität, Bijektivität	17
1.4.2	Verknüpfung von Funktionen	18
1.4.3	Verkettung von Funktionen	18

1.4.4	Stetigkeit und Differenzierbarkeit	18
1.4.5	Zusammenhang Differenzierbarkeit — Stetigkeit	18
1.4.6	Verkettung differenzierbarer Funktionen	19
1.4.7	Differentiation von Monomen	19
1.4.8	Kettenregel	19
1.4.9	Ableitung der Umkehrfunktion	19
1.5	Elementare Funktionen	19
1.6	Integralrechnung	19
1.7	Komplexe Zahlen	19
1.8	Elementare Differentialgleichungen	19
1.8.1	Definition Rechteck	19
1.8.2	Lineare DGL 1. Ordnung	20
2	Grenzwerte	21
2.1	Gruppen und Körper	21
2.1.1	Gruppen	21
2.1.2	Körper	21
2.1.3	Angeordnete Körper	22
2.1.4	Minimum und Maximum	23
2.1.5	Obere und untere Schranke	24
2.1.6	Supremum und Infimum	24
2.2	Folgen	24
2.2.1	Konvergenz	24
2.2.2	Bestimmte Divergenz	25
2.2.3	Beschränktheit	25
2.2.4	Zusammenhang Konvergenz — Beschränktheit	25
2.2.5	Grenzwertrechenregeln	25
2.2.6	Sandwich Theorem u.a.	26
2.2.7	Monotonie	26
2.2.8	Zusammenhang Monotonie und Beschränktheit	26
2.3	Häufungswerte	26
2.3.1	Teilfolgen	26
2.3.2	Teilfolgen einer Konvergenten Folge	26
2.3.3	Häufungswerte	26
2.3.4	Limes superior/inferior	27
2.3.5	Charakterisierung limsup/liminf	27
2.3.6	Konvergenz und limsup/liminf	27
2.3.7	Satz von Bolzano-Weierstraß	27
2.3.8	Cauchy-Kriterium	27
2.4	Unendliche Reihen	28
2.4.1	Definition	28
2.4.2	Cauchy-Kriterium für unendliche Reihen	28
2.4.3	Grenzwertrechenregeln für unendliche Reihen	28
2.4.4	Positive Folgen	29
2.4.5	Leibniz-Kriterium	29
2.4.6	Absolute Konvergenz	29

2.4.7	Majorantenkriterium	29
2.4.8	Minorantenkriterium	30
2.4.9	Wurzel- und Quotientenkriterium	30
2.4.10	Umordnung einer Reihe	30
2.4.11	Cauchy-Produkt	31
2.4.12	Cauchy-Verdichtungssatz	31
2.5	Potenzreihen	31
2.5.1	Definition	31
2.5.2	Hadamard (Konvergenzradius mit Wurzelkriterium) . . .	31
2.5.3	Konvergenzradius mit Quotientenkriterium	32
2.5.4	Hinweis	32
2.5.5	Integration und Differentiation von Potenzreihen	32
2.5.6	Cauchy-Produkt für Potenzreihen	32
2.5.7	Wichtige Potenzreihen	32
2.5.8	Alternative Definition der Exponentialfunktion	33
2.6	Funktionsgrenzwerte	33
2.6.1	Bemerkung	33
2.6.2	Epsilon-Umgebung	33
2.6.3	Funktionsgrenzwerte (über Delta-Epsilon-Kriterium) . . .	33
2.6.4	Folgenkriterium	34
2.6.5	Rechenregeln für Funktionsgrenzwerte	34
2.6.6	Cauchy-Kriterium für Funktionsgrenzwerte	35
2.6.7	Bestimmte Divergenz	35
2.6.8	Monotone Funktionen	35
2.6.9	Grenzwerte an Intervallgrenzen	35
2.7	Stetigkeit	36
2.7.1	Anschaulich	36
2.7.2	Stetigkeit: Delta-Epsilon-Kriterium	36
2.7.3	Bemerkungen	36
2.7.4	Rechenregeln für Stetigkeit	36
2.7.5	Stetigkeit von Potenzreihen	36
2.7.6	Umgebung positiver Funktionswerte	37
2.7.7	Zwischenwertsatz	37
2.7.8	Existenz des Logarithmus	37
2.7.9	Maximum/Minimum/Infimum/Supremum einer Funktion	37
2.7.10	Beschränktheit einer stetigen Funktion	38
2.7.11	Weierstraß: Existenz von Min und Max	38
2.7.12	Zusammenhang Injektivität — Stetigkeit	38
2.7.13	Existenz und Monotonie der Umkehrfunktion	38
2.7.14	Gleichmäßige Stetigkeit	38
3	Differentialrechnung	39
3.1	Ableitung	39
3.1.1	Definition Differenzen-Quotient	39
3.1.2	Rechtsseitige und linksseitige Ableitung	39
3.1.3	Ableitungsrechenregeln	39

3.1.4	Alternative Definition der Ableitung	40
3.1.5	Zusammenhang Differentierbarkeit — Stetigkeit	40
3.1.6	Differentiation von Potenzreihen	40
3.1.7	Ableitung der Umkehrfunktion	40
3.1.8	Kettenregel	40
3.2	Mittelwertsätze	40
3.2.1	Satz von Rolle	40
3.2.2	Definition lokaler Extrempunkt	41
3.2.3	Notwendige Bedingung für lokale Extrema	41
3.2.4	2. Mittelwertsatz	41
3.2.5	1. Mittelwertsatz (Folgerung aus 2. Mittelwertsatz)	41
3.2.6	L'Hospital	41
3.2.7	Satz von Taylor	42

II HM 2 — Zusammenfassung 43

4	Integration	44
4.1	Integration	44
4.1.1	Definition Zerlegung, Zwischenwerte	44
4.1.2	Definition Riemannsumme	44
4.1.3	Definition Riemann-Integral	45
4.1.4	Menge der Riemann-Integrierbaren Funktionen	46
4.1.5	Kriterien für Riemann-Integrierbarkeit	46
4.1.6	Änderung von Funktionen	47
4.1.7	Zusammenhang Stetigkeit und Integrierbarkeit	47
4.1.8	Stückweise Integration	47
4.1.9	1. Mittelwertsatz der Integralrechnung	47
4.1.10	Existenz der Stammfunktion	48
4.1.11	Definition Stammfunktion	48
4.1.12	Eindeutigkeit der Stammfunktion	48
4.1.13	Hauptsatz der Differential und Integralrechnung	48
4.1.14	Zusammenhang Monotonie und Riemann-Integrierbarkeit	48
4.1.15	Zweiter Mittelwertsatz der Integralrechnung	48
4.2	Uneigentliche Integrale	49
4.2.1	Definition uneigentliches Integral	49
4.2.2	Cauchy-Kriterium	49
4.2.3	Majorantenkriterium	50
4.2.4	Absolute Konvergenz	50
4.2.5	Minorantenkriterium	50
4.2.6	Integralkriterium für Reihen	50

5	Gleichmäßige Konvergenz	51
5.1	Gleichmäßige Konvergenz	51
5.1.1	Definition Funktionenfolge und Funktionenreihe	51
5.1.2	Gleichmäßige Konvergenz	51
5.1.3	Stetigkeit der Grenzfunktion	52
5.1.4	Integration der Grenzfunktion	52
5.1.5	Cauchy Kriterium für gleichmäßige Konvergenz	52
5.1.6	Differentiation der Grenzfunktion	52
5.1.7	Majorantenkriterium auf Potenzreihen anwenden	53
5.1.8	Majorantenkriterium für Funktionenreihen	53
6	Differentialrechnung mit mehreren Variablen	54
6.1	Der n-dimensionale Euklidische Raum	54
6.1.1	Definitionen	54
6.1.2	Folgerungen	54
6.1.3	Konventionen	55
6.1.4	Definition Epsilon-Umgebung	55
6.1.5	Definition Topologische Begriffe	55
6.1.6	Definition offene und abgeschlossene Menge	56
6.2	Folgen	57
6.2.1	Definition	57
6.2.2	Bolzano-Weierstraß	57
6.2.3	Grenzwertrechenregeln	57
6.2.4	Weitere Bemerkungen	58
6.3	Funktionsgrenzwerte und Stetigkeit	58
6.3.1	Definition Funktion	58
6.3.2	Definition Funktionsgrenzwert	58
6.3.3	Definitionen aus HM 1 im Mehrdimensionalen	58
6.3.4	Definition Stetigkeit	59
6.3.5	Grenzwerte von verketteten Funktionen	59
6.3.6	Grenzwertrechenregeln	59
6.3.7	Maximum und Minimum Kompakter Mengen	60
6.3.8	Weierstraß	60
6.4	Partielle Ableitungen und Richtungsableitungen	60
6.4.1	Definition partielle Ableitung	60
6.4.2	Definition Umgebung eines Punktes	61
6.4.3	Definition Richtungsableitung	61
6.5	Die totale Ableitung	61
6.5.1	Definition totale Ableitung	61
6.5.2	Zusammenhang Stetigkeit und Differenzierbarkeit	62
6.5.3	Zusammenhang partielle und totale Diffbarkeit	62
6.5.4	Kettenregel	63
6.5.5	Matrix-Produkt	63
6.6	Extremwerte, Mittelwertsatz	63
6.6.1	Definition lokales Extrema	63
6.6.2	Notwendige Bedingung für lokale Extrema	63

6.6.3	Mittelwertsatz	64
6.6.4	Gebiete bzw. kurvenweise zusammenhängende Gebiete . .	64
6.6.5	Partielle Ableitung r-ter Ordnung	64
6.6.6	Hessematrix	65
6.6.7	Definitheit	65
6.6.8	Satz von Schwarz	65
6.6.9	Satz von Taylor	66
6.6.10	Hinreichende Bedingung für lokale Extrema	66
6.7	Implizit definierte Funktionen	66
6.7.1	Bemerkung	66
6.7.2	Vorläufige Definition Rang einer Matrix	66
6.7.3	Einheitsmatrix und Inverse einer Matrix	66
6.7.4	Zusammenhang Bijektivität und reguläre Matrizen	67
6.7.5	Satz über die Umkehrfunktion	67
6.7.6	Satz über die Gebietstreue	67
6.7.7	Definition Auflösbarkeit	67
6.7.8	Hauptsatz über implizite Funktionen	68
6.7.9	Extrema unter Nebenbedingungen	68
6.7.10	Definition lokale Minima/Maxima unter Nebenbedingungen	69
6.7.11	Definition Linear Unabhängig	69
6.7.12	Satz von Lagrange	70
6.7.13	Lagrange Funktion	70

III Beweisansätze 71

7	HM 1	72
7.0.1	Eindeutigkeit des Grenzwert einer Folge	72
7.0.2	Konvergente Folgen sind beschränkt	72
7.0.3	Grenzwertrechenregeln	72
7.0.4	Monotoniekriterium	72
7.0.5	Grenzwert einer konv. Folge = Grenzwert jeder Teilfolge	72
7.0.6	Charakterisierung \lim und \lim	72
7.0.7	Folge konv. $\lim = \lim$	72
7.0.8	Bolzano-Weierstraß	73
7.0.9	Cauchy Kriterium	73
7.0.10	Reihe konv. Folge ist Nullfolge	73
7.0.11	GrenzwertRR für Reihen	73
7.0.12	Reihe konv g. 0	73
7.0.13	Leibniz	73
7.0.14	Absolut konv. \Rightarrow konv.	73
7.0.15	Majorantenkriterium	73
7.0.16	Minorantenkriterium	73
7.0.17	Wurzelkriterium	73
7.0.18	Quotientenkriterium	73
7.0.19	Hadamard	74

7.0.20	Differenzieren / Integrieren von Potenzreihen	74
7.0.21	Lemma zu sin, cos und exp	74
7.0.22	$e^z \neq 0$ und $e^{-z} = \frac{1}{e^z}$	74
7.0.23	Pythagoras	74
7.0.24	$e^x > 0 \ \forall x \in \mathbb{R}$	74
7.0.25	$1 + x \leq e^x \ \forall x \in \mathbb{R}$	74
7.0.26	$x < y \Rightarrow e^x < e^y$	74
7.0.27	Folgenkriterium	74
7.0.28	Cauchy für Funktionen	74
7.0.29	Grenzwerte an Intervallgrenzen	74
7.0.30	Verknüpfungen stetiger Funktionen stetig	74
7.0.31	Potenzreihen sind innerhalb des Konvergenzradius stetig	75
7.0.32	Umgebung pos. Funktionswerte	75
7.0.33	Zwischenwertsatz	75
7.0.34	Existenz log	75
7.0.35	Beschränktheit stetiger Funktionen	75
7.0.36	Weierstraß existenz min bzw. max	75
8	HM 2	76
IV	Appendix	77
9	Grenzwerte	78
9.1	Konvergenzkriterien	78
10	Integration	79
10.1	Riemann-Integrierbarkeit	79

Teil I

HM 1 — Zusammenfassung

Kapitel 1

Vorkurs

1.1 Aussagenlogik

1.1.1 Definition Aussage

Eine Aussage ist ein Satz, der entweder wahr oder falsch ist.

Bemerkung

Wir beschäftigen uns mit der klassischen zweiwertigen Logik. Es gibt auch Logiken mit 3 bzw. 4 Werten.

1.1.2 Verknüpfungen

Formal kann eine Oder-Verknüpfung mit dem \vee -Zeichen durch eine Wahrheitstabelle definiert werden:

A	B	$A \vee B$
1	1	1
1	0	1
0	1	1
0	0	0

Analog kann eine Und-Verknüpfung mit dem \wedge -Zeichen durch eine Wahrheitstabelle definiert werden:

A	B	$A \wedge B$
1	1	1
1	0	0
0	1	0
0	0	0

Und eine Negation wird definiert durch:

A	$\neg A$
1	0
0	1

Eine sog. Implikation wird durch das \Rightarrow -Zeichen dargestellt und ist definiert durch:

A	B	$A \Rightarrow B$
1	1	1
1	0	0
0	1	1
0	0	1

Bemerkung

Bei mehr als einer Verknüpfung muss klar sein welche Verknüpfung als erstes ausgewertet werden muss, hierfür werden Klammern verwendet.

1.1.3 Mehr zu Implikationen

Bei der Aussage $A \Rightarrow B$ bezeichnet man A als hinreichende Bedingung und B als notwendige Bedingung.

Die Aussage $A \Rightarrow B$ ist äquivalent zu $\neg B \Rightarrow \neg A$.

1.1.4 Bezeichnung von Aussagen

Eine Aussageform heißt:

- (a) Allgemeingültig (oder Tautologie), wenn sie als Wahrheitswert stets den Wert wahr annimmt.
- (b) Erfüllbar, wenn die Wahrheitstabelle mindestens einmal den Wert wahr enthält.
- (c) Unerfüllbar (oder Kontradiction), wenn die Wahrheitstabelle nur falsch-Einträge enthält.

1.1.5 Satz der Identität

Mit $A \Leftrightarrow B$ kürzen wir die Aussage:

$$(A \Rightarrow B) \wedge (B \Rightarrow A)$$

ab.

Bemerkung

Für den allg. Fall sagt man zu $A \Leftrightarrow B$: A ist äquivalent zu B . Das heißt aber nicht, dass $A = B$ ist.

1.2 Mengen

1.2.1 Definition: Mengen nach Cantor

Unter einer Menge versteht man eine Zusammenfassung bestimmter wohlunterscheidbarer Objekte unsere Anschauung oder unseres Denkens zu einem Ganzen.

1.2.2 Begrifflichkeiten und Schreibweise

Objekte einer Menge bezeichnet man als Elemente einer Menge.

Schreibweise:

- (a) $x \in M$ oder $x \notin M$
- (b) Mengen können durch Aufzählen der Elemente beschrieben werden: $M = \{a, b, c\}$
- (c) Mengen können durch Eigenschaften der Elemente beschrieben werden: $M = \{x : x \text{ hat Eigenschaft} \dots\}$

1.2.3 Leere Menge, Teilmengen

- (a) Die Menge, die kein Element enthält, heißt leere Menge. Wir bezeichnen diese mit \emptyset .
- (b) Eine Menge M_1 heißt Teilmenge einer Menge M_2 (Schreibweise $M_1 \subseteq M_2$) falls jedes Element von M_1 auch Element von M_2 ist. D.h. es gilt:

$$x \in M_1 \Rightarrow x \in M_2$$

- (c) Zwei Mengen sind gleich wenn gilt:

$$M_1 = M_2 \Leftrightarrow M_1 \subseteq M_2 \wedge M_2 \subseteq M_1$$

- (d) M_1 heißt echte Teilmenge von M_2 wenn gilt:

$$M_1 \subseteq M_2 \wedge M_1 \neq M_2$$

Schreibweise: $M_1 \subset M_2$ oder $M_1 \subsetneq M_2$.

