

Mathe LK Rh

Tim D.

MSS 2017-20

# Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>11/1</b>	<b>5</b>
<b>1</b>	<b>Terme, Gleichungen, Ungleichungen</b>	<b>6</b>
1.1	Pascalsches Dreieck . . . . .	6
1.2	pq-Formel . . . . .	6
1.3	abc-Formel . . . . .	7
1.4	Satz von Vieta . . . . .	7
1.5	Binomischer Lehrsatz . . . . .	8
1.6	Gleichungen und Ungleichungen . . . . .	8
1.6.1	Gleichung lösen durch Substitution . . . . .	8
1.7	Potenzen, Wurzeln und Logarithmen . . . . .	9
1.7.1	Potenz- und Wurzelgesetze . . . . .	9
1.7.2	Logarithmengesetze . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Funktion - Relation - Zahlenfolge</b>	<b>11</b>
2.1	Zahlenfolgen . . . . .	11
2.2	Monotonie, Beschränktheit . . . . .	13
2.3	Grenzwert einer Zahlenfolge/Funktion . . . . .	15
2.3.1	Grenzwerte . . . . .	17
2.3.2	Grenzwerte von Funktionen: $\lim_{x \rightarrow \infty}$ ; $\lim_{x \rightarrow a}$ . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Analysis</b>	<b>23</b>
3.1	Abschnittsweise definierte Funktionen - Stetigkeit . . . . .	23
3.2	Stetigkeit einer Funktion an der Stelle $x_0$ . . . . .	25
3.3	Polynomdivision . . . . .	27
3.4	Punktprobe . . . . .	27
3.5	Mittlere Änderungsrate . . . . .	28
3.6	Tangentensteigung, Ableitung . . . . .	30
3.6.1	Vom Differenzenquotienten zum Differentialquotienten . . . . .	30
3.6.2	Ableitung . . . . .	31
3.7	Sekanten-, Tangenten-, Normalengleichung . . . . .	32
3.8	Ableitungsfunktion . . . . .	35

3.9	Nullstellen . . . . .	40
3.9.1	Mehrfache Nullstellen . . . . .	41
3.10	Hoch-, Tief- und Sattelpunkte . . . . .	45
3.11	2. Ableitungsfunktion . . . . .	48
3.12	Wendepunkte . . . . .	49
3.13	Nullstellen: Polynomdivision . . . . .	56
3.14	Verhalten für $x \rightarrow \pm\infty$ . . . . .	61
3.15	Symmetrie . . . . .	61
3.16	Kurvendiskussion . . . . .	63
3.17	Tangente und Anwendungen . . . . .	68
3.17.1	Allgemeine Tangentengleichung - Herleitung . . . . .	68
<b>II</b>	<b>11/2</b>	<b>72</b>
3.18	Optimieren unter Nebenbedingungen . . . . .	73
3.19	Numerisches Verfahren zur Nullstellenbestimmung . . . . .	77
3.19.1	Anwendungen des Newton-Verfahrens . . . . .	79
3.20	AB Kurvenuntersuchungen . . . . .	86
3.20.1	Ortslinie . . . . .	88
3.21	Wiederholung . . . . .	91
3.22	Sinus- und Kosinusfunktion . . . . .	92
3.22.1	Vielfachheit der Lösungen von (geniometrischen) Gleichungen . . . . .	92
3.22.2	Die allgemeine Sinusfunktion . . . . .	94
3.22.3	AB Die Funktionen $f: x \mapsto a \cdot \sin(b(x - c))$ und ihre Graphen . . . . .	95
3.22.4	Ableitung der Sinusfunktion . . . . .	96
3.23	Neue Funktionen aus alten Funktionen . . . . .	100
3.23.1	Ableitungsregeln . . . . .	100
3.24	Exponentialfunktionen - Ableitung . . . . .	107
3.24.1	Basis $\neq e$ . . . . .	110
3.25	Wiederholung . . . . .	115
3.25.1	Sinusfunktionen und Newton-Verfahren . . . . .	115
3.25.2	Produktregel . . . . .	116
3.25.3	Quotientenregel . . . . .	117
3.25.4	Kurvendiskussion . . . . .	118
3.26	Lineare Gleichungssysteme (LGS) . . . . .	121
3.26.1	Gauß-Verfahren . . . . .	122
3.26.2	Matrix-Schreibweise . . . . .	124
3.26.3	Steckbriefaufgaben . . . . .	125
3.26.4	Funktionenschar . . . . .	128

<b>4</b>	<b>Integralrechnung</b>	<b>132</b>
4.1	Untersumme - Obersumme . . . . .	133
4.1.1	Obersumme/Untersumme $\rightarrow \lim \rightarrow$ Integral . . . . .	135
4.2	Das bestimmte Integral . . . . .	136
4.3	Berechnung von Integralen, Hauptsatz . . . . .	137
4.3.1	Verallgemeinerung (Hauptsatz der Differenzial- und Integralrechnung) . . . . .	137
4.4	Integrale lösen - Anwendung . . . . .	138
<b>III</b>	<b>12/1</b>	<b>141</b>
4.5	Stammfunktion bilden, integrieren . . . . .	142
4.6	bestimmtes Integral, Integralfunktion, unbestimmtes Integral . . .	142
4.6.1	Integralfunktion . . . . .	144
4.7	Rechenregeln für Integrale . . . . .	144
4.8	Ableitung der Umkehrfunktion . . . . .	147
4.9	Integral und Flächeninhalt . . . . .	149
4.9.1	Flächeninhalt, uneigentliche Integrale . . . . .	151
4.10	Integration von Produkten: partielle Integration . . . . .	155
4.11	Integration durch Substitution . . . . .	158
4.11.1	Wiederholung . . . . .	162
4.12	Rotationskörper . . . . .	164
4.12.1	Bestimmung des Volumens von Rotationskörpern . . . . .	164
<b>5</b>	<b>Analytische Geometrie</b>	<b>168</b>
5.1	Punkte und Vektoren . . . . .	168
5.1.1	Darstellung im 3-dimensionalen Koordinatensystem . . . . .	168
5.2	Ortsvektoren und Verschiebungsvektoren . . . . .	170
5.2.1	Addition, Subtraktion und Multiplikation mit einer Zahl . . .	170
5.2.2	Vektorzüge und Linearkombinationen . . . . .	175
5.3	Geraden in $\mathbb{R}^3$ . . . . .	178
5.3.1	Kollinearität . . . . .	183
5.3.2	Lage zweier Geraden . . . . .	183
5.3.3	Parameterpunkte und -geraden . . . . .	188
5.4	Abstand zweier Punkte, Vektorlänge, Streckenlänge . . . . .	189
5.4.1	Einheitsvektor . . . . .	191
5.5	Produkte zweier Vektoren . . . . .	194
5.5.1	Skalarprodukt . . . . .	194
5.6	Vektorräume . . . . .	203
5.6.1	Basis . . . . .	205
5.7	Lineare Abhängigkeit, Unabhängigkeit . . . . .	207

5.8	Wiederholung: Geometrie, Geraden . . . . .	210
5.9	Parametergleichung einer Ebene . . . . .	212
5.10	Sonderfälle . . . . .	214
5.11	Kreuzprodukt . . . . .	215
5.12	Spatprodukt . . . . .	218
5.13	Abstand eines Punktes von einer Geraden . . . . .	219
5.14	Ebenendarstellung . . . . .	220
5.14.1	Normalenform . . . . .	220
5.14.2	Koordinatenform . . . . .	222
5.14.3	Ebenen zeichnen . . . . .	224
5.15	Lage Ebene $\leftrightarrow$ Gerade . . . . .	227
5.15.1	Schnittwinkel . . . . .	231

Teil I

11/1

# Kapitel 1

## Terme, Gleichungen, Ungleichungen

### 1.1 Pascalsches Dreieck

$n = 0:$																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											</
----------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	----

### 1.2 pq-Formel

$$x^2 + px + q = 0$$

$$x_{1/2} = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 - q}$$

## 1.3 abc-Formel

$$ax^2 + bx + c = 0$$

$$x_{1/2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

## 1.4 Satz von Vieta

$$0 = x^2 + px + q$$

pq-Formel:

$$x_{1/2} = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\underbrace{\left(\frac{p}{2}\right)^2 - q}_{\text{Diskriminante}}}$$

\*Diskriminante:

$> 0 \Rightarrow$  zwei Lösungen

$= 0 \Rightarrow$  eine Lösung

$< 0 \Rightarrow$  keine Lösung

$$x_1 + x_2 = -\frac{p}{2} + \sqrt{\dots} - \frac{p}{2} - \sqrt{\dots} = -p$$

$$x_1 \cdot x_2 = \left(-\frac{p}{2} + \sqrt{\dots}\right)\left(-\frac{p}{2} - \sqrt{\dots}\right) = \frac{p^2}{4} - \frac{p^2}{4} + q = q$$

$$\Rightarrow x_1 + x_2 = -p \quad x_1 \cdot x_2 = q$$

$$\begin{aligned} 0 &= x^2 + px + q = (x - x_1)(x - x_2) \\ &= x^2 + (-x_1 - x_2)x + x_1 \cdot x_2 \end{aligned}$$

**Beispiel**

$$\frac{1}{9}x^2 - \frac{2}{3}x - 8 = \frac{1}{9}\left(x^2 \underbrace{-6}_{x_1+x_2} x \underbrace{-72}_{x_1 \cdot x_2}\right)$$

$$x_1 = 12; \quad x_2 = -6$$

$$0 = \frac{1}{9} \underbrace{(x - 12)(x + 6)}_{\text{Linearfaktoren}}$$



## 1.5 Binomischer Lehrsatz

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

### Beispiele

$$n = 2$$

$$(a + b)^2 = \underbrace{\sum_{k=0}^2 \binom{2}{k} \cdot a^{2-k} \cdot b^k}$$

Drei Summanden:  $k = 0$ ;  $k = 1$ ;  $k = 2$

$$\begin{aligned} &= \underbrace{\binom{5}{0} a^2}_{k=0} + \underbrace{\binom{5}{1} ab}_{k=1} + \underbrace{\binom{5}{2} b^2}_{k=2} \\ &= 1 \cdot a^2 + 2 \cdot ab + 1 \cdot b^2 = a^2 + 2ab + b^2 \end{aligned}$$

$$n = 5$$

$$\begin{aligned} (a + b)^2 &= \sum_{k=0}^5 \binom{5}{k} \cdot a^{5-k} \cdot b^k \\ &= \binom{5}{0} a^5 + \binom{5}{1} a^4 b^1 + \binom{5}{2} a^3 b^2 + \binom{5}{3} a^2 b^3 + \binom{5}{4} a^1 b^4 + \binom{5}{5} b^5 \\ &= a^5 + 5a^4 b + 10a^3 b^2 + 10a^2 b^3 + 5ab^4 + b^5 \end{aligned}$$

Binomialkoeffizienten

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

## 1.6 Gleichungen und Ungleichungen

### 1.6.1 Gleichung lösen durch Substitution

**Beispiel**  $0 = 2x^4 - 3x^2 - 5$

Lösungsmenge der Gleichung = Menge der Nullstellen (Schnitte mit der x-Achse) der Funktion mit gleichem Funktionsterm

substituiere  $x^2 = t$

$$0 = 2t^2 - 3t - 5$$

$$t_{1/2} = \frac{3 \pm \sqrt{9 + 40}}{4} = \frac{3 \pm 7}{4}$$

$$t_1 = 2.5, \quad t_2 = -1$$

resubstituiere

$$t_1 = x^2 = 2.5 \quad | \sqrt{\phantom{x}}$$

$$x_1 = \sqrt{2.5}; \quad x_2 = -\sqrt{2.5}$$

$$t_2 = x^2 = -1 \quad | \sqrt{\phantom{x}}$$

keine Lösung

$$L = \{\sqrt{2.5}; -\sqrt{2.5}\}$$

## 1.7 Potenzen, Wurzeln und Logarithmen

### 1.7.1 Potenz- und Wurzelgesetze

$$a^x \cdot a^y = a^{x+y}$$

$$a^x : a^y = a^{x-y}$$

$$a^x \cdot b^x = (ab)^x$$

$$a^x : b^x = \left(\frac{a}{b}\right)^x$$

$$(a^x)^y = a^{xy}$$

$$a^{-x} = \frac{1}{a^x}$$

$$\sqrt[x]{a^y} = a^{\frac{y}{x}}$$

$$\sqrt[x]{a} \cdot \sqrt[x]{b} = \sqrt[x]{ab}$$

$$\sqrt[x]{\sqrt[y]{a}} = \sqrt[xy]{a}$$

### 1.7.2 Logarithmengesetze

$$\log_a(xy) = \log_a(x) + \log_a(y)$$

$$\log_a(x^y) = \log_a(x) \cdot y$$

$$a^x = 10^{\log(a) \cdot x}$$

$$\log_a(x) = \frac{\log(x)}{\log(a)}$$

# Kapitel 2

## Funktion - Relation - Zahlenfolge

Eine Funktion ist eine Zuordnung (Zahlen  $x \rightarrow$  Zahlen  $y$ ), die jeder Zahl  $x$  der Definitionsmenge genau eine Zahl  $y$  der Wertemenge zuordnet.

Darstellung:

- Funktionsgleichung, z. B.  $f(x) = y = \underbrace{2x^2 + 5}_{\text{Funktionsterm}}$
- Graph
- Wertetabelle

Eine Relation ist eine allgemeine Zuordnung von  $x$  zu  $y$ ,  
z. B.  $x = 3$  (senkrechte Gerade),  $x^2y = y^2 + x^3$

Eine Zahlenfolge ist eine Funktion mit  $x \in \mathbb{N}$

### 2.1 Zahlenfolgen

Definitionsmenge  $D = \mathbb{N}_0$

Wertemenge  $W = \mathbb{R}$

$a_n = y = \dots \leftarrow \text{Funktionsterm}$

Angabe eines Funktionsterms für alle Zahlen nennt man explizite Darstellung der Zahlenfolge.

$$a_n = \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

$$a_1 = \frac{1}{2}; \quad a_2 = \frac{1}{4}; \quad a_3 = \frac{1}{8}; \quad \dots; \quad a_{100} = 2^{-100}$$

Berechnung der Folgezahlen Schritt für Schritt nennt man implizite Darstellung der Zahlenfolge. (Rekursion)

$$a_n = 2 \cdot a_{n-1} + 3 \cdot a_{n-2}$$

$$a_1 = 1; \quad a_2 = 1$$

$$a_3 = 2 \cdot a_2 + 3 \cdot a_1 = 2 \cdot 1 + 3 \cdot 1 = 5; \quad a_4 = 2 \cdot a_3 + 3 \cdot a_2 = 2 \cdot 5 + 3 \cdot 1 = 13$$

**16/1**

a

$$a_n = \frac{2n}{5}$$

$$a_1 = \frac{2}{5}; \quad a_2 = \frac{4}{5}; \quad a_3 = 1\frac{1}{5}; \quad a_4 = 1\frac{2}{5}; \quad a_5 = 2;$$

$$a_6 = 2\frac{2}{5}; \quad a_7 = 2\frac{4}{5}; \quad a_8 = 3\frac{1}{5}; \quad a_9 = 3\frac{3}{5}; \quad a_{10} = 4$$

d

$$a_n = \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

$$a_1 = \frac{1}{2}; \quad a_2 = \frac{1}{4}; \quad a_3 = \frac{1}{8}; \quad a_4 = \frac{1}{16}; \quad a_5 = \frac{1}{32};$$

$$a_6 = \frac{1}{64}; \quad a_7 = \frac{1}{128}; \quad a_8 = \frac{1}{256}; \quad a_9 = \frac{1}{512}; \quad a_{10} = \frac{1}{1024}$$

f

$$a_n = \sin\left(\frac{\pi}{2}n\right)$$

$$a_1 = 1; \quad a_2 = 0; \quad a_3 = -1; \quad a_4 = 0; \quad a_5 = 1;$$

$$a_6 = 0; \quad a_7 = -1; \quad a_8 = 0; \quad a_9 = 1; \quad a_{10} = 0$$

16/2

a

$$a_1 = 1; a_{n+1} = 2 + a_n$$

$$a_1 = 1; a_2 = 3; a_3 = 5; a_4 = 7; a_5 = 9;$$

$$a_6 = 11; a_7 = 13; a_8 = 15; a_9 = 17; a_{10} = 19$$

$$a_n = 2n - 1$$

b

$$a_1 = 1; a_{n+1} = 2 \cdot a_n$$

$$a_1 = 1; a_2 = 3; a_3 = 4; a_4 = 8; a_5 = 16;$$

$$a_6 = 32; a_7 = 64; a_8 = 128; a_9 = 512; a_{10} = 1024$$

$$a_n = 2^{n-1}$$

d

$$a_1 = 0; a_2 = 1; a_{n+2} = a_n + a_{n+1} \quad (\text{Fibonacci})$$

$$a_1 = 0; a_2 = 1; a_3 = 1; a_4 = 2; a_5 = 3;$$

$$a_6 = 5; a_7 = 8; a_8 = 13; a_9 = 21; a_{10} = 34$$

$$a_n = \frac{\varphi^n - \psi^n}{\varphi - \psi}$$

## 2.2 Monotonie, Beschränktheit

16/5

$$a_n = 200000\text{€} \cdot 0.98^n$$

16/7

a

$$V_0 = 1^3 = 1$$

$$V_1 = V_0 + \frac{1}{8}V_0 = 1 + \frac{1}{8} = \frac{9}{8}$$

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{8}\left(\frac{1}{8}V_0\right) = \frac{9}{8} + \frac{1}{64} = \frac{73}{64}$$

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{8}\left(\frac{1}{8}\left(\frac{1}{8}V_0\right)\right) = \frac{73}{64} + \frac{1}{512} = \frac{585}{512}$$

b

$$V_n = \sum_{k=0}^n 8^{-k}$$

Streng monoton fallende Zahlenfolge

z. B.  $a_n$  von  $16/5$  ist eine Folge mit der Eigenschaft  $a_n < a_{n-1}$

Streng monoton steigende Zahlenfolge

z. B.  $V_n$  von  $16/7$  ist eine Folge mit der Eigenschaft  $a_n > a_{n-1}$

Ohne „streng“entsprechend  $\leq$  bzw.  $\geq$

18/1

a

$$a_n = 1 + \frac{1}{n}$$

$$a_1 = 2; a_2 = 1\frac{1}{2}; a_3 = 1\frac{1}{3}; a_4 = 1\frac{1}{4}; a_5 = 1\frac{1}{5}$$

streng monoton fallend

nach oben beschränkt (2); nach unten beschränkt (1)

b

$$a_n = \left(\frac{3}{4}\right)^n$$

$$a_1 = \frac{3}{4}; a_2 = \frac{9}{16}; a_3 = \frac{27}{64}; a_4 = \frac{81}{256}; a_5 = \frac{243}{1024}$$

streng monoton fallend

nach oben beschränkt ( $\frac{3}{4}$ ); nach unten beschränkt (0)

c

$$a_n = (-1)^n$$

$$a_1 = -1; a_2 = 1; a_3 = -1; a_4 = 1; a_5 = -1$$

nicht monoton

nach oben beschränkt (1); nach unten beschränkt (-1)

d

$$a_n = 1 + \frac{(-1)^n}{n}$$

$$a_1 = 0; a_2 = \frac{3}{2}; a_3 = \frac{2}{3}; a_4 = \frac{5}{4}; a_5 = \frac{4}{5}$$

nicht monoton

nach oben beschränkt ( $\frac{3}{2}$ ); nach unten beschränkt (0)

e

$$a_n = \frac{8n}{n^2 + 1}$$

$$a_1 = 4; a_2 = \frac{16}{5}; a_3 = \frac{12}{5}; a_4 = \frac{32}{17}; a_5 = \frac{20}{13}$$

streng monoton fallend

nach oben beschränkt (4); nach unten beschränkt (0)

		$a_n$	$n$	$(-1)^n \cdot n$	$(-1)^n : n$	$1 + 1 : n$
18/2	↑ beschränkt	✗	✗	✓	✓	
	↓ beschränkt	✓	✗	✓	✓	
	beschränkt	✗	✗	✓	✓	
	monoton	✓	✗	✗	✓	

## 2.3 Grenzwert einer Zahlenfolge/Funktion

Der Grenzwert  $g$  ist eine reelle Zahl, der sich die Folgenwerte (Funktionswerte) annähern, sodass die Folgenwerte (Funktionswerte) vom Grenzwert praktisch nicht mehr unterschieden werden können.

z. B.

$$a_n = n^{-1}$$

$$a_n = \frac{1}{1}; \frac{1}{2}; \frac{1}{3}; \frac{1}{4}; \frac{1}{5}; \dots; \frac{1}{n}$$

$a_n$  hat den Grenzwert  $g = 0$ , da  $a_n$  auch streng monoton fallend ist, ist  $s = 0$  die größte untere Schranke (=„Infimum“).

Vorgehen

Ich gebe eine Genauigkeitsschranke, z. B.  $\epsilon = 10^{-3}$  vor (kleine positive Zahl). Zu  $\epsilon$  finde ich ein  $n_\epsilon = 1001$ . Alle Folgenwerte mit  $n \geq n_\epsilon = 1001$  (also  $a_{1001}, a_{1002}, \dots$ ) liegen näher beim Grenzwert  $g = 0$  als  $\epsilon = 10^{-3}$  angibt. Finde ich zu jeder möglichen Genauigkeitsschranke  $\epsilon$  solch ein  $n_\epsilon$ , so ist  $g$  der Grenzwert. Ist diese Bedingung erfüllt, so notiert man

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = g \quad \text{hier: } \lim_{n \rightarrow \infty} n^{-1} = 0$$



22/2 (Abweichung  $< \epsilon = 0.1$ )

a

$$a_n = \frac{1+n}{n}$$
$$\left| \frac{1+n}{n} - 1 \right| < 0.1$$
$$n_\epsilon > 10$$

b

$$a_n = \frac{n^2 - 1}{n^2}$$
$$\left| \frac{n^2 - 1}{n^2} - 1 \right| < 0.1$$
$$\epsilon > \sqrt{10} \approx 3.162 \quad (\text{ab } 4)$$

c

$$a_n = 1 - \frac{100}{n}$$
$$\left| 1 - \frac{100}{n} - 1 \right| < 0.1$$
$$n_\epsilon > 1000$$

d

$$a_n = \frac{n-1}{n+2}$$
$$\left| \frac{n-1}{n+2} - 1 \right| < 0.1$$
$$n_\epsilon > 28$$

e

$$a_n = \frac{2n^2 - 3}{3n^2}$$
$$\left| \frac{2n^2 - 3}{3n^2} - 1 \right| < 0.1$$

→ keine Lösung

zu e

$$\begin{aligned}
 & \left| \frac{2n^2 - 3}{3n^2} - 1 \right| < 0.1 \\
 & 1 - \frac{2n^2 - 3}{3n^2} < 0.1 \quad | - 0.1 + \frac{2n^2 - 3}{3n^2} \\
 & 0.9 < \frac{2n^2 - 3}{3n^2} \quad | \cdot 3n^2 \\
 & 2.7n^2 < 2n^2 - 3 \quad | - 2n^2 \\
 & 0.7n^2 < -3 \quad | \div 0.7 \\
 & n^2 < -\frac{30}{7} \quad | \sqrt{\phantom{x}} \\
 & n < \sqrt{-\frac{30}{7}} \quad \text{und} \quad n < -\sqrt{-\frac{30}{7}} \\
 & \Rightarrow \text{nicht lösbar}
 \end{aligned}$$

### 2.3.1 Grenzwerte

Eine Zahlenfolge mit Grenzwert ist eine konvergente Folge. Die Folge konvergiert gegen den Grenzwert. Eine Zahlenfolge ohne Grenzwert ist eine divergente Folge. Eine Nullfolge hat den Grenzwert  $g = 0$ .

$$a_n = \frac{n}{n+1} \quad g = 1 \quad \rightarrow \quad a_n^* = \frac{n}{n+1} - 1 \quad g = 0 \quad (\text{Nullfolge})$$

22/4

a

$$\begin{aligned}
 & \left| \left( \frac{3n-2}{n+2} \right) - 3 \right| < \epsilon \\
 & \left| \frac{-8}{n+2} \right| < \epsilon \quad | x^{-1} \\
 & \frac{n+2}{8} > \frac{1}{\epsilon} \quad | \cdot 8 \\
 & n+2 > \frac{8}{\epsilon} \quad | - 2 \\
 & n > \frac{8}{\epsilon} - 2
 \end{aligned}$$

b

$$|(\frac{n^2 + n}{5n^2}) - 0.2| < \epsilon$$

$$\frac{n}{5n^2} < \epsilon \quad | \cdot 5$$

$$n^{-1} < 5\epsilon \quad | x^{-1}$$

$$n > \frac{1}{5\epsilon}$$

c

$$|(\frac{2^{n+1}}{2^n + 1}) - 2| < \epsilon$$

$$|\frac{-2}{2^n + 1}| < \epsilon \quad | \div 2; x^{-1}$$

$$2^n + 1 > \frac{2}{\epsilon} \quad | - 1$$

$$2^n > \frac{2}{\epsilon} - 1 \quad | \log; \div \log(2)$$

$$n > \frac{\log(\frac{2}{\epsilon} - 1)}{\log(2)}$$

d

$$|(\frac{3 \cdot 2^n + 2}{2^{n+1}}) - \frac{3}{2}| < \epsilon$$

$$|\frac{3 \cdot 2^n + 2 - 3 \cdot 2^n}{2^{n+1}}| < \epsilon$$

$$\frac{2}{2^{[n+1]}} < \epsilon$$

$$\frac{1}{2^n} < \epsilon \quad | x^{-1}$$

$$2^n > \frac{1}{\epsilon} \quad | \log \div \log(2)$$

$$n > \frac{-\log(\epsilon)}{\log(2)}$$

24/2

a

$$a_n = \frac{1+2n}{1+n} = \frac{\frac{1}{n}+2}{\frac{1}{n}+n}$$
$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \frac{\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} + \lim_{n \rightarrow \infty} 2}{\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} + \lim_{n \rightarrow \infty} n} = \frac{0+2}{0+1} = 2$$

b

$$a_n = \frac{7n^3+1}{n^3-10} = \frac{7+\frac{1}{n^3}}{1-\frac{10}{n^3}}$$
$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \frac{\lim_{n \rightarrow \infty} 7 + \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n^3}}{\lim_{n \rightarrow \infty} 1 - \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{10}{n^3}} = \frac{7+0}{1-0} = 7$$

f

$$a_n = \frac{\sqrt{n+1}}{\sqrt{n+1}+2} = \left(\frac{\sqrt{n+1}}{\sqrt{n+1}}\right) \div \left(\frac{\sqrt{n+1}}{\sqrt{n+1}} + \frac{2}{\sqrt{n+1}}\right) = \frac{1}{1+\frac{2}{\sqrt{n+1}}}$$
$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \frac{\lim_{n \rightarrow \infty} 1}{\lim_{n \rightarrow \infty} 1 + \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2}{\sqrt{n+1}}} = \frac{1}{1+0} = 1$$

g

$$a_n = \frac{(5-n)^4}{(5+n)^4} = \left(\frac{\frac{5}{n}-1}{\frac{5}{n}+1}\right)^4$$
$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \left(\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{\frac{5}{n}-1}{\frac{5}{n}+1}\right)\right)^4 = \left(\frac{\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{5}{n} - \lim_{n \rightarrow \infty} 1}{\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{5}{n} + \lim_{n \rightarrow \infty} 1}\right)^4 = \left(\frac{0-1}{0+1}\right)^4 = 1$$

24/3

a

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{2^n-1}{2^n}\right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1-\frac{1}{2^n}}{1}\right) = \frac{\lim_{n \rightarrow \infty} 1 - \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2^n}}{\lim_{n \rightarrow \infty} 1} = \frac{1-0}{1} = 1$$

b

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{2^n - 1}{2^{n-1}} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{1 - \frac{1}{2^n}}{0.5} \right) = \frac{\lim_{n \rightarrow \infty} 1 - \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2^n}}{\lim_{n \rightarrow \infty} 0.5} = \frac{1 - 0}{0.5} = 2$$

c

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{2^n}{1 + 4^n} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{\frac{1}{2^n}}{1 + \frac{1}{4^n}} \right) = \frac{\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2^n}}{\lim_{n \rightarrow \infty} 1 + \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{4^n}} = \frac{0}{1 + 0} = 0$$

d

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{2^n + 3^{n+1}}{2^n + 3^n} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{\frac{1}{(\frac{3}{2})^n} - 1}{\frac{1}{(\frac{3}{2})^n} + 1} \right) = \frac{\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{(\frac{3}{2})^n} - \lim_{n \rightarrow \infty} 1}{\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{(\frac{3}{2})^n} + \lim_{n \rightarrow \infty} 1} = \frac{0 - 1}{0 + 1} = -1$$

e

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{2^n + 3^{n+1}}{2 \cdot 3^n} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{(\frac{2}{3})^n + 3}{2} \right) = \frac{\lim_{n \rightarrow \infty} (\frac{2}{3})^n + \lim_{n \rightarrow \infty} 3}{\lim_{n \rightarrow \infty} 2} = \frac{0 + 3}{2} = \frac{3}{2}$$

### 2.3.2 Grenzwerte von Funktionen: $\lim_{x \rightarrow \infty}$ ; $\lim_{x \rightarrow a}$

$$f(x) = y = \frac{3x^2 - 3}{(x+1)(x-4)} \quad D = \mathbb{R} \setminus \underbrace{\{-1; 4\}}_{\text{Nullstellen des Nenners}}$$

$x = -1 \rightarrow$  Nullstelle des Zählers und Nenners

$x = 4 \rightarrow$  Nullstelle des Nenners

$$f(x) = y = \frac{3(x^2 - 1)}{(x+1)(x-4)} = \frac{3(x+1)(x-1)}{(x+1)(x-4)} = \frac{3x-3}{x-4}$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{3x-3}{x-4} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\frac{3x}{x} - \frac{3}{x}}{\frac{x}{x} - \frac{4}{x}} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{3 - \frac{3}{x}}{1 - \frac{4}{x}} = 3$$

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} \dots = \lim_{x \rightarrow -\infty} \dots = \lim_{x \rightarrow -\infty} \dots = 3$$

$$\Rightarrow \lim_{x \rightarrow \pm \infty} f(x) = 3$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \neq \lim_{x \rightarrow -\infty}$$

**Beispiel**  $f(x) = 2^x$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} 2^x = \infty; \quad \lim_{x \rightarrow -\infty} 2^x = 0$$

$$\lim_{x \rightarrow -1} \frac{3x - 3}{x - 4} = \frac{3(-1) - 3}{-1 - 4} = \frac{-6}{-5} = 1.2$$

$$\lim_{x \rightarrow 4} \frac{3x - 3}{x - 4} = ?$$

x	3.9	3.99	3.999	4.1	4.01	4.001
y	-87	-897	-8997	93	903	9003

$$\lim_{x \nearrow 4} f(x) = -\infty \quad \lim_{x \searrow 4} f(x) = +\infty$$



$x = 4 \rightarrow$  Unendlichkeitsstelle, ein Pol mit Vorzeichenwechsel

Der Punkt  $(-1|1.2)$  gehört nicht zum Graphen. Es ergibt sich ein Loch im Graphen.

28/6

a

$$f(x) = \frac{x}{x}$$

$$\lim_{x \rightarrow 0} f(x) = 1$$

x	-0.1	-0.01	0.01	0.1
y	1	1	1	1

b

$$f(x) = \frac{x^3}{x}$$

$$\lim_{x \rightarrow 0} f(x) = 0$$

x	-0.1	-0.01	0.01	0.1
y	-0.01	-0.0001	0.0001	0.01

c

$$f(x) = \frac{x}{x^3}$$

$$\lim_{x \rightarrow 0} f(x) = \infty$$

x	-0.1	-0.01	0.01	0.1
y	100	10000	10000	100

d

$$f(x) = \frac{2^x}{3^x}$$

$$\lim_{x \rightarrow 0} f(x) = \frac{2^0}{3^0} = 1$$

e

$$f(x) = \frac{2^x - 1}{3^x}$$

$$\lim_{x \rightarrow 0} f(x) = \frac{2^0 - 1}{3^0} = 0$$

# Kapitel 3

## Analysis

### 3.1 Abschnittsweise definierte Funktionen - Stetigkeit

$$D = \mathbb{R}$$

$$f(x) = \begin{cases} 2x & \text{für } x < -5 \\ x^2 + 10 & \text{für } -5 \leq x < 1 \\ -x & \text{für } x \geq 1 \end{cases}$$

Abschnittsweise definierte Funktionen  $\rightarrow$  Für verschiedene Abschnitte der Zahlengeraden von  $\mathbb{R}$  sollen unterschiedliche Funktionsterme gelten.

#### Einschub: Ganzrationale Funktionen

$$f(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_2 x^2 + a_1 x + a_0$$

**z. B.**  $f(x) = 3x^4 + 5x - 7$

$$n = 4 \quad (\text{Grad } n \in \mathbb{N})$$

$$a_4 = 4$$

$$a_3 = a_2 = 0$$

$$a_1 = 5$$

$$a_0 = -7$$

Grad der ganzrationalen Funktion ist die höchste Potenz, bspw. 4

Funktionsterm = Polynom



Die Stetigkeit einer Funktion beschreibt die Tatsache, ob man den Graph der Funktion ohne abzusetzen zeichnen kann.

**Beispiel:**  $f(x) = x^3$



$f(x)$  ist überall stetig

Allgemein gilt:

Ganzrationale Funktionen sind überall, d. h.  $-\infty < x < \infty$ , stetig.

Untersuche  $f(x) = \begin{cases} \dots \\ \dots \\ \dots \end{cases}$  auf Stetigkeit an den Übergangsstellen:

$$x_1 = -5; x_2 = 1$$

$$\lim_{x \nearrow -5} f(x) = -10$$

$$\lim_{x \searrow -5} f(x) = -35$$

$\Rightarrow$  unterschiedliche Grenzwerte bedeuten  $f(x)$  ist bei  $x = -5$  unstetig

$$\lim_{x \nearrow 1} f(x) = 11$$

$$\lim_{x \searrow 1} f(x) = -1$$

$\Rightarrow$  unstetig bei  $x = 1$

28/9

a

$$f(x) = \begin{cases} x^2 & \text{für } x \leq 3 \\ 12 - x & \text{für } x > 3 \end{cases}$$

$$\lim_{x \nearrow 3} f(x) = 3^2 = 9$$

$$\lim_{x \searrow 3} f(x) = 12 - 3 = 9$$

$\Rightarrow$  stetig

b

$$f(x) = \begin{cases} x^2 + 4x & \text{für } x \leq -1 \\ 2^x - 3 & \text{für } x > -1 \end{cases}$$

$$\lim_{x \nearrow -1} f(x) = (-1)^2 + 4(-1) = -3$$

$$\lim_{x \searrow -1} f(x) = 2^{-1} - 3 = -2.5$$

$\Rightarrow$  unstetig

28/11

•

$$f(x) = \sin\left(\frac{1}{x}\right) \quad D_f = \mathbb{R} \setminus \{0\}$$

$$\lim_{x \rightarrow 0} f(x) = \sin(\infty) = -1 \text{ bis } +1 \quad \Rightarrow \text{kein Grenzwert}$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = \sin(0) = 0$$

### 3.2 Stetigkeit einer Funktion an der Stelle $x_0$

Eine Funktion ist stetig bei  $x = x_0$ , wenn Folgendes gilt:

$$\lim_{x \nearrow x_0} f(x) = \lim_{x \searrow x_0} f(x) = f(x_0)$$

29/4

a  $a_n = \frac{n^2 - 7n - 1}{10n^2 - 7n} \quad \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \frac{1}{10}$

b  $a_n = \frac{n^3 - 3n^2 + 3n - 1}{5n^3 - 8n + 5} \quad \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \frac{1}{5}$

$$\text{f } a_n = \frac{2^{n+1}}{2^n+1} \quad \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 2$$

$$\text{g } a_n = \frac{3^n+1}{5^n} \quad \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$$

**29/5**

$$\text{a } \lim_{n \rightarrow \infty} (\sqrt{n+100} - \sqrt{n}) = 0$$

$$\text{b } \lim_{n \rightarrow \infty} (\sqrt{n} \cdot (\sqrt{n+10} - \sqrt{n})) = 5$$

$$\text{c } \lim_{n \rightarrow \infty} (\sqrt{4n^2 + 3n} - 2n) = \frac{3}{4}$$

**30/10**

$$\text{a } \lim_{x \rightarrow 2} \frac{(x-2)^2}{x-2} = \lim_{x \rightarrow 2} (x-2) = 0$$

$$\text{b } \lim_{x \rightarrow 2} \frac{x^2-4}{x^4-16} = \lim_{x \rightarrow 2} \frac{1}{x^2+4} = \frac{1}{8}$$

**30/11**

**a**

$$f(x) = \frac{x^2 - 2x + 1}{x - 1} = \frac{(x-1)^2}{x-1} = x-1 \quad D = \mathbb{R} \setminus \{1\}$$

$$\lim_{x \rightarrow 1} f(x) = x-1 = 0$$

**c**

$$f(x) = \frac{x^4 - 1}{x^2 - 1} = x^2 + 1 \quad D = \mathbb{R} \setminus \{1; -1\}$$

$$\lim_{x \rightarrow 1} f(x) = 1^2 + 1 = 2$$

$$\lim_{x \rightarrow -1} f(x) = (-1)^2 + 1 = 2$$

**29/6**  $a_n = 0.95^n$

$$\text{a } a_5 = 0.95^5 = 0.77$$

$$\text{b } 0.5 = 0.95^n \Rightarrow n = \frac{\log(0.5)}{\log(0.95)} \approx 13.5 \quad n = 13$$

**c**

$$s(n) = 1 + \sum_{k=1}^{n-1} 2a_k$$

$$s(5) = 1 + 2a_1 + 2a_2 + 2a_3 + 2a_4$$

$$= 1 + 1.9 + 1.805 + 1.71475 + 1.6290125 = 8.0487625$$

### 3.3 Polynomdivision

30/11

d

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{x^6 - 1}{x^2 - 1} \\ (x^6 - 1) \div (x^2 - 1) & \\ \begin{array}{r} x^6 \phantom{- 1} \\ - x^6 + x^4 \phantom{- 1} \\ \hline x^4 \phantom{- 1} \\ - x^4 + x^2 \phantom{- 1} \\ \hline x^2 - 1 \\ - x^2 + 1 \\ \hline 0 \end{array} & \\ (x^6 - 1) \div (x^2 - 1) &= x^4 + x^2 + 1 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow x^6 - 1 = (x^2 - 1)(x^4 + x^2 + 1)$$

$$f(x) = x^4 + x^2 + 1$$

$$\lim_{x \rightarrow 1} f(x) = 1^4 + 1^2 + 1 = 3$$

### 3.4 Punktprobe

(erfüllt ein Punkt eine Gleichung)

z. B.  $P(2|3)$

$$f(x) = y = 2x^2 - 5x + 3$$

Setze für  $x$  die Zahl 2 ein

$$f(x) = 8 - 10 + 3 = 1 \neq 3$$

$\Rightarrow P$  gehört nicht zum Graphen von  $f$

38/4

a Höhenmeter: 250m

Streckenkilometer: 10km

b Gesamtanstieg: 750m

c Bei Streckenkilometer 25: Achsensymmetrie zur y-Achse

39/7

a 1.8m

b  $D = \{x \in \mathbb{R} | 0 \leq x \leq 7.42\}$

c  $f(2.5) = 2.425$

39/11

a  $f(x) = 1.9879 \cdot 10^{-4} + 86$

b  $f(-995.5) = f(995.5) = 283$   
 $f(0) = 86$

c  $D = \{x \in \mathbb{R} | -995.5 \leq x \leq 995.5\}$

### 3.5 Mittlere Änderungsrate



Eine **Sekante**  $s$  ist eine Gerade, die eine Kurve in 2 (oder mehr) Punkten schneidet.

Eine **Sehne**  $s^*$ , Teil einer Sekante, ist eine Strecke, die zwei Kurvenpunkte verbindet.

Eine **Tangente**  $t$  ist eine Gerade, die die Kurve in einem Punkt berührt.

