

# HM2 Kurzzusammenfassung

Florian Leuze

# Inhaltsverzeichnis

0.1	Versionierung . . . . .	5
<b>1</b>	<b>Allgemeines</b>	<b>6</b>
1.1	Trigonometrie . . . . .	6
1.1.1	Winkelfunktionen . . . . .	6
1.1.2	Sinussatz . . . . .	6
1.1.3	Cosinussatz . . . . .	6
1.1.4	Tangenssatz . . . . .	6
1.1.5	Umwandlung . . . . .	6
1.1.6	Additionstheoreme . . . . .	7
1.1.7	Folgerungen aus den Additionstheoremen . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Integralberechnung</b>	<b>7</b>
2.1	Unbestimmtes Integral . . . . .	7
2.2	Bestimmtes Integral . . . . .	7
2.3	Partielle Integration . . . . .	8
2.4	Integration durch Substitution . . . . .	8
2.4.1	Spezialfall . . . . .	8
2.5	Gerade/Ungerade Funktionen . . . . .	8
2.6	Allgemeines zur Integration . . . . .	8
2.6.1	Riemann Integrierbarkeit . . . . .	8
2.6.1.1	Riemannsches Unterintegral . . . . .	8
2.6.1.2	Riemannsches Oberintegral . . . . .	9
2.6.1.3	Riemannsche Untersumme . . . . .	9
2.6.1.4	Riemannsche Obersumme . . . . .	9
2.6.1.5	Eigenschaften . . . . .	9
2.6.1.6	Kriterien zur Riemann-Integrierbarkeit . . . . .	10
2.6.2	MWS der Integralrechnung . . . . .	10
2.6.3	Hauptsatz der Differential- und Integralrechnung . . . . .	11
2.6.3.1	Folgerungen . . . . .	11
2.7	Partialbruchzerlegung . . . . .	11
2.8	Uneigentliche Integrale . . . . .	12
2.8.1	Typen uneigentlicher Integrale . . . . .	12
2.9	Wichtige Integrale . . . . .	12
2.10	Separierbare DGL . . . . .	13
2.10.1	Wiederholung klassische DGL . . . . .	13
2.10.2	Lösen von DGL mit Koeffizienten die von t abhängig sind . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Lineare Algebra</b>	<b>15</b>
3.1	Definitionen . . . . .	15
3.1.1	Linearkombinationen . . . . .	15
3.1.2	Spann und Erzeugendensystem . . . . .	15
3.1.3	Lineare Unabhängigkeit . . . . .	15
3.1.4	Basis . . . . .	15
3.1.5	Kanonische Basis . . . . .	16

3.2	Vektorräume . . . . .	16
3.2.1	Definitionen . . . . .	16
3.2.1.1	$\mathbb{R}^d$ . . . . .	16
3.2.1.2	Vektoraddition . . . . .	16
3.2.1.3	Skalare Multiplikation . . . . .	16
3.2.1.4	Nullvektor . . . . .	16
3.2.2	Struktur . . . . .	17
3.2.3	Untervektorraum . . . . .	17
3.2.3.1	Untervektorraumkriterien . . . . .	17
3.2.3.2	Triviale UVR von $V$ . . . . .	18
3.2.3.3	Interessante Untervektorräume . . . . .	18
3.3	Erzeugendensystem, Basis, Dimension, Kern lineare Unabhängigkeit	18
3.3.1	Linearkombination, Spann . . . . .	18
3.3.2	Lineare Unabhängigkeit . . . . .	18
3.3.3	Dimension . . . . .	19
3.3.4	Kern . . . . .	19
3.3.5	Rang . . . . .	19
3.3.6	Basis . . . . .	19
3.3.6.1	Folgerungen . . . . .	19
3.3.6.2	Matrixdarstellung einer linearen Abbildung bezüglich zweier Basen . . . . .	20
3.4	Lösungsmengen linearer Gleichungssysteme . . . . .	20
3.4.1	Zeilenvektoren . . . . .	21
3.4.2	Gauss Algorithmus . . . . .	21
3.4.3	Gauss-Algorithmus: Spann . . . . .	21
3.4.4	Gauss-Algorithmus: Dimension, Rang . . . . .	21
3.4.5	Folgerungen . . . . .	22
3.5	Lineare Abbildungen und Matrizen . . . . .	22
3.5.1	Das Matrizenkalkül . . . . .	23
3.5.2	Rechenregeln . . . . .	23
3.5.3	Einheitsmatrix . . . . .	24
3.5.4	Inverse Matrix . . . . .	24
3.5.4.1	Bestimmung der Inversen bei $n \times n$ Matrizen . . . . .	24
3.5.4.2	Inverse bei $2 \times 2$ Matrizen . . . . .	24
3.5.5	Symmetrische Matrizen . . . . .	24
3.5.6	Schiefsymmetrische Matrizen . . . . .	24
3.5.7	Hermiteische Matrizen . . . . .	24
3.5.8	Transposition . . . . .	25
3.6	Determinanten . . . . .	25
3.6.1	Bestimmung der Determinanten . . . . .	25
3.6.1.1	Determinante einer $2 \times 2$ Matrix . . . . .	25
3.6.1.2	Determinante einer $3 \times 3$ Matrix . . . . .	25
3.6.1.3	Determinante einer Matrix $> 3 \times 3$ . . . . .	26
3.7	Eigenwerttheorie . . . . .	26
3.7.1	Bestimmung der Eigenwerte und Eigenvektoren . . . . .	26
3.7.2	Basis des Eigenraumes bestimmen . . . . .	27

3.7.3	Orthonormalbasis des Eigenraumes bestimmen (Gram Schmidt)	27
3.7.4	Projektion . . . . .	28
3.8	Differentialgleichungssysteme . . . . .	28
3.9	Quadriken bestimmen . . . . .	28
3.9.1	Methode . . . . .	28
3.9.2	Normalformen von Quadriken im $\mathbb{R}^2$ . . . . .	29
3.9.3	Normalformen von Quadriken im $\mathbb{R}^3$ . . . . .	30
3.10	Äquivalenzaussagen . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Mehrdimensionale Analysis</b>	<b>31</b>
4.1	Partielle Ableitung . . . . .	31
4.1.1	Gradient und Nabla Operator . . . . .	31
4.1.2	Jacobi Matrix . . . . .	31
4.2	Richtungsableitung . . . . .	32
4.3	Mehrdimensionale Kettenregel . . . . .	32
4.4	Wichtige Operatoren . . . . .	32
4.4.1	Divergenz . . . . .	32
4.4.2	Laplace-Operator . . . . .	33
4.4.3	Rotation . . . . .	33
4.5	Lemma von Schwarz . . . . .	33
4.6	Taylorscher Satz . . . . .	33
4.6.1	Wiederholung eindimensionaler Taylorscher Satz . . . . .	33
4.6.2	Mehrdimensionaler Mittelwertsatz . . . . .	33
4.6.3	Mehrdimensionaler Taylorscher Satz . . . . .	34
4.6.4	Wichtige 1-dim Reihen . . . . .	34
4.7	Mehrdimensionale Extremwertaufgaben . . . . .	35
4.7.1	Hesse Matrix . . . . .	35
4.7.2	Untersuchung nach Extremwerten . . . . .	36
<b>5</b>	<b>Literatur</b>	<b>37</b>

## 0.1 Versionierung

Datum	Vers.	Kürzel	Änderung
19.04.2018	0.1	FL	Erzeugung Dokument; Erzeugung Inhaltsverzeichnis; Erzeugung Versionierung; Erzeugung 2.1 - 2.7.4
19.04.2018	0.2	FL	Korrekturen 2.6.1 - 2.6.9 u. 2.7.1 - 2.7.2 Titel
20.04.2018	0.2.1	FL	Erzeugung 2.7.1.1 - 2.7.1.4; Korrektur Riemannsche Untersumme; Erzeugung Literaturverzeichnis
23.06.2018	0.2.3	FL	Neustrukturierung; Löschung HM1 Stoff; Erzeugung HM2 Stoff
23.06.2018	0.2.4	FL	Kleinere Korrekturen
27.06.2018	0.2.5	FL	Hinzugefügt: Bem. 2.8, 3.1, 3.2, 3.3, 3.8, 3.9.1 Schritt 5, 3.9.2 (Quadriken im $\mathbb{R}^2$ ; Korrekturen: 3.6.1.1 Fehler in Formel korrigiert, 3.6.1.3 Tippfehler korrigiert

# 1 Allgemeines

## 1.1 Trigonometrie

### 1.1.1 Winkelfunktionen

$$\sin(\alpha) = \frac{\text{Gegenkathete}}{\text{Hypothenuse}} \quad (1.1.1)$$

$$\cos(\alpha) = \frac{\text{Ankathete}}{\text{Hypothenuse}} \quad (1.1.2)$$

$$\tan(\alpha) = \frac{\text{Gegenkathete}}{\text{Ankathete}} \quad (1.1.3)$$

### 1.1.2 Sinussatz

$$\frac{a}{\sin\alpha} = \frac{b}{\sin\beta} = \frac{c}{\sin\gamma} = 2r = \frac{abc}{2F} \quad (1.1.4)$$

### 1.1.3 Cosinussatz

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bccos\alpha \quad (1.1.5)$$

$$b^2 = c^2 + a^2 - 2cacos\beta \quad (1.1.6)$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2abcos\gamma \quad (1.1.7)$$

### 1.1.4 Tangenssatz

$$\frac{b+c}{b-c} = \frac{\tan\left(\frac{\beta+\gamma}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\beta-\gamma}{2}\right)} = \frac{\cot\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\beta-\gamma}{2}\right)} \quad (1.1.8)$$

Analog für  $\frac{a+b}{a-b}$  und  $\frac{a+c}{a-c}$ .