1.2.4 Transitivität u.a.

Für Mengen M, M_1, M_2, M_3 gilt stets:

- (a) Aus $M_1 \subseteq M_2$ und $M_2 \subseteq M_3$ folgt stets: $M_1 \subseteq M_3$
- (b) $M_1 = M_2 \Leftrightarrow M_1 \subseteq M_2 \wedge M_2 \subseteq M_1$
- (c) $M \subseteq M$ und $\emptyset \subseteq M$

1.2.5 Verknüpfung von Mengen

Für Mengen M_1 und M_2 definiert man:

- (a) Die Vereinigung von M_1 und M_2 durch:

$$M_1 \cup M_2 := \{x : x \in M_1 \vee x \in M_2\}$$

- (b) Den Schnitt von M_1 und M_2 durch:

$$M_1 \cap M_2 := \{x : x \in M_1 \wedge x \in M_2\}$$

- (c) Die Differenz von M_1 und M_2 durch:

$$M_1 \setminus M_2 := \{x : x \in M_1 \wedge x \notin M_2\}$$

- (d) Das Kartesische Produkt von M_1 und M_2 durch:

$$M_1 \times M_2 := \{(a, b) : a \in M_1 \wedge b \in M_2\}$$

- (e) Das Kartesische Produkt von M_1 und M_1 durch;

$$(M_1)^2 := M_1 \times M_1$$

1.2.6 Potenzmenge

Für eine Menge M ist durch

$$P(M) := \{A : A \subseteq M\}$$

die Potenzmenge definiert (Menge aller Teilmengen von M).

Bemerkung

Hier gilt $\emptyset \in P(M)$.

1.2.7 Rechenregeln für Mengen

Für bel. Mengen M_1, M_2, M_3 gilt:

- (a) Kommutativität:

$$M_1 \cup M_2 = M_2 \cup M_1 \text{ und } M_1 \cap M_2 = M_2 \cap M_1$$

- (b) Assoziativität:

$$(M_1 \cup M_2) \cup M_3 = M_1 \cup (M_2 \cup M_3) \text{ und } (M_1 \cap M_2) \cap M_3 = M_1 \cap (M_2 \cap M_3)$$

- (c) Distributivgesetz:

$$M_1 \cap (M_2 \cup M_3) = (M_1 \cap M_2) \cup (M_1 \cap M_3) \text{ und } M_1 \cup (M_2 \cap M_3) = (M_1 \cup M_2) \cap (M_1 \cup M_3)$$

1.2.8 Komplement

Ist X eine feste Menge und $M \subseteq X$ beliebig, so heißt

$$M^c := X \setminus M$$

das Komplement von M (bzgl. X).

1.2.9 Bemerkung

Die Schreibweise erfordert das X aus dem Kontext bekannt sein muss.

1.2.10 Verknüpfungen über mehrere Elemente

Für Mengen M_1, M_2, \dots, M_n mit $n \in \mathbb{N}$ definieren wir die Notation:

(a)

$$\bigcup_{k=1}^n M_k = M_1 \cup M_2 \cup \dots \cup M_n$$

(b)

$$\bigcap_{k=1}^n M_k = M_1 \cap M_2 \cap \dots \cap M_n$$

(c)

$$\prod_{k=1}^n M_k = M_1 \times M_2 \times \dots \times M_n$$

1.2.11 Wichtige Zusammenhänge

(a) $(M^c)^c = M$

(b) $M_1 \subseteq M_2 \Rightarrow M_2^c \subseteq M_1^c$

(c) $(M_1 \cup M_2)^c = M_1^c \cap M_2^c$

1.3 Vollständige Induktion

1.3.1 Summen und Produktzeichen

Für $m, n \in \mathbb{Z}, m \leq n$ und $a_m, a_{m+1}, \dots, a_n \in \mathbb{R}$ definieren wir:

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

und

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

Falls $m > n$ ist definieren wir $\sum_{k=m}^n a_k := 0$ und $\prod_{k=m}^n a_k := 1$

1.3.2 Prinzip der Vollständigen Induktion

Gegen seien Aussagen $A(n)$ für $n \geq n_0$ mit $n_0, n \in \mathbb{Z}$ (n_0 beliebig aber fest).
Und es gelte:

- (a) $A(n_0)$ ist wahr
- (b) Für alle $n \geq n_0$ gilt: $A(n) \Rightarrow A(n+1)$

Bemerkung

- (a) n_0 wird als Induktionsanfang, n als Induktionsschritt bezeichnet
- (b) Nachteil: wir wissen nicht wieso etwas gilt, nur dass es gilt

1.3.3 Rechenregeln für Summen

Für $m, n \in \mathbb{Z}$ und $a_k, b_k, c \in \mathbb{R}$ gilt:

- (a) Indexverschiebung:

$$\sum_{k=m}^n a_k = \sum_{k=m+l}^{n+l} a_{k-l}$$

für beliebiges $l \in \mathbb{Z}$

- (b) Trennen von Summen:

$$\sum_{k=m}^n (a_k + b_k) = \sum_{k=m}^n a_k + \sum_{k=m}^n b_k$$

- (c) Konstante Faktoren können aus der Summe “gezogen” werden:

$$\sum_{k=m}^n c \cdot a_k = c \cdot \sum_{k=m}^n a_k$$

- (d) “Teleskopsummen”:

$$\sum_{k=m}^n (a_k - a_{k+1}) = a_m - a_{n+1}$$

- (e) Summe über Konstanten:

$$\sum_{k=m}^n c = c \cdot (n - m + 1)$$

1.3.4 Doppelsummen

Für $n \in \mathbb{N}$ und $a_{ij} \in \mathbb{R}$, $1 \leq i \leq j \leq n$ gilt:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n a_{ij} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^j a_{ij}$$

1.3.5 Fakultät und Binomialkoeffizient

Für $n \in \mathbb{N}_0$ und ein $\alpha \in \mathbb{R}$ heißt

(a) die Fakultät von n

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

(b) den Binomialkoeffizienten

$$\binom{\alpha}{n} := \frac{\prod_{k=1}^n (\alpha - k + 1)}{n!}$$

1.3.6 Rechenregeln für den Binomialkoeffizienten

Für $n, m \in \mathbb{N}_0$ mit $m \geq n$ und $\alpha \in \mathbb{R}$ gilt:

(a)

$$\binom{\alpha}{n} + \binom{\alpha}{n+1} = \binom{\alpha+1}{n+1}$$

(b)

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

1.3.7 Binomischer Lehrsatz

Für $a, b \in \mathbb{R}$ und $n \in \mathbb{N}_0$ gilt:

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

1.3.8 Definition Betrag

Für $x \in \mathbb{R}$ heißt

$$|x| := \begin{cases} x & , x \geq 0 \\ -x & , x < 0 \end{cases}$$

der Betrag von x

Bemerkung

Es gilt:

- (a) $|x| \geq 0 \quad \forall x \in \mathbb{R}$
- (b) $|x \cdot y| = |x| \cdot |y| \quad \forall x, y \in \mathbb{R}$
- (c) $|x - a| < \varepsilon \Leftrightarrow a - \varepsilon < x < a + \varepsilon$
- (d) $|x| = \max\{x, -x\} \quad \forall x \in \mathbb{R}$

1.3.9 Dreiecksungleichung

Für alle $x, y \in \mathbb{R}$ gilt:

- (a) $|x + y| \leq |x| + |y|$ (obere Dreiecksungleichung)
- (b) $|x + y| \geq ||x| - |y||$ (untere Dreiecksungleichung)

Bemerkung

Es gilt $x \leq |x| \quad \forall x \in \mathbb{R}$.

1.4 Funktion und Differentiation

Eine Funktion (bzw. Abbildung, Operator) f von X nach Y ist eine Vorschrift, die jedem $x \in X$ ein eindeutig bestimmtes $y \in Y$ zuordnet. Das $x \in X$ zugeordnete Element aus Y wird mit $f(x)$ bezeichnet.

Schreibweise

$$f : X \rightarrow Y, \quad x \mapsto f(x)$$

Bemerkung

X heißt Definitionsbereich, $Y := \{y \in Y : \exists x \in X \text{ mit } y = f(x)\}$ die Zielmenge.

1.4.1 Injektivität, Surjektivität, Bijektivität

- (a) Eine Funktion heißt injektiv, falls gilt:

$$x \neq y \Rightarrow f(x) \neq f(y) \text{ for all } x, y \in X$$

- (b) Eine Funktion heißt surjektiv, falls gilt:

$$\forall y \in Y \exists x \in X : y = f(x)$$

- (c) Eine Funktion heißt bijektiv, wenn sie injektiv und surjektiv ist.

1.4.2 Verknüpfung von Funktionen

Gegeben seien $f, g : X \rightarrow Y$ und $c \in \mathbb{R}$. Dann definieren wir die Funktionen

$$\begin{aligned} c \cdot f : X &\rightarrow Y, & x &\mapsto (cf)(x) := c \cdot f(x) \\ f + g : X &\rightarrow Y, & x &\mapsto (f+g)(x) := f(x) + g(x) \\ f \cdot g : X &\rightarrow Y, & x &\mapsto (fg)(x) := f(x) \cdot g(x) \\ \frac{f}{g} : X &\rightarrow Y, & x &\mapsto \left(\frac{f}{g}\right)(x) := \frac{f(x)}{g(x)} \text{ für } x \text{ mit } g(x) \neq 0 \end{aligned}$$

1.4.3 Verkettung von Funktionen

Seien $f : X \rightarrow Y$ und $g : Y \rightarrow Z$ gegeben, dann heißt die Funktion

$$g \circ f : X \rightarrow Z, x \mapsto (g \circ f)(x) := g(f(x))$$

die Verkettung von g mit f oder das Kompositum von g mit f

1.4.4 Stetigkeit und Differenzierbarkeit

Sei $I \subseteq \mathbb{R}$ ein Intervall und $f : I \rightarrow \mathbb{R}$

- (a) f heißt stetig in x_0 , wenn $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = f(x_0)$ gilt
- (b) f heißt stetig auf I , wenn f in jedem $x_0 \in I$ stetig ist.
- (c) f heißt differenzierbar in x_0 , wenn der Grenzwert $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$ existiert.

Bemerkung

Im Fall der Differenzierbarkeit bezeichnen wir den Grenzwert mit $f'(x_0)$ (Newton Notation) oder $\frac{d}{dx}f(x_0)$ (Leibniz Notation).

1.4.5 Zusammenhang Differenzierbarkeit — Stetigkeit

Eine differenzierbare Funktion ist stets stetig.

Bemerkung

Die Ableitung einer differenzierbaren Funktion muss hingegen nicht stetig sein.

1.4.6 Verkettung differentierbarer Funktionen

Seien $g, f : I \rightarrow \mathbb{R}$ differentierbar, dann sind cf , $f + g$, $f \cdot g$ und im Fall $g(x) \neq 0 \forall x \in I$ auch $\frac{f}{g}$ differentierbare Funktionen, und es gilt:

$$\begin{aligned}\frac{d}{dx}(c \cdot f)(x) &= (c \cdot f)'(x) = c \cdot f'(x) \\ \frac{d}{dx}(f + g)(x) &= (f + g)'(x) = f'(x) + g'(x) \\ \frac{d}{dx}(f \cdot g)(x) &= (f \cdot g)'(x) = f'(x) \cdot g(x) + f(x) \cdot g'(x) \\ \frac{d}{dx}\left(\frac{f}{g}\right)(x) &= \left(\frac{f}{g}\right)'(x) = \frac{f'(x)g(x) - g'(x)f(x)}{(g(x))^2}\end{aligned}$$

1.4.7 Differentiation von Monomen

Es sei $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $x \mapsto x^n = f(x)$ und $n \in \mathbb{Z}$. Dann ist f differentierbar mit $f'(x) = n \cdot x^{n-1}$.

1.4.8 Kettenregel

Gegeben seien Intervalle $I, J \subseteq \mathbb{R}$ und differentierbare Funktionen $f : I \rightarrow J, g : J \rightarrow \mathbb{R}$. Dann ist auch $g \circ f$ differentierbar und es gilt:

$$\frac{d}{dx}(g \circ f)(x) = \frac{d}{dx}g(f(x)) = (g \circ f)'(x) = g'(f(x)) \cdot f'(x)$$

1.4.9 Ableitung der Umkehrfunktion

Sei $f : I \rightarrow J$ bijektiv und differentierbar dann ist die Umkehrfunktion $f^{-1} : J \rightarrow I$ ebenfalls differentierbar und es gilt:

$$\frac{d}{dx}f^{-1}(x) = \frac{1}{f'(f^{-1}(x))}$$

1.5 Elementare Funktionen

1.6 Integralrechnung

1.7 Komplexe Zahlen

1.8 Elementare Differentialgleichungen

1.8.1 Definition Rechteck

- (a) $I_1, I_2, \dots, I_n \subseteq \mathbb{R}^n$ seien nicht leeren Intervalle. Dann heißt die Menge $M = I_1 \times I_2 \times \dots \times I_n$ ein (n-Dimensionales) Rechteck.

- (b) Sei $M \subseteq \mathbb{R}^n$ ein Rechteck und $\varphi : M \rightarrow \mathbb{R}$ stetig. Dann heißt eine Funktion $y : I \rightarrow \mathbb{R}$ die Lösung der Differentialgleichung (1. Ordnung)

$$y' = \varphi(t; y)$$

wenn gilt:

- i y ist stetig differentierbar
 - ii $(t, y(t)) \in M \forall t \in I$
 - iii $y'(t) = \varphi(t, y(t)) \forall t \in I$
- (c) Sei $M \subseteq \mathbb{R}^2$ ein Rechteck, $\varphi : M \rightarrow \mathbb{R}$ stetig und $(t_0, y_0) \in M$. Dann heißt $\varphi : I \rightarrow \mathbb{R}$ eine Lösung des Anfangswertproblems (AWP)

$$y' = \varphi(t, y); y(t_0) = y_0$$

wenn y eine Lösung von $y' = f(t, y)$ ist und $y(t_0) = y_0$ gilt.

Bemerkung

Eine DGL n -ter Ordnung mit $n \geq 2$ ist nicht direkt durch die Definition beschrieben.

Wenn wir aber eine Funktion $\vec{y} : I \subseteq \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^2$ definiert mit:

$$\begin{aligned} y(t) &= \begin{pmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{pmatrix} \\ y_1(t) &= x(t) \\ y_2(t) &= \dot{y}_1(t) - \dot{x}(t) \\ \dot{y}_2(t) &= \ddot{x}(t) = -\frac{a_1}{a_2}\dot{x}(t) - \frac{a_0}{a_2}x(t) = -\frac{a_1}{a_2}y_2(t) - \frac{a_0}{a_2}y_1(t) \end{aligned}$$

1.8.2 Lineare DGL 1. Ordnung

Sei $I \subseteq \mathbb{R}$ ein Intervall und t_0 ein Punkt in I mit $t_0 - \delta; t_0 + \delta \subseteq I$ (d.h. nicht auf dem Rand von I). Weiter seien $f, g : I \rightarrow \mathbb{R}$ stetig.

Definiere

$$\begin{aligned} y_0 &: I \rightarrow \mathbb{R} \\ y_0(t) &= \exp\left(\int_{t_0}^t f(u) du\right) \\ y &: I \rightarrow \mathbb{R} \\ y(t) &= \left(y_0 \cdot \int_{t_0}^t \frac{g(u)}{y_0(u)} du\right) \cdot y_0(t) \end{aligned}$$

Dann ist:

- (a) y_0 eine Lösung von $y' = f(t)y; y(t_0) = 1$
- (b) y eine Lösung von $y' = f(t)y + g(t); y(t_0) = y_0$

Kapitel 2

Grenzwerte

2.1 Gruppen und Körper

2.1.1 Gruppen

Eine Gruppe ist definiert als ein Tuppel aus einer (nicht-leeren) Menge und einer Verknüpfung. Eine Gruppe erfüllt die folgenden Axiome (seien $a, b, c \in \mathbb{G}$):

$$\begin{array}{ll} a \circ (b \circ c) = (a \circ b) \circ c & \text{(Assoziativität)} \\ a \circ \varepsilon = a & \text{(Rechtsneutrales Element)} \\ a \circ a' = \varepsilon & \text{(Rechtsinverses Element)} \end{array}$$

Eine abelsche Gruppe erfüllt des weiteren:

$$a \circ b = b \circ a \quad \text{(Kommutativität)}$$

2.1.2 Körper

Ein Körper ist definiert als eine Menge mit mindestens zwei Elementen (0 und 1) und zwei Verknüpfungen.

$$\begin{array}{ll} + : \mathbb{K} \times \mathbb{K} & \rightarrow \mathbb{K} \\ \cdot : \mathbb{K} \times \mathbb{K} & \rightarrow \mathbb{K} \end{array}$$

\mathbb{K} ist bezüglich der Addition und der Multiplikation (genauer: $\mathbb{K} \setminus \{0\}$) ein abelscher Körper, das heißt es gilt (seien $a, b, c \in \mathbb{K}$):

$$\begin{aligned}
 a + (b + c) &= (a + b) + c && \text{(Assoziativität bez. der Addition)} \\
 a + 0 &= a && \text{(Existenz einer 0)} \\
 a + (-a) &= 0 && \text{(Existenz eines Inversen bez. der Addition)} \\
 a + b &= b + a && \text{(Kommutativität bez. der Addition)} \\
 a \cdot (b \cdot c) &= (a \cdot b) \cdot c && \text{(Assoziativität bez. der Multiplikation)} \\
 a \cdot 1 &= a && \text{(Existenz einer 1)} \\
 a \cdot a^{-1} &= 1 \quad \forall a \neq 0 && \text{(Existenz eines Inversen bez. der Multiplikation)} \\
 a \cdot b &= b \cdot a && \text{(Kommutativität bezüglich der Multiplikation)}
 \end{aligned}$$

außerdem gilt:

$$a \cdot (b + c) = (a \cdot b) + (a \cdot c) \quad \text{(Distributivgesetz)}$$

Bemerkung

\mathbb{Q} , \mathbb{R} und \mathbb{C} sind Körper. \mathbb{Z} und \mathbb{N} nicht (kein additiv inverses bei \mathbb{N} , kein multiplikativ inverses bei beiden).

