

Zusammenfassung Höhere Mathematik

Paul Nykiel

1. August 2017

Schlagzahl erhöhen.

Inhaltsverzeichnis

I	HM 1 — Zusammenfassung	12
1	Vorkurs	13
1.1	Aussagenlogik	13
1.1.1	Definition Aussage	13
1.1.2	Verknüpfungen	13
1.1.3	Mehr zu Implikationen	14
1.1.4	Bezeichnung von Aussagen	14
1.1.5	Satz der Identität	14
1.2	Mengen	15
1.2.1	Defintion: Mengen nach Cantor	15
1.2.2	Begrifflichkeiten und Schreibweise	15
1.2.3	Leere Menge, Teilmengen	15
1.2.4	Transitivität u.a.	15
1.2.5	Verknüpfung von Mengen	16
1.2.6	Potenzmenge	16
1.2.7	Rechenregeln für Mengen	16
1.2.8	Komplement	17
1.2.9	Bemerkung	17
1.2.10	Verknüpfungen über mehrere Elemente	17
1.2.11	Wichtige Zusammenhänge	17
1.3	Vollständige Induktion	17
1.3.1	Summen und Produktzeichen	17
1.3.2	Prinzip der Vollständigen Induktion	18
1.3.3	Rechenregeln für Summen	18
1.3.4	Doppelsummen	19
1.3.5	Fakultät und Binomialkoeffizient	19
1.3.6	Rechenregeln für den Binomialkoeffizienten	19
1.3.7	Binomischer Lehrsatz	19
1.3.8	Definition Betrag	19
1.3.9	Dreiecksungleichung	20
1.4	Funktion und Differentiation	20
1.4.1	Injektivität, Surjektivität, Bijektivität	20
1.4.2	Verknüpfung von Funktionen	21
1.4.3	Verkettung von Funktionen	21

1.4.4	Stetigkeit und Differenzierbarkeit	21
1.4.5	Zusammenhang Differenzierbarkeit — Stetigkeit	21
1.4.6	Verkettung differenzierbarer Funktionen	22
1.4.7	Differentiation von Monomen	22
1.4.8	Kettenregel	22
1.4.9	Ableitung der Umkehrfunktion	22
1.5	Elementare Funktionen	22
1.6	Integralrechnung	22
1.7	Komplexe Zahlen	22
1.8	Elementare Differentialgleichungen	22
1.8.1	Definition Rechteck	22
1.8.2	Lineare DGL 1. Ordnung	23
2	Grenzwerte	24
2.1	Gruppen und Körper	24
2.1.1	Gruppen	24
2.1.2	Körper	24
2.1.3	Angeordnete Körper	25
2.1.4	Minimum und Maximum	26
2.1.5	Obere und untere Schranke	27
2.1.6	Supremum und Infimum	27
2.2	Folgen	27
2.2.1	Konvergenz	27
2.2.2	Bestimmte Divergenz	28
2.2.3	Beschränktheit	28
2.2.4	Zusammenhang Konvergenz — Beschränktheit	28
2.2.5	Grenzwertrechenregeln	28
2.2.6	Sandwich Theorem u.a.	29
2.2.7	Monotonie	29
2.2.8	Zusammenhang Monotonie und Beschränktheit	29
2.3	Häufungswerte	29
2.3.1	Teilfolgen	29
2.3.2	Teilfolgen einer Konvergenten Folge	29
2.3.3	Häufungswerte	29
2.3.4	Limes superior/inferior	30
2.3.5	Charakterisierung limsup/liminf	30
2.3.6	Konvergenz und limsup/liminf	30
2.3.7	Satz von Bolzano-Weierstraß	30
2.3.8	Cauchy-Kriterium	30
2.4	Unendliche Reihen	31
2.4.1	Definition	31
2.4.2	Cauchy-Kriterium für unendliche Reihen	31
2.4.3	Grenzwertrechenregeln für unendliche Reihen	31
2.4.4	Positive Folgen	32
2.4.5	Leibniz-Kriterium	32
2.4.6	Absolute Konvergenz	32

2.4.7	Majorantenkriterium	32
2.4.8	Minorantenkriterium	33
2.4.9	Wurzel- und Quotientenkriterium	33
2.4.10	Umordnung einer Reihe	33
2.4.11	Cauchy-Produkt	34
2.4.12	Cauchy-Verdichtungssatz	34
2.5	Potenzreihen	34
2.5.1	Definition	34
2.5.2	Hadamard (Konvergenzradius mit Wurzelkriterium) . . .	34
2.5.3	Konvergenzradius mit Quotientenkriterium	35
2.5.4	Hinweis	35
2.5.5	Integration und Differentiation von Potenzreihen	35
2.5.6	Cauchy-Produkt für Potenzreihen	35
2.5.7	Wichtige Potenzreihen	35
2.5.8	Alternative Definition der Exponentialfunktion	36
2.6	Funktionsgrenzwerte	36
2.6.1	Bemerkung	36
2.6.2	Epsilon-Umgebung	36
2.6.3	Funktionsgrenzwerte (über Delta-Epsilon-Kriterium) . . .	36
2.6.4	Folgenkriterium	37
2.6.5	Rechenregeln für Funktionsgrenzwerte	37
2.6.6	Cauchy-Kriterium für Funktionsgrenzwerte	38
2.6.7	Bestimmte Divergenz	38
2.6.8	Monotone Funktionen	38
2.6.9	Grenzwerte an Intervallgrenzen	38
2.7	Stetigkeit	39
2.7.1	Anschaulich	39
2.7.2	Stetigkeit: Delta-Epsilon-Kriterium	39
2.7.3	Bemerkungen	39
2.7.4	Rechenregeln für Stetigkeit	39
2.7.5	Stetigkeit von Potenzreihen	39
2.7.6	Umgebung positiver Funktionswerte	40
2.7.7	Zwischenwertsatz	40
2.7.8	Existenz des Logarithmus	40
2.7.9	Maximum/Minimum/Infimum/Supremum einer Funktion	40
2.7.10	Beschränktheit einer stetigen Funktion	41
2.7.11	Weierstraß: Existenz von Min und Max	41
2.7.12	Zusammenhang Injektivität — Stetigkeit	41
2.7.13	Existenz und Monotonie der Umkehrfunktion	41
2.7.14	Gleichmäßige Stetigkeit	41
3	Differentialrechnung	42
3.1	Ableitung	42
3.1.1	Definition Differenzen-Quotient	42
3.1.2	Rechtsseitige und linksseitige Ableitung	42
3.1.3	Ableitungsrechenregeln	42

3.1.4	Alternative Definition der Ableitung	43
3.1.5	Zusammenhang Differentierbarkeit — Stetigkeit	43
3.1.6	Differentiation von Potenzreihen	43
3.1.7	Ableitung der Umkehrfunktion	43
3.1.8	Kettenregel	43
3.2	Mittelwertsätze	43
3.2.1	Satz von Rolle	43
3.2.2	Definition lokaler Extrempunkt	44
3.2.3	Notwendige Bedingung für lokale Extrema	44
3.2.4	2. Mittelwertsatz	44
3.2.5	1. Mittelwertsatz (Folgerung aus 2. Mittelwertsatz)	44
3.2.6	L'Hospital	44
3.2.7	Satz von Taylor	45

II HM 2 — Zusammenfassung 46

4	Integration	47
4.1	Integration	47
4.1.1	Definition Zerlegung, Zwischenwerte	47
4.1.2	Definition Riemannsumme	47
4.1.3	Definition Riemann-Integral	48
4.1.4	Menge der Riemann-Integrierbaren Funktionen	49
4.1.5	Kriterien für Riemann-Integrierbarkeit	49
4.1.6	Endliche Änderung von Funktionen	50
4.1.7	Zusammenhang Stetigkeit und Integrierbarkeit	50
4.1.8	Stückweise Integration	50
4.1.9	1. Mittelwertsatz der Integralrechnung	50
4.1.10	Existenz der Stammfunktion	51
4.1.11	Definition Stammfunktion	51
4.1.12	Eindeutigkeit der Stammfunktion	51
4.1.13	Hauptsatz der Differential und Integralrechnung	51
4.1.14	Zusammenhang Monotonie und Riemann-Integrierbarkeit	51
4.1.15	Zweiter Mittelwertsatz der Integralrechnung	51
4.2	Uneigentliche Integrale	52
4.2.1	Definition uneigentliches Integral	52
4.2.2	Cauchy-Kriterium	52
4.2.3	Majorantenkriterium	53
4.2.4	Absolute Konvergenz	53
4.2.5	Minorantenkriterium	53
4.2.6	Integralkriterium für Reihen	53

5	Gleichmäßige Konvergenz	54
5.1	Gleichmäßige Konvergenz	54
5.1.1	Definition Funktionenfolge und Funktionenreihe	54
5.1.2	Gleichmäßige Konvergenz	54
5.1.3	Stetigkeit der Grenzfunktion	55
5.1.4	Integration der Grenzfunktion	55
5.1.5	Cauchy Kriterium für gleichmäßige Konvergenz	55
5.1.6	Differentiation der Grenzfunktion	55
5.1.7	Majorantenkriterium auf Potenzreihen anwenden	56
5.1.8	Majorantenkriterium für Funktionenreihen	56
6	Differentialrechnung mit mehreren Variablen	57
6.1	Der n-dimensionale Euklidische Raum	57
6.1.1	Definitionen	57
6.1.2	Folgerungen	57
6.1.3	Konventionen	58
6.1.4	Definition Epsilon-Umgebung	58
6.1.5	Definition Topologische Begriffe	58
6.1.6	Definition offene und abgeschlossene Menge	59
6.2	Folgen	60
6.2.1	Definition	60
6.2.2	Bolzano-Weierstraß	60
6.2.3	Grenzwertrechenregeln	60
6.2.4	Weitere Bemerkungen	61
6.3	Funktionsgrenzwerte und Stetigkeit	61
6.3.1	Definition Funktion	61
6.3.2	Definition Funktionsgrenzwert	61
6.3.3	Definitionen aus HM 1 im Mehrdimensionalen	61
6.3.4	Definition Stetigkeit	62
6.3.5	Grenzwerte von verketteten Funktionen	62
6.3.6	Grenzwertrechenregeln	62
6.3.7	Maximum und Minimum Kompakter Mengen	63
6.3.8	Weierstraß	63
6.4	Partielle Ableitungen und Richtungsableitungen	63
6.4.1	Definition partielle Ableitung	63
6.4.2	Definition Umgebung eines Punktes	64
6.4.3	Definition Richtungsableitung	64
6.5	Die totale Ableitung	64
6.5.1	Definition totale Ableitung	64
6.5.2	Zusammenhang Stetigkeit und Differenzierbarkeit	65
6.5.3	Zusammenhang partielle und totale Diffbarkeit	65
6.5.4	Kettenregel	66
6.5.5	Matrix-Produkt	66
6.6	Extremwerte, Mittelwertsatz	66
6.6.1	Definition lokales Extrema	66
6.6.2	Notwendige Bedingung für lokale Extrema	66