### 1.1.5 Umwandlung

$$\tan\alpha = \frac{\sin\alpha}{\cos\alpha} \quad (1.1.9)$$

$$\sin^2(\alpha) + \cos^2(\alpha) = 1 \quad (1.1.10)$$

$$1 + \tan^2(\alpha) = \frac{1}{\cos^2(\alpha)} = \sec^2(\alpha) \quad (1.1.11)$$

$$1 + \cot^2(\alpha) = \frac{1}{\sin^2(\alpha)} = \csc^2(\alpha) \quad (1.1.12)$$

### 1.1.6 Additionstheoreme

$$\sin(x \pm y) = \sin(x)\cos(y) \pm \cos(x)\sin(y) \quad (1.1.13)$$

$$\cos(x \pm y) = \cos(x)\cos(y) \mp \sin(x)\sin(y) \quad (1.1.14)$$

$$\tan(x \pm y) = \frac{\tan(x) \pm \tan(y)}{1 \mp \tan(x)\tan(y)} = \frac{\sin(x \pm y)}{\cos(x \pm y)} \quad (1.1.15)$$

$$\tan(x \pm y) = \frac{\tan(x) \pm \tan(y)}{1 \mp \tan(x)\tan(y)} = \frac{\sin(x \pm y)}{\cos(x \pm y)} \quad (1.1.16)$$

$$\cot(x \pm y) = \frac{\cot(x)\cot(y) \mp 1}{\cot(y) \pm \cot(x)} = \frac{\cos(x \pm y)}{\sin(x \pm y)} \quad (1.1.17)$$

$$\cot(x \pm y) = \frac{\cot(x)\cot(y) \mp 1}{\cot(y) \pm \cot(x)} = \frac{\cos(x \pm y)}{\sin(x \pm y)} \quad (1.1.18)$$

$$\sin(x+y) \cdot \sin(x-y) = \cos^2(y) - \cos^2(x) = \sin^2(x) - \sin^2(y) \quad (1.1.19)$$

$$\cos(x+y) \cdot \cos(x-y) = \cos^2(y) - \sin^2(x) = \cos^2(x) - \sin^2(y) \quad (1.1.20)$$

### 1.1.7 Folgerungen aus den Additionstheoremen

$$\cos^2\left(\frac{x}{2}\right) + \sin^2\left(\frac{x}{2}\right) = \cos\left(\frac{x}{2}\right)\cos\left(\frac{x}{2}\right) + \sin\left(\frac{x}{2}\right)\sin\left(\frac{x}{2}\right) \quad (1.1.21)$$

$$\stackrel{(1.1.20)}{=} \cos\left(\frac{x}{2} - \frac{x}{2}\right) = \cos(0) = 1 \quad (1.1.22)$$

$$\cos\left(\frac{x}{2} - \frac{x}{2}\right) = \cos(0) = 1 \quad (1.1.23)$$

$$2\sin\left(\frac{x}{2}\right)\cos\left(\frac{x}{2}\right) = \sin\left(\frac{x}{2}\right)\cos\left(\frac{x}{2}\right) + \sin\left(\frac{x}{2}\right)\cos\left(\frac{x}{2}\right) \quad (1.1.24)$$

$$\stackrel{(1.1.20)}{=} \sin\left(\frac{x}{2} + \frac{x}{2}\right) = \sin(x) \quad (1.1.25)$$

$$\sin\left(\frac{x}{2} + \frac{x}{2}\right) = \sin(x) \quad (1.1.26)$$

$$\sin(2x) = \sin(x+x) \stackrel{(1.1.20)}{=} \sin(x)\cos(x) + \sin(x)\cos(x) \quad (1.1.27)$$

$$= 2\sin(x)\cos(x) \quad (1.1.28)$$

## 2 Integralberechnung

### 2.1 Unbestimmtes Integral

$$\int f(x)dx = F(x) + C = [F(x)] \quad , C \in \mathbb{R} \quad (2.1.1)$$

### 2.2 Bestimmtes Integral

$$\int_a^b f(x)dx = F(b) - F(a) \quad (2.2.1)$$

## 2.3 Partielle Integration

Entspricht der "Produktregel" der Differentialrechnung.

$$\int_a^b f'(x)g(x)dx = f(x)g(x)\Big|_a^b - \int_a^b f(x)g'(x)dx \quad (2.3.1)$$

Bietet sich zum Beispiel bei Produkten aus x-Potenz mit e-Funktionen, log, sin oder cos an.

## 2.4 Integration durch Substitution

Entspricht der "Kettenregel" der Differentialrechnung.

$$\int_a^b f(g(x))g'(x)dx = \int_{g(a)}^{g(b)} f(y)dy \quad (\text{setze } y = g(x)) \quad (2.4.1)$$

### 2.4.1 Spezialfall

$$\int \frac{f'(x)}{f(x)}dx = \ln(|f(x)|) + C \quad , C \in \mathbb{R} \quad (2.4.2)$$

## 2.5 Gerade/Ungerade Funktionen

$$\int_{-a}^a f(x)dx = \begin{cases} 2 \int_0^a f(x)dx & , f \text{ gerade} \\ 0 & , f \text{ ungerade} \end{cases} \quad (2.5.1)$$

$$\begin{array}{ll} f \text{ gerade, falls } f(-x) = f(x) & (z.B. : \cos(x), x^2) \\ f \text{ ungerade, falls } f(-x) = -f(x) & (z.B. : \sin(x), x^3) \end{array}$$

## 2.6 Allgemeines zur Integration

### 2.6.1 Riemann Integrierbarkeit

$f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  stetig bzw. monoton  
 $\Rightarrow f$  ist R-integrierbar.

#### 2.6.1.1 Riemannsches Unterintegral

$$\int_a^b f(x)dx = \sup\{U_f(Z) : Z \text{ Zerlegung von } [a, b]\} \quad (2.6.1)$$



### 2.6.1.2 Riemannsches Oberintegral

$$\int_{\bar{a}}^b f(x)dx = \inf\{O_f(Z) : Z \text{ Zerlegung von } [a, b]\} \quad (2.6.2)$$

→ f heißt Riemann-integrierbar über  $[a, b]$ , falls

$$\int_{\bar{a}}^b f(x)dx = \int_a^{\bar{b}} f(x)dx \quad (2.6.3)$$

In diesem Fall heißt der Wert das Riemannnn-Integral und wird mit  $\int_a^b f(x)dx$  bezeichnet.

### 2.6.1.3 Riemannsche Untersumme

$$U_f(Z) = \sum_{j=0}^{n-1} \inf_{\xi \in [x_j, X_{j+1}]} f(\xi) \cdot (x_{j+1} - x_j) \quad (2.6.4)$$

### 2.6.1.4 Riemannsche Obersumme

$$O_f(Z) = \sum_{j=0}^{n-1} \sup_{\xi \in [x_j, X_{j+1}]} f(\xi) \cdot (x_{j+1} - x_j) \quad (2.6.5)$$

### 2.6.1.5 Eigenschaften

a) Falls  $a < b$  setzen wir:

$$\begin{aligned} \int_b^a f(x)dx &= - \int_a^b f(x)dx \\ \int_a^a f(x)dx &= 0 \end{aligned} \quad (2.6.6)$$

b) f, g seien R-integrierbar,  $\lambda, \mu \in \mathbb{R} \rightarrow \lambda f + \mu g$  ist R-integrierbar (Vektorraum-eigenschaft).

$$\int_a^b \lambda f + \mu g(x)dx = \lambda \int_a^b f(x)dx + \mu \int_a^b g(x)dx \quad (2.6.7)$$

c)  $a < C < b$ , f ist R-integrierbar.

$$\int_a^b f(x)dx = \int_a^C f(x)dx + \int_C^b f(x)dx \quad (2.6.8)$$

d)

$$\begin{aligned} f(x) \geq 0 &\Rightarrow \int_a^b f(x)dx \geq 0 \\ f(x) \geq g(x) &\Rightarrow \int_a^b f(x)dx \geq \int_a^b g(x)dx \end{aligned} \quad (2.6.9)$$

e) Sind  $f$  und  $g$  R-integrierbar ist auch  $f * g$  R-integrierbar. (2.6.10)

f)

$$g(x) \geq C > 0 \Rightarrow \frac{f}{g} \text{ ist R-integrierbar.} \quad (2.6.11)$$

g) Ist  $f$  R-integrierbar dann ist auch  $|f|$  R-integrierbar. (2.6.12)

h)

$$(b-a) \inf_{x \in [a,b]} f(x) \leq \int_a^b f(x) dx \leq (b-a) \sup_{x \in [a,b]} f(x) \quad (2.6.13)$$

### 2.6.1.6 Kriterien zur Riemann-Integrierbarkeit

a)  $f$  monoton  $\Rightarrow f$  R-integrierbar.

b)  $f$  stetig  $\Rightarrow f$  R-integrierbar

**Satz 2.1.** „Jede stetige Funktion  $f : k \rightarrow \mathbb{R}$  auf einer kompakten Menge  $k$ , d.h. für  $k \subset \mathbb{R}^d$  abgeschlossen und beschränkt, ist dort gleichmäßig stetig und damit R-integrierbar.“ (Schneider 2018) Beispiel für  $k$ :  $k : [a, b]$

c)

**Satz 2.2.** Kriterium: Jede Funktion deren Unstetigkeitsstellen eine Nullmenge bilden (z.B. abzählbare Mengen) sind R-integrierbar. „Satz: Eine Funktion  $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  ist genau dann R-integrierbar, wenn  $f$  beschränkt ist und die Menge der Unstetigkeitsstellen eine Nullmenge ist.“ (Schneider 2018)

Die Konsequenz daraus lautet, dass jede stetige Funktion mit endlich vielen Sprungstellen R-integrierbar ist. (Vgl. Schneider 2018)

d)

**Satz 2.3.** „Sei  $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  beschränkt. Dann ist  $f$  R-integrierbar genau dann, wenn es zu jedem  $\varepsilon > 0$  eine Partition  $Z$  gibt, so dass  $O_f(Z)U_f(Z) < \varepsilon$ .“ (Schneider 2018)

Anmerkung: „In der Mengenlehre ist eine Partition (auch Zerlegung oder Klasseneinteilung) einer Menge  $M$  eine Menge  $P$ , deren Elemente nichtleere Teilmengen von  $M$  sind, sodass jedes Element von  $M$  in genau einem Element von  $P$  enthalten ist. Anders gesagt: Eine Partition einer Menge ist eine Zerlegung dieser Menge in nichtleere paarweise disjunkte Teilmengen.“ (Wikimedia-Foundation 2018)

### 2.6.2 MWS der Integralrechnung

$f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  stetig, dann  $\exists \xi \in [a, b]$  mit  $\int_a^b f(x) dx = f(\xi)(b-a)$ .