2.1.3 Angeordnete Körper

Ein Körper heißt angeordnet wenn folgende Axiome erfüllt sind (seien $a, b, c \in \mathbb{K}$):

$$\begin{aligned}
 a < b \vee b < a \vee a &= b \\
 a < b \wedge b < c &\Rightarrow a < c \\
 a < b &\Rightarrow a + c < b + c \\
 a < b \wedge c > 0 &\Rightarrow a * c < b * c
 \end{aligned}$$

Bemerkung

\mathbb{Q} und \mathbb{R} sind angeordnete Körper. Für \mathbb{C} kann keine Ordnungsrelation definiert werden so das alle Axiome erfüllt sind.

Gebräuchliche Definition zu angeordneten Körpern

Es gilt $0 < 1$, sonst Widerspruch in (O3).

Die Ordnungsrelation wird dann definiert durch:

$$\begin{aligned}
 2 &:= 1 + 1 \\
 3 &:= 2 + 1 \\
 4 &:= 3 + 1 \\
 &\vdots
 \end{aligned}$$

Die Natürlichen Zahlen werden Induktiv definiert:

1. $1 \in \mathbb{N}$
2. $n \in \mathbb{N} \Rightarrow (n + 1) \in \mathbb{N}$

Bemerkung

Aus 2. lässt sich direkt ableiten das \mathbb{N} nach oben unbeschränkt ist (Archimedisches Prinzip).

Vollständig Angeordnete Körper

Ein Körper heißt Vollständig, falls jede nach oben beschränkte, nicht-leere Teilmenge ein Supremum besitzt.

$\Rightarrow \mathbb{R}$ ist der einzige Vollständig angeordnete Körper.

Bemerkung

\mathbb{Q} ist nicht vollständig angeordnet, da $A := \{x | x^2 \leq 2\} \subset \mathbb{Q}$ kein Supremum besitzt (Supremum ist $\sqrt{2} \notin \mathbb{Q}$).

2.1.4 Minimum und Maximum

Sei \mathbb{K} ein angeordneter Körper und $A \subset \mathbb{K}$ dann heißt m Minimum falls gilt:

1. $m \in \mathbb{K}$
2. $a \geq m \forall a \in A$

Analog ist das Maximum definiert: Sei \mathbb{K} ein angeordneter Körper und $A \subset \mathbb{K}$ dann heißt m Maximum falls gilt:

1. $m \in \mathbb{K}$
2. $a \leq m \forall a \in A$

Schreibweisen: $m = \min(A)$ bzw. $m = \max(A)$

Bemerkung

Minimum und Maximum existieren nicht immer.

Beispiel: $A := \{x | x > 0\} \subset \mathbb{R}$ hat nicht 0 als Minimum da $0 \notin A$ und kein beliebiges m da $\tilde{m} := \frac{m}{2} < m \forall m \in A$

2.1.5 Obere und untere Schranke

Sei \mathbb{K} ein angeordneter Körper und $A \subset \mathbb{K}$ dann ist s untere Schranke falls gilt:

- $s \leq a \quad \forall a \in A$

Analog ist die obere Schranke definiert: Sei \mathbb{K} ein angeordneter Körper und $A \subset \mathbb{K}$ dann ist s obere Schranke falls gilt:

- $s \geq a \quad \forall a \in A$

Bemerkung

Hat eine Menge eine obere (bzw. untere) Schranke heißt er nach oben (bzw. unten) beschränkt. Ist eine Menge nach unten und oben beschränkt bezeichnet man sie als beschränkt.

2.1.6 Supremum und Infimum

s heißt Infimum (größte untere Schranke) falls gilt:

- s ist untere Schranke
- Falls \tilde{s} ebenfalls untere Schranke ist gilt $s \geq \tilde{s}$

Analog ist das Supremum definiert: s heißt Supremum (kleinste obere Schranke) falls gilt:

- s ist obere Schranke
- Falls \tilde{s} ebenfalls obere Schranke ist gilt $s \leq \tilde{s}$

Schreibweise: $s = \inf(A)$ bzw. $s = \sup(A)$

Bemerkung

Wenn Minimum (bzw. Maximum) existieren sind diese gleich dem Infimum (bzw. Supremum).

2.2 Folgen

Eine Folge a_n ist definiert als eine Funktion:

$$a_n := \varphi : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{M} \subset \mathbb{R}$$

oder auch $(a_n)_{n=1}^{\infty}$.

2.2.1 Konvergenz

Eine Folge a_n heißt konvergent wenn gilt:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists n_0(\varepsilon) : |a_n - a| < \varepsilon \quad \forall n > n_0(\varepsilon)$$

Bemerkung

Der Grenzwert ist eindeutig, d.h. es existiert nur ein Grenzwert.

Schreibweise

Falls a_n gegen a konvergiert schreibt man:

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

2.2.2 Bestimmte Divergenz

Eine Folge a_n heißt bestimmt Divergent wenn gilt

$$\forall x \in \mathbb{R} \exists n(x) : a_n > x \text{ bzw. } a_n < x$$

Schreibweise:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \infty \text{ bzw. } -\infty$$

2.2.3 Beschränktheit

Eine Folge heißt beschränkt wenn gilt:

$$|a_n| < c \quad \forall n$$

Beschränktheit nach oben/unten

Eine Folge heißt nach oben (bzw. unten) beschränkt wenn gilt:

$$a_n < c \quad \forall n \in \mathbb{N} \text{ bzw. } a_n > c \quad \forall n \in \mathbb{N}$$

2.2.4 Zusammenhang Konvergenz — Beschränktheit

Jede konvergente Folge ist beschränkt.

2.2.5 Grenzwertrechenregeln

Seien $(a_n)_{n=1}^{\infty}$, $(b_n)_{n=1}^{\infty}$, $(c_n)_{n=1}^{\infty}$ Folgen in \mathbb{C} mit:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a \text{ und } \lim_{n \rightarrow \infty} b_n = b$$

Dann gilt:

- $\lim_{n \rightarrow \infty} |a_n| = |a|$
- $\lim_{n \rightarrow \infty} (a_n + b_n) = a + b$
- $\lim_{n \rightarrow \infty} (a_n \cdot b_n) = a \cdot b$
- Falls $b \neq 0$: $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = \frac{a}{b}$

2.2.6 Sandwich Theorem u.a.

Seien $(a_n)_{n=1}^\infty, (b_n)_{n=1}^\infty, (c_n)_{n=1}^\infty$ Folgen in \mathbb{R} mit:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} b_n = b \text{ und } \gamma \in \mathbb{R}$$

Dann gilt:

- $a_n \leq \gamma \quad \forall n \in \mathbb{N} \Rightarrow a \leq \gamma$
- $a_n \geq \gamma \quad \forall n \in \mathbb{N} \Rightarrow a \geq \gamma$
- $a_n \leq b_n \quad \forall n \in \mathbb{N} \Rightarrow a \leq b$
- $a_n \leq c_n \leq b_n \quad \forall n \in \mathbb{N} \wedge a = b \Rightarrow c = \lim_{n \rightarrow \infty} c_n = a = b$

2.2.7 Monotonie

Eine Folge $(a_n)_{n=1}^\infty$ in \mathbb{R} heißt:

- Monoton wachsend falls: $a_{n+1} \geq a_n \quad \forall n \in \mathbb{N}$ (Schreibweise: $a_n \nearrow$)
- Monoton fallend falls: $a_{n+1} \leq a_n \quad \forall n \in \mathbb{N}$ (Schreibweise: $a_n \searrow$)
- Streng monoton wachsend falls: $a_{n+1} > a_n \quad \forall n \in \mathbb{N}$ (Schreibweise: $a_n \uparrow$)
- Streng monoton fallend falls: $a_{n+1} < a_n \quad \forall n \in \mathbb{N}$ (Schreibweise: $a_n \downarrow$)

2.2.8 Zusammenhang Monotonie und Beschränktheit

Jede Monotone und beschränkte Folge konvergiert.

2.3 Häufungswerte

Häufungswerte sind Grenzwerte einer Teilfolge.

2.3.1 Teilfolgen

Eine Folge $(b_n)_{n=1}^\infty$ heißt Teilfolge von $(a_n)_{n=1}^\infty$, wenn eine streng monotone Funktion $\varphi : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ existiert mit $b_n = a_{\varphi(n)}$.

2.3.2 Teilfolgen einer Konvergenten Folge

Sei $(a_n)_{n=1}^\infty$ eine konvergente Folge in \mathbb{C} mit: $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$ und $(b_n)_{n=1}^\infty$ sei eine Teilfolge. Dann gilt $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = a$.

2.3.3 Häufungswerte

Sei $(a_n)_{n=1}^\infty$ eine Folge in \mathbb{C} . Dann heißt $a \in \mathbb{C}$ ein Häufungswert einer Folge, falls eine Teilfolge gegen a konvergiert.

2.3.4 Limes superior/inferior

Sei $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ eine reelle Folge, dann heißt:

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} a_n := \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n := \sup\{x \in \mathbb{R}, a_n > x \text{ } \infty\text{-oft}\}$$

der Limes superior von $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ und

$$\liminf_{n \rightarrow \infty} a_n := \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n := \inf\{x \in \mathbb{R}, a_n < x \text{ } \infty\text{-oft}\}$$

der Limes inferior von $(a_n)_{n=1}^{\infty}$.

2.3.5 Charakterisierung limsup/liminf

Sei $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ eine reelle Folge und $s \in \mathbb{R}$. Dann gilt:

(a)

$$s = \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n \Leftrightarrow \forall \varepsilon > 0 \text{ gilt:}$$

i $a_n < s + \varepsilon$ für fast alle n

ii $a_n > s - \varepsilon$ für ∞ -viele n

(b)

$$s = \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n \Leftrightarrow \forall \varepsilon > 0 \text{ gilt:}$$

i $a_n > s - \varepsilon$ für fast alle n

ii $a_n < s + \varepsilon$ für ∞ -viele n

2.3.6 Konvergenz und limsup/liminf

Eine beschränkte Folge $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ in \mathbb{R} konvergiert \Leftrightarrow

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n = \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n$$

2.3.7 Satz von Bolzano-Weierstraß

Jede beschränkte Folge in \mathbb{C} besitzt eine konvergente Teilfolge.

2.3.8 Cauchy-Kriterium

Sei $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ eine Folge in \mathbb{C} , dann gilt

$$(a_n)_{n=1}^{\infty} \text{ konv. } \Leftrightarrow \forall \varepsilon > 0 \exists n_0(\varepsilon) : |a_n - a_m| < \varepsilon \forall n, m > n_0(\varepsilon)$$

Bemerkung

Im Gegensatz zur Definition der Folgenkonvergenz muss der Grenzwert nicht bekannt sein.

2.4 Unendliche Reihen

2.4.1 Definition

Sei $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ eine Folge in \mathbb{C} , dann heißt die durch

$$s_n = \sum_{k=1}^n a_k$$

definiert Folge $(s_n)_{n=1}^{\infty}$ eine Folge von Partialsummen der unendlichen Reihe:

$$\sum_{k=1}^{\infty} a_k$$

Falls die Folge $(s_n)_{n=1}^{\infty}$ konvergiert setzen wir:

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

2.4.2 Cauchy-Kriterium für unendliche Reihen

Sei $\sum_{k=1}^{\infty} a_k$ eine ∞ -Reihe, dann gilt:

$$\sum_{k=1}^{\infty} a_k \text{ konv.} \Leftrightarrow \forall \varepsilon > 0 \exists n_0(\varepsilon) : \left| \sum_{k=m}^n a_k \right| < \varepsilon \quad \forall n, m > n_0(\varepsilon)$$

und:

$$\sum_{k=1}^{\infty} a_k \text{ konv.} \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$$

2.4.3 Grenzwertrechenregeln für unendliche Reihen

Seien

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_k \text{ und } \sum_{n=1}^{\infty} b_k \text{ gegeben und } \alpha, \beta \in \mathbb{C}$$

dann gilt:

(a)

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} a_k \text{ und } \sum_{n=1}^{\infty} b_k \text{ konv.:} \\ \Rightarrow \sum_{k=1}^{\infty} (\alpha a_k + \beta b_k) \text{ konv.} \\ \text{und: } \sum_{k=1}^{\infty} (\alpha a_k + \beta b_k) = \alpha \sum_{n=1}^{\infty} a_k + \beta \sum_{n=1}^{\infty} b_k \end{aligned}$$

(b)

$$\sum_{k=1}^{\infty} a_k \text{ konv.} \Leftrightarrow \sum_{k=1}^{\infty} \operatorname{Re}(a_k) \text{ und } \sum_{k=1}^{\infty} \operatorname{Im}(a_k) \text{ konv.}$$

(c)

$$\sum_{k=1}^{\infty} a_k \text{ konv.} \Leftrightarrow \text{die Restreihe } R_n := \sum_{k=n}^{\infty} a_k \text{ konv. gegen } 0 \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} R_n = 0$$

2.4.4 Positive Folgen

Es sei $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ eine Folge mit $(a_n)_{n=1}^{\infty} \in [0, \infty)$ dann gilt:

$$\sum_{k=1}^{\infty} a_k \text{ konv.} \Leftrightarrow \text{Folge der Partialsummen } \sum_{k=1}^n a_k \text{ ist beschr.}$$

2.4.5 Leibniz-Kriterium

Sei $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ eine monoton fallende, reelle Folge. Dann gilt falls $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$ ist, konv. die sogenannte alternierende Reihe

$$\sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k a_k$$

2.4.6 Absolute Konvergenz

Eine Reihe $\sum_{k=1}^{\infty} a_k$ heißt absolut konvergent, wenn

$$\sum_{k=1}^{\infty} |a_k|$$

konvergiert.

Bemerkung

Jede absolut konvergente Reihe ist auch konvergent.

2.4.7 Majorantenkriterium

Seien $\sum_{k=1}^{\infty} a_k$ und $\sum_{k=1}^{\infty} b_k$ mit $b_k \geq 0$ gegeben.
Wenn $\sum_{k=1}^{\infty} b_k$ konv. und ein $c > 0$ ex. mit

$$|a_k| \leq c \cdot |b_k|$$

für fast alle k , dann konv. $\sum_{k=1}^{\infty} a_k$ absolut.

2.4.8 Minorantenkriterium

Falls ein $c > 0$ ex. mit $a_k \geq c \cdot b_k > 0$ für fast alle k , dann:

$$\sum_{k=1}^{\infty} b_k \text{ div.} \Rightarrow \sum_{k=1}^{\infty} a_k \text{ div.}$$

2.4.9 Wurzel- und Quotientenkriterium

Sei $\sum_{k=1}^{\infty} a_k$ gegeben. Dann gilt:

(a) Wenn

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} < 1$$

gilt, dann konv. $\sum_{k=1}^{\infty} a_k$ absolut.

Wenn

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} > 1$$

gilt, dann div. $\sum_{k=1}^{\infty} a_k$.

(b) Wenn $a_n \neq 0 \forall n$ und

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| < 1$$

gilt, dann konv. $\sum_{k=1}^{\infty} a_k$ absolut.

Wenn $a_n \neq 0 \forall n$ und

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| > 1$$

gilt, dann divergiert. $\sum_{k=1}^{\infty} a_k$.

Bemerkung

Wenn das Wurzelkriterium keine Aussage macht, kann das Quotientenkriterium trotzdem eine Aussage machen.

2.4.10 Umordnung einer Reihe

Eine Reihe $\sum_{k=1}^{\infty} b_k$ heißt Umordnung der Reihe $\sum_{k=1}^{\infty} a_k$, wenn eine bij. Abb $\varphi: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ ex. mit $b_k = a_{\varphi(k)}$.