6.6.3	Mittelwertsatz	67
6.6.4	Gebiete bzw. kurvenweise zusammenhängende Gebiete . .	67
6.6.5	Partielle Ableitung r-ter Ordnung	67
6.6.6	Hessematrix	68
6.6.7	Definitheit	68
6.6.8	Satz von Schwarz	68
6.6.9	Satz von Taylor	69
6.6.10	Hinreichende Bedingung für lokale Extrema	69
6.7	Implizit definierte Funktionen	69
6.7.1	Bemerkung	69
6.7.2	Vorläufige Definition Rang einer Matrix	69
6.7.3	Einheitsmatrix und Inverse einer Matrix	69
6.7.4	Zusammenhang Bijektivität und reguläre Matrizen	70
6.7.5	Satz über die Umkehrfunktion	70
6.7.6	Satz über die Gebietstreue	70
6.7.7	Definition Auflösbarkeit	70
6.7.8	Hauptsatz über implizite Funktionen	71
6.7.9	Extrema unter Nebenbedingungen	71
6.7.10	Definition lokale Minima/Maxima unter Nebenbedingungen	72
6.7.11	Definition Linear Unabhängig	72
6.7.12	Satz von Lagrange	73
6.7.13	Lagrange Funktion	73
7	Integration in mehreren Veränderlichen	74
7.1	Parameterintegrale	74
7.1.1	Eigentliche Parameterintegrale	74
7.1.2	Leibniz Regel	74
7.1.3	Uneigentliche Parameterintegrale	75
7.1.4	Majorantenkriterium	75
7.1.5	Fubini für uneigentliche Parameterintegrale	75
7.1.6	Konvergenzkriterien	75
7.2	Kurvenintegrale	76
7.2.1	Äquivalenz für Kurven	76
7.2.2	Kurven im \mathbb{R}^n	76
7.2.3	Eigenschaften von Parameterdarstellungen	77
7.2.4	Weitere Definitionen zu Kurven	78
7.2.5	Kurvenintegrale 2. Art	78
7.2.6	Substitutionsregel	79
7.2.7	Definition Wegunabhängigkeit	79
7.2.8	1. Hauptsatz für Kurvenintegral	80
7.2.9	Äquivalente Aussagen zu Stammfunktionen	80
7.2.10	Definition einfach zusammenhängende Gebiete	80
7.2.11	Sternförmige Gebiete	80
7.2.12	2. Hauptsatz für Kurvenintegrale	81
7.2.13	Definition Rotation	81
7.2.14	Zusammenhang Rotation und Integrabilitätsbedingung . .	81

7.2.15	Definition Linienintegral/Kurvenintegral 1. Art	82
7.3	Bereichsintegrale	83
7.3.1	Intervalle im \mathbb{R}^n	83
7.3.2	Definition Zerlegung	83
7.3.3	Definition Riemann-Summe	84
7.3.4	Riemann integrierbare Bereichsintegrale	84
7.3.5	Bereichsintegrale über beschränkte Mengen	84
7.3.6	Cavalieri	85
7.3.7	Fubini	85
7.3.8	Definition Meßbare-Mengen	85
7.3.9	Definition 2×2 Determinante	85
7.3.10	Mehrdimensionale Substitutionsregel	86
7.4	Integralsätze in der Ebene	86
7.4.1	Positiv berandete Menge	86
7.4.2	Satz von Green	86
7.4.3	Definition Normalbereiche	86
7.4.4	Gauß'sche Integralsätze in der Ebene	86
7.5	Oberflächenintegrale und Integralsätze im \mathbb{R}^3	87
7.5.1	Definition Reguläre Flächen	87
7.5.2	Defintion Oberflächenintegral	87
7.5.3	Satz von Stokes	88
7.5.4	Divergenzsatz von Gauß	88
8	Lineare Algebra	89
8.1	Der Begriff Vektorraum	89
8.1.1	Definition Vektorraum	89
8.1.2	Rechenregeln	89
8.2	Unterräume	90
8.2.1	Definition Unterraum	90
8.2.2	Unterraumkriterien	90
8.2.3	Durchschnitt von Unterräumen	90
8.2.4	Definition lineare Hülle	90
8.2.5	Definition Linearkombination	91
8.2.6	Zusammenhang lineare Hülle — Linearkombination . . .	91
8.3	Lineare Unabhängigkeit	91
8.3.1	Definition Lineare Unabhängigkeit	91
8.3.2	Rechenregeln für lineare Unabhängigkeit	91
8.4	Basis und Dimension	92
8.4.1	Definition Hamel-Basis	92
8.4.2	Äquivalente Aussagen zu Basen	93
8.4.3	Existenz einer Basis	93
8.4.4	Eigenschaften der Basis	93
8.4.5	Definition Dimension	93
8.4.6	Beziehung von Dimensionen	94
8.4.7	Lineare unabängigkeit im n -Dimensionalen	94
8.5	Lineare Gleichungssysteme	94

8.5.1	Definition lineares Gleichungssystem	94
8.5.2	Zusammenhang Kern und Lösung eines LGS	95
8.5.3	Definition Affiner Unterraum, lineare Mannigfaltigkeit	95
8.5.4	Definition Zeilen-/Spaltenrang	95
8.5.5	Elementare Zeilen-/Stufenoperationen	95
8.5.6	Beziehung Spalten-/Zeilenrang	97
8.5.7	Definition Rang einer Matrix	97
8.5.8	Gauß-Algorithmus	97
8.5.9	Lösbarkeit eines LGS	97
8.5.10	Lösung eines LGS	97

III Beweisansätze 98

9 HM 1 99

9.1	Grenzwerte	99
9.1.1	Eindeutigkeit des Grenzwert einer Folge	99
9.1.2	Konvergente Folgen sind beschränkt	99
9.1.3	Grenzwertrechenregeln	99
9.1.4	Monotoniekriterium	99
9.1.5	Grenzwert einer konv. Folge = Grenzwert jeder Teilfolge	99
9.1.6	Charakterisierung $\overline{\lim}$ und $\underline{\lim}$	99
9.1.7	Folge konv. $\overline{\lim} = \underline{\lim}$	99
9.1.8	Bolzano-Weierstraß	100
9.1.9	Cauchy Kriterium	100
9.1.10	Reihe konv. Folge ist Nullfolge	100
9.1.11	GrenzwertRR für Reihen	100
9.1.12	Reihe konv g. 0	100
9.1.13	Leibniz	100
9.1.14	Absolut konv. \Rightarrow konv.	100
9.1.15	Majorantenkriterium	100
9.1.16	Minorantenkriterium	100
9.1.17	Wurzelkriterium	100
9.1.18	Quotientenkriterium	100
9.1.19	Hadamard	101
9.1.20	Differenzieren / Integrieren von Potenzreihen	101
9.1.21	Lemma zu sin, cos und exp	101
9.1.22	$e^z \neq 0$ und $e^{-z} = \frac{1}{e^z}$	101
9.1.23	Pythagoras	101
9.1.24	$e^x > 0 \ \forall x \in \mathbb{R}$	101
9.1.25	$1 + x \leq e^x \ \forall x \in \mathbb{R}$	101
9.1.26	$x < y \Rightarrow e^x < e^y$	101
9.1.27	Folgenkriterium	101
9.1.28	Cauchy für Funktionen	101
9.1.29	Grenzwerte an Intervallgrenzen	101
9.1.30	Verknüpfungen stetiger Funktionen stetig	101

9.1.31	Potenzreihen sind innerhalb des Konvergenzradius stetig	102
9.1.32	Umgebung pos. Funktionswerte	102
9.1.33	Zwischenwertsatz	102
9.1.34	Existenz \log	102
9.1.35	Beschränktheit stetiger Funktionen	102
9.1.36	Weierstraß existenz \min bzw. \max	102
10 HM 2		103
10.1	Integration	103
10.1.1	Riemann integrierbar impliziert Beschränktheit	103
10.1.2	Rechenregeln für Integrale (Verkettung usw.)	103
10.1.3	Transitivität	103
10.1.4	1. MWS der Integralrechnung	103
10.1.5	Eine Stammfunktion einer Funktion ist stetig und differenzierbar	103
10.1.6	Hauptsatz der DI	104
10.1.7	Monotonie impliziert Riemann Integrierbarkeit	104
10.1.8	2. MWS der Integralrechnung	104
10.1.9	Integralkriterium	104
10.2	Gleichmäßige Konvergenz	104
10.2.1	Stetigkeit der Grenzfunktion	104
10.3	Differentialrechnung mit mehreren Veränderlichen	104
10.3.1	Grenzwertrechenregeln	104
10.3.2	Max/Min kompakter Mengen	104
10.3.3	Stetigkeit einer Funktion durch beschränkte partielle Ableitungen	105
10.3.4	Differenzierbarkeit impliziert Stetigkeit	105
10.3.5	Zusammenhang totale und partielle Diff'barkeit	105
10.3.6	Kettenregel	105
10.3.7	Notwendige Bedingung für Extrema	105
10.3.8	Mittelwertsatz	105
10.3.9	Konstante Funktionen	106
10.3.10	Taylor	106
10.3.11	Hinreichende Bedingung für Extrema	106
10.3.12	Beweisidee für den Hauptsatz über implizite Funktionen	106
10.3.13	Herleitung für die Ableitung der Auflösung	106
10.3.14	Satz von Lagrange	106
10.4	Integration in mehreren Veränderlichen	106
10.4.1	Ableitung in Integral ziehen	106
10.4.2	Fubini	107
10.4.3	Leibniz Regel	107
10.4.4	Beweis-Idee Kurvenintegrale (Substitutionsregel)	107
10.4.5	1. Hauptsatz für Kurvenintegrale	107
10.4.6	Äquivalente Aussagen für Kurvenintegrale	107
10.4.7	2. Hauptsatz für Kurvenintegrale	107
10.4.8	Gauß'sche Integralsätze in der Ebene	108

IV	Klausurvorbereitung	109
11	HM1	111
12	HM2	112
12.1	Integration	112
12.1.1	Wichtige Beweise	112
12.1.2	Typische Aufgaben	112
12.1.3	Trickreiche Aufgaben	112
12.1.4	Weitere hilfreiche Dinge	113
12.2	Gleichmäßige Konvergenz	113
12.2.1	Wichtige Beweise	113
12.2.2	Typische Aufgaben	113
12.2.3	Trickreiche Aufgaben	113
12.3	Differentialrechnung mit mehreren Veränderlichen	113
12.3.1	Wichtige Beweise	113
12.3.2	Typische Aufgaben	114
V	Appendix	115
13	Grenzwerte	116
13.1	Konvergenzkriterien	116
14	Integration	117
14.1	Riemann-Integrierbarkeit	117
15	Integration in mehreren Veränderlichen	118
15.1	Häufige Additionstheoreme	118
15.2	Integral-Shortcuts	119

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)

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

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 Tupple 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:

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

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:

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

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 Endliche 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.

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

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

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

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 $\|\cdot\|$ ($\|\cdot\| : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$) 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

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

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 $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ 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 $f : A \subseteq \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$ 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.

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

Zudem muss x_0 die Nebenbedingung erfüllen.