### 2.6.3 Hauptsatz der Differential- und Integralrechnung

$f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  stetig, dann ist  $F(x) = \int_a^x f(t)dt$  diffbar und  $F'(x) = f(x)$ .

#### 2.6.3.1 Folgerungen

**Satz 2.4.** *Ist  $f$  ungerade, so ist  $f''$  gerade, und alle Stammfunktionen von  $f$  sind gerade. (vgl. Gauss 2018)*

**Satz 2.5.** *Ist  $f$  gerade, so ist  $f'$  ungerade, und  $f$  besitzt eine ungerade Stammfunktion. (vgl. Gauss 2018)*

## 2.7 Partialbruchzerlegung

$$R(x) = \frac{p(x)}{q(x)}, \quad p, q \text{ Polynome} \quad (2.7.1)$$

Vorgehensweise:

- 1) Zähler und Nennergrad untersuchen  
ist  $\text{grad}(p) > \text{grad}(q)$ , also Zählergrad  $>$  Nennergrad umformen in  
 $R(x) = p_1(x) + \frac{p_2(x)}{q(x)} \Rightarrow$  Polynomdivision.
- 2) Nullstellen und faktorisieren
  - Nullstellen des Nenners bestimmen
  - Nenner Faktorisieren in  $p_1, p_2, \dots$
- 3) Ansatz
  - Ansatz für Partialbruchzerlegung  $R(x) = \frac{A}{p_1} + \frac{B}{p_2} + \dots$
  - Bestimmung von A, B, C, ...

Bei quadratischen oder höhergradigen Nullstellen lautet der Ansatz:

$$NST = x^n \Rightarrow R(x) = \frac{A}{x} + \frac{B}{x^2} + \dots + \frac{N}{x^n} \quad (2.7.2)$$

Bei komplexen Nullstellen muss der Ansatz angepasst werden.

$$\begin{aligned} NST &: 2, -2, 2i, -2i \\ \text{Ansatz} &: R(x) = \frac{A}{x-2} + \frac{B}{x+2} + \frac{Cx+D}{x^2+4} \end{aligned} \quad (2.7.3)$$

Es werden also die komplexen Nullstellen ausmultipliziert und so reell dargestellt.

## 2.8 Uneigentliche Integrale

**Satz 2.6.** Sei  $f : [a, \infty] := I \rightarrow \mathbb{R}$  lokal integrierbar. Konvergiert  $\int_a^\infty f(x)dx$  absolut, d.h. ist  $\int_a^\infty |f(x)|dx$  konvergent, so konvergiert auch  $\int_a^\infty f(x)dx$ .

**Satz 2.7.** Majorantenkriterium: Gilt für alle  $x \in I$ , dass  $|f(x)| \leq g(x)$ , und ist  $\int_a^\infty g(x)dx$  konvergent, so ist  $\int_a^\infty dx$  (im Script vom Prof ist hier die untere Grenze 0, ich denke es sollte aber a sein) absolut konvergent.

**Satz 2.8.** Minorantenkriterium: Gilt für alle  $x \in I$ , dass  $0 \leq g(x) \leq f(x)$  und divergiert  $\int_a^\infty g(x)dx$ , so divergiert auch  $\int_a^\infty dx$ .

**Bemerkung 2.1.** Abschätzungen mit negativen Minoranten sind falsch da mit einer negativen Minorante alles nach unten abgeschätzt werden kann.

### 2.8.1 Typen uneigentlicher Integrale

$$\begin{aligned} \text{Singularität: } & \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{x}} dx \\ \text{Unbeschränktes Gebiet: } & \int_1^\infty e^{-x} dx \end{aligned} \tag{2.8.1}$$

**Definition 2.9.** Eine Singularität ist die Stelle, an der die Funktion divergieren würde oder undefiniert wäre.

**Methode:** Ersetzen der kritischen Stelle durch  $z$  und setzen eines Grenzüberganges, z.B.:

$$\lim_{z \rightarrow 0} \int_z^1 \frac{1}{\sqrt{x}} dx, \quad \lim_{z \rightarrow \infty} \int_1^z e^{-x} dx$$

### Vergleichsintegrale

$$\begin{aligned} \int_1^\infty \frac{1}{x^\alpha} dx &= \begin{cases} \text{konvergiert} & , \alpha > 1 \\ \text{divergiert} & , \alpha \leq 1 \end{cases} \\ \int_0^1 \frac{1}{x^\alpha} dx &= \begin{cases} \text{divergiert} & , \alpha \geq 1 \\ \text{konvergiert} & , \alpha < 1 \end{cases} \end{aligned} \tag{2.8.2}$$

## 2.9 Wichtige Integrale

$$\int \frac{1}{1+y^2} dx = \arctan(y) \tag{2.9.1}$$

$$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1}, \quad n \neq -1 \tag{2.9.2}$$

$$\int \frac{1}{\cos^2(x)} dx = \tan(x) \quad (2.9.3)$$

$$\int \frac{1}{\sin^2(x)} dx = \cot(x) \quad (2.9.4)$$

$$\int a^x dx = \frac{a^x}{\ln(a)} \quad (2.9.5)$$

$$\int \frac{1}{x} dx = \ln|x| \quad (2.9.6)$$

$$\int \frac{1}{\cosh^2(x)} dx = \tanh(x) \quad (2.9.7)$$

$$\int \frac{1}{\sinh^2(x)} dx = -\coth(x) \quad (2.9.8)$$

$$\int \ln(x) dx = x \ln(x) - x \quad (2.9.9)$$

$$\int \frac{1}{x - x_1} dx = \ln|x - x_1| \quad (2.9.10)$$

$$\int \frac{1}{(x - x_1)^k} dx = \frac{1}{-k + 1} (x - x_1)^{-k+1}, \quad k > 1 \quad (2.9.11)$$

$$\int \frac{1}{(x - a)^2 + b^2} dx = \frac{1}{b^2} \int \frac{1}{\left(\frac{x-a}{b}\right)^2 + 1} dx = \frac{1}{b} \arctan\left(\frac{x-a}{b}\right) \quad (2.9.12)$$

## 2.10 Separierbare DGL

### 2.10.1 Wiederholung klassische DGL

Bisher: lineare DGL mit konstanten Koeffizienten.

z.B.:  $y''(t) - 5y'(t) + 4y(t) = e^{2t}$ ,  $y(0) = 1$ ,  $y'(0) = 1$

Homogene DGL:  $y(t) = e^{\lambda t} \Rightarrow p(\lambda) = \lambda^2 - 5\lambda + 4 = 0$   
 $\Rightarrow \lambda_1 = 1, \lambda_2 = 4$   
 $\Rightarrow y_h(t) = C_1 e^t + C_2 e^{4t}$ ,  $C_1, C_2 \in \mathbb{R}$

Inhomogenes DGL:  $\underbrace{yp(t) = re^{2t}}_{\text{da 2 keine NST}}$

$$\begin{aligned} \Rightarrow yp'(t) &= 2re^{2t}, \quad yp''(t) = 4re^{2t} \\ &\stackrel{DGL}{=} 4re^{2t} - 10re^{2t} + 4re^{2t} \stackrel{!}{=} e^{2t} \Rightarrow -2re^{2t} = e^{2t} \\ \Rightarrow r &= -\frac{1}{2} \end{aligned}$$

Allgemeine Lösung:  $y(t) = y_h(t) + yp(t) = C_1 e^t + C_2 e^{4t} - \frac{1}{2} e^{2t}$

**2.10.2 Lösen von DGL mit Koeffizienten die von t abhängig sind**

z.B.  $y'(t) - ty(t) = t$  ,  $y(0) = 1$

Spezielle Form:

$$y'(t) = f(t)g(y(t)) \quad , \quad y(t_0) = y_0 \quad (2.10.1)$$

$$\Rightarrow y'(t) = t + ty(t) = \underbrace{t}_{f(t)} \underbrace{g(y(t))}_{(1+y(t))}$$

Lösung: Trennung der Veränderlichen:

$$\frac{y'}{g(y)} = f(t) \xrightarrow{y' = \frac{dy}{dt}} \int \frac{1}{g(y)} dy = \int f(t) dt + C \quad , \quad C \in \mathbb{R} \quad (2.10.2)$$

$C$  erhält man aus der Anfangsbedingung  $y(t_0) = y_0$ .

## 3 Lineare Algebra

### 3.1 Definitionen

#### 3.1.1 Linearkombinationen

$V$  sei ein Vektorraum (im Folgenden VR),  $v_1, \dots, v_m \in V$ ,  $\lambda_i \in \mathbb{R}$ .

$$(1) \quad \sum_{i=1}^m \lambda_i v_i \quad \text{Linearkombinationen der } v_i. \quad (3.1.1)$$

#### 3.1.2 Spann und Erzeugendensystem

$$(2) \quad \text{span}(v_1, \dots, v_m) = \left\{ \sum_{i=1}^m \lambda_i v_i \mid \lambda_i, v_i \in \mathbb{R} \right\} \quad \text{Spann der } v_i.$$

Gilt  $\text{span}(v_1, \dots, v_m) = V \Rightarrow \{v_1, \dots, v_m\}$  ist ein Erzeugendensystem. (3.1.2)

**Bemerkung 3.1.** Es gilt:

$$\dim = \text{span} \Rightarrow EZS \quad (3.1.3)$$

#### 3.1.3 Lineare Unabhängigkeit

$$(3) \quad v_1, \dots, v_m \text{ linear unabhängig, falls}$$

$$\sum_{i=1}^m \lambda_i v_i = \vec{0} \Rightarrow \lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_m = 0$$

0 darf die einzige Lösung sein, sonst linear abhängig. (3.1.4)

**Bemerkung 3.2.** Es gilt:

$$\det A \neq 0 \Rightarrow \text{linear unabhängig} \quad (3.1.5)$$

#### 3.1.4 Basis

$$(4) \quad B = \{b_1, \dots, b_n\} \subset V \text{ ist Basis von } V, \text{ falls}$$

(B1)  $b_i$  linear unabhängig,  $i = 1, \dots, n$

(B2)  $B$  ist ein Erzeugendensystem. (3.1.6)