Bemerkung

Die Reihe konvergiert nur gegen den selben Wert, wenn $\sum_{k=1}^{\infty} a_k$ absolut konvergent ist.

2.4.11 Cauchy-Produkt

Die Reihen $\sum_{k=1}^{\infty} b_k$ und $\sum_{k=1}^{\infty} a_k$ seien absolut konv.. Dann gilt:

$$\left(\sum_{k=0}^{\infty} a_k \right) \cdot \left(\sum_{k=0}^{\infty} b_k \right) = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\sum_{j=0}^k a_j \cdot b_{k-j} \right) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k$$

und $\sum_{k=0}^{\infty} c_k$ konv. ebenfalls absolut.

2.4.12 Cauchy-Verdichtungssatz

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n \text{ konv.} \Leftrightarrow \sum_{k=1}^{\infty} 2^k a_{2^k} \text{ konv.}$$

2.5 Potenzreihen

2.5.1 Definition

Sei $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ eine Folge in \mathbb{C} und $z_0 \in \mathbb{C}$. Dann heißt

$$\sum_{k=0}^{\infty} a_k \cdot (z - z_0)^k$$

eine Potenzreihe mit Entwicklungspunkt z_0 und Koeffizienten a_n .

Bemerkung

Viele wichtige Funktionen können als Potenzreihen dargestellt werden.

2.5.2 Hadamard (Konvergenzradius mit Wurzelkriterium)

Sei $\sum_{k=0}^{\infty} a_k (z - z_0)^k$ eine PR. Definiere

$$R := \frac{1}{\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|}}$$

Dabei sei $R := \infty$, falls $\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = 0$ und $R = 0$ falls $\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = \infty$.

Dann konv. die PR absolut, falls $|z - z_0| < R$ und divergiert falls $|z - z_0| > R$.

Bemerkung I

Für $|z - z_0| = R$ wird keine Aussage gemacht.

Bemerkung II

R heißt der Konvergenzradius der Potenzreihe.

2.5.3 Konvergenzradius mit Quotientenkriterium

Sei $\sum_{k=0}^{\infty} a_k(z - z_0)^k$ eine PR. Der Potenzradius kann ebenfalls berechnet werden durch:

$$R = \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_n}{a_{n+1}} \right|$$

2.5.4 Hinweis

Es gilt:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{n} = 1$$

2.5.5 Integration und Differentiation von Potenzreihen

Sei $\sum_{k=0}^{\infty} a_k(z - z_0)^k$ mit Konvergenzradius R . Dann besitzen auch die Potenzreihen

$$\sum_{k=0}^{\infty} k a_k(z - z_0)^{k-1} \text{ und } \sum_{k=0}^{\infty} \frac{a_k}{k+1} (z - z_0)^{k+1}$$

den Konvergenzradius R .

2.5.6 Cauchy-Produkt für Potenzreihen

Seien $\sum_{k=0}^{\infty} a_k(z - z_0)^k$ und $\sum_{k=0}^{\infty} b_k(z - z_0)^k$ Potenzreihen, die den Konvergenzradius R_1 bzw. R_2 besitzen. Dann besitzt

$$\sum_{k=0}^{\infty} c_k(z - z_0)^k \text{ mit } c_k = \sum_{l=0}^k a_l \cdot b_{k-l}$$

den Konvergenzradius $R = \min\{R_1, R_2\}$.

2.5.7 Wichtige Potenzreihen

(a) Die Exponentialfunktion ist definiert durch:

$$\exp : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C} \quad z \mapsto \exp(z) := \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{k!}$$

(b) Die Trigonometrischen Funktionen sind definiert durch:

$$\begin{aligned} \sin : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C} \quad z \mapsto \sin(z) &:= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k+1)!} z^{2k+1} \\ \cos : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C} \quad z \mapsto \cos(z) &:= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k)!} z^{2k} \end{aligned}$$

(c) Tangens und Cotangens sind dann definiert als:

$$\begin{aligned}\tan : \{z \in \mathbb{C} : \cos(z) \neq 0\} &\rightarrow \mathbb{C} & z \mapsto \tan(z) &:= \frac{\sin(z)}{\cos(z)} \\ \cot : \{z \in \mathbb{C} : \sin(z) \neq 0\} &\rightarrow \mathbb{C} & z \mapsto \cot(z) &:= \frac{\cos(z)}{\sin(z)}\end{aligned}$$

2.5.8 Alternative Definition der Exponentialfunktion

$$\forall z \in \mathbb{C} \text{ gilt } \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{z}{n}\right)^n = \exp(z)$$

2.6 Funktionsgrenzwerte

2.6.1 Bemerkung

In diesem Intervall bezeichnet I stets ein offenes Intervall und \bar{I} dessen sog. Abschluss z.B.:

- (a) $I = (a, b)$ und $\bar{I} = [a, b]$
- (b) $I = (-\infty, b)$ und $\bar{I} = (-\infty, b]$
- (c) $I = (a, \infty)$ und $\bar{I} = [a, \infty)$
- (d) $I = (\infty, \infty)$ und $\bar{I} = (\infty, \infty)$

2.6.2 Epsilon-Umgebung

Für $x_0 \in \mathbb{R}$ und $\varepsilon > 0$ heißt

$$U_\varepsilon(x_0) := \{x \in \mathbb{R} : |x - x_0| < \varepsilon\} = (x_0 - \varepsilon, x_0 + \varepsilon)$$

die ε -Umgebung von x_0 . Und

$$\dot{U}_\varepsilon(x_0) := U_\varepsilon(x_0) \setminus \{0\} = (x_0 - \varepsilon, x_0) \cup (x_0, x_0 + \varepsilon)$$

die punktierte ε -Umgebung von x_0 .

2.6.3 Funktionsgrenzwerte (über Delta-Epsilon-Kriterium)

Sei $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ und $x_0 \in I$

- (a) f konv. gegen ein $a \in \mathbb{R}$ für $x \rightarrow x_0$ (kurz: $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a$) wenn gilt

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta(\varepsilon) : |f(x) - a| < \varepsilon \quad \forall x \text{ mit } |x - x_0| < \delta(\varepsilon) \text{ und } x \neq x_0$$

Schreibweise:

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a \text{ oder } f(x) = a \text{ für } x \rightarrow x_0$$

(b) Sei $x_0 \in I$, dann konv. f einseitig von links gegen $a \in \mathbb{R}$ wenn gilt:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta(\varepsilon) : |f(x) - a| < \varepsilon \quad \forall x \in (x_0 - \delta, x_0)$$

Schreibweise:

$$\lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x) = a$$

(c) Sei $x_0 \in I$, dann konv. f einseitig von rechts gegen $a \in \mathbb{R}$ wenn gilt:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta(\varepsilon) : |f(x) - a| < \varepsilon \quad \forall x \in (x_0, x_0 + \delta)$$

Schreibweise:

$$\lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x) = a$$

(d) Sei $I = (\alpha, \infty)$ (bzw. $I = (-\infty, \beta)$) dann konv. f gegen a für $x \rightarrow \infty$ (bzw. $x \rightarrow -\infty$) wenn gilt:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists x_1(\varepsilon) : |f(x) - a| < \varepsilon \quad \forall x \in I : x > x_1(\varepsilon) \text{ (bzw. } x < x_1(\varepsilon))$$

2.6.4 Folgenkriterium

Sei $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ und $x_0 \in \bar{I}, u \in \mathbb{R}$ dann gilt $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = a \Leftrightarrow$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Für eine beliebige Folge } (x_n)_{n=1}^{\infty} \text{ mit} \\ \text{(i) } x_n \neq x_0 \forall n \\ \text{(ii) } \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x_0 \\ \text{gilt stets:} \\ \lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = a \end{array} \right.$$

2.6.5 Rechenregeln für Funktionsgrenzwerte

Seien $f, g : I \rightarrow \mathbb{R}$ und $x_0 \in I$ und gelte

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a, \quad \lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = b$$

Dann gilt:

(a)

$$\lim_{x \rightarrow x_0} (\alpha \cdot f(x)) = \alpha \cdot a$$

(b)

$$\lim_{x \rightarrow x_0} (g(x) + f(x)) = a + b$$

(c)

$$\lim_{x \rightarrow x_0} (g(x) \cdot f(x)) = a \cdot b$$

(d)

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \left(\frac{f(x)}{g(x)} \right) = \frac{a}{b} \quad \text{falls } b \neq 0$$

2.6.6 Cauchy-Kriterium für Funktionsgrenzwerte

Sei $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ und $x_0 \in I$ dann ex. $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) \Leftrightarrow$

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta(\varepsilon) : |f(x) - f(y)| < \varepsilon \forall x, y \in I \text{ mit } 0 < |x - x_0| < \delta(\varepsilon) \text{ und } 0 < |y - x_0| < \delta(\varepsilon)$$

2.6.7 Bestimmte Divergenz

Sei $f : I \rightarrow \mathbb{R}$, $x_0 \in I$ dann definieren wir die bestimmte Divergenz (uneigentliche Konvergenz) von $(f \rightarrow \infty)$ durch

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \infty \Leftrightarrow \forall c > 0 \exists \delta(c) : f(x) > c \forall x \text{ mit } 0 < |x - x_0| < \delta(c)$$

Analog definieren man links- und rechtsseitig Divergenz gegen ∞ bzw. $-\infty$.

2.6.8 Monotone Funktionen

Sei $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ dann heißt (auf I)

- (a) monoton wachsend ($f \nearrow$), falls gilt

$$x < y \Rightarrow f(x) \leq f(y)$$

- (b) streng monoton wachsend ($f \uparrow$), falls gilt

$$x < y \Rightarrow f(x) < f(y)$$

- (c) monoton fallend ($f \searrow$), falls gilt

$$x < y \Rightarrow f(x) \geq f(y)$$

- (d) streng monoton fallend ($f \downarrow$)

$$x < y \Rightarrow f(x) > f(y)$$

- (e) monoton falls f monoton fallend oder monoton steigend ist

- (f) streng monoton falls f streng monoton fallend oder streng monoton steigend ist

- (g) Beschränkt falls gilt:

$$\exists c : |f(x)| < c \forall x \in I$$

2.6.9 Grenzwerte an Intervallgrenzen

Sei $a \leq b$ und $f : (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$ monoton und beschränkt, dann ex.

$$\lim_{x \rightarrow b^-} f(x) \text{ und } \lim_{x \rightarrow a^+} f(x)$$

2.7 Stetigkeit

2.7.1 Anschaulich

Graph einer Funktion kann ohne Absetzen gezeichnet werden \Leftrightarrow

Es gibt keine Sprünge \Leftrightarrow

$f : I \rightarrow \mathbb{R}$ an keiner Stelle $x_0 \in I$ ist ein Sprung \Leftrightarrow

$$\forall x_0 \in I : \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = f(x_0)$$

2.7.2 Stetigkeit: Delta-Epsilon-Kriterium

Sei $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ und $x_0 \in I$, dann ist f in x_0 stetig falls gilt:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta(\varepsilon) : |f(x) - f(x_0)| < \varepsilon \quad \forall x \in I \text{ mit } |x - x_0| < \delta(\varepsilon)$$

Und f ist stetig (auf I), wenn f in jedem $x_0 \in I$ stetig ist.

2.7.3 Bemerkungen

(a) f ist stetig in $x_0 \Leftrightarrow$

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = f(x_0)$$

gilt.

(b) f ist stetig in x_0 dann gilt:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x_0 \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = f(x_0)$$

2.7.4 Rechenregeln für Stetigkeit

Sind $f, g : I \rightarrow \mathbb{R}$ stetig, dann sind auch die Funktionen

(a) $c \cdot f$ (für $c \in \mathbb{R}$)

(b) $f + g$

(c) $f \cdot g$

(d) und falls $g(x) \neq 0 \forall x \in I$ $\frac{f}{g}$

stetig.

Ist $f : I \rightarrow J, g : I \rightarrow \mathbb{R}$ und beide stetig dann ist auch $g \circ f$ stetig.

2.7.5 Stetigkeit von Potenzreihen

Sei $f(x) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k(x - x_0)^k$ eine Potenzreihe mit Konvergenzradius $R > 0$, dann gilt für $x_1 \in U_R(x_0)$, dass $\lim_{x \rightarrow x_1} f(x) = f(x_1)$ (d.h. Potenzreihen sind innerhalb des Konvergenzradius stetig).

2.7.6 Umgebung positiver Funktionswerte

Sei $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ stetig in x_0 , dann gilt:

$$f(x_0) > 0 \Rightarrow \exists \delta > 0 : f(x) > 0 \quad \forall x \in I \text{ mit } |x - x_0| < \delta$$

2.7.7 Zwischenwertsatz

Sei $D = [a, b]$ (also abgeschlossen) und $f : D \rightarrow \mathbb{R}$ stetig dann ex. zu jedem y zwischen $f(a)$ und $f(b)$ ein $x \in [a, b]$ mit $f(x) = y$.

Genauer:

$$\forall y \in [m, M] \quad \exists x \in [a, b] \text{ mit } f(x) = y$$

Wobei $m = \min\{f(a), f(b)\}$ und $M = \max\{f(a), f(b)\}$.

Bemerkung

Bei einer Funktion ist das Bild eines Intervalls wieder ein Intervall. D.h.

$$f([a, b]) = [c, d]$$

2.7.8 Existenz des Logarithmus

Die Exponentialfunktion $\exp : \mathbb{R} \rightarrow (0, \infty)$ ist bijektiv. Das heißt es existiert eine Umkehrfunktion, diese wird $\log : (0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ genannt.

2.7.9 Maximum/Minimum/Infimum/Supremum einer Funktion

Sei $f : D \rightarrow \mathbb{R}$ mit $D \subseteq \mathbb{R}$, dann heißt im Fall der Existenz:

(a)

$$\max_{x \in D} f(x) := \max_D f(x) := \max\{f(x) \mid x \in D\}$$

das Maximum von f auf D .

(b)

$$\min_{x \in D} f(x) := \min_D f(x) := \min\{f(x) \mid x \in D\}$$

das Minimum von f auf D .

(c)

$$\sup_{x \in D} f(x) := \sup_D f(x) := \sup\{f(x) \mid x \in D\}$$

das Supremum von f auf D .

(d)

$$\inf_{x \in D} f(x) := \inf_D f(x) := \inf\{f(x) \mid x \in D\}$$

das Infimum von f auf D .

2.7.10 Beschränktheit einer stetigen Funktion

Seien $a, b \in \mathbb{R}$ mit $a < b$ und eine stetige Funktion $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ gegeben, dann ist f beschränkt. (d.h. $\sup_{[a,b]}(f) < \infty$ und $\inf_{[a,b]}(f) > -\infty$).

2.7.11 Weierstraß: Existenz von Min und Max

Seien $a, b \in \mathbb{R}$ mit $a < b$ und $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ stetig, dann ex.:

$$\min_{[a,b]} f \text{ und } \max_{[a,b]} f$$

2.7.12 Zusammenhang Injektivität — Stetigkeit

Sei $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ stetig auf einem Intervall $I \subseteq \mathbb{R}$. Dann gilt:

$$f \text{ inj. auf } I \Leftrightarrow f \text{ ist streng monoton}$$

2.7.13 Existenz und Monotonie der Umkehrfunktion

Sei $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ stetig und streng monoton auf einem Intervall I . Dann ex. auf $J := f(I)$ die Umkehrfunktion $f^{-1} : J \rightarrow I$ und diese ist im gleichen Sinn wie f streng Monoton und stetig.

2.7.14 Gleichmäßige Stetigkeit

Eine Funktion $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ heißt gleichmäßig stetig auf I , wenn gilt:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta(\varepsilon) |f(x_1) - f(x_2)| < \varepsilon \forall x_1, x_2 \in I \text{ mit } |x_1 - x_2| < \delta(\varepsilon)$$

Bemerkung

Im Gegensatz zur normalen Stetigkeit wird bei der gleichmäßigen Stetigkeit eine Funktion $\delta(\varepsilon)$ für die ganze Funktion bestimmt und nicht nur für jeden Punkt einzeln (also $\delta(x_0, \varepsilon)$). Es wird also zwischen Stetigkeit in einem Punkt und Stetigkeit auf einem Intervall unterschieden.

Kapitel 3

Differentialrechnung

3.1 Ableitung

3.1.1 Definition Differenzen-Quotient

Sei $f : D \subseteq \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Dann heißt f in $x_0 \in D$ differentierbar, falls

$$f'(x_0) := \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$$

für alle $x_0 \in D$ existiert.