6.7.13 Lagrange Funktion

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

Kapitel 7

Integration in mehreren Veränderlichen

7.1 Parameterintegrale

7.1.1 Eigentliche Parameterintegrale

Sei $f(x, t)$ reel und stetig in $[\alpha, \beta] \times [a, b]$ (also $x \in [\alpha, \beta], t \in [a, b]$). Dann gilt für

$$F(x) := \int_a^b f(x, t) \, dt$$

- (a) F ist stetig auf $[\alpha, \beta]$
- (b) Ist f_x stetig in $[\alpha, \beta] \times [a, b]$, so ist $F \in C^1([\alpha, \beta])$ und $F'(x) = \int_a^b f_x(x, t) \, dt$
- (c) Satz von Fubini:

$$\int_{\alpha}^{\beta} F(x) \, dx = \int_{\alpha}^{\beta} \int_a^b f(x, t) \, dt \, dx = \int_a^b \int_{\alpha}^{\beta} f(x, t) \, dx \, dt$$

7.1.2 Leibniz Regel

Seien $f(x, t), f_x(x, t)$ stetig in $[\alpha, \beta] \times [a, b]$ und $u, v \in C^1([a, b])$. Dann ist

$$F(x) = \int_{u(x)}^{v(x)} f(x, t) \, dt \in C^1([a, b])$$

und

$$F'(x) = \int_{u(x)}^{v(x)} f_x(x, t) \, dt + f(x, v(x))v'(x) - f(x, u(x))u'(x)$$

7.1.3 Uneigentliche Parameterintegrale

Ist für jedes $x \in M \subseteq \mathbb{R}$ ein uneigentliches Integral

$$\int_a^b f(x, t) \, dt$$

mit kritischem Punkt a oder b gegeben, so heißt dieses gleichmäßig konvergent in M , wenn gilt:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists L \in (a, b) : \left| \int_{T_1}^{T_2} f(x, t) \, dt \right| < \varepsilon \quad \forall x \in M \quad \forall T_1, T_2 \in (a, L) \text{ (bzw. } \forall T_1, T_2 \in (L, b))$$

7.1.4 Majorantenkriterium

Ein uneigentliches Integral $\int_a^b f(x, t) \, dt$ konvergiert gleichmäßig in M wenn ein konvergentes Integral

$$\int_a^b g(t) \, dt \text{ ex. mit } |f(x, t)| \leq g(t)$$

7.1.5 Fubini für uneigentliche Parameterintegrale

Ist $f(x, t)$ stetig in $[\alpha, \beta] \times [a, b]$ und konvergiert

$$F(x) = \int_a^b f(x, t) \, dt$$

gleichmäßig auf $[\alpha, \beta]$ dann ist F stetig und

$$\int_\alpha^\beta \int_a^b f(x, t) \, dt \, dx = \int_a^b \int_\alpha^\beta f(x, t) \, dx \, dt$$

7.1.6 Konvergenzkriterien

Sind $f(x, t), f_x(x, t)$ stetig auf $[\alpha, \beta] \times [a, b]$ und ist

$$\int_a^b f(x, t) \, dt$$

für ein $x_0 \in [\alpha, \beta]$ konvergent und ist

$$\int_a^b f_x(x, t) \, dt$$

gleichmäßig konvergent. Dann gilt:

$$F(x) = \int_a^b f(x, t) \, dt \quad \forall x \in [\alpha, \beta]$$

und

$$F'(x) = \int_a^b f_x(x, t) \, dt \quad \forall x \in (\alpha, \beta)$$

existiert und ist stetig.

7.2 Kurvenintegrale

7.2.1 Äquivalenz für Kurven

Zwei stetige Funktionen $x : [a, b] \subseteq \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n, y : [\alpha, \beta] \subseteq \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ heißen Äquivalent (schreibweise $x \sim y$), wenn eine streng monoton wachsende Funktion

$$\phi : [a, b] \rightarrow [\alpha, \beta]$$

gibt mit

$$x(t) = y(\phi(t)) \quad \forall t \in [a, b]$$

Bemerkung

Es gilt:

- (a) $x \sim x$ (Reflexivität)
- (b) $x \sim y \Rightarrow y \sim x$ (Symmetrie)
- (c) $x \sim y \wedge y \sim z \Rightarrow x \sim z$ (Transitivität)

7.2.2 Kurven im \mathbb{R}^n

Ist $x : [a, b] \subseteq \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig, so nennt man die Menge

$$\mathbb{K} := \{y : [\alpha, \beta] \subseteq \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n \text{ mit } x \sim y\}$$

die Kurve \mathbb{K} mit Parameterdarstellung x und den Punkt $x(a)$ Anfangspunkt und $x(b)$ Endpunkt.

Schreibweise

$$\mathbb{K} : x(t), a \leq t \leq b$$

Die Menge

$$T(\mathbb{K}) := \{x(t) : t \in [a, b]\} = x([a, b])$$

nennt man den Träger der Kurve \mathbb{K} .

Bemerkung

Verschieden Kurven können also den gleichen Träger haben.

Man nennt K :

- (a) Geschlossen, wenn $x(a) = x(b)$
- (b) Einfach oder Jordankurve, wenn $x(t) \neq x(s) \forall t, s : a \leq t < s < b$

7.2.3 Eigenschaften von Parameterdarstellungen

- (a) Eine Parameterdarstellung $x : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ einer Kurve heißt stückweise stetig differentierbar, wenn eine Zerlegung

$$T : a = t_0 < \dots < t_k = b \quad (7.1)$$

existiert und x auf (t_l, t_{l+1}) $l \in \{0, \dots, k-1\}$ differentierbar ist.

- (b) Besitzt eine Kurve \mathbb{K} eine (stückweise) stetig differentierbare Parameterdarstellung $x(t), t \in [a, b]$ mit $\dot{x}(t) \neq \vec{0}$ für $t \in [a, b]$ so heißt \mathbb{K} stückweise glatt oder stückweise regulär.
- (c) Ist eine Parameterdarstellung x von \mathbb{K} differentierbar und glatt, so heißt

$$T(t) := \frac{\dot{x}(t)}{\|\dot{x}(t)\|}$$

der Tangential (einheits) vektor von x und \mathbb{K}

- (d) Ist auch T differentierbar und glatt (also $\dot{T}(t) \neq \vec{0}$) so heißt

$$N(t) := \frac{\dot{T}(t)}{\|\dot{T}(t)\|}$$

der (Haupt-) Normalen (einheits) vektor von \mathbb{K} und x bei t

- (e) Und falls $n = 3$

$$B(t) = T(t) \times N(t)$$

der Binormalen (einheits) vektor von \mathbb{K} und x bei t (Man nennt dann $T(t), N(t), B(t)$ ein begleitendes Dreibein von \mathbb{K})

- (f) Existiert $T(t)$, so nennt man die Gerade

$$\{x(t) + \lambda \dot{x}(t) : \lambda \in \mathbb{R}\}$$

die Tangente von \mathbb{K} bei t

- (g) Existiert auch $N(t)$ so nennt man die Ebene

$$\{x(t) + \lambda \dot{x}(t) + \mu \ddot{x}(t) : \lambda, \mu \in \mathbb{R}\}$$

die Schmiegeebene von \mathbb{K} bei t .

Bemerkung

Sei $x(t) = y(\phi(t))$ mit $a \leq t \leq b$ zwei Parameterdarstellungen von x . Dann gilt:

$$T(t) = \frac{\dot{x}(t)}{\|\dot{x}(t)\|} = \frac{\dot{y}(\phi(t)) \cdot \dot{\phi}(t)}{\|\dot{y}(\phi(t)) \cdot \dot{\phi}(t)\|} = \frac{\dot{y}(\phi(t))}{\|\dot{y}(\phi(t))\|}$$

Das heißt die Berechnung von T ist unabhängig von der konkreten Parameterdarstellung

Existiert $N(t)$ dann gilt:

$$N(t) \perp T(t)$$

Existiert auch $B(t)$ (im \mathbb{R}^3), dann gilt: $N(t), T(t), B(t)$ sind paarweise Orthogonal.

7.2.4 Weitere Definitionen zu Kurven

(a) Ist $\mathbb{K} : x(t), a \leq t \leq b$ eine Kurve, so heißt:

$$-\mathbb{K} : y(t), a \leq t \leq b \text{ mit } y(t) = x(a + b - t)$$

die zu \mathbb{K} entgegengesetzte Kurve

(b) Sind $\mathbb{K} : x(t), a \leq t \leq b$ und $\mathbb{L} : y(t), \alpha \leq t \leq \beta$ zwei Kurven und gilt $x(b) = y(\alpha)$ dann ist

$$\mathbb{K} + \mathbb{L} : z(t), a \leq t \leq (\beta - \alpha) + b$$

und

$$z(t) = \begin{cases} x(t) & , a \leq t \leq b \\ y(t - b + \alpha) & , b \leq t \leq (\beta - \alpha) + b \end{cases}$$

die aus \mathbb{K} und \mathbb{L} zusammengesetzte Kurve.

7.2.5 Kurventintegrale 2. Art

Sei \mathbb{K} eine Kurve im \mathbb{R}^n und

$$f : T(\mathbb{K}) \rightarrow \mathbb{R}^n$$

(a) Sei $x : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine Parameterdarstellung von \mathbb{K}

(i) Für eine Zerlegung $T : a = t_0 < \dots < t_n = b$, Zwischenpunkte $Z : (\xi_1, \dots, \xi_n)$ mit $t_{k-1} \leq \xi_k \leq t_k$ heißt

$$S(f, x, T, Z) := \sum_{k=1}^n f(x(\xi_k)) \cdot (x(t_k) - x(t_{k-1}))$$

die Riemann-Summe von f, T, Z bezüglich x .

- (ii) Existiert eine Zahl $I \in \mathbb{R}$ derart, dass für jede Folge von Zerlegungen T_n mit

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mu(T_n) = 0$$

stets

$$\lim_{n \rightarrow \infty} S(f, x, T_n, Z_n) = I$$

folgt, so heißt I das Kurvenintegral (2. Art) von f längs \mathbb{K} bzgl. x .

- (b) Gibt es stets ein I wie in (a) so heißt f längs \mathbb{K} (Riemann-) integrierbar und man nennt I das (unbestimmte) Kurvenintegral von f längs \mathbb{K} und schreibt:

$$I = \int_{\mathbb{K}} f = \int_{\mathbb{K}} f(x) \cdot dx = \int_{\mathbb{K}} f_1(x) dx_1 + \cdots + f_n(x) dx_n$$

7.2.6 Substitutionsregel

Ist $\mathbb{K} : x(t), a \leq t \leq b$ eine Kurve im \mathbb{R}^n und $x(t)$ stückweise differentierbar, sowie $f : T(\mathbb{K}) \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig, so ist f längs \mathbb{K} integrierbar und es gilt:

$$\int_{\mathbb{K}} f(x) dx = \int_a^b f(x(t)) dx(t) = \int_a^b f(x(t)) \cdot \dot{x}(t) dt$$

7.2.7 Definition Wegunabhängigkeit

Sei $f \in C(G, \mathbb{R}^n)$ mit $G \subseteq \mathbb{R}^n$ ein Gebiet:

- (a) Gilt für zwei Wege \mathbb{K} und \mathbb{L} mit gleichem Anfangs- und Endpunkt stets

$$\int_{\mathbb{K}} f = \int_{\mathbb{L}} f$$

dann heißen die Kurvenintegrale Wegunabhängig in G .

- (b) Eine Funktion $F \in C^1(G, \mathbb{R})$ heißt Stammfunktion von f in G , wenn

$$\nabla F(x) = f(x) \quad \forall x \in G$$

gilt.

- (c) Man nennt

$$P := -F$$

das Potential von f .

- (d) Man nennt f konservativ in G oder ein Potentialfeld oder Gradientenfeld in G , wenn f eine Stammfunktion hat.