Eine **Passante**  $p$  ist eine Gerade, die die Kurve nicht schneidet.

$$P(1|3) \quad Q(10|8)$$

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{5}{9} \text{ (Steigung der Sekante durch } P \text{ und } Q)$$

Die Sekantensteigung  $m$  heißt mittlere Änderungsrate der Funktion  $f$  zwischen den Punkten  $P$  und  $Q$ .

$$P(1|3) \quad f(1) = 3$$

$$Q(10|8) \quad f(10) = 8$$

$$x_1 = 1; \quad x_2 = 10 \quad \Delta x = x_2 - x_1 = h = 9$$

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_2 - y_1}{\underbrace{x_2 - x_1}} = \frac{f(x_1 + h) - f(x_1)}{h}$$

Differenzenquotient

$$\text{Beispielrechnung } f(x) = 2x^2 - 3x + 5$$

$$x_1 = 2; \quad x_2 = 10$$

$$h = x_2 - x_1 = 8$$

$$m = \frac{f(10) - f(2)}{8} = \frac{175 - 7}{8} = 21$$

$$41/2 \quad \begin{array}{c|cccccccc} t \text{ [d]} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ h \text{ [mm]} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 4 & 6 & 7 \end{array}$$

$$a \quad m = \frac{h(9) - h(1)}{8} = \frac{7}{8}$$

$$b \quad m = \frac{h(3) - h(1)}{2} = 0$$

$$d \quad m = \frac{h(6) - h(4)}{2} = 1$$

$$c \quad m = \frac{h(9) - h(7)}{2} = \frac{3}{2}$$

$$41/1 \quad f(x) = \frac{1}{x} + 2$$

$$a \quad m = \frac{f(1) - f(0.1)}{0.9} = -10$$

$$b \quad m = \frac{f(12) - f(2)}{10} = -\frac{1}{24}$$

$$c \quad m = \frac{f(0.02) - f(0.01)}{0.01} = -5000$$

$$d \quad m = \frac{f(1000) - f(100)}{900} = -100000^{-1}$$

## 3.6 Tangentensteigung, Ableitung



**H** Hochpunkt (waagerechte Tangente)

**W** Wendepunkt (maximale/minimale Steigung)

**T** Tiefpunkt (waagerechte Tangente)

**U** Unstetigkeit (keine Tangentensteigung)

**K** Knickstelle (keine Tangentensteigung)

**S** Sattelpunkt (Wendepunkt mit waagerechter Tangente)

### 3.6.1 Vom Differenzenquotienten zum Differentialquotienten

$$f(x) = y = x^2 \quad x_0 = 2$$

$$m = \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h} = \frac{(2 + h)^2 - 2^2}{h} = 4 + h \quad (\text{Sekante})$$

$$m = \lim_{h \rightarrow 0} (4 + h) = 4 \quad (\text{Tangente})$$

### 3.6.2 Ableitung

$$\begin{aligned}f(x) &= 2x^3 \quad x_0 = 4 \\m_{\text{Sekante}} &= \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h} \\&= \frac{2(4 + h)^3 - 2 \cdot 4^3}{h} \\&= \frac{128 + 96h + 24h^2 + 2h^3 - 128}{h} \\&= 96 + 24h + 2h^2\end{aligned}$$

Sekante durch  $P(4|f(4))$ ,  $Q(6|f(6)) \Rightarrow h = 2$

$$m = 96 + 24 \cdot 2 + 2 \cdot 2^2 = 152$$

Sekante durch  $P(4|f(4))$ ,  $Q(-1|f(-1)) \Rightarrow h = -5$

$$m = 96 + 24 \cdot (-5) + 2 \cdot (-5)^2 = 26$$

Die Tangentensteigung ist der Grenzwert der Sekantensteigung für  $h \rightarrow 0$ .

$$m_{\text{Tangente}} = \lim_{h \rightarrow 0} m_{\text{Sekante}} = \lim_{h \rightarrow 0} 96 + 24h + 2h^2 = 96$$

Die Ableitung der Funktion  $f(x) = 2x^3$  bei  $x = 4$  ist 96.

$$f'(4) = 96 \text{ (Tangentensteigung)}$$

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_0+h)-f(x_0)}{h} = f'(x_0)$$

46/6

$$\text{a } 10.15 \text{ Uhr: } m = \frac{500m}{15min} = 33.\bar{3} \frac{m}{min}$$

$$10.45 \text{ Uhr: } m = \frac{-500m}{15min} = -33.\bar{3} \frac{m}{min}$$

$$11.15 \text{ Uhr: } m = \frac{-1000m}{15min} = -66.\bar{6} \frac{m}{min}$$

b am größten:  $\sim 10.05$  Uhr  
am kleinsten:  $\sim 11.20$  Uhr

48/3

$$\text{a } x_0 = 4 \\ \lim_{h \rightarrow 0} \frac{(4+h)^2 - 4^2}{h} = 8$$

$$\text{b } x_0 = 3 \\ \lim_{h \rightarrow 0} \frac{-2(3+h)^2 - (-2) \cdot 3^2}{h} = -12$$



$$\text{e } x_0 = -1$$

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{(-1+h)^{-1} - (-1)^{-1}}{h} = -1$$

$$\text{h } x_0 = 3$$

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{(-3+h+2) - (-3+2)}{h} = -1$$

$$\text{i } x_0 = 7$$

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{4-4}{h} = 0$$

### 3.7 Sekanten-, Tangenten-, Normalengleichung

$$f(x) = 5x^3 \quad P_1(2|f(2)) \quad P_2(4|f(4))$$

Sekantengleichung

$$y = m \cdot x + b$$

$$m_s = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{f(4) - f(2)}{4 - 2} = \frac{320 - 40}{2} = 140$$

$$b = -m \cdot x + y = -140 \cdot 2 + 40 = -240$$

$$s(x) = 140x - 240$$

Tangentengleichung im Punkt  $P_1(2|40)$

$$y = m \cdot x + b$$

$$m_t = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(2+h) - f(2)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{5(2+h)^3 - 40}{h} = 60$$

$$b = -m \cdot x + y = -60 \cdot 2 + 40 = -80$$

$$t(x) = 60x - 80$$

Normalengleichung im Punkt  $P_1(2|40)$

$$y = m \cdot x + b$$

$$m_n = -\frac{\Delta x}{\Delta y} = -\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)^{-1} = \frac{-1}{m_t}$$

$$m_n \cdot m_t = -1$$

$$m_t = 60$$

$$m_n = -\frac{1}{60}$$

$$b = -m \cdot x + y = 40 \frac{1}{30}$$

$$n(x) = -\frac{1}{60}x + 40 \frac{1}{30}$$

Zwei Geraden mit  $m_1$  und  $m_2$  sind orthogonal, wenn gilt  $m_1 \cdot m_2 = -1$

49/14

a

$$\begin{aligned}f(x) &= 0.5x^2 & P(1|f(1) = 0.5) \\m_t &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\frac{1}{2}(1+h)^2 - \frac{1}{2}}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} (1 + \frac{1}{2}h) = 1 \\b_t &= -m_t \cdot x + y = -\frac{1}{2} \\y_t &= x - \frac{1}{2} \\m_n &= -\frac{1}{m_t} = -1 \\b_n &= -m_n \cdot x + y = 1.5 \\y_n &= -x + 1.5\end{aligned}$$

b

$$\begin{aligned}f(x) &= 2x^2 - 4 & P(-2|f(-2) = 4) \\m_t &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{2(-2+h)^2 - 4 - 4}{h} = -8 \\b_t &= -m_t \cdot x + y = -12 \\y_t &= -8x - 12 \\m_n &= -\frac{1}{m_t} = \frac{1}{8} \\b_n &= -m_n \cdot x + y = 4\frac{1}{4} \\y_n &= \frac{1}{8}x + 4\frac{1}{4}\end{aligned}$$

c

$$\begin{aligned}
 f(x) &= \sqrt{x} & P(0.5|f(0.5) = \sqrt{0.5}) \\
 m_t &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sqrt{0.5+h} - \sqrt{0.5}}{h} = \frac{\sqrt{2}}{2} \\
 b_t &= -m_t \cdot x + y = \frac{\sqrt{2}}{4} \\
 y_t &= \frac{\sqrt{2}}{2}x + \frac{\sqrt{2}}{4} \\
 m_n &= -\frac{1}{m_t} = -\frac{2}{\sqrt{2}} \\
 b_n &= -m_n \cdot x + y = \sqrt{2} \\
 y_n &= -\frac{2}{\sqrt{2}} \cdot x + \sqrt{2}
 \end{aligned}$$

d

$$\begin{aligned}
 f(x) &= -x^3 + 2 & P(2|f(2) = -6) \\
 m_t &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{-(2+h)^3 + 2 + 6}{h} = -12 \\
 b_t &= -m_t \cdot x + y = 18 \\
 y_t &= -12x + 18 \\
 m_n &= -\frac{1}{m_t} = \frac{1}{12} \\
 b_n &= -m_n \cdot x + y = -6\frac{1}{6} \\
 y_n &= \frac{1}{12}x - 6\frac{1}{6}
 \end{aligned}$$

**49/13**  $f(x) = -\frac{1}{x}$

a

$$\begin{aligned}
 &P(-1|f(-1) = 1) \\
 m_t &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{-\frac{1}{-1+h} - 1}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{h}{h + h^2} = 1 \\
 \alpha &= \text{atan}(m_t) = 45^\circ
 \end{aligned}$$

b

$$P(2|f(2) = -\frac{1}{2})$$

$$m_t = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{-\frac{1}{2+h} + \frac{1}{2}}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\frac{h}{2}}{2h + h^2} = \frac{1}{4}$$

$$\alpha = \text{atan}(m_t) = 14.04^\circ$$

c

$$P(0.1|f(0.1) = -10)$$

$$m_t = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{-\frac{1}{0.1+h} + 10}{h} = 100$$

$$\alpha = \text{atan}(m_t) = 89.43^\circ$$

49/12c

$$f(x) = -3\sqrt{x} \quad x_0 = 8$$

$$f'(x_0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{-3\sqrt{8+h} - (-3\sqrt{8})}{h}$$

$$= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{(-\sqrt{72+9h} + \sqrt{72})(-\sqrt{72+9h} - \sqrt{72})}{h(-\sqrt{72+9h} - \sqrt{72})}$$

$$= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{9}{-\sqrt{72+9h} - \sqrt{72}}$$

$$= \frac{9}{-2\sqrt{72}} = \frac{3}{-4\sqrt{2}} = -\frac{3}{\sqrt{32}}$$

## 3.8 Ableitungsfunktion

Die Ableitung von  $f(x)$  bei  $x_0$  ist eine lokale Eigenschaft der Funktion  $f(x)$ , also einer Stelle  $x_0$ . Allerdings sind unsere Funktionen fast überall differenzierbar. Ausnahmen sind Unstetigkeitsstellen und Knickstellen. Es gibt eine Funktion  $f'(x) = m_t(x)$  für alle Stellen  $x$ . Sie heißt Ableitungsfunktion.

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

$$\text{z. B. } f(x) = x^4$$

$$\begin{aligned} f'(x) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{(x+h)^4 - x^4}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{x^4 + 4x^3h + 6x^2h^2 + 4xh^3 + h^4 - x^4}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} 4x^3 + 6x^2h + 4xh^2 + h^3 \\ &= 4x^3 \end{aligned}$$

$$\text{z. B. } f'(5) = 500$$

$$g(x) = x^2$$

$$g'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{(x+h)^2 - x^2}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{x^2 + xh + h^2 - x^2}{h} = 2x$$

$$h(x) = x^3$$

$$h'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{(x+h)^3 - x^3}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{x^3 + 3x^2h + 3xh^2 + h^3 - x^3}{h} = 3x^2$$

$$i(x) = a \cdot x^2$$

$$i'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{a(x+h)^2 - a \cdot x^2}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{ax^2 + 2xh + ah^2 - ax^2}{h} = 2ax$$

$$j(x) = \sqrt{x}$$

$$j'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sqrt{x+h} - \sqrt{x}}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{(\sqrt{x+h} - \sqrt{x})(\sqrt{x+h} + \sqrt{x})}{h(\sqrt{x+h} + \sqrt{x})} = \frac{1}{2\sqrt{x}}$$

$$k(x) = \frac{1}{x^2}$$

$$k'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{(x+h)^{-2} - x^{-2}}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{(x^2 + 2xh + h^2)^{-1} - x^{-2}}{h} = -2x^{-3}$$

$$f(x) = ax^n \qquad f'(x) = n \cdot ax^{n-1}$$

54/2

a

$$f(x) = ax^2 + bx + c$$
$$f'(x) = 2ax + b$$

b

$$f(x) = \frac{a}{x} + c$$
$$f'(x) = -ax^{-2}$$

c

$$f(x) = x^{c+1}$$
$$f'(x) = (c+1)x^c$$

d

$$f(x) = t^2 + 3t$$
$$f'(x) = 2t + 3$$

e

$$f(x) = x - t$$
$$f'(x) = 1$$

f

$$f(t) = x - t$$
$$f'(t) = -1$$

55/7

c

$$f(x) = 3x^2 + 3$$
$$f'(x) = 6x$$
$$P(0.5|f(0.5) = 3.75)$$
$$m = f'(0.5) = 3$$
$$b = -m \cdot x + y = 2.25$$
$$y = 3x + 2.25$$

d

$$f(x) = -x^3 + 2$$

$$f'(x) = -3x^2$$

$$P(2|f(2) = -6)$$

$$m = f'(2) = -12$$

$$b = -m \cdot x + y = 18$$

$$y = -12x + 18$$

$$\mathbf{59/6} \quad g(x) = 10 - 3x \Rightarrow m = -3$$

c

$$f(x) = -\frac{1}{100}x^3$$

$$f'(x) = -\frac{3}{100}x^2$$

$$-3 = -\frac{3}{100}x^2$$

$$x = 10$$

$$P(10|f(10) = -20)$$

d

$$f(x) = bx^3 + c$$

$$f'(x) = 3bx^2$$

$$-3 = 3bx^2$$

$$x = \pm(-b)^{-\frac{1}{2}}$$

$$P(\pm(-b)^{-\frac{1}{2}}|f(\pm(-b)^{-\frac{1}{2}}) = \pm(-b)^{-\frac{1}{2}} + c) \quad b < 0$$

**60/12**

$$H(t) = \begin{cases} 3.2 & \text{für } 0 \leq t \leq 1 \\ 3.2 - 5(t-1)^2 & \text{für } 1 \leq t \leq 1.8 \\ 0 & \text{für } 1.8 \leq t \leq 3 \end{cases}$$

a

$$H'(0.5) = 0$$

$$H'(1.5) = -10t + 10 = -5$$

$$H'(2.5) = 0$$

b

$$H'(1) = 0 = -10t + 10$$

$$H'(1.8) = -10t + 10 = -8 \neq H'(1.8) = 0$$

**67/3**

a

$$x^5 - 20x^3 + 64x = 0 \quad | \div x \Rightarrow x = 0$$

$$x^4 - 20x^2 + 64 = 0 \quad | t = x^2$$

$$t^2 - 20t + 64 = 0 \quad | pq$$

$$t_{1/2} = 10 \pm \sqrt{100 - 64} = 10 \pm 6 \quad | \text{resubst.}$$

$$x_{1/2/3/4} = \pm \sqrt{t_{1/2}}$$

$$L = \{0; \pm 2; \pm 4\}$$

b

$$x^5 - 17x^3 + 16x = 0 \quad | \div x \Rightarrow x = 0$$

$$x^4 - 17x^2 + 16 = 0 \quad | t = x^2$$

$$t^2 - 17t + 16 = 0 \quad | pq$$

$$t_{1/2} = 8.5 \pm \sqrt{72.25 - 16} = 8.5 \pm 7.5 \quad | \text{resubst.}$$

$$x_{1/2/3/4} = \pm \sqrt{t_{1/2}}$$

$$L = \{0; \pm 1; \pm 4\}$$

c

$$(x - \frac{2}{3})(x^4 - \frac{13}{6}x^2 + 1) = 0$$

$$x - \frac{2}{3} = 0 \Rightarrow x = \frac{2}{3}$$

$$x^4 - \frac{13}{6}x^2 + 1 = 0 \quad | t = x^2$$

$$t^2 - \frac{13}{6}t + 1 = 0 \quad | pq$$

$$t_{1/2} = \frac{13}{12} \pm \sqrt{\frac{169}{144} - 1} = \frac{13}{12} \pm \frac{5}{12}$$

$$x_{1/2/3/4} = \pm \sqrt{t_{1/2}}$$

$$L = \{\frac{2}{3}; \pm \sqrt{\frac{2}{3}}; \pm \sqrt{\frac{3}{2}}\}$$



d

$$\begin{aligned}
 (x^3 - 8)(x^4 - \frac{14}{3}x^2 + 5) &= 0 \\
 x^3 - 8 = 0 &\Rightarrow x = \sqrt[3]{8} = 2 \\
 x^4 - \frac{14}{3}x^2 + 5 = 0 &\quad |t = x^2 \\
 t^2 - \frac{14}{3}t + 5 = 0 &\quad |pq \\
 t_{1/2} = \frac{7}{3} \pm \sqrt{\frac{49}{9} - 5} = \frac{7}{3} \pm \frac{2}{3} &\quad | \text{resubst.} \\
 x_{1/2/3/4} = \pm \sqrt{t_{1/2}} \\
 L = \{2; \pm \sqrt{\frac{5}{3}}; \pm \sqrt{3}\}
 \end{aligned}$$

### 3.9 Nullstellen

Annahme:  $f(x) = 0$  habe  $x_1 = 2$ ;  $x_2 = -3$ ;  $x_3 = 1$  als Lösungen,  $f(x)$  hat Grad 3.

$$\begin{aligned}
 f(x) &= x(x - 2)(x + 3)(x - 1) \\
 &= x^3 - 7x + 6 \text{ für } c = 1
 \end{aligned}$$

Würde ich die zusätzliche Nullstelle  $x_4 = 4$  als Linearfaktor in die Funktionsgleichung einfügen, so hätte ich eine Funktion 4. Grades. Allgemein gilt: Eine ganzrationale Funktion mit Grad  $n$  hat maximal  $n$  Nullstellen. Funktionen mit ungeradzahigen Graden  $n = 1, 3, 5, 7 \dots$  haben mindestens eine Nullstelle. Solche mit geradzahigen Graden  $n = 2, 4, 6, 8 \dots$  haben keine Mindestzahl an Nullstellen.

### 3.9.1 Mehrfache Nullstellen

Beispiel  $f(x)$  habe  $x_1 = x_2 = 2$  und  $x_3 = 1$  als Nullstellen (Grad 3).



Berührungspunkt bei  $x = 2$ , außerdem Extrempunkt.

Finde ich eine doppelte Nullstelle, so liegt gleichzeitig an der Stelle ein Extrempunkt vor. Eine dreifache Nullstelle ist zusätzlich ein Sattelpunkt mit waagerechter Tangente.

67/5

a

$$f(x) = x^2 - 2x$$

$$f(0) = 0$$

$$f(x) = 0$$

$$L = \{0; 2\}$$



c

$$f(x) = x(x^2 - 9)$$

$$f(0) = 0$$

$$f(x) = 0$$

$$L = \{0; \pm 3\}$$



f

$$f(x) = x^4 - 13x^2 + 36$$

$$f(0) = 36$$

$$f(x) = 0$$

$$L = \{\pm 2; \pm 3\}$$



**68/13**  $f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d$

a

$$\text{NS: } 0; -4; \frac{4}{5}$$

$$a = 5$$

$$\begin{aligned} f(x) &= a(x - 0)(x + 4)\left(x - \frac{4}{5}\right) = a\left(x^3 + 3\frac{1}{5}x^2 - 3\frac{1}{5}x\right) \\ &= 5x^3 + 16x^2 - 16x \end{aligned}$$

b

$$\text{NS: } -\frac{1}{3}; 3; \frac{10}{3}$$

$$a = 9$$

$$\begin{aligned} f(x) &= a\left(x + \frac{1}{3}\right)(x - 3)\left(x - \frac{10}{3}\right) = a\left(x^3 - 6x^2 - \frac{1}{9}x + 3\frac{1}{3}\right) \\ &= 9x^3 - 72x^2 - x + 30 \end{aligned}$$

c

$$\text{NS: } 0; -\sqrt{2}; \sqrt{2}$$

$$a = 1$$

$$\begin{aligned} f(x) &= a(x-0)(x+\sqrt{2})(x-\sqrt{2}) = a(x^3 - 2x) \\ &= x^3 - 2x \end{aligned}$$

d

$$\text{NS: } 0; -\frac{1}{\sqrt{5}}; \frac{1}{\sqrt{5}}$$

$$a = 5$$

$$\begin{aligned} f(x) &= a(x-0)\left(x+\frac{1}{\sqrt{5}}\right)\left(x-\frac{1}{\sqrt{5}}\right) = a\left(x^3 - \frac{1}{5}x\right) \\ &= 5x^3 - x \end{aligned}$$

$$\mathbf{68/12} \quad f(x) = -0.08x^2 + 0.56x + 1.44$$

a

$$0 = -0.08x^2 + 0.56x + 1.44$$

$$x_{1/2} = \frac{-0.56 \pm \sqrt{0.56^2 - 4(-0.08) \cdot 1.44}}{2(-0.08)} = \frac{-0.56 \pm 0.88}{-0.16}$$

$$(x_1 = -2) \quad x_2 = 9$$

b

$$1.44 = -0.08x^2 + 0.56x + 1.44$$

$$0 = -0.08x^2 + 0.56x$$

$$x_{1/2} = \frac{-0.56 \pm \sqrt{0.56^2}}{2(-0.08)} = \frac{-0.56 \pm 0.56}{-0.16}$$

$$(x_1 = 0) \quad x_2 = 7$$

$$\mathbf{68/11}$$

$$f(x) = ax^2 + c$$

$$f(0) = 2 \Rightarrow c = 2$$

$$f(5) = f(-5) = 1$$

$$f(x) = -\frac{1}{25}x^2 + 2$$

$$f(x) = 0 \quad x = \pm\sqrt{50}$$

$$\text{Breite: } 2\sqrt{50} = 10\sqrt{2} \approx 14.14$$

68/15

$$s = 1000m$$

$$s(t) = 30t - 0.4t^2$$

$$v(t) = 30 - 0.8t$$

a

$$v(t) = 0 = 30 - 0.8t \Rightarrow t = 37.5$$

$$s(37.5) = 30(37.5) - 0.4(37.5)^2 = 565.5$$

b

$$s(t) = v_0 \cdot t - 0.4t^2 < 1000$$

$$v(t) = v_0 - 0.8t \Rightarrow t = \frac{v_0}{0.8}$$

$$s(t) = \frac{v_0^2}{0.8} - 0.4\left(\frac{v_0}{0.8}\right)^2 = \frac{5}{8}v_0^2 < 1000$$

$$v_0 < \sqrt{1600} = 40$$

### 3.10 Hoch-, Tief- und Sattelpunkte

Hochpunkt:  $f(x_H) \geq f(x)$  in der Nähe

Tiefpunkt:  $f(x_T) \leq f(x)$  in der Nähe

$$f'(x_H) = f'(x_T) = f'(x_S) = 0$$

Daraus folgt ein Rechenverfahren zur Bestimmung der Stellen  $x$  mit  $f'(x) = 0$ .

$$\text{z. B. } f(x) = x^3 - 2x^2$$

$$f'(x) = 3x^2 - 4x = 0$$

$$\Rightarrow x_1 = 0 \quad x_2 = \frac{4}{3}$$

$x_1$  und  $x_2$  sind Kandidaten für Extrema.

### Umgebungsuntersuchung

für Hochpunkte gilt:  $f'(x_l) > 0$   $f'(x) = 0$   $f'(x_r) < 0$

für Tiefpunkte gilt:  $f'(x_l) < 0$   $f'(x) = 0$   $f'(x_r) > 0$

$$\text{zu: } x_1 = 0 \quad x_l = -1 \quad x_r = 1$$

$$f'(x_l) = f'(-1) = 7$$

$$f'(x_1) = f'(0) = 0$$

$$f'(x_r) = f'(1) = -1$$

$$\Rightarrow H(0|0)$$

$$\text{zu: } x_2 = \frac{4}{3} \quad x_l = 1 \quad x_r = 2$$

$$f'(x_l) = f'(1) = -1$$

$$f'(x_1) = f'(0) = 0$$

$$f'(x_r) = f'(2) = 4$$

$$\Rightarrow T\left(\frac{4}{3} \mid -1.2\right)$$

Sonderfall Sattelpunkt (Wendepunkt mit waagerechter Tangente)

$$f'(x_l) < 0 \quad f'(x) = 0 \quad f'(x_r) < 0 \quad \text{oder}$$

$$f'(x_l) > 0 \quad f'(x) = 0 \quad f'(x_r) > 0$$

73/2

e

$$f(x) = -\frac{1}{4}x^4 + x^3 - 4$$

$$f'(x) = -x^3 + 3x^2 = 0 \quad | \div x \Rightarrow x_1 = 0$$

$$0 = -x^2 + 3x \quad | \div x \Rightarrow x_2 = 0$$

$$0 = -x + 3 \quad | -3; \cdot(-1)$$

$$3 = x$$

$$L = \{0; 3\}$$

$$f'(-1) = 4 \quad f'(0) = 0 \quad f'(1) = 2 \quad \Rightarrow \text{Sattelpunkt } S(0|f(0) = -4)$$

$$f'(2) = 4 \quad f'(3) = 0 \quad f'(4) = -16 \quad \Rightarrow \text{Hochpunkt } H(3|f(3) = 2\frac{3}{4})$$

74/6

b

$$f(x) = x^4 - 4x^3 + 4x^2$$

$$f'(x) = 4x^3 - 12x^2 + 8x$$

$$0 = 4x^3 - 12x^2 + 8x \quad | \div x \Rightarrow x_1 = 0$$

$$0 = 4x^2 - 12x + 8 \quad | abc$$

$$x_{2/3} = \frac{12 \pm 4}{8}$$

$$x_2 = 1 \quad x_3 = 2$$

$$f'(-1) = -24 \quad f'(x_1) = 0 \quad f'(\frac{1}{2}) = 1.5 \quad \Rightarrow T(0|0)$$

$$f'(\frac{1}{2}) = 1.5 \quad f'(x_2) = 0 \quad f'(\frac{3}{2}) = -1.5 \quad \Rightarrow H(1|1)$$

$$f'(\frac{3}{2}) = -1.5 \quad f'(x_3) = 0 \quad f'(3) = 24 \quad \Rightarrow T(2|0)$$





## 3.11 2. Ableitungsfunktion

$$f''(x) = (f'(x))'$$

Die 2. Ableitungsfunktion  $f''(x)$  beschreibt das Krümmungsverhalten der Ursprungsfunktion  $f(x)$ .

$f''(x) > 0$  links gekrümmt

$f''(x) < 0$  rechts gekrümmt

$f''(x) = 0$  Wendepunkt

80/1

b

$$f(x) = 2x - 3x^2$$

$$f'(x) = 2 - 6x$$

$$f''(x) = -6$$

$$f'(x) = 0 \quad L = \left\{\frac{1}{3}\right\}$$

$$f''\left(\frac{1}{3}\right) = -6 < 0 \quad H\left(\frac{1}{3} \mid \frac{1}{3}\right)$$

d

$$f(x) = x^4 - 4x^2 + 3$$

$$f'(x) = 2 - 6x$$

$$f''(x) = 12x^2 - 8$$

$$f'(x) = 0 \quad L = \{\pm\sqrt{2}; 0\}$$

$$f''(\pm\sqrt{2}) = 16 > 0 \quad T(\pm\sqrt{2} \mid -1)$$

$$f''(0) = -8 < 0 \quad H(0 \mid 3)$$

e

$$f(x) = \frac{4}{5}x^5 - \frac{10}{3}x^3 + \frac{9}{4}x$$

$$f'(x) = 4x^4 - 10x^2 + \frac{9}{4}$$

$$f''(x) = 16x^3 - 20x$$

$$f'(x) = 0 \quad L = \{\pm \frac{1}{2}; \pm \frac{3}{2}\}$$

$$f''(\frac{1}{2}) = -8 < 0 \quad H(\frac{1}{2} | \frac{11}{15})$$

$$f''(-\frac{1}{2}) = 8 > 0 \quad H(-\frac{1}{2} | -\frac{11}{15})$$

$$f''(\frac{3}{2}) = 24 > 0 \quad T(\frac{3}{2} | -\frac{9}{5})$$

$$f''(-\frac{3}{2}) = -24 < 0 \quad T(-\frac{3}{2} | \frac{9}{5})$$

### 3.12 Wendepunkte

Wendepunkte eines Graphen sind Punkte, an denen die Krümmung wendet. Am Wendepunkt selbst ist das Krümmungsverhalten gleich 0. Außerdem sind Wendepunkte Punkte mit maximaler bzw. minimaler Steigung.

Notwendige Bedingung:  $f''(x) = 0$

Hinreichende Bedingung (I): Umgebungsuntersuchung

$f''(x_l) > 0$   $f''(x_r) < 0$  Wechsel im Krümmungsverhalten

$\Rightarrow$  Wendepunkt  $WP(x|f(x))$  (links-rechts)

Hinreichende Bedingung (II):  $f'''(x) \neq 0$

für  $f'''(x) < 0$  LRWP

für  $f'''(x) > 0$  RLWP

für  $f'''(x) = 0$  keine Entscheidung

84/1

a

$$f(x) = x^3 + 2$$

$$f''(x) = 6x = 0 \quad L = \{0\}$$

$$f'''(x) = 6 \Rightarrow RLWP(0|2)$$

rechts:  $x \in ]-\infty; 0]$

links:  $x \in [0; \infty[$

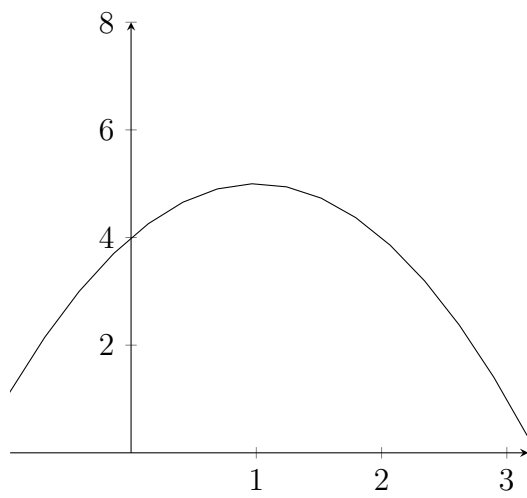


b

$$f(x) = 4 + 2x - x^2$$

$$f''(x) = -2 = 0 \quad L = \{\}$$

rechts:  $x \in ]-\infty; \infty[$



d

$$f(x) = x^5 - x^4 + x^3$$

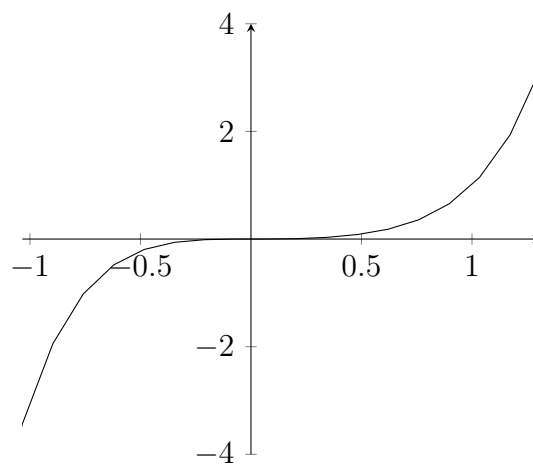
$$f''(x) = 20x^3 - 12x^2 + 6x = 0 \quad L = \{0\}$$

$$f'''(x) = 60x^2 - 24x + 6$$

$$f'''(0) = 6 \Rightarrow RLWP(0|0)$$

rechts:  $x \in ]-\infty; 0]$

links:  $x \in [0; \infty[$



84/2b

$$f(x) = x^3 + 3x^2 + 3x$$

$$f'(x) = 3x^2 + 6x + 3$$

$$f''(x) = 6x + 6$$

$$f'''(x) = 6$$

$$f''(x) = 0 \quad L = \{-1\}$$

$$f'''(-1) = 6 \Rightarrow RLWP(-1 | f(-1) = -1)$$

$$f'(-1) = 0 \Rightarrow \text{Sattelpunkt}$$



85/12

$$f(x) = x^3 + bx^2 + cx + d$$

$$f'(x) = 3x^2 + 2bx + c = 0$$

$$f''(x) = 6x + 2b = 0 \Rightarrow x = -\frac{1}{3}b$$

$$f'(-\frac{1}{3}b) = 3(-\frac{1}{3}b)^2 + 2b(-\frac{1}{3}b) + c = -\frac{1}{3}b^2 + c = 0$$

$$\Rightarrow c = \frac{b^2}{3}$$

85/14

a

$$f_a(x) = x^3 - ax^2$$

$$f_a''(x) = 6x - 2a = 0 \quad L = \left\{\frac{a}{3}\right\}$$

$$f_a'''(x) = 6 \quad f_a'''(\frac{a}{3}) = 6 \Rightarrow RLWP(\frac{a}{3} | f_a(\frac{a}{3}))$$

b

$$f_a(x) = x^4 - 2ax^2 + 1$$

$$f_a''(x) = 12x^2 - 4a = 0 \quad L = \left\{\pm\sqrt{\frac{a}{3}}\right\}$$

$$f_a'''(x) = 24x$$

$$f_a'''(\sqrt{\frac{a}{3}}) = 24(\sqrt{\frac{a}{3}}) > 0 \Rightarrow RLWP(\sqrt{\frac{a}{3}} | f_a(\sqrt{\frac{a}{3}}))$$

$$f_a'''(-\sqrt{\frac{a}{3}}) = 24(-\sqrt{\frac{a}{3}}) < 0 \Rightarrow LRWP(-\sqrt{\frac{a}{3}} | f_a(-\sqrt{\frac{a}{3}}))$$

89/2

- A wahr, die Steigung ist negativ, d. h. die Werte werden kleiner
- B falsch, die Funktion hat bei  $x = -1$  einen Sattelpunkt, die Steigung ist davor und danach positiv
- C wahr, einen Tiefpunkt bei  $x = 2$  und einen Hochpunkt bei  $x = 0$
- D ?, die Funktionswerte sind an der Ableitungsfunktion nicht erkennbar

89/1

c

$$f(x) = -\frac{1}{18}x^4 + x^2$$

$$f(0) = 0 \Rightarrow S(0|0)$$

$$f(x) = 0 \quad L = \{0; \pm\sqrt{18}\} \Rightarrow S(0|0), S(\sqrt{18}|0), S(-\sqrt{18}|0)$$

$$f'(x) = -\frac{2}{9}x^3 + 2x = 0 \quad L = \{0; \pm 3\}$$

$$f''(x) = -\frac{2}{3}x^2 + 2$$

$$f''(0) = 2 \Rightarrow T(0|f(0) = 0)$$

$$f''(3) = 4 \Rightarrow T(3|f(3) = \frac{9}{2})$$

$$f''(-3) = -4 \Rightarrow T(-3|f(-3) = \frac{9}{2})$$

monoton steigend  $f'(x) \geq 0$ :  $] -\infty; -3]$ ,  $[0; 3]$

monoton fallend  $f'(x) \leq 0$ :  $[3; 0]$ ,  $[3; \infty[$



d

$$f(x) = \frac{1}{6}x^3 - x^2 + 1.5x$$

$$f(0) = 0 \Rightarrow S(0|0)$$

$$f(x) = \frac{1}{6}x^3 - x^2 + 1.5x = 0 \quad L = \{0; 3\} \Rightarrow S(0|0), S(3|0)$$

$$f'(x) = \frac{1}{2}x^2 - 2x + 1.5 = 0 \quad L = \{1; 3\}$$

$$f''(x) = x - 2$$

$$f''(1) = -1 \Rightarrow H(1|f(1) = 0.\overline{6})$$

$$f''(3) = 1 \Rightarrow T(3|f(3) = 0)$$

monoton steigend  $f'(x) \geq 0$ :  $[-\infty; 1], [3; \infty]$

monoton fallend  $f'(x) \leq 0$ :  $[1; 3]$





f

$$f(x) = x + \frac{5}{x} \quad D = \mathbb{R} \setminus \{0\} \quad (\text{kein Schnittpunkt mit y-Achse})$$

$$f(x) = 0 \quad L = \{\} \quad (\text{kein Schnittpunkt mit x-Achse})$$

$$f'(x) = 1 - \frac{5}{x^2} = 0 \quad L = \{\pm\sqrt{5}\}$$

$$f''(x) = \frac{10}{x^3}$$

$$f''(\sqrt{5}) = \frac{2}{\sqrt{5}} \Rightarrow T(\sqrt{5}|f(\sqrt{5})) = \sqrt{20}$$

$$f''(-\sqrt{5}) = -\frac{2}{\sqrt{5}} \Rightarrow T(-\sqrt{5}|f(-\sqrt{5})) = -\sqrt{20}$$

$$\text{monoton steigend } f'(x) \geq 0: \quad ]-\infty; -\sqrt{5}] , [\sqrt{5}; \infty[$$

$$\text{monoton fallend } f'(x) \leq 0: \quad [-\sqrt{5}; 0[ , ]0; \sqrt{5}]$$



### 3.13 Nullstellen: Polynomdivision

97/2

$$\begin{array}{r} \text{b } ( \quad 2x^3 + 2x^2 - 21x + 12 ) \div (x + 4) = 2x^2 - 6x + 3 \\ \underline{- 2x^3 - 8x^2} \phantom{+ 12} \\ \phantom{2x^3 + } - 6x^2 - 21x \phantom{+ 12} \\ \phantom{2x^3 + } \underline{6x^2 + 24x} \phantom{+ 12} \\ \phantom{2x^3 + } \phantom{6x^2 + } 3x + 12 \\ \phantom{2x^3 + } \phantom{6x^2 + } \underline{- 3x - 12} \\ \phantom{2x^3 + } \phantom{6x^2 + } \phantom{3x + } 0 \end{array}$$

$$\begin{array}{r} \text{c } \left( \begin{array}{r} 2x^3 - 7x^2 - x + 2 \\ -2x^3 + x^2 \end{array} \right) \div (2x - 1) = x^2 - 3x - 2 \\ \hline \begin{array}{r} -6x^2 - x \\ 6x^2 - 3x \end{array} \\ \hline \begin{array}{r} -4x + 2 \\ 4x - 2 \end{array} \\ \hline 0 \end{array}$$

$$\begin{array}{r} \text{d } \left( \begin{array}{r} x^4 + 2x^3 - 4x^2 - 9x - 2 \\ -x^4 - 2x^3 \end{array} \right) \div (x + 2) = x^3 - 4x - 1 \\ \hline \begin{array}{r} -4x^2 - 9x \\ 4x^2 + 8x \end{array} \\ \hline \begin{array}{r} -x - 2 \\ x + 2 \end{array} \\ \hline 0 \end{array}$$

**98/4**

$$\begin{array}{r} \text{a } x_1 = 1 \\ \left( \begin{array}{r} x^3 - 6x^2 + 11x - 6 \\ -x^3 + x^2 \end{array} \right) \div (x - 1) = x^2 - 5x + 6 \\ \hline \begin{array}{r} -5x^2 + 11x \\ 5x^2 - 5x \end{array} \\ \hline \begin{array}{r} 6x - 6 \\ -6x + 6 \end{array} \\ \hline 0 \end{array}$$

$$x_{2/3} = \frac{5 \pm 1}{2}$$

$$x_2 = 2$$

$$x_3 = 3$$

$$f(x) = (x - 1)(x - 2)(x - 3)$$

$$\begin{array}{l} \text{b } x_1 = 2 \\ \left( \begin{array}{r} x^3 + x^2 - 4x - 4 \\ -x^3 + 2x^2 \end{array} \right) \div (x - 2) = x^2 + 3x + 2 \\ \hline \begin{array}{r} 3x^2 - 4x \\ -3x^2 + 6x \end{array} \\ \hline \begin{array}{r} 2x - 4 \\ -2x + 4 \end{array} \\ \hline 0 \end{array}$$

$$\begin{aligned} x_{2/3} &= \frac{-3 \pm 1}{2} \\ x_2 &= -2 \\ x_3 &= -1 \\ f(x) &= (x - 2)(x + 2)(x + 1) \end{aligned}$$

$$\begin{array}{l} \text{c } x_1 = -2 \\ \left( \begin{array}{r} 4x^3 - 13x + 6 \\ -4x^3 - 8x^2 \end{array} \right) \div (x + 2) = 4x^2 - 8x + 3 \\ \hline \begin{array}{r} -8x^2 - 13x \\ 8x^2 + 16x \end{array} \\ \hline \begin{array}{r} 3x + 6 \\ -3x - 6 \end{array} \\ \hline 0 \end{array}$$

$$\begin{aligned} x_{2/3} &= \frac{8 \pm 4}{8} \\ x_2 &= \frac{1}{2} \\ x_3 &= \frac{3}{2} \\ f(x) &= (x + 2)\left(x - \frac{1}{2}\right)\left(x - \frac{3}{2}\right) \end{aligned}$$

$$\begin{array}{r}
 \text{d } x_1 = 3 \\
 (4x^3 - 8x^2 - 11x - 3) \div (x - 3) = 4x^2 + 4x + 1 \\
 \underline{-4x^3 + 12x^2} \\
 4x^2 - 11x \\
 \underline{-4x^2 + 12x} \\
 x - 3 \\
 \underline{-x + 3} \\
 0
 \end{array}$$

$$\begin{aligned}
 x_{2/3} &= \frac{-4 \pm 0}{8} \\
 x_{2/3} &= -\frac{1}{2} \\
 f(x) &= (x - 3)\left(x + \frac{1}{2}\right)
 \end{aligned}$$

$$\mathbf{98/11} \quad f(x) = x^3 - 2x^2 - 3x + 10 \quad S(-2|0) \Rightarrow x_1 = -2$$

$$\begin{array}{r}
 \text{a } (x^3 - 2x^2 - 3x + 10) \div (x + 2) = x^2 - 4x + 5 \\
 \underline{-x^3 - 2x^2} \\
 -4x^2 - 3x \\
 \underline{4x^2 + 8x} \\
 5x + 10 \\
 \underline{-5x - 10} \\
 0
 \end{array}$$

$$\begin{aligned}
 x_{2/3} &= \frac{4 \pm \sqrt{-4}}{2} \\
 &\Rightarrow \text{keine Lösung}
 \end{aligned}$$

b

$$\begin{aligned}
 g(x) &= mx + b \quad m = 2 \quad S(-2|0) \\
 0 &= 2 \cdot (-2) + b \Rightarrow b = 4 \\
 &\Rightarrow g(x) = 2x + 4
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f(x) &= g(x)x^3 - 2x^2 - 3x + 10 = 2x + 4 \\
 0 &= x^3 - 2x^2 - 5x + 6 \quad x_1 = -2
 \end{aligned}$$

$$\begin{array}{r}
 (x^3 - 2x^2 - 5x + 6) \div (x + 2) = x^2 - 4x + 3 \\
 \underline{-x^3 - 2x^2} \phantom{+ 6} \\
 -4x^2 - 5x \phantom{+ 6} \\
 \underline{4x^2 + 8x} \phantom{+ 6} \\
 3x + 6 \\
 \underline{-3x - 6} \\
 0
 \end{array}$$

$$x_{2/3} = \frac{4 \pm 2}{2}$$

$$x_2 = 1 \quad S(1|6)$$

$$x_3 = 3 \quad S(3|10)$$

**98/12**  $f_t(x) = 2x^3 - tx^2 + 8x$

a

$$f_2(x) = 2x^3 - 2x^2 + 8x \quad | \div x$$

$$0 = 2x^2 - 2x + 8$$

$$x_{2/3} = \frac{2 \pm \sqrt{-60}}{4} \quad \text{keine Lösung}$$

$$L = \{0\}$$

$$f_{10}(x) = 2x^3 - 10x^2 + 8x \quad | \div x$$

$$0 = 2x^2 - 10x + 8$$

$$x_{2/3} = \frac{10 \pm 6}{4}$$

$$L = \{0; 1; 4\}$$

$$f_{-10}(x) = 2x^3 + 10x^2 + 8x \quad | \div x$$

$$0 = 2x^2 + 10x + 8$$

$$x_{2/3} = \frac{-10 \pm 6}{4}$$

$$L = \{0; -1; -4\}$$

b

$$\text{Diskriminante} > 0$$

$$|t| > 8$$

c

$$t = 8$$

$$f_8(x) = 2x^3 - 8x^2 + 8x$$

$$\text{Nullstellen: } \{0; 2\}$$

### 3.14 Verhalten für $x \rightarrow \pm\infty$

$$\text{z. B. } f(x) = -2x^3 + 5x^2 - 7x + 2$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) \approx \lim_{x \rightarrow \infty} (-2x^3) = -\infty$$