Es gilt:

$$(1) \quad \dim V = |B| \quad (\text{Mächtigkeit von } B)$$

$$(2) \quad \dim V = n \quad (\Rightarrow n + 1 \text{ Vektoren sind linear abhängig})$$

$$(3) \quad \forall v \in V : v = \sum_{i=1}^n \lambda_i b_i \text{ eindeutig darstellbar.}$$

$$\Rightarrow B^v = (\lambda_1, \dots, \lambda_n)^T \quad (\text{Koordinaten von } v \text{ bezüglich } B) \quad (3.1.7)$$

### 3.1.5 Kanonische Basis

$$e_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{pmatrix}, \quad e_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \dots, \quad e_d = \begin{pmatrix} 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.1.8)$$

## 3.2 Vektorräume

### 3.2.1 Definitionen

#### 3.2.1.1 $\mathbb{R}^d$

$$\mathbb{R}^d : v = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ v_d \end{pmatrix}, \quad w = \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ w_d \end{pmatrix} \quad (3.2.1)$$

#### 3.2.1.2 Vektoraddition

$$v + w = \begin{pmatrix} v_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ v_d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} w_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ w_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_1 + w_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ v_d + w_d \end{pmatrix} \quad (3.2.2)$$

#### 3.2.1.3 Skalare Multiplikation

$$\alpha \in \mathbb{R}, \quad v \in \mathbb{R}^d$$

$$\alpha \cdot v = \begin{pmatrix} \alpha \cdot v_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \alpha \cdot v_d \end{pmatrix} \quad (3.2.3)$$

#### 3.2.1.4 Nullvektor

$$\mathcal{O} = \begin{pmatrix} 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.2.4)$$



### 3.2.2 Struktur

Für  $v, w, z \in \mathbb{R}^d$  gelten die folgenden Eigenschaften:

$$\begin{aligned}
 (\mathbf{V1}) \quad & v + w = w + v \\
 (\mathbf{V2}) \quad & v + (w + z) = (v + w) + z \\
 (\mathbf{V3}) \quad & v + 0 = 0 + v = v \quad (0 \text{ ist das neutrale Element}) \\
 (\mathbf{V4}) \quad & v + (-v) = (-v) + v = 0 \quad (-v \text{ ist das inverse Element})
 \end{aligned}
 \tag{3.2.5}$$

Für  $\alpha, \beta \in \mathbb{R}, v, w \in \mathbb{R}^d$  gilt:

$$\begin{aligned}
 (\mathbf{S1}) \quad & 1 \cdot v = v \quad (1 \in \mathbb{R}) \\
 (\mathbf{S2}) \quad & \alpha(\beta v) = (\alpha\beta)v \\
 (\mathbf{S3}) \quad & (\alpha + \beta)v = \alpha \cdot v + \beta \cdot v \\
 (\mathbf{S4}) \quad & \alpha(v + w) = \alpha \cdot v + \alpha \cdot w
 \end{aligned}
 \tag{3.2.6}$$

(V1) – (V4) und (S1) – (S4) gelten auch für Funktionen.

**Definition 3.1.** Ist  $V$  eine Menge für deren Elemente eine Addition und eine skalare Multiplikation erklärt ist, so heißt sie Vektorraum, falls die Eigenschaften (V1) – (V4) und (S1) – (S4) erfüllt sind, wobei jetzt  $v, w, z \in V$ . Je nach Skalarkörper, also  $\mathbb{R}$  oder  $\mathbb{C}$  sprechen wir von einem reellen oder komplexen Vektorraum. Teilmengen von Vektorräumen, die ebenfalls Vektorräume sind, heißen Untervektorräume. (Schneider 2018)

### 3.2.3 Untervektorraum

$V$  sei ein Vektorraum und es gelte  $U \subset V$ .

**Definition 3.2.** Eigenschaften (V1) – (V4), (S1) – (S4) sind als Teilmenge von  $V$  erfüllt, aber mit  $u, v \in U$  und  $\alpha \in \mathbb{R}$  muss auch  $u + v \in U$ ,  $\alpha u \in U$  gelten (Abgeschlossenheit bezüglich Vektoraddition und skalarer Multiplikation). (Schneider 2018)

#### 3.2.3.1 Untervektorraumkriterien

$$\begin{aligned}
 (\mathbf{UV0}) \quad & 0 \in U \\
 (\mathbf{UV1}) \quad & u, v \in U \Rightarrow u + v \in U \\
 (\mathbf{UV2}) \quad & u \in U, \lambda \in \mathbb{R} \Rightarrow \lambda u \in U
 \end{aligned}
 \tag{3.2.7}$$

Es gilt:  $U_1, U_2$  UVR von  $V$

$$\begin{aligned}
 (1) \quad & U_1 \cap U_2 = \{v \in V : v \in U_1 \wedge v \in U_2\} \text{ UVR von } V \\
 (2) \quad & U_1 \cup U_2 = \{v \in V : v \in U_1 \vee v \in U_2\} \text{ kein UVR von } V
 \end{aligned}
 \tag{3.2.8}$$

### 3.2.3.2 Triviale UVR von V

$$\begin{aligned} U &= \{0\} \\ U &= V \end{aligned}$$

### 3.2.3.3 Interessante Untervektorräume

- Die Menge der stetigen Funktionen:  $([a, b], \mathbb{R})$
- Die Menge der n-mal stetig diffbaren Funktionen  $\mathbb{C}^n([a, b], \mathbb{R})$
- Die Menge der Riemann-integrierbaren Funktionen

## 3.3 Erzeugendensystem, Basis, Dimension, Kern lineare Unabhängigkeit

### 3.3.1 Linearkombination, Spann

**Definition 3.3.** Für  $v_1, \dots, v_m \in V$  (Vektorraum) und  $\lambda_j \in \mathbb{R}$  heißt ein Vektor der Form

$$v = \sum_{j=1}^m \lambda_j v_j \quad (3.3.1)$$

eine Linearkombination der Vektoren  $v_1, \dots, v_m$ . Die Menge aller Linearkombinationen heißt der Spann von  $v_1, \dots, v_m$ , d.h.

$$\text{Spann}(v_1, \dots, v_m) = \left\{ \sum_{j=1}^m \lambda_j v_j : \lambda_j \in \mathbb{R} \right\} \quad (3.3.2)$$

bzw. der von  $v_1, \dots, v_m$  aufgespannte Raum. (Schneider 2018)

Beispiel:

$$\begin{aligned} v_1 &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad v_2 = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad v_3 = \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}, \quad v_4 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \\ v_3 &= v_1 + v_2 \quad v_4 = v_2 - v_1 \\ \Rightarrow \text{Spann}(v_1, \dots, v_4) &= \{ \lambda_1 v_1 + \lambda_2 v_2 : \lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R} \} \end{aligned}$$

### 3.3.2 Lineare Unabhängigkeit

**Definition 3.4.** Die Vektoren  $v_1, \dots, v_m$  heißen linear unabhängig, falls aus

$$\sum_{j=1}^m \lambda_j v_j = \mathcal{O} \in V \quad (3.3.3)$$

bereits

$$\lambda_1 = \dots = \lambda_m = 0 \in \mathbb{R} \quad (3.3.4)$$

folgt.

### 3.3.3 Dimension

**Satz 3.5.** Für jede  $m \times n$  Matrix  $A$  gilt die Dimensionsformel:

$$\dim(\text{Kern}A) + \text{Rang}A = n \quad (3.3.5)$$

### 3.3.4 Kern

**Satz 3.6.** Die Lösungen von  $Ax = 0$  bilden einen Untervektorraum des  $\mathbb{R}^n$ , der sogenannte Kern von  $A$ , Schreibweise  $\text{Kern}A$ .

### 3.3.5 Rang

**Definition 3.7.** Die maximale Anzahl linearer Zeilenvektoren der Matrix  $A$  heißt der Rang von  $A$ .

### 3.3.6 Basis

**Definition 3.8.**  $B = \{v_1, \dots, v_m\} \subset V$  heißt eine Basis von  $V$ , falls  $B$  linear unabhängig und  $V = \text{spann}\{v_1, \dots, v_m\}$  ist.

**Satz 3.9.** „(Basen von endlich-dimensionalen Vektorräumen sind gleich groß). Sei  $V$  ein Vektorraum mit Basis  $\{v_1, \dots, v_m\}$ . Dann sind je  $n$  Vektoren  $w_1, \dots, w_n$  aus  $V$  mit  $n > m$  linear abhängig.“ (Schneider 2018)

#### 3.3.6.1 Folgerungen

**Definition 3.10.** „Ist  $\{v_1, \dots, v_m\}$  eine Basis des Vektorraums  $V$ , so lässt sich jeder Vektor  $v \in V$  eindeutig als Linearkombination der  $\{v_1, \dots, v_m\}$  schreiben, d.h.:

$$\exists x_k \text{ mit } v = \sum_{k=1}^m x_k v_k \quad (3.3.6)$$

“(Schneider 2018)

Mit  $x_k$  und  $v_k$  als Koordinaten bezüglich dieser Basis.

**Definition 3.11.** „Die Anzahl der Elemente einer Basis von  $V$  ist unabhängig von der speziellen Wahl der Basis. Die Anzahl der Elemente der Basis heißt die Dimension des Vektorraumes  $V$ .“ (Schneider 2018) Schreibweise:

$$\dim V = m \quad (3.3.7)$$

**Definition 3.12.** „Besitzt  $V$  eine Basis mit endlich vielen Elementen, so heißt  $V$  endlich dimensional, sonst heißt  $V$  unendlich dimensional.“ (Schneider 2018)

### 3.3.6.2 Matrixdarstellung einer linearen Abbildung bezüglich zweier Basen

Gegeben sei der Vektorraum  $\mathbb{R}^2$  mit der Basis  $C = c_1, c_2$  mit  $c_1 = (1, 1)^T$  und  $c_2 = (0, -2)^T$ , sowie der Vektorraum  $\mathbb{R}^3$  mit der Basis  $B$ . Die lineare Abbildung  $L : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$  sei gegeben durch

$$L \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2x_1 + x_2 \\ x_2 - x_3 \end{pmatrix}$$

Bestimmen Sie die Matrixdarstellung von  $L$  bezüglich der Basen  $B$  und  $C$ .