3.1.2 Rechtsseitige und linksseitige Ableitung

Im Fall der Existenz heißen

$$\begin{aligned} f'(x_0^+) &:= \lim_{x \rightarrow x_0^+} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \text{ bzw.} \\ f'(x_0^-) &:= \lim_{x \rightarrow x_0^-} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \end{aligned}$$

die rechts- bzw. linksseitige Ableitung in x_0

Bemerkung

$$f'(x_0) \text{ ex.} \Leftrightarrow f'(x_0^+) \text{ und } f'(x_0^-) \text{ ex. und } f'(x_0^+) = f'(x_0^-)$$

3.1.3 Ableitungsregeln

Seien $f, g : D \rightarrow \mathbb{R}$ differentierbar in $x_0 \in D$, dann gilt:

- (a) $(f + g)'(x_0) = f'(x_0) + g'(x_0)$
- (b) $(f \cdot g)'(x_0) = f'(x_0) \cdot g(x_0) + f(x_0) \cdot g'(x_0)$

(c) Falls $g(x_0) \neq 0$: $\left(\frac{f}{g}\right)'(x_0) = \frac{f'(x_0)g(x_0) - f(x_0)g'(x_0)}{g(x_0)^2}$

3.1.4 Alternative Definition der Ableitung

Sei $f : D \subseteq \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ und $x_0 \in D$. Dann gilt: f differenzierbar in $x_0 \Leftrightarrow$

$\exists A \in \mathbb{R}$ und $r : D \rightarrow \mathbb{R}$ mit $\lim_{x \rightarrow x_0} r(x) = 0$ so dass gilt: $f(x) = f(x_0) + A \cdot (x - x_0) + r(x) \cdot (x - x_0)$

3.1.5 Zusammenhang Differenzierbarkeit — Stetigkeit

Ist $f : D \rightarrow \mathbb{R}$ differenzierbar in $x_0 \in D \Rightarrow f$ stetig in x_0

3.1.6 Differentiation von Potenzreihen

Sei $f(x) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k (x - x_0)^k$ eine Potenzreihe mit $R > 0$, dann ist f für x mit $|x - x_0| < R$ differenzierbar, und es gilt:

$$f'(x) = \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cdot k \cdot (x - x_0)^{k-1}$$

Bemerkung

Der Konvergenzradius von $f'(x)$ ist ebenfalls R .

3.1.7 Ableitung der Umkehrfunktion

Seien $I, J \subseteq \mathbb{R}$ Intervalle und $f : I \rightarrow J$ sei differenzierbar und bijektiv, dann ist auch $f^{-1} : J \rightarrow I$ differenzierbar und es gilt:

$$(f^{-1})'(y_0) = \frac{d}{dx} f^{-1}(y_0) = \frac{1}{f'(f^{-1}(y_0))} \forall y_0 \in J \text{ für ein } y_0 = f(x_0) \text{ und } f'(y_0) \neq 0$$

3.1.8 Kettenregel

Seien $f : A \rightarrow B$, $g : B \rightarrow \mathbb{R}$ mit $A, B \subseteq \mathbb{R}$ differenzierbar auf A bzw. B , dann ist auch $g \circ f$ auf A differenzierbar und es gilt:

$$(g \circ f)'(x_0) = g'(f(x_0)) \cdot f'(x_0) \quad \forall x_0 \in A$$

3.2 Mittelwertsätze

3.2.1 Satz von Rolle

Sei $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ stetig und auf (a, b) differenzierbar. Falls $f(a) = f(b)$ gilt, existiert ein $x_0 \in (a, b)$ mit $f'(x_0) = 0$

3.2.2 Definition lokaler Extrempunkt

Sei $f : D \rightarrow \mathbb{R}$ und $x_0 \in D$. Dann besitzt f in x_0 ein lokales Maximum (bzw. Minimum): \Leftrightarrow

$$\exists \delta > 0 : f(x) \leq f(x_0) \text{ (bzw. } f(x) \geq f(x_0)) \quad \forall x \in D \cap U_\delta(x_0)$$

3.2.3 Notwendige Bedingung für lokale Extrema

Sei $f : D \rightarrow \mathbb{R}$ differenzierbar in $x_0 \in D$ und x_0 sei kein Randpunkt, dann gilt:
Liegt bei x_0 ein lokales Maximum/Minimum $\Rightarrow f'(x_0) = 0$.

3.2.4 2. Mittelwertsatz

Seien $f, g : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ stetig und auf (a, b) differenzierbar dann existiert ein $x_0 \in (a, b)$ mit

$$f'(x_0) \cdot (g(b) - g(a)) = g'(x_0) \cdot (f(b) - f(a))$$

Bzw. falls nicht durch Null geteilt wird:

$$\frac{f'(x_0)}{g'(x_0)} = \frac{f(b) - f(a)}{g(b) - g(a)}$$

3.2.5 1. Mittelwertsatz (Folgerung aus 2. Mittelwertsatz)

Sei $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ stetig und auf (a, b) differenzierbar

$$\Rightarrow \exists x_0 \in (a, b) \text{ mit } f'(x_0) = \frac{f(b) - f(a)}{b - a}$$

3.2.6 L'Hospital

Seien $f, g : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ ($a < b, b \in (\mathbb{R} \cup \infty)$) differenzierbar auf (a, b) mit $g'(x) \neq 0 \quad \forall x \in (a, b)$. Falls der Grenzwert $\alpha = \lim_{x \rightarrow b^-} \frac{f'(x)}{g'(x)}$ ex. und:

(a) $\lim_{x \rightarrow b^-} f(x) = \lim_{x \rightarrow b^-} g(x) = 0$ oder

(b) $\lim_{x \rightarrow b^-} g(x) = \infty$

dann gilt:

$$\lim_{x \rightarrow b^-} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x \rightarrow b^-} \frac{f'(x)}{g'(x)}$$

3.2.7 Satz von Taylor

Sei $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ $n + 1$ mal differentierbar auf (a, b) und $x_0 \in (a, b)$. Dann gilt für ein $\xi \in (x_0, x)$:

$$f(x) = \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(x_0)}{k!} \cdot (x - x_0)^k + \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!} \cdot (x - x_0)^{n+1}$$

Teil II

HM 2 — Zusammenfassung

Kapitel 4

Integration

4.1 Integration

4.1.1 Definition Zerlegung, Zwischenwerte

Eine Teilmenge T von $[a, b]$ mit $a, b \in T$ nennt man eine Unterteilung, Zerlegung oder Partitionierung von $[a, b]$ wenn gilt:

$$T = \{x_0, x_1, \dots, x_n\} \text{ mit} \\ a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$$

Schreibweise für diese Menge T sei:

$$T : a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$$

Ist T eine Zerlegung, dann heißt:

- (a) Die Zahl $\mu(T) := \max\{|x_{k-1} - x_k|, k = 0, \dots, n\}$ das Feinheitsmaß von T .
- (b) Ein Vektor $\xi = (\xi_1, \dots, \xi_n) \in \mathbb{R}^n$ heißt ein Zwischenwertvektor zu T , wenn gilt

$$x_{k-1} \leq \xi_k \leq x_k \text{ für } k = 1, \dots, n$$

Dann heißt die Komponente ξ_k ein Zwischenwert von x_{k-1} und x_k .

4.1.2 Definition Riemannsumme

Ist $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion, $T : a = x_0 < \dots < x_n = b$ eine Zerlegung von $[a, b]$ und $\xi = (\xi_1, \dots, \xi_n)$ ein Zwischenwertevektor zu T , dann nennen wir die Summe

$$S(f; T, \xi) = S_f(T, \xi) = \sum_{k=1}^n f(\xi_k)(x_k - x_{k-1})$$

die Riemansumme von f bezüglich T und ξ .

4.1.3 Definition Riemann-Integral

Eine Funktion $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ heißt Riemann-Integrierbar unter $[a, b]$ wenn für jede Folge $(T_N)_{N=1}^{\infty}$ von Zerlegungen von $[a, b]$ mit $\mu(T_N) \rightarrow 0$ für $N \rightarrow \infty$ und jede Folge $(\xi_N)_{N=1}^{\infty}$ von Zwischenpunktvektoren der Grenzwert

$$\lim_{N \rightarrow \infty} S(f; T_N, \xi_N) \text{ existiert.}$$

Behauptung

Der Grenzwert ist im Fall der Existenz für jede Folge identisch.

Bemerkung

(a) Im Fall der Existenz bezeichnet man den Grenzwert durch:

$$\int_a^b f(x) \, dx = \lim_{N \rightarrow \infty} S(f; T_N, \xi_N)$$

(b) Zu $(T_N)_{N=1}^{\infty}$, also T_1, T_2, T_3, \dots :

$$\begin{aligned} T_1 : & \quad a = x_0^{(1)} < \dots < x_n^{(1)} = b \\ T_2 : & \quad a = x_0^{(2)} < \dots < x_n^{(2)} = b \\ T_3 : & \quad a = x_0^{(3)} < \dots < x_n^{(3)} = b \\ & \quad \vdots \\ T_l : & \quad a = x_0^{(l)} < \dots < x_n^{(l)} = b \end{aligned}$$

(c) Zu $(\xi_N)_{N=1}^{\infty}$, also $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots$:

$$\begin{aligned} \xi_1 &= (\xi_1^{(1)}, \dots, \xi_n^{(1)}) \text{ mit } x_{k-1}^{(1)} \leq \xi_k^{(1)} \leq x_k^{(1)} \text{ mit } 1 \leq k \leq n_1 \\ \xi_2 &= (\xi_1^{(2)}, \dots, \xi_n^{(2)}) \text{ mit } x_{k-1}^{(2)} \leq \xi_k^{(2)} \leq x_k^{(2)} \text{ mit } 1 \leq k \leq n_2 \\ \xi_3 &= (\xi_1^{(3)}, \dots, \xi_n^{(3)}) \text{ mit } x_{k-1}^{(3)} \leq \xi_k^{(3)} \leq x_k^{(3)} \text{ mit } 1 \leq k \leq n_3 \\ & \quad \vdots \\ \xi_l &= (\xi_1^{(l)}, \dots, \xi_n^{(l)}) \text{ mit } x_{k-1}^{(l)} \leq \xi_k^{(l)} \leq x_k^{(l)} \text{ mit } 1 \leq k \leq n_l \end{aligned}$$

(d) Sei f integrierbar und $(T_N)_{N=1}^{\infty}$ und $(\xi_N)_{N=1}^{\infty}$ sowie $(\tilde{T}_N)_{N=1}^{\infty}$ und $(\tilde{\xi}_N)_{N=1}^{\infty}$ entsprechende Folgen, d.h. $\mu(T_N) \rightarrow 0, \mu(\tilde{T}_N) \rightarrow 0$ für $N \rightarrow \infty$. Dann gilt für $(\hat{T}_N)_{N=1}^{\infty}$ und $(\hat{\xi}_N)_{N=1}^{\infty}$ mit

$$\hat{T}_N := \begin{cases} T_N & \text{für } N \text{ gerade} \\ \tilde{T}_N & \text{für } N \text{ ungerade} \end{cases}$$

und

$$\hat{\xi}_N := \begin{cases} \xi_N & \text{für } N \text{ gerade} \\ \tilde{\xi}_N & \text{für } N \text{ ungerade} \end{cases}$$

dass

$$\lim_{N \rightarrow \infty} S(f; \hat{T}_N, \hat{S}_N)$$

existiert, da f integrierbar ist.

Dann stimmt der Grenzwert von $\lim_{N \rightarrow \infty} S(f; \tilde{T}_N, \tilde{S}_N)$ und $\lim_{N \rightarrow \infty} S(f; T_N, S_N)$ überein.

4.1.4 Menge der Riemann-Integrierbaren Funktionen

Mit $R[a, b]$ oder $R([a, b])$ bezeichnen wir die Menge von Funktionen $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ die auf $[a, b]$ Riemann integrierbar sind.

4.1.5 Kriterien für Riemann-Integrierbarkeit

(a)

$$f \in R[a, b] \Rightarrow f \text{ ist auf } [a, b] \text{ beschränkt}$$

(b) Ist $f, g \in R[a, b]$ und $c \in \mathbb{R}$ dann sind auch die Funktionen

$$\begin{array}{rcl} f & + & g \\ f & - & g \\ c & \cdot & f \end{array}$$

Riemann integrierbar auf $[a, b]$.

(c) Ist $f, g \in R[a, b]$, dann ist auch

$$f \cdot g \in R[a, b]$$

(d) Ist $f, g \in R[a, b]$ und falls $|g(x)| > \delta > 0 \forall x \in [a, b]$ dann ist auch

$$\frac{f}{g} \in R[a, b]$$

(e) Für beliebiges $c \in [a, b]$ gilt:

$$f \in R[a, b] \Leftrightarrow f \in R[a, c] \wedge f \in R[c, b]$$

und weiter gilt:

$$\int_a^b f(x) \, dx = \int_a^c f(x) \, dx + \int_c^b f(x) \, dx$$

(f)

$$f \in R[a, b] \Rightarrow |f| \in R[a, b]$$

und

$$\left| \int_a^b f(x) \, dx \right| \leq \int_a^b |f(x)| \, dx$$

4.1.6 Änderung von Funktionen

Wenn $f \in R[a, b]$ ist und durch endlich viele Änderungen daraus $g : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ konstruiert werden kann, d.h.

$$g(x) = \begin{cases} f(x) & \text{falls } x \notin \{x_1, \dots, x_n\} \\ y_1 & \text{falls } x = x_1 \\ \vdots & \end{cases}$$

dann gilt $g \in R[a, b]$ und

$$\int_a^b f(x) \, dx = \int_a^b g(x) \, dx$$

4.1.7 Zusammenhang Stetigkeit und Integrierbarkeit

Es gilt:

$$f \in C[a, b] \Rightarrow f \in R[a, b]$$

4.1.8 Stückweise Integration

Falls $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ stückweise stetig ist, d.h. es existieren endlich viele Intervall-Stücke auf denen f stetig ist, dann ist $f \in R[a, b]$ und es gilt:

$$\int_a^b f(x) \, dx = \int_{x_0}^{x_1} f(x) \, dx + \int_{x_1}^{x_2} f(x) \, dx + \dots + \int_{x_{n-1}}^{x_n} f(x) \, dx$$

4.1.9 1. Mittelwertsatz der Integralrechnung

Seien $f, g \in R[a, b]$ und $g \geq 0$ auf $[a, b]$. Dann gibt es ein $\mu \in \mathbb{R}$ mit $\inf_{[a, b]} f(x) \leq \mu \leq \sup_{[a, b]} f(x)$ sodass gilt:

$$\int_a^b f(x)g(x) \, dx = \mu \int_a^b g(x) \, dx$$

Ist f stetig auf $[a, b]$, dann existiert ein $\xi \in [a, b]$ mit

$$\int_a^b f(x)g(x) \, dx = f(\xi) \int_a^b g(x) \, dx$$

Bemerkung

Für $g(x) = 1$ und f stetig lautet die Aussage also:

$$\int_a^b f(x) \, dx = f(\xi) \cdot (b - a)$$

4.1.10 Existenz der Stammfunktion

Sei $f \in R[a, b]$, dann ist für jedes $c \in [a, b]$ durch:

$$F(x) := \int_c^x f(t) dt$$

eine stetige Funktion definiert. Und für jedes $x_0 \in (a, b)$ gilt:

$$f \text{ stetig in } x_0 \Rightarrow F \text{ ist differentierbar in } x_0 \wedge F'(x_0) = f(x_0)$$

4.1.11 Definition Stammfunktion

Gilt $F'(x) = f(x) \forall x \in [a, b]$ dann wird F als Stammfunktion von f bezeichnet.

4.1.12 Eindeutigkeit der Stammfunktion

Sind F und G Stammfunktionen von f , dann existiert ein $c \in \mathbb{R}$ mit

$$F(x) = G(x) + c \forall x \in [a, b]$$

4.1.13 Hauptsatz der Differential und Integralrechnung

Sei $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ gegeben dann gilt:

(a) Ist $f \in R[a, b]$ und F eine Stammfunktion, dann gilt:

$$\int_a^b f(t) dt = F(b) - F(a) =: [F(x)]_a^b$$

(b) Ist $f \in C[a, b]$ dann existiert eine Stammfunktion und zwar

$$F(x) := \int_c^x f(t) dt$$

Bemerkung

Aus dem Hauptsatz folgen Integrationstechniken wie partielles Integrieren oder die Substitutionsregel.

4.1.14 Zusammenhang Monotonie und Riemann-Integrierbarkeit

Ist $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ auf $[a, b]$ monoton, dann ist $f \in R[a, b]$.

4.1.15 Zweiter Mittelwertsatz der Integralrechnung

Ist f monoton auf $[a, b]$, g integrierbar auf $[a, b]$, dann existiert ein $\xi \in [a, b]$ mit:

$$\int_a^b f(x)g(x) dx = f(a) \int_a^\xi g(x) dx + f(b) \int_\xi^b g(x) dx$$

4.2 Uneigentliche Integrale

4.2.1 Definition uneigentliches Integral

Eine Funktion $f : [a, b) \rightarrow \mathbb{R}$ mit $a < b \leq \infty$ heißt über $[a, b)$ uneigentlich Riemann integrierbar, wenn gilt:

- (a) $\forall c$ mit $a \leq c < b$ ist $f \in R[a, c]$
- (b) Der Grenzwert

$$\alpha = \lim_{c \rightarrow b^-} \int_a^c f(x) \, dx$$

existiert. In dem Fall schreiben wir

$$\alpha = \int_a^b f(x) \, dx$$

und sagen das uneigentliche Integral

$$\int_a^b f(x) \, dx$$

konvergiert gegen α oder hat den Wert α .