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) \approx \lim_{x \rightarrow -\infty} (-2x^3) = +\infty$$

$\Rightarrow$  unterschiedlich für ungeradzahliges Grad

$$\text{z. B. } g(x) = 2x^4 - 5x$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} g(x) \approx \lim_{x \rightarrow \infty} (2x^4) = +\infty$$

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} g(x) \approx \lim_{x \rightarrow -\infty} (2x^4) = +\infty$$

$\Rightarrow$  gleich für geradzahliges Grad

### 3.15 Symmetrie

$$\text{Bsp. } f(x) = x^4 + 5x^2 - 7$$

$f(x)$  ist achsensymmetrisch zur y-Achse, weil nur geradzahlige Exponenten vorkommen.

$$\text{Bsp. } g(x) = x^5 - 7x^3 + x$$

$g(x)$  ist punktsymmetrisch zum Ursprung, weil nur ungeradzahlige Exponenten vorkommen.

allgemein:

achsensymmetrisch zur y-Achse:  $f(x) = f(-x)$

punktsymmetrisch zum Ursprung:  $f(x) = -f(-x)$

ansonsten: Symmetrie nicht erkennbar

Anwendung:

Bsp.  $h(x) = \frac{3x^2+2x}{x^2+5}$

$$h(-x) = \frac{3(-x)^2+2(-x)}{(-x)^2+5} = -\frac{3x^2+2x}{x^2+5} = -h(x)$$

$\Rightarrow$  punktsymmetrisch

100/2

a  $f(x) = -\mathbf{3x^4} - 0.2x^2 + 10$

b  $f(x) = 3x + 4x^3 - x^2 = \mathbf{4x^3} - x^2 + 3x$

c  $f(x) = 2(x-1) \cdot x^2 = \mathbf{2x^3} - 2x^2$

d  $f(x) = (x+1)(x^3+1) = \mathbf{x^4} + x^3 + x + 1$

e  $f(x) = -2(x^4 - x^3 - x^2) = -\mathbf{2x^4} + 2x^3 + 2x^2$

f  $f(x) = x^2 \cdot (-6x - x^2) = -\mathbf{x^4} - 6x^3$

102/1

d  $f(x) = x(x^2 - 5) = x^3 - 5x \Rightarrow$  punktsymmetrisch

e  $f(x) = (x-2)^2 + 1 = x^2 - 4x + 5 \Rightarrow$  nicht erkennbar

f  $f(x) = x(x-1)(x+1) = x^3 - x \Rightarrow$  punktsymmetrisch

## 3.16 Kurvendiskussion

105/1

c

$$f(x) = \frac{1}{2}x^3 - 4x^2 + 8x$$

Ableitungen

$$f'(x) = \frac{3}{2}x^2 - 8x + 8$$

$$f''(x) = 3x - 8$$

$$f'''(x) = 3$$

Symmetrie

$$f(-x) \neq f(x)$$

$$-\frac{1}{2}x^3 - 4x^2 - 8x \neq \frac{1}{2}x^3 - 4x^2 + 8x$$

$$f(-x) \neq -f(x)$$

$$-\frac{1}{2}x^3 - 4x^2 - 8x \neq -\frac{1}{2}x^3 + 4x^2 - 8x$$

Nullstellen

$$f(x) = 0 = \frac{1}{2}x^3 - 4x^2 + 8x \quad | \div x \Rightarrow x_1 = 0$$

$$x_{2/3} = \frac{4 \pm \sqrt{16 - 4 \cdot \frac{1}{2} \cdot 8}}{2 \cdot \frac{1}{2}} = 4$$

$$L = \{0; 4\}$$

Grenzverhalten

$$\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{2}x^3 = \infty$$

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{1}{2}x^3 = -\infty$$



### Extremstellen

$$f'(x) = 0 = \frac{3}{2}x^2 - 8x + 8$$

$$x_{1/2} = \frac{8 \pm \sqrt{64 - 4 \cdot \frac{3}{2} \cdot 8}}{2 \cdot \frac{3}{2}} = \frac{8 \pm 4}{3}$$

$$L = \{\frac{4}{3}; 4\}$$

$$f''(x_1) = f''(\frac{4}{3}) = -4 < 0 \quad HP(\frac{4}{3} | f(\frac{4}{3}))$$

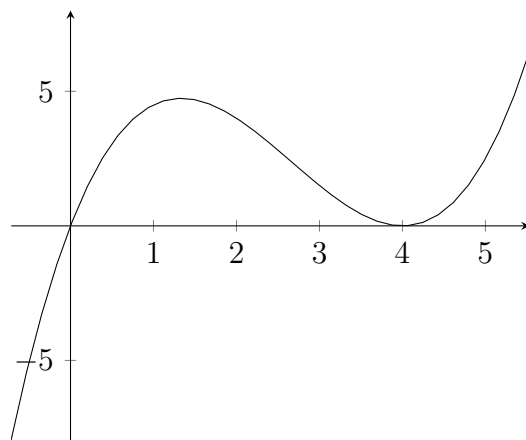
$$f''(x_2) = f''(4) = 4 > 0 \quad TP(4 | f(4))$$

### Wendestellen

$$f''(x) = 0 = 3x - 8$$

$$L = \{\frac{8}{3}\}$$

$$f'''(x_1) = f'''(\frac{8}{3}) = 3 > 0 \quad RLWP(\frac{8}{3} | f(\frac{8}{3}))$$



d

$$f(x) = \frac{1}{2}x^3 + 3x^2 - 8 = x^3 + 6x^2 - 16$$

Ableitungen

$$f'(x) = 3x^2 + 12x$$

$$f''(x) = 6x + 12$$

$$f'''(x) = 6$$

Symmetrie

$$f(-x) \neq f(x)$$

$$-x^3 + 6x^2 + 16 \neq x^3 + 6x^2 - 16$$

$$f(-x) \neq -f(x)$$

$$-x^3 + 6x^2 + 16 \neq -x^3 - 6x^2 + 16$$

Nullstellen

$$f(x) = 0 = x^3 + 6x^2 - 16$$

$$x_1 = -2$$

$$\begin{array}{r} \left( \begin{array}{r} x^3 + 6x^2 \\ -x^3 - 2x^2 \end{array} - 16 \right) \div (x + 2) = x^2 + 4x - 8 \\ \hline 4x^2 \\ -4x^2 - 8x \\ \hline -8x - 16 \\ 8x + 16 \\ \hline 0 \end{array}$$

$$x_{2/3} = \frac{-4 \pm \sqrt{16 - 4(-8)}}{2} = \frac{-4 \pm \sqrt{48}}{2}$$

$$L = \{-2; -5.46; 1.46\}$$

Grenzverhalten

$$\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow \infty} x^3 = \infty$$

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow -\infty} x^3 = -\infty$$

### Extremstellen

$$f'(x) = 0 = 3x^2 + 12x \quad | \div x \Rightarrow x_1 = 0$$

$$3x + 12 = 0$$

$$L = \{0; -4\}$$

$$f''(x_1) = f''(0) = 12 > 0 \quad TP(0|f(0))$$

$$f''(x_2) = f''(-4) = -12 < 0 \quad HP(-4|f(-4))$$

### Wendestellen

$$f''(x) = 0 = 6x + 12$$

$$L = \{-2\}$$

$$f'''(x_1) = f'''(-2) = 6 > 0 \quad RLWP(-2|f(-2))$$



106/5

$$f(x) = 187.5 - 1.579 \cdot 10^{-2} \cdot x^2 - 1.988 \cdot 10^{-6} \cdot x^4$$

a

Höhe

$$f(0) = 187.5$$

Breite

$$f(x) = 0$$

$$\text{subst. } t = x^2$$

$$0 = 187.5 - 1.579 \cdot 10^{-2} \cdot t - 1.988 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$$

$$t_{1/2} = \frac{1.579 \cdot 10^{-2} \pm \sqrt{(1.579 \cdot 10^{-2})^2 - 4 \cdot (-1.988 \cdot 10^{-6}) \cdot 187.5}}{2 \cdot (-1.988 \cdot 10^{-6})}$$

$$t_1 < 0 \quad t_2 = 6520.923541$$

$$x_{1/2} = \pm \sqrt{t_2} \approx \pm 80$$

$$2 \cdot 80 = 160$$

b

$$f'(x) = -3.158 \cdot 10^{-2} \cdot x - 7.952 \cdot 10^{-6} \cdot x^3$$

$$f'(80) = -2.5264 - 4.071424 \approx -6.6$$

$$\text{atan}(-6.6) \approx -81^\circ$$

c

$$f(19) = 187.5 - 5.70019 - 0.259078148 \approx 181$$

$$\text{vertikaler Abstand: } 187.5 - 181 = 6.5 < 10$$

$$f(9) - 10 = 177.5 - 1.579 - 0.01988 \approx 176.2$$

## 3.17 Tangente und Anwendungen

### 3.17.1 Allgemeine Tangentengleichung - Herleitung

$$f(x) = y = m \cdot x + b$$

$$\text{Stelle } u \quad f'(u) = m \quad f(u) = y$$

$$f(u) = f'(u) \cdot u + b \Rightarrow b = f(u) - f'(u) \cdot u$$

$$t(x) = f'(u) \cdot x + f(u) - f'(u) \cdot u$$

$$= f'(u) \cdot (x - u) + f(u)$$

$$n(x) = -\frac{1}{f'(u)} \cdot (x - u) + f(u)$$

108/5

a

$$f(x) = x^2 - x; \quad B(-2|6) \quad u = -2$$

$$f'(x) = 2x - 1 \quad f'(u) = -5$$

$$t(x) = -5 \cdot (x + 2) + 6 = -5x - 4$$

$$n(x) = \frac{1}{5} \cdot (x + 2) + 6 = \frac{1}{5}x + 6\frac{2}{5}$$

b

$$f(x) = \frac{4}{x} + 2; \quad B(4|3) \quad u = 4$$

$$f'(x) = -4x^{-2} \quad f'(u) = -\frac{1}{4}$$

$$t(x) = -\frac{1}{4} \cdot (x - 4) + 3 = -\frac{1}{4}x + 4$$

$$n(x) = 4 \cdot (x - 4) + 3 = 4x - 13$$

### Exkurs: Quadratische Ergänzung

führt auf die Scheitelpunktform einer quadratischen Gleichung

$$\text{z. B. } f(x) = x^2 - x$$

$$= x^2 - x + 0.25 - 0.25$$

$$= (x - 0.5)^2 - 0.25$$

$$\text{Scheitelpunkt } S(0.5 | -0.25)$$

$$\begin{aligned}
\text{z. B. } g(x) &= 4x^2 - 3x + 8 \\
&= 4\left(x^2 - \frac{3}{4}x\right) + 8 \\
&= 4\left(x^2 - \frac{3}{4}x + \frac{9}{64} - \frac{9}{64}\right) + 8 \\
&= 4\left(x - \frac{3}{8}\right)^2 - 4\left(\frac{9}{64}\right) + 8 \\
&= 4\left(x - \frac{3}{8}\right)^2 + \frac{137}{16} \\
\text{Scheitelpunkt } S\left(\frac{3}{8} \mid \frac{137}{16}\right)
\end{aligned}$$

nimm den Koeffizienten (-1), halbiere ihn (-0.5) und quadriere anschließend (0.25).

**109/10**

$$\begin{aligned}
f(x) = y &= 4 - \frac{1}{2}x^2 \\
Y(0|6) \\
f'(x) &= -x \\
t(x) &= f'(x_0) \cdot (x - x_0) + f(x_0) = \frac{x_0^2}{2} - x \cdot x_0 + 4 \\
0 &= \frac{1}{2}x_0^2 - 2 \quad x_0 = \pm 2
\end{aligned}$$

**109/11**

$$\begin{aligned}
f(x) &= -0.002x^4 + 0.122x^2 - 1.8 \\
\text{Tiefster Punkt: } T(0 \mid -1.8) \\
\text{Augen: } P(x_0 \mid 1.6) \\
f'(x) &= -0.008x^3 + 0.244x \\
t(x) &= 0.006u^4 - 0.122u^3 - 0.008u^3x + 0.224ux - 1.8 \\
t(0) &= -1.8 = 0.006u^4 - 0.122u^3 - 1.8 \quad L = \{0; \pm\sqrt{\frac{61}{3}}\} \\
t(x) &= 0.366752x - 1.8 \quad \text{für } u = \sqrt{\frac{61}{3}} \\
1.6 &= 0.366752x_0 - 1.8 \\
x_0 &= 9.2706
\end{aligned}$$

112/7

$$S(t) = -0.08t^3 + 3.5t^2 + 10.6t + 237$$

a

$$S'(t) = -0.24t^2 + 7t + 10.6$$

Die Ableitung gibt an, wie stark die Schulden ansteigen, also die Neuverschuldung pro Jahr.

b

$$S''(t) = -0.48t + 7$$

$$S''(t_0) = 0$$

$$t_0 = 14.58\bar{3} \quad (\text{um } 1994)$$

c

$$S'(t_0) = 0 = -0.24t^2 + 7t + 10.6$$

$$t_0 = \frac{1}{12}(175 + \sqrt{36985}) \approx 30.6 \quad (\text{um } 2010)$$

$$S''(t_0) \approx -7.69 < 0 \quad \Rightarrow \quad \text{Hochpunkt}$$

d Nicht die Staatsschulden, sondern die Neuverschuldung, nahm ab.

111/3

$$f(t) = 0.25t^3 - 12t^2 + 144t$$

a

$$f(t) = 0 = 0.25t^3 - 12t^2 + 144t \quad L = \{0; 24\}$$

$$f'(t) = 0 = 0.75t^2 - 24t + 144 \quad L = \{8; 24\}$$

$$f''(t) = 1.5t - 24$$

$$f''(8) = -12 < 0 \quad \Rightarrow \quad HP$$

$$f''(24) = 12 > 0 \quad \Rightarrow \quad TP$$

$$f''(t) = 0 = 1.5t - 24 \quad L = \{16\}$$

$$f'''(t) = 1.5 > 0 \quad \Rightarrow \quad RLWP$$

b

$$\text{Hälfte d. Maximalwerts} = \frac{f(8)}{2} = \frac{512}{2} = 256$$

$$f(t) = 256 = 0.25t^3 - 12t^2 + 144t$$

$$0 = 0.25t^3 - 12t^2 + 144t - 256$$

$$\begin{array}{r} \left( \begin{array}{r} \frac{1}{4}t^3 - 12t^2 + 144t - 256 \\ - \frac{1}{4}t^3 + 4t^2 \end{array} \right) \div (t - 16) = \frac{1}{4}t^2 - 8t + 16 \\ \hline \phantom{\left( \right)} - 8t^2 + 144t \\ \phantom{\left( \right)} \phantom{-} 8t^2 - 128t \\ \hline \phantom{\left( \right)} \phantom{\phantom{-}} 16t - 256 \\ \phantom{\left( \right)} \phantom{\phantom{-}} - 16t + 256 \\ \hline \phantom{\left( \right)} \phantom{\phantom{-}} 0 \end{array}$$

$$L = \{2.1436; 16; (29.856)\}$$

$$f_2(t) = 0.25t^3 - 12t^2 + 144t - 256$$

$$f_2'(t) = f'(t) = 0.75t^2 - 24t + 144$$

$$f_2'(2.1436) \approx 96 > 0$$

$$f_2'(16) = -48 < 0$$

$$(f_2'(29.856) \approx 96 > 0)$$

Zeitraum: 2.1436 bis 16



Teil II

11/2

112/5

$$O(t) = -\frac{1}{300}(t^3 - 36t^2 + 324t - 5700) \quad t \in [0; 24]$$

a

$$O'(t) = \frac{1}{100}(-t^2 + 24t - 108) = 0$$

$$t_{1/2} = \frac{-24 \pm \sqrt{24^2 - 4 \cdot 108}}{-2} = \frac{-24 \pm 12}{-2} = 12 \pm 6$$

$$t_1 = 6 \quad t_2 = 18$$

$$O''(t) = \frac{12 - t}{50}$$

$$O''(t_1) = \frac{6}{50} > 0 \Rightarrow TP(6|O(6) = 16.12)$$

$$O''(t_2) = \frac{-6}{50} < 0 \Rightarrow HP(18|O(18) = 19)$$

b Die Steigung der Wendetangente gibt an, wie sich die Temperaturänderung ändert (Beschleunigung).

### 3.18 Optimieren unter Nebenbedingungen

Tunnelquerschnitt:



Länge der Randlinie (Umfang) ist  $5m$ ;  $A$  ist maximal

Hauptbedingung HB

$$A(r, h) = 2rh + \frac{1}{2}\pi r^2$$

( $A(r)$  heißt Zielfunktion ZF)

Nebenbedingung NB

$$U = 5 = 2h + 2r + \pi r \quad | - 2r - \pi r$$

$$h = \frac{5}{2} - r - \frac{1}{2}\pi r$$

setze  $h$  in  $A(r, h)$  ein

$$A(r) = 2r\left(\frac{5}{2} - r - \frac{1}{2}\pi r\right) + \frac{1}{2}\pi r^2$$

$$= 5r - 2r^2 - \pi r^2 + \frac{1}{2}\pi r^2$$

$$= \left(-\frac{1}{2}\pi - 2\right) \cdot r^2 + 5r$$

$$A'(r) = 5 - 7.14159r$$

$$A'(r) = 0 \quad L = \{0.7\}$$

$$h = 0.7 \quad \text{für } r = 0.7$$

$$A(r) = 1.75m^2$$

**114/3**

$$A(l, b) = l \cdot b$$

$$U = 50 = 2(l + b) \Rightarrow b = 25 - l$$

$$A(l) = 2l \cdot (25 - l) = -2l^2 + 50l$$

$$A'(l) = -4l + 50$$

$$A'(l) = 0 \quad L = \{12.5\}$$

$$l = b = 12.5cm$$

**114/4**

$$U(l, b) = 2(l + b)$$

$$A = 400 = l \cdot b \Rightarrow b = \frac{400}{l}$$

$$U(l) = 2l + \frac{800}{l}$$

$$U'(l) = 2 - 800l^{-2}$$

$$U'(l) = 0 \quad L = \{\pm 20\}$$

$$l = b = 20cm$$

**115/7**

a

$$V(x) = (16 - 2x) \cdot (10 - 2x) \cdot x = 4x^3 - 52x^2 + 160x$$

$$V'(x) = 12x^2 - 104x + 160$$

$$V'(x) = 0 \quad L = \left\{2; \left(\frac{20}{3}\right)\right\}$$

$$V(2cm) = 144cm^3$$

**115/8**

$$U(r, h) = \pi r + 2r + 2h$$

$$A = 45 = \frac{1}{2}\pi r^2 + 2rh \Rightarrow h = \frac{45 - \frac{1}{2}\pi r^2}{2r}$$

$$U(r) = \frac{1}{2}\pi r + 2r + \frac{45}{r}$$

$$U'(r) = -45r^{-2} + \frac{1}{2}\pi + 2$$

$$U'(r) = 0 \quad L = \{\pm 3.55\}$$

$$r = 3.55m$$

$$h = 3.55m \quad \text{fuer } r = 3.55m$$

115/11

$$V(r, h) = \pi r^2 h$$

$$12^2 = (2r)^2 + h^2 \Rightarrow r = \sqrt{36 - \frac{h^2}{4}}$$

$$V(h) = \pi \cdot \left(36 - \frac{h^2}{4}\right) \cdot h = 36h\pi - \frac{h^3\pi}{4}$$

$$V'(h) = -\frac{3}{4}\pi h^2 + 36\pi$$

$$V'(h) = 0 \quad L = \{\pm 6.93\}$$

$$h = 6.93 \text{ cm}$$

$$r = 4.9 \text{ cm} \quad \text{fuer } h = 6.93 \text{ cm}$$

115/14

$a$  ... Kantenlänge der Grundfläche

$$V(a, h) = \frac{1}{3} \cdot a^2 \cdot h$$

$$2.4^2 = 5.76 = h_s^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2$$

$$h_s^2 = h^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2$$

$$\Rightarrow h = \sqrt{5.76 - \frac{a^2}{2}}$$

$$V(a) = \frac{1}{3} \cdot a^2 \cdot \sqrt{5.76 - \frac{a^2}{2}}$$

$$V_2(a) = V(a)^2 = \frac{1}{9} \cdot a^4 \cdot \left(5.76 - \frac{a^2}{2}\right) = -\frac{1}{18}a^6 + 0.64a^4$$

$$V_2'(a) = -\frac{1}{3}a^5 + 2.56a^3$$

$$V_2'(a) = 0 \quad L = \{0; \pm 2.771\}$$

$$V(2.771 \text{ m}) \approx 3.55 \text{ m}^3$$

115/13

Tragfähigkeit  $T \sim b$

Tragfähigkeit  $T \sim h^2$

a

$$r = 50cm$$

$$T(b, h) = b \cdot h^2$$

$$h^2 + b^2 = (2r)^2 \Rightarrow h^2 = 10000 - b^2 \Rightarrow h = \sqrt{10000 - b^2}$$

$$T(b) = b \cdot (10000 - b^2) = -b^3 + 10000b$$

$$T'(b) = -3b^2 + 10000$$

$$T'(b) = 0 \quad L = \{\pm \frac{100}{\sqrt{3}}\}$$

$$T(\frac{100}{\sqrt{3}}) \approx 384900$$

$$b \approx 57.74cm$$

$$h = \sqrt{10000 - (\frac{100}{\sqrt{3}})^2} \approx 81.65cm$$

### 3.19 Numerisches Verfahren zur Nullstellenbestimmung

z. B.  $f(x) = x^3 + 5x - 10$

probeweise:

$$f(1) = -4$$

$$f(2) = 8$$

$\Rightarrow$  Nullstelle zwischen 1 und 2

Vermutung  $x_0 = 1.5$



Zum Rechenverfahren

Tangentengleichung  $t(x) = f'(x_0)(x - x_0) + f(x_0)$

$$t(x_1) = 0 \quad x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)}$$

$$\rightarrow x_2 = x_1 - \frac{f(x_1)}{f'(x_1)}$$

allgemeine Näherungsformel nach Newton (und Raphson)

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$$

$n$  beginnend bei 0

Abbruchbedingung: Nullstelle auf 3 Dezimalen genau. Das bedeutet, dass beim nächsten Schritt sich die 3. Dezimale nicht mehr ändern darf

Beispiel  $f(x) = x^3 + 5x - 10$

$$f'(x) = 3x^2 + 5$$

$$x_0 = 1.5$$

$$x_1 = 1.5 - \frac{1.5^3 + 5 \cdot 1.5 - 10}{3 \cdot 1.5^2 + 5} \approx 1.4255$$

$$x_2 = \dots \approx 1.4233$$

$$x_3 = \dots \approx 1.42331$$

Nullstelle auf 3 Dezimalen genau:  $x = 1.423$

118/1

a

$$x^3 + 2x - 1 = 0$$

$$f'(x) = 3x^2 + 2$$

$$x_0 = 0$$

$$x_1 = 0 - \frac{-1}{2} = 0.5$$

$$x_2 = \frac{5}{11} = 0.\overline{45}$$

$$x_3 = \frac{1581}{3487} \approx 0.453398\dots$$

$$x_4 = \frac{50302634185}{110945952227} \approx 0.453397\dots$$

$$x^* = 0.453$$

### 3.19.1 Anwendungen des Newton-Verfahrens

Mögliche Fragestellungen:

- Nullstellen eines Funktionsgraphen  $f(x) = 0$ , auch  $f(x) = a$
- Nullstellen der Ableitungsfunktion  $f'(x) = 0$ , auch  $f'(x) = m$
- Schnittstellen zweier Funktionsgraphen  $f(x) = g(x)$
- zu Zielfunktion Lösungen finden



118/2

a

$$f(x) = x^3 - 3x - 1$$

$$f'(x) = 3x^2 - 3$$

$$x_0 = 2$$

$$x_1 = 1.8889$$

$$x_2 = 1.8795$$

$$x_3 = 1.8794$$

$$x_4 = 1.8794$$

$$x_1^* = 1.879$$

...

$$x_2^* = -1.532$$

$$x_3^* = -0.347$$

b

$$f(x) = x^3 + 3x^2 - 3$$

$$f'(x) = 3x^2 + 6x$$

$$x_0 = 1$$

$$x_1 = 0.8889$$

$$x_2 = 0.8795$$

$$x_3 = 0.8794$$

$$x_4 = 0.8794$$

$$x_1^* = 0.879$$

...

$$x_2^* = -2.532$$

$$x_3^* = -1.347$$

c

$$f(x) = x^4 - 2x^3 - 5x^2 + 1$$

$$f'(x) = 4x^3 - 6x^2 - 10x$$

$$x_0 = 0.5$$

$$x_1 = 0.4271$$

$$x_2 = 0.4203$$

$$x_3 = 0.4204$$

$$x_4 = 0.4204$$

$$x_1^* = 0.420$$

...

$$x_2^* = -1.332$$

$$x_3^* = -0.521$$

$$x_4^* = 3.432$$

d

$$f(x) = x^4 + x^3 - 4x^2 + x + 0.5$$

$$f'(x) = 4x^3 + 3x^2 - 8x + 1$$

$$x_0 = 0.5$$

$$x_1 = 0.6071$$

$$x_2 = 0.6030$$

$$x_3 = 0.6030$$

$$x_1^* = 0.603$$

...

$$x_2^* = -2.635$$

$$x_3^* = -0.246$$

$$x_4^* = 1.278$$

**118/3**

$$f(x) = x^5 + x^3 + 1$$

$$f'(x) = 5x^4 + 3x^2$$

$$x_0 = -1$$

$$x_1 = -0.8750$$

$$x_2 = -0.8400$$

$$x_3 = -0.8376$$

$$x_4 = -0.8376$$

$$x^* = -0.838$$

**118/4**

**a**

$$g(x) = x^2; \quad h(x) = x^3 - 1$$

$$f(x) = g(x) - h(x) = -x^3 + x^2 + 1$$

$$f'(x) = -3x^2 + 2x$$

$$x_0 = 1.5$$

...

$$x^* = 1.466$$

**b**

$$g(x) = x^3; \quad h(x) = \frac{1}{2}x^3 - 2x + 2$$

$$f(x) = g(x) - h(x) = \frac{1}{2}x^3 + 2x - 2$$

$$f'(x) = \frac{3}{2}x^2 + 2$$

$$x_0 = 1$$

...

$$x^* = 0.848$$

118/5

a

$$f(x) = 0.1x^4 - x^2 - x + 1; \quad m = 1$$

$$f'(x) = 0.4x^3 - 2x - 1 = 1$$

$$0.4x^3 - 2x - 2 = 0$$

$$x_0 = 2.5$$

...

$$x^* = 2.627$$

b

$$f(x) = -0.1x^4 - x^3 + x^2 + 3; \quad m = -18$$

$$f'(x) = -0.4x^3 - 3x^2 + 2x = -18$$

$$-0.4x^3 - 3x^2 + 2x + 18 = 0$$

$$x_0 = 2.5$$

...

$$x^* = 2.400$$

c

$$f(x) = \frac{1}{10}x^3 + \frac{1}{2}x^2 - 1 + \frac{1}{x}; \quad m = 4$$

$$f'(x) = \frac{3}{10}x^2 + x - \frac{1}{x^2} = 4$$

$$\frac{3}{10}x^2 + x - \frac{1}{x^2} - 4 = 0$$

$$x_0 = 2.5$$

...

$$x^* = 2.418$$

d

$$f(x) = \sqrt{x} - \frac{1}{2}x^3 + 3; \quad m = -10$$

$$f'(x) = \frac{1}{2\sqrt{x}} - \frac{3}{2}x^2 = -10$$

$$\frac{1}{2\sqrt{x}} - \frac{3}{2}x^2 + 10 = 0$$

$$x_0 = 2.5$$

...

$$x^* = 2.622$$

**118/6**

a

$$f(x) = x^5 + x + 1$$

$$f'(x) = 5x^4 + 1 > 0$$

Die Funktion ist streng monoton steigend, d. h. sie hat genau eine Nullstelle.

b

$$x_0 = -1$$

...

$$x^* \approx -0.755$$

118/7

$$r = 9cm$$

$$V_K = \frac{4}{3}\pi r^3$$

$$V_Z = h\pi R^2 = \frac{1}{4}V_K = \frac{1}{3}\pi r^3$$

$$hR^2 = \frac{1}{3}r^3$$

$$R^2 + \left(\frac{h}{2}\right)^2 = r^2 \Rightarrow R^2 = r^2 - \frac{h^2}{4}$$

$$h\left(r^2 - \frac{h^2}{4}\right) = hr^2 - \frac{h^3}{4} = \frac{1}{3}r^3$$

$$81h - \frac{h^3}{4} = 243$$

$$-\frac{1}{4}h^3 + 81h - 243 = 0$$

$$\left(-\frac{1}{4}h^3 + 81h - 243\right)' = -\frac{3}{4}h^2 + 81$$

...

$$(h_1 \approx -19.345)$$

$$h_2 \approx 3.091$$

$$h_3 \approx 16.25$$

$$R_2 = \sqrt{r^2 - \frac{h_2^2}{4}} \approx 8.87$$

$$R_3 = \sqrt{r^2 - \frac{h_3^2}{4}} \approx 3.87$$

## 3.20 AB Kurvenuntersuchungen

AB/1

a

$$f_a(x) = x^2 - 2ax + 1$$

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

**Symmetrie**

$$f_a(-x) = x^2 + 2ax + 1 \neq f_a(x)$$

$$-f_a(x) = -x^2 + 2ax - 1 \neq f_a(-x)$$

$\Rightarrow$  keine Symmetrie erkennbar

**Nullstellen**

$$x^2 - 2ax + 1 = 0$$

$$x_{1/2} = \frac{2a \pm \sqrt{(-2a)^2 - 4 \cdot 1 \cdot 1}}{2 \cdot 1} = a \pm \sqrt{a^2 - 1}$$

**Extrema**

$$f'_a(x) = 2x - 2a = 0 \quad L = \{a\}$$

$$f''_a(x) = 2 > 0 \quad \Rightarrow TP(a|f_a(a) = -a^2 + 1)$$

**Wendepunkte**

$$f''_a(x) = 0 \quad L = \{\}$$

b



$$a = 1, 1.5, 0.5$$

c

$$f'_a(4) = 2 \cdot 4 - 2a = 1 \Rightarrow a = 3.5$$

d

$$x_{1/2} = a \pm \sqrt{a^2 - 1}$$

$$a^2 - 1 < 0 \quad \text{fuer } a < 1 \Rightarrow \text{keine Nullstelle}$$

$$a^2 - 1 = 0 \quad \text{fuer } a = 1 \Rightarrow 1 \text{ Nullstelle}$$

$$a^2 - 1 > 0 \quad \text{fuer } a > 1 \Rightarrow 2 \text{ Nullstellen}$$



### 3.20.1 Ortslinie

Der Graph, auf dem alle Tiefpunkte zu unterschiedlichen  $a$  liegen, heißt Ortslinie der Tiefpunkte:

$$T(a | -a^2 + 1)$$

$$x = a$$

$$y = -a^2 + 1$$

setze  $a$  aus  $x$ -Koordinate in  $y$  ein

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

Funktionsgleichung der Ortskurve der Tiefpunkte



AB/5

a

$$f_a(x) = \frac{1}{2}x^4 - ax^2$$

$$a > 0$$

### Symmetrie

$$f_a(-x) = \frac{1}{2}x^4 - ax^2 = f_a(x)$$

$\Rightarrow$  Achsensymmetrie

$$-f_a(x) = -\frac{1}{2}x^4 + ax^2 \neq f_a(-x)$$

$\Rightarrow$  keine Punktsymmetrie erkennbar

### Nullstellen

$$\frac{1}{2}x^4 - ax^2 = 0 \quad | \div x^2$$

$$\frac{1}{2}x^2 - a = 0$$

$$L = \{0; \pm\sqrt{2a}\}$$

### Extrema

$$f'_a(x) = 2x^3 - 2ax = 0 \quad | \div x$$

$$2x^2 - 2a = 0$$

$$x = \pm\sqrt{a}$$

$$f''_a(x) = 6x^2 - 2a$$

$$f''_a(\pm\sqrt{a}) = 4a > 0 \Rightarrow TP$$

$$f''_a(0) = -2a < 0 \Rightarrow HP$$

### Wendepunkte

$$f''_a(x) = 0 \quad L = \{\pm\sqrt{\frac{a}{3}}\}$$

$$f'''_a(x) = 12x$$

$$f'''_a(\sqrt{\frac{a}{3}}) = 12\sqrt{\frac{a}{3}} > 0 \Rightarrow RLWP$$

$$f'''_a(-\sqrt{\frac{a}{3}}) = -12\sqrt{\frac{a}{3}} < 0 \Rightarrow LRWP$$

b

$$T(\pm\sqrt{a} - \frac{1}{2}a^2)$$

$$f_T(x) = -\frac{1}{2}x^4$$

$$W(\pm\sqrt{\frac{a}{3}} - \frac{5a^2}{18})$$

$$f_W(x) = -\frac{5}{2}x^4$$



**AB/4**

a

$$f_a(x) = \frac{1}{4}(x^4 - ax^2) \quad WP(1|f_a(1))$$

$$f_a(-x) = \frac{1}{4}(x^4 - ax^2) = f_a(x)$$

$\Rightarrow$  Achsensymmetrie  $\Rightarrow$  zweiter Wendepunkt bei  $x = -1$

$$f_a''(\pm 1) = 3 \cdot 1^2 - \frac{1}{2}a = 0 \quad \Rightarrow a = 6$$

$$f_6(\pm 1) = \frac{1}{4}(1^4 - 6 \cdot 1^2) = -\frac{5}{4}$$

b

$$f_a''(x) = 3x^2 - \frac{1}{2}a = 0 \quad L = \{\pm\sqrt{\frac{a}{6}}\}$$

$$t_1(x) = -\frac{a}{3}\sqrt{\frac{a}{6}}x + \frac{a^2}{48}$$

$$t_2(x) = \frac{a}{3}\sqrt{\frac{a}{6}}x + \frac{a^2}{48}$$

### 3.21 Wiederholung

115/9

$$O(a, h) = a^2 + 4ah$$

$$V(a, h) = a^2 \cdot h = 40dm^3 \Rightarrow h = \frac{40dm^3}{a^2}$$

$$O(a) = a^2 + 160dm^3 \cdot a^{-1}$$

$$O'(a) = 2a - 160dm^3 \cdot a^{-2}$$

$$a = \sqrt[3]{80dm^3} \approx 4.309dm$$

$$h = \frac{40dm^3}{\sqrt[3]{80dm^3}^2} = \sqrt[3]{10} \approx 2.154dm$$

119/8

$$h(0) = 400m$$

$$h(370) = 0$$

- a  $h'$  beschreibt das Gefälle des Flusses und gibt den Höhenverlust des Wassers pro Kilometer an
- b ein Stausee hat einen waagerechten Abschnitt des Graphen zur Folge, ein Wasserfall eine Sprungstelle
- c  $h'$  ist nicht positiv, da das Wasser ausschließlich nach unten fließt; die Einheit ist  $\frac{m}{km}$

## 3.22 Sinus- und Kosinusfunktion

$$f(\alpha) = \sin(\alpha)$$

$$f(x) = \sin(x)$$

$$\frac{\alpha}{360^\circ} = \frac{x}{U} \quad U = 2\pi r$$

$$x = \frac{\alpha \cdot 2\pi}{360^\circ} \quad \alpha = \frac{x \cdot 360^\circ}{2\pi}$$

wichtige x-Koordinaten

$$x = 3.14\dots = \pi \quad x = 6.28\dots = 2\pi$$

$$x = 1.57\dots = \frac{\pi}{2} \quad x = 4.71\dots = \frac{3\pi}{2}$$

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

### 3.22.1 Vielfachheit der Lösungen von (geometrischen) Gleichungen

$$\sin(x) = 0.7$$

$$x = \arcsin(0.7) \approx 0.775$$

$$x_n \approx 0.775 + n \cdot 2\pi$$

$$x_m \approx \pi - 0.775 + m \cdot 2\pi$$

$$n, m \in \mathbb{Z}$$

$$\cos(x) = 0.3$$

$$x = \arccos(0.3) \approx 1.266$$

$$x_n \approx 1.266 + n \cdot 2\pi$$

$$x_m \approx -1.266 + n \cdot 2\pi$$

$$n, m \in \mathbb{Z}$$

128/6

a

$$\sin(x) = 0.9396$$

$$x = \arcsin(0.9396) \approx 1.221$$

$$x_n \approx 1.221 + n \cdot 2\pi$$

$$x_m \approx \pi - 1.221 + m \cdot 2\pi$$

b

$$\sin(x) = 0.5519$$

$$x = \arcsin(0.5519) \approx 0.585$$

$$x_n \approx 0.585 + n \cdot 2\pi$$

$$x_m \approx \pi - 0.585 + m \cdot 2\pi$$

c

$$\cos(x) = 0.6294$$

$$x = \arcsin(0.6294) \approx 0.890$$

$$x_n \approx 0.890 + n \cdot 2\pi$$

$$x_m \approx -0.890 + m \cdot 2\pi$$

d

$$\cos(x) = -0.8870$$

$$x = \arcsin(-0.8870) \approx 2.662$$

$$x_n \approx 2.662 + n \cdot 2\pi$$

$$x_m \approx -2.662 + m \cdot 2\pi$$

128/7

a

$$\sin(x) = 0.63$$

$$x = \arcsin(0.63) \approx 0.682$$

$$x_n \approx 0.682 + n \cdot 2\pi$$

$$x_m \approx \pi - 0.682 + m \cdot 2\pi$$

b

$$\cos(x) = -0.55$$

$$x = \arcsin(-0.55) \approx 2.153$$

$$x_n \approx 2.153 + n \cdot 2\pi$$

$$x_m \approx -2.153 + m \cdot 2\pi$$

c

$$\sin(x) = -\frac{1}{2}$$

$$x = \arcsin\left(-\frac{1}{2}\right) \approx -0.524$$

$$x_n \approx -0.524 + n \cdot 2\pi$$

$$x_m \approx \pi + 0.524 + m \cdot 2\pi$$

d

$$\cos(x) = -\frac{1}{2}\sqrt{2}$$

$$x = \arcsin\left(-\frac{1}{2}\sqrt{2}\right) \approx 2.356$$

$$x_n \approx 2.356 + n \cdot 2\pi$$

$$x_m \approx -2.356 + m \cdot 2\pi$$

### 3.22.2 Die allgemeine Sinusfunktion

$$f(x) = y = a \cdot \sin(b(x - c)) + d$$

a Streckung entlang der y-Achse (Amplitude)

b Streckung entlang der x-Achse (Perioden pro  $2\pi$ , Periodenlänge  $p = \frac{2\pi}{b}$ )

c Verschiebung in x-Richtung (für  $c > 0$  nach rechts)

d Verschiebung in y-Richtung

### 3.22.3 AB Die Funktionen $f: x \mapsto a \cdot \sin(b(x - c))$ und ihre Graphen

AB/3

a

$$f(x) = 3 \cdot \sin\left(\frac{1}{2}(x - \pi)\right)$$

$$p = 4\pi$$

$$3 \cdot \sin\left(\frac{1}{2}(x - \pi)\right)$$

$$x_H = 2\pi + n \cdot p$$

$$x_T = n \cdot p$$

$$x_W = \pi + \frac{n}{2} \cdot p$$

b

$$f(x) = 2 \cdot \sin\left(\frac{2}{3}x\right)$$

$$p = 3\pi$$

$$x_H = \frac{3}{4}\pi + n \cdot p$$

$$x_T = 2\frac{1}{4}\pi + n \cdot p$$

$$x_W = \frac{n}{2} \cdot p$$

c

$$f(x) = 4 \cdot \sin\left(x - \frac{\pi}{6}\right)$$

$$p = 2\pi$$

$$x_H = \frac{2}{3}\pi + n \cdot p$$

$$x_T = \frac{5}{3}\pi + n \cdot p$$

$$x_W = \frac{\pi}{6} + \frac{p}{2}$$



AB/5

$$f(x) = a \cdot \sin(b \cdot x + e)$$

a

$$f(x) = 20 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{20} \cdot x - \frac{\pi}{2}\right)$$

b

$$f(x) = 6 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{12} \cdot x + \frac{\pi}{4}\right)$$

c

$$f(x) = 4 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} \cdot x - \frac{\pi}{2}\right)$$

AB/6

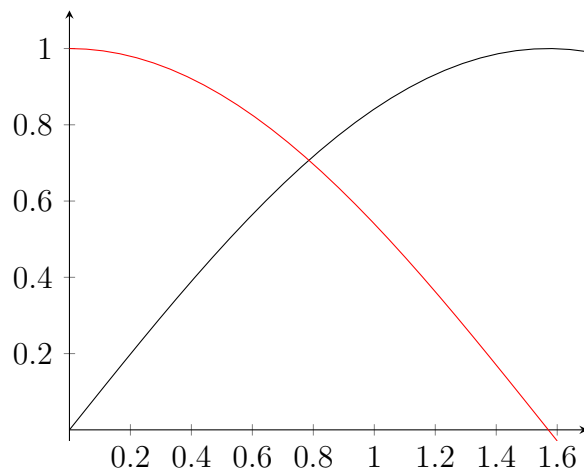
$$f(t) = a \cdot \sin(b(t - c)) \quad -2 \leq t \leq 13$$

a Die Sonne bewegt sich aus Sicht der Aufnahmen periodisch auf und ab.  
Ihr Höhenverlauf lässt sich daher über eine Sinuskurve modellieren.

b

$$f(x) = a \cdot \sin\left(\frac{\pi}{12} \cdot (x - 6)\right)$$

### 3.22.4 Ableitung der Sinusfunktion



$\sin(x)$ ,  $\cos(x)$

## Annäherung mit Taylorreihe

$$f(x) = f(a) + \frac{f'(a)}{1!}(x-a)^1 + \frac{f''(a)}{2!}(x-a)^2 + \frac{f'''(a)}{3!}(x-a)^3 + \dots$$

$$a = x_0 = 0$$

$$f(x_0) = f(0) + \frac{f'(0)}{1!}x^1 + \frac{f''(0)}{2!}x^2 + \frac{f'''(0)}{3!}x^3 + \dots$$

$$\sin(x) = 0 + x^1 - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \dots$$

$$(\sin(x))' = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \frac{x^6}{6!} = \dots = \cos(x)$$

$$f(x) = \sin(x)$$

$$f'(x) = \cos(x)$$

$$f''(x) = -\sin(x)$$

$$f'''(x) = -\cos(x)$$

$$f^{(4)}(x) = \sin(x)$$

...