**Matrixdarstellung**  $m_L^{C,B}$

**1. Schritt:** Bilde die Basisvektoren von  $B$  mit der linearen Abb.  $L$  ab:

$$\begin{aligned} L \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix} \\ L \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix} \\ L \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

**2. Schritt:** Stelle die Bildvektoren als Linearkombination der Basiselemente von  $C$  dar:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix} &= 2 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 \\ -2 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix} &= 2 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} + 0 \begin{pmatrix} 0 \\ -2 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} &= 1 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 \\ -2 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

**3. Schritt:** Eintragen der Koeffizienten in eine Matrix:

$$m_L^{C,B} = \begin{pmatrix} 2 & 2 & 1 \\ \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad (3.3.8)$$

## 3.4 Lösungsmengen linearer Gleichungssysteme

$$\begin{pmatrix} a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + \dots + a_{mn}x_n = b_m \end{pmatrix} \rightarrow Ax = b \quad (3.4.1)$$

### 3.4.1 Zeilenvektoren

Die Koeffizienten der Zeilen nennt man Zeilenvektoren.

$$v_1 = \begin{pmatrix} a_{11} \\ \vdots \\ \vdots \\ a_{1n} \end{pmatrix}, \quad \dots, \quad v_m = \begin{pmatrix} a_{m1} \\ \vdots \\ \vdots \\ a_{mn} \end{pmatrix} \quad (3.4.2)$$

### 3.4.2 Gauss Algorithmus

Beim Gauss-Algorithmus werden Linearkombinationen der Zeilenvektoren gebildet. Das LGS hat nach der Anwendung folgende Form:

[illegible]

Die neuen Zeilenvektoren nach dem Gauss-Algorithmus sind:

$$\tilde{v}_1 = \begin{pmatrix} \tilde{a}_{11} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \tilde{a}_{1n} \end{pmatrix}, \quad \dots, \quad \tilde{v}_m = \begin{pmatrix} \tilde{a}_{m1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \tilde{a}_{mn} \end{pmatrix} \quad (3.4.4)$$

Da beim Gauss-Algorithmus nur Linearkombinationen verwendet werden bleibt der Spannn erhalten.

### 3.4.3 Gauss-Algorithmus: Spann

$$\text{span}\{v_1, \dots, v_m\} = \text{span}\{\tilde{v}_1, \dots, \tilde{v}_m\} \quad (3.4.5)$$

### 3.4.4 Gauss-Algorithmus: Dimension, Rang

Weiterhin gilt:

$$\dim\{span\{v_1, ..., v_m\}\} = \dim\{\tilde{v}_1, ..., \tilde{v}_m\} = r \quad (3.4.6)$$

$r$  heißt Zeilenrang von  $A$  bzw. der Rang von  $A$ .

### 3.4.5 Folgerungen

#### Satz 3.13.

a) „Die Lösungen von  $Ax = 0$  bilden einen Untervektorraum des  $\mathbb{R}^n$ , den sogenannten Kern von  $A$ .“ (Schneider 2018)

Schreibweise:

$$\text{Kern}(A) = \ker(A) = \text{kernel}(A) \quad (3.4.7)$$

b)

$$\underbrace{\dim\{\ker\{A\}\}}_{n-r} + \underbrace{\text{Rang}\{A\}}_r = n \quad (3.4.8)$$

c) „Ein LGS  $Ax = 0$  mit  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$  besitzt nur die Lösung  $x = 0$ , wenn  $\text{Rang}\{A\} = n$ .“ (Schneider 2018)

d) „Ist  $(w_1, \dots, w_k)$  eine Basis des Kerns, so lautet die allgemeine Lösung von  $Ax = 0$ :

$$x = \sum_{j=1}^k \alpha_j w_j \quad , \alpha_j \in \mathbb{R} \quad (\text{Superpositionsprinzip}) \quad (3.4.9)$$

“ (Schneider 2018)

e) „Ist  $x_s$  eine spezielle Lösung von  $Ax = b$ , so lautet die allgemeine Lösung von  $Ax = b$ :

$$x = x_s + \sum_{j=1}^k \alpha_j w_j \quad , \quad , \alpha_j \in \mathbb{R} \quad (3.4.10)$$

Die Lösungsmenge von  $Ax = b$  ist ein affiner Raum, d.h. die Differenz von jeweils zwei Elementen bildet einen Vektorraum.“ (Schneider 2018)

## 3.5 Lineare Abbildungen und Matrizen

**Definition 3.14.** „Es seien  $V$  und  $W$  Vektorräume. Eine Abbildung  $T : V \rightarrow W$  heißt linear, falls für alle  $u, v \in V$  und  $\lambda \in \mathbb{R}$  bzw.  $\mathbb{C}$

$$T(v + w) = T(v) + T(w) \quad (3.5.1)$$

$$T(\lambda v) = \lambda T(v) \quad (3.5.2)$$

gilt.“ (Schneider 2018)

Wie erhält man die Matrix zu einer linearen Abbildung?

„Sei  $T : V \rightarrow W$  eine lineare Abbildung.  $\{v_1, \dots, v_n\}$  sei eine Basis von  $V$  und  $\{w_1, \dots, w_m\}$  sei eine Basis von  $W$ . Dann lässt sich jeder Vektor  $T(v_j)$  in eindeutiger Weise als Linearkombination der  $w_1, \dots, w_m$  darstellen, d.h. es gibt  $a_{ij} \in \mathbb{R}$  mit

$$T(v_j) = \sum_{i=1}^m a_{ij} w_i. \quad (3.5.3)$$

$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}$  heißt die Matrix der linearen Abbildung  $T$  bezüglich der Basen  $\{v_1, \dots, v_n\}$  und  $\{w_1, \dots, w_m\}$ .“ (Schneider 2018)

**Satz 3.15.** „ Die Koordinaten von  $w = T(v)$  entstehen aus den Koordinaten von  $v$  durch Multiplikation mit der Matrix  $A$ .

$$\begin{aligned}
 w &= T(v) \\
 \text{mit } v &= \sum_{j=1}^n x_j v_j \text{ und } w = \sum_{i=1}^m y_i w_i \\
 \text{ergibt sich} \\
 \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.5.4}$$

bzw.  $y = Ax$ . “(Schneider 2018)

### 3.5.1 Das Matrizenkalkül

Matrizenmultiplikation tritt bei der Hintereinanderausführung linearer Abbildungen auf.

$$T(v) = Av, \quad S(w) = Bw \rightarrow (SoT)(v) = \underbrace{BA}_{\text{Matrizen}} \underbrace{v}_{\text{Vektoren}} \tag{3.5.5}$$

Der Eintrag in der  $i$ -ten Zeile und  $j$ -ten Spalte von  $BA$  sieht wie folgt aus:

$$a_{ij} = \sum_k b_{ik} a_{kj} \tag{3.5.6}$$

Damit Matrizen multipliziert werden können, müssen sie die richtige Größe haben.

$$\text{Mit } A \in \mathbb{R}^{m \times n} \text{ und } B \in \mathbb{R}^{n \times k} = C \in \mathbb{R}^{m \times k} \tag{3.5.7}$$

Matrizenmultiplikation ist im allgemeinen

- nicht kommutativ, d.h.  $AB \neq BA$
- nicht nullteilerfrei

### 3.5.2 Rechenregeln

$$\begin{aligned}
 \text{(M1)} \quad & (A + B)C = AC + BC \\
 \text{(M2)} \quad & A(B + C) = AB + AC \\
 \text{(M3)} \quad & A(BC) = (AB)C \\
 \text{(M4)} \quad & A(\lambda B) = (\lambda A)B = \lambda(AB)
 \end{aligned} \tag{3.5.8}$$

**Bemerkung 3.3.** Es gilt weiterhin:

$$S^{-1}AS = D \tag{3.5.9}$$

$$A^n = SD^n S^{-1} \tag{3.5.10}$$

$$\tag{3.5.11}$$

### 3.5.3 Einheitsmatrix

Die Einheitsmatrix (Identität) Besteht nur aus in der Diagonale Einsen, alle anderen Stellen sind mit Nullen aufgefüllt.

$$I = id = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.5.12)$$

Die Einträge an i-ter Zeile und j-ter Spalte sind über das Kronecker-Delta beschrieben.

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (3.5.13)$$

### 3.5.4 Inverse Matrix

Es gilt

$$A^{-1} = A \quad (3.5.14)$$

#### 3.5.4.1 Bestimmung der Inversen bei $n \times n$ Matrizen

$\Rightarrow$  Gauss Algorithmus angewandt auf  $A|I$  bis  $A$  zu  $I$  umgeformt ist.

#### 3.5.4.2 Inverse bei $2 \times 2$ Matrizen

$$\text{Mit } A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}, A^{-1} = \frac{1}{\det A} \begin{pmatrix} d & -b \\ -c & a \end{pmatrix} = \frac{1}{ad - bc} \begin{pmatrix} d & -b \\ -c & a \end{pmatrix} \quad (3.5.15)$$

### 3.5.5 Symmetrische Matrizen

**Definition 3.16.** Eine reelle  $n \times n$  Matrix  $A$  heißt symmetrisch, falls  $A = A^T$ .

### 3.5.6 Schiefsymmetrische Matrizen

**Definition 3.17.** Eine Matrix  $A$  heißt schiefsymmetrisch, falls  $A^T = -A$ .

**Bemerkung 3.4.**  $\det A = 0$ , falls  $n$  gerade

**Bemerkung 3.5.**  $x^T A x = 0$  für alle  $x \in \mathbb{R}^n$

### 3.5.7 Hermitesche Matrizen

**Definition 3.18.**  $A^* := \bar{A}^T$

Eine komplexe  $n \times n$  Matrix  $A$  heißt hermitesch, falls  $A = \bar{A}^T$ .