7.2.8 1. Hauptsatz für Kurvenintegral

Sei f konservativ in G mit Stammfunktion F und Potential P dann gilt für jeden Weg \mathbb{K} in G mit Anfangspunkt $A \in G$ und Endpunkt $B \in G$:

$$\int_{\mathbb{K}} f = F(B) - F(A) = P(A) - P(B)$$

insbesondere ist also das Integral wegunabhängig.

7.2.9 Äquivalente Aussagen zu Stammfunktionen

(a)

$$\int_{\mathbb{K}} f \text{ ist wegunabhängig in } G$$

(b) f besitzt eine Stammfunktion

(c)

$$\int_{\mathbb{K}} f = 0 \text{ für jede geschlossene Kurve } \mathbb{K}$$

Bemerkung

Rechenregeln für zwei Kurven \mathbb{K} und \mathbb{L} :

(a)

$$\int_{\mathbb{K}+\mathbb{L}} f = \int_{\mathbb{K}} f + \int_{\mathbb{L}} f$$

(b)

$$\int_{-\mathbb{K}} f = - \int_{\mathbb{K}} f$$

7.2.10 Definition einfach zusammenhängende Gebiete

Ein Gebiet $G \subseteq \mathbb{R}^n$ heißt einfach zusammenhängend, wenn sich jede geschlossene Kurve in G innerhalb von G „auf einen beliebigen Punkt zusammenziehen lässt“.

7.2.11 Sternförmige Gebiete

Eine Menge $G \subseteq \mathbb{R}^n$ heißt Sternförmig bezüglich $x_0 \in G$, wenn für alle $x \in G$ gilt, dass $\overline{x_0 x} \subseteq G$ (d.h. jedes x ist von x_0 durch einen Streckenzug erreichbar). G ist ein sternförmiges Gebiet, wenn G offen und sternförmig ist.

Bemerkung

G sternförmig $\Rightarrow G$ einfach zusammenhängend

7.2.12 2. Hauptsatz für Kurvenintegrale

Sei $f \in C^1(G, \mathbb{R}^n)$, $G \subseteq \mathbb{R}^n$ ein Gebiet, dann gilt:

- (a) Besitzt f eine Stammfunktion in G , so erfüllt f in G die Integrabilitätsbedingung:

$$\frac{\partial f_l}{\partial x_k} = \frac{\partial f_k}{\partial x_l} \quad k, l \in \{1, \dots, n\}$$

D.h. die Jacobi-Matrix von f ist symmetrisch.

Kurz:

$$f \text{ hat Stammfunktion} \Rightarrow f' = (f')^T$$

- (b) Ist G einfach zusammenhängend und erfüllt f die Integrabilitätsbedingung dann besitzt f eine Stammfunktion.

Kurz:

$$G \text{ einfach zusammenhängend} \wedge f' = (f')^T \Rightarrow \exists F : \nabla F = f$$

7.2.13 Definition Rotation

Sei $G \subseteq \mathbb{R}^3$ offen und $f : G \rightarrow \mathbb{R}^3$ partiell differentierbar, dann heißt die Funktion $\text{rot } f : G \rightarrow \mathbb{R}^3$ mit

$$\text{rot } f(x) := \begin{pmatrix} \frac{\partial f_3}{\partial x_2} - \frac{\partial f_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial f_1}{\partial x_3} - \frac{\partial f_3}{\partial x_1} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} - \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \end{pmatrix}$$

die Rotation von f in G .

Bemerkung

Im Fall $f : G \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ definiert man

$$\text{rot } f(x_1, x_2) = \frac{\partial f_2}{\partial x_1} - \frac{\partial f_1}{\partial x_2}$$

Formal betrachtet man die Hilfsfunktion

$$\tilde{f}(x, y, z) := \begin{pmatrix} f_1(x, y) \\ f_2(x, y) \\ 0 \end{pmatrix}$$

7.2.14 Zusammenhang Rotation und Integrabilitätsbedingung

Ist $f \in C^1(G, \mathbb{R}^3)$, G ein Gebiet, dann gilt

- (a) f besitzt eine Stammfunktion $\Rightarrow \text{rot } f = \vec{0}$
 (b) G einfach zusammenhängend und $\text{rot } f = \vec{0} \Rightarrow f$ hat Stammfunktion.

7.2.15 Definition Linienintegral/Kurvenintegral 1. Art

Sei $\mathbb{K} : x(t), a \leq t \leq b$ ein Weg, und x stückweise differentierbar. Für ein $\phi \in C(T(\mathbb{R}), \mathbb{R})$ heißt

$$\int_{\mathbb{K}} \phi \, ds := \int_a^b \phi(x(t)) \|\dot{x}(t)\| \, dt$$

ein Linienintegral oder Kurvenintegral 1. Art von ϕ längs \mathbb{K} .

Bemerkung

(a) Mit $\phi \equiv 1$:

$$\int_{\mathbb{K}} 1 \, ds = \int_a^b \phi(x(t)) \|\dot{x}(t)\| \, dt = \int_a^b \|\dot{x}(t)\| \, dt = l(\mathbb{K})$$

d.h. mit Linienintegralen können auch Weglängen berechnet werden, bzw. Weglängen berechnet man mit $\phi = 1$.

(b) $\phi : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ wähle $\mathbb{K} : x(t) = a + t \cdot (b - a) \, t \in [0, 1]$:

$$\int_{\mathbb{K}} \phi \, ds = \int_0^1 \phi(a + t \cdot (b - a)) \|b - a\| \, dt = \int_a^b \phi(t) \, dt$$

(c) Linienintegrale hängen nicht von der Parameterdarstellung ab.

(d) Man schreibt (falls Parameter-Darstellung bekannt ist) oft

$$ds = \|\dot{x}(t)\| \, dt$$

und nennt ds Bogensegment oder Liniensegment.

(e) Ist $f \in C(T(\mathbb{K}), \mathbb{R}^n)$ und $\dot{x}(t) \neq \vec{0} \, \forall t \in [a, b]$, dann ist:

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{K}} f &= \int_{\mathbb{K}} f(x) \, dx = \int_a^b f(x(t)) \dot{x}(t) \, dt \\ &= \int_a^b \frac{f(x(t)) \dot{x}(t)}{\|\dot{x}(t)\|} \|\dot{x}(t)\| \, dt \\ &= \int_a^b f(x(t)) \cdot T(t) \|\dot{x}(t)\| \, dt \\ &= \int_{\mathbb{K}} \phi \, ds \text{ mit } \phi(t) = f(x(t)) \cdot T(t) \end{aligned}$$

7.3 Bereichsintegrale

Hier: $f : G \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ und

$$\int_G f = \int_G f(x_1, \dots, x_n) \, d(x_1, \dots, x_n)$$

sollen anschaulich bedeuten:

Welches Volumen schließt der Graph von f mit der Grundfläche G ein.

7.3.1 Intervalle im \mathbb{R}^n

Für $a, b \in \mathbb{R}^n$ bezeichnet die Menge

$$[a, b] := [a_1, b_1] \times \dots \times [a_n, b_n]$$

einen (kompakten) Quader oder (kompaktes) Intervall im \mathbb{R}^n . Die Zahl

$$V([a, b]) = \begin{cases} \prod_{k=1}^n (b_k - a_k) & , \text{ falls } b_k > a_k \text{ für } k = 1, \dots \\ 0 & , \text{ sonst} \end{cases}$$

bezeichnet das Volumen, und die Zahlen $b_1 - a_1, \dots, b_n - a_n$ als Kantenlängen.

7.3.2 Definition Zerlegung

Ist $[a, b] = [a_1, b_1] \times \dots \times [a_n, b_n]$ und ist für jedes $k \in \{1, \dots, n\}$ mit

$$T^{(k)} : a_k = x_0 < \dots < x_{l_k} = b_k$$

eine Zerlegung von $[a_k, b_k]$ dann heißt die Menge

$$I_{l_1, \dots, l_n} = [x_{l_1-1}^{(1)} - x_{l_1}^{(1)}] \times \dots \times [x_{l_1-1}^{(n)} - x_{l_1}^{(n)}]$$

mit $l_k \in \{1, \dots, l_k\}$ für $k \in \{1, \dots, n\}$ eine Zerlegung T von $[a, b]$.
Das Feinheitsmaß von T ist

$$\mu(T) = \max_{l_1, \dots, l_n} V(I_{l_1, \dots, l_n})$$

Allgemein ist ein Intervall von der Form

$$[x_i^{(1)}, x_{i+1}^{(1)}] \times [x_j^{(2)}, x_{j+1}^{(2)}]$$

mit $i \in \{0, \dots, l_1 - 1\}$ und $j \in \{0, \dots, l_2 - 1\}$.

7.3.3 Definition Riemann-Summe

Sei T eine Zerlegung eines kompakten Quaders $I \subseteq \mathbb{R}^n$ mit Teilquadrern I_1, \dots, I_l mit $l = l_1 \cdot \dots \cdot l_n$ (entstehen indem man die Zerlegungsintervalle fortlaufend durchnummeriert) und Zwischenpunkte $\xi = (\xi_1, \dots, \xi_l)$ mit $\xi_i \in I_i (i \in \{1, \dots, l\})$ und $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ (d.h. Skalarwertige Funktion). Dann heißt

$$S(f, T, \xi) = \sum_{i=1}^l f(\xi_i) \mu(I_i)$$

die Riemann-Summe von f bezüglich T und ξ .

7.3.4 Riemann integrierbare Bereichsintegrale

Sei $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion, $I \subseteq \mathbb{R}^n$ ein Quader. Gibt es eine Zahl $\alpha \in \mathbb{R}$, so dass für jede Folge von Zerlegungen $(T_k)_{k=1}^\infty$ mit Zwischenpunkten $(\xi_k)_{k=1}^\infty$ mit $\lim_{k \rightarrow \infty} \mu(T_k) = 0$ die Riemann-Summe $S(f, T_k, \xi_k)$ gegen α konvergiert für $k \rightarrow \infty$ dann heißt f Riemann integrierbar über I und α nennen wir das Bereichsintegral von f über I .

Schreibweise

$$\alpha = \int_I f(x) \, dx$$

Zur Schreibweise: z.B. $n = 2$ auch:

$$\alpha = \iint_I f(x, y) \, d(x, y) := \int_I f(x, y) \, d(x, y)$$

oder Angabe von I an dem Integral:

$$\alpha = \int_{[a_1, b_1] \times [a_2, b_2]} f(x, y) \, d(x, y)$$

7.3.5 Bereichsintegrale über beschränkte Mengen

Sei $M \subseteq \mathbb{R}^n$ beschränkt und $I = [a_1, b_1] \times \dots \times [a_n, b_n]$ ein Quader mit $M \subseteq I$. Dann heißt $f : M \rightarrow \mathbb{R}$ über M integrierbar wenn die Funktion

$$\tilde{f} : I \rightarrow \mathbb{R} \text{ mit } \tilde{f}(x) = \begin{cases} f(x) & , x \in M \\ 0 & , \text{sonst} \end{cases}$$

über I Bereichs-Riemann integrierbar ist. Wir definieren:

$$\int_M f(x) \, dx = \int_I \tilde{f}(x) \, dx$$

7.3.6 Cavalieri

Sei $M \subseteq \mathbb{R}^n (n > 1)$ und bezeichne

$$M' = \{x \in \mathbb{R} : (x, y)^T \in M \text{ für ein } y \in \mathbb{R}^{n-1}\}$$

und für $x \in M'$

$$M(x) = \{y \in \mathbb{R}^{n-1} : (x, y) \in M\}$$

dann gilt für $f \in C(\bar{M})$ (falls $M, M', M(x)$ sogenannte messbare Mengen sind, d.h. $\mu(M), \mu M', \mu M(x)$ sind definiert)

$$\int_M f(x, y) \, d(x, y) = \int_{M'} \left[\int_{M(x)} f(x, y) \, dy \right] dx$$

mit $x \in \mathbb{R}$ und $y \in \mathbb{R}^{n-1}$.