130/1

a

$$f(x) = 12 \cdot \sin(x)$$

$$f'(x) = 12 \cdot \cos(x)$$

b

$$f(x) = -2 \cdot \cos(x)$$

$$f'(x) = -2 \cdot (-\sin(x))$$

c

$$f(x) = \sqrt{5} \cdot \cos(x)$$

$$f'(x) = \sqrt{5} \cdot (-\sin(x))$$

d

$$f(x) = \frac{1}{\pi} \cdot \sin(x)$$
$$f'(x) = \frac{1}{\pi} \cdot \cos(x)$$

e

$$f(x) = 5x^3 - \sin(x)$$
$$f'(x) = 15x^2 - \cos(x)$$

f

$$f(x) = 2 \cdot \cos(x) - \sin(x)$$
$$f'(x) = 2 \cdot (-\sin(x)) - \cos(x)$$

130/3

b

$$f(x) = 3 \cdot \sin(x)$$
$$P\left(\frac{5\pi}{3} | ?\right)$$
$$y = f\left(\frac{5\pi}{3}\right) \approx -2.598$$
$$f'(x) = 3 \cdot \cos(x)$$
$$m_t = f'\left(\frac{5\pi}{3}\right) = 1.5$$
$$b_t = -2.598 - 1.5 \cdot \frac{5\pi}{3} \approx -10.452$$
$$t(x) = 1.5x - 10.452$$

130/4

c

$$\begin{aligned}f(x) &= 2 \cdot \sin(x) - \cos(x); \quad x \in [0; 2\pi] \\f'(x) &= 2 \cdot \cos(x) + \sin(x)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}f'(x) &= 0 = 2 \cdot \cos(x) + \sin(x) \\2 &= -\frac{\sin(x)}{\cos(x)} = -\tan(x) \Rightarrow x = \operatorname{atan}(-2) \\L &= \{\operatorname{atan}(-2) + n\pi\} \quad n \in \{1; 2\}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}f''(x) &= \cos(x) - 2 \cdot \sin(x) \\f''(\operatorname{atan}(-2) + \pi) &\approx -2.23 < 0 \\HP(\operatorname{atan}(-2) + \pi | f(\operatorname{atan}(-2) + \pi)) &= HP(2.034 | 2.236) \\f''(\operatorname{atan}(-2) + 2\pi) &\approx 2.23 > 0 \\TP(\operatorname{atan}(-2) + 2\pi | f(\operatorname{atan}(-2) + 2\pi)) &= TP(5.176 | -2.236)\end{aligned}$$

d

$$\begin{aligned}f(x) &= 4 \cdot \cos(x) + 2x; \quad x \in [0; 2\pi] \\f'(x) &= -4 \cdot \sin(x) + 2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}f'(x) &= 0 = -4 \cdot \sin(x) + 2 \\0.5 &= \sin(x) \Rightarrow x = \operatorname{asin}(0.5) \\L &= \{\operatorname{asin}(0.5); \pi - \operatorname{asin}(0.5)\}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}f''(x) &= -4 \cdot \cos(x) \\f''(\operatorname{asin}(0.5)) &\approx -3.46 < 0 \\HP(\operatorname{asin}(0.5) | f(\operatorname{asin}(0.5))) &= HP(0.524 | 4.51) \\f''(\pi - \operatorname{asin}(0.5)) &\approx 3.46 > 0 \\TP(\pi - \operatorname{asin}(0.5) | f(\pi - \operatorname{asin}(0.5))) &= TP(2.618 | 1.772)\end{aligned}$$

## 3.23 Neue Funktionen aus alten Funktionen

gegeben sind

$$f(x) = \sin(x)$$

$$g(x) = \sqrt{x}$$

$$h(x) = x^2 + 5$$

Produkt

$$i(x) = f(x) \cdot g(x) = \sin(x) \cdot \sqrt{x}$$

$$j(x) = h(x) \cdot f(x) = (x^2 + 5) \cdot \sin(x)$$

Quotient

$$k(x) = \frac{g(x)}{f(x)} = \frac{\sqrt{x}}{\sin(x)}$$

$$l(x) = \frac{h(x)}{g(x)} = \frac{x^2 + 5}{\sqrt{x}}$$

Verkettung

$$m(x) = f(g(x)) = \sin(\sqrt{x})$$

$$n(x) = g(f(x)) = \sqrt{\sin(x)}$$

$$o(x) = f(g(h(x))) = \sin(\sqrt{x^2 + 5})$$

### 3.23.1 Ableitungsregeln

Produktregel

$$k(x) = f(x) \cdot g(x)$$

$$\begin{aligned} k'(x) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) \cdot g(x+h) - f(x) \cdot g(x)}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) \cdot g(x+h) - \cancel{f(x) \cdot g(x+h)} + \cancel{f(x) \cdot g(x+h)} - f(x) \cdot g(x)}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{[f(x+h) - f(x)] \cdot g(x+h) + f(x) \cdot [g(x+h) - g(x)]}{h} \\ &= \mathbf{f'(x)} \cdot \mathbf{g(x)} + \mathbf{f(x)} \cdot \mathbf{g'(x)} \end{aligned}$$

## Kettenregel

$$\begin{aligned}k(x) &= f(g(x)) \\k'(x) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(g(x+h)) - f(g(x))}{h} \\&= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(g(x+h)) - f(g(x))}{g(x+h) - g(x)} \cdot \frac{g(x+h) - g(x)}{h} \\&= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(z+i) - f(z)}{i} \cdot g'(x) \\&= f'(z) \cdot g'(x) \\&= \mathbf{f'(g(x)) \cdot g'(x)}\end{aligned}$$

$$g(x) = z \quad g(x+h) = z+i$$

## Beispiele

$$\begin{aligned}k(x) &= (x^2 + 2x - 7) \cdot \sin(x) \\k'(x) &= (2x + 2) \cdot \sin(x) + (x^2 + 2x - 7) \cdot \cos(x)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}k(x) &= \sin(x^3 - 5x) \\k'(x) &= \cos(x^3 - 5x) \cdot (3x^2 - 5)\end{aligned}$$

135/1

a

$$\begin{aligned}f(x) &= (x+2)^4 \\f'(x) &= 4(x+2)^3\end{aligned}$$

b

$$\begin{aligned}f(x) &= (8x+2)^3 \\f'(x) &= 3(8x+2)^2 \cdot 8 = 24(8x+2)^2\end{aligned}$$

c

$$\begin{aligned}f(x) &= \left(\frac{1}{2} - 5x\right)^3 \\f'(x) &= 3\left(\frac{1}{2} - 5x\right)^2 \cdot (-5) = -15\left(\frac{1}{2} - 5x\right)^2\end{aligned}$$

d

$$f(x) = \frac{1}{4}(x^2 - 5)^2$$
$$f'(x) = \frac{1}{2}(x^2 - 5) \cdot 2x = x^3 - 5x$$

135/2

a

$$f(x) = \frac{1}{(x-1)^2}$$
$$f'(x) = -2(x-1)^{-3}$$

b

$$f(x) = \frac{1}{(3x-1)^2}$$
$$f'(x) = -2(3x-1)^{-3} \cdot 3 = -6(3x-1)^{-3}$$

e

$$f(x) = \sin(2x)$$
$$f'(x) = \cos(2x) \cdot 2 = 2\cos(2x)$$

f

$$f(x) = \sin(2x + \pi)$$
$$f'(x) = \cos(2x + \pi) \cdot 2 = 2\cos(2x + \pi) = -2\cos(2x)$$

138/1

g

$$f(x) = \frac{2}{x} \cdot \cos(x)$$
$$f'(x) = -2x^{-2} \cdot \cos(x) - \frac{2}{x} \cdot \sin(x)$$

h

$$f(x) = \sin(x) \cdot \cos(x)$$
$$f'(x) = (\cos(x))^2 - (\sin(x))^2 = \cos(2x)$$

i

$$f(x) = x^2 \cdot \sin(x)$$
$$f'(x) = 2x \cdot \sin(x) + x^2 \cdot \cos(x)$$

j

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{x}} \cdot \cos(x)$$
$$f'(x) = -\frac{\cos(x)}{2\sqrt{x^3}} - \frac{\sin(x)}{\sqrt{x}}$$

k

$$f(x) = \frac{\pi}{4} \cdot \sin(x) \cdot (2 - x)$$
$$f'(x) = \frac{\pi}{4} \cdot \cos(x) \cdot (2 - x) - \frac{\pi}{4} \cdot \sin(x)$$

l

$$f(x) = \sqrt{3} \cdot \sqrt{x}$$
$$f'(x) = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{x}}$$

135/4

a

$$f(x) = 0.25 \cdot \sin(2x + \pi)$$
$$f'(x) = 0.25 \cdot \cos(2x + \pi) \cdot 2 = -0.5 \cdot \cos(2x)$$

b

$$f(x) = \frac{2}{3} \cdot \sin(\pi - 3x)$$
$$f'(x) = \frac{2}{3} \cdot \cos(\pi - 3x) \cdot (-3) = 2 \cdot \cos(3x)$$

c

$$f(x) = -\cos(x^2 + 1)$$
$$f'(x) = \sin(x^2 + 1) \cdot 2x$$



d

$$f(x) = \frac{1}{3} \cdot (\cos(x))^2$$
$$f'(x) = \frac{1}{3} \cdot 2 \cdot \cos(x) \cdot (-\sin(x)) = -\frac{2}{3} \cdot \cos(x) \cdot \sin(x)$$

e

$$f(x) = \sqrt{3x}$$
$$f'(x) = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3x}} \cdot 3 = \frac{3}{2\sqrt{3x}}$$

f

$$f(x) = \sqrt{3+x}$$
$$f'(x) = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3+x}} \cdot 1 = \frac{1}{2\sqrt{3+x}}$$

g

$$f(x) = \sqrt{7x-5}$$
$$f'(x) = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{7x-5}} \cdot 7 = \frac{7}{2 \cdot \sqrt{7x-5}}$$

h

$$f(x) = \sqrt{7x^2-5}$$
$$f'(x) = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{7x^2-5}} \cdot 14x = \frac{7x}{\sqrt{7x^2-5}}$$

i

$$f(x) = \frac{1}{\sin(x)}$$
$$f'(x) = -\frac{1}{(\sin(x))^2} \cdot \cos(x) = -\frac{\cos(x)}{(\sin(x))^2}$$

## Ableitungen mit mehr als zwei Funktionen

$$\begin{aligned}l &= g \cdot [h \cdot k] \\l' &= g' \cdot h \cdot k + g \cdot [h' \cdot k + h \cdot k'] \\&= g' \cdot h \cdot k + g \cdot h' \cdot k + g \cdot h \cdot k'\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}l &= g(h(k)) \\l' &= g'(h(k)) \cdot h'(k) \cdot k'\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}l &= g \cdot h(k) \\l' &= g' \cdot h(k) + g \cdot h'(k) \cdot k'\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}l &= g(h \cdot k) \\l' &= g'(h \cdot k) \cdot [h' \cdot k + h \cdot k']\end{aligned}$$

## Quotientenregel

$$\begin{aligned}l &= \frac{g}{h} = g \cdot h^{-1} \\l' &= g' \cdot h^{-1} + g \cdot [-h^{-2} \cdot h'] \\&= g' \cdot h^{-1} - g \cdot h^{-2} \cdot h' \\&= \frac{g'}{h} - \frac{g \cdot h'}{h^2} = \frac{g' \cdot h}{h \cdot h} - \frac{g \cdot h'}{h^2} \\&= \frac{g' \cdot h - g \cdot h'}{h^2}\end{aligned}$$

138/2

e

$$\begin{aligned}f(x) &= (5 - 4x)^3 \cdot x^{-2} \\f'(x) &= 3(5 - 4x)^2 \cdot (-4) \cdot x^{-2} + (5 - 4x)^3 \cdot (-2x^{-3}) \\&= -\frac{2 \cdot (5 - 4x)^2 \cdot (2x + 5)}{x^3}\end{aligned}$$

f

$$\begin{aligned}f(x) &= 3x \cdot \cos(2x) \\f'(x) &= 3 \cdot \cos(2x) + 3x \cdot (-\sin(2x)) \cdot 2 \\&= 3 \cdot (\cos(2x) - 2x \cdot \sin(2x))\end{aligned}$$

g

$$\begin{aligned}f(x) &= 3x \cdot (\sin(x))^2 \\f'(x) &= 3 \cdot (\sin(x))^2 + 3x \cdot 2 \cdot \sin(x) \cdot \cos(x) \\&= 3 \cdot \sin(x) \cdot (\sin(x) + 2x \cdot \cos(x))\end{aligned}$$

h

$$\begin{aligned}f(x) &= (2x - 1)^2 \cdot \sqrt{x} \\f'(x) &= 2(2x - 1) \cdot 2 \cdot \sqrt{x} + (2x - 1)^2 \cdot \frac{1}{2\sqrt{x}} \\&= \frac{(2x - 1) \cdot (10x - 1)}{2\sqrt{x}}\end{aligned}$$

i

$$\begin{aligned}f(x) &= 0.5x^2 \cdot \sqrt{4 - x} \\f'(x) &= x \cdot \sqrt{4 - x} + 0.5x^2 \cdot \frac{1}{2\sqrt{4 - x}} \cdot (-1) \\&= \frac{(4 - 1.25x) \cdot x}{\sqrt{4 - x}}\end{aligned}$$

**140/2**

a

$$\begin{aligned}f(x) &= \frac{1 - x^2}{3x + 5} \\f'(x) &= \frac{-2x \cdot (3x + 5) - (1 - x^2) \cdot 3}{(3x + 5)^2} \\&= -\frac{(3x + 1) \cdot (x + 3)}{(3x + 5)^2}\end{aligned}$$

b

$$\begin{aligned}g(x) &= \frac{\sqrt{x}}{x + 2} \\g'(x) &= \frac{\frac{1}{2\sqrt{x}} \cdot (x + 2) - \sqrt{x} \cdot 1}{(x + 2)^2} \\&= \frac{2 - x}{2\sqrt{x} \cdot (x + 2)^2}\end{aligned}$$

c

$$h(x) = \frac{3 \cdot \sin(x)}{6x - 1}$$

$$h'(x) = \frac{3 \cdot \cos(x) \cdot (6x - 1) - 3 \cdot \sin(x) \cdot 6}{(6x - 1)^2}$$

d

$$k(x) = \frac{\sin(x)}{\cos(x)}$$

$$k'(x) = \frac{\cos(x) \cdot \cos(x) - \sin(x) \cdot (-\sin(x))}{(\cos(x))^2}$$

$$= 1 + (\tan(x))^2$$

## 3.24 Exponentialfunktionen - Ableitung

$$f(x) = 2^x \quad f'(x) \quad g(x) = 4^x \quad g'(x)$$



Zwischen  $2^x$  und  $4^x$  liegt eine Exponentialfunktion, deren Ableitungsfunktion genau der Ursprungsfunktion entspricht. Sie wird natürliche Exponentialfunktion genannt.

$$f(x) = e^x$$

$$\text{Eulersche Zahl } e = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n \approx 2.71828$$

$$f(x) = e^x$$

$$f'(x) = e^x$$

$$f''(x) = e^x$$

$$\dots$$

$$e^x \leftrightarrow \log_e(x) = \ln(x)$$

$$\Rightarrow e^{\ln(x)} = \ln(e^x) = x$$

$$2^x = 5^{x \cdot \frac{\log(2)}{\log(5)}} = 5^{x \cdot \log_5(2)}$$

$$2^x = e^{x \cdot \ln(2)}$$

$$10^x = e^{x \cdot \ln(10)}$$

$$f(x) = e^{x \cdot \ln(2)} = 2^x$$

$$f'(x) = e^{x \cdot \ln(2)} \cdot \ln(2) = 2^x \cdot \ln(2) \approx 2^x \cdot 0.7$$

$$f(x) = e^{x \cdot \ln(4)} = 4^x$$

$$f'(x) = e^{x \cdot \ln(4)} \cdot \ln(4) = 4^x \cdot \ln(4) \approx 4^x \cdot 1.4$$

142/3

a

$$f(x) = x \cdot e^x$$

$$f'(x) = 1 \cdot e^x + x e^x = e^x \cdot (x + 1)$$

b

$$f(x) = \frac{e^x}{x}$$

$$f'(x) = \frac{e^x \cdot x - e^x \cdot 1}{x^2} = \frac{e^x \cdot (x - 1)}{x^2}$$

c

$$f(x) = \frac{x}{e^x}$$

$$f'(x) = \frac{1 \cdot e^x - x \cdot e^x}{(e^x)^2} = \frac{1 - x}{e^x}$$

d

$$\begin{aligned}f(x) &= (x+1) \cdot e^x \\f'(x) &= 1 \cdot e^x + (x+1) \cdot e^x = e^x \cdot (x+2)\end{aligned}$$

e

$$\begin{aligned}f(x) &= \frac{x}{e^{-0.5x}} \\f'(x) &= \frac{1 \cdot e^{-0.5x} - x \cdot (-0.5) \cdot e^{-0.5x}}{(e^{-0.5x})^2} = e^{0.5x} \cdot (1 + 0.5x)\end{aligned}$$

f

$$\begin{aligned}f(x) &= \frac{e^x + 1}{x} \\f'(x) &= \frac{e^x \cdot x - (e^x + 1) \cdot 1}{x^2} = \frac{e^x \cdot (x-1) - 1}{x^2}\end{aligned}$$

g

$$\begin{aligned}f(x) &= \frac{e^x}{x-1} \\f'(x) &= \frac{e^x \cdot (x-1) - e^x \cdot 1}{(x-1)^2} = \frac{e^x \cdot (x-2)}{(x-1)^2}\end{aligned}$$

h

$$\begin{aligned}f(x) &= \frac{e^{3x}}{x+2} \\f'(x) &= \frac{3 \cdot e^{3x} \cdot (x+2) - e^{3x} \cdot 1}{(x+2)^2} = \frac{e^{3x} \cdot (3x+5)}{(x+2)^2}\end{aligned}$$

i

$$\begin{aligned}f(x) &= x^2 + x \cdot e^{0.1x} = x^2 \cdot \left(1 + \frac{e^{0.1x}}{x}\right) \\f'(x) &= 2x \cdot \left(1 + \frac{e^{0.1x}}{x}\right) + x^2 \cdot \frac{e^{0.1x} \cdot (0.1x - 1)}{x^2} = e^{0.1x} \cdot (0.1x + 1) + 2x\end{aligned}$$

j

$$\begin{aligned}f(x) &= x \cdot e^{-2x+1} \\f'(x) &= 1 \cdot e^{-2x+1} + x \cdot (-2e^{-2x+1}) = e^{1-2x} \cdot (1-2x)\end{aligned}$$

k

$$f(x) = x^2 \cdot e^{ax}$$

$$f'(x) = 2x \cdot e^{ax} + x^2 \cdot a \cdot e^{ax} = x \cdot e^{ax} \cdot (2 + ax)$$

l

$$f(x) = x \cdot e^{2x^2+1}$$

$$f'(x) = 1 \cdot e^{2x^2+1} + x \cdot e^{2x^2+1} \cdot 4x = e^{2x^2+1} \cdot (4x^2 + 1)$$

### 3.24.1 Basis $\neq e$

$$f(x) = 10^x = (e^z)^x = e^{ln(10) \cdot x}$$

$$e^z = 10 \quad \Rightarrow \quad z = ln(10)$$

$$\Rightarrow \quad b^x = e^{ln(b) \cdot x}$$

$$f'(x) = e^{ln(10) \cdot x} \cdot ln(10)$$

$$= 10^x \cdot ln(10)$$

$$\Rightarrow \quad b^x \cdot ln(b)$$

145/8

f

$$e^{2x} + 10 = 6.5 \cdot e^x \quad | \text{subst. } e^x = z$$

$$z^2 + 10 = 6.5z \quad | - 6.5z$$

$$z^2 - 6.5z + 10 = 0$$

$$z_{1/2} = \frac{6.5 \pm \sqrt{42.25 - 40}}{2}$$

$$z_1 = 4 \quad z_2 = 2.5 \quad | \text{resubst.}$$

$$z_1 = 4 = e^x \quad | ln$$

$$x_1 = ln(4) \approx 1.386$$

$$z_2 = 2.5 = e^x \quad | ln$$

$$x_2 = ln(2.5) \approx 0.916$$

a

$$e^{2x} - 6 \cdot e^x + 8 = 0 \quad | \text{subst. } e^x = z$$

$$z^2 - 6z + 8 = 0$$

$$z_{1/2} = \frac{6 \pm \sqrt{36 - 32}}{2}$$

$$z_1 = 4 \quad z_2 = 2 \quad | \text{resubst.}$$

$$z_1 = 4 = e^x \quad | \ln$$

$$x_1 = \ln(4) \approx 1.386$$

$$z_2 = 2 \quad | \ln$$

$$x_2 = \ln(2) \approx 0.693$$

b

$$e^x - 2 - \frac{15}{e^x} = 0 \quad | \text{subst. } e^x = z$$

$$z - 2 - \frac{15}{z} = 0 \quad | \cdot z$$

$$z^2 - 2z - 15 = 0$$

$$z_{1/2} = \frac{2 \pm \sqrt{4 + 60}}{2}$$

$$z_1 = 5 \quad (z_2 = -3) \quad | \text{resubst.}$$

$$z_1 = 5 = e^x \quad | \ln$$

$$x_1 = \ln(5) \approx 1.609$$



g

$$(e^{2x} - 6) \cdot (5 - e^{3x}) = 0 \quad | \text{subst. } e^x = z$$

$$(z^2 - 6) \cdot (5 - z^3) = 0$$

$$z^2 - 6 = 0 \quad | \sqrt{\phantom{x}}$$

$$z_1 = \sqrt{6} \approx 2.449 \quad | \text{resubst.}$$

$$z_1 = \sqrt{6} = e^x \quad | \ln$$

$$x_1 = \ln(\sqrt{6}) \approx 0.896$$

$$5 - z^3 = 0 \quad | \sqrt[3]{\phantom{x}}$$

$$z_2 = \sqrt[3]{5} \approx 1.710 \quad | \text{resubst.}$$

$$z_2 = \sqrt[3]{5} = e^x \quad | \ln$$

$$x_2 = \ln(\sqrt[3]{5}) \approx 0.536$$

h

$$2 \cdot e^x + 15 = 8 \cdot e^{-x} \quad | \text{subst. } e^x = z$$

$$2z + 15 = \frac{8}{z} \quad | - \frac{8}{z}$$

$$2z + 15 - \frac{8}{z} = 0 \quad | \cdot z$$

$$2z^2 + 15z - 8 = 0$$

$$z_{1/2} = \frac{-15 \pm \sqrt{225 + 64}}{4}$$

$$z_1 = 0.5 \quad (z_2 = -8) \quad | \text{resubst.}$$

$$z_1 = 0.5 = e^x \quad | \ln$$

$$x = \ln(0.5) \approx -0.693$$

146/9

$$h(t) = 0.02 \cdot e^{kt}$$

a

$$h(0) = 0.02$$

b

$$h(6) = 0.02 \cdot e^{6k} = 0.4$$

$$e^{6k} = 20$$

$$6k = \ln(20)$$

$$k = \frac{\ln(20)}{6} \approx 0.499$$

c

$$h(9) = 0.02 \cdot e^{0.499 \cdot 9} \approx 1.784$$

d

$$h(t) = 0.02 \cdot e^{0.499t} = 3$$

$$e^{0.499t} = 150$$

$$0.499t = \ln(150)$$

$$t = \frac{\ln(150)}{0.499} \approx 10.041$$

e

$$h(t+1) - h(t) = 1.5$$

$$0.02 \cdot e^{k \cdot (t+1)} - 0.02 \cdot e^{k \cdot t} = 1.5$$

$$0.02e^{kt} \cdot (e^k - 1) = 1.5$$

$$e^{kt} \cdot (e^k - 1) = 75$$

$$0.647e^{0.499t} = 75$$

$$e^{0.499t} = 115.92$$

$$0.499t = \ln(115.92)$$

$$t = \frac{\ln(115.92)}{0.499} \approx 9.525$$

f

$$h'(t) = 0.02k \cdot e^{kt} = 1$$

$$0.02 \cdot 0.499 \cdot e^{0.499t} = 1$$

$$e^{0.499t} = 100.2$$

$$0.499t = \ln(100.2)$$

$$t = \frac{\ln(100.2)}{0.499} \approx 9.233$$

g

$$t \geq 9$$

$$k(t) = 3.5 - 8.2 \cdot e^{-0.175t}$$

$$k(t) = 3.5 - 8.2 \cdot e^{-0.175t} = 3$$

$$e^{-0.175t} \approx 0.061$$

$$-0.175t \approx \ln(0.061)$$

$$t \approx \frac{\ln(0.061)}{-0.175} \approx 15.982$$

$$k(t+1) - k(t) = 0.2$$

$$3.5 - 8.2 \cdot e^{-0.175 \cdot (t+1)} - 3.5 + 8.2 \cdot e^{-0.175t} = 0.2$$

$$-8.2 \cdot e^{-0.175 \cdot (t+1)} + 8.2 \cdot e^{-0.175t} = 0.2$$

$$-8.2 \cdot e^{-0.175t} \cdot (e^{-0.175} - 1) = 0.2$$

$$1.316 \cdot e^{-0.175t} \approx 0.2$$

$$e^{-0.175t} \approx 0.152$$

$$-0.175t \approx \ln(0.152)$$

$$t \approx \frac{\ln(0.152)}{-0.175} \approx 10.765$$

## 3.25 Wiederholung

### 3.25.1 Sinusfunktionen und Newton-Verfahren

130/8

$$P(x_0|f(x_0)) \quad Q(x_0|g(x_0)) \quad 0 \leq x \leq 2\pi$$

a

$$\begin{aligned} f(x) &= 2 \cdot \sin(x) & g(x) &= x^2 \\ f'(x) &= 2 \cdot \cos(x) & g'(x) &= 2x \\ h(x) &= f'(x) - g'(x) = 2 \cdot \cos(x) - 2x = 0 \\ h'(x) &= -2 \cdot \sin(x) - 2 \end{aligned}$$

$$x_0 = 0$$

$$x_1 = x_0 - \frac{h(x_0)}{h'(x_0)} = 1$$

$$x_2 = x_1 - \frac{h(x_1)}{h'(x_1)} \approx 0.75036$$

$$x_3 = x_2 - \frac{h(x_2)}{h'(x_2)} \approx 0.73911$$

$$x_4 = x_3 - \frac{h(x_3)}{h'(x_3)} \approx 0.73908$$

$$x_5 = x_4 - \frac{h(x_4)}{h'(x_4)} \approx 0.73909$$

$$x^* \approx 0.7391$$

$$P(x^*|f(x^*)) \approx P(0.7391|1.3472)$$

$$Q(x^*|g(x^*)) \approx Q(0.7391|0.5463)$$

b

$$\begin{aligned}f(x) &= \sin(x) + 2 \cdot \cos(x) & g(x) &= x^3 \\f'(x) &= \cos(x) - 2 \cdot \sin(x) & g'(x) &= 3x^2 \\h(x) &= f'(x) - g'(x) = \cos(x) - 2 \cdot \sin(x) - 3x^2 = 0 \\h'(x) &= -\sin(x) - 2 \cdot \cos(x) - 6x\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}x_0 &= 0 \\x_1 &= x_0 - \frac{h(x_0)}{h'(x_0)} = 0.5 \\x_2 &= x_1 - \frac{h(x_1)}{h'(x_1)} \approx 0.34120 \\x_3 &= x_2 - \frac{h(x_2)}{h'(x_2)} \approx 0.32336 \\x_4 &= x_3 - \frac{h(x_3)}{h'(x_3)} \approx 0.32311 \\x_5 &= x_4 - \frac{h(x_4)}{h'(x_4)} \approx 0.32311 \\x^* &\approx 0.3231\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P(x^*|f(x^*)) &\approx P(0.3231|2.2140) \\Q(x^*|g(x^*)) &\approx Q(0.3231|0.0337)\end{aligned}$$

### 3.25.2 Produktregel

138/3

a

$$\begin{aligned}f(x) &= (2x - 8) \cdot \sin(x) & f'(x) &= 2 \cdot \cos(x) \\f(x) &= a \cdot b & f'(x) &= a' \cdot b + a \cdot b' \neq a' \cdot b' \\ \Rightarrow f'(x) &= 2 \cdot \sin(x) + (2x - 8) \cdot \cos(x)\end{aligned}$$

b

$$\begin{aligned}g(x) &= (2x - 3) \cdot (8 - x)^2 \\g'(x) &= \mathbf{2} \cdot (8 - x)^2 + (2x - 3) \cdot \mathbf{(16 - 2x)}\end{aligned}$$

### 3.25.3 Quotientenregel

140/11

a

$$f(x) = \sin(x) + \tan(x) = \sin(x) + \frac{\sin(x)}{\cos(x)}$$
$$f'(x) = \cos(x) + (\cos(x))^{-2}$$

b

$$f(x) = \sin(x) \cdot \tan(x) = \frac{(\sin(x))^2}{\cos(x)}$$
$$f'(x) = \sin(x) + \frac{\sin(x)}{(\cos(x))^2}$$

c

$$f(x) = \frac{\cos(x)}{\tan(x)} = \frac{(\cos(x))^2}{\sin(x)}$$
$$f'(x) = -2 \cdot \cos(x) - \frac{(\cos(x))^3}{(\sin(x))^2}$$

d

$$f(x) = \frac{\tan(x)}{2} = \frac{\sin(x)}{2 \cdot \cos(x)}$$
$$f'(x) = \frac{1}{2 \cdot (\cos(x))^2}$$

e

$$f(x) = \tan(2x) = \frac{\sin(2x)}{\cos(2x)}$$
$$f'(x) = \frac{2}{(\cos(2x))^2}$$

f

$$f(x) = \tan(x^2) = \frac{\sin(x^2)}{\cos(x^2)}$$
$$f'(x) = \frac{2x}{(\cos(x^2))^2}$$

g

$$f(x) = (\tan(x))^2 = \frac{(\sin(x))^2}{(\cos(x))^2}$$

$$f'(x) = \frac{2 \cdot \sin(x)}{(\cos(x))^3}$$

h

$$f(x) = \frac{2}{\tan(x)} = \frac{2 \cdot \cos(x)}{\sin(x)}$$

$$f'(x) = -\frac{2}{(\sin(x))^2}$$

### 3.25.4 Kurvendiskussion

146/13

$$f(x) = 80000 \cdot e^{0.002x}$$

$$0 \hat{=} 01.10.2002$$

a

$$92 \hat{=} 01.01.2003$$

$$f(92) = 80000 \cdot e^{0.002 \cdot 92} \approx 96161.27$$

$$457 \hat{=} 01.01.2004$$

$$f(457) = 80000 \cdot e^{0.002 \cdot 457} \approx 199542.38$$

b

$$f(x) = 80000 \cdot e^{0.002x} = 1000000$$

$$e^{0.002x} = 12.5$$

$$x = \frac{\ln(12.5)}{0.002} \approx 1262.86 \hat{=} 17.03.2006$$

$$f(x) = 80000 \cdot e^{0.002x} = 1000000000$$

$$e^{0.002x} = 12500$$

$$x = \frac{\ln(12500)}{0.002} \approx 4716.74 \hat{=} 31.08.2015$$

c

$$\begin{aligned}
 2 \cdot f(x_1) &= f(x_2) \\
 2 \cdot 80000 \cdot e^{0.002x_1} &= 80000 \cdot e^{0.002x_2} \\
 2 \cdot e^{0.002x_1} &= e^{0.002x_2} \\
 \ln(2) + 0.002x_1 &= 0.002x_2 \\
 x_2 - x_1 &= \frac{\ln(2)}{0.002} \approx 346.57
 \end{aligned}$$

d

$$\begin{aligned}
 p \cdot f(x_1) &= f(x_1 + 365) \\
 p \cdot 80000 \cdot e^{0.002x_1} &= 80000 \cdot e^{0.002 \cdot (x_1 + 365)} \\
 p \cdot e^{0.002x_1} &= e^{0.002x_1} \cdot e^{0.002 \cdot 365} \\
 p &= e^{0.002 \cdot 365} \approx 2.08 = 208\%
 \end{aligned}$$

e

$$\begin{aligned}
 365 &\hat{=} 01.10.2003 \\
 f(365) - f(364) &= 80000 \cdot e^{0.002 \cdot 365} - 80000 \cdot e^{0.002 \cdot 364} \approx 331.68 \\
 f'(x) &= 80000 \cdot 0.002 \cdot e^{0.002x} = 160 \cdot e^{0.002x} \\
 f(364.5) &\approx 331.68
 \end{aligned}$$

f

$$\begin{aligned}
 f(x+1) - f(x) &= 400 \\
 80000 \cdot e^{0.002 \cdot (x+1)} - 80000 \cdot e^{0.002x} &= 400 \\
 80000 \cdot e^{0.002x} \cdot (e^{0.002} - 1) &= 400 \\
 x = \ln\left(\frac{400}{80000 \cdot (e^{0.002} - 1)}\right) \cdot \frac{1}{0.002} &\approx 457.65 \hat{=} 02.01.2004 \\
 f'(x) &= 160 \cdot e^{0.002x} = 400 \\
 x = \ln\left(\frac{400}{160}\right) \cdot \frac{1}{0.002} &\approx 458.15 \hat{=} 03.01.2004
 \end{aligned}$$



146/10

$$v(t) = 2.5 \cdot (1 - e^{-0.1t})$$

a

$$v(0) = 0$$

$$v(10) \approx 1.58$$

b



c

$$v(t) = 2$$

$$t = -\frac{\ln(0.2)}{0.1} \approx 16.09$$

d

$$\lim_{t \rightarrow \infty} v(t) = 2.5$$

e

$$v(t) = 2.5 \cdot (1 - e^{-0.1t})$$

$$v(t+1) = 2.5 \cdot (1 - e^{-0.1 \cdot (t+1)})$$

$$v(t) < v(t+1)$$

$$2.5 \cdot (1 - e^{-0.1t}) < 2.5 \cdot (1 - e^{-0.1 \cdot (t+1)}) \quad | \div 2.5$$

$$1 - e^{-0.1t} < 1 - e^{-0.1 \cdot (t+1)} \quad | -1; \cdot (-1)$$

$$e^{-0.1t} > e^{-0.1 \cdot (t+1)} \quad | \ln()$$

$$-0.1t > -0.1 \cdot (t+1) \quad | \cdot (-10)$$

$$t < t+1$$

f

$$\Delta v = v(t_2) - v(t_1)$$

$$= v(5) - v(2) \approx 0.98 - 0.45 = 0.53$$

g

$$v'(t) = 0.25 \cdot e^{-0.1t}$$

$$v'(2) = 0.20$$

h Die Beschleunigung ist bei  $t = 0$  am größten, da sie ständig kleiner wird.

## 3.26 Lineare Gleichungssysteme (LGS)

$$\text{z. B. } \begin{vmatrix} 3x_1 & + & 2x_2 & - & 3x_3 & = & 5 \\ -x_1 & - & x_2 & + & 5x_3 & = & 15 \end{vmatrix} \quad 2 \times 3 \text{ LGS}$$

### LGS in Stufenform

$$\begin{cases} -x_2 + 4x_1 + 3x_3 = 2 \\ 3x_2 + x_1 = 5 \\ 4x_2 = 8 \end{cases}$$

$\Rightarrow$  einfach zu lösen

$$\text{III } 4x_2 = 8 \rightarrow x_2 = 2$$

eingesetzt in II

$$x_1 + 3 \cdot 2 = 5 \rightarrow x_1 = -1$$

eingesetzt in I

$$4 \cdot (-1) - 2 + 3x_3 = 2 \rightarrow x_3 = \frac{8}{3}$$

$$L = \left\{ \left( -1 \mid 2 \mid \frac{8}{3} \right) \right\}$$

### 3.26.1 Gauß-Verfahren

Das Gauß-Verfahren dient dazu, ein LGS in Stufenform zu überführen und dann zu lösen.