### 3.5.8 Transposition

Die Transposition besitzt folgende Eigenschaften

$$\begin{aligned}
 (\mathbf{T1}) \quad & (A + B)^T = A^T + B^T \\
 (\mathbf{T2}) \quad & (\lambda A)^T = \lambda A^T \\
 (\mathbf{T3}) \quad & (A^T)^T = A \\
 (\mathbf{T4}) \quad & (AB)^T = B^T A^T \\
 (\mathbf{T5}) \quad & (A^T)^{-1} = (A^{-1})^T
 \end{aligned} \tag{3.5.16}$$

## 3.6 Determinanten

**Satz 3.19.** *Determinantenentwicklungssatz:*

$$\det(AB) = \det A \cdot \det B$$

**Bemerkung 3.6.** *Aussagen zu Determinante einer Matrix  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$*

$$\det(A) \neq 0 \leftrightarrow \text{Rang}(A) = n \leftrightarrow A^{-1} \text{ existiert}$$

$$\det(A) = 0 \leftrightarrow \text{Zeilen bzw. Spalten linear unabhängig}$$

$$\det(A^T) = \det(A)$$

$$\det(A^{-1}) = \frac{1}{\det(A)}$$

$$\det(\lambda A) = \lambda^n \det(A)$$

$$\det(A + B) \neq \det(A) + \det(B)$$

$$\det A = \prod_j \lambda_j$$

### 3.6.1 Bestimmung der Determinanten

#### 3.6.1.1 Determinante einer 2x2 Matrix

$$A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}, \quad \det A = ad - bc \tag{3.6.1}$$

#### 3.6.1.2 Determinante einer 3x3 Matrix

Die Determinante wird über die Sarrussche Regel bestimmt:

$$\begin{aligned}
 \det A &= \begin{vmatrix} A_{aa} & A_{ab} & A_{ac} \\ A_{ba} & A_{bb} & A_{bc} \\ A_{ca} & A_{cb} & A_{cc} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_{aa} & A_{ab} & A_{ac} \\ A_{ba} & A_{bb} & A_{bc} \\ A_{ca} & A_{cb} & A_{cc} \end{vmatrix} \\
 &\Rightarrow \det A = A_{aa}A_{bb}A_{cc} + A_{ab}A_{bc}A_{ca} + A_{ac}A_{ba}A_{cb} \\
 &\quad - A_{ca}A_{bb}A_{ac} - A_{cb}A_{bc}A_{aa} - A_{cc}A_{ba}A_{ab}
 \end{aligned} \tag{3.6.2}$$

### 3.6.1.3 Determinante einer Matrix $> 3 \times 3$

**Satz 3.20.** *Determinantenentwicklungssatz: Für  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$  bezeichne  $A_{ik}$  die aus  $A$  durch Streichung der  $i$ -ten Zeile und  $k$ -ten Spalte entstehende Matrix. Dann gilt:*

$$\det A = \sum_{k=1}^n (-1)^{i+k} a_{ik} \det A_{ik}$$

wobei  $i$  fest gewählt wird.

Es bietet sich hierbei an  $i$  so zu wählen, dass möglichst viele Teile der Entwicklung sich durch eine 0 löschen.

$$\begin{aligned} \det \begin{pmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 3 & 4 & 5 \\ 5 & 6 & 7 \end{pmatrix} &= a_{11} \det(A_{11})(-1)^{1+1} + a_{12} \det(A_{12})(-1)^{1+2} + a_{13} \det(A_{13})(-1)^{1+3} \\ &= 1 \cdot \begin{vmatrix} 4 & 5 \\ 6 & 7 \end{vmatrix} - 2 \cdot \begin{vmatrix} 3 & 5 \\ 5 & 7 \end{vmatrix} + 2 \cdot \begin{vmatrix} 3 & 4 \\ 5 & 6 \end{vmatrix} \\ &= 1(-2) - 2(-4) + 2(-2) = 2 \end{aligned}$$

## 3.7 Eigenwerttheorie

**Definition 3.21.** *Eine Zahl  $\lambda \in \mathbb{C}$  heißt Eigenwert (EW) der Matrix  $A$ , falls es einen Vektor  $v \in \mathbb{C}^n$  gibt mit  $Av = \lambda v$  und  $v \neq 0$ .  $v$  heißt ein zum Eigenwert  $\lambda$  gehöriger Eigenvektor (EV). Die Menge aller Eigenvektoren eines Eigenwertes  $\lambda$  zusammen mit 0 heißt der Eigenraum.*

$$E_\lambda = \{v \in \mathbb{C}^n \mid Av = \lambda v\} \quad (3.7.1)$$

**Satz 3.22.**  $\lambda \in \mathbb{C}$  ist ein EW von  $A$  genau dann, wenn

$$p_A(\lambda) = \det(A - \lambda I) = 0 \quad (3.7.2)$$

### 3.7.1 Bestimmung der Eigenwerte und Eigenvektoren

**Schritt 1:** (3.7.2) anwenden und NST bestimmen. Es gilt

$$\text{Vielfachheit der NST} = \text{algebraische Vielfachheit; Schreibweise :} \quad (3.7.3)$$

$$a(\lambda_j) = x \in \mathbb{R} \quad (3.7.4)$$

**Schritt 2:** Eigenvektoren zur Matrix  $A$  bestimmen. Es gilt:

$$Av = \lambda_j v \Rightarrow (A - \lambda_j I)v = 0 \quad (3.7.5)$$

**Schritt 2.1:** Gegebenenfalls geometrische Vielfachheiten ablesen (Anzahl an Nullzeilen), es gilt:

$$\text{geometrische Vielfachheit} := g(\lambda_j) = \dim(A_{\lambda_j}) = n - \text{Rang}(A - \lambda I) \quad (3.7.6)$$

**Bemerkung 3.7.** *Die Anzahl an Eigenvektoren pro Eigenwert müssen der geometrischen Vielfachheit entsprechen. Die Eigenvektoren pro Eigenwert müssen linear unabhängig sein.*

### 3.7.2 Basis des Eigenraumes bestimmen

Die Eigenvektoren bilden eine Basis des Eigenraumes. Es gilt:

$$S_1 = (v_1, v_2, \dots, v_j) \quad (3.7.7)$$

**Satz 3.23.** Sei  $A \in \mathbb{C}^{n \times n}$  eine hermitesche Matrix (siehe (3.18)). Dann gilt:

- Die Eigenwerte von  $A$  sind reell
- Die Eigenvektoren zu verschiedenen Eigenwerten sind orthogonal zueinander

### 3.7.3 Orthonormalbasis des Eigenraumes bestimmen (Gram Schmidt)

Im Folgenden sei davon ausgegangen, dass die Eigenvektoren nicht orthogonal zueinander stehen. Im Falle bereits orthogonaler Eigenvektoren kann auf die Orthogonalisierung verzichtet werden (nicht jedoch auf die Normierung). Es seien  $v_1, v_2, v_3$  Eigenvektoren von  $A$ .

**Schritt 1:** Ersten Eigenvektor normieren

$$w_1 = \frac{v_1}{\|v_1\|}$$

**Schritt 2:** Zweiten Eigenvektor orthogonalisieren

$$\tilde{w}_2 = v_2 - \langle w_1, v_2 \rangle w_1$$

**Schritt 3:** Zweiten Eigenvektor normieren

$$w_2 = \frac{\tilde{w}_2}{\|\tilde{w}_2\|}$$

**Schritt 4:** Dritten Eigenvektor orthonormieren

$$\begin{aligned} \tilde{w}_3 &= v_3 - \langle w_2, v_3 \rangle w_2 - \langle w_1, v_3 \rangle w_1 \\ w_3 &= \frac{\tilde{w}_3}{\|\tilde{w}_3\|} \end{aligned} \quad (3.7.8)$$

Das Verfahren kann auf beliebig viele Eigenvektoren erweitert werden. Die so erhaltenen Vektoren bilden eine Orthonormalbasis des Eigenraums:

$$S_2 = (w_1, w_2, w_3) \quad (3.7.9)$$

Weiter gilt:

$$S_2 S_2^T = I, \quad \text{da } S_2 \text{ orthogonal ist} \quad (3.7.10)$$

und

$$D := \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix} = S_2^T A S_2 \quad (3.7.11)$$

und somit

$$A^{-1} = (S_2 D S_2^T)^{-1} = (S_2^{-1})^{-1} D^{-1} S_2^{-1} = S_2 D^{-1} S_2^T \quad (3.7.12)$$

### 3.7.4 Projektion

**Bemerkung 3.8.** Projektion von  $x$  auf  $w$ :

$$P(x) = \sum_{i=1}^m \langle v_i, x \rangle v_i \quad (3.7.13)$$

## 3.8 Differentialgleichungssysteme

**Schritt 1:** Überführung in Matrixdarstellung

**Schritt 2:** Eigenwerte und Eigenvektoren bestimme (siehe (3.7))

**Schritt 3:** Allgemeine Lösung bilden:

$$x(t) = Sy(t) = (v_1, \dots, v_n) \begin{pmatrix} C_1 e^{\lambda_1 t} \\ \vdots \\ C_n e^{\lambda_n t} \end{pmatrix} = C_1 e^{\lambda_1 t} + \dots + C_n e^{\lambda_n t}$$

**Schritt 4:** Anfangsbedingungen (z.B.  $x^* = 0$ ) einsetzen und bestimmen

$$S := (v_1, \dots, v_n)$$

$$x(0) = Sy(x^*) = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{pmatrix} = x^*$$

## 3.9 Quadriken bestimmen

### 3.9.1 Methode

**Schritt 1:** Diagonalmatrix  $A$ , Vektor  $b$  und Konstante  $c$  ablesen

**Beispiel:**

$$-1x_1^2 - 1x_2^2 + 1x_3^2 + 6x_1x_2 + 2x_1x_3 + 2x_2x_3 - 12x_1 + 4x_2 - 10x_3 - 11 = 0$$

$$A = \begin{pmatrix} -1 & 3 & 1 \\ 3 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}, b = \begin{pmatrix} -12 \\ 4 \\ -10 \end{pmatrix}, c = 11$$

Im Zuge der Vorlesung gilt immer  $A = A^T$ .

**Schritt 1.1:** Als Quadrik aufschreiben

$$\begin{aligned} q(x) &= x^T A x + b^T x + c \\ &= \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} -1 & 3 & 1 \\ 3 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -12 \\ 4 \\ -10 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} + 11 \end{aligned}$$

**Schritt 2:** Diagonalmatrix  $\Lambda$  bestimmen

Dazu nach (3.7.6) Eigenwerte und Eigenvektoren bestimmen, nach (3.7.8) eine Orthonormalmatrix mit den Eigenvektoren erzeugen und schließlich nach (3.7.11) die Diagonalmatrix  $\Lambda$  bilden.