7.3.7 Fubini

Im Fall $n = 2$ steht nach Cavalieri ein Parameterintegral und mit Fubini gilt:

$$\int_{M'} \int_{M(x)} f(x, y) \, dy \, dx = \int_{\tilde{M}'} \int \tilde{M}(y) f(x, y) \, dx \, dy$$

wobei $\tilde{M}', \tilde{M}(y)$ analog zu $M', M(x)$ bezüglich y definiert sind.

7.3.8 Definition Meßbare-Mengen

Eine beschränkte Menge $M \subseteq \mathbb{R}^n$ heißt (Jordan-) meßbar, wenn

$$\int_M 1 \, dx$$

existiert, in diesem Fall nennt man

$$\mu(M) := \int_M 1 \, dx$$

das Volumen von M . Ist $\mu M = 0$, so nennt man M eine Nullmenge.

7.3.9 Definition 2×2 Determinante

Für

$$A = \begin{pmatrix} a & c \\ b & d \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$$

definieren wir die Funktion

$$\det : \mathbb{R}^{2 \times 2} \rightarrow \mathbb{R}$$

durch $A \mapsto \det(A) = a \cdot d - c \cdot b$ und nennen die Funktionsauswertung die Determinante von A .

7.3.10 Mehrdimensionale Substitutionsregel

Sei $M \subseteq \mathbb{R}^n$ meßbar und $G \supseteq M$ ein Gebiet. Ist $T \in C^1(G, \mathbb{R}^m)$ und gilt $\det(T'(x)) \neq 0 \forall x \in M \setminus N$ für eine Nullmenge N , dann gilt:

$$\int_{T(M)} f(x_1, \dots, x_n) \, d(x_1, \dots, x_n) = \int_M f(T(u_1, \dots, u_n)) |\det(T'(u_1, \dots, u_n))| \, d(u_1, \dots, u_n)$$

7.4 Integralsätze in der Ebene

7.4.1 Positiv berandete Menge

Eine beschränkte Menge $B \subseteq \mathbb{R}^2$ heißt positiv berandet durch einen Weg, (Randkurve) \mathbb{K} , wenn $T(\mathbb{K}) = \partial B$ ist und wenn \mathbb{K} eine stückweise stetig differenzierbare Parameterdarstellung $x : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^2$ hat mit:

- (i) $\dot{x}(t) \neq 0$ für fast alle $t \in [a, b]$
- (ii) der Normalenvektor von $x(t)$ zeigt nach außen

7.4.2 Satz von Green

Ist $B \subseteq \mathbb{R}^2$ positiv berandet, dann gilt für alle $f \in C^1(B, \mathbb{R}^2)$

$$\iint_B \frac{\partial f_2}{\partial x} - \frac{\partial f_1}{\partial y} \, d(x, y) = \int_{\partial B} f(x, y) \, d(x, y)$$

7.4.3 Definition Normalbereiche

Eine Menge $B \subseteq \mathbb{R}^2$ heißt Normalbereich bezüglich der x -Achse (bzw. y -Achse), wenn es ein Intervall $[a, b]$ gibt und die Funktion φ, ψ mit

$$B = \{(x, y)^T : a \leq x \leq b, \phi(x) \leq y \leq \psi(x)\}$$

7.4.4 Gauß'sche Integralsätze in der Ebene

Sei $B \subseteq \mathbb{R}^2$ ein positiv berandeter Bereich und $f \in C^1(B, \mathbb{R}^2)$ bzw. $f \in C^2(B, \mathbb{R}^2)$ und bezeichne ν die nach außen gerichtete Normale auf ∂B . Dann gelten die Integralsätze:

(i)

$$\iint_B (\operatorname{div} f)(x, y) \, d(x, y) = \int_{\partial B} f \cdot \nu \, ds$$

(ii)

$$\iint_B f_1(x, y) \Delta f_2(x, y) - f_2(x, y) \Delta f_1(x, y) \, d(x, y) = \int_{\partial B} f_1 \frac{\partial f_2}{\partial \nu} - f_2 \frac{\partial f_1}{\partial \nu}$$

7.5 Oberflächenintegrale und Integralsätze im \mathbb{R}^3

7.5.1 Definition Reguläre Flächen

Sei $B \subseteq \mathbb{R}^2$ und $x : B \rightarrow \mathbb{R}^3$,

$$x(u, v) = \begin{pmatrix} x_1(u, v) \\ x_2(u, v) \\ x_3(u, v) \end{pmatrix}$$

eine stetig diffbare Funktion, für die $x_u = \frac{\partial x}{\partial u}$ und $x_v = \frac{\partial x}{\partial v}$ linear unabhängig sind (d.h. die Vektoren x_u und x_v zeigen nicht in die gleiche oder entgegengesetzte Richtung) (für fast alle $(u, v)^T \in B$) die Menge der Ausnahmen muss $\tilde{B} \subseteq B$ muss $\mu \tilde{B} = 0$ erfüllen.

Das Bild einer solchen Funktion, d.h. die Menge

$$A = x(B) := \{x(u, v) | (u, v)^T \in B\}$$

heißt dann eine reguläre Fläche im \mathbb{R}^3 und die Funktion x heißt die Parametrisierung von A .

Man nennt

- (i) $x_u(u, v), x_v(u, v)$ die Tangentialvektoren in $(u, v)^T$
- (ii) $n(u, v) := \frac{(x_u \times x_v)(u, v)}{\|(x_u \times x_v)(u, v)\|}$
 - Vektor mit Länge 1 der Senkrecht auf den Tangentialvektoren steht
 - Rechnerisch zu erhalten durch das Kreuzprodukt der Tangentialvektoren

der (Flächen-) Normalenvektor in $(u, v)^T$ falls $x_u(u, v)$ und $x_v(u, v)$ linear unabhängig sind.

Ist B positiv berandet durch $\mathbb{K} : y(t), a \leq t \leq b$ so nennt man A positiv berandet durch Kurve mit Parameterdarstellung $x(y(t)), a \leq t \leq b$.

7.5.2 Definition Oberflächenintegral

Sei A eine reguläre Fläche im \mathbb{R}^3 mit Parameterdarstellung $x : B \rightarrow \mathbb{R}^3, B \subseteq \mathbb{R}^2$ meßbar und x injektiv auf $B \setminus N$ für eine Nullmenge N .

- (a) Für jedes $f \in C(A, \mathbb{R})$ heißt

$$\iint_A f \cdot d\sigma = \iint_B f(x(u, v)) \cdot \|(x_u \times x_v)(u, v)\| \, d(u, v)$$

das Oberflächenintegral von f über A und man nennt

$$d\sigma = \|(x_u \times x_v)(u, v)\| \, d(u, v)$$

das Oberflächenelement.

- (b) $O(A) := \iint_A 1$ heißt Oberflächeninhalt von A .

Bemerkung

1. Das Oberflächenintegral hängt nicht von der Parameterdarstellung ab.
2. Ein Summand des Oberflächenintegrals sieht so aus:

$$f(x(u, v)) \cdot \|(x_u \times x_v)(u, v)\| \cdot \Delta u \Delta v$$

7.5.3 Satz von Stokes

Sei A eine reguläre Fläche im \mathbb{R}^3 und ∂A positiv berandet. Dann gilt für $f \in C^1(A, \mathbb{R}^3)$

$$\iint_A \operatorname{rot} f \cdot n \, do = \int_{\partial A} f$$

Mit n :

- (i) Normalenvektor
- (ii) Länge 1
- (iii) Senkrecht auf Fläche
- (iv) Immer auf der gleichen Seite von A

also

$$\iint_B \operatorname{rot}(f(x(u, v))) \cdot n(x(u, v)) \cdot \|(x_u \times x_v)(u, v)\| \, d(u, v) = \int_{\partial A} f$$

mit

$$n(x(u, v)) = \pm \frac{(x_u \times x_v)(u, v)}{\|(x_u \times x_v)(u, v)\|}$$

7.5.4 Divergenzsatz von Gauß

Sei $M \subseteq \mathbb{R}^3$ kompakt und ∂M ergebe sich als endliche Vereinigung von regulären Flächen, deren Normale n (normiert) nach Außen zeigt. Dann gilt für jedes $f \in C^1(M, \mathbb{R}^3)$

$$\iiint_M \operatorname{div} f = \iint_{\partial M} f \cdot n \, do$$

Kapitel 8

Lineare Algebra

8.1 Der Begriff Vektorraum

8.1.1 Definition Vektorraum

Gegeben sei eine abelsche Gruppe V und ein Körper \mathbb{K} (bei uns wird $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ oder $\mathbb{K} = \mathbb{C}$ gelten) und eine Abbildung:

$$\cdot : \mathbb{K} \times V \rightarrow V, (\alpha, x) \mapsto \alpha \cdot x =: \alpha x \text{ (Skalierung)}$$

Dann nennt man V einen Vektorraum über \mathbb{K} , wenn die folgenden Vektorraumaxiome erfüllt sind:

- (V1) $\alpha \cdot (\beta \cdot v) = (\alpha \cdot \beta) \cdot v$ (Assoziativgesetz)
- (V2) $\alpha \cdot (x + y) = (\alpha \cdot x) + (\alpha \cdot y) = \alpha x + \alpha y$
 $(\alpha + \beta) \cdot x = \alpha x + \beta x$ (Distributivgesetzte)
- (V3) $1 \cdot x = x$ für die $1 \in \mathbb{K}$ (Gesetz der Eins)

In einem Vektorraum V über \mathbb{K} nennt man Elemente aus V Vektoren, die Elemente aus \mathbb{K} Skalare, \mathbb{K} den Skalarkörper und „ \cdot “ die Multiplikation mit Skalaren. Die „ $+$ “ Verknüpfung in V die V die Vektoraddition und das neutrale Element $\vec{0} \in V$ den Nullvektor.

8.1.2 Rechenregeln

Ist V ein Vektorraum über \mathbb{K} , so gilt für $\alpha, \beta \in \mathbb{K}$ und $x, y \in V$:

1. (a) $0 \cdot x = \vec{0} = \alpha \vec{0}$
(b) $\alpha \cdot x = \vec{0} \Rightarrow \alpha = 0 \vee x = \vec{0}$

2.

$$\alpha(-x) = (-\alpha)x = -(\alpha x)$$

8.2 Unterräume

8.2.1 Definition Unterraum

Eine Teilmenge U eines Vektorraums V über \mathbb{K} heißt Unterraum von V , wenn U bezüglich der in V definierten Vektoraddition und Skalierung ein Vektorraum ist.