256/4

a

$$\begin{vmatrix} 2x_1 & - & 4x_2 & + & 5x_3 & = & 3 \\ 3x_1 & + & 3x_2 & + & 7x_3 & = & 13 \\ 4x_1 & - & 2x_2 & - & 3x_3 & = & -1 \end{vmatrix}$$

Eliminiere  $x_1$  aus 2 der 3 Gleichungen

$$\begin{vmatrix} 2x_1 & - & 4x_2 & + & 5x_3 & = & 3 \\ 3x_1 & + & 3x_2 & + & 7x_3 & = & 13 \\ \color{red}{0}x_1 & + & 6x_2 & - & 13x_3 & = & -7 \end{vmatrix} \quad \begin{matrix} \\ \\ III - 2 \cdot I \end{matrix}$$
$$\begin{vmatrix} 2x_1 & - & 4x_2 & + & 5x_3 & = & 3 \\ \color{red}{0}x_1 & + & 18x_2 & - & 1x_3 & = & 17 \\ \color{red}{0}x_1 & + & 6x_2 & - & 13x_3 & = & -7 \end{vmatrix} \quad \begin{matrix} \\ 2 \cdot II - 3 \cdot I \\ \end{matrix}$$

Eliminiere  $x_2$  aus 1 der 2 Gleichungen

$$\begin{vmatrix} 2x_1 & - & 4x_2 & + & 5x_3 & = & 3 \\ \color{red}{0}x_1 & + & \color{red}{0}x_2 & + & 38x_3 & = & 38 \\ \color{red}{0}x_1 & + & 6x_2 & - & 13x_3 & = & -7 \end{vmatrix} \quad \begin{matrix} \\ II - 3 \cdot III \\ \end{matrix}$$

Löse LGS in Stufenform

$$\begin{vmatrix} 2x_1 & - & 4x_2 & + & 5x_3 & = & 3 \\ & & & & 38x_3 & = & 38 \\ & & 6x_2 & - & 13x_3 & = & -7 \end{vmatrix}$$

$$\text{II } 38x_3 = 38 \rightarrow x_3 = 1$$

eingesetzt in III

$$6x_2 - 13 \cdot 1 = -7 \rightarrow x_2 = 1$$

eingesetzt in I

$$2x_1 - 4 \cdot 1 + 5 \cdot 1 = 3 \rightarrow x_1 = 1$$

$$L = \{(1|1|1)\}$$

### 3.26.2 Matrix-Schreibweise

256/4

b

$$\begin{vmatrix} -x_1 & + & 7x_2 & - & x_3 & = & 5 \\ 4x_1 & - & x_2 & + & x_3 & = & 1 \\ 5x_1 & - & 3x_2 & + & x_3 & = & -1 \end{vmatrix} \longrightarrow \begin{vmatrix} -1 & 7 & -1 & \vdots & 5 \\ 4 & -1 & 1 & \vdots & 1 \\ 5 & -3 & 1 & \vdots & -1 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} -1 & 7 & -1 & \vdots & 5 \\ 3 & 6 & 0 & \vdots & 6 \\ 1 & -2 & 0 & \vdots & -2 \end{vmatrix} \quad II + I; \quad III - II$$

$$\begin{vmatrix} -1 & 7 & -1 & \vdots & 5 \\ 3 & 6 & 0 & \vdots & 6 \\ 0 & 12 & 0 & \vdots & 12 \end{vmatrix} \quad II - 3 \cdot III$$

...

$$L = \{0|1|2\}$$

c

$$\begin{array}{l}
 \left| \begin{array}{cccc} 0 & 0.6 & 1.8 & 3 \\ 0.3 & 1.2 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0 & 1 & 1 \end{array} \right| \\
 \left| \begin{array}{cccc} 0 & 0.6 & 1.8 & 3 \\ 0.3 & 0 & -3.6 & -6 \\ 0.5 & 0 & 1 & 1 \end{array} \right| II - 2 \cdot I \\
 \left| \begin{array}{cccc} 0 & 0.6 & 1.8 & 3 \\ 2.1 & 0 & 0 & -2.4 \\ 0.5 & 0 & 1 & 1 \end{array} \right| II + 3.6 \cdot III \\
 2.1x_1 = -2.4 \rightarrow x_1 = -\frac{8}{7} \\
 0.5 \cdot \left(-\frac{8}{7}\right) + x_3 = 1 \rightarrow x_3 = \frac{11}{7} \\
 0.6x_2 + 1.8 \cdot \frac{11}{7} = 3 \rightarrow x_2 = \frac{2}{7} \\
 L = \left\{ -\frac{8}{7} \mid \frac{2}{7} \mid \frac{11}{7} \right\}
 \end{array}$$

### Beispiel einer Sonderfall-Lösung

$$\begin{array}{l}
 \left| \begin{array}{rrcr} 3x_1 & + & 2x_2 & - & 3x_3 & = & 5 \\ -x_1 & - & x_2 & + & 5x_3 & = & 15 \end{array} \right| \\
 \left| \begin{array}{rrcr} 3x_1 & + & 2x_2 & - & 3x_3 & = & 5 \\ -x_1 & - & x_2 & + & 12x_3 & = & 50 \end{array} \right| I + 3 \cdot II
 \end{array}$$

Eine Variable ist frei wählbar und wird  $a$  bezeichnet

$$x_3 = a$$

$$II - x_2 + 12a = 50 \rightarrow x_2 = 12a - 50$$

$$I - 3x_1 + 2(12a - 50) - 3a = 5 \rightarrow x_1 = -7a + 35$$

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -7a + 35 \\ 12a - 50 \\ a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -7a \\ 12a \\ a \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 35 \\ -50 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 35 \\ -50 \\ 0 \end{pmatrix} + a \cdot \begin{pmatrix} 7 \\ 12 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Geradengleichung im  $\mathbb{R}^3$

### 3.26.3 Steckbriefaufgaben

**Beispiel** Gesucht ist die Funktionsgleichung einer Funktion zweiten Grades

$$y = ax^2 + bx + c$$

Merkmale:

1. verläuft durch  $P(2|5)$

$$f(2) = 5$$

$$5 = a \cdot 2^2 + b \cdot 2 + c \quad 5 = 4a + 2b + c$$

2. hat bei  $x = 3$  die Steigung 10

$$f'(x) = 2ax + b = 10$$

$$10 = 6a + b$$

3. schneidet die y-Achse bei 5

$$f(0) = 5$$

$$5 = a \cdot 0^2 + b \cdot 0 + c$$

$$5 = c$$

$$c = 5$$

$$10 = 6a + b \quad \Rightarrow \quad b = 10 - 6a$$

$$5 = 4a + 2(10 - 6a) + 5 \quad \Rightarrow \quad a = 2.5$$

$$b = 10 - 6 \cdot 2.5 = -5$$

Die gesuchte Funktion heißt  $f(x) = 2.5x^2 - 5x + 5$

### Beispiele für Bedingungen

- hat bei  $P(1|3)$  einen Wendepunkt

$$f(1) = 3$$

$$f''(1) = 0$$

- verläuft bei  $P(-2|3)$  parallel zur Geraden  $g(x) = 4x - 1$

$$f'(-2) = 4$$

- hat an der Stelle  $x = 3$  einen Sattelpunkt

$$f'(3) = 0$$

$$f''(3) = 0$$

- ist eine achsensymmetrische Funktion 4. Grades / punktsymmetrische Funktion 5. Grades

$$f(x) = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e$$

$$\Rightarrow b = d = 0$$

$$g(x) = ax^5 + bx^4 + cx^3 + dx^2 + ex + f$$

$$\Rightarrow b = d = f = 0$$

262/1

c

$$A(1|3) \quad B(-1|2) \quad C(3|2)$$

$$y = ax^2 + bx + c$$

$$3 = a + b + c$$

$$2 = a - b + c$$

$$2 = 9a + 3b + c$$

$$a - b + c = 9a + 3b + c \Rightarrow a = -\frac{1}{2}b$$

$$\frac{1}{2}b + c = -\frac{3}{2} + c + 1 \Rightarrow b = \frac{1}{2} \Rightarrow a = -\frac{1}{4}$$

$$3 = -\frac{1}{4} + \frac{1}{2} + c \Rightarrow c = 2\frac{3}{4}$$

$$y = -\frac{x}{4} + \frac{x}{2} + 2\frac{3}{4}x$$



262/4

a

$$A(0|1) \quad B(1|0) \quad C(-1|4) \quad D(2|-5)$$

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d$$

$$1 = d$$

$$0 = a + b + c + d$$

$$4 = -a + b - c + d$$

$$-5 = 8a + 4b + 2c + d$$

$$a + b + c = a + b - c + d + 8a + 4b + 2c + d \Rightarrow c = 2a + b$$

$$4 = -a + b - 2a - b + d \Rightarrow a = -1 \Rightarrow b + c = 0$$

$$c = 2a + b \Rightarrow c = -1 \Rightarrow b = 1$$

$$y = -x^3 + x^2 - x + 1$$

### 3.26.4 Funktionenschar

262/3

b

$$f(x) = ax^2 + bx + c$$

$$A(2|0) \quad B(-2|0)$$

$$\begin{vmatrix} 4a + 2b + c & = & 0 \\ 4a - 2b + c & = & 0 \end{vmatrix}$$

2x3 LGS unterbestimmt  $\Rightarrow$  eine Variable ist frei wählbar

$$\begin{vmatrix} 4a + 2b + c & = & 0 \\ 4b & = & 0 \end{vmatrix} \quad I - II$$

$$\Rightarrow b = 0$$

$$4a + c = 0$$

setze  $a = k$

$$4k + c = 0 \Rightarrow c = -4k$$

$$f_k(x) = kx^2 - 4k \quad \text{Funktionenschar, Parameterfunktion}$$

c

$$\begin{aligned} f(x) &= ax^2 + bx + c \\ A(-4|0) \quad B(0|-4) \\ \left| \begin{array}{ccc} 16a & -4b & +c = 0 \\ & & c = -4 \end{array} \right| \end{aligned}$$

$$\Rightarrow c = -4$$

$$16a - 4b - 4 = 0$$

$$a = k$$

$$16k - 4b = 4 \Rightarrow b = 4k - 1$$

$$f_k(x) = kx^2 + 4kx - x - 4$$

262/8

$$f(x) = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e$$

$$f(x) = -f(x) \Rightarrow b = d = 0$$

$$f(0) = -1 \Rightarrow e = -1$$

$$f(1) = -3 \quad f'(1) = 0 \quad f''(1) < 0$$

$$f(x) = ax^4 + bx^2 - 1$$

$$f(1) = a + b - 1 = -3 \Rightarrow a + b = -2$$

$$f'(x) = 4ax^3 + 2bx$$

$$f'(1) = 4a + 2b = 2a - 4 = 0 \Rightarrow a = 2 \Rightarrow b = -4$$

$$f(x) = 2x^4 - 4x^2 - 1$$

$$f''(x) = 24x^2 - 8$$

$$f''(1) = 16 > 0$$

$\Rightarrow$  keine Lösung

263/10

c

$$f(x) = a_2x^2 + a_1x + a_0$$

$$P(-3|3) \quad Q(3|0)$$

$$f(-3) = 9a_2 - 3a_1 + a_0 = 3$$

$$f(3) = 9a_2 + 3a_1 + a_0 = 0$$

$$9a_2 - 3a_1 + a_0 = 9a_2 + 3a_1 + a_0 + 3$$

$$-a_1 = a_1 + 1 \Rightarrow a_1 = -\frac{1}{2}$$

$$9a_2 + 1.5 + a_0 = 3 \Rightarrow a_0 = 1.5 - 9a_2$$

$$a_2 = k$$

$$f_k(x) = kx^2 - 0.5x + 1.5 - 9k$$

schwarz

$$f_k(1) = k - 0.5 + 1.5 - 9k = 2 \Rightarrow k = -\frac{1}{8}$$

$$f(x) = -\frac{1}{8}x^2 - \frac{1}{2}x + 2.625$$

rot

$$f_k(1) = k - 0.5 + 1.5 - 9k = 3 \Rightarrow k = -\frac{1}{4}$$

$$f(x) = -\frac{1}{4}x^2 - \frac{1}{2}x + 3.75$$

blau

$$f_k(1) = k - 0.5 + 1.5 - 9k = -1 \Rightarrow k = \frac{1}{4}$$

$$f(x) = \frac{1}{4}x^2 - \frac{1}{2}x - 0.75$$

263/11

$$f(\pm \frac{1624}{2}) = f(\pm 812) = 254 - 65 = 189$$

$$f(x) = ax^2 + bx + c$$

$$f(x) = -f(x) \Rightarrow b = 0$$

$$f(0) = 0 \Rightarrow c = 0$$

$$f(812) = ax^2 = 659344a = 189 \Rightarrow a \approx 2.8665 \cdot 10^{-4}$$

$$f(x) = 2.8665 \cdot 10^{-4} \cdot x^2$$

263/12

$$SP(-1|-1) \quad SP(1|1) \Rightarrow f'(\pm 1) = f''(\pm 1) = 0$$

$$WP(0|0) \Rightarrow f''(0) = 0$$

$$f(x) = ax^5 + bx^3 + cx$$

$$f(1) = a + b + c = 1$$

$$f'(1) = 5a + 3b + c = 0$$

$$f''(1) = 20a + 6b = 0$$

$$\begin{array}{l} \left| \begin{array}{cccc} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 5 & 3 & 1 & 0 \\ 20 & 6 & 0 & 0 \end{array} \right| \\ \left| \begin{array}{cccc} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 4 & 2 & 0 & -1 \\ 20 & 6 & 0 & 0 \end{array} \right| \quad II - I \\ \left| \begin{array}{cccc} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 4 & 2 & 0 & -1 \\ 8 & 0 & 0 & 3 \end{array} \right| \quad III - 3 \cdot II \end{array}$$

$$8a = 3 \Rightarrow a = \frac{3}{8}$$

$$\frac{3}{2} + 2b = -1 \Rightarrow b = -\frac{5}{4}$$

$$\frac{3}{8} - \frac{5}{4} + c = 1 \Rightarrow \frac{15}{8}$$

$$f(x) = \frac{3}{8}x^5 - \frac{5}{4}x^3 + \frac{15}{8}x$$

# Kapitel 4

## Integralrechnung

$$s = v \cdot t \quad \text{für } v = \text{const.}$$

$$\text{Rechtecksfläche } A = 5s \cdot 15 \frac{m}{s} = 75m$$

Es gilt  $A = s =$  zurückgelegter Weg



$$s(t) = v(t) \cdot t$$

$s$  = Summe von Rechteckstreifen als Näherung für den Flächeninhalt



Durch Grenzwertbildung erhält man

$$s = \int_0^5 v(t) \cdot dt$$

## 4.1 Untersumme - Obersumme

Beispiel  $f(x) = y = x^2 \quad x \in [0; 1]$



### Untersumme

$$U_5 = 0.2 \cdot (0 + 0.04 + 0.16 + 0.36 + 0.64) = 0.24FE$$

Der wahre Flächeninhalt ist sicher größer als  $0.24FE$

### Obersumme

$$O_5 = 0.2 \cdot (0.04 + 0.16 + 0.36 + 0.64 + 1) = 0.44FE$$

Der wahre Flächeninhalt ist sicher kleiner als  $0.44FE$

5 → Intervall in 5 gleiche Abschnitte:

$I = [0; 1] \Rightarrow$  Intervallbreite 0.2 → Breite der Rechtecke

$(0 + \dots + 0.64)$  bzw.  $(0.04 + \dots + 1)$  → Höhen der Rechtecke

$FE \rightarrow$  Flächeneinheiten

$$\begin{aligned} U_{10} &= 0.1 \cdot (0 + 0.01 + 0.04 + 0.09 + 0.16 + 0.25 + 0.36 + 0.49 + 0.64 + 0.81) \\ &= 0.285FE \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} O_{10} &= 0.1 \cdot (0.01 + 0.04 + 0.09 + 0.16 + 0.25 + 0.36 + 0.49 + 0.64 + 0.81 + 1) \\ &= 0.385FE \end{aligned}$$

#### 4.1.1 Obersumme/Untersumme $\rightarrow \lim \rightarrow \text{Integral}$

$$f(x) = x^2$$

Teile das Intervall in  $n$  Teile

$\rightarrow$  Jeder Teil ist  $\frac{b}{n}$  (da  $b = 1 \rightarrow \frac{1}{n}$ ) Längeneinheiten breit

$$\begin{aligned} U_n &= \frac{1}{n} \cdot \left(0 + \left(\frac{1}{n}\right)^2 + \left(\frac{2}{n}\right)^2 + \left(\frac{3}{n}\right)^2 + \dots + \left(\frac{n-1}{n}\right)^2\right) \\ &= \frac{1}{n^3} \cdot (0 + 1^2 + 2^2 + 3^2 + \dots + (n-1)^2) \\ &= \frac{1}{n^3} \cdot \frac{1}{6} \cdot (n-1) \cdot n \cdot (2n-1) \\ &= \frac{1}{6} \cdot \frac{n-1}{n} \cdot \frac{n}{n} \cdot \frac{2n-1}{n} \\ \lim_{n \rightarrow \infty} U_n &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{6} \cdot \frac{n-1}{n} \cdot \frac{n}{n} \cdot \frac{2n-1}{n}\right) = \frac{1}{6} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2 = \frac{1}{3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} O_n &= \frac{1}{n} \cdot \left(\left(\frac{1}{n}\right)^2 + \left(\frac{2}{n}\right)^2 + \left(\frac{3}{n}\right)^2 + \dots + \left(\frac{n-1}{n}\right)^2 + \left(\frac{n}{n}\right)^2\right) \\ &= \frac{1}{n^3} \cdot (1^2 + 2^2 + 3^2 + \dots + (n-1)^2 + n^2) \\ &= \frac{1}{n^3} \cdot \frac{1}{6} \cdot n \cdot (n+1) \cdot (2(n+1)-1) \\ &= \frac{1}{6} \cdot \frac{n}{n} \cdot \frac{n+1}{n} \cdot \frac{2(n+1)-1}{n} \\ \lim_{n \rightarrow \infty} O_n &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{6} \cdot \frac{n}{n} \cdot \frac{n+1}{n} \cdot \frac{2(n+1)-1}{n}\right) = \frac{1}{6} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2 = \frac{1}{3} \end{aligned}$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} U_n = \lim_{n \rightarrow \infty} O_n = \frac{1}{3}$$

Der wahre Flächeninhalt ist  $A = \frac{1}{3}FE$

$$\text{Wenn gilt, dass } \lim_{n \rightarrow \infty} U_n = \lim_{n \rightarrow \infty} O_n = \text{Zahl} = \int_a^b f(x) \cdot dx$$

Existiert ein gemeinsamer Grenzwert ( $n \rightarrow \infty$ ) von Untersumme und Obersumme, so nennt man den Grenzwert Integralwert des bestimmten Integrals.

**160/3**

a  $1FE \hat{=} 1000000m^3$  Wasser



- b Am schnellsten zwischen  $2h$  und  $4h$ .  
Am langsamsten zwischen  $8h$  und  $10h$ .  
Nach  $12h$  wiederholt sich der Graph periodisch.
- c Der Graph wird um 25% gestreckt, die Fläche wächst also um 25%.

## 4.2 Das bestimmte Integral

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

$a, b$  ... linke bzw. rechte Intervallgrenze

$f(x)$  ... Integrand, zu integrierende Funktion

$x$  ... Integrationsvariable

$dx$  ... Differenzial  $\lim_{x \rightarrow 0} \Delta x = dx$

$f(x) \cdot dx$  ... Fläche eines infinitesimal schmalen Rechteckstreifens mit Breite  $dx$  und Höhe  $f(x)$

$\int$  ... Integralzeichen meint eine Summation

liegt  $f(x)$  unterhalb der  $x$ -Achse ( $< 0$ ) im Intervall  $[a; b]$ , so gilt  $\int_a^b f(x) \cdot dx < 0$

Das Integral ist die Differenz oberhalb der  $x$ -Achse und unterhalb der  $x$ -Achse liegender Flächenstücke

## 4.3 Berechnung von Integralen, Hauptsatz

Gesucht: Flächeninhalt unter dem Graphen von  $f(x) = y = \frac{2}{5}x^3$  im Intervall  $[0; b]$

$$\int_0^b \frac{1}{5}x^3 \cdot dx$$

$$\begin{aligned} O_n &= \frac{b}{n} \cdot \left( \frac{1}{5} \left( \frac{b}{n} \right)^3 + \frac{1}{5} \left( \frac{2b}{n} \right)^3 + \dots + \frac{1}{5} \left( \frac{(n-1) \cdot b}{n} \right)^3 + \frac{1}{5} b^3 \right) \\ &= \frac{1}{5} \cdot \frac{b^4}{n^4} \cdot (1^3 + 2^3 + \dots + (n-1)^3 + n^3) \\ &= \frac{1}{5} \cdot \frac{b^4}{n^4} \cdot \frac{1}{4} n^2 \cdot (n+1)^2 \\ &= \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{5} \cdot b^4 \cdot \frac{n}{n} \cdot \frac{n}{n} \cdot \frac{n+1}{n} \cdot \frac{n+1}{n} \end{aligned}$$

$$\int_0^b \frac{1}{5}x^3 \cdot dx = \lim_{n \rightarrow \infty} O_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{5} \cdot b^4 \cdot \frac{n}{n} \cdot \frac{n}{n} \cdot \frac{n+1}{n} \cdot \frac{n+1}{n} \right) = \frac{1}{20} b^4$$

Betrachte den Flächeninhalt zu linker Grenze  $a$  und rechter Grenze  $b$ .

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} O_n &= \frac{1}{20} a^4 \quad \text{fuer } [0; a] \\ \lim_{n \rightarrow \infty} O_n &= \frac{1}{20} b^4 \quad \text{fuer } [0; b] \\ A &= \frac{1}{20} b^4 - \frac{1}{20} a^4 \quad \text{fuer } [a; b] \end{aligned}$$

$$A = \frac{1}{20} b^4 - \frac{1}{20} a^4 = \int_a^b \frac{1}{5} x^3 \cdot dx = \left[ \frac{1}{20} x^4 \right]_a^b$$

### 4.3.1 Verallgemeinerung (Hauptsatz der Differenzial- und Integralrechnung)

$$A = \int_a^b f(x) \cdot dx = [F(x)]_a^b = F(b) - F(a)$$

dabei gilt  $F'(x) = f(x)$

$F(x)$  heißt Aufleitungsfunktion oder Stammfunktion von  $f(x)$ .

$$\text{im Beispiel: } F(x) = \frac{1}{20}x^4 \rightarrow \left(\frac{1}{20}x^4\right)' = \frac{d}{dx}\left(\frac{1}{20}x^4\right) = \frac{1}{5}x^3$$

**167/3**

a

$$f(x) = x^2 \quad F(x) = \frac{1}{3}x^3$$
$$\int_0^4 x^2 \cdot dx = F(4) - F(0) = \frac{64}{3}$$

i

$$f(x) = \frac{1}{8}x^4 \quad F(x) = \frac{1}{40}x^5$$
$$\int_{-2}^{-1} \frac{1}{8}x^4 \cdot dx = F(-1) - F(-2) = 0.775$$

j

$$f(x) = 0.5x^2 \quad F(x) = \frac{1}{6}x^3$$
$$\int_{-4}^4 0.5x^2 \cdot dx = F(4) - F(-4) = \frac{64}{3}$$

k

$$f(x) = x^5 \quad F(x) = \frac{1}{6}x^6$$
$$\int_{-1}^1 x^5 \cdot dx = F(1) - F(-1) = 0$$

## 4.4 Integrale lösen - Anwendung

**168/11**

$$v(t) = 9.81 \cdot t \quad V(t) = s(t) = 4.905 \cdot t^2$$
$$\int_0^3 v(t) \cdot dt = V(3) - V(0) = 44.145$$

**168/13**

a

$$\begin{aligned}f(x) &= x & F(x) &= 0.5x^2 \\ \int_0^z x \cdot dx &= 18 = F(z) - F(0) = F(z) - 0 \\ F(z) &= 18 \quad \Rightarrow \quad z = 6\end{aligned}$$

b

$$\begin{aligned}f(x) &= 4x & F(x) &= 2x^2 \\ \int_1^z 4x \cdot dx &= 30 = F(z) - F(1) = F(z) - 2 \\ F(z) &= 32 \quad \Rightarrow \quad z = 4\end{aligned}$$

c

$$\begin{aligned}f(x) &= 2x & F(x) &= x^2 \\ \int_z^{10} 2x \cdot dx &= 19 = F(10) - F(z) = 100 - F(z) \\ F(z) &= 81 \quad \Rightarrow \quad z = 9\end{aligned}$$

d

$$\begin{aligned}f(x) &= 0.4 & F(x) &= 0.4x \\ \int_0^{2z} 0.4 \cdot dx &= 8 = F(2z) - F(0) = F(2z) - 0 \\ F(2z) &= 8 \quad \Rightarrow \quad 2z = 20 \quad \Rightarrow \quad z = 10\end{aligned}$$

**168/15**

a

$$\begin{aligned}f(x) &= -2x^2 + 8x + 1 = 0 \\ x_{1/2} &= \frac{-8 \pm \sqrt{8^2 - 4 \cdot (-2) \cdot 1}}{2 \cdot (-2)} = \frac{-8 \pm \sqrt{72}}{-4} \\ x_1 &\approx -0.1213 & x_2 &\approx 4.1213\end{aligned}$$

b

$$\begin{aligned}f(x) &= (x+3)^2 \cdot (x+1) = 0 \\(x+3)^2 &= 0 \quad \Rightarrow \quad x_1 = -3 \\(x+1) &= 0 \quad \Rightarrow \quad x_2 = -1\end{aligned}$$

c

$$\begin{aligned}f(x) &= 4x^2 \cdot (x^2 - 10) + 4x^2 = 8x^4 - 40x^2 = 0 \\x_1 &= 0 \\(x^2 - 10) &= -1 \quad \Rightarrow \quad x_{2/3} = \pm 3\end{aligned}$$

d

$$\begin{aligned}f(x) &= 4 \cdot (x - 0.5)^4 - 4 = 0 \\(x - 0.5)^4 &= 1 \quad \Rightarrow \quad x_1 = 1.5 \quad x_2 = -0.5\end{aligned}$$

e

$$\begin{aligned}f(x) &= e^x - e^2 = 0 \\x &= 2\end{aligned}$$

f

$$\begin{aligned}f(x) &= 0.2e^{2x} - 1 = 0 \\e^{2x} &= 5 \quad \Rightarrow \quad x = \frac{\log(5)}{2} \approx 0.8047\end{aligned}$$

Teil III

12/1

## 4.5 Stammfunktion bilden, integrieren

$$\int_a^b x^7 \cdot dx = \left[ \frac{1}{8} x^8 \right]_a^b$$

$$\int \frac{1}{(x+4)^3} \cdot dx = -\frac{1}{2} \cdot (x+4)^{-2} + c$$

$$\int \frac{5}{(3x-2)^5} \cdot dx = -\frac{5}{4 \cdot 3} \cdot (3x-2)^{-4} + c$$

$$\int \frac{1}{5} \cdot e^{2x} \cdot dx = \frac{1}{5 \cdot 2} \cdot e^{2x} + c$$

## 4.6 bestimmtes Integral, Integralfunktion, unbestimmtes Integral

$$\int_a^b \frac{1}{x} \cdot dx = [\ln(|x|)]_a^b$$

sofern  $a, b > 0$  oder  $a, b < 0$  kein Problem

wenn eines größer und eines kleiner 0 ist, dann muss man genauer untersuchen (Polstelle!)

$$a = -1 \quad b = 2$$

$$\int_a^b \frac{1}{2x-5} \cdot dx = \left[ \frac{1}{2} \cdot \ln(|2x-5|) \right]_a^b$$

171/3

a

$$\int_0^2 (2+x)^3 \cdot dx = \left[ \frac{1}{4} \cdot (2+x)^4 \right]_0^2 = \frac{1}{4} \cdot ((2+2)^4 - (2+0)^4) = 60$$

b

$$\int_2^3 \left(1 + \frac{1}{x^2}\right) \cdot dx = \left[ x - \frac{1}{x} \right]_2^3 = \left(3 - \frac{1}{3}\right) - \left(2 - \frac{1}{2}\right) = \frac{7}{6}$$

c

$$\int_0^2 \frac{1}{(x+1)^2} \cdot dx = \left[ -(x+1)^{-1} \right]_0^2 = -(2+1)^{-1} + (0+1)^{-1} = \frac{2}{3}$$

d

$$\int_0^9 \frac{2}{5} \cdot \sqrt{x} \cdot dx = \left[ \frac{4}{15} \cdot x^{\frac{3}{2}} \right]_0^9 = \frac{4}{15} \cdot 9^{\frac{3}{2}} - \frac{4}{15} \cdot 0^{\frac{3}{2}} = 7.2$$

e

$$\int_{-0.5}^0 e^{2x+1} \cdot dx = \left[ \frac{1}{2} e^{2x+1} \right]_{-0.5}^0 = \frac{1}{2} e^{2 \cdot 0 + 1} - \frac{1}{2} e^{2 \cdot (-0.5) + 1} \approx 0.8591$$

f

$$\begin{aligned} \int_0^\pi \sin(3x - \pi) \cdot dx &= \left[ -\frac{1}{3} \cdot \cos(3x - \pi) \right]_0^\pi = \\ &= -\frac{1}{3} \cdot \cos(3\pi - \pi) + \frac{1}{3} \cdot \cos(3 \cdot 0 - \pi) = -\frac{2}{3} \end{aligned}$$

g

$$\int_{-1}^1 \frac{1}{5} \cdot e^{\frac{1}{2}x} \cdot dx = \left[ \frac{2}{5} e^{\frac{1}{2}x} \right]_{-1}^1 = \frac{2}{5} e^{\frac{1}{2} \cdot 1} - \frac{2}{5} e^{\frac{1}{2} \cdot (-1)} = \frac{2e - 2}{5 \cdot \sqrt{e}} \approx 0.4169$$

h

$$\int_{-\pi}^\pi \cos(3x) \cdot dx = \left[ -\frac{1}{3} \sin(3x) \right]_{-\pi}^\pi = -\frac{1}{3} \sin(3\pi) + \frac{1}{3} \sin(3 \cdot (-\pi)) = 0$$

**171/4**

c

$$\int_3^4 \frac{1}{2(x+1)} \cdot dx = \left[ \frac{\ln(x+1)}{2} \right]_3^4 = \frac{\ln(4+1)}{2} - \frac{\ln(3+1)}{2} \approx 0.1116$$



### 4.6.1 Integralfunktion

$$\int_a^b f(x) \cdot dx = [F(x)]_a^b = F(b) - F(a) = J$$

$$J_a(x) = \int_a^x f(x) \cdot dx = [F(x)]_a^x = F(x) - F(a)$$

Integralfunktion zur unteren (linken) Grenze  $a$ . Sie gibt zu jedem später eingesetzten Wert  $x$  ( $= b$ ) den bestimmten Integralwert an.

$$\int f(x) \cdot dx = [F(x)]^x = F(x) + c$$

unbestimmtes Integral

175/2

$$f(x) = \frac{1}{2}x \quad J_a(x) = \int_a^x \frac{1}{2}t \cdot dt$$

$$\begin{array}{c|cccccc} x & -4 & -2 & 0 & 2 & 4 & 6 \\ J_{-4}(x) & 0 & -3 & -4 & -3 & 0 & 5 \end{array}$$

$$\begin{array}{c|cccccc} x & -4 & -2 & 0 & 2 & 4 & 6 \\ J_0(x) & 4 & 1 & 0 & 1 & 4 & 9 \end{array}$$

$$\begin{array}{c|cccccc} x & -4 & -2 & 0 & 2 & 4 & 6 \\ J_2(x) & 3 & 0 & -1 & 0 & 3 & 8 \end{array}$$

## 4.7 Rechenregeln für Integrale

$$\int_a^a f(x) \cdot dx = 0$$

$$\int_a^b c \cdot f(x) \cdot dx = c \cdot \int_a^b f(x) \cdot dx$$

$$\int_a^b f(x) \cdot dx + \int_b^c f(x) \cdot dx = \int_a^c f(x) \cdot dx$$

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

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

172/15

a

$$\int_{-1}^{3.3} 5x^2 \cdot dx - 10 \cdot \int_{-1}^{3.3} \frac{1}{2}x^2 \cdot dx = 0$$

b

$$\int_0^1 (x - 2\sqrt{x^2 + 4}) \cdot dx + 2 \cdot \int_0^1 \sqrt{x^2 + 4} \cdot dx = \int_0^1 x \cdot dx = 0.5$$

c

$$\int_3^{3.7} \frac{1}{x} \cdot dx + \int_{3.7}^4 \frac{1}{x} \cdot dx = \int_3^4 \frac{1}{x} \cdot dx = \ln(4) - \ln(3) \approx 0.2877$$

176/10

$$f(t) = 50t^4 \cdot e^{-t}$$

a Die Integralfunktion gibt die Anzahl der Telefonanrufe bis zum Zeitpunkt  $x$  an.

$$J_0(x) = \int_0^x f(t) \cdot dt$$
$$J_0(4) = \int_0^4 f(t) \approx 445$$

b

$$J_4(8) = J_0(8) - J_0(4) \approx 1080 - 445 = 635$$

Die Anzahl der Anrufer in der Warteschleife ist zu dem Zeitpunkt am höchsten, an dem die Anrufer pro Minute wieder unter 200 sinken (bei  $t \approx 5$ ).

176/9

$$f(t) = \cos\left(\frac{2\pi}{24}(t - 12)\right)$$
$$g(t) = \cos\left(\frac{2\pi}{24}(t - 6)\right)$$

- a Zunahme ( $f(t) > 0$ ) zwischen 6 und 18 Uhr  
 Abnahme ( $f(t) < 0$ ) zwischen 18 und 6 Uhr

Zunahme ( $g(t) > 0$ ) zwischen 0 und 12 Uhr  
 Abnahme ( $g(t) < 0$ ) zwischen 12 und 24 Uhr

- b Am schnellsten um 12 Uhr (Hochpunkt)  
 Am langsamsten um 0/24 Uhr (Tiefpunkt)

Am schnellsten um 6 Uhr (Hochpunkt)  
 Am langsamsten um 18 Uhr (Tiefpunkt)

- c Maximal um 18 Uhr (Rechts-Links-Wendepunkt)  
 Minimal um 6 Uhr (Links-Rechts-Wendepunkt)

Maximal um 12 Uhr (Rechts-Links-Wendepunkt)  
 Minimal um 0/24 Uhr (Links-Rechts-Wendepunkt)

d

$$F(t) = -\frac{12}{\pi} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{12}t\right) + c$$

$$c = 20 - F_{c=0}(12) = 20$$

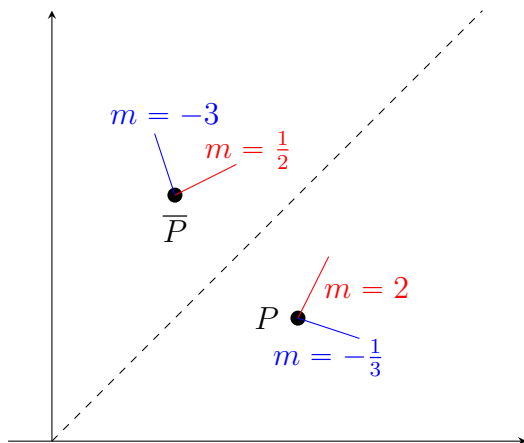
$$F(18) \approx 23.82 \quad F(6) \approx 16.18$$

$$G(t) = -\frac{12}{\pi} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{12}t\right) + c$$

$$c = 20 - G_{c=0}(12) \approx 16.1803$$

$$G(12) = 20 \quad G(0) = G(24) \approx 12.36$$

## 4.8 Ableitung der Umkehrfunktion



$$f(x) = y = x^2 \Leftrightarrow \overline{f(y)} = x = \sqrt{y}$$

$$\overline{f'(y)} = \frac{1}{f'(x)}$$

### Beispiele

$$f(x) = y = x^2 \Leftrightarrow \overline{f(y)} = x = y^{\frac{1}{2}}$$

$$\overline{f'(y)} = \frac{1}{3x^2} = \frac{1}{3(y^{\frac{1}{2}})^2} = \frac{1}{3}y^{-\frac{1}{2}}$$

umbenennen

$$\overline{f'(x)} = \frac{1}{3}x^{-\frac{1}{2}}$$

$$f(x) = y = e^x \Leftrightarrow \overline{f(y)} = x = \ln(y)$$

$$\overline{f'(y)} = \frac{1}{e^x} = \frac{1}{e^{\ln(x)}} = \frac{1}{x}$$

umbenennen

$$\overline{f'(x)} = \frac{1}{x}$$

$$f(x) = y = \sin(x) \Leftrightarrow \overline{f(y)} = x = \operatorname{asin}(y)$$

$$\begin{aligned}\overline{f'(y)} &= \frac{1}{\cos(x)} = \frac{1}{\cos(\operatorname{asin}(y))} \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2(x)}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2(\operatorname{asin}(y))}} = \frac{1}{\sqrt{1 - y^2}}\end{aligned}$$

umbenennen

$$\overline{f'(x)} = \frac{1}{\sqrt{1 - x^2}}$$

$$f(x) = y = \cos(x) \Leftrightarrow f(y) = x = \operatorname{acos}(y)$$

$$\begin{aligned}\overline{f'(y)} &= \frac{1}{-\sin(x)} = \frac{1}{-\sin(\operatorname{acos}(y))} \\ &= -\frac{1}{\sqrt{1 - \cos^2(x)}} = -\frac{1}{\sqrt{1 - \cos^2(\operatorname{acos}(y))}} = -\frac{1}{\sqrt{1 - y^2}}\end{aligned}$$

umbenennen

$$\overline{f'(x)} = -\frac{1}{\sqrt{1 - x^2}}$$

$$f(x) = y = \tan(x) \Leftrightarrow f(y) = x = \operatorname{atan}(y)$$

$$\begin{aligned}\overline{f'(y)} &= \cos^2(x) = \cos^2(\operatorname{atan}(y)) \\ &= 1 - \sin^2(x) = 1 - \sin^2(\operatorname{atan}(y)) = 1 - \frac{y^2}{y^2 + 1} = \frac{1}{y^2 + 1}\end{aligned}$$

umbenennen

$$\overline{f'(x)} = \frac{1}{x^2 + 1}$$

## 4.9 Integral und Flächeninhalt



$$A = A_1 + A_2$$

$$A \neq \int_a^b f(x) \cdot dx = I$$

$$A = \left| \int_a^c f(x) \cdot dx \right| + \left| \int_c^b f(x) \cdot dx \right|$$



$$A = A_1 + A_2$$

1. Berechne die Schnittstellen  $a$ ,  $b$ ,  $c$

$$2. A = \left| \int_a^b (g(x) - f(x)) \cdot dx \right| + \left| \int_b^c (g(x) - f(x)) \cdot dx \right|$$

Wie die Flächen zur  $x$ -Achse liegen ist unwichtig, weil ich gedanklich beide Graphen gemeinsam soweit nach oben schieben kann dass die Flächen komplett oberhalb der  $x$ -Achse liegen.

$$\begin{aligned} f(x) &\longrightarrow f(x) + d \\ g(x) &\longrightarrow g(x) + d \end{aligned}$$

Durch Differenzialbildung fallen die gedanklich eingeführten Verschiebungen wieder weg.

$$\int_a^b ((f(x) + d) - (g(x) + d)) \cdot dx = \int_a^b (f(x) - g(x)) \cdot dx$$

179/2

a

$$\begin{aligned} f(x) &= -0.5x^2 + 0.5 & g(x) &= -1.5 \\ F(x) &= -\frac{1}{6}x^3 + 0.5x & G(x) &= -1.5x \end{aligned}$$

I  $A_2 + A_3$

$$\begin{aligned} A &= \left| \int_{-1}^1 f(x) \cdot dx \right| \\ &= |F(1) - F(-1)| = \frac{2}{3}FE \end{aligned}$$

II  $A_2 + A_3 + A_4 + A_5$

$$\begin{aligned} A &= \left| \int_{-2}^2 (f(x) - g(x)) \cdot dx \right| \\ &= |(F(2) - F(-2)) - (G(2) - G(-2))| = 5\frac{1}{3}FE \end{aligned}$$

III  $A_3$

$$\begin{aligned} A &= \left| \int_0^1 f(x) \cdot dx \right| \\ &= |F(1) - F(0)| = \frac{1}{3}FE \end{aligned}$$

IV  $A_1$

$$\begin{aligned} A &= \left| \int_{-2}^{-1} f(x) \cdot dx \right| \\ &= |F(-1) - F(-2)| = \frac{2}{3}FE \end{aligned}$$

180/5

a

$$f(x) = x^2 \quad g(x) = -x^2 + 4x$$

$$f(x) = g(x) \quad L = \{0; 2\}$$

$$f(x) - g(x) = 2x^2 - 4x$$

$$A = \left| \int_0^2 (2x^2 - 4x) \cdot dx \right| = \left| \left[ \frac{2}{3}x^3 - 2x^2 \right]_0^2 \right| = 2\frac{2}{3}FE$$

b

$$f(x) = -\frac{1}{x^2} \quad g(x) = 2.5x - 5.25$$

$$f(x) = g(x) \quad L = \{2; \sim -0.4; \sim 0.5\}$$

$$f(x) - g(x) = -2.5x + 5.25 - \frac{1}{x^2}$$

$$\begin{aligned} A &\approx \left| \int_{0.5}^2 \left( -2.5x + 5.25 - \frac{1}{x^2} \right) \cdot dx \right| \\ &= \left| \left[ -1.25x^2 + 5.25x + \frac{1}{x} \right]_{0.5}^2 \right| \approx 1.7FE \end{aligned}$$

#### 4.9.1 Flächeninhalt, uneigentliche Integrale

180/8

$$f_t(x) = \frac{t}{x^2} \quad [1; 2]$$

$$F_t(x) = -\frac{t}{x}$$

$$A(t) = \int_1^2 -\frac{t}{x} \cdot dx = \frac{t}{2}$$

$$A(16) = 8$$



180/10

$$f_a(x) = a \cdot \sin(x) \quad g_a(x) = -\frac{1}{a} \cdot \sin(x) \quad x \in [0; \pi]$$

$$f_a(x) - g_a(x) = \sin(x) \cdot \left(a + \frac{1}{a}\right)$$

$$A(a) = \int_0^\pi \sin(x) \cdot \left(a + \frac{1}{a}\right) \cdot dx = \left(a + \frac{1}{a}\right) \cdot [-\cos(x)]_0^\pi = \left(a + \frac{1}{a}\right) \cdot 2$$

$$A'(a) = -\frac{2}{a^2} + 2$$

$$A''(a) = \frac{4}{a^3}$$

$$A'(a) = 0 \quad L = \{\pm 1\}$$

$$A''(1) = 4 > 0 \Rightarrow TP$$

$$\text{Minimaler Flächeninhalt: } A(1) = 4FE$$

$$\text{Beispiel } f(x) = \frac{1}{x^2} \quad [3; \infty[$$

$$A = \lim_{z \rightarrow \infty} \int_3^z \frac{1}{x^2} \cdot dx = \lim_{z \rightarrow \infty} [-x^{-1}]_3^z$$

$$= \lim_{z \rightarrow \infty} \left(-\frac{1}{z} + \frac{1}{3}\right) = \frac{1}{3}FE$$