Andernfalls divergiert das uneigentliche Integral. Analog geht man für Funktionen

- $f : (a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ mit $-\infty \leq a < b$ und
- $f : (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$ mit $-\infty \leq a < b \leq \infty$

vor.

4.2.2 Cauchy-Kriterium

Sei $f \in R[a, b]$ $\forall c \in (a, b), a < c \leq \infty$ Dann konv.

$$\int_a^b f(x) \, dx$$

- (a) Im Fall $b < \infty$ genau dann, wenn gilt:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 : \left| \int_{T_1}^{T_2} f(x) \, dx \right| < \varepsilon \quad \forall T_1, T_2 \in [b - \delta, b)$$

- (b) Im Fall $b = \infty$, wenn gilt:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists K \geq a : \left| \int_{T_1}^{T_2} f(x) \, dx \right| < \varepsilon \quad \forall T_1, T_2 \geq K$$

4.2.3 Majorantenkriterium

Seien $f, g \in R[a, c] \forall c \in (a, b), a < b \leq \infty$ oder $f, g \in R[c, b] \forall c \in (a, b) - \infty \leq a < b$. Außerdem $|f(x)| \leq g(x)$. Und

$$\int_a^b g(x) \, dx$$

konvergiert, dann konvergiert auch

$$\int_a^b f(x) \, dx$$

4.2.4 Absolute Konvergenz

Ist $f \in R[T_1, T_2]$ für $a < T_1 \leq T_2 < b \leq \infty$ so heißt

$$\int_a^b f(x) \, dx$$

absolut konvergent, wenn

$$\int_a^b |f(x)| \, dx$$

konvergent ist.

4.2.5 Minorantenkriterium

$$f(x) \geq g(x) \geq 0 \wedge \int_a^b g(x) \, dx = \infty \Rightarrow \int_a^\infty f(x) \, dx = \infty$$

4.2.6 Integralkriterium für Reihen

Sei $f : [a, \infty) \rightarrow [0, \infty)$ und $f \searrow (a \in \mathbb{Z})$. Dann gilt:

$$\sum_{n=m}^{\infty} f(n) < \infty \Leftrightarrow \int_a^{\infty} f(x) \, dx < \infty$$

Kapitel 5

Gleichmäßige Konvergenz

5.1 Gleichmäßige Konvergenz

5.1.1 Definition Funktionenfolge und Funktionenreihe

Sei M eine Menge und $m \in \mathbb{Z}$. Ist jedem $n \in \{m, m+1, \dots\}$ eine Funktion $f_n : M \rightarrow \mathbb{R}$ zugeordnet, so nennt man:

- (a) Die Folge $(f_n)_{n=m}^{\infty}$ eine Funktionenfolge auf M
- (b) Die Reihe $\sum_{n=m}^{\infty} f_n(x)$ eine Funktionenreihe auf M

konvergiert $(f_n)_{n \geq m}$ (bzw. $\sum_{n=m}^{\infty} f_n(x)$) für alle $x \in \tilde{M} \subseteq M$ so heißt die durch $f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$ (bzw. $f(x) = \sum_{n=m}^{\infty} f_n(x)$) definierte Funktion $f : \tilde{M} \rightarrow \mathbb{R}$ die Grenzfunktion von $(f_n)_{n=m}^{\infty}$ (bzw. $\sum_{n=m}^{\infty} f_n$).

5.1.2 Gleichmäßige Konvergenz

Sei M eine Menge und sei $f : M \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion.

- (a) Eine Funktionenfolge $(f_n)_{n=1}^{\infty}$ heißt auf M gleichmäßig konvergent gegen f wenn gilt:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists n_0(\varepsilon) : |f_n(x) - f(x)| < \varepsilon \quad \forall x \in M \text{ und } n \geq n_0(\varepsilon)$$

- (b) Eine Funktionenfolge $\sum_{n=m}^{\infty} f_n$ konvergiert gleichmäßig auf M wenn gilt:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists n_0(\varepsilon) : \left| \sum_{k=m}^n f_k(x) - f(x) \right| < \varepsilon \quad \forall x \in M \text{ und } n \geq n_0(\varepsilon)$$

Bemerkung

Offensichtlich gilt:

$$\text{Gleichmäßig konvergent} \Rightarrow \text{Punktweise Konvergent}$$

5.1.3 Stetigkeit der Grenzfunktion

Sei $(f_n)_{n=1}^\infty$ (bzw. $\sum_{n=1}^\infty f_n(x)$) gleichmäßig konvergent gegen f auf einem Intervall I und alle f_n stetig auf I . Dann ist auch die Grenzfunktion f stetig.

5.1.4 Integration der Grenzfunktion

Sei $(f_n)_{n=1}^\infty$ eine Folge von integrierbaren Funktionen auf $[a, b]$

- (a) Falls $(f_n)_{n=1}^\infty$ gleichmäßig gegen f konvergiert, dann ist auch f auf $[a, b]$ integrierbar und es gilt:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_a^b f_n(x) \, dx = \int_a^b \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) \, dx$$

- (b) Analog für Funktionenreihen

5.1.5 Cauchy Kriterium für gleichmäßige Konvergenz

- (a) Eine Funktionenfolge $(f_n)_{n=1}^\infty$ konvergiert genau dann gleichmäßig auf einer Menge M (\subseteq Definitionsbereich), wenn gilt:

$$\forall \varepsilon > 0 \, \exists n(\varepsilon) : |f_n(x) - f_m(x)| < \varepsilon \, \forall n \geq n(\varepsilon) \, \forall x \in M$$

- (b) Analog für Funktionenreihen

5.1.6 Differentiation der Grenzfunktion

Sei $(f_n)_{n=1}^\infty$ eine auf dem Intervall I differentierbare Folge von Funktionen.

- (a) Konvergiert die Folge $(f'_n)_{n=1}^\infty$ gleichmäßig auf I und konvergiert für ein beliebiges, festes $x_0 \in I$ die reelle Folge $(f_n(x_0))_{n=1}^\infty$ dann ist auch die Grenzfunktion f von $(f_n)_{n=1}^\infty$ differentierbar und es gilt:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{d}{dx} f_n(x) = \frac{d}{dx} \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$$

- (b) Analog für Funktionenreihen

Bemerkung

Außerdem gilt dass $(f_n)_{n=1}^\infty$ (bzw. $\sum_{n=1}^\infty f_n$) auf jedem beschränkten Teilintervall von I gleichmäßig konvergiert.

5.1.7 Majorantenkriterium auf Potenzreihen anwenden

Für eine reelle Potenzreihe $f(x) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k (x - x_0)^k$ mit Konvergenzradius $R > 0$ gilt:

(a) f ist stetig auf $(x_0 - R, x_0 + R) =: I$

(b) f ist differentierbar auf I und

$$f'(x) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k \cdot k \cdot (x - x_0)^{k-1}$$

(c) f ist integrierbar auf I und hat die Stammfunktion

$$F(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{a_k}{k+1} (x - x_0)^{k+1}$$

Bemerkung

Wurde alles schon in HM1 gezeigt aber mühsam.

5.1.8 Majorantenkriterium für Funktionenreihen

Falls $|f_n(x)| \leq a_n$ und $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ konvergiert $\Rightarrow \sum_{n=1}^{\infty} f_n(x)$ ist gleichmäßig konvergent.

Kapitel 6

Differentialrechnung mit mehreren Variablen

6.1 Der n-dimensionale Euklidische Raum

6.1.1 Definitionen

Sind $n, m \in \mathbb{N}$, so gelten folgende Bezeichnungen:

$$\mathbb{R}^n := \left\{ \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \text{ für } x_1, \dots, x_n \in \mathbb{R} \right\}$$

$$\mathbb{R}^{m \times n} := \left\{ \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \text{ für } a_{ij} \in \mathbb{R}, 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n \right\}$$

$$\langle x, y \rangle := x \cdot y := x^T y := \sum_{k=1}^n x_k y_k \text{ (Skalarprodukt)}$$

$$\|x\| := \|x\|_2 := |x| := \sqrt{\sum_{k=1}^n x_k^2} \text{ euklidische Norm des } \mathbb{R}^n / \text{Betrag in } \mathbb{R}^n$$

6.1.2 Folgerungen

1.

$$\|x\|_\infty = \max_{k=1 \dots n} |x_k| \leq \|x\|_2 \leq \sqrt{n} \max_{k=1 \dots n} |x_k| \quad \forall x \in \mathbb{R}^n$$

2.

$$\|x\|_1 = \sum_{k=1}^n |x_k|$$

und

$$\|x\|_2 \leq \|x\|_1$$

3. $\|x\|_1, \|x\|_2, \|x\|_\infty$ sind drei mögliche Festlegungen für Vektornormen. Allgemein hat eine Norm $\|\cdot\|_2$ ($\|\cdot\|_2 : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$) folgende Eigenschaften:

$$\begin{aligned} \|x\| &\geq 0 & \forall x \in \mathbb{R}^n \wedge \|x\| = 0 &\Leftrightarrow x = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \vec{0} \\ \|\alpha \cdot x\| &= |\alpha| \cdot \|x\| & \forall \alpha \in \mathbb{R} \wedge \forall x \in \mathbb{R}^n \\ \|x + y\| &\leq \|x\| + \|y\| & \forall x, y \in \mathbb{R}^n \end{aligned}$$

4. Der Einheitskreis ist bezüglich verschiedener Normen nicht immer ein Kreis
5. p-Norm:

$$\|x\|_p = \sqrt[p]{\sum_{k=1}^n |x_k|^p}$$

6. $x \cdot y$ im \mathbb{R}^2 hat die anschauliche Bedeutung

$$\langle x, y \rangle = x \cdot y = \|x\|_2 \cdot \|y\|_2 \cdot \cos(\alpha)$$

Daraus folgt die Cauchy-Schwarzsche-Ungleichung (CSU)

$$\langle x, y \rangle \leq \|x\|_2 \cdot \|y\|_2$$

6.1.3 Konventionen

- (a) In \mathbb{R}^n sei stets $A^c := \mathbb{R}^n \setminus A$ für eine Menge $A \subseteq \mathbb{R}^n$
- (b) Mit $\|\cdot\|$ bezeichnen wir die euklidische Norm $\|\cdot\|_2$. Außer es wird explizit gesagt, dass $\|\cdot\|$ eine allgemeine Norm ist (z.B. „Sei $\|\cdot\|$ eine Norm auf \mathbb{R}^n)

6.1.4 Definition Epsilon-Umgebung

Sei $a \in \mathbb{R}^n, \varepsilon > 0$ dann heißt

$$U_\varepsilon(a) := \{x \in \mathbb{R}^n \mid \|x - a\| < \varepsilon\} \text{ die } \varepsilon\text{-Umgebung von } a$$

$$\dot{U}_\varepsilon(a) := U_\varepsilon(a) \setminus \{a\} \quad (= \{x \in \mathbb{R}^n \mid 0 < \|x - a\| < \varepsilon\}) \text{ die punktierte } \varepsilon\text{-Umgebung von } a$$

6.1.5 Definition Topologische Begriffe

Sei $A \subseteq \mathbb{R}^n$. Ein Punkt $a \in \mathbb{R}^n$ heißt:

- (a) Innerer Punkt von A , falls ein $\varepsilon > 0$ existiert, sodass $U_\varepsilon(a) \subseteq A$ Kurz:

$$a \text{ innerer Punkt von } A :\Leftrightarrow \exists \varepsilon > 0 : U_\varepsilon(a) \subseteq A$$

Die Menge $\overset{\circ}{A}$ ist die Menge aller innerer Punkte von A

$$\overset{\circ}{A} := \{a \in \mathbb{R}^n \mid \exists \varepsilon > 0 \text{ mit } U_\varepsilon(a) \subseteq A\}$$

- (b) Berührungspunkt von A , wenn jede ε -Umgebung von a mindestens einen Punkt aus A enthält. Kurz:

$$a \in \mathbb{R}^n \text{ ist Berührungspunkt von } A :\Leftrightarrow \forall \varepsilon > 0 : U_\varepsilon(a) \cap A \neq \emptyset$$

Die Menge aller Berührungspunkte von

$$\bar{A} := \{x \in \mathbb{R}^n \mid \forall \varepsilon > 0 \text{ ist } U_\varepsilon(x) \cap A \neq \emptyset\}$$

heißt der Abschluss oder abgeschlossene Hülle von A .

- (c) Häufungspunkt von A , wenn jede punktierte ε -Umgebung von a ein Element von A enthält. Kurz:

$$a \in \mathbb{R}^n \text{ ist Häufungspunkt} :\Leftrightarrow \forall \varepsilon > 0 : \dot{U}_\varepsilon(a) \cap A \neq \emptyset$$

- (d) Randpunkt von A , wenn jede ε -Umgebung Elemente aus A und A^c enthält. Kurz:

$$a \in \mathbb{R}^n \text{ ist Randpunkt von } A :\Leftrightarrow \forall \varepsilon > 0 (U_\varepsilon(a) \cap A \neq \emptyset) \wedge (U_\varepsilon(a) \cap A^c \neq \emptyset)$$

Die Menge

$$\partial A := \{a \in \mathbb{R}^n \mid a \text{ ist Randpunkt von } A\}$$

heißt der Rand von A .

Bemerkung

Man kann zeigen:

$$\bar{A} = A \cup \partial A = \overset{\circ}{A} \cup \partial A$$

6.1.6 Definition offene und abgeschlossene Menge

Eine Menge $A \subseteq \mathbb{R}^n$ heißt:

- (a) offen, wenn $A = \overset{\circ}{A}$ gilt (also A besteht nur aus inneren Punkten)
- (b) abgeschlossen, wenn $\partial A \subseteq A$ (Rand gehört zu A)

6.2 Folgen

6.2.1 Definition

Eine Folge

$$a_k = \begin{pmatrix} a_1^{(k)} \\ \vdots \\ a_n^{(k)} \end{pmatrix}$$

in \mathbb{R}^n heißt:

- (a) Konvergent gegen einen Grenzwert a , wenn gilt:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists n(\varepsilon) : \|a_k - a\| < \varepsilon \quad \forall k \geq n(\varepsilon)$$

Schreibweise:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} a_k = a \text{ oder } a_k \rightarrow a \quad (k \rightarrow \infty)$$

- (b) Beschränkt, wenn gilt:

$$\exists c > 0 : \|a_k\| < c \quad \forall k \in \mathbb{N}$$

Bemerkung

- (a) Die Norm $\|\cdot\|$ sei hier die euklidische Norm $\|\cdot\|_2$. Wir werden aber sehen:
Jede Norm auf \mathbb{R}^n wäre ok.

- (b)

$$a_k \rightarrow a \quad (k \rightarrow \infty) \Rightarrow \text{Jede Komponente von } a_k \text{ konvergiert gegen entsprechende Komponente von } a$$

- (c) Cauchy-Kriterium:

$$(a_k)_{k=1}^{\infty} \text{ konv.} \Leftrightarrow \forall \varepsilon > 0 \exists n(\varepsilon) : \|a_k - a_l\| < \varepsilon \quad \forall k, l \geq n(\varepsilon)$$

6.2.2 Bolzano-Weierstraß

Jede beschränkte Folge im \mathbb{R}^n hat eine konvergente Teilfolge.

6.2.3 Grenzwertrechenregeln

Die Grenzwertrechenregeln übertragen sich auch auf Folgen im \mathbb{R}^n .

6.2.4 Weitere Bemerkungen

Sei $A \subseteq \mathbb{R}^n$ und $a \in \mathbb{R}^n$, dann gilt:

(a)

$$a \in \bar{A} \Leftrightarrow \exists (a_k)_{k=1}^{\infty} \text{ mit } a_k \in A \forall k \text{ mit } \lim_{k \rightarrow \infty} a_k = a$$

(b) a ist ein Häufungspunkt von A

$$\exists (a_k)_{k=1}^{\infty} \text{ mit } a_k \in A \setminus \{a\} \text{ mit } \lim_{k \rightarrow \infty} a_k = a$$

(c) A ist abgeschlossen \Leftrightarrow für jede konvergente Folge $(a_k)_{k=1}^{\infty}$ mit $a_k \in A \forall k$ gilt $\lim_{k \rightarrow \infty} a_k \in A$.

(d) A ist kompakt \Leftrightarrow Jede Folge in A besitzt einen Häufungspunkt in A .

6.3 Funktionsgrenzwerte und Stetigkeit

6.3.1 Definition Funktion

Eine Funktion $f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ nennt man eine Funktion in n Veränderlichen (oder Vektorfeld). Im Fall $m = 1$ nennt man f eine reelle Funktion (oder Skalarfeld).