8.2.2 Unterraumkriterien

Für $U \subseteq V$ und $U \neq \emptyset$ sind folgende Aussagen äquivalent

(a) U ist ein Unterraum von V

(b)

$$x, y \in U, \alpha, \beta \in \mathbb{K} \Rightarrow \alpha x + \beta y \in U$$

(c)

$$(x, y \in U \Rightarrow x + y \in U) \wedge (\alpha \in \mathbb{K}, x \in U \Rightarrow \alpha x \in U)$$

8.2.3 Durchschnitt von Unterräumen

Der Durchschnitt von Unterräumen ist wieder ein Unterraum, d.h.:

$$U_i \text{ } i \in J \text{ (} J \text{ eine Indexmenge) sind Unterräume} \Rightarrow \bigcap_{i \in J} U_i \text{ ist Unterraum}$$

8.2.4 Definition lineare Hülle

- Ist M eine beliebige Teilmenge eines Vektorraums. Dann heißt

$$\text{span}(M) := \bigcap_{U \in S} U \text{ mit } S := \{U \subseteq V : U \text{ ist Unterraum, } U \supseteq M\}$$

der von M aufgespannte Unterraum oder die lineare Hülle von M .

- Ist U ein Unterraum und $M \subseteq V$ mit $\text{span}(M) = U$, dann heißt M ein erzeugendes System von U .

Bemerkung

1. $\text{span}(M)$ ist der kleinste Unterraum, der M enthält
2. $\text{span}(\emptyset) = \vec{0}$
3. $M \subseteq N \Rightarrow \text{span}(M) \subseteq \text{span}(N)$
4. Ist U ein Unterraum, dann gilt $U = \text{span}(U) = \text{span}(U \setminus \{\vec{0}\})$

8.2.5 Definition Linearkombination

Ist V ein Vektorraum über \mathbb{K} und $x_1, \dots, x_n \in V, \alpha_1, \dots, \alpha_n \in \mathbb{K}$ dann heißt

$$\sum_{k=1}^n \alpha_k x_k \in V$$

eine Linearkombination von x_1, \dots, x_n (mit Koeffizienten $\alpha_1, \dots, \alpha_n$).

8.2.6 Zusammenhang lineare Hülle — Linearkombination

Sei V ein Vektorraum über \mathbb{K} und $M \subseteq V$, dann gilt $\text{span } M$ ist die Menge aller Linearkombinationen, d.h.

$$\text{span}(M) = \{\alpha_1 x_1 + \dots + \alpha_n x_n \mid x_1, \dots, x_n \in M, \alpha_1, \dots, \alpha_n \in \mathbb{K}\}$$

im Fall $M = \{x_1, \dots, x_n\}$ gilt:

$$\text{span}(M) = \{\alpha_1 x_1 + \dots + \alpha_n x_n \mid \alpha_1, \dots, \alpha_n \in \mathbb{K}\}$$

8.3 Lineare Unabhängigkeit

8.3.1 Definition Lineare Unabhängigkeit

Sei V ein Vektorraum über \mathbb{K}

- (a) Eine endliche Liste $a_1, \dots, a_n \in V$ heißt linear unabhängig (l.u.), wenn gilt

$$\alpha_1 a_1 + \dots + \alpha_n a_n = \vec{0} \Rightarrow \alpha_1 = \dots = \alpha_n = 0$$

Andernfalls heißen a_1, \dots, a_n linear abhängig (l.a.).

- (b) Eine beliebige Teilmenge $M \subseteq V$ heißt linear unabhängig, wenn für eine beliebige endliche Liste $a_1, \dots, a_n \in M$ gilt, dass diese linear unabhängig sind. Andernfalls ist M linear abhängig.

8.3.2 Rechenregeln für lineare Unabhängigkeit

Für Vektoren $a, a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_n$ eines Vektorraumes V gilt:

- (a)

$$a \text{ l.u.} \Leftrightarrow \{a\} \text{ l.u.} \Leftrightarrow a \neq \vec{0}$$

Bemerkung:

a_1, a_2 mit $a_1 = a_2$ ist linear unabhängig, aber $M = \{a, a\} = \{a\}$ ist nur dann linear abhängig wenn $a = \vec{0}$.

- (b) a_1, \dots, a_n linear abhängig $\Rightarrow a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_k$ sind linear abhängig für $k \geq 0$.

- (c) a_1, \dots, a_n linear unabhängig $\Rightarrow a_1, \dots, a_k$ linear unabhängig für $k \leq n$
- (d) a_1, \dots, a_n linear unabhängig $\Rightarrow a_1, \dots, a_n$ sind paarweise verschieden
- (e) Für $n \geq 2$ sind a_1, \dots, a_n genau dann linear abhängig, wenn ein Vektor als Linearkombination darstellbar ist. D.h.:

$$\exists i \in \{1, \dots, n\} : a_i = \sum_{k=1, k \neq i}^n \alpha_k a_k \text{ für } \alpha_1, \dots, \alpha_{i-1}, \alpha_{i+1}, \dots, \alpha_n \in \mathbb{K}$$

- (f) Sind a_1, \dots, a_n linear unabhängig und a_1, \dots, a_n, a linear abhängig, so ist a die linear Kombination von a_1, \dots, a_n und die Koeffizienten sind eindeutig.
- (g) Ist a eine Linearkombination von a_1, \dots, a_n und jeder Vektor a_k eine Linearkombination von b_1, \dots, b_m so ist a eine Linearkombination von b_1, \dots, b_m

Bemerkung

Für Teilmengen M, N eines Vektorraums V gilt:

- (a) M l.a. $M \subseteq N \Rightarrow N$ l.a.
- (b) $M = \emptyset \Rightarrow M$ l.u.
- (c) $\vec{0} \in M \Rightarrow M$ l.a.

Für $V = \mathbb{R}^3$

- (a) a_1, a_2, a_3 seien linear abhängig und a_1, a_2 linear unabhängig
 \Leftrightarrow also a_3 ist in der von a_1 und a_2 aufgespannten Ebene
 \Rightarrow Spat mit Kanten a_1, a_2, a_3 hat Volumen 0
 $\Leftrightarrow \det(a_1, a_2, a_3) = 0$
- (b) a_1, a_2 linear abhängig $\Rightarrow a_2$ ist auf der von a_1 aufgespannten Gerade
 $\Rightarrow \det(a_1, a_2) = 0$

8.4 Basis und Dimension

8.4.1 Definition Hamel-Basis

- (a) Eine Teilmenge B eines Vektorraums V heißt (Hamel-) Basis von V , wenn gilt
 - (i) B ist linear unabhängig
 - (ii) $V = \text{span}(B)$

Kurz:

B ist ein linear unabhängiges Erzeuger-System von V

- (b) Man sagt Vektoren b_1, \dots, b_n bilden eine Basis von V , wenn gilt $B = \{b_1, \dots, b_n\}$ ist eine Basis von V .

8.4.2 Äquivalente Aussagen zu Basen

Sei $B \subseteq V$, V ein Vektorraum, dann sind folgende Aussagen äquivalent

1. B ist eine Basis
2. B ist ein minimales Erzeugersystem
 - (a) $V = \text{span}(B)$
 - (b) $V \neq \text{span}(\tilde{B})$ mit $\tilde{B} \subsetneq B$
3. B ist eine maximale, linear Unabhängige Teilmenge von V , d.h.
 - (a) B ist linear unabhängig
 - (b) $B \cup \{x\}$ ist linear abhängig für $x \in V \setminus B$ beliebig. D.h. $x \in \text{span}(B)$
4. Falls $B \neq \emptyset$ ist dies auch äquivalent zu:
Jedes $x \in V$ ist eine Linearkombination von endlich vielen Vektoren aus B und die Koeffizienten sind eindeutig bestimmt.

8.4.3 Existenz einer Basis

Jeder Vektorraum V besitzt eine Basis. Genauer gilt: Ist M ein Erzeugendensystem von V , so gibt es eine Basis B von V mit $B \subseteq M$.

8.4.4 Eigenschaften der Basis

Sei V ein Vektorraum, dann gilt

1. Ist $M \subseteq V$ endlich und linear unabhängig so existiert eine Basis B von V mit $M \subseteq B$. D.h. M kann zu einer Basis von V erweitert werden.
2. Ist B und \tilde{B} jeweils eine Basis von V dann haben beide gleich viele Elemente. Also $|B| = |\tilde{B}|$ (also auch im Fall $\infty = \infty$).

8.4.5 Definition Dimension

Ist V ein Vektorraum und B eine Basis, dann ist

$$\dim V := |B|$$

die Dimension von V . Im Fall $|B| < \infty$ also $\dim V \in \mathbb{N}_0$ heißt V endlich dimensional.

8.4.6 Beziehung von Dimensionen

Ist U ein Unterraum von V , so gilt

- (a) $\dim U \leq \dim V$
- (b) $\dim U = \dim V \Leftrightarrow U = V$ für $\dim V < \infty$

8.4.7 Lineare unabhängigkeit im n -Dimensionalen

Ist V ein n -Dimensionaler Vektorraum, so gilt:

- (a) n linear unabhängige Vektoren bilden eine Basis
- (b) $n + 1$ Vektoren V sind linear abhängig.

8.5 Lineare Gleichungssysteme

8.5.1 Definition lineares Gleichungssystem

Sei $m, n \in \mathbb{K}, \mathbb{K}$ ein Körper. $A \in \mathbb{K}^{m \times n}, b \in \mathbb{K}^m$ dann nennt man die Gleichung

$$A \cdot x = b \Leftrightarrow \begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n & = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n & = b_2 \\ \vdots & \vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \cdots + a_{mn}x_n & = b_m \end{cases}$$

ein Lineares Gleichungssystem mit Koeffizienten A , rechter Seite b und Unbekannten x .

Etwas allgemeiner mit $A \in \mathbb{K}^{m \times n}, B \in \mathbb{K}^{m \times r}, X \in \mathbb{K}^{n \times r}$.

Dann ist

$$A \cdot X = B \Leftrightarrow \begin{cases} A \cdot x_1 & = b_1 \\ \vdots & \vdots \\ A \cdot x_r & = b_r \end{cases}$$

ein System von Lineargleichungen mit Koeffizienten X , rechten Seiten B und Unbekannten X .

Im Fall $b = \vec{0}$ (bzw. $B = \vec{0}$) heißt das LGS homogen.

Bemerkung

Im Fall $Ax = b$ nennt man

- (a) $\mathbb{L}(A, b) := \{x \in \mathbb{K}^n : Ax = b\}$ die Lösungsmenge des LGS
- (b) $\text{Kern}(A) := \{x \in \mathbb{K}^n : A \cdot x = \vec{0}\}$ den Kern von A . Es gilt $\text{Kern}(A) = \mathbb{L}(A, \vec{0})$.
- (c) $\text{Im}(A) := \{y \in \mathbb{K}^m : \exists x \in \mathbb{K}^n \text{ mit } Ax = y\}$ das Bild von A .

8.5.2 Zusammenhang Kern und Lösung eines LGS

Sei $A \in \mathbb{K}^{m \times n}$, dann gilt

- (a) $\text{Kern}(A)$ ist Unterraum von \mathbb{K}^n
- (b) Ist $b \in \mathbb{K}^m$ und $x_0 \in \mathbb{K}^n$ eine Lösung von $Ax = b$, dann ist die Lösungsgesamtheit

$$x_0 + \text{Kern}(A) := \{x_0 + y : y \in \text{Kern}(A)\}$$

Bemerkung

Außerdem ist $\mathbb{L}(A, b)$ und $\text{Kern}(A) = \mathbb{L}(A, \vec{0})$ ein Unterraum von \mathbb{K}^n .

8.5.3 Definition Affiner Unterraum, lineare Mannigfaltigkeit

Ist x_0 ein Vektor und U ein Unterraum, dann ist

$$x_0 + U := \{x_0 + u : u \in U\}$$

ein affiner Unterraum und $\dim(x_0 + U) := \dim(U)$ die Dimension von $x_0 + U$.