183/1

Fig. 1

$$y = \frac{1}{(x+1)^2} \quad [1; z]$$

$$A(z) = \int_1^z \frac{1}{(x+1)^2} \cdot dx = \left[-\frac{1}{x+1}\right]_1^z = -\frac{1}{z+1} + \frac{1}{2}$$

$$A = \lim_{z \rightarrow \infty} A(z) = \frac{1}{2}$$

Fig. 2

$$y = e^{-\frac{1}{2}x} \quad [2; z]$$

$$A(z) = \int_2^z e^{-\frac{1}{2}x} \cdot dx = \left[-2 \cdot e^{-\frac{1}{2}x}\right]_2^z = -2 \cdot e^{-\frac{1}{2}z} + \frac{2}{e}$$

$$A = \lim_{z \rightarrow \infty} A(z) = \frac{2}{e} \approx 0.736$$

Fig. 3

$$y = \frac{2}{x^3} \quad [z; 1]$$

$$A(z) = \int_z^1 \frac{2}{x^3} \cdot dx = \left[ -\frac{1}{x^2} \right] = -1 + \frac{1}{z^2}$$

$$A = \lim_{z \rightarrow 0} A(z) = \infty$$

Fig. 4

$$y = \frac{4}{\sqrt{x}} \quad [z; 4]$$

$$A(z) = \int_z^4 \frac{4}{\sqrt{x}} \cdot dx = [8 \cdot \sqrt{x}] = 16 - 8 \cdot \sqrt{z}$$

$$A = \lim_{z \rightarrow 0} A(z) = 16$$

**183/7**

$$W = \int_{h_1}^{h_2} F(s) \cdot ds$$

$$F(s) = \gamma \frac{m \cdot M}{s^2}$$

$$c = \gamma \cdot m \cdot M \approx 3.982 \cdot 10^{17} \cdot \frac{m \cdot kg}{s^2}$$

$$F(s) = c \cdot s^{-2}$$

$$W = \int_{h_1}^{h_2} c \cdot s^{-2} \cdot ds = [-c \cdot s^{-1}]_{h_1}^{h_2}$$

**a**

$$h_1 = 6.37 \cdot 10^6 m \quad h_2 = 4.22 \cdot 10^7 m$$

$$W = [-c \cdot s^{-1}]_{6.37 \cdot 10^6 m}^{4.22 \cdot 10^7 m} \approx 1.333 \cdot 10^{-7} \cdot c \approx 5.308 \cdot 10^{10} Nm$$

**b**

$$h_1 = 6.37 \cdot 10^6 m \quad h_2 \rightarrow \infty$$

$$W = \lim_{h_2 \rightarrow \infty} [-c \cdot s^{-1}]_{6.37 \cdot 10^6 m}^{h_2} \approx 1.570 \cdot 10^{-7} \cdot c \approx 6.252 \cdot 10^{10} Nm$$

**183/5**

$$\begin{aligned} \text{I} \quad & f(x) = \frac{1}{x^3} & F(x) &= -\frac{1}{2 \cdot x^2} \\ \text{II} \quad & f(x) = \frac{1}{x^2} & F(x) &= -\frac{1}{x} \\ \text{III} \quad & f(x) = \frac{1}{\sqrt{x}} & F(x) &= 2 \cdot \sqrt{x} \end{aligned}$$

**a**

$$\lim_{z \rightarrow \infty} \int_1^z f(x) \cdot dx = [F(x)]_1^z$$

$$\text{I} = \frac{1}{2}$$

$$\text{II} = 1$$

$$\text{III} = \infty$$

**b**

$$\lim_{z \rightarrow 1} \int_z^0 f(x) \cdot dx = [F(x)]_z^1$$

$$\text{I} = \infty$$

$$\text{II} = \infty$$

$$\text{III} = 2$$

**180/11**

$$f(x) = x^2$$

$$t(x) = m \cdot x + b$$

$$f'(x) = 2x \Rightarrow m = f'(a) = 2a$$

$$f(a) = a^2 \Rightarrow b = a^2 - 2a \cdot a = -a^2$$

$$\Rightarrow t(x) = 2a \cdot x - a^2$$

$$\begin{aligned} \int_0^a (f(x) - t(x)) \cdot dx &= \int_0^a (x^2 - 2ax + a^2) \cdot dx = \left[ \frac{1}{3}x^3 - ax^2 + a^2x \right]_0^a \\ &= \frac{1}{3}a^3 \end{aligned}$$

## 4.10 Integration von Produkten: partielle Integration

Ableitungs-Produktregel:  $(u \cdot v)' = u' \cdot v + u \cdot v'$

$$(u \cdot v)' = u' \cdot v + u \cdot v' \quad | - u \cdot v'$$

$$u' \cdot v = (u \cdot v)' - u \cdot v' \quad | \int$$

$$\int u' \cdot v = \int (u \cdot v)' - \int u \cdot v'$$

$$\int u' \cdot v = u \cdot v - \int u \cdot v'$$

### Beispiel

$$\int \sin(x) \cdot x \cdot dx = -\cos(x) \cdot x - \int -\cos(x) \cdot 1 \cdot dx$$

$$= -\cos(x) \cdot x + \sin(x) + c$$

$$(-\cos(x)) \cdot x + \sin(x))' = \sin(x) \cdot x$$

$$\int e^{2x} \cdot x^2 \cdot dx = \frac{1}{2}e^{2x} \cdot x^2 - \int \frac{1}{2}e^{2x} \cdot 2x \cdot dx$$

$$= \frac{1}{2}e^{2x} \cdot x^2 - \left( \frac{1}{2}e^{2x} \cdot x - \int \frac{1}{2}e^{2x} \cdot 1 \cdot dx \right)$$

$$= \frac{1}{2}e^{2x} \cdot x^2 - \frac{1}{2}e^{2x} \cdot x + \int \frac{1}{2}e^{2x} \cdot dx$$

$$= \frac{1}{2}e^{2x} \cdot x^2 - \frac{1}{2}e^{2x} \cdot x + \frac{1}{4}e^{2x}$$

$$= e^{2x} \cdot \left( \frac{1}{2}x^2 - \frac{1}{2}x + \frac{1}{4} \right)$$

### Spezialfälle

$$\int 1 \cdot \ln(x) \cdot dx = x \cdot \ln(x) - \int x \cdot \frac{1}{x} \cdot dx$$

$$= x \cdot \ln(x) - x$$

(Stammfunktion von  $\ln(x)$ )

$$\begin{aligned}
\int \sin(x) \cdot \cos(x) \cdot dx &= -\cos(x) \cdot \cos(x) - \int \cos(x) \cdot (-\sin(x)) \cdot dx \\
&= -\cos^2(x) - \int \sin(x) \cdot \cos(x) \cdot dx \quad | + \int \sin(x) \cdot \cos(x) \cdot dx \\
2 \cdot \int \sin(x) \cdot \cos(x) \cdot dx &= -\cos^2(x) \quad | \div 2 \\
\int \sin(x) \cdot \cos(x) \cdot dx &= -\frac{\cos^2(x)}{2}
\end{aligned}$$

**188/1**

a

$$\int_{-1}^1 e^x \cdot x \cdot dx = [e^x \cdot x]_{-1}^1 - \int e^x \cdot 1 \cdot dx = [e^x \cdot x - e^x]_{-1}^1 = \frac{2}{e}$$

d

$$\begin{aligned}
\int_0^{0.5} e^{2x+2} \cdot 4x \cdot dx &= \left[ \frac{1}{2} e^{2x+2} \cdot 4x \right]_0^{0.5} - \int \frac{1}{2} e^{2x+2} \cdot 4 \cdot dx \\
&= [2e^{2x+2} \cdot x - e^{2x+2}]_0^{0.5} = e^2
\end{aligned}$$

**188/2**

b

$$\begin{aligned}
\int_0^\pi \cos(x) \cdot x \cdot dx &= [\sin(x) \cdot x]_0^\pi - \int \sin(x) \cdot 1 \cdot dx \\
&= [\sin(x) \cdot x + \cos(x)]_0^\pi = -2
\end{aligned}$$

d

$$\begin{aligned}
\int_0^{2\pi} \sin(0.5x) \cdot 2x \cdot dx &= [-2\cos(0.5x) \cdot 2x]_0^{2\pi} - \int -2\cos(0.5x) \cdot 2 \cdot dx \\
&= [-2\cos(0.5x) \cdot 2x + 8\sin(0.5x)]_0^{2\pi} = 8\pi
\end{aligned}$$

a

$$\begin{aligned}
\int_0^{\pi} (\sin(x))^2 \cdot dx &= [-\cos(x) \cdot \sin(x)]_0^{\pi} - \int -\cos(x) \cdot \cos(x) \cdot dx \\
&= [-\cos(x) \cdot \sin(x)]_0^{\pi} - \int (-\sin^2(x) - 1) \cdot dx \\
&= [-\cos(x) \cdot \sin(x) + x]_0^{\pi} - \int \sin^2(x) \cdot dx \quad | + \int_0^{\pi} \sin^2(x) \cdot dx; \quad \div 2 \\
&= \left[ \frac{-\cos(x) \cdot \sin(x) + x}{2} \right]_0^{\pi} = \frac{\pi}{2}
\end{aligned}$$

c

$$\begin{aligned}
\int_{-2}^2 e^x \cdot \cos(x) \cdot dx &= [\sin(x) \cdot e^x]_{-2}^2 - \int \sin(x) \cdot e^x \cdot dx \\
&= [\sin(x) \cdot e^x]_{-2}^2 - ([-\cos(x) \cdot e^x]_{-2}^2 - \int -\cos(x) \cdot e^x \cdot dx) \\
&= [\sin(x) \cdot e^x + \cos(x) \cdot e^x]_{-2}^2 - \int \cos(x) \cdot e^x \cdot dx \\
&= \left[ \frac{(\sin(x) + \cos(x)) \cdot e^x}{2} \right]_{-2}^2 \approx 1.912
\end{aligned}$$

d

$$\begin{aligned}
\int_0^2 \sin(\pi x) \cdot e^{2x} \cdot dx &= \left[ \frac{1}{2} e^{2x} \cdot \sin(\pi x) \right]_0^2 - \int \frac{1}{2} e^{2x} \cdot \pi \cdot \cos(\pi x) \cdot dx \\
&= \left[ \frac{1}{2} e^{2x} \cdot \sin(\pi x) \right]_0^2 - \left( \left[ \frac{1}{4} e^{2x} \cdot \pi \cdot \cos(\pi x) \right]_0^2 - \int -\frac{1}{4} e^{2x} \cdot \pi^2 \cdot \sin(\pi x) \cdot dx \right) \\
&= \left[ \frac{1}{2} e^{2x} \cdot \sin(\pi x) \right]_0^2 - \left( \left[ \frac{1}{4} e^{2x} \cdot \pi \cdot \cos(\pi x) + \frac{1}{4} \pi^2 \right]_0^2 - \int e^{2x} \cdot \sin(\pi x) \cdot dx \right) \\
&= \left[ \frac{2e^{2x} \cdot \sin(\pi x) - \pi \cdot e^{2x} \cdot \cos(\pi x)}{\pi^2 + 4} \right]_0^2 = \frac{\pi}{\pi^2 + 4} - \frac{e^4 \cdot \pi}{\pi^2 + 4} \approx -12.140
\end{aligned}$$

## 4.11 Integration durch Substitution

Kettenregel:  $(f(g(x)))' = f'(g(x)) \cdot g'(x)$

$$\begin{aligned}\int f'(g(x)) \cdot g'(x) \cdot dx &= \int (f(g(x)))' \cdot dx \\ &= f(g(x)) \quad \text{Dabei ist } f \text{ die Stammfunktion von } f' \\ \Rightarrow \text{Benenne um } f' &\rightarrow f \quad f \rightarrow F\end{aligned}$$

$$\int f(g(x)) \cdot g'(x) \cdot dx = F(g(x))$$

Substitution 1

$$\begin{aligned}\int_a^b f(g(x)) \cdot g'(x) \cdot dx &\quad \text{ersetze } z = g(x) \quad \frac{dz}{dx} = g'(x) \Rightarrow dz = g'(x) \cdot dx \\ &= \int_{g(a)}^{g(b)} f(z) \cdot dz = [F(z)]_{g(a)}^{g(b)}\end{aligned}$$

Resubstitution

$$= [F(g(x))]_a^b$$

Beispiel

$$\int_1^2 \frac{5x}{\sqrt{1+3x^2}} \cdot dx$$

$$\begin{aligned}\text{subst. } z &= 1 + 3x^2 \quad \frac{dz}{dx} = (1 + 3x^2)' = 6x \quad dz = 6x \cdot dx \\ &= \frac{5}{6} \int_1^2 \frac{6x}{\sqrt{1+3x^2}} \cdot dx = \frac{5}{6} \int_4^{13} z^{-\frac{1}{2}} \cdot dz \\ &= \frac{5}{6} \left[ 2z^{\frac{1}{2}} \right]_4^{13} = \frac{5}{6} \left[ 2 \cdot (1 + 3x^2)^{\frac{1}{2}} \right]_1^2 \approx 2.676\end{aligned}$$

191/1

a

$$\int_0^2 \frac{4x}{\sqrt{1+2x^2}} \cdot dx; \quad g(x) = 1 + 2x^2$$

subst.  $z = g(x) \quad dz = g'(x) \cdot dx$

$$= \int_{g(0)}^{g(2)} \frac{1}{\sqrt{z}} \cdot dz = [2 \cdot \sqrt{z}]_1^9 = 4$$

b

$$\int_{-1}^1 \frac{-2x}{(4-3x^2)^2} \cdot dx; \quad g(x) = 4 - 3x^2$$

subst.  $z = g(x) \quad dz = g'(x) \cdot dx$

$$= \int_{g(-1)}^{g(1)} \frac{1}{3z^2} \cdot dz = \left[ -\frac{1}{3z} \right]_1^1 = 0$$

191/3

e

$$\int_0^3 \frac{2x}{1+x^2} \cdot dx$$

subst.  $z = 1 + x^2 \quad dz = 2x \cdot dx$

$$= \int_1^{10} \frac{1}{z} \cdot dz = [\ln(z)]_1^{10}$$

resubst.

$$= [\ln(1+x^2)]_0^3 = \ln(10) \approx 2.3026$$

f

$$\int_{-1}^2 \frac{e^x}{2+e^x} \cdot dx$$

subst.  $z = 2 + e^x \quad dz = e^x \cdot dx$

$$= \int_{2+e^{-1}}^{2+e^2} \frac{1}{z} \cdot dz = [\ln(z)]_{2+e^{-1}}^{2+e^2}$$

resubst.

$$= [\ln(2+e^x)]_{-1}^2 \approx 1.3775$$



g

$$\int_e^{e^2} \frac{4}{x \cdot \ln(x)} \cdot dx$$

subst.  $z = \ln(x) \quad dz = \frac{1}{x} \cdot dx$

$$= \int_1^2 \frac{4}{z} \cdot dz = [4 \cdot \ln(z)]_1^2$$

resubst.

$$= [4 \cdot \ln(\ln(x))]_e^{e^2} = 4 \cdot \ln(2) \approx 2.7726$$

h

$$\int_{\frac{1}{3}}^{\frac{1}{2}} \frac{\pi \cdot \cos(\pi x)}{\sin(\pi x)} \cdot dx$$

subst.  $z = \sin(\pi x) \quad dz = \pi \cdot \cos(\pi x) \cdot dx$

$$= \int_{\sin(\frac{\pi}{3})}^{\sin(\frac{\pi}{2})} \frac{1}{z} \cdot dz = [\ln(z)]_{\sin(\frac{\pi}{3})}^{\sin(\frac{\pi}{2})}$$

resubst.

$$= [\ln(\sin(\pi x))]_{\frac{1}{3}}^{\frac{1}{2}} \approx 0.1438$$

191/8

a

$$\int_0^{\ln(2)} \frac{e^{2x}}{e^{2x} + 3} \cdot dx \quad t = e^{2x} + 3 \quad t' = \frac{dt}{dx} = 2e^{2x} \quad dx = \frac{1}{2 \cdot e^{2x}} \cdot dt$$

$$= \int_{t(0)}^{t(\ln(2))} \frac{e^{4x}}{t} \cdot \frac{1}{2 \cdot e^{2x}} \cdot dt = \int_{t(0)}^{t(\ln(2))} \frac{e^{2x}}{2t} \cdot dt = \int_{t(0)}^{t(\ln(2))} \frac{t-3}{2t} \cdot dt$$

$$= \left[ \frac{t}{2} - \frac{3}{2} \cdot \ln(t) \right]_4^7 \approx 0.6606$$

b

$$\int_1^2 \frac{2x+3}{(x+2)^2} \cdot dx \quad t = x+2 \quad t' = \frac{dt}{dx} = 1 \quad dx = dt$$

$$= \int_{t(1)}^{t(2)} \frac{2x+3}{t^2} \cdot dt = \int_{t(1)}^{t(2)} \frac{2t-1}{t^2} \cdot dt = \int_{t(1)}^{t(2)} \left( \frac{2}{t} - \frac{1}{t^2} \right) \cdot dt$$

$$= \left[ 2 \cdot \ln(t) + \frac{1}{t} \right]_3^4 \approx 0.4920$$

c

$$\begin{aligned}
& \int_{0.5}^7 \frac{x}{\sqrt{4x-1}} \cdot dx \quad t = 4x - 1 \quad t' = \frac{dt}{dx} = 4 \quad dx = \frac{dt}{4} \\
&= \int_{t(0.5)}^{t(7)} \frac{x}{\sqrt{t}} \cdot \frac{1}{4} \cdot dt = \int_{t(0.5)}^{t(7)} \frac{\frac{1}{4}t + \frac{1}{4}}{4 \cdot \sqrt{t}} \cdot dt = \int_{t(0.5)}^{t(7)} \frac{t+1}{16 \cdot \sqrt{t}} \cdot dt \\
&= \left[ \left( \frac{1}{16}t + \frac{1}{16} \right) \cdot 2 \cdot \sqrt{t} \right]_{t(0.5)}^{t(7)} - \int_{t(0.5)}^{t(7)} \frac{1}{8} \cdot \sqrt{t} \cdot dt \\
&= \left[ \left( \frac{1}{8}t + \frac{1}{8} \right) \cdot \sqrt{t} \right]_{t(0.5)}^{t(7)} - \left[ \frac{1}{8} \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{t^3} \right]_{t(0.5)}^{t(7)} \\
&= \left[ \frac{1}{8} \cdot (t \cdot \sqrt{t} + \sqrt{t} - \frac{2}{3} \cdot \sqrt{t^3}) \right]_1^{27} \approx 6.3285
\end{aligned}$$

d

$$\begin{aligned}
& \int_0^4 \frac{4}{1+2 \cdot \sqrt{x}} \cdot dx \quad t = 1 + 2 \cdot \sqrt{x} \quad t' = \frac{dt}{dx} = \frac{1}{\sqrt{x}} \quad dx = \sqrt{x} \cdot dt \\
&= \int_{t(0)}^{t(4)} \frac{4}{t} \cdot \sqrt{x} \cdot dt = \int_{t(0)}^{t(4)} \frac{4}{t} \cdot \frac{t-1}{2} \cdot dt = \int_{t(0)}^{t(4)} \frac{4t-4}{2t} \cdot dt \\
&= \left[ \frac{1}{2t} \cdot (2t^2 - 4t) \right]_{t(0)}^{t(4)} - \int_{t(0)}^{t(4)} -\frac{1}{2t^2} \cdot (2t^2 - 4t) \cdot dt \\
&= [t-2]_{t(0)}^{t(4)} - \int_{t(0)}^{t(4)} \left( \frac{2}{t} - 1 \right) \cdot dt \\
&= [t-2 - (2 \cdot \ln(t) - t)]_{t(0)}^{t(4)} = [2 \cdot (t-1 - \ln(t))]_1^5 \approx 4.7811
\end{aligned}$$

## Substitution 2

$$\begin{aligned}
& \int_a^b f(x) \cdot dx \quad \text{ersetze } x = g(z) \\
&= \int_a^b f(g(z)) \cdot dx = \int_{\bar{g}(a)}^{\bar{g}(b)} f(g(z)) \cdot g'(z) \cdot dz
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
x &= g(z) & z &= \bar{g}(x) \\
\frac{dx}{dz} &= g'(z) & dx &= g'(z) \cdot dz
\end{aligned}$$

$$= [F(g(z))]_{\bar{g}(a)}^{\bar{g}(b)} = [F(x)]_a^b$$

Beispiel

$$\begin{aligned} \int_0^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} \cdot dx & \quad x = \sin(z) \quad dx = \cos(z) \cdot dz \\ &= \int_0^{\frac{\pi}{6}} \frac{\cos(z)}{\sqrt{1-\sin^2(z)}} \cdot dz = \int_0^{\frac{\pi}{6}} 1 \cdot dz = [z]_0^{\frac{\pi}{6}} = \frac{\pi}{6} \approx 0.524 \end{aligned}$$

AB/23

a

$$\begin{aligned} & \int_0^1 e^x \cdot \sqrt{e^x + 1} \cdot dx \\ x(t) = \ln(t) \quad t = e^x \quad dx &= \frac{1}{t} \cdot dt \\ &= \int_{e^0}^{e^1} e^{\ln(t)} \cdot \sqrt{e^{\ln(t)} + 1} \cdot \frac{1}{t} \cdot dz = \int_1^e \sqrt{t+1} \cdot dz \\ &= \left[ \frac{2}{3} \cdot \sqrt{(t+1)^3} \right]_1^e \approx 2.8943 \end{aligned}$$

c

$$\begin{aligned} & \int_1^3 \frac{1}{x} \cdot \ln(x^2) \cdot dx \\ x(t) = e^t \quad t = \ln(x) \quad dx &= e^t \cdot dt \\ &= \int_{\ln(1)}^{\ln(3)} \frac{1}{e^t} \cdot \ln(e^{t^2}) \cdot e^t \cdot dt = \int_0^{\ln(3)} \ln(e^{2t}) \cdot dt = \int_0^{\ln(3)} 2t \cdot dt \\ &= [t^2]_0^{\ln(3)} = (\ln(3))^2 \approx 1.2069 \end{aligned}$$

### 4.11.1 Wiederholung

1. Ersetze  $g(x)$  durch  $z$

$$\begin{aligned} \int_a^b &= f(g(x)) \cdot g'(x) \cdot dx = \int_{g(a)}^{g(b)} f(z) \cdot dz \\ &= [F(z)]_{g(a)}^{g(b)} = [F(g(x))]_a^b \\ z &= g(x) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dz}{dx} &= g'(x) \\ dz &= g'(x) \cdot dx \end{aligned}$$

2. Ersetze  $x$  durch  $g(z)$

$$\begin{aligned}\int_a^b f(x) \cdot dx &= \int_{\bar{g}(a)}^{\bar{g}(b)} f(g(z)) \cdot g'(z) \cdot dz \\ &= [F(g(z))]_{\bar{g}(a)}^{\bar{g}(b)} = [F(x)]_a^b\end{aligned}$$

$$x = g(z) \quad \Leftrightarrow \quad z = \bar{g}(x)$$

$$\frac{dx}{dz} = g'(z)$$

$$dx = g'(z) \cdot dz$$

AB/23

d

$$\begin{aligned}\int_1^2 \frac{1 + \ln(x)}{x \cdot (1 - \ln(x))} \cdot dx \\ x(t) = e^t \quad t = \ln(x) \quad dx = e^t \cdot dt\end{aligned}$$

$$= \int_{\ln(1)}^{\ln(2)} \frac{1 + \ln(e^t)}{e^t \cdot (1 - \ln(e^t))} \cdot e^t \cdot dt = \int_0^{\ln(2)} \frac{1 + t}{1 - t} \cdot dt$$

$$z = 1 - t \quad \frac{dz}{dt} = -1 \quad dz = -dt$$

$$\begin{aligned}&= - \int_{1-0}^{1-\ln(2)} \frac{2 - z}{z} \cdot dz = - \int_{1-0}^{1-\ln(2)} \left(\frac{2}{z} - 1\right) \cdot dz \\ &= - [2 \cdot \ln(z) - z]_1^{1-\ln(2)} \approx 1.6696\end{aligned}$$

g

$$\begin{aligned}\int_0^1 \frac{1}{\sqrt{4 - x^2}} \cdot dx \\ x(t) = 2 \cdot \sin(t) \quad t = \arcsin\left(\frac{x}{2}\right) \quad dx = 2 \cdot \cos(t) \cdot dt\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}&= \int_{\arcsin(0)}^{\arcsin(\frac{1}{2})} \frac{2 \cdot \cos(t)}{\sqrt{4 - (2 \cdot \sin(t))^2}} \cdot dt = \int_0^{\arcsin(\frac{1}{2})} \frac{2 \cdot \cos(t)}{2 \cdot \sqrt{1 - (\sin(t))^2}} \cdot dt \\ &= \int_0^{\arcsin(\frac{1}{2})} \frac{2 \cdot \cos(t)}{2 \cdot \sqrt{(\cos(t))^2}} \cdot dt = \int_0^{\arcsin(\frac{1}{2})} 1 \cdot dt = [t]_0^{\arcsin(\frac{1}{2})} = \frac{\pi}{6}\end{aligned}$$

## 4.12 Rotationskörper

Rotationssymmetrische Körper, die man sich dadurch entstanden vorstellen kann, dass eine Fläche um eine Achse ( $x$ -Achse) rotiert.

### 4.12.1 Bestimmung des Volumens von Rotationskörpern

$$f(x) = \frac{1}{2}x^2 + 1$$



$$A = \int_a^b f(x) \cdot dx$$

$$= \int_1^2 \left(\frac{1}{2}x^2 + 1\right) \cdot dx = \left[\frac{1}{6}x^3 + x\right]_1^2 = \frac{13}{6}FE \approx 2.17FE$$

$$V = \int_a^b \pi \cdot (f(x))^2 \cdot dx$$

$$= \pi \cdot \int_1^2 \left(\frac{1}{2}x^2 + 1\right)^2 \cdot dx = \pi \cdot \left[\frac{1}{20}x^5 + \frac{1}{3}x^3 + x\right]_1^2 = \frac{293\pi}{60}VE \approx 15.34VE$$

196/1

a

$$\begin{aligned}y &= \sqrt{x+1} \\V &= \pi \cdot \int_{-1}^2 (\sqrt{x+1})^2 \cdot dx = \pi \cdot \int_{-1}^2 (x+1) \cdot dx \\&= \pi \cdot \left[ \frac{1}{2}x^2 + x \right]_{-1}^2 = \pi \cdot 4.5VE \approx 14.1372VE\end{aligned}$$

b

$$\begin{aligned}y &= \frac{1}{x} \\V &= \pi \cdot \int_1^3 \left(\frac{1}{x}\right)^2 \cdot dx = \pi \cdot \int_1^3 x^{-2} \cdot dx \\&= \pi \cdot \left[ -x^{-1} \right]_1^3 = \pi \cdot \frac{2}{3}VE \approx 2.0944VE\end{aligned}$$

c

$$\begin{aligned}y &= x^2 - 6x + 8 \\y &= 0 \quad L = \{2; 4\} \\V &= \pi \cdot \int_2^4 (x^2 - 6x + 8)^2 \cdot dx = \pi \cdot \int_2^4 (x^4 - 12x^3 + 52x^2 - 96x + 64) \cdot dx \\&= \pi \cdot \left[ \frac{1}{5}x^5 - 3x^4 + \frac{52}{3}x^3 - 48x^2 + 64x \right]_2^4 = \pi \cdot \frac{16}{15}VE \approx 3.3510VE\end{aligned}$$

197/8

$$f(x) = 0.5x + 1 \quad g(x) = 1.5 \cdot \sqrt{x-1} \quad [0; 4]$$

a

$$\begin{aligned}V_W &= \pi \cdot \int_1^4 (1.5 \cdot \sqrt{x-1})^2 \cdot dx = \pi \cdot \int_1^4 (2.25x - 2.25) \cdot dx \\&= \pi \cdot \left[ 1.125x^2 - 2.25x \right]_1^4 = 10.125\pi \approx 31.8086 \\[V_W] &= cm^3\end{aligned}$$

b

$$\begin{aligned}
 V &= \pi \cdot \int_0^4 (0.5x + 1)^2 \cdot dx = \pi \cdot \int_0^4 (0.25x^2 + x + 1) \cdot dx \\
 &= \pi \cdot \left[ \frac{1}{12}x^3 + \frac{1}{2}x^2 + x \right]_0^4 = \frac{52\pi}{3} \approx 54.4543 \\
 V_G &= V - V_W = 10.125\pi - \frac{52\pi}{3} = 22.6456 \\
 [V] &= [V_G] = cm^3
 \end{aligned}$$

**197/9**

b

$$\begin{aligned}
 f(x) &= 3x^2 - x^3 & g(x) &= x^2 \\
 f(x) &= g(x) & L &= \{0; 2\} \\
 V &= \pi \cdot ((3x^2 - x^3)^2 - (x^2)^2) \cdot dx = \pi \cdot (9x^4 - 6x^5 + x^6 - x^4) \cdot dx \\
 &= \pi \left[ \frac{8}{5}x^5 - x^6 + \frac{1}{7}x^7 \right]_0^2 = \frac{192\pi}{35} \approx 17.2339
 \end{aligned}$$

**188/4**

b

$$\begin{aligned}
 f(x) &= 2x \cdot \sin(x) \\
 \int f(x) \cdot dx &= -\cos(x) \cdot 2x - \int -\cos(x) \cdot 2 \cdot dx = -\cos(x) \cdot 2x + \sin(x) \cdot 2
 \end{aligned}$$

**188/9**

b

$$\begin{aligned}
 &\int_1^e x \cdot \ln(2x) \cdot dx \\
 &= \left[ \frac{1}{2}x^2 \cdot \ln(2x) \right]_1^e - \int_1^e \frac{1}{2}x^2 \cdot \frac{1}{x} \cdot dx = \left[ \frac{1}{2}x^2 \cdot \ln(2x) \right]_1^e - \int_1^e \frac{1}{2}x \cdot dx \\
 &= \left[ \frac{1}{2}x^2 \cdot \ln(2x) - \frac{1}{4}x^2 \right]_1^e \approx 4.3115
 \end{aligned}$$

c

$$\begin{aligned} & \int_1^{e^2} x^2 \cdot \ln(x) \cdot dx \\ &= \left[ \frac{1}{3} x^3 \cdot \ln(x) \right]_1^{e^2} - \int_1^{e^2} \frac{1}{3} x^3 \cdot \frac{1}{x} \cdot dx \\ &= \left[ \frac{1}{3} x^3 \cdot \ln(x) - \frac{1}{9} x^3 \right]_1^{e^2} \approx 224.2382 \end{aligned}$$



# Kapitel 5

## Analytische Geometrie

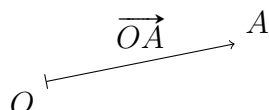
### 5.1 Punkte und Vektoren

Jeder Punkt im Raum  $\mathbb{R}^3$  ist durch 3 Koordinaten  $(x|y|z)$  oder  $(x_1|x_2|x_3)$  festgelegt, sofern zuvor der Ursprung  $O$  des Koordinatensystems festgelegt wird.

Den Vektor, der vom Ursprung  $O$  zum Punkt  $A(x|y|z)$  führt, nennt man Ortsvektor von  $A$  und notiert man

$$\overrightarrow{OA} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

Ein Vektor ist eine Strecke (mit Länge) mit Orientierung (Pfeil).



#### 5.1.1 Darstellung im 3-dimensionalen Koordinatensystem

$A(2|3|4)$      $B(-3|1|-2)$      $C(3|0|2)$

Alle Punkte mit  $(-2|1|z)$  liegen auf einer Geraden parallel zur  $z$ -Achse.



275/2

a+c



b

$$D(-2|-1|0) \quad E(-2|0|3) \quad F(1|0|3) \quad H(-2|-1|3)$$

276/3

$$\begin{array}{ll} P(2|3|0) & Q(4|4|0) \\ R(0|3|1) & S(0|-2|-1) \\ T(2|0|2) & U(3|0|-1) \end{array}$$

276/10

$$A(2|0|0) \quad B(-1|2|-1) \quad C(-2|3|4) \quad D(3|4|-2)$$

a

$$A'(2|0|0) \quad B'(-1|2|\textcolor{red}{1}) \quad C'(-2|3|\textcolor{red}{-4}) \quad D'(3|4|\textcolor{red}{2})$$

b

$$A'(-2|0|0) \quad B'(1|2|-1) \quad C'(2|3|4) \quad D'(-3|4|-2)$$

c

$$A'(2|0|0) \quad B'(-1|-2|-1) \quad C'(-2|-3|4) \quad D'(3|-4|-2)$$

## 5.2 Ortsvektoren und Verschiebungsvektoren

$\overrightarrow{OA}$  ist der Ortsvektor des Punktes  $A$ . Der Vektor führt vom Ursprung  $O$  zum Punkt  $A$ .  $\overrightarrow{BC}$  ist ein Verschiebungsvektor, der Punkt  $B$  auf Punkt  $C$  verschiebt, bzw.  $B$  mit  $C$  verbindet und auf  $C$  zeigt. Mit Hilfe des Vektors  $\overrightarrow{BC}$  lassen sich auch andere Punkte in gleicher Weise verschieben wie Punkt  $B$  auf Punkt  $C$ .

$$\overrightarrow{BC} = \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \end{pmatrix} \quad P(0|1) \quad Q(4|3) \quad R(1.5|0.5)$$

$$\overrightarrow{OP} + \overrightarrow{BC} = \overrightarrow{OP'} \quad \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \end{pmatrix}$$



### 5.2.1 Addition, Subtraktion und Multiplikation mit einer Zahl

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix} \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} 2 \\ -3 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \vec{c} = \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}$$

- $$\vec{d} = \vec{a} + \vec{b} + \vec{c}$$

$$\vec{d} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2 \\ -3 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7 \\ -3 \\ 5 \end{pmatrix}$$



- $$\vec{e} = \vec{a} - \vec{b} = \vec{a} + (-\vec{b}) \text{ (Gegenvektor von } \vec{b} \text{)}$$

$$\vec{e} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 2 \\ -3 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -2 \\ 3 \\ -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix}$$



- $$\vec{f} = 3 \cdot \vec{a}$$

$$\vec{f} = 3 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ 15 \end{pmatrix}$$

**Darstellung eines Vektors durch andere Vektoren (Bsp. Verbindungsvektor)**

$$\vec{a} = \overrightarrow{OA} = \begin{pmatrix} 4 \\ 4 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \vec{b} = \overrightarrow{OB} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$\overrightarrow{AB} = -\vec{a} + \vec{b} = -\overrightarrow{OA} + \overrightarrow{OB} = \overrightarrow{OB} - \overrightarrow{OA} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 4 \\ 4 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -5 \\ -4 \\ 2 \end{pmatrix}$$

279/6

a

$$\begin{aligned} & A(-2|2|3) \quad B(5|5|5) \quad C(9|6|5) \quad D(2|3|3) \\ & \overrightarrow{AB} = \begin{pmatrix} 7 \\ 3 \\ 2 \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{DC} = \begin{pmatrix} 7 \\ 3 \\ 2 \end{pmatrix} \\ & \overrightarrow{AB} = \overrightarrow{DC} \Rightarrow \text{Parallelogramm} \end{aligned}$$

b

$$\begin{aligned} & A(2|0|3) \quad B(4|4|4) \quad C(11|7|9) \quad D(9|3|8) \\ & \overrightarrow{AB} = \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{DC} = \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \\ 1 \end{pmatrix} \\ & \overrightarrow{AB} = \overrightarrow{DC} \Rightarrow \text{Parallelogramm} \end{aligned}$$

c

$$\begin{aligned} & A(2|-2|7) \quad B(6|5|1) \quad C(1|-1|1) \quad D(8|0|8) \\ & \overrightarrow{AB} = \begin{pmatrix} 4 \\ 7 \\ -6 \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{DC} = \begin{pmatrix} -7 \\ -1 \\ -7 \end{pmatrix} \\ & \overrightarrow{AB} \neq \overrightarrow{DC} \Rightarrow \text{kein Parallelogramm} \end{aligned}$$

279/7

a

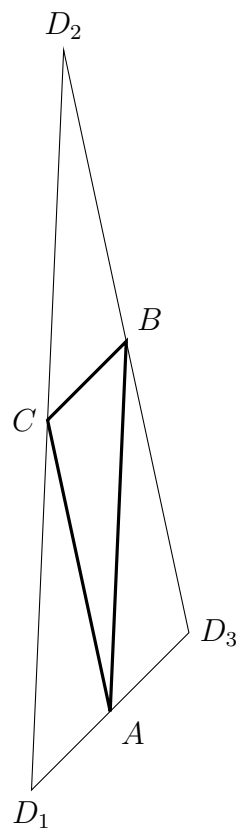
$$A(21|-11|43) \quad B(3|7|-8) \quad C(0|4|5)$$

$$\overrightarrow{AB} = \begin{pmatrix} -18 \\ 18 \\ -51 \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{BC} = \begin{pmatrix} -3 \\ -3 \\ 13 \end{pmatrix}$$

$$\overrightarrow{OD_1} = \overrightarrow{OA} + \overrightarrow{BC} = \begin{pmatrix} 18 \\ -14 \\ 56 \end{pmatrix}$$

$$\overrightarrow{OD_2} = \overrightarrow{OC} + \overrightarrow{AB} = \begin{pmatrix} -18 \\ 22 \\ -46 \end{pmatrix}$$

$$\overrightarrow{OD_3} = \overrightarrow{OA} - \overrightarrow{BC} = \begin{pmatrix} 24 \\ -8 \\ 30 \end{pmatrix}$$



b

$$A(-75|199|-67) \quad B(35|0|-81) \quad C(1|2|3)$$

$$\overrightarrow{AB} = \begin{pmatrix} 110 \\ -199 \\ 14 \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{BC} = \begin{pmatrix} -34 \\ 2 \\ 84 \end{pmatrix}$$

$$\overrightarrow{OD_1} = \overrightarrow{OA} + \overrightarrow{BC} = \begin{pmatrix} -109 \\ 201 \\ 17 \end{pmatrix}$$

$$\overrightarrow{OD_2} = \overrightarrow{OC} + \overrightarrow{AB} = \begin{pmatrix} 111 \\ -197 \\ 17 \end{pmatrix}$$

$$\overrightarrow{OD_3} = \overrightarrow{OA} - \overrightarrow{BC} = \begin{pmatrix} -41 \\ 197 \\ -151 \end{pmatrix}$$



## 5.2.2 Vektorzüge und Linearkombinationen

(zu 279/6)

$M_1$  ... Mittelpunkt von  $\overline{AB}$

$M_2$  ... Mittelpunkt des Parallelogramms (mit  $D_1$ )

$$\overrightarrow{OM_1} = \overrightarrow{OA} + \frac{1}{2} \cdot \overrightarrow{AB} = \overrightarrow{OB} - \frac{1}{2} \overrightarrow{AB}$$

$$\overrightarrow{OM_2} = \overrightarrow{OA} + \frac{1}{2} \cdot \overrightarrow{AC} = \overrightarrow{OC} - \frac{1}{2} \overrightarrow{AC}$$

zu 6a

$$\overrightarrow{OA} = \begin{pmatrix} -2 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{OB} = \begin{pmatrix} 5 \\ 5 \\ 5 \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{OC} = \begin{pmatrix} 9 \\ 6 \\ 5 \end{pmatrix}$$

$$\overrightarrow{OM_1} = \begin{pmatrix} -2 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} 7 \\ 3 \\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.5 \\ 3.5 \\ 4 \end{pmatrix}$$

$$\overrightarrow{OM_2} = \begin{pmatrix} -2 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} 11 \\ 4 \\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.5 \\ 4 \\ 4 \end{pmatrix}$$

zu 6b

$$\overrightarrow{OA} = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{OB} = \begin{pmatrix} 4 \\ 4 \\ 4 \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{OC} = \begin{pmatrix} 11 \\ 7 \\ 9 \end{pmatrix}$$

$$\overrightarrow{OM_1} = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 3.5 \end{pmatrix}$$

$$\overrightarrow{OM_2} = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} 9 \\ 7 \\ 6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6.5 \\ 3.5 \\ 6 \end{pmatrix}$$

Setze ich mehrere Vektorpfeile, mit Koeffizienten multipliziert, aneinander, so nennt man das einen Vektorzug. Die rechnerische Summe solcher Vektoren heißt Linearkombination.