**Schritt 3:** Vektor  $\tilde{b}$  bestimmen sodass gilt  $q(Sy) = y^T \Lambda y + \tilde{b}^T y + c$ :

$$\begin{aligned} q(Sy) &= (Sy)^T A Sy + \tilde{b}^T Sy + c = y^T S^T A Sy + (S^T \tilde{b})^T y + c \\ &= y^T \Lambda y + \tilde{b}^T y + c \Rightarrow \tilde{b} := S^T b \end{aligned}$$

**Schritt 4:** In  $q(Sy) = y^T \Lambda y + \tilde{b}^T y + c$  einsetzen:

$$\begin{aligned} q(Sy) &= y^T \Lambda y + \tilde{b}^T y + c \\ &= \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \tilde{b}_1 \\ \tilde{b}_2 \\ \tilde{b}_3 \end{pmatrix}^T y + c \end{aligned}$$

**Schritt 5:** Ausmultiplizieren und quadratisch ergänzen

Hierbei ist wichtig, dass die quadratischen Anteile ohne Faktor in das Binom übergehen (also vorher ausklammern).

**Schritt 6:** Quadrik anhand nachfolgender Tabellen ablesen

### 3.9.2 Normalformen von Quadriken im $\mathbb{R}^2$

$$\text{Ellipse} \quad : \quad \left(\frac{x_1}{a}\right)^2 + \left(\frac{x_2}{b}\right)^2 - 1 = 0 \quad (3.9.1)$$

$$\text{Kreis} \quad : \quad x_1^2 + x_2^2 = r \quad (3.9.2)$$

$$\begin{array}{l} \text{Schneidendes} \\ \text{Geradenpaar} \end{array} \quad : \quad \frac{x_1^2}{a^2} - \frac{x_2^2}{b^2} = 0 \quad (3.9.3)$$

**3.9.3 Normalformen von Quadriken im  $\mathbb{R}^3$** 

$$\text{Ellipsoid} \quad : \quad x^2 + y^2 + z^2 - 1 = 0 \quad (3.9.4)$$

$$\begin{array}{l} \text{Einschaliges} \\ \text{Hyperboloid} \end{array} \quad : \quad x^2 + y^2 - z^2 - 1 = 0 \quad (3.9.5)$$

$$\begin{array}{l} \text{Zweischaliges} \\ \text{Hyperboloid} \end{array} \quad : \quad x^2 + y^2 - z^2 + 1 = 0 \quad (3.9.6)$$

$$\begin{array}{l} \text{Elliptisches} \\ \text{Paraboloid} \end{array} \quad : \quad x^2 + y^2 - 2z = 0 \quad (3.9.7)$$

$$\begin{array}{l} \text{Hyperbolisches} \\ \text{Paraboloid} \end{array} \quad : \quad x^2 - y^2 - 2z = 0 \quad (3.9.8)$$

**3.10 Äquivalenzaussagen**

**Satz 3.24.** Für  $A \in \mathbb{R}^{d \times d}$  sind folgende Aussagen äquivalent

- a)  $A$  ist regulär
- b) Rang von  $A$  ist gleich  $d$
- c) Die Zeilenvektoren von  $A$  sind linear unabhängig
- d)  $Ax = 0$  hat nur  $x = 0$  als Lösung
- e)  $Ax = b$  ist eindeutig lösbar
- f) Die Spaltenvektoren sind linear unabhängig
- g) Die Matrix besitzt eine Inverse  $A^{-1}$
- h) Die Determinante von  $A$  ist ungleich 0
- i)  $A$  besitzt keinen Eigenwert 0

## 4 Mehrdimensionale Analysis

### 4.1 Partielle Ableitung

**Definition 4.1.**  $f(x)$  heißt in  $x^* \in \mathbb{R}^d$  nach der  $j$ -ten Koordinate  $x_j$  partiell diffbar, falls der Grenzwert

$$\frac{\partial f}{\partial x_j}(x^*) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(x^* + te_j) - f(x^*)}{t} \quad (4.1.1)$$

existiert bzw. falls  $\tilde{f}_j(x_j)$  in  $x_j$  diffbar ist.  $\frac{\partial f}{\partial x_j}(x^*)$  heißt die partielle Ableitung von  $f$ .

**Bemerkung 4.1.** Alternative Schreibweisen:

$$\frac{\partial f}{\partial x_j} = \frac{\text{partial}}{\partial x_j} f = \partial_{x_j} f = D_j f = f_{x_j} = \dots \quad (4.1.2)$$

**Definition 4.2.** Allgemein:  $n$ -te partielle Ableitung:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x_k \partial x_j} = \frac{\partial f}{\partial x_k} \left( \frac{\partial f}{\partial x_j} \right) \quad (4.1.3)$$

#### 4.1.1 Gradient und Nabla Operator

**Definition 4.3.** Der Zeilenvektor

$$\text{grad } f(x^*) = \left( \frac{\partial f}{\partial x_1}(x^*), \dots, \frac{\partial f}{\partial x_d}(x^*) \right) \quad (4.1.4)$$

heißt der Gradient von  $f$  in  $x^*$ . Es gilt weiter:

$$\nabla f(x^*) = (\text{grad } f(x^*))^T \quad (4.1.5)$$

Der eingeführte Operator heißt Nabla-Operator.

**Bemerkung 4.2.** Es gilt weiterhin:

$$\text{grad}(\alpha f + \beta g) = \alpha \text{grad } f + \beta \text{grad } g, \quad \alpha, \beta \in \mathbb{R} \quad (4.1.6)$$

$$\text{grad}(f \cdot g) = f \cdot \text{grad } g + g \cdot \text{grad } f \quad (4.1.7)$$

#### 4.1.2 Jacobi Matrix

**Definition 4.4.** Die Matrix der ersten Ableitung heißt die Jacobi Matrix.

$$Jf = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_d} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_m}{\partial x_d} \end{pmatrix} \quad (4.1.8)$$

## 4.2 Richtungsableitung

**Definition 4.5.** Sei  $f : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ . Für  $x^* \in \mathbb{R}^d$  und  $v \in \mathbb{R}^d_{/\{0\}}$  heißt

$$D_v f(x^*) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(x^* + tv) - f(x^*)}{t} \quad (4.2.1)$$

die Richtungsableitung von  $f$  in  $x^*$  in Richtung  $v$ . (Andere Schreibweise:  $\frac{\partial f}{\partial v}$ )

Wenn alle Ableitungen existieren gilt:

$$D_v f = \text{grad } f \cdot v \quad (4.2.2)$$

**Bemerkung 4.3.** Der Gradient zeigt dabei selbst in Richtung des steilsten Anstiegs.

**Satz 4.6.** Ist  $f : D \rightarrow \mathbb{R}$  mit  $D \subset \mathbb{R}^d$  offen in einer Umgebung von  $x^* \in D$  partiell diffbar und sind die partiellen Ableitungen dort beschränkt, dann ist  $f$  stetig in  $x^*$ .

**Satz 4.7.** Existieren in einer Umgebung von  $x^*$  alle partiellen Ableitungen und sind dann stetig in  $x^*$ , so ist  $f$  diffbar in  $x^*$ . Allgemein gilt, existieren alle partiellen Ableitungen bis zur Ordnung  $k$  und sind diese stetig, so ist  $f \in C^k$ , d.h.  $k$ -fach stetig diffbar.

**Bemerkung 4.4.** Folgerung: Alle Polynome, alle  $\sin$ ,  $\cos$ ,  $\exp$ , ... Funktionen sind mehrdimensional diffbar.

**Bemerkung 4.5.** Ist  $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$  in einer Umgebung  $U$  von  $x^*$  partiell diffbar und sind diese in  $x^*$  stetig, so ist  $f$  diffbar in  $x^*$ .

## 4.3 Mehrdimensionale Kettenregel

**Satz 4.8.** Sei  $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  und  $g : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^d$ . Sei  $f$  in  $x^*$  diffbar und  $g$  in  $y^* = f(x^*)$  diffbar. Dann ist  $g \circ f$  in  $x^*$  diffbar mit Jacobimatrix.

$$J(g \circ f)(x^*) = Jg(f(x^*)) \cdot Jf(x^*) \quad (4.3.1)$$

Somit gilt für  $h(x) = g(f(x))$ , dass

$$\frac{\partial z_{\mathbf{k}}}{\partial x_{\mathbf{j}}} = \sum_{\mathbf{i}} \frac{\partial z_{\mathbf{k}}}{\partial y_{\mathbf{i}}} \cdot \frac{\partial y_{\mathbf{i}}}{\partial x_{\mathbf{j}}} \quad (4.3.2)$$

## 4.4 Wichtige Operatoren

### 4.4.1 Divergenz

$$\begin{aligned} f : \mathbb{R}^d &\rightarrow \mathbb{R}^d, f = (f_1, \dots, f_d), x = (x_1, \dots, x_d) \\ \text{div } f &= \sum_{j=1}^d \frac{\partial f_j}{\partial x_j} = \frac{\partial f_1}{\partial x_1} + \frac{\partial f_2}{\partial x_2} + \dots + \frac{\partial f_d}{\partial x_d} \end{aligned} \quad (4.4.1)$$

**Bemerkung 4.6.** Die Divergenz ist die Spur der Jacobimatrix, also die Summe der Diagonalelemente.



### 4.4.2 Laplace-Operator

$$\begin{aligned} \varphi : \mathbb{R}^d &\rightarrow \mathbb{R} \\ \Delta\varphi = \nabla\nabla\varphi &= \sum_{j=1}^d \frac{\text{diff}^2\varphi}{\partial x_j^2} = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x_1^2} + \dots + \frac{\partial^2\varphi}{\partial x_d^2} \end{aligned} \quad (4.4.2)$$

**Bemerkung 4.7.** Der Laplace Operator bildet die Spur der Hesse Matrix.

### 4.4.3 Rotation

$$\begin{aligned} f : \mathbb{R}^3 &\rightarrow \mathbb{R}^3 \\ \text{rot } f &= \begin{pmatrix} \frac{\partial f_3}{\partial x_2} - \frac{\partial f_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial f_1}{\partial x_3} - \frac{\partial f_3}{\partial x_1} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} - \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4.4.3)$$

**Bemerkung 4.8.** Die Bestandteile der Rotation sind die Nebendiagonalelemente der Jacobimatrix. Die Rotation gibt an wie „schief“ die Jacobimatrix ist.