8.5.4 Definition Zeilen-/Spaltenrang

Sei

$$A = (a_1, \dots, a_n) = \begin{pmatrix} \tilde{a}_1^T \\ \vdots \\ \tilde{a}_m^T \end{pmatrix}$$

. Dann heißt

- (a) $\dim(\text{span}(a_1, \dots, a_n))$ der Spaltenrang
- (b) $\dim(\text{span}(\tilde{a}_1, \dots, \tilde{a}_m))$ der Zeilenrang

Bemerkung

Also Spaltenrang $\hat{=}$ Anzahl der linear unabhängigen Spalten.

Und Zeilenrang $\hat{=}$ Anzahl der linear unabhängigen Zeilen.

8.5.5 Elementare Zeilen-/Stufenoperationen

Mittels elementarer Zeilen- bzw. Stufenoperationen kann man eine Matrix auf Zeilenstufenform bringen.

1. Vertauschen von Zeilen bzw. Spalten

Spalten-Operation:

$$A \cdot E = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 & 2 & 1 \\ 6 & 5 & 4 \\ 9 & 8 & 7 \end{pmatrix}$$

Zeilen-Operationen

$$E \cdot A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7 & 8 & 9 \\ 4 & 5 & 6 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}$$

2. Das α -fache der zweiten Zeile/Spalte zur ersten Zeile/Spalte addieren

Spalten-Operation:

$$A \cdot E = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \alpha & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1+2\alpha & 2 & 3 \\ 4+5\alpha & 5 & 6 \\ 7+8\alpha & 8 & 9 \end{pmatrix}$$

Zeilen-Operationen

$$E \cdot A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \alpha & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1+4\alpha & 2+5\alpha & 3+6\alpha \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{pmatrix}$$

3. Zeile/Spalte 2 mit α multiplizieren

Spalten-Operation:

$$A \cdot E = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2\alpha & 3 \\ 4 & 5\alpha & 6 \\ 7 & 8\alpha & 9 \end{pmatrix}$$

Zeilen-Operationen:

$$E \cdot A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4\alpha & 5\alpha & 6\alpha \\ 7 & 8 & 9 \end{pmatrix}$$

Formal bedeutet die Überführung von A in Zeilenstufenform \tilde{A} also:

- (a) mit elementaren Zeilenoperationen (Gauß) überführt ist $\tilde{A} = E_r \cdots E_1 \cdot A$ mit Elementarmatrizen E_1, \dots, E_r .
- (b) Mit elementaren Spaltenoperationen ist $\tilde{A} = A_1 \cdot E_1 \cdots E_s$ mit Elementarmatrizen E_1, \dots, E_s .

Bemerkung

Statt in Zeilenstufenform kann man A auch in die Form der Pseudo-Einheitsmatrix

$$\hat{I} = \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & 1 & \vec{0} & \\ & \vec{0} & \ddots & \\ & & & 0 \end{pmatrix} = \text{diag}(1, 1, \dots, 0, 0)$$

Man kann zeigen:

1. Wird eine Zeilenoperation durchgeführt ändert sich nicht der Zeilenrang
2. Wird eine Spaltenoperation durchgeführt ändert sich nicht der Spaltenrang

8.5.6 Beziehung Spalten-/Zeilenrang

Zeilen- und Spaltenrang sind gleich.

8.5.7 Definition Rang einer Matrix

Sei $A \in \mathbb{K}^{m \times n}$, dann ist der Rang von A definiert als der Zeilenrang von A und wir schreiben dafür:

$$\text{rg}(A) := \text{Zeilenrang}$$

8.5.8 Gauß-Algorithmus

Sei für $A \in \mathbb{K}^{m \times n}, b \in \mathbb{K}^m, x \in \mathbb{K}^n$ $Ax = b$ ein LGS mit gewissen elementaren Zeilenoperationen wird A in eine Zeilenstufenform \tilde{A} überführt ($\tilde{A} = E_r \cdots \cdots E_1 \cdot A$). Gleichzeitig werden diese auf b angewendet, wobei man ein \tilde{b} erhält ($\tilde{b} = E_r \cdots \cdots E_1 \cdot b$).

Dann gilt für x :

$$Ax = b \Leftrightarrow \tilde{A}x = \tilde{b}$$

8.5.9 Lösbarkeit eines LGS

Ein LGS $AX = b$ ist lösbar, genau dann wenn

$$\text{rg}(A) = \text{rg}(A|b)$$

gilt.

8.5.10 Lösung eines LGS

Falls ein LGS $Ax = b$ lösbar ist, dann ist $\mathbb{L}(A|b)$ ein affiner Unterraum und es gilt:

$$\dim(\mathbb{L}(A|b)) = n - \text{rg}(A)$$

Teil III

Beweisansätze

Kapitel 9

HM 1

9.1 Grenzwerte

9.1.1 Eindeutigkeit des Grenzwert einer Folge

Zeige, dass Grenzwert a = Grenzwert b , nahrhafte 0

9.1.2 Konvergente Folgen sind beschränkt

Nahrhafte 0, Dreiecks-ugl.

9.1.3 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)

9.1.4 Monotoniekriterium

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

9.1.5 Grenzwert einer konv. Folge = Grenzwert jeder Teilfolge

Def. Konvergenz + Def Teilfolge

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

Argumentiere über Eigenschaften \sup und \inf

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

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

9.1.8 Bolzano-Weierstraß

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

9.1.9 Cauchy Kriterium

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

9.1.10 Reihe konv. Folge ist Nullfolge

Cauchy für Reihen

9.1.11 GrenzwertRR für Reihen

GrenzwertRR für Folgen

9.1.12 Reihe konv g. 0

Restreihe als Differenz darstellen

9.1.13 Leibniz

Cauchy für Reihen

9.1.14 Absolut konv. \Rightarrow konv.

Cauchy und Dreiecks-ugl.

9.1.15 Majorantenkriterium

Cauchy

9.1.16 Minorantenkriterium

Kontradiktion von Majorantenkriterium

9.1.17 Wurzelkriterium

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

9.1.18 Quotientenkriterium

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

9.1.19 Hadamard

Wurzelkriterium+ Fallunterscheidung für Sonderfälle

9.1.20 Differenzieren / Integrieren von Potenzreihen

Wurzelkriterium

9.1.21 Lemma zu sin, cos und exp

Cauchy-Produkt + Definitionen

9.1.22 $e^z \neq 0$ und $e^{-z} = \frac{1}{e^z}$

Inverses Element der Multiplikation

9.1.23 Pythagoras

3. binomische Formel

9.1.24 $e^x > 0 \ \forall x \in \mathbb{R}$

Betrachte $x \geq 0$, angeordneter Körper

9.1.25 $1 + x \leq e^x \ \forall x \in \mathbb{R}$

Bernoulli

9.1.26 $x < y \Rightarrow e^x < e^y$

nährhafte 0

9.1.27 Folgenkriterium

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

9.1.28 Cauchy für Funktionen

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

9.1.29 Grenzwerte an Intervallgrenzen

Argumentiere über Supremum / Infimum

9.1.30 Verknüpfungen stetiger Funktionen stetig

Folgenkriterium

9.1.31 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

9.1.32 Umgebung pos. Funktionswerte

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

9.1.33 Zwischenwertsatz

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

9.1.34 Existenz \log

Zeigen \exp ist bijektiv (Zwischenwertsatz)

9.1.35 Beschränktheit stetiger Funktionen

Annahme f nicht beschränkt Folgenkriterium

9.1.36 Weierstraß existenz \min bzw. \max

Zeigen das $\sup = \max$

Kapitel 10

HM 2

10.1 Integration

10.1.1 Riemann integrierbar impliziert Beschränktheit

Betrachte Riemannsumme

10.1.2 Rechenregeln für Integrale (Verkettung usw.)

Betrachte Riemannsumme

10.1.3 Transitivität

Betrachte Riemannsumme

10.1.4 1. MWS der Integralrechnung

Benutze die Transitivität des Integrals und folgende Abschätzung:

$$\begin{aligned} m \cdot g(x) &\leq f(x)g(x) \leq M \cdot g(x) \\ \text{mit} \\ m &:= \inf_{[a,b]}(f) \\ M &:= \sup_{[a,b]}(f) \end{aligned}$$

10.1.5 Eine Stammfunktion einer Funktion ist stetig und differentierbar

Stetigkeit mit $\delta - \varepsilon$ -Kriterium nachrechnen und dabei die Beschränktheit von f ausnutzen

Differentierbarkeit mit Differenzenquotient prüfen (f muss stetig in x_0 sein)

10.1.6 Hauptsatz der DI

Schreibe $F(b) - F(a)$ als Teleskopsumme und nutze den 1. MWS aus HM1
Zweiter Teil folgt aus 10.1.5

10.1.7 Monotonie impliziert Riemann Integrierbarkeit

Betrachte Riemannsumme und nutze SWT (mithilfe der Randpunkte, die ξ einschließen)

10.1.8 2. MWS der Integralrechnung

Nur für den vereinfachten Fall ($f \in C^1[a, b], g \in C[a, b]$):

Definiere passende Stammfunktion für g . Löse das Integral $\int_a^b f(x)g(x)dx$ über partielle Integration. Weiterhin wird 10.1.4 benötigt.

10.1.9 Integralkriterium

Nutze folgende Abschätzung:

$$f(n) = \int_n^{n+1} f(t) dt \geq \int_n^{n+1} f(n) dt \geq \int_n^{n+1} f(n+1) dt = f(n+1)$$

und dann das Majorantenkriterium.

10.2 Gleichmäßige Konvergenz

10.2.1 Stetigkeit der Grenzfunktion

Zeige Stetigkeit mithilfe $\delta - \varepsilon$ -Kriterium durch einfügen von nahrhaften Nullen.
Und dann Dreiecksungleichungen.

10.3 Differentialrechnung mit mehreren Veränderlichen

10.3.1 Grenzwertrechenregeln

Verwende GWRR aus HM1, indem du die einzelnen Vektorkomponenten betrachtest.

10.3.2 Max/Min kompakter Mengen

- (a) Konstruiere eine Folge aus der Menge A , die gegen das Supremum von A konvergiert und zeige damit, dass das Supremum in A enthalten ist.

- (b) Ansatz: Zeige, dass eine konvergente Folge $(y_n)_{n=1}^\infty$ aus dem Bild B von f $B := f(A)$ beschränkt ist und gegen einen Wert in B konvergiert. Dazu nutzt du eine Folge $(x_n)_{n=1}^\infty \in A$ mit $f(x_n) = y_n$. Nutze nun die Stetigkeit von f .

10.3.3 Stetigkeit einer Funktion durch beschränkte partielle Ableitungen

Für $f : G \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ ist zu zeigen: $\left| \frac{\partial f}{\partial x_k} \right| \leq c_k \in \mathbb{R} \ \forall k \Rightarrow f \in C(G, \mathbb{R})$

Ansatz: Definition der Stetigkeit mit nahrhaften Nullen (verändere immer nur ein Argument aus f , sodass du den eindimensionalen Mittelwertsatz aus HM1 anwenden kannst).

10.3.4 Differentierbarkeit impliziert Stetigkeit

Betrachte $\lim_{x \rightarrow a} f(x)$ und setze die Definition für totale Differentierbarkeit ein.