283/5

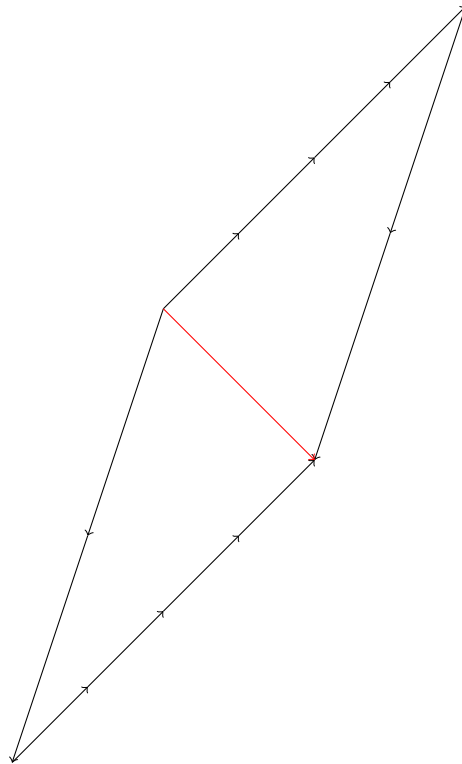
a

$$2 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} + 3 \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 8 \\ 4 \end{pmatrix}$$



b

$$4 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} - 2 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ -2 \end{pmatrix}$$



c

$$3 \cdot \begin{pmatrix} -1 \\ -2 \end{pmatrix} + 2 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ -3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ -12 \end{pmatrix}$$



**283/7**

d

$$\begin{pmatrix} 5 \\ 6 \\ 7 \end{pmatrix} + (-1) \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 \\ 4 \\ 3 \end{pmatrix}$$

e

$$3 \cdot \begin{pmatrix} -1 \\ 4 \\ 2 \end{pmatrix} - 2 \cdot \begin{pmatrix} -2 \\ 4 \\ 1 \end{pmatrix} + 3 \cdot \begin{pmatrix} -1 \\ 4 \\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 \\ 16 \\ 10 \end{pmatrix}$$

f

$$4 \cdot \begin{pmatrix} 0.5 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix} + 2 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 6 \\ 2 \end{pmatrix} + 3 \cdot \begin{pmatrix} 0.8 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6.4 \\ 30 \\ 17 \end{pmatrix}$$

284/11

f  $-(\vec{u} - \vec{v}) = \vec{v} - \vec{u}$

g  $2(2\vec{a} + 4\vec{b}) = 4\vec{a} + 8\vec{b}$

h  $-4(\vec{a} - \vec{b}) - \vec{b} + \vec{a} = 3\vec{a} - 3\vec{b}$

i  $3(\vec{a} + 2(\vec{a} + \vec{b})) = 9\vec{a} + 6\vec{b}$

j  $6(\vec{a} - \vec{b}) + 4(\vec{a} + \vec{b}) = 10\vec{a} - 2\vec{b}$

k  $7\vec{u} + 5(\vec{u} - 2(\vec{u} + \vec{v})) = 2\vec{u} - 10\vec{v}$

284/12

a  $\overrightarrow{AG} = \vec{a} + \vec{b} + \vec{c}$

b  $\overrightarrow{BH} = -\vec{a} + \vec{b} + \vec{c}$

c  $\overrightarrow{EC} = \vec{a} + \vec{b} - \vec{c}$

d  $\overrightarrow{ME} = -\frac{1}{2}\vec{a} - \frac{1}{2}\vec{b} + \vec{c}$

### 5.3 Geraden in $\mathbb{R}^3$

$O$

$$\begin{array}{ccccccc} S_5 & A & S_2 & S_1 & S_3 & B & S_4 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{array}$$

$$\overrightarrow{OS_1} = \overrightarrow{OA} + \frac{1}{2}\overrightarrow{AB}$$

$$\overrightarrow{OS_2} = \overrightarrow{OA} + \frac{1}{4}\overrightarrow{AB}$$

$$\overrightarrow{OS_3} = \overrightarrow{OA} + \frac{3}{4}\overrightarrow{AB}$$

$$\overrightarrow{OS_4} = \overrightarrow{OA} + \frac{3}{2}\overrightarrow{AB} = \overrightarrow{OB} + \frac{1}{2}\overrightarrow{AB}$$

$$\overrightarrow{OS_5} = \overrightarrow{OA} - \frac{1}{4}\overrightarrow{AB}$$

Gerade durch die Punkte  $A$  und  $B$ :

$$g: \vec{x} = \overrightarrow{OA} + s \cdot \overrightarrow{AB} \quad s \in \mathbb{R}$$

Parametergleichung einer Geraden  $g$ :

$g$  Name der Geraden

$\vec{x}$  Ortsvektor eines unbestimmten Punktes

$\overrightarrow{OA}$  Ortsvektor eines bestimmten Punktes  $A$  (heißt auch Stützvektor)

$s$  Parameter  $s \in \mathbb{R}$

Beim Durchlaufen aller Zahlen von  $\mathbb{R}$  werden nacheinander alle Punkte der Geraden  $g$  dargestellt

$\overrightarrow{AB}$  Richtungsvektor von  $g$  gibt die Richtung von  $g$  an

$$h: \vec{x} = \vec{a} + r \cdot \vec{b}$$

$$h: \vec{x} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} + r \cdot \begin{pmatrix} -3 \\ 5 \\ 2 \end{pmatrix}$$

Beispiele für Punkte auf  $h$

$$\overrightarrow{OP_1} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} \quad r = 0$$

$$\overrightarrow{OP_2} = \begin{pmatrix} -2 \\ 5 \\ 4 \end{pmatrix} \quad r = 1$$

$$\overrightarrow{OP_3} = \begin{pmatrix} -5 \\ 10 \\ 6 \end{pmatrix} \quad r = 2$$

$$\overrightarrow{OP_4} = \begin{pmatrix} 4 \\ -5 \\ 0 \end{pmatrix} \quad r = -1$$

$$\overrightarrow{OQ} = \begin{pmatrix} 3 \\ 7 \\ -1 \end{pmatrix} \in h$$

$$\begin{pmatrix} 3 \\ 7 \\ -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} + r \cdot \begin{pmatrix} -3 \\ 5 \\ 2 \end{pmatrix}$$

gibt es ein  $r$ , das alle 3 Gleichungen löst?

$$3 = 1 - 3r \Rightarrow r = -\frac{2}{3}$$

$$7 = 5r \Rightarrow r = \frac{7}{5}$$

$$-1 = 2 + 2r \Rightarrow r = -\frac{3}{2}$$

$$\Rightarrow Q \notin h$$

287/2

a

$$A(1|2|2) \quad B(5|-4|7)$$

$$g: \vec{x} = \overrightarrow{OA} + s \cdot \overrightarrow{AB} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 4 \\ -6 \\ 5 \end{pmatrix}$$

$$g: \vec{x} = \overrightarrow{OB} + s \cdot \overrightarrow{AB} = \begin{pmatrix} 5 \\ -4 \\ 7 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 4 \\ -6 \\ 5 \end{pmatrix}$$

b

$$A(-3|-2|9) \quad B(0|0|3)$$

$$g: \vec{x} = \overrightarrow{OA} + s \cdot \overrightarrow{AB} = \begin{pmatrix} -3 \\ -2 \\ 9 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ -6 \end{pmatrix}$$

$$g: \vec{x} = \overrightarrow{OB} + s \cdot \overrightarrow{AB} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ -6 \end{pmatrix}$$

c

$$A(7|-2|7) \quad B(1|1|1)$$

$$g: \vec{x} = \overrightarrow{OA} + s \cdot \overrightarrow{AB} = \begin{pmatrix} 7 \\ -2 \\ 7 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} -6 \\ 3 \\ -6 \end{pmatrix}$$

$$g: \vec{x} = \overrightarrow{OB} + s \cdot \overrightarrow{AB} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} -6 \\ 3 \\ -6 \end{pmatrix}$$

287/3

c

$$X(2|3|-1) \quad g: \vec{x} = \begin{pmatrix} 7 \\ 0 \\ 4 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} 5 \\ -3 \\ 5 \end{pmatrix}$$

$$2 = 7 + t \cdot 5 \Rightarrow t = -1$$

$$3 = t \cdot -3 \Rightarrow t = -1$$

$$-1 = 4 + t \cdot 5 \Rightarrow t = -1$$

$$\Rightarrow X \in g$$

d

$$X(2|-1|-1) \quad g: \vec{x} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$2 = 1 + t \Rightarrow t = 1$$

$$-1 = t \cdot 3 \Rightarrow t = -\frac{1}{3}$$

$$\Rightarrow X \notin g$$

288/12

a  $g$

$$P_1(2|9|0) \quad P_2(-4|1|0) \quad g: \vec{x} = \begin{pmatrix} 2 \\ 9 \\ 0 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} 3 \\ 4 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$h$

$$H(-4|1|3) \quad P(2|5|-3) \quad h: \vec{x} = \begin{pmatrix} -4 \\ 1 \\ 3 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ -3 \end{pmatrix}$$

$i$

$$P_1(-4|5|3) \quad P_2(-4|9|0) \quad i: \vec{x} = \begin{pmatrix} -4 \\ 5 \\ 3 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 4 \\ -3 \end{pmatrix}$$

$j$

$$P_1(-1|1|0) \quad P_2(-1|5|3) \quad j: \vec{x} = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 4 \\ 3 \end{pmatrix}$$

**b**  $g$

$$C(-8|11|0) \quad P(-2|5|3) \quad g: \vec{x} = \begin{pmatrix} -8 \\ 11 \\ 0 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ -2 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$h$

$$P_1(-2|5|3) \quad P_2(-6|9|3) \quad h: \vec{x} = \begin{pmatrix} -2 \\ 5 \\ 3 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} -2 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$i$

$$B(0|11|0) \quad P(-6|5|3) \quad i: \vec{x} = \begin{pmatrix} 0 \\ 11 \\ 0 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} -2 \\ -2 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$j$

$$M(-4|7|0) \quad P(-6|5|3) \quad j: \vec{x} = \begin{pmatrix} -4 \\ 7 \\ 0 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} -2 \\ -2 \\ 3 \end{pmatrix}$$

### 5.3.1 Kollinearität

$$g: \vec{x} = \vec{a} + t \cdot \vec{b} \quad t \in \mathbb{R}$$

für  $\vec{b}$  gilt:  $\vec{b}$  kann durch  $\vec{b}' = s \cdot \vec{b}$  ersetzt werden  $s \in \mathbb{R} \quad s \neq 0$

$\vec{b}' \parallel \vec{b}$   $\vec{b}'$  und  $\vec{b}$  sind kollinear

Sonderfall: Gerade durch  $O$

$$\text{z. B. } g: \vec{x} = t \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \\ 5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 \\ -6 \\ -10 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \\ 5 \end{pmatrix}$$

hier ist  $\vec{a} \parallel \vec{b}$ , d. h.  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$  sind kollinear ( $\vec{a} = -2 \cdot \vec{b}$ )

### 5.3.2 Lage zweier Geraden

4 Möglichkeiten unterschiedlicher Lage:

- Schnitt (Schnittpunkt)
- parallel
- identisch
- windschief

**Verfahren um festzustellen, welche Lage zwei Geraden  $g$  und  $h$  haben**

$$g: \vec{x} = \vec{a} + s \cdot \vec{b}$$

$$h: \vec{x} = \vec{c} + t \cdot \vec{d}$$

$$\vec{b} \stackrel{?}{=} r \cdot \vec{d}$$

- wahr:

$$\vec{a} \stackrel{?}{=} \vec{c} + t \cdot \vec{d} \quad \text{oder} \quad \vec{c} \stackrel{?}{=} \vec{a} + s \cdot \vec{b}$$

- wenn wahr, dann sind  $g$  und  $h$  identisch
- wenn nicht wahr, dann sind  $g$  und  $h$  parallel



- nicht wahr:

$$\vec{a} + s \cdot \vec{b} = \vec{c} + t \cdot \vec{d}$$

- finde ich ein  $s$  und ein  $t$ , sodass das LGS gelöst wird, so schneiden sich  $g$  und  $h$  in einem Punkt  $S$
- ansonsten sind  $g$  und  $h$  windschief

292/1

a

$$g: \vec{x} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} + r \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$h: \vec{x} = \begin{pmatrix} 3 \\ 6 \\ 4 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} 4 \\ 8 \\ 2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 2 \\ 4 \\ 1 \end{pmatrix} = r \cdot \begin{pmatrix} 4 \\ 8 \\ 2 \end{pmatrix}$$

$$r = 2$$

$\Rightarrow$  identisch oder parallel

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 6 \\ 4 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} 4 \\ 8 \\ 2 \end{pmatrix}$$

$$t = -\frac{1}{2}$$

$\Rightarrow$  identisch

292/2

a

$$g: \vec{x} = \begin{pmatrix} 9 \\ 0 \\ 6 \end{pmatrix} + r \cdot \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}$$
$$h: \vec{x} = \begin{pmatrix} 7 \\ -2 \\ 2 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 9 \\ 0 \\ 6 \end{pmatrix} + r \cdot \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7 \\ -2 \\ 2 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}$$

$$9 + 3r = 7 + s$$

$$2r = -2 + s$$

$$6 + r = 2 + 2s$$

$$\Rightarrow \quad r = 0 \quad s = 2$$

$$\overrightarrow{OS} = \begin{pmatrix} 9 \\ 0 \\ 6 \end{pmatrix} + 0 \cdot \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7 \\ -2 \\ 2 \end{pmatrix} + 2 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 9 \\ 0 \\ 6 \end{pmatrix}$$

$$S(9|0|6)$$

292/4

a

$$g: \vec{x} = \begin{pmatrix} 5 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

$$h: \vec{x} = \begin{pmatrix} 7 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} -6 \\ -3 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix} = r \cdot \begin{pmatrix} -6 \\ -3 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$r = -3$$

$\Rightarrow$  identisch oder parallel

$$\begin{pmatrix} 5 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} -6 \\ -3 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$5 = 7 + t \cdot (-6) \quad \Rightarrow \quad t = \frac{1}{3}$$

$$0 = 1 + t \cdot (-3) \quad \Rightarrow \quad t = \frac{1}{3}$$

$$1 = 2 + t \cdot 3 \quad \Rightarrow \quad t = -\frac{1}{3}$$

$\Rightarrow$  parallel

b

$$g: \vec{x} = t \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$h: \vec{x} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \neq r \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

$\Rightarrow$  nicht parallel

$$t_g \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix} + t_h \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

$$t_g \cdot 2 = 2 + t_h \cdot 0 \quad \Rightarrow \quad t_g = 1$$

$$t_g \cdot 0 = 3 + t_h \cdot 1 \quad \Rightarrow \quad t_h = -1$$

$$t_g \cdot 1 \neq 4 + t_h \cdot (-1)$$

$\Rightarrow$  windschief

293/8

b

$$g: \vec{x} = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$h: \vec{x} = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$i: \vec{x} = t \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$j: \vec{x} = t \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}$$

### 5.3.3 Parameterpunkte und -geraden

$$\overrightarrow{OA_b} = \begin{pmatrix} 1 \\ 5 \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + b \cdot 0 \\ 5 + b \cdot 0 \\ 0 + b \cdot 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 5 \\ 0 \end{pmatrix} + b \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\overrightarrow{OC_d} = \begin{pmatrix} 2d \\ 1 - 5d \\ 7 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 + d \cdot 2 \\ 1 + d \cdot (-5) \\ 7 + d \cdot 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 7 \end{pmatrix} + d \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ -5 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$g_a: \vec{x} = \begin{pmatrix} 2 \\ a \\ 5 \end{pmatrix} + r \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix} + a \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + r \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

293/10

a

$$g_a: \vec{x} = \begin{pmatrix} 3 \\ a \\ 3 \end{pmatrix} + r \cdot \begin{pmatrix} -1 \\ 5 \\ 7 \end{pmatrix} \quad h_a: \vec{x} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ a \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ -22 \\ -29 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} -1 \\ 5 \\ 7 \end{pmatrix} \neq t \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ -22 \\ -29 \end{pmatrix}$$

$\Rightarrow$  nicht parallel

$$\begin{pmatrix} 3 \\ a \\ 3 \end{pmatrix} + r \cdot \begin{pmatrix} -1 \\ 5 \\ 7 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ a \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ -22 \\ -29 \end{pmatrix}$$

$$3 - r = 1 + 2s$$

$$a + 5r = -22s$$

$$3 + 7r = a - 29s$$

$$a = 2 \quad r = 4 \quad s = -1$$

$$\overrightarrow{OS} = \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} + 4 \cdot \begin{pmatrix} -1 \\ 5 \\ 7 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ 22 \\ 31 \end{pmatrix}$$

b

$$g_a: \vec{x} = \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ a \end{pmatrix} + r \cdot \begin{pmatrix} 10 \\ 7 \\ 0 \end{pmatrix} \quad h_a: \vec{x} = \begin{pmatrix} a \\ -1 \\ 3 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 6 \\ 2 \\ -1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 10 \\ 7 \\ 0 \end{pmatrix} \neq t \cdot \begin{pmatrix} 6 \\ 2 \\ -1 \end{pmatrix}$$

$\Rightarrow$  nicht parallel

$$\begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ a \end{pmatrix} + r \cdot \begin{pmatrix} 10 \\ 7 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \\ -1 \\ 3 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 6 \\ 2 \\ -1 \end{pmatrix}$$

$$3 + 10r = a + 6s$$

$$2 + 7r = -1 + 2s$$

$$a = 3 - s$$

$$a = 5 \quad r = -1 \quad s = -2$$

$$\overrightarrow{OS} = \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 5 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 10 \\ 7 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -7 \\ -5 \\ 5 \end{pmatrix}$$

293/16

$$G = 10cm^2 \quad h = 15cm$$

$$V_Z = G \cdot h = 150cm^3$$

$$V_K = \frac{1}{3} \cdot G \cdot h = 50cm^3$$

$$V_Z - V_K = 100cm^3 = 0.1L$$

## 5.4 Abstand zweier Punkte, Vektorlänge, Streckenlänge

$$\text{Bsp. } g: \vec{x} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} + r \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad r \in \mathbb{R}: [2; 5]$$



$$\begin{aligned}\overrightarrow{OC} &= \begin{pmatrix} 5 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix} & \overrightarrow{OD} &= \begin{pmatrix} 11 \\ -3 \\ 3 \end{pmatrix} \\ |\overrightarrow{CD}| &= |\overrightarrow{CD}| = \text{Abstand } C \leftrightarrow D \\ \overrightarrow{CD} &= \begin{pmatrix} 6 \\ -3 \\ 0 \end{pmatrix}\end{aligned}$$

### Seitenlängen des Segels (Bsp. S. 294)

unten:  $4m$

links:  $\sqrt{(5m)^2 + (3m)^2}$  (Satz des Pythagoras)

rechts:  $\sqrt{(\sqrt{34}m)^2 + (4m)^2} = \sqrt{(5m)^2 + (3m)^2 + (4m)^2}$

$$|\overrightarrow{CD}| = \sqrt{6^2 + (-3)^2 + 0^2} = \sqrt{45} \approx 6.71LE$$

Die Länge eines Vektors  $\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}$  ist  $\left| \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} \right| = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}$

297/2

a

$$A(0|0|0) \quad B(2|3|-1)$$

$$\overrightarrow{AB} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ -1 \end{pmatrix}$$

$$|\overrightarrow{AB}| = \sqrt{2^2 + 3^2 + (-1)^2} = \sqrt{14} \approx 3.74LE$$

b

$$A(2|2|-2) \quad B(0|-1|5)$$

$$\overrightarrow{AB} = \begin{pmatrix} -2 \\ -3 \\ 7 \end{pmatrix}$$

$$|\overrightarrow{AB}| = \sqrt{(-2)^2 + (-3)^2 + 7^2} = \sqrt{62} \approx 7.87LE$$

c

$$A(1|5|6) \quad B(1|6|7)$$

$$\overrightarrow{AB} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$|\overrightarrow{AB}| = \sqrt{0^2 + 1^2 + 1^2} = \sqrt{2} \approx 1.41LE$$

### 5.4.1 Einheitsvektor

Ein Einheitsvektor hat die Länge  $1LE$

Einheitsvektor zu z. B.  $\vec{a} = \begin{pmatrix} 2 \\ 5 \\ 1 \end{pmatrix} \quad |\vec{a}| = \sqrt{30}$

$$\vec{a}_0 = \frac{1}{\sqrt{30}} \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 5 \\ 1 \end{pmatrix}$$

297/8

a

$$A(1|-2|2) \quad B(3|2|1) \quad C(3|0|3)$$

$$\overrightarrow{AB} = \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \\ -1 \end{pmatrix} \quad |\overrightarrow{AB}| = \sqrt{2^2 + 4^2 + (-1)^2} = \sqrt{21}$$

$$\overrightarrow{AC} = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} \quad |\overrightarrow{AC}| = \sqrt{2^2 + 2^2 + 1^2} = \sqrt{9}$$

$$\overrightarrow{BC} = \begin{pmatrix} 0 \\ -2 \\ 2 \end{pmatrix} \quad |\overrightarrow{BC}| = \sqrt{0^2 + (-2)^2 + 2^2} = \sqrt{8}$$

$$|\overrightarrow{AB}| \neq |\overrightarrow{AC}| \neq |\overrightarrow{BC}| \Rightarrow \text{nicht gleichschenkelig}$$



b

$$\begin{aligned}
 & A(7|0|-1) \quad B(5|-3|-1) \quad C(4|0|1) \\
 & \overrightarrow{AB} = \begin{pmatrix} -2 \\ -3 \\ 0 \end{pmatrix} \quad |\overrightarrow{AB}| = \sqrt{(-2)^2 + (-3)^2 + 0^2} = \sqrt{13} \\
 & \overrightarrow{AC} = \begin{pmatrix} -3 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} \quad |\overrightarrow{AC}| = \sqrt{(-3)^2 + 0^2 + 2^2} = \sqrt{13} \\
 & \overrightarrow{BC} = \begin{pmatrix} -1 \\ 3 \\ 2 \end{pmatrix} \quad |\overrightarrow{BC}| = \sqrt{(-1)^2 + 3^2 + 2^2} = \sqrt{14} \\
 & |\overrightarrow{AB}| = |\overrightarrow{AC}| \Rightarrow \text{gleichschenkelig}
 \end{aligned}$$

297/9

a

$$\begin{aligned}
 & A(4|2|-1) \quad B(10|-8|9) \quad C(4|0|1) \\
 & \overrightarrow{OM_a} = \overrightarrow{OB} + \frac{1}{2} \cdot \overrightarrow{BC} = \begin{pmatrix} 10 \\ -8 \\ 9 \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} -6 \\ 8 \\ -8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7 \\ -4 \\ 5 \end{pmatrix} \\
 & \overrightarrow{OM_b} = \overrightarrow{OC} + \frac{1}{2} \cdot \overrightarrow{CA} = \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ -2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \\
 & \overrightarrow{OM_c} = \overrightarrow{OA} + \frac{1}{2} \cdot \overrightarrow{AB} = \begin{pmatrix} 4 \\ 2 \\ -1 \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} 6 \\ -10 \\ 10 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7 \\ -3 \\ 4 \end{pmatrix} \\
 & |\overrightarrow{AM_a}| = \left| \begin{pmatrix} 3 \\ -6 \\ 6 \end{pmatrix} \right| = \sqrt{3^2 + (-6)^2 + 6^2} = \sqrt{81} = 9 \\
 & |\overrightarrow{BM_b}| = \left| \begin{pmatrix} -6 \\ 9 \\ -9 \end{pmatrix} \right| = \sqrt{(-6)^2 + 9^2 + (-9)^2} = \sqrt{198} \approx 14.07 \\
 & |\overrightarrow{CM_c}| = \left| \begin{pmatrix} 3 \\ -3 \\ 3 \end{pmatrix} \right| = \sqrt{3^2 + (-3)^2 + 3^2} = \sqrt{27} \approx 5.20
 \end{aligned}$$

b

$$\begin{aligned}
& A(1|2| - 1) \quad B(-1|10|15) \quad C(9|6| - 5) \\
\overrightarrow{OM_a} &= \overrightarrow{OB} + \frac{1}{2} \cdot \overrightarrow{BC} = \begin{pmatrix} -1 \\ 10 \\ 15 \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} 10 \\ -4 \\ -20 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 \\ 8 \\ 5 \end{pmatrix} \\
\overrightarrow{OM_b} &= \overrightarrow{OC} + \frac{1}{2} \cdot \overrightarrow{CA} = \begin{pmatrix} 9 \\ 6 \\ -5 \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} -8 \\ -4 \\ 4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 \\ 4 \\ -3 \end{pmatrix} \\
\overrightarrow{OM_c} &= \overrightarrow{OA} + \frac{1}{2} \cdot \overrightarrow{AB} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ -1 \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} -2 \\ 8 \\ 16 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 6 \\ 7 \end{pmatrix} \\
|\overrightarrow{AM_a}| &= \left| \begin{pmatrix} 3 \\ 6 \\ 6 \end{pmatrix} \right| = \sqrt{3^2 + 6^2 + 6^2} = \sqrt{81} = 9 \\
|\overrightarrow{BM_b}| &= \left| \begin{pmatrix} 6 \\ -6 \\ -18 \end{pmatrix} \right| = \sqrt{6^2 + (-6)^2 + (-18)^2} = \sqrt{396} \approx 19.90 \\
|\overrightarrow{CM_c}| &= \left| \begin{pmatrix} -9 \\ 0 \\ 12 \end{pmatrix} \right| = \sqrt{(-9)^2 + 0^2 + 12^2} = \sqrt{225} = 15
\end{aligned}$$

c

zu a

$$\begin{aligned}
|\overrightarrow{AS}| &= \frac{2}{3} \cdot |\overrightarrow{AM_a}| = 6 \\
|\overrightarrow{BS}| &= \frac{2}{3} \cdot |\overrightarrow{BM_b}| \approx 9.38 \\
|\overrightarrow{CS}| &= \frac{2}{3} \cdot |\overrightarrow{CM_c}| \approx 3.46
\end{aligned}$$

zu b

$$\begin{aligned}
|\overrightarrow{AS}| &= \frac{2}{3} \cdot |\overrightarrow{AM_a}| = 6 \\
|\overrightarrow{BS}| &= \frac{2}{3} \cdot |\overrightarrow{BM_b}| \approx 13.27 \\
|\overrightarrow{CS}| &= \frac{2}{3} \cdot |\overrightarrow{CM_c}| = 10
\end{aligned}$$

## 5.5 Produkte zweier Vektoren

### 5.5.1 Skalarprodukt

Beispiel aus der Physik:



$$W = \vec{F} \cdot \vec{s}$$

$$\cos(\alpha) = \frac{|\vec{F}_s|}{|\vec{F}|} \Rightarrow |\vec{F}_s| = |\vec{F}| \cdot \cos(\alpha) \quad \vec{F}_s \dots \vec{F} \text{ in Richtung } \vec{s}$$

$$W = \vec{F} \cdot \vec{s} = |\vec{F}| \cdot \cos(\alpha) \cdot |\vec{s}|$$

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \cos(\alpha) = a_1 \cdot b_1 + a_2 \cdot b_2 + a_3 \cdot b_3$$

Beispiel:

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} -2 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = 1 \cdot (-2) + 2 \cdot 0 + 3 \cdot 3 = 7$$

Winkel zwischen  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$ :

$$7 = \left| \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} \right| \cdot \left| \begin{pmatrix} -2 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix} \right| \cdot \cos(\alpha) = \sqrt{14} \cdot \sqrt{13} \cdot \cos(\alpha)$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{7}{\sqrt{14} \cdot \sqrt{13}}\right) \approx 1.025 \approx 58.73^\circ$$

Spezialfall:

$$\alpha = 90^\circ$$

$$\Rightarrow \cos(\alpha) = 0$$

$$\Rightarrow \vec{a} \cdot \vec{b} = 0$$

$$\vec{a} \perp \vec{b}$$

$$\text{z. B. } \vec{a} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 5 \end{pmatrix}$$

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = 1 \cdot 3 + (-1) \cdot 3 + 0 \cdot 5 = 0$$

$$\Rightarrow \vec{a} \perp \vec{b}$$

321/1

a

$$g: \vec{x} = \begin{pmatrix} 2 \\ -2 \\ 0 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} -5 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad h: \vec{x} = \begin{pmatrix} 5 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} -2 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} -5 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -2 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix} = 12$$

$$\Rightarrow g \not\perp h$$

b

$$g: \vec{x} = \begin{pmatrix} 8 \\ 6 \\ -9 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ -9 \\ -4 \end{pmatrix} \quad h: \vec{x} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 7 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 5 \\ 2 \\ -2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 2 \\ -9 \\ -4 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 5 \\ 2 \\ -2 \end{pmatrix} = 0$$

$$\Rightarrow g \perp h$$

zu 297/8

a

$$\overrightarrow{AB} \cdot \overrightarrow{AC} = \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \\ -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} = 11 \quad |\overrightarrow{AB}| \cdot |\overrightarrow{AC}| = \sqrt{21} \cdot \sqrt{9}$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{11}{3\sqrt{21}}\right) \approx 0.64 \approx 36.86^\circ$$

$$\overrightarrow{BA} \cdot \overrightarrow{BC} = \begin{pmatrix} -2 \\ -4 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ -2 \\ 2 \end{pmatrix} = 10 \quad |\overrightarrow{BA}| \cdot |\overrightarrow{BC}| = \sqrt{21} \cdot \sqrt{8}$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{10}{\sqrt{21} \cdot \sqrt{8}}\right) \approx 0.69 \approx 39.51^\circ$$

$$\overrightarrow{CA} \cdot \overrightarrow{CB} = \begin{pmatrix} -2 \\ -2 \\ -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ -2 \end{pmatrix} = -2 \quad |\overrightarrow{CA}| \cdot |\overrightarrow{CB}| = \sqrt{9} \cdot \sqrt{8}$$

$$\gamma = \arccos\left(\frac{-2}{3\sqrt{8}}\right) \approx 1.81 \approx 103.63^\circ$$

b

$$\overrightarrow{AB} \cdot \overrightarrow{AC} = \begin{pmatrix} -2 \\ -3 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -3 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} = 6 \quad |\overrightarrow{AB}| \cdot |\overrightarrow{AC}| = \sqrt{13} \cdot \sqrt{13}$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{6}{13}\right) \approx 1.09 \approx 62.51^\circ$$

$$\overrightarrow{BA} \cdot \overrightarrow{BC} = \overrightarrow{CA} \cdot \overrightarrow{CB} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -1 \\ 3 \\ 2 \end{pmatrix} = 7$$

$$|\overrightarrow{BA}| \cdot |\overrightarrow{BC}| = |\overrightarrow{CA}| \cdot |\overrightarrow{CB}| = \sqrt{13} \cdot \sqrt{14}$$

$$\beta = \gamma = \arccos\left(\frac{7}{\sqrt{13} \cdot \sqrt{14}}\right) \approx 1.03 \approx 58.74^\circ$$

zu 297/9

a

$$\overrightarrow{AB} \cdot \overrightarrow{AC} = \begin{pmatrix} 6 \\ -10 \\ 10 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ -2 \\ 2 \end{pmatrix} = 40 \quad |\overrightarrow{AB}| \cdot |\overrightarrow{AC}| = \sqrt{236} \cdot \sqrt{8}$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{40}{\sqrt{236} \cdot \sqrt{8}}\right) \approx 0.40 \approx 22.99^\circ$$

$$\overrightarrow{BA} \cdot \overrightarrow{BC} = \begin{pmatrix} -6 \\ 10 \\ -10 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -6 \\ 8 \\ -8 \end{pmatrix} = 196 \quad |\overrightarrow{BA}| \cdot |\overrightarrow{BC}| = \sqrt{236} \cdot \sqrt{164}$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{196}{\sqrt{236} \cdot \sqrt{164}}\right) \approx 0.09 \approx 4.95^\circ$$

$$\overrightarrow{CA} \cdot \overrightarrow{CB} = \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ -2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 6 \\ -8 \\ 8 \end{pmatrix} = -32 \quad |\overrightarrow{CA}| \cdot |\overrightarrow{CB}| = \sqrt{8} \cdot \sqrt{164}$$

$$\gamma = \arccos\left(\frac{-32}{\sqrt{8} \cdot \sqrt{164}}\right) \approx 2.65 \approx 152.06^\circ$$

b

$$\overrightarrow{AB} \cdot \overrightarrow{AC} = \begin{pmatrix} -2 \\ 8 \\ 16 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 8 \\ 4 \\ -4 \end{pmatrix} = -48 \quad |\overrightarrow{AB}| \cdot |\overrightarrow{AC}| = \sqrt{324} \cdot \sqrt{96}$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{-48}{\sqrt{324} \cdot \sqrt{96}}\right) \approx 1.85 \approx 105.79^\circ$$

$$\overrightarrow{BA} \cdot \overrightarrow{BC} = \begin{pmatrix} 2 \\ -8 \\ -16 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 10 \\ -4 \\ -20 \end{pmatrix} = 372 \quad |\overrightarrow{BA}| \cdot |\overrightarrow{BC}| = \sqrt{324} \cdot \sqrt{516}$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{372}{\sqrt{324} \cdot \sqrt{516}}\right) \approx 0.43 \approx 24.52^\circ$$

$$\overrightarrow{CA} \cdot \overrightarrow{CB} = \begin{pmatrix} -8 \\ -4 \\ 4 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -10 \\ 4 \\ 20 \end{pmatrix} = 144 \quad |\overrightarrow{CA}| \cdot |\overrightarrow{CB}| = \sqrt{96} \cdot \sqrt{516}$$

$$\gamma = \arccos\left(\frac{144}{\sqrt{96} \cdot \sqrt{516}}\right) \approx 0.87 \approx 49.68^\circ$$

321/2

a

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ -4 \\ 3 \end{pmatrix}$$
$$\vec{a} \cdot \vec{b} = 0$$
$$2b_1 - 12 + 0 = 0 \Rightarrow b_1 = 6$$

b

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 1 \\ a_2 \\ 3 \end{pmatrix} \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}$$
$$\vec{a} \cdot \vec{b} = 0$$
$$2 - a_2 + 3 = 0 \Rightarrow a_2 = 5$$

c

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} -1 \\ 4 \\ 2 \end{pmatrix} \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ b_3 \end{pmatrix}$$
$$\vec{a} \cdot \vec{b} = 0$$
$$-3 + 0 + 2b_3 = 0 \Rightarrow b_3 = 1.5$$

321/3

a

$$g: \vec{x} = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 7 \\ 17 \\ 2 \end{pmatrix}$$
$$\begin{pmatrix} 7 \\ 17 \\ 2 \end{pmatrix} \cdot \vec{a} = 0$$
$$7a_1 + 17a_2 + 2a_3 = 0$$

z. B.  $\vec{a} = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ -7 \end{pmatrix}$

$$h: \vec{x} = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ -7 \end{pmatrix}$$

322/8

a

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix} \quad \vec{c} = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix}$$

$$\text{I} \quad \vec{a} \cdot \vec{c} = 1c_1 + 2c_2 + 3c_3 = 0$$

$$\text{II} \quad \vec{b} \cdot \vec{c} = 2c_1 + 0c_2 + 3c_3 = 0 \quad \Rightarrow \quad c_1 = -\frac{3}{2}c_3$$

wähle willkürlich  $c_3 = 2 \Rightarrow c_1 = -3$

setze  $c_1$  und  $c_3$  in I ein

$$-3 + 2c_2 + 6 = 0 \quad \Rightarrow \quad c_2 = -\frac{3}{2}$$

$$\vec{c} = r \cdot \begin{pmatrix} -3 \\ -\frac{3}{2} \\ 2 \end{pmatrix} \quad r \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$$

b

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ -1 \end{pmatrix} \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} 5 \\ -1 \\ -2 \end{pmatrix} \quad \vec{c} = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix}$$

$$\text{I} \quad \vec{a} \cdot \vec{c} = 2c_1 + 3c_2 - c_3 = 0$$

$$\text{II} \quad \vec{b} \cdot \vec{c} = 5c_1 - c_2 - 2c_3 = 0$$

$$\text{I} = \frac{1}{2} \cdot \text{II} \quad \Rightarrow \quad c_1 = 7c_2$$

wähle willkürlich  $c_2 = 1 \Rightarrow c_1 = 7$

setze  $c_1$  und  $c_2$  in I ein

$$14 + 3 - c_3 = 0 \quad \Rightarrow \quad c_3 = 17$$

$$\vec{c} = r \cdot \begin{pmatrix} 7 \\ 1 \\ 17 \end{pmatrix} \quad r \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$$



c

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 5 \end{pmatrix} \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} 4 \\ -1 \\ 5 \end{pmatrix} \quad \vec{c} = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix}$$

$$\text{I} \quad \vec{a} \cdot \vec{c} = c_1 + 2c_2 + 5c_3 = 0$$

$$\text{II} \quad \vec{b} \cdot \vec{c} = 4c_1 - c_2 + 5c_3 = 0$$

$$\text{I} = \text{II} \Rightarrow c_1 = c_2$$

wähle willkürlich  $c_1 = 5 \Rightarrow c_2 = 5$

setze  $c_1$  und  $c_2$  in I ein

$$5 + 10 + 5c_3 = 0 \Rightarrow c_3 = -3$$

$$\vec{c} = r \cdot \begin{pmatrix} 5 \\ 5 \\ -3 \end{pmatrix} \quad r \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$$

322/9

a

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} 3 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} \quad \vec{c} = \begin{pmatrix} c_1 \\ 1 \\ 4 \end{pmatrix}$$

$$\vec{a} \cdot \vec{c} = c_1 + 0 + 8 = 0 \Rightarrow c_1 = -8$$

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = 3 + 0 + 2b_3 = 0 \Rightarrow b_3 = -1.5$$

$$\vec{b} \cdot \vec{c} = -24 + b_2 - 6 = 0 \Rightarrow b_2 = 30$$

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} 3 \\ 30 \\ -1.5 \end{pmatrix} \quad \vec{c} = \begin{pmatrix} -8 \\ 1 \\ 4 \end{pmatrix}$$

b

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \vec{c} = \begin{pmatrix} c_1 \\ 2 \\ -5 \end{pmatrix}$$

$$\vec{a} \cdot \vec{c} = c_1 + 2 - 5 = 0 \Rightarrow c_1 = 3$$

$$\text{I } \vec{a} \cdot \vec{b} = b_1 + b_2 + 1 = 0$$

$$\text{II } \vec{b} \cdot \vec{c} = 3b_1 + 2b_2 - 5 = 0$$

$$\Rightarrow b_1 = 7 \quad b_2 = -8 \quad (\text{Einsetzungsverfahren})$$

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} 7 \\ -8 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \vec{c} = \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ -5 \end{pmatrix}$$

366/7

a

$$A(2|-2|-2) \quad B(-2|5.5|-2) \quad C(-6|2|4) \quad D(1|-2|1)$$



$$\overrightarrow{AB} = \begin{pmatrix} -4 \\ 7.5 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{BC} = \begin{pmatrix} -4 \\ -3.5 \\ 6 \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{CD} = \begin{pmatrix} 7 \\ -4 \\ -3 \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{DA} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -3 \end{pmatrix}$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\vec{AB} \cdot \vec{AD}}{|\vec{AB}| \cdot |\vec{AD}|}\right) = \arccos\left(\frac{4}{\sqrt{72.25} \cdot \sqrt{10}}\right) \approx 1.42 \approx 81.44^\circ$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{\vec{BC} \cdot \vec{BA}}{|\vec{BC}| \cdot |\vec{BA}|}\right) = \arccos\left(\frac{10.25}{\sqrt{64.25} \cdot \sqrt{72.25}}\right) \approx 1.42 \approx 81.35^\circ$$

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\vec{CD} \cdot \vec{CB}}{|\vec{CD}| \cdot |\vec{CB}|}\right) = \arccos\left(\frac{32}{\sqrt{74} \cdot \sqrt{64.25}}\right) \approx 1.09 \approx 62.35^\circ$$

$$\delta = \arccos\left(\frac{\vec{DA} \cdot \vec{DC}}{|\vec{DA}| \cdot |\vec{DC}|}\right) = \arccos\left(\frac{-16}{\sqrt{10} \cdot \sqrt{74}}\right) \approx 2.20 \approx 126.03^\circ$$

b

$$\alpha + \beta + \gamma + \delta \approx 351^\circ$$

Die Summe der Innenwinkel ist nicht  $360^\circ$ , da das Viereck nicht auf einer Ebene liegt.