## 4.5 Lemma von Schwarz

**Satz 4.9.** Sei  $f : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$  eine  $C^2$ -Funktion, so gilt für alle  $i, j \in \{1, \dots, d\}$ :

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} = \frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i} \quad (4.5.1)$$

**Bemerkung 4.9.** Allgemein: Ist  $f \in C^k$ , dann ist die Reihenfolge des Differenzierens bis zur  $k$ -ten Ordnung egal.

## 4.6 Taylorscher Satz

### 4.6.1 Wiederholung eindimensionaler Taylorscher Satz

$$T(f, x, x^*) = \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(x^*)}{k!} (x - x^*)^k \quad (4.6.1)$$

### 4.6.2 Mehrdimensionaler Mittelwertsatz

**Satz 4.10.** Sei  $f : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$  (hier wichtig:  $\mathbb{R}$ , nicht  $\mathbb{R}^m$ ,  $m \geq 2$ ) diffbar. Dann gibt es ein  $\Theta \in (0, 1)$  mit

$$f(b) - f(a) = \underbrace{\text{grad } f(a + \Theta(b - a))}_{\in \mathbb{R}^d} \underbrace{(b - a)}_{\in \mathbb{R}^d} \quad (4.6.2)$$

**Bemerkung 4.10.** Der MWS gilt nicht für vektorwertige Funktionen.

### 4.6.3 Mehrdimensionaler Taylorscher Satz

**Definition 4.11.** *Offen: Um jeden Punkt  $x \in D$  lässt sich eine Kugel in  $D$  legen mit  $r < 0$ .*

**Definition 4.12.** *Konvex: Zu  $x, y \in D$  ist auch die Verbindungsstrecke in  $D$ .*

**Satz 4.13.** *Sei  $f : D \rightarrow \mathbb{R}$  eine  $C^{m+1}$  Funktion auf einer offenen und konvexen Menge  $D \in \mathbb{R}^d$  und  $x^* \in D$ . Dann gilt:*

$$f(x) = Tm(x, x^*) + Rm(x, x^*) \quad (4.6.3)$$

mit

$$Tm(x, x^*) = \sum_{j=0}^m \sum_{j_1+j_2+\dots+j_d=j} \frac{1}{j_1!j_2!\dots j_d!} (x_1 - x_1^*)^{j_1} \dots (x_d - x_d^*)^{j_d} \frac{\partial^m f(x^*)}{\partial x_1^{j_1} \dots \partial x_d^{j_d}} \quad (4.6.4)$$

und

$$Rm(x, x^*) = \sum_{j_1+j_2+\dots+j_d=m+1} \frac{1}{j_1!j_2!\dots j_d!} (x_1 - x_1^*)^{j_1} \dots (x_d - x_d^*)^{j_d} \frac{\partial^m f(x^*)}{\partial x_1^{j_1} \dots \partial x_d^{j_d}} (x^* + \Theta(x - x^*)) \quad (4.6.5)$$

**Bemerkung 4.11.** *Taylorpolynome sind lokal die beste Approximation.*

$$T1(x, x^*) = f(x^*) + \frac{\partial f}{\partial x_1}(x^*)(x_1 - x_1^*) + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_d}(x^*)(x_d - x_d^*) \quad (4.6.6)$$

ist die Tangentialebene an  $x^*$ .

**Bemerkung 4.12.** *Zum Berechnen der Taylorpolynome ist es oft einfacher bekannte 1-dim Taylorpolynome bzw. Taylorreihe zu verwenden. Es gilt dann:*

$$Tm(f, x, x^*) = T_a(f_a, x, x^*) \cdot \dots \cdot T_d(f_d, x, x^*) \quad (4.6.7)$$

Wobei auch mehrere Dimensionen mit einer 1-dim Reihe substituiert werden können.

### 4.6.4 Wichtige 1-dim Reihen

- Exponentialreihe:

$$e^x = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^k}{k!} \quad \forall x \in \mathbb{R} \quad (4.6.8)$$

- Geometrische Reihe

$$\frac{1}{1-q} = \sum_{k=0}^{\infty} q^k \quad |q| < 1 \quad (4.6.9)$$

- Sinusreihe

$$\sin(y) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k y^{2k+1}}{(2k+1)!} = y - \frac{1}{3!}y^3 + \frac{1}{5!}y^5 + \dots \quad (4.6.10)$$

- Cosinusreihe

$$\cos(y) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k y^{2k}}{(2k)!} = 1 - \frac{1}{2}y^2 + \frac{1}{4!}y^4 + \dots \quad (4.6.11)$$

## 4.7 Mehrdimensionale Extremwertaufgaben

Im Folgenden sei  $f : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ .

**Satz 4.14.** *Besitzt  $f = f(x)$  in einem Punkt  $x^*$  ein lokales Extremum (d.h. Minimum oder Maximum), so gilt*

$$\nabla f(x^*) = 0 \quad (4.7.1)$$

**Bemerkung 4.13.**  $\nabla f(x^*) = 0$  liefert häufig keine Extrema sondern Sattelpunkte (je höher die Raumdimension desto wahrscheinlicher, dass kein Extrema vorliegt).

$f$  um  $x^*$  lässt sich besser verstehen in dem man das Taylorpolynom 2. Grades um  $x^*$  betrachtet. Dieses lässt sich mit Hilfe der Hesse-Matrix folgendermaßen formulieren:

$$T2(x, x^*) = f(x^*) + \nabla f(x^*)^T(x - x^*) + \frac{1}{2}(x - x^*)^T Hf(x^*)(x - x^*) \quad (4.7.2)$$

### 4.7.1 Hesse Matrix

Die Hesse Matrix ist die Matrix der zweiten Ableitung.

$$Hf(x^*) = J(Jf(x^*)) = f''(x^*) = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_1} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_d} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_d \partial x_1} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_d \partial x_d} \end{pmatrix} \quad (4.7.3)$$

**Bemerkung 4.14.** *Die Hesse Matrix ist symmetrisch. Daher besitzt sie reelle Eigenwerte und kann durch eine orthogonale Transformation diagonalisiert werden.*

**Bemerkung 4.15.**

$$\forall \lambda_j > 0 \Rightarrow \text{Minimum}$$

$$\forall \lambda_j < 0 \Rightarrow \text{Maximum}$$

$$\exists \lambda_j \text{ und } \lambda_i \text{ mit unterschiedliche Vorzeichen} \Rightarrow \text{Sattelpunkt}$$

Umkehrung:

$$\text{Minimum} \Rightarrow \forall \lambda_j |\lambda_j| \geq 0$$

$$\text{Maximum} \Rightarrow \forall \lambda_j |\lambda_j| \leq 0$$

$$(4.7.4)$$

**Satz 4.15.** Sei  $f \in C^2$  mit  $\nabla f(x^*) = 0$  ( $x^*$  ist ein kritischer Punkt).

- a) Ist  $x^*$  ein lokales Minimum, so ist  $Hf(x^*)$  positiv semidefinit, d.h. es gilt  $v^T Hf(x^*) v \geq 0 \quad \forall v \in \mathbb{R}^d$ .
- b) Ist  $x^*$  ein lokales Maximum, so ist  $Hf(x^*)$  negativ semidefinit, d.h. es gilt  $v^T Hf(x^*) v \leq 0 \quad \forall v \in \mathbb{R}^d$ .
- c) Ist  $Hf(x^*)$  positiv definit, d.h. es gilt  $v^T Hf(x^*) v > 0 \quad \forall v \in \mathbb{R}_{\setminus\{0\}}^d$ , so ist  $x^*$  ein Minimum.
- d) Ist  $Hf(x^*)$  negativ definit, d.h. es gilt  $v^T Hf(x^*) v < 0 \quad \forall v \in \mathbb{R}_{\setminus\{0\}}^d$ , so ist  $x^*$  ein Maximum.

**Bemerkung 4.16.** Für  $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$  ist die Hessematrix eine  $2 \times 2$  Matrix.

$$\Rightarrow \text{spur } Hf = \lambda_1 + \lambda_2, \quad \det Hf = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \quad (4.7.5)$$

**Satz 4.16.** Hurwitz Kriterium für  $2 \times 2$  Matrizen: Sei  $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R} \in \mathbb{C}^2$ ,  $x^*$  sei ein kritischer Punkt von  $f$  und sei  $\det Hf(x^*) > 0$ , dann gilt:

$$\begin{aligned} \partial_{x_1}^2 f(x^*) > 0 &\Rightarrow \text{lokales Minimum} \\ \partial_{x_1}^2 f(x^*) < 0 &\Rightarrow \text{lokales Maximum} \end{aligned} \quad (4.7.6)$$

#### 4.7.2 Untersuchung nach Extremwerten

**Schritt 1:** Gradient und Hesse Matrix von  $f$  bestimmen:

$$\nabla f(x) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x_1}(x) \\ \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial x_d}(x^*) \end{pmatrix}, \quad Hf(x) = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_1} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_d} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_d \partial x_1} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_d \partial x_d} \end{pmatrix}$$

**Schritt 2:** Kritische(n) Punkt(e) bestimmen

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

**Schritt 3:** Kritische Punkte in Hessematrix einsetzen und auswerten

Abhängig der Dimension der Matrix (4.7.6), (4.15) oder (4.7.4) anwenden.

## 5 Literatur

Gauss, N. (2018), ‘Hm2 vortragsuebung’. Vorlesungsuebung.

Schneider, P. D. G. (2018), ‘Hm1-2 script’. Vorlesungsscript.

Wikimedia-Foundation (2018), ‘Partition (mengenlehre)’, [https://de.wikipedia.org/wiki/Partition\\_\(Mengenlehre\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Partition_(Mengenlehre)). Accessed: 2018-04-20.