Schreibweise

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) := f \left(\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \right) := \begin{pmatrix} f_1(x_1, \dots, x_n) \\ \vdots \\ f_n(x_1, \dots, x_n) \end{pmatrix}$$

6.3.2 Definition Funktionsgrenzwert

Sei $f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ und $a \in \bar{A}$ dann heißt ein $b \in \mathbb{R}^m$ mit:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta(\varepsilon) : \|f(x) - b\| < \varepsilon \forall x \in \dot{U}_{\delta(\varepsilon)}(a) \cap A$$

der Grenzwert von f für x gegen a . Kurz:

$$\lim_{x \rightarrow a} f(x) = b$$

6.3.3 Definitionen aus HM 1 im Mehrdimensionalen

Sei $f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$, $a \in \bar{A}$ und $b \in \mathbb{R}^m$

(a) Folgende Aussagen sind äquivalent:

$$(a) f(x) \rightarrow b \ (x \rightarrow a)$$

(b) $\|f(x) - b\| \rightarrow 0 \ (x \rightarrow a, x \in A)$

(c) Für jede Komponente

$$f_l(x) \text{ von } f(x) = \begin{pmatrix} f_1(x) \\ \vdots \\ f_m(x) \end{pmatrix} \text{ gilt } f_l(x) \rightarrow b_l \ (x \rightarrow a)$$

(d) Für eine Folge $(x_k)_{k=1}^\infty$ in A mit $\lim_{k \rightarrow \infty} x_k \neq a \ \forall k$ folgt:

$$f(x_k) \rightarrow b \ (k \rightarrow \infty)$$

(b) Falls $\lim_{x \rightarrow a} f(x)$ existiert ist dieser Eindeutig.

(c) Cauchy-Kriterium:

$$\forall \varepsilon > 0 \ \exists \delta(\varepsilon) : \|f(x) - f(y)\| < \varepsilon \ \forall x, y \in \dot{U}_{\delta(\varepsilon)}(a) \cap A$$

(d) Grenzwertrechenregeln gelten analog zu HM 1

(e) Sei $B \subseteq A$ mit $a \in \bar{B}$ dann gilt:

$$\lim_{x \rightarrow a \text{ mit } x \in B} f(x) = b \Leftrightarrow \lim_{x \rightarrow a \text{ mit } x \in A} f(x) = b$$

6.3.4 Definition Stetigkeit

Sei $f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ und $a \in A$, dann ist f in a stetig wenn gilt $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = f(a)$. Das heißt:

$$\forall \varepsilon \ \exists \delta(\varepsilon) : \|f(x) - f(a)\| < \varepsilon \ \forall x \in U_{\delta(\varepsilon)}(a) \cap A$$

6.3.5 Grenzwerte von verketteten Funktionen

Sei $A \subseteq \mathbb{R}^n, B \subseteq \mathbb{R}^m, a \in \bar{A}$ und $f : A \rightarrow B, g : B \rightarrow \mathbb{R}^l$. Existiert $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = b$ so gilt $b \in \bar{B}$ und es gilt:

$$\lim_{x \rightarrow a} g(f(x)) = \lim_{y \rightarrow b} g(y)$$

sofern der Grenzwert $\lim_{y \rightarrow b} g(y)$ existiert.

6.3.6 Grenzwertrechenregeln

Für $f, g : A \rightarrow \mathbb{R}^n$ gilt: Falls $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = \alpha$ und $\lim_{x \rightarrow a} g(x) = \beta$ existiert, dann gilt:

(a)

$$\lim_{x \rightarrow a} f(x) + g(x) = \alpha + \beta$$

(b)

$$\lim_{x \rightarrow a} f(x)^T g(x) = \alpha^T \beta$$

6.3.7 Maximum und Minimum Kompakter Mengen

- (a) Ist $\emptyset \neq A \subseteq \mathbb{R}$ kompakt, so existiert $\max A$ und $\min A$.
- (b) Ist $A \subseteq \mathbb{R}^n$, A kompakt und $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ stetig auf A , dann ist $f(A)$ kompakt.

6.3.8 Weierstraß

Falls $A \subseteq \mathbb{R}^m$ und $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ stetig ist dann gilt:

$$A \text{ kompakt} \Rightarrow \min_{x \in A} f(x), \max_{x \in A} f(x) \text{ existiert}$$

6.4 Partielle Ableitungen und Richtungsableitungen

6.4.1 Definition partielle Ableitung

Eine Funktion $f : A \subseteq \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$ heißt in einem Punkt $a \in \mathbb{R}^m$ partiell differenzierbar nach seiner k -ten Variable x_k ($k \in \{1, \dots, m\}$) wenn $f(a + h \cdot e_k)$ mit

$$e_k = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \text{ (} k\text{-te Komponente)} \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

für ein festes $\delta > 0$ und alle h mit $|h| < \delta$ existiert:

$$\frac{\partial}{\partial x_k} f(a) := f_{x_k}(a) := \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(a + h \cdot e_k) - f(a)}{h}$$

Dieser Grenzwert heißt partielle Ableitung von f nach x_k bei a .

Existiert bei a die partiellen Ableitungen $f_{x_1}(a), \dots, f_{x_m}(a)$ so heißt f (einmal) partiell differenzierbar bei a und nennt man im Fall $n = 1$ den Spaltenvektor

$$\nabla f(a) := \text{grad } f(a) := \begin{pmatrix} f_{x_1}(a) \\ \vdots \\ f_{x_m}(a) \end{pmatrix}$$

den Gradienten von f bei a .

Falls alle partiellen Ableitungen stetig sind nennt man f stetig partiell differenzierbar.

Schreibweise

$C^k(G, \mathbb{R}^n) := \{f : G \rightarrow \mathbb{R}^n \mid \text{alle } k\text{-ten partiellen Ableitungen existieren und sind stetig}\}$

6.4.2 Definition Umgebung eines Punktes

Eine Umgebung eines Punktes $a \in \mathbb{R}^n$ ist eine Menge $U \subseteq \mathbb{R}^n$ für die ein $\varepsilon > 0$ existiert, so dass $U_\varepsilon(a) \subseteq U$. Eine offene Umgebung U ist eine Umgebung, die zusätzlich eine offene Menge ist.

Bemerkung

Ist $f : G \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ partiell differentierbar und sind in einer Umgebung von $a \in G$ alle partiellen Ableitungen beschränkt, dann ist f stetig in a .

6.4.3 Definition Richtungsableitung

Seien $a, r \in \mathbb{R}^n$ und r eine Richtung, d.h. $\|r\| = 1$. Eine Funktion $f : G \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ heißt bei a in Richtung r differentierbar, wenn der Grenzwert

$$\frac{\partial}{\partial r} f(a) := \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(a + h \cdot r) - f(a)}{h}$$

existiert. Dieser Grenzwert heißt dann die Richtungsableitung von f bei a in Richtung r .

6.5 Die totale Ableitung

6.5.1 Definition totale Ableitung

Sei $f : G \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ und $a \in G \subseteq \mathbb{R}^n$

- (a) Man nennt f total differentierbar bei a , wenn es eine Matrix $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ gibt, dass bei einer Umgebung U von a gilt:

$$f(x) = f(a) + A(x - a) + r(x)$$

mit

$$\frac{r(x)}{\|x - a\|} \rightarrow \vec{0} \quad (x \rightarrow a)$$

In dem Fall nennen wir A die (totale) Ableitung von f bei a und wir schreiben $f'(a) = A$

(b) Ist $f = \begin{pmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_n \end{pmatrix}$ partiell differenzierbar bei a , so heißt

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} f_1(a) & \cdots & \frac{\partial}{\partial x_n} f_1(a) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial}{\partial x_1} f_m(a) & \cdots & \frac{\partial}{\partial x_n} f_m(a) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \nabla f_1(a)^T \\ \vdots \\ \nabla f_n(a)^T \end{pmatrix} = \frac{\partial}{\partial x} f(a) = J_f(a)$$

die Jacobi-Matrix von f bei a .

Bemerkung

(a) Wir werden sehen, dass gilt:

$$f \text{ ist in } a \text{ total differenzierbar} \Leftrightarrow f'(a) = J_f(a)$$

(b) Im Fall $m = 1$ gilt also:

$$J_f(a) = \nabla f(a)^T$$

und falls f total differenzierbar ist gilt:

$$f'(a) = \nabla f(a)^T$$

(c) Bedeutung des Skalarprodukts $x, y \in \mathbb{R}^n$

$$x \cdot y := x^T y := \sum_{k=1}^n x_k y_k = \|x\|_2 \|y\|_2 \cos \alpha$$

(d) Definition des Matrix-Vektor-Produktes:

$$A \in \mathbb{R}^{m \times n}, x \in \mathbb{R}^n, b \in \mathbb{R}^m$$

$$A \cdot x = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11}x_1 + \cdots + a_{1n}x_n \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + \cdots + a_{mn}x_n \end{pmatrix}$$

6.5.2 Zusammenhang Stetigkeit und Differenzierbarkeit

Ist $f : G \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ differenzierbar in $a \in G \Rightarrow f$ stetig in a .

6.5.3 Zusammenhang partielle und totale Diffbarkeit

Sei $f : G \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ und $a \in G$

(a) Ist f total differenzierbar bei a , so gilt:

(a) f ist bei a partiell differenzierbar und

$$f'(a) = \frac{\partial}{\partial x} f(a)$$

(b) f ist bei a in jede Richtung r differenzierbar und

$$\frac{\partial}{\partial r} f(a) = J_f(a) \cdot r$$

(b) Wenn f partiell differenzierbar in a ist und alle partiellen Ableitungen in a stetig sind, so ist f in a differenzierbar.

$$\frac{\partial}{\partial x_n} f(x_n) \text{ stetig in } a \Leftrightarrow f \text{ differenzierbar in } a$$

6.5.4 Kettenregel

Ist $f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow B \subseteq \mathbb{R}^m$ total differenzierbar in $a \in A$ und $g : B \rightarrow \mathbb{R}^l$ total differenzierbar in a . Dann gilt $g \circ f$ ist in a differenzierbar und

$$(g \circ f)' = g'(f(a)) \cdot f'(a)$$

6.5.5 Matrix-Produkt

Für $A \in \mathbb{R}^{m \times k}$, $B \in \mathbb{R}^{k \times n}$ und $C \in \mathbb{R}^{m \times n}$ ist das Matrix-Produkt $C = A \cdot B$ definiert durch:

$$c_{ij} = \sum_{l=1}^k a_{il} b_{lj}$$

6.6 Extremwerte, Mittelwertsatz

6.6.1 Definition lokales Extrema

(a) Eine Funktion $f : G \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ besitzt in $x_0 \in G$ ein lokales Minimum (bzw. Maximum), wenn in einer Umgebung von U von x_0 gilt:

$$f(x) \geq f(x_0) \text{ (bzw. } f(x) \leq f(x_0)) \forall x \in U$$

unter einem lokalen Extrema versteht man ein lokales Minimum oder Maximum

(b) f besitzt in x_0 ein globales Minimum (bzw. Maximum), wenn

$$f(x) \geq f(x_0) \text{ (bzw. } f(x) \leq f(x_0)) \forall x \in G$$

6.6.2 Notwendige Bedingung für lokale Extrema

Besitzt $f : G \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, $f \in C^1(G, \mathbb{R})$ in $x_0 \in \overset{\circ}{G}$ ein lokales Extrema, so gilt:

$$\nabla f(x_0) = 0$$

Bemerkung

Einen Punkt $x_0 \in G$ mit $\nabla f(x_0) = 0$ nennen wir kritischen Punkt oder stationären Punkt.

6.6.3 Mittelwertsatz

Sei $f : G \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ mit G offen differentierbar und G enthalte die Menge

$$L(a, b) := \overline{ab} := \{a + t \cdot (b - a) \mid t \in [0, 1]\}$$

für $a, b \in G$. Dann existiert ein $\xi \in (0, 1)$ mit

$$f(b) = f(a) + \nabla f(a + \xi(b - a))^T (b - a)$$

6.6.4 Gebiete bzw. kurvenweise zusammenhängende Gebiete

(a) Eine Menge

$$\overline{a_0, a_1, \dots, a_n} := \bigcup_{k=0}^{n-1} \overline{a_k, a_{k+1}}$$

für $a_0, \dots, a_n \in \mathbb{R}^m$ heißt Polygonzug

(b) Eine Menge $M \subseteq \mathbb{R}^n$ heißt kurvenweise zusammenhängend, wenn zu $a, b \in M$ stets eine stetige Funktion $\gamma : [0, 1] \rightarrow M$ existiert mit $\gamma(0) = a$ und $\gamma(1) = b$ (dann ist γ) eine Kurve von a nach b .

(c) Eine Menge $G \subseteq \mathbb{R}^n$ heißt Gebiet, wenn G offen und kurvenweise zusammenhängend ist (keine Inseln).

Bemerkung

Ist G ein Gebiet und $a, b \in G$ dann existiert stets ein Polynomzug, der a und b verbindet und durch G verläuft.

6.6.5 Partielle Ableitung r -ter Ordnung

Für $f : G \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ definiert man (falls existent) für $x_0 \in G$ und $k_1, \dots, k_r \in \{1, \dots, n\}$ die partielle Ableitung r -ter Ordnung indirekt durch:

$$\frac{\partial^r}{\partial x_{k_1} \dots \partial x_{k_r}} f(x_0) := f_{x_{k_1} \dots x_{k_r}}(x_0) := \begin{cases} \frac{\partial}{\partial x_{k_1}} f(x_0) & \text{falls } r = 1 \\ \frac{\partial}{\partial x_{k_1}} \left(\frac{\partial^{r-1}}{\partial x_{k_2} \dots \partial x_{k_r}} f(x_0) \right) & \text{sonst} \end{cases}$$

existieren alle partiellen Ableitungen der Ordnung r , dann ist f r -mal partiell differentierbar sind diese außerdem stetig, so ist f r -mal stetig partiell differentierbar.

Schreibweise

$C^r(G, \mathbb{R}^m) := \{f : G \rightarrow \mathbb{R}^m \mid f \text{ } r\text{-mal stetig partiell differentierbar}\}$ und $C^r(G) := C^r(G, \mathbb{R}^1)$

6.6.6 Hessematrix

Ist $f : G \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ 2-mal partiell differentierbar bei $a \in G$ so heißt

$$H_f(a) := \begin{pmatrix} f_{x_1 x_1}(a) & \cdots & f_{x_1 x_n}(a) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{x_n x_1}(a) & \cdots & f_{x_n x_n}(a) \end{pmatrix} = (\nabla f_{x_1}(a) \quad \cdots \quad \nabla f_{x_n}(a))$$

die Hesse-Matrix von f bei a .

6.6.7 Definitheit

Sei $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$

(a) Die durch $Q_A(x) := x^T \cdot A \cdot x$ definierte Funktion $Q_A : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ heißt die Quadratische Form von A .

(b) Die Matrix und die Quadratische Form heißen:

(a) positiv definit

$$:\Leftrightarrow Q_A(x) > 0 \quad \forall x \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}$$

(b) positiv semidefinit

$$:\Leftrightarrow Q_A(x) \geq 0 \quad \forall x \in \mathbb{R}^n$$

(c) negativ definit

$$:\Leftrightarrow Q_A(x) < 0 \quad \forall x \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}$$

(d) negativ semidefinit

$$:\Leftrightarrow Q_A(x) \leq 0 \quad \forall x \in \mathbb{R}^n$$

(e) indefinit

$$:\Leftrightarrow \exists x, y \in \mathbb{R}^n : Q_A(x) < 0, Q_A(y) > 0$$

6.6.8 Satz von Schwarz

Ist $G \neq \emptyset, f : G \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ 2-mal stetig partiell differentierbar, dann gilt:

$$H_f(x, y) = H_f(y, x)^T$$

6.6.9 Satz von Taylor

Seien $a, b \in G$ (G eine Gebiet mit $G \neq \emptyset$), $f : G \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ zweimal stetig differenzierbar und $\overline{ab} \subseteq G$. Dann existiert eine $\xi \in (0, 1)$ mit

$$f(b) = f(a) + \nabla f(a)^T(b-a) + \frac{1}{2}(b-a)^T H_f(a + \xi(b-a))(b-a)$$

6.6.10 Hinreichende Bedingung für lokale Extrema

Sei $f \in C^2(U, \mathbb{R})$ mit U eine Umgebung von a und $\nabla f(a) = \vec{0}$ dann gilt:

- (a) Ist $H_f(a)$ positiv definit, so ist bei a ein lokales Minimum
- (b) Ist $H_f(a)$ negativ definit, so ist bei a ein lokales Maximum

6.7 Implizit definierte Funktionen

6.7.1 Bemerkung

Wir betrachten zunächst lineare Funktionen $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ dann lässt sich $f(x)$ darstellen als:

$$f(x) = Ax + b$$

mit $A \in \mathbb{R}^{m \times n}, b \in \mathbb{R}^m$

6.7.2 Vorläufige Definition Rang einer Matrix

Wir definieren für eine Matrix $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ den Rang vorläufig als die Anzahl der Stufen nachdem mit dem Gauss-Algorithmus die Matrix in Zeilen-Stufenform überführt wurde.