10.3.5 Zusammenhang totale und partielle Diff'barkeit

Ist f total differentierbar und es ist zu zeigen: $\frac{\partial f(x)}{\partial r} = f'(x) \cdot r$ mit r eine Richtung.

Ansatz: Richtungsableitung mit Definition ausrechnen und dann die Definition der totalen Differentierbarkeit einsetzen. Betrachte also:

$$\left\| \frac{f(x + h \cdot r) - f(x)}{h} - J_f(x) \cdot r \right\|$$

Weiterhin ist zu zeigen, dass wenn alle partiellen Ableitungen von f stetig sind, f differentierbar ist. Dies haben wir nur für Skalarfelder gezeigt.

Ansatz: Schreibe $f(x) = f(a) + (f(x) - f(a))$ und gehe dann vor wie in 10.3.3.

10.3.6 Kettenregel

Setze in $g \circ f = g(f(x))$ die Definition der totalen Differentierbarkeit ein.

10.3.7 Notwendige Bedingung für Extrema

Definiere eine Hilfsfunktion $g(t) := f(x_0 + t(x - x_0))$ und argumentiere dann für lokale Extrema wie in HM1.

10.3.8 Mittelwertsatz

Hilfsfunktion $g(t) := f(a + t(b - a))$. Verwende den eindimensionale MWS.

10.3.9 Konstante Funktionen

Zeige: $f(x) \equiv \text{const} \Leftrightarrow \nabla f(x) = \vec{0} \forall x \in G$

Ansatz für Rückrichtung: Nutze die Punkte eines Polygonzuges vom Punkt a nach Punkt x und den MWS.

10.3.10 Taylor

Nutze die Hilfsfunktion $g(t) := f(a + t(b - a))$ und Taylor aus HM1.

10.3.11 Hinreichende Bedingung für Extrema

Nutze den Satz von Taylor.

10.3.12 Beweisidee für den Hauptsatz über implizite Funktionen

Laut Voraussetzung ist $g(x, y) \in C^1(G, \mathbb{R})$. Deswegen kann man g als näherungsweise linear annehmen (lokal betrachtet). Mit dieser Näherung lässt sich g einfach nach z.B. y auflösen.

10.3.13 Herleitung für die Ableitung der Auflösung

Hier für den Fall $g : G \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$. Nutze folgenden Ansatz:

$$\frac{d}{dx} g(x, f(x)) \stackrel{!}{=} 0$$

Diese Gleichung lässt sich einfach nach $f'(x)$ auflösen.

10.3.14 Satz von Lagrange

Nur für den vereinfachten Fall $f, g : G \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$

Da in unserem Fall $\nabla g(x_0, y_0) \neq 0$, existiert eine Auflösung a nach x oder y . Damit kannst du dir eine Hilfsfunktion $h(x) := f(x, a(x))$ definieren und diese auf Extremstellen untersuchen (wie in HM1).

10.4 Integration in mehreren Veränderlichen

10.4.1 Ableitung in Integral ziehen

Betrachte

$$F'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{F(x+h) - F(x)}{h}$$

sowie

$$F'(x) = \int_a^b f_x(x, t) dt$$

$F'(x)$ einsetzen, Integral in Grenzwert einsetzen, MWS, zeigen das Differenz im Grenzwert 0.

10.4.2 Fubini

Hilfsfunktion:

$$g(u) = \int_{\alpha}^{\beta} \int_a^b f(x, t) \, dt \, dx - \int_a^b \int_{\alpha}^{\beta} f(x, t) \, dx \, dt$$

zeigen dass $g'(u) \equiv 0$ und $g(x) = g(a) = 0$.

10.4.3 Leibniz Regel

Hilfsfunktion:

$$G(x, a, b) = \int_a^b f(x, t) \, dt$$

∇G berechnen, innere Ableitung.

10.4.4 Beweis-Idee Kurvenintegrale (Substitutionsregel)

Riemann Summe, Mittelwertsatz, Abschätzung für verschiedene ξ , da f stetig.

10.4.5 1. Hauptsatz für Kurvenintegrale

Kurvenintegral mit Parametrisierung, integrant als Ableitung darstellen.

10.4.6 Äquivalente Aussagen für Kurvenintegrale

Kurven kombinieren/aufteilen um aus mehreren Kurven eine geschlossene bzw. aus einer geschlossenen Kurven mehrer mit gleichem Anfangs-/Endpunkt zu erzeugen.

10.4.7 2. Hauptsatz für Kurvenintegrale

1. f stetig, $F \in C^2$, Satz von Schwarz

2. Nur für Sternförmiges Gebiet.

F als Integral von x_0 (Mittelpunkt von Sternförmigem Gebiet) zu x darstellen und Weg Parametrisieren.

Ableitung von F nach x_k berechnen, Skalarprodukt als Summe schreiben, Produktregel, Integrabilitätsbedingung anwenden, als Ableitung nach t darstellen.

10.4.8 Gauß'sche Integralsätze in der Ebene

1. Hilfsfunktion:

$$h(x, y) = \begin{pmatrix} -f_2(x, y) \\ f_1(x, y) \end{pmatrix}$$

zeigen dass $\iint \operatorname{div} h = - \iint \operatorname{rot} f$, Stokes anwenden, f durch h darstellen, Normalenvektor normieren, Linienintegral.

2. Hilfsfunktion:

$$h(x, y) = f_1(x, y) \nabla f_2(x, y) - f_2(x, y) \nabla f_1(x, y)$$

$\operatorname{div} h$ und $h\nu$ ausrechnen und Gleichheit über ersten Teil von Gauß.

Teil IV

Klausurvorbereitung

Hier findest du eine kurze Übersicht über alle Themen, die du für die jeweilige Klausur beherrschen solltest: Wichtige Definitionen und Beweise, die man gut in der Klausur abfragen kann, besonders trickreiche Aufgaben, die mehrmals in der Vorlesung oder in der Übung besprochen wurden und generelle Kompetenzen, die höchstwahrscheinlich von dir verlangt werden.

Kapitel 11

HM1

Kapitel 12

HM2

12.1 Integration

12.1.1 Wichtige Beweise

- 1. und 2. Mittelwertsatz der Integralrechnung
- Hauptsatz der Differential- und Integralrechnung

12.1.2 Typische Aufgaben

Berechne den GW von z.B. folgender Reihe (hast du also das Prinzip der Riemann-Summen verstanden?)

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=0}^n \sin \frac{k\pi}{n}$$

Untersuche Reihen auf Konvergenz (wende das Integralkriterium an)

$$\sum_{n=-m}^{\infty} \frac{1}{1+n^2} \quad (m \in \mathbb{N})$$

Oder diese hier (Tipp: Eulersche Gammafunktion)

$$\sum_{n=0}^{\infty} n^3 e^{-n^2}$$

Untersuche uneigentliche Integrale auf Konvergenz

12.1.3 Trickreiche Aufgaben

Schwierige uneigentliche Integrale. Konvergiert beispielsweise dieses Integral?
(Ja, tut es)

$$\int_1^{\infty} \frac{\sin x}{x} \, dx$$

12.1.4 Weitere hilfreiche Dinge

Schau dir uneigentliche Integrale an, die man gut als Majorante oder Minorante verwenden kann, z.B.:

$$\int_0^1 \frac{1}{x^\alpha} dx$$

12.2 Gleichmäßige Konvergenz

12.2.1 Wichtige Beweise

- Stetigkeit der Grenzfunktion
- Satz von Dini (ziemlich tricky, aber die Idee sollte man im Kopf haben)

12.2.2 Typische Aufgaben

Untersuche Reihen auf gleichmäßige Konvergenz, z.B.:

$$\sum_{k=0}^{\infty} x(1-x)^k, \quad \forall x \in [0, 1] \quad \text{bzw.} \quad \forall x \in [a, 1] \quad \text{mit} \quad 0 < a \leq 1$$

12.2.3 Trickreiche Aufgaben

Auf welchem Intervall konvergiert die Riemannsche Zeta-Funktion gleichmäßig?

$$\zeta(s) := \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^s}$$

12.3 Differentialrechnung mit mehreren Veränderlichen

12.3.1 Wichtige Beweise

- Beweise über z.B. die Vereinigung von beliebig vielen offenen Mengen
- Mehrdimensionaler Mittelwertsatz
- Notwendige Bedingung für Extrema
- Satz über konstante Funktionen
- Satz von Taylor
- Hinreichende Bedingung für Extrema
- Herleitung für die Ableitung der Auflösung (kann sehr hilfreich sein, wenn man die Formel vergessen hat)

12.3.2 Typische Aufgaben

Kannst du:

- dir Mengen vorstellen und zeichnen?
- Funktionsgrenzwerte berechnen?
- Funktionen auf Stetigkeit prüfen?
- partielle Ableitungen und Richtungsableitungen berechnen?
- Funktionen auf totale Diff'barkeit prüfen?
- Extremwerte von Funktionen finden und klassifizieren?
- mit Matrizen rechnen und Inverse bestimmen?
- prüfen, ob eine Funktion umkehrbar ist und die Umkehrung bestimmen?
- die Ableitung einer unbekannten Umkehrfunktion bestimmen?
- prüfen, ob eine Funktion nach einer / mehreren Variablen auflösbar ist und die Auflösung bestimmen?
- die Ableitung einer unbekannten Auflösung berechnen?
- Extrema unter Nebenbedingung bestimmen?

Teil V

Appendix

Kapitel 13

Grenzwerte

13.1 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 14

Integration

14.1 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	

Kapitel 15

Integration in mehreren Veränderlichen

15.1 Häufige Additionstheoreme

$$\begin{aligned}\sin^2(t) &= \frac{1}{2}(1 - \cos(2t)) \\ \cos^2(t) &= \frac{1}{2}(1 + \cos(2t)) \\ \sin(t) \cos(t) &= \frac{1}{2} \sin(2t)\end{aligned}$$

15.2 Integral-Shortcuts

$$\begin{aligned}
 \int_a^b \sin(t) \, dt &= \int_a^b \cos(t) \, dt = 0 \quad \text{Für eine volle Periode } [a, b] \subset \mathbb{R} \\
 \int_{k\pi}^{(k+1)\pi} \sin(t) \, dt &= \pm 2 \quad \forall k \in \mathbb{Z} \\
 \int_{k\pi}^{(k+1)\pi} \cos(t) \, dt &= 0 \quad \forall k \in \mathbb{Z} \\
 \int_{l\pi}^{(l+1)\pi} \cos(t) \, dt &= \pm 2 \quad \forall l \in \{x : x = k + \frac{1}{2}, k \in \mathbb{Z}\} \\
 \int_{l\pi}^{(l+1)\pi} \sin(t) \, dt &= 0 \quad \forall l \in \{x : x = k + \frac{1}{2}, k \in \mathbb{Z}\} \\
 \int_a^b \sin(t) \cos(t) \, dt &= 0 \quad \forall [a, b] \subseteq \mathbb{R} \text{ mit } a - b = k\pi, k \in \mathbb{Z} \\
 \int_a^b \sin^2(t) \, dt &= \frac{a-b}{2} \quad \forall [a, b] \subseteq \mathbb{R} \text{ mit } a - b = k\pi, k \in \mathbb{Z} \\
 \int_a^b \cos^2(t) \, dt &= \frac{a-b}{2} \quad \forall [a, b] \subseteq \mathbb{R} \text{ mit } a - b = k\pi, k \in \mathbb{Z}
 \end{aligned}$$