366/3

a

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ a \end{pmatrix} \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \\ 2 \end{pmatrix} \quad \alpha = 90^\circ$$

$$\alpha = 90^\circ \Rightarrow \vec{a} \cdot \vec{b} = 0 = 2a - 1 \Rightarrow a = \frac{1}{2}$$

b

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} \sqrt{3} \\ b \\ 0 \end{pmatrix} \quad \alpha = 30^\circ$$

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = b \quad |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| = \sqrt{3 + b^2}$$

$$\alpha = 30^\circ = \arccos\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \Rightarrow \frac{b}{\sqrt{3 + b^2}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \Rightarrow b = 3$$

c

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.5 \\ 0.5 \end{pmatrix} \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ c \end{pmatrix} \quad \alpha = 60^\circ$$

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = \frac{c}{2} \quad |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| = \sqrt{0.5} \cdot \sqrt{1 + c^2}$$

$$\alpha = 30^\circ = \arccos\left(\frac{1}{2}\right) \Rightarrow \frac{c}{2 \cdot \sqrt{0.5} \cdot \sqrt{1 + c^2}} = \frac{1}{2} \Rightarrow c = 1$$

366/4

$$\begin{aligned}\vec{a} &= \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix} & \vec{b} &= \begin{pmatrix} -1 \\ 5 \end{pmatrix} \\ \vec{a} \cdot \vec{b} &= 13 & |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| &= \sqrt{13} \cdot \sqrt{26} \\ \alpha_{a,b} = \alpha_{-a,-b} &= \arccos\left(\frac{13}{\sqrt{13} \cdot \sqrt{26}}\right) &= 45^\circ \\ \alpha_{-a,b} = \alpha_{a,-b} &= 180^\circ - 45^\circ = 135^\circ\end{aligned}$$

## 5.6 Vektorräume

Beispiel

$$\text{Vektorraum } V_1 = \left\{ \begin{pmatrix} a \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \mid a \in \mathbb{R} \right\} \subset \mathbb{R}^3$$

$$\text{Prüfe } \vec{a} + \vec{b} \in V_1: \quad \begin{pmatrix} a_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 + a_2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{Nullvektor} \quad \begin{pmatrix} a \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{Gegenvektor} \quad \begin{pmatrix} a \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -a \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{Kommutativgesetz} \quad \begin{pmatrix} a \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{Assoziativgesetz} \quad \left( \begin{pmatrix} a \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right) + \begin{pmatrix} c \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \left( \begin{pmatrix} b \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right)$$

$$V_2 = \left\{ \begin{pmatrix} a^2 \\ a \\ 0 \end{pmatrix} \mid a \in \mathbb{R} \right\} \subset \mathbb{R}^3$$

Abgeschlossenheit:

$$\begin{pmatrix} a^2 \\ a \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b^2 \\ b \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c^2 \\ c \\ 0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} a^2 \\ a \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b^2 \\ b \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a^2 + b^2 \\ a + b \\ 0 \end{pmatrix} \notin V_2$$

$$\text{z. B. } a = 3, b = 5 \quad \begin{pmatrix} 9 \\ 3 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 25 \\ 5 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 34 \\ 8 \\ 0 \end{pmatrix} \notin V_2$$

$$\left[ \begin{pmatrix} (a+b)^2 \\ a+b \\ c \end{pmatrix} \right] \in V_2$$

$\Rightarrow V_2$  ist kein Vektorraum, da er nicht abgeschlossen ist

300/1

b

$$V = \left\{ \begin{pmatrix} a \\ 2a \\ 3a \end{pmatrix} \mid a \in \mathbb{R} \right\}$$

$$\begin{pmatrix} a \\ 2a \\ 3a \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b \\ 2b \\ 3b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a+b \\ 2(a+b) \\ 3(a+b) \end{pmatrix} \in V \quad k \cdot \begin{pmatrix} a \\ 2a \\ 3a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ak \\ 2ak \\ 3ak \end{pmatrix} \in V$$

$\Rightarrow V$  ist ein Vektorraum

c

$$V = \left\{ \begin{pmatrix} a \\ a^2 \\ a^3 \end{pmatrix} \mid a \in \mathbb{R} \right\}$$

$$\begin{pmatrix} a \\ a^2 \\ a^3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b \\ b^2 \\ b^3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a+b \\ a^2+b^2 \\ a^3+b^3 \end{pmatrix} \notin V$$

$\Rightarrow V$  ist kein Vektorraum

### 5.6.1 Basis

Die Basis eines Vektorraums ist ein Satz von Vektoren mit den Eigenschaften:

- Jeder Vektor muss als Linearkombination der Vektoren der Basis darstellbar sein
- Die Anzahl der Basisvektoren muss minimal sein

Beispiel

$$V = \mathbb{R}^3 \quad Basis_1 = \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$$

$$\text{z. B. } \begin{pmatrix} 2 \\ -3 \\ 4 \end{pmatrix} = 2 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + (-3) \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + 4 \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$Basis_2 = \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$$

$$M = \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right\} \quad M \text{ ist keine Basis}$$

Die Mindestzahl von Vektoren der Basis heißt Dimension des Vektorraums.  $\mathbb{R}^3$  ist ein 3-dimensionaler Vektorraum.

$$V_1 = \left\{ \begin{pmatrix} 1a \\ 2a \\ 3a \end{pmatrix} \mid a \in \mathbb{R} \right\} \quad Basis = \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} \right\} \quad (1\text{-dim.})$$

$$V_2 = \left\{ \begin{pmatrix} a \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \mid a \in \mathbb{R} \right\} \quad Basis = \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right\} \quad (1\text{-dim.})$$

301/3

a

$$N = \left\{ \begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix} \mid a, b \in \mathbb{R} \right\}$$

$$\begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ -b_1 & a_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_2 & b_2 \\ -b_2 & a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 + a_2 & b_1 + b_2 \\ -(b_1 + b_2) & a_1 + a_2 \end{pmatrix}$$

$$r \cdot \begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ar & br \\ -br & ar \end{pmatrix}$$

$\Rightarrow N$  ist ein Vektorraum

$$Basis = \left\{ \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \right\}$$

b

$$N = \left\{ \begin{pmatrix} a & b \\ 0 & c \end{pmatrix} \mid a + b + c = 0 \right\}$$

$$\begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ 0 & c_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_2 & b_2 \\ 0 & c_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 + a_2 & b_1 + b_2 \\ 0 & c_1 + c_2 \end{pmatrix}$$

$$(a_1 + a_2) + (b_1 + b_2) + (c_1 + c_2) = (a_1 + b_1 + c_1) + (a_2 + b_2 + c_2) = 0$$

$$r \cdot \begin{pmatrix} a & b \\ 0 & c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ar & br \\ 0 & cr \end{pmatrix}$$

$$ar + br + cr = r(a + b + c) = 0$$

$\Rightarrow N$  ist ein Vektorraum

$$Basis = \left\{ \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \right\}$$

c

$$N = \left\{ \begin{pmatrix} 1 & a \\ a & 1 \end{pmatrix} \mid a \in \mathbb{R} \right\}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & a_1 \\ a_1 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & a_2 \\ a_2 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & a_1 + a_2 \\ a_1 + a_2 & 2 \end{pmatrix}$$

$\Rightarrow N$  ist kein Vektorraum

## 5.7 Lineare Abhängigkeit, Unabhängigkeit

Beispiele

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 1 \\ -3 \\ 2 \end{pmatrix} \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} -4 \\ 12 \\ -8 \end{pmatrix}$$
$$-4\vec{a} = \vec{b} \quad \text{oder} \quad 4\vec{a} + \vec{b} = \vec{0}$$

$\vec{a}, \vec{b}$  sind linear abhängig; geometrisch formuliert:  $\vec{a}, \vec{b}$  sind kollinear

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 3 \end{pmatrix} \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \vec{c} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 9 \end{pmatrix}$$

$(\vec{a}, \vec{b}), (\vec{a}, \vec{c}), (\vec{b}, \vec{c})$  sind jeweils linear unabhängig

$(\vec{a}, \vec{b}, \vec{c})$  sind linear abhängig, denn  $2\vec{a} + 3\vec{b} = \vec{c}$  oder  $2\vec{a} + 3\vec{b} - \vec{c} = \vec{0}$

Allgemein gilt für 3 Vektoren  $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$

gilt mindestens eine der Gleichungen

$$r \cdot \vec{a} + s \cdot \vec{b} = \vec{c} \quad \text{oder}$$

$$r \cdot \vec{a} + s \cdot \vec{c} = \vec{b} \quad \text{oder}$$

$$r \cdot \vec{b} + s \cdot \vec{c} = \vec{a}$$

dann heißt die Vektormenge  $\{\vec{a}; \vec{b}; \vec{c}\}$  linear abhängig

einfachere Prüfung:

gilt

$$r \cdot \vec{a} + s \cdot \vec{b} + t \cdot \vec{c} = \vec{0} \quad r \neq 0 \vee s \neq 0 \vee t \neq 0$$

dann sind  $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$  linear abhängig, andernfalls linear unabhängig



Prüfe auf lineare Abhängigkeit

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} -2 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \vec{c} = \begin{pmatrix} 3 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}$$
$$r \cdot \vec{a} + s \cdot \vec{b} + t \cdot \vec{c} = \vec{0}$$

$$\text{I} \quad r - 2s + 3t = 0$$

$$\text{II} \quad 2r + 2s - t = 0$$

$$\text{III} \quad 3r + s + t = 0$$

$$L = \{(0, 0, 0)\} \Rightarrow \{\vec{a}; \vec{b}; \vec{c}\} \text{ ist linear unabhängig}$$

Ist  $\{\vec{a}; \vec{b}; \vec{c}\}$  eine Basis des  $\mathbb{R}^3$ ?

Das meint:

Lässt sich jeder Vektor des  $\mathbb{R}^3$  durch eine Linearkombination von  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$ ,  $\vec{c}$  darstellen?

Löse dazu:

$$r \cdot \vec{a} + s \cdot \vec{b} + t \cdot \vec{c} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

304/2

b

$$\begin{pmatrix} 7 \\ -1 \\ 3 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \\ 1 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 3 \\ -6 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$7r + s + 3t = 0$$

$$-r - 2s - 6t = 0$$

$$3r + s + 3t = 0$$

$$L = \{(0, 0, 0); (0, k, -\frac{k}{3})\} \Rightarrow \text{linear abhängig}$$

Die letzten beiden Vektoren sind kollinear. Der erste Vektor, der nicht kollinear zu den anderen beiden ist, lässt sich daher nicht durch eine Linearkombination der anderen beiden darstellen.

Prüfe auf lineare Abhängigkeit

$$r \cdot \vec{a} + s \cdot \vec{b} + t \cdot \vec{c} = \vec{0}$$

$r = s = t = 0$  ist immer eine Lösung (triviale Lösung)

Findet man weitere Lösungen, so sind  $\{\vec{a}; \vec{b}; \vec{c}\}$  linear abhängig und komplanar. Andernfalls (nur triviale Lösung) sind sie linear unabhängig und bilden eine Basis des  $\mathbb{R}^3$ .

Da  $\left| \left\{ \vec{a}; \vec{b}; \vec{c} \right\} \right| = 3$  ist der  $\mathbb{R}^3$  dreidimensional.

304/4

c

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} -4 \\ -2 \\ 2 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} -7 \\ -2 \\ 8 \end{pmatrix}$$

$$r - 4s - 7t = 0$$

$$r - 2s - 2t = 0$$

$$r + 2s + 8t = 0$$

$$L = \{(0, 0, 0); (-6k, -5k, 2k)\} \Rightarrow \text{linear abhängig}$$

d

$$\begin{pmatrix} 4 \\ -1 \\ 2 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 1 \\ 4 \\ 1 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} -2 \\ 3 \\ -1 \end{pmatrix}$$

$$4r + s - 2t = 0$$

$$-r + 4s + 3t = 0$$

$$2r + s - t = 0$$

$$L = \{(0, 0, 0)\} \Rightarrow \text{linear unabhängig}$$

304/6

$$r \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ -2 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \\ 2 \\ -8 \end{pmatrix}$$

$$2r - s = a$$

$$3r + s = 2$$

$$-2r + 2s = -8$$

$$a = 5.5$$

$$r = 1.5 \quad s = -2.5$$

## 5.8 Wiederholung: Geometrie, Geraden

307/10 1

$$r = 1.5cm$$

$$A_{Kreis} = \pi \cdot r^2 = 7.069cm^2$$

$$A_{Dreieck} = \frac{1}{2} \cdot r^2 = 1.125cm^2$$

$$A = A_{Kreis} - A_{Dreieck} = 5.944cm^2$$

2

$$A_{Parall.} = 4cm \cdot 2cm = 8cm^2$$

$$A_{Trapez} = \frac{1}{2} \cdot (1cm + 2.5cm) \cdot 2cm = 3.5cm^2$$

$$A = A_{Parall.} - A_{Trapez} = 4.5cm^2$$

307/11

a Parallelogramme

b Dreiecke

309/13

a

$$x_3 = 0$$

b

$$\vec{x} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 7 \end{pmatrix} + r \cdot \begin{pmatrix} -2 \\ 5 \\ -1 \end{pmatrix}$$

$x_1$ - $x_2$ -Ebene

$$x_3 = 0 \quad \Rightarrow \quad r = 7$$

$$R(-12|38|0)$$

$x_2$ - $x_3$ -Ebene

$$x_1 = 0 \quad \Rightarrow \quad r = 1$$

$$S(0|8|6)$$

$x_1$ - $x_3$ -Ebene

$$x_2 = 0 \quad \Rightarrow \quad r = -\frac{3}{5}$$

$$T(3.2|0|7.6)$$

c

$$i: \vec{x} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} + r \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

d

$$j: \vec{x} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} + r \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

## 5.9 Parametergleichung einer Ebene

$$E: \vec{x} = \vec{a} + r \cdot \vec{b} + s \cdot \vec{c}$$

$E$  ... Name der Ebene

$\vec{a}$  ... Stützvektor, Ortsvektor eines bestimmten Punktes  $A$

$\vec{b}, \vec{c}$  ... Spannvektoren

$r, s$  ... Parameter, die durchlaufen gedanklich alle Werte von  $\mathbb{R}$

$\vec{x}$  ... allgemeiner, unbestimmter Ortsvektor aller Punkte  $X$  der Ebene  $E$

Ich erhalte eine Ebenengleichung, wenn

- Stütz- und 2 Spannvektoren
- 3 Punkte (nicht auf einer Geraden)
- 1 Gerade und 1 Punkt
- 2 sich schneidende Geraden
- 2 echt parallele Geraden

Punktprobe:

$$P \in E ?$$

$\vec{p}$  ist Ortsvektor von  $P$

$$\vec{p} = \vec{a} + r \cdot \vec{b} + s \cdot \vec{c} \Rightarrow 3 \times 2 \text{ LGS}$$

wenn eindeutig lösbar, dann  $P \in E$

318/5

a

$$A(0|1|-1) \quad B(2|3|5) \quad C(-1|3|-1) \quad D(2|2|2)$$

$$E: \vec{x} = \overrightarrow{OA} + r \cdot \overrightarrow{AB} + s \cdot \overrightarrow{AC} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix} + r \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 6 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$D \in E ?$$

$$\text{I} \quad 2 = 2r - s$$

$$\text{II} \quad 2 = 1 + 2r + 2s$$

$$\text{III} \quad 2 = -1 + 6r$$

$$L = \{\} \Rightarrow \text{keine Ebene}$$

b

$$A(3|0|2) \quad B(5|1|9) \quad C(6|2|7) \quad D(8|3|14)$$

$$E: \vec{x} = \overrightarrow{OA} + r \cdot \overrightarrow{AB} + s \cdot \overrightarrow{AC} = \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} + r \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 7 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 5 \end{pmatrix}$$

$$D \in E ?$$

$$\text{I} \quad 8 = 3 + 2r + 3s$$

$$\text{II} \quad 3 = r + 2s$$

$$\text{III} \quad 14 = 2 + 7r + 5s$$

$$L = \{(1, 1)\} \Rightarrow \text{Ebene}$$

**319/10**

a

$$E: \vec{x} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 3 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} 4 \\ -5 \\ 2 \end{pmatrix}$$

b

$$E: \vec{x} = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ 5 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 7 \\ 10 \end{pmatrix}$$

**319/12**

a

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 4 \\ 3 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$1 + 2t = 3 + s$$

$$1 + 3t = 4$$

$$2 + t = 3 + s$$

$$L = \{(0; 1)\}$$

$$E: \vec{x} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

## 5.10 Sonderfälle

$$E: \vec{x} = \vec{a} + r \cdot \vec{b} + s \cdot \vec{c} \quad r, s \in \mathbb{R}$$

$\{\vec{a}; \vec{b}; \vec{c}\}$  sind in der Regel linear unabhängig, d. h. nicht komplanar. Im Sonderfall sind  $\{\vec{a}; \vec{b}; \vec{c}\}$  komplanar. Das bedeutet, dass  $E$  durch den Ursprung  $O$  verläuft. Im Sonderfall darf ich  $E$  so schreiben:

$$E: \vec{x} = r \cdot \vec{b} + s \cdot \vec{c}$$

$$g: \vec{x} = \vec{d} + r \cdot \vec{e} \quad r \in \mathbb{R}$$

$\{\vec{d}; \vec{e}\}$  sind normalerweise nicht kollinear. Im Sonderfall,  $g$  verläuft durch  $O$ , sind sie kollinear:

$$g: \vec{x} = r \cdot \vec{e}$$

322/14

a

$$\begin{aligned} E: \vec{x} &= \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} + r \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \\ 2 \end{pmatrix} & g: \vec{x} &= \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \\ 1 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \\ 1 \end{pmatrix} &= 0 & \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \\ 2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \\ 1 \end{pmatrix} &= 0 \\ \Rightarrow & \text{orthogonal} \end{aligned}$$

b

$$\begin{aligned} E: \vec{x} &= r \cdot \begin{pmatrix} -2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix} & g: \vec{x} &= t \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \\ 2 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} -2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \\ 2 \end{pmatrix} &= 0 & \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \\ 2 \end{pmatrix} &= 4 \\ \Rightarrow & \text{nicht orthogonal} \end{aligned}$$

$$E: \vec{x} = \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ 4 \end{pmatrix} + r \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \\ 5 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 2 \\ -1 \\ 5 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = 0$$

$$2x - y + 5z = x + z = 0 \quad L = \{(k; -3k; -k)\}$$

$$g: \vec{x} = \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ 4 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} k \\ -3k \\ -k \end{pmatrix}$$

$$g: \vec{x} = \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ 4 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ -3 \\ -1 \end{pmatrix} \quad \text{für } k = 1$$

## 5.11 Kreuzprodukt

$$\vec{a} \times \vec{b} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_2 b_3 - a_3 b_2 \\ a_3 b_1 - a_1 b_3 \\ a_1 b_2 - a_2 b_1 \end{pmatrix}$$

$$\vec{a} \cdot \vec{x} = 0 \quad | \quad a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 = 0$$

$$\vec{b} \cdot \vec{x} = 0 \quad || \quad b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 = 0$$

$$b_1 \cdot | - a_1 \cdot ||$$

$$| a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 = 0$$

$$|| 0 + (b_1 a_2 - a_1 b_2) x_2 + (b_1 a_3 - a_1 b_3) x_3 = 0$$

$$\text{willkürlich } x_2 = a_3 b_1 - a_1 b_3$$

$$\Rightarrow x_3 = -(a_2 b_1 - a_1 b_2) = a_1 b_2 - a_2 b_1$$

$$\Rightarrow x_1 = a_2 b_3 - a_3 b_2$$



$$|\vec{a} \times \vec{b}| = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \sin(\alpha)$$



$$\sin(\alpha) = \frac{h}{|\vec{b}|}$$

$$h = |\vec{b}| \cdot \sin(\alpha)$$

$$A_P = |\vec{a}| \cdot h = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \sin(\alpha) = |\vec{a} \times \vec{b}|$$

Das Kreuzprodukt  $\vec{a} \times \vec{b}$  ergibt einen Vektor als Ergebnis. Die Länge des Vektors  $\vec{c}$  ist  $|\vec{c}|$  und entspricht dem Flächeninhalt  $A_P$  des von den Vektoren  $\vec{a}$  und  $\vec{b}$  aufgespannten Parallelogramms.

373/1

a

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 5 \end{pmatrix} \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \vec{c} = \begin{pmatrix} -1 \\ 5 \\ 0 \end{pmatrix}$$

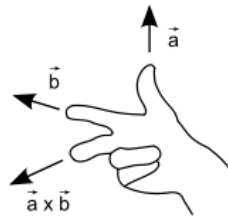
$$\vec{a} \times \vec{b} = \begin{pmatrix} 1 \cdot 1 - 5 \cdot 2 \\ 5 \cdot 3 - 2 \cdot 1 \\ 2 \cdot 2 - 1 \cdot 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -9 \\ 13 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\vec{b} \times \vec{c} = \begin{pmatrix} 2 \cdot 0 - 1 \cdot 5 \\ 1 \cdot (-1) - 3 \cdot 0 \\ 3 \cdot 5 - 2 \cdot (-1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -5 \\ -1 \\ 17 \end{pmatrix}$$

$$\vec{c} \times \vec{a} = \begin{pmatrix} 5 \cdot 5 - 0 \cdot 1 \\ 0 \cdot 2 - (-1) \cdot 5 \\ -1 \cdot 1 - 5 \cdot 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 25 \\ 5 \\ -11 \end{pmatrix}$$

$$\vec{a} \times \vec{b} = \vec{c} \quad \vec{b} \times \vec{a} = -\vec{c}$$

$\vec{a}$ ,  $\vec{b}$ ,  $\vec{c}$  bilden ein Rechtssystem (rechte Hand)



373/3

a

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ -1 \end{pmatrix} \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{a} \times \vec{b} = \begin{pmatrix} 2 \cdot 0 - (-1) \cdot 1 \\ -1 \cdot 1 - 3 \cdot 0 \\ 3 \cdot 1 - 2 \cdot 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\left| \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix} \right| = \sqrt{1^2 + (-1)^2 + 1^2} = \sqrt{3}$$

$$A_P = \sqrt{3}FE \approx 1.732FE$$

b

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 5 \\ -2 \\ 2 \end{pmatrix} \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} 8 \\ 9 \\ -2 \end{pmatrix}$$

$$\vec{a} \times \vec{b} = \begin{pmatrix} -2 \cdot (-2) - 2 \cdot 9 \\ 2 \cdot 8 - 5 \cdot (-2) \\ 5 \cdot 9 - (-2) \cdot 8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -14 \\ 26 \\ 61 \end{pmatrix}$$

$$\left| \begin{pmatrix} -14 \\ 26 \\ 61 \end{pmatrix} \right| = \sqrt{(-14)^2 + 26^2 + 61^2} = \sqrt{4593}$$

$$A_P = \sqrt{4593}FE \approx 67.772FE$$

Wenn  $\vec{a} \parallel \vec{b}$ , also kollinear, dann gilt  $\vec{a} \times \vec{b} = \vec{0}$   
 $|\vec{a} \times \vec{b}| = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \sin(\alpha)$

## 5.12 Spatprodukt

$$\begin{aligned} V_{Spat} &= G \cdot h = |\vec{a} \times \vec{b}| \cdot h \\ &= |\vec{a} \times \vec{b}| \cdot |\vec{c}| \cdot \cos(\alpha) \\ &= |(\vec{a} \times \vec{b}) \cdot \vec{c}| \quad (\text{Spatprodukt}) \end{aligned}$$

Anwendung: Berechne das Volumen von Spat und Pyramiden

$$\begin{aligned} V_{Spat} &= |(\vec{a} \times \vec{b}) \cdot \vec{c}| \\ V_{Pyramide} &= \frac{1}{3} \cdot |(\vec{a} \times \vec{b}) \cdot \vec{c}| \quad (\text{Grundseite: Parallelogramm des Spats}) \\ V_{Pyramide, dreiseitig} &= \frac{1}{6} \cdot |(\vec{a} \times \vec{b}) \cdot \vec{c}| \end{aligned}$$

374/6

a

$$\begin{aligned} \vec{a} &= \begin{pmatrix} -1 \\ 5 \\ 6 \end{pmatrix} \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} 8 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \vec{c} = \begin{pmatrix} -2 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix} \\ V_S &= \left| \begin{pmatrix} -1 \\ 5 \\ 6 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 8 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -2 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix} \right| = \left| \begin{pmatrix} -7 \\ 49 \\ -42 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -2 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix} \right| = 196 \\ V_P &= \frac{1}{6} \cdot 196 = 32.\bar{6} \end{aligned}$$

b

$$\begin{aligned} \vec{a} &= \begin{pmatrix} 1 \\ 7 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} -8 \\ 8 \\ 18 \end{pmatrix} \quad \vec{c} = \begin{pmatrix} 7 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix} \\ V_S &= \left| \begin{pmatrix} 1 \\ 7 \\ 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} -8 \\ 8 \\ 18 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 7 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix} \right| = \left| \begin{pmatrix} 118 \\ -26 \\ 64 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 7 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix} \right| = 902 \\ V_P &= \frac{1}{6} \cdot 902 = 150.\bar{3} \end{aligned}$$

## 5.13 Abstand eines Punktes von einer Geraden

gegeben:

$$g: \vec{x} = \vec{a} + r \cdot \vec{b}$$

$$P: \vec{p}$$



$$\text{Bilde } |\vec{b} \times \overrightarrow{AP}| = A_{\text{Parallelogramm}}$$

$$|\vec{b}| \cdot |\vec{h}| = A_{\text{Parallelogramm}}$$

$$|\vec{b} \times \overrightarrow{AP}| = |\vec{b}| \cdot |\vec{h}|$$

$$\Rightarrow \frac{|\vec{b} \times \overrightarrow{AP}|}{|\vec{b}|} = |\vec{h}|$$

$|\vec{h}|$  ist der gesuchte Abstand von Punkt  $P$  zur Geraden  $g$ .

373/5

c

$$\begin{aligned}
 g: \vec{x} &= \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix} & R(-2|-1|1) \\
 \overrightarrow{PR} &= \begin{pmatrix} -3 \\ -2 \\ 1 \end{pmatrix} & \vec{u} = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix} \\
 |\vec{h}| &= \frac{|\vec{u} \times \overrightarrow{PR}|}{|\vec{u}|} = \frac{\left| \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix} \right|}{\left| \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix} \right|} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{6}} = \sqrt{\frac{1}{2}} \approx 0.7071
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 g: \vec{x} &= \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 2 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ -3 \\ -6 \end{pmatrix} & R(1|2|-3) \\
 \overrightarrow{PR} &= \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ -5 \end{pmatrix} & \vec{u} = \begin{pmatrix} 2 \\ -3 \\ -6 \end{pmatrix} \\
 |\vec{h}| &= \frac{|\vec{u} \times \overrightarrow{PR}|}{|\vec{u}|} = \frac{\left| \begin{pmatrix} -9 \\ -16 \\ -5 \end{pmatrix} \right|}{\left| \begin{pmatrix} 2 \\ -3 \\ -6 \end{pmatrix} \right|} = \frac{\sqrt{362}}{\sqrt{49}} \approx 2.7180
 \end{aligned}$$

## 5.14 Ebenendarstellung

### 5.14.1 Normalenform

$$E: \vec{x} = \vec{a} + r \cdot \vec{b} + s \cdot \vec{c}$$

$$E: (\vec{x} - \vec{a}) \cdot \vec{n} = 0$$

$$\overrightarrow{AX} \cdot \vec{n} = 0$$

$\vec{n}$  ... Normalenvektor der Ebene

$\vec{a}$  ... Stützvektor, Ortsvektor eines bestimmten Punktes

$\vec{x}$  ... allgemeiner Ortsvektor aller Punkte der Ebene

$\overrightarrow{AX}$  ... Verbindungsvektor, der in der Ebene liegt

Punkte  $X$  der Ebene sind diejenigen, deren Verbindungsvektoren  $\overrightarrow{AX}$  orthogonal zu  $\vec{n}$  stehen.

z. B.

$$\left( \vec{x} - \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} \right) \cdot \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 4 \end{pmatrix} = 0$$

$$\text{Beispiellösung } x_1 = \begin{pmatrix} 5 \\ 0 \\ 4 \end{pmatrix}$$

Punktprobe  $P(2|1|1)$   $P \in E$ ?

$$\begin{pmatrix} 2-1 \\ 1-2 \\ 1-3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 4 \end{pmatrix} = 0 \quad -1 + 0 - 8 = -9 \neq 0 \quad \Rightarrow \quad P \notin E$$

Normalengleichung aus  $A(1|0|5)$ ,  $B(0|2|1)$ ,  $C(4|5|6)$

$$E: \vec{x} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix} + r \cdot \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \\ -4 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 3 \\ 5 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\vec{n} = \overrightarrow{AB} \times \overrightarrow{AC} = \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \\ -4 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 3 \\ 5 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 22 \\ -11 \\ -11 \end{pmatrix}$$

$$E: \left( \vec{x} - \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix} \right) \cdot \begin{pmatrix} 22 \\ -11 \\ -11 \end{pmatrix} = 0$$

## 5.14.2 Koordinatenform

Berechne das Skalarprodukt in der Normalengleichung mit  $\vec{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}$

$$E: \left( \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} \right) \cdot \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{pmatrix} = 0$$

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{pmatrix} = 0$$

$$(n_1 \cdot x_1 + n_2 \cdot x_2 + n_3 \cdot x_3) - (a_1 \cdot n_1 + a_2 \cdot n_2 + a_3 \cdot n_3) = 0$$

$$\text{z. B. } 22x_1 - 11x_2 - 11x_3 = -33$$

$$\text{Beispiellösungen } \vec{x} = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 6 \end{pmatrix}, \dots$$

$$E: ax_1 + bx_2 + cx_3 = d$$

Betrachte die Koordinatenform als eine Gleichung für drei Variablen  $x_1, x_2, x_3$ . Die Lösungen der Gleichung sind Dreiertupel  $L = \{(\dots, \dots, \dots), \dots\}$ . Notiere ich die Dreiertupel als Spaltenvektoren, so stellen sie die Ortsvektoren der Punkte der Ebene  $E$  dar. Die Koeffizienten  $a, b, c$  der Koordinatenform sind die Koordinaten von  $\vec{n}$ , des Normalenvektors.

### Koordinatenform $\rightarrow$ Normalenform

$$\text{z. B. } 5x_1 - x_2 + 3x_3 = 9$$

$$1. \text{ Lies ab } \vec{n} = \begin{pmatrix} 5 \\ -1 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$2. \text{ Finde eine Lösung } \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}, \text{ z. B. } \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$E: \left( \vec{x} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix} \right) \cdot \begin{pmatrix} 5 \\ -1 \\ 3 \end{pmatrix} = 0$$

### Sonderfälle

•

$$E: x_3 = 5 \rightarrow \vec{n} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Punkte der Ebene haben  $x_3 = 5$ ;  $x_1, x_2$  sind beliebige Koordinaten.

$$\text{z. B. } \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 5 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -2 \\ 3 \\ 5 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 7 \\ 5 \end{pmatrix}, \dots$$

$x_1$  und  $x_2$  sind nicht erwähnt, also frei wählbar.

•

$$E: 2x_1 - 4x_2 = 0$$

Der Ursprung  $O$  ist Teil der Ebene  $E$ . Der Verbindungsvektor  $\vec{O} - \vec{a}$ , also der Ortsvektor  $\vec{a}$  liegt in der Ebene  $E$  und steht orthogonal zu  $\vec{n}$ . Daher sind  $\vec{a} \cdot \vec{n} = 0$  und damit  $d = 0$ .

325/3

$$D(-7|1|3)$$

a

$$A(1|1|1) \quad B(1|0|1) \quad C(0|1|1)$$

$$\vec{AB} = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \vec{AC} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{n} = \vec{AB} \times \vec{AC} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}$$

$$E: \left( \vec{x} - \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right) \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} = 0$$

$$E: -x_3 = 0 + 0 - 1 = -1$$

$$D \in E? \quad -x_3 = -3 \neq -1 \quad \Rightarrow \quad D \notin E$$



b

$$A(-1|2|0) \quad B(-3|1|1) \quad C(1|-1|-1)$$

$$\overrightarrow{AB} = \begin{pmatrix} -2 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{AC} = \begin{pmatrix} 2 \\ -3 \\ -1 \end{pmatrix}$$

$$\vec{n} = \overrightarrow{AB} \times \overrightarrow{AC} = \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ 8 \end{pmatrix}$$

$$E: \left( \vec{x} - \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix} \right) \cdot \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ 8 \end{pmatrix} = 0$$

$$E: 4x_1 + 8x_3 = -4 + 0 + 0 = -4$$

$$D \in E? \quad 4x_1 + 8x_3 = -28 + 24 = -4 \quad \Rightarrow \quad D \in E$$

### 5.14.3 Ebenen zeichnen

Zeichne Ebene  $E: 2x_1 - 3x_2 + 5x_3 = 12$

Schnitt mit der ...

$x_1$ -Achse:

$$x_2 = x_3 = 0 \quad \Rightarrow \quad 2x_1 = 12 \quad x_1 = 6 \quad P(6|0|0)$$

$x_2$ -Achse:

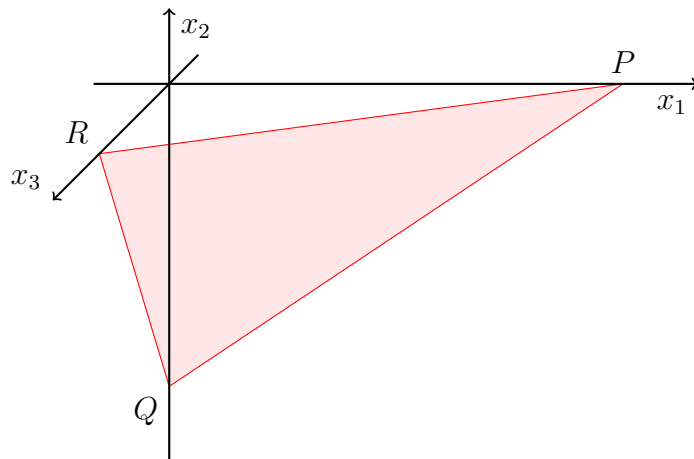
$$x_1 = x_3 = 0 \quad \Rightarrow \quad -3x_2 = 12 \quad x_2 = -4 \quad Q(0|-4|0)$$

$x_3$ -Achse:

$$x_1 = x_2 = 0 \quad \Rightarrow \quad 5x_3 = 12 \quad x_3 = 2.4 \quad R(0|0|2.4)$$

$P, Q, R$  heißen Spurpunkte.

Gerade durch  $P$  und  $Q$  (bzw.  $Q$  und  $R$ ,  $P$  und  $R$ ) heißt Spurgerade.



Spurgerade (PQ):

$$g: \vec{x} = \begin{pmatrix} 0 \\ -4 \\ 0 \end{pmatrix} + r \cdot \begin{pmatrix} 6 \\ 4 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Spezialfälle

•

$$3x_1 + 6x_3 = 18 \quad P(6|0|0) \quad R(0|0|3) \quad Q(0|\infty|0)$$

Kein Schnitt mit der  $x_2$ -Achse, verläuft parallel zur  $x_2$ -Achse.

•

$$2x_1 = 5 \quad P(2.5|0|0)$$

Kein Schnitt mit der  $x_2$ - und  $x_3$ -Achse, verläuft parallel zur  $x_2x_3$ -Ebene.

**328/3** Fig. 1

$$\begin{array}{lll} P(2|0|0) & Q(0|5|0) & R(0|0|3) \\ 15x_1 = 30 & 6x_2 = 30 & 10x_3 = 30 \\ E: 15x_1 + 6x_2 + 10x_3 = 30 \end{array}$$

Fig. 2

$$\begin{array}{lll} P(1|0|0) & Q(0|4|0) & R(0|0|-1.5) \\ 12x_1 = 12 & 3x_2 = 12 & -8x_3 = 12 \\ E: 12x_1 + 3x_2 - 8x_3 = 12 \end{array}$$

328/5

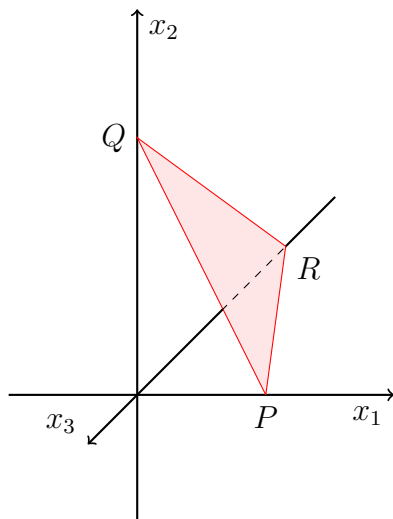
a

$$E: \vec{x} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} + r \cdot \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6 \\ 3 \\ -2 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} \cdot \vec{n} = 6$$

$$E: 6x_1 + 3x_2 - 2x_3 = 6$$

$$P(1|0|0) \quad Q(0|2|0) \quad R(0|0|-3)$$



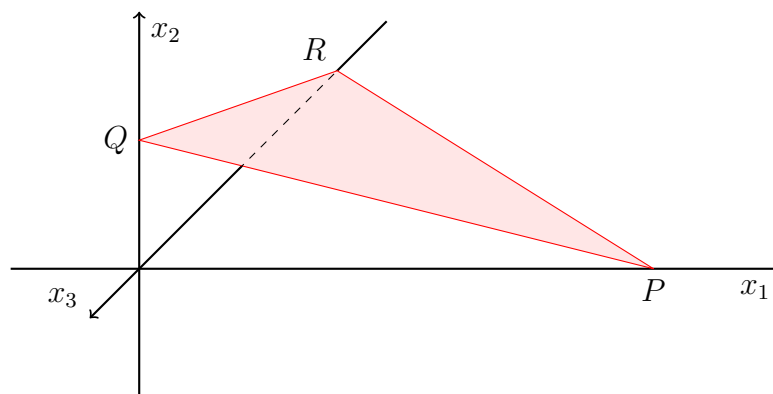
b

$$E: \vec{x} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} + r \cdot \begin{pmatrix} 5 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 4 \end{pmatrix}$$

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} 5 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -5 \\ -20 \\ 5 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot \vec{n} = -20$$

$$E: -5x_1 - 20x_2 + 5x_3 = -20$$

$$P(4|0|0) \quad Q(0|1|0) \quad R(0|0|-4)$$



328/6 Fig. 3

$$P(0|3|0)$$

$$E: x_2 = 3$$

parallel zur  $x_1x_3$ -Ebene

Fig. 4

$$P(1|0|0) \quad Q(0|5|0)$$

$$5x_1 = 5 \quad x_2 = 5$$

$$E: 5x_1 + x_2 = 5$$

parallel zur  $x_3$ -Ebene

## 5.15 Lage Ebene $\leftrightarrow$ Gerade

- schneiden sich
- verlaufen parallel
- Gerade ist Teil der Ebene

Beispiel:

$$E: 2x_1 - x_2 + 3x_3 = 16$$

$$g: \vec{x} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} + r \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1+2r \\ 2-r \\ 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}$$

$g$  in  $E$  eingesetzt

$$2 \cdot (1 + 2r) - (2 - r) + 3 \cdot 3 = 16$$

$$\Rightarrow r = \frac{7}{5}$$

$$\text{Schnittpunkt } \overrightarrow{OS} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} + \frac{7}{5} \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.8 \\ 0.6 \\ 3 \end{pmatrix}$$

- eindeutige Lösung für  $r \Rightarrow$  schneiden sich
- kein  $r$  erfüllt die Gleichung  $\Rightarrow$  kein Schnittpunkt, parallele Lage
- für jedes  $r$  ein möglicher gemeinsamer Punkt  $\Rightarrow$  Gerade liegt in der Ebene

330/1

$$g: \vec{x} = \begin{pmatrix} 4 \\ 6 \\ 2 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}$$

a

$$E: 2x_1 + 4x_2 + 6x_3 = 16$$

$$2 \cdot (4 + t) + 4 \cdot (6 + 2t) + 6 \cdot (2 + 3t) = 16$$

$$\Rightarrow t = -1$$

$$\begin{pmatrix} 4 \\ 6 \\ 2 \end{pmatrix} - 1 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 4 \\ -1 \end{pmatrix}$$

$$S(3|4|-1)$$

b

$$E: 5x_2 - 7x_3 = 13$$

$$5 \cdot (6 + 2t) - 7 \cdot (2 + 3t) = 13$$

$$t = \frac{3}{11}$$

$$\begin{pmatrix} 4 \\ 6 \\ 2 \end{pmatrix} + \frac{3}{11} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4.\overline{27} \\ 6.\overline{54} \\ 2.\overline{81} \end{pmatrix}$$

$$S(4.\overline{27}|6.\overline{54}|2.\overline{81})$$

**330/2**

a

$$g: \vec{x} = \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \\ 4 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} 7 \\ 8 \\ 6 \end{pmatrix} \quad E: \vec{x} = \begin{pmatrix} 1 \\ 4 \\ 3 \end{pmatrix} + r \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$-2 + 7t = 1 + s$$

$$1 + 8t = 4 - r$$

$$4 + 6t = 3 + r + 3s$$

$$t = 1 \quad r = -5 \quad s = 4$$

$$\begin{pmatrix} -2 \\ 1 \\ 4 \end{pmatrix} + 1 \cdot \begin{pmatrix} 7 \\ 8 \\ 6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 \\ 9 \\ 10 \end{pmatrix}$$

$$S(5|9|10)$$

b

$$g: \vec{x} = \begin{pmatrix} 22 \\ -18 \\ -7 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} 4 \\ 1 \\ -5 \end{pmatrix} \quad E: \vec{x} = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + r \cdot \begin{pmatrix} 4 \\ -7 \\ 1 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 4 \\ -3 \end{pmatrix}$$

$$22 + 4t = 2 + 4r$$

$$-18 + t = 1 - 7r + 4s$$

$$-7 - 5t = r - 3s$$

$$t = r - 5 \quad s = 2r - 6$$

$$g \in E$$

c

$$g: \vec{x} = t \cdot \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix} \quad E: \vec{x} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} + r \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$-t = 2r$$

$$-t = 2s$$

$$-t = 2$$

$$t = -2 \quad r = 1 \quad s = 1$$

$$-2 \cdot \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix}$$

$$S(2|2|2)$$

### 5.15.1 Schnittwinkel

$$g: \vec{x} = \vec{a} + r \cdot \vec{b} \quad h: \vec{x} = \vec{c} + s \cdot \vec{d}$$

$$\vec{b} \cdot \vec{d} = |\vec{b}| \cdot |\vec{d}| \cdot \cos(\alpha)$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\vec{b} \cdot \vec{d}}{|\vec{b}| \cdot |\vec{d}|}\right) \quad \alpha < 90^\circ$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\vec{n} \cdot \vec{b}}{|\vec{n}| \cdot |\vec{b}|}\right) \quad \beta = \arcsin\left(\frac{\vec{n} \cdot \vec{b}}{|\vec{n}| \cdot |\vec{b}|}\right) \quad \beta = 90^\circ - \alpha$$