Bemerkung

Allgemein werden wir sehen, dass $Ax = b$ lösbar ist \Leftrightarrow Rang von A gleich Rang von $(A|b)$ gilt. Eindeutig lösbar ist das LGS wenn in der Zeilen-Stufen Form in jeder Zeile eine Stufe anfängt und A quadratisch ist.

6.7.3 Einheitsmatrix und Inverse einer Matrix

Ist $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ und $B \in \mathbb{R}^{n \times n}$ mit

$$B \cdot A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & & & \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{pmatrix} I \text{ (Einheitsmatrix)}$$

dann nennt man B die zu A inverse Matrix und schreibt $A^{-1} := B$. Dann gilt:

$$\begin{aligned} Ax &= b \\ \Leftrightarrow A^{-1} \cdot A \cdot x &= A^{-1} \cdot b \\ \Leftrightarrow I \cdot x &= A^{-1} \cdot b \\ \Leftrightarrow x &= A^{-1} \cdot b \end{aligned}$$

Falls zu einer Matrix $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ die Inverse A^{-1} existiert nennt man A regulär.

Bemerkung

Die Menge $G := \{A \in \mathbb{R}^n : A \text{ ist regulär}\}$ ist bezüglich der Matrixmultiplikation eine nicht abelsche Gruppe mit I als neutrales Element und A^{-1} als das zu A (links-) inverse Element.

6.7.4 Zusammenhang Bijektivität und reguläre Matrizen

Für $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ mit $f(x) = A \cdot x + b$ gilt:

$$f \text{ ist bijektiv} \Leftrightarrow A \text{ ist regulär}$$

6.7.5 Satz über die Umkehrfunktion

Sei $f \in C^1(G, \mathbb{R}^n)$ für ein Gebiet $G \subseteq \mathbb{R}^n$ und $x_0 \in G$. Weiter gelte, dass $f'(x_0)$ regulär ist. Dann gibt es eine offene Umgebung U von x_0 ($U \subseteq G$), dass gilt:

- (a) $f(U)$ ist offen und $f'(x)$ ist regulär
- (b) $f : U \rightarrow V$ ist bijektiv und $f^{-1} : V \rightarrow U$ ist aus $C^1(V, U)$
- (c)

$$\frac{d}{dy} f^{-1}(y) = (f'(f^{-1}(y)))^{-1} \quad \forall y \in V$$

6.7.6 Satz über die Gebietstreue

Ist G eine offene Menge in \mathbb{R}^n und $f \in C^1(G, \mathbb{R}^n)$ mit $f'(x)$ ist regulär auf G , so ist auch $f(G)$ ein Gebiet.

6.7.7 Definition Auflösbarkeit

Sei $g : \mathbb{R}^{m+n} \rightarrow \mathbb{R}^m$ ($n, m \in \mathbb{N}$) und $b \in \mathbb{R}^m$. Man nennt die Gleichung

$$g(x, y) = b \text{ mit } x \in \mathbb{R}^n \text{ und } y \in \mathbb{R}^m$$

- (a) Auf $G \in \mathbb{R}^n$ (global) nach y auflösbar, wenn es eine Funktion $f : G \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ gibt mit $g(x, f(x)) = b \quad \forall x \in G$

- (b) Bei $x_0 \in \mathbb{R}^n$ lokal nach y auflösbar, wenn $g(x, y) = b$ in einer Umgebung von x_0 nach y (global) auflösbar ist.

D.h mit $y_0 := f(x_0)$ existiert die Auflösung $y = f(x)$ mit $g(x, f(x)) = b$ und $y_0 = f(x_0)$ in einer Umgebung von x_0 .

Bemerkung

Allgemein soll auch für nichtlineare Funktionen einfach geprüft werden können ob eine lokale Auflösung nach x oder y existiert.

Wir werden sehen es gilt:

$$\frac{\partial}{\partial x} g|_{x=x_0} \text{ regulär} \Leftrightarrow \text{Es existiert eine lokale Auflösung nach } x \quad (6.1)$$

(Analog für Auflösungen nach y).

6.7.8 Hauptsatz über implizite Funktionen

Sei $x_0 \in \mathbb{R}^n$ und $y_0, b \in \mathbb{R}^m$. Für eine offene Umgebung G von $\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix}$. Sei $g \in C^1(G, \mathbb{R}^m)$ (d.h $g : G \subseteq \mathbb{R}^{m+n} \rightarrow \mathbb{R}^m$ und stetig differentierbar) ist $g(x_0, y_0) = b$ und $\frac{\partial}{\partial y} g(x_0, y_0)$ regulär, so gibt es eine Umgebung U von x_0 und V von y_0 , so dass:

(a)

$$\frac{\partial}{\partial y} g(x, y) \text{ ist regulär } \forall x \in U \text{ und } \forall y \in V$$

- (b) Die Gleichung $g(x, y) = b$ besitzt eine eindeutige Auflösung $f : U \rightarrow V$ mit $y_0 = f(x_0)$ und es gilt:

$$f'(x) = \left(\frac{\partial}{\partial y} g(x, f(x)) \right)^{-1} \cdot \frac{\partial}{\partial x} g(x, f(x)) \forall x \in U$$

(die Auflösung ist also differentierbar)

- (c) Ist $g \in C^r(g, \mathbb{R}^m)$ dann ist $f \in C^r(U, \mathbb{R}^m)$

6.7.9 Extrema unter Nebenbedingungen

$$\begin{cases} x + y \\ x^2 + y^2 = 1 \end{cases} \rightarrow \max \text{ oder } \min$$

Idee Nebenbedingung nach y auflösen und in Zielfunktion einsetzen

$$1. \ y = \pm \sqrt{1 - x^2}$$

$$\Rightarrow f(x, y) = f(x, \pm \sqrt{1 - x^2}) = \tilde{f}(x) \quad (6.2)$$

2.

$$\tilde{f}(x) \stackrel{!}{=} \tilde{f}^{(k)}(x) \stackrel{!}{=} \dots, \tilde{f}^{(2l)}(x) \stackrel{!}{=} 0 \quad k = 1, \dots, 2 \cdot l - 1$$

Beobachtung Bei den gesuchten Extrema berühren sich die Höhenlinien von f und g

$$\stackrel{\text{Formaler}}{\Rightarrow} \exists \lambda \in \mathbb{R} : \nabla f(x, y) = \lambda \nabla g(x, y)$$

Aber die Bedingung ist nicht hinreichend, sondern nur notwendig.
Trotzdem: Die notwendige Bedingung liefert (hoffentlich) eine Endliche Anzahl Kandidaten, diese können einzeln überprüft werden.

6.7.10 Definition lokale Minima/Maxima unter Nebenbedingungen

Seien $f, g_1, \dots, g_m : G \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ mit G offen gegeben sowie $b_1, \dots, b_m \in \mathbb{R}$. Dann nennt man ein $x_0 \in G$ ein lokales Minimum (bzw. Maximum) von f unter der Nebenbedingung $g_1(x) = b_1 \dots g_m(x) = b_m$ wenn es eine offene Umgebung $U \subseteq G$ von x_0 gibt mit $f(x) \geq f(x_0) \forall x \in U$ und $g_k(x) = b_k$ für $k = 1 \dots m$ (bzw. $f(x) \leq f(x_0) \forall x \in U$).

6.7.11 Definition Linear Unabhängig

Seien $a_1, \dots, a_m \in \mathbb{R}^n$ mit $m \in \mathbb{N}$. Dann heißen diese Vektoren linear unabhängig, wenn das lineare Gleichungssystem

$$\alpha_1 a_1 + \dots + \alpha_m a_m = \vec{0}$$

nur die Lösung $\alpha_1 = \dots = \alpha_m = 0$ besitzt.

$$\Leftrightarrow \begin{pmatrix} a_1 & \dots & a_m \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

Ansonsten sind die Vektoren linear abhängig.

Bemerkung

Sind a_1, \dots, a_k nicht linear abhängig:

$$\begin{aligned} &\stackrel{\text{Def.}}{\Rightarrow} \exists k \in \{1, \dots, m\} \text{ und Lösung } \alpha_1, \dots, \alpha_m \text{ mit} \\ &\quad \alpha_1 a_1 + \dots + \alpha_k a_k + \dots + \alpha_m a_m = 0 \quad \alpha_k \neq 0 \\ &\Rightarrow a_k = -\frac{\alpha_1}{\alpha_k} a_1 \dots - \frac{\alpha_{k-1}}{\alpha_k} a_{k-1} - \frac{\alpha_{k+1}}{\alpha_k} a_{k+1} \dots \end{aligned}$$

d.h. a_k lässt sich aus durch $a_1, \dots, a_{k-1}, a_{k+1}, \dots, a_m$ bestimmen.

6.7.12 Satz von Lagrange

Seien $f, g_1, \dots, g_m \in C^1(U)$ für eine offene Umgebung U von $x_0 \in \mathbb{R}^n$ (wie oben $f, g_1, \dots : G \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$) und seien $b_1, \dots, b_m \in \mathbb{R}$. Ist x_0 ein lokales Extrema unter der Nebenbedingung $g_k(x) = b_k$, $k = 1, \dots, m$ und die Vektoren $\nabla g_1(x_0), \dots, \nabla g_m(x_0)$ linear unabhängig.

$$\begin{aligned} \exists \lambda_1, \dots, \lambda_m \in \mathbb{R} \quad \text{mit} \quad & \nabla f(x_0) + \lambda_1 \nabla g_1(x_0) + \dots + \lambda_m \nabla g_m(x_0) = \vec{0} \\ \Leftrightarrow & f'(x_0)^T + J_g(x_0)^T \cdot \lambda = \vec{0} \\ \Leftrightarrow & f'(x_0) = -\nabla^T J_g(x_0) \end{aligned}$$

Zudem muss x_0 die Nebenbedingung erfüllen.

6.7.13 Lagrange Funktion

$$\begin{aligned} L(x, \lambda) &= L(x_1, \dots, x_m, \lambda_1, \dots, \lambda_m) := f(x) + \lambda^T (g(x) - b) \\ \Leftrightarrow L'(x, \lambda) &= \begin{pmatrix} f'(x) + \lambda^T g'(x), g(x) - b \end{pmatrix} \stackrel{!}{=} \vec{0} \end{aligned}$$

Teil III

Beweisansätze

Kapitel 7

HM 1

7.0.1 Eindeutigkeit des Grenzwert einer Folge

Zeige, dass Grenzwert a = Grenzwert b , nahrhafte 0

7.0.2 Konvergente Folgen sind beschränkt

Nahrhafte 0, Dreiecks-ugl.

7.0.3 Grenzwertrechenregeln

Nahrhafte 0, Dreiecks-ugl. $a_n \leq \gamma \forall n \Rightarrow a \leq \gamma$ Ausgehend von a über nahrh. 0 zu Def Konvergenz $a_n \leq b_n \forall n \Rightarrow a \leq b$ Definiere Hilfsfolge, argumentiere nach s.o Sandwich-Theorem Zeige, dass $-\varepsilon < c_n < \varepsilon$ (Quasi Epsilon-Schlauch)

7.0.4 Monotoniekriterium

Da $|a_n| < c \forall n$, argumentiere über das Supremum der Menge, die aus a_n besteht

7.0.5 Grenzwert einer konv. Folge = Grenzwert jeder Teilfolge

Def. Konvergenz + Def Teilfolge

7.0.6 Charakterisierung $\overline{\lim}$ und $\underline{\lim}$

Argumentiere über Eigenschaften \sup und \inf

7.0.7 Folge konv. $\overline{\lim} = \underline{\lim}$

Hin: Eindeutigkeit des Grenzwert; Rück: Charakterisierung \limsup und \liminf

7.0.8 Bolzano-Weierstraß

Zunächst für reelle Folge (trivial), dann für komplex: Realteil ist klar, Imaginärteil: Teilfolge konstruieren

7.0.9 Cauchy Kriterium

Hin: nährhafte 0; Rück: zeige Beschränktheit, dann folge daraus, dass ein Häufungswert existiert und benutze diesen als Grenzwert-Kandidat

7.0.10 Reihe konv. Folge ist Nullfolge

Cauchy für Reihen

7.0.11 GrenzwertRR für Reihen

GrenzwertRR für Folgen

7.0.12 Reihe konv g. 0

Restreihe als Differenz darstellen

7.0.13 Leibniz

Cauchy für Reihen

7.0.14 Absolut konv. \Rightarrow konv.

Cauchy und Dreiecks-ugl.

7.0.15 Majorantenkriterium

Cauchy

7.0.16 Minorantenkriterium

Kontradiktion von Majorantenkriterium

7.0.17 Wurzelkriterium

Majorantenkrit: geom. Summe über $Q := q + \varepsilon < 1$, in q das Wurzelkriterium einsetzen, Charakterisierung $\overline{\lim}$

7.0.18 Quotientenkriterium

Majorantenkrit: setze in q das Quotientenkriterium ein und Argumentation über \lim

7.0.19 Hadamard

Wurzelkriterium+ Fallunterscheidung für Sonderfälle

7.0.20 Differenzieren / Integrieren von Potenzreihen

Wurzelkriterium

7.0.21 Lemma zu sin, cos und exp

Cauchy-Produkt + Definitionen

7.0.22 $e^z \neq 0$ und $e^{-z} = \frac{1}{e^z}$

Inverses Element der Multiplikation

7.0.23 Pythagoras

3. binomische Formel

7.0.24 $e^x > 0 \ \forall x \in \mathbb{R}$

Betrachte $x \geq 0$, angeordneter Körper

7.0.25 $1 + x \leq e^x \ \forall x \in \mathbb{R}$

Bernoulli

7.0.26 $x < y \Rightarrow e^x < e^y$

nährhafte 0

7.0.27 Folgenkriterium

Hin: Def. Folgenkonv. und dann Def Funktionsgrenzwert einsetzen; Rück: Wähle versch. δ und zeige Widerspruch

7.0.28 Cauchy für Funktionen

Hin: Def. FunktionsGrenzwert + Nährhafte 0; Rück: Cauchy für Folgen

7.0.29 Grenzwerte an Intervallgrenzen

Argumentiere über Supremum / Infimum

7.0.30 Verknüpfungen stetiger Funktionen stetig

Folgenkriterium

7.0.31 Potenzreihen sind innerhalb des Konvergenzradius stetig

Abschätzung: $\exists r > 0 : |x - x_0| \text{ bzw. } |x_1| \leq r$, dann einfach $|f(x) - f(x_1)|$ nach oben abschätzen

7.0.32 Umgebung pos. Funktionswerte

Wähle $\varepsilon = \frac{f(x_0)}{2}$, Def. Stetigkeit

7.0.33 Zwischenwertsatz

Definiere $x_0 := \sup\{x \in [a, b] : f(x) \leq y\}$ und zwei Hilfsfolgen, die gegen x_0 konvergieren

7.0.34 Existenz \log

Zeigen \exp ist bijektiv (Zwischenwertsatz)

7.0.35 Beschränktheit stetiger Funktionen

Annahme f nicht beschränkt Folgenkriterium

7.0.36 Weierstraß existenz \min bzw. \max

Zeigen das $\sup = \max$

Kapitel 8

HM 2

Teil IV

Appendix

Kapitel 9

Grenzwerte

9.1 Konvergenzkriterien

Zusammenfassung verschiedener Konvergenzkriterien nach Wikipedia (Seite: Konvergenzkriterium):

Kriterium	nur f. mon. F.	Konv.	Div.	abs. Konv.	Absch.	Fehlerabsch.
Nullfolgenkriterium			X			
Monotoniekriterium		X		X		
Leibniz-Kriterium	X	X			X	X
Cauchy-Kriterium		X	X			
Abel-Kriterium	X	X				
Dirichlet-Kriterium	X	X				
Majorantenkriterium		X		X		
Minorantenkriterium			X			
Wurzelkriterium		X	X	X		X
Integralkriterium	X	X	X	X	X	
Cauchy-Kriterium	X	X	X	X		
Grenzwertkriterium		X	X			
Quotientenkriterium		X	X	X		X
Gauß-Kriterium		X	X	X		
Raabe-Kriterium		X	X	X		
Kummer-Kriterium		X	X	X		
Bertrand-Kriterium		X	X	X		
Ermakoff-Kriterium	X	X	X	X		

Kapitel 10

Integration

10.1 Riemann-Integrierbarkeit

Kriterium	Integrierbar	Nicht Integrierbar
Funktion nicht beschränkt		X
Verknüpfung Riemann-Integrierbarer Funktionen	X	
Stetige Funktion	X	
Endliche vielen Änderungen zu Riemann-Int.barer Funktion	X	
Monotone Funktion	X	