

# *Schülerskript SMP*

Mach' dir keine Sorgen wegen deiner Schwierigkeiten mit der Mathematik.  
Ich kann dir versichern, daß meine noch größer sind.

---

*Brief an ein Schulmädchen, 1943*  
ALBERT EINSTEIN

Clara Schaefer  
Bruno Gelfort  
Pascal Borel  
Rémy Moll

**1<sup>ère</sup> & Te SMP**



# Inhaltsverzeichnis

<b>Kapitel 1</b>	<b>Folgen</b>	<b>7</b>
1.1	Verschiedene Darstellungen . . . . .	7
1.1.1	Explizite Darstellung . . . . .	7
1.1.2	Rekursive Darstellung . . . . .	7
1.2	Auffällige Folgen . . . . .	10
1.2.1	Arithmetische Folgen . . . . .	10
1.2.2	Geometrische Folgen . . . . .	11
1.3	Klassifizierung von Folgen . . . . .	11
1.3.1	Monotonie . . . . .	11
1.3.2	Beschränktheit . . . . .	12
1.3.3	Konvergenz . . . . .	12
<b>Kapitel 2</b>	<b>Reihen</b>	<b>18</b>
2.1	Arithmetische Reihen . . . . .	18
2.1.1	Gauß'sche Summenformel . . . . .	18
2.1.2	Allgemein . . . . .	19
2.2	Geometrische Reihen . . . . .	20
<b>Kapitel 3</b>	<b>Funktionsuntersuchung</b>	<b>22</b>
3.1	Stetigkeit . . . . .	22
3.2	Differenzierbarkeit . . . . .	23
3.2.1	Zusammenhang zwischen Stetigkeit und Differenzierbarkeit . . . . .	23
3.3	Ableitungsregeln . . . . .	23
3.3.1	Tangente und Normale . . . . .	24
3.4	Vollständige Funktionsuntersuchung . . . . .	25
3.4.1	Definitionsbereich . . . . .	25
3.4.2	Achsen Schnittpunkte . . . . .	25
3.4.3	Symmetrie . . . . .	25
3.4.4	Grenzwerte . . . . .	26
3.4.5	Asymptoten . . . . .	27
3.4.6	Monotonie . . . . .	28
3.4.7	Extremstellen . . . . .	28
3.4.8	Wendestellen . . . . .	29
3.4.9	Funktionseinordnung . . . . .	30
3.4.10	Umkehrbarkeit . . . . .	30
3.4.11	Beispiel . . . . .	31
3.5	Funktionenscharen . . . . .	35
3.5.1	Beispiel . . . . .	35

<b>Kapitel 4</b>	<b>Trigonometrie</b>	<b>40</b>
4.1	Kurze Wiederholung . . . . .	40
4.2	Additions- und Verdopplungssätze . . . . .	41
4.3	Allgemeine Sinus- und Kosinussätze . . . . .	41
4.4	Sinusfunktionen . . . . .	41
4.4.1	Zusammengesetzte Sinusfunktionen . . . . .	42
4.5	Polarkoordinaten . . . . .	42
4.5.1	Umrechnung . . . . .	42
4.6	Beispiele einer Funktionsdiskussion . . . . .	42
4.6.1	$f(x) = 2 \cos(x) + 2 \sin(x) \cos(x)$ . . . . .	42
<b>Kapitel 5</b>	<b>Exponentialfunktionen</b>	<b>46</b>
5.1	Wiederholung: Potenzgesetze . . . . .	46
5.2	Die Eulersche Zahl ( $e$ ) . . . . .	46
5.2.1	Verschiedene Darstellungen . . . . .	47
5.2.2	Herleitung zur Zahl $e$ . . . . .	47
5.2.3	$e$ ist irrational . . . . .	49
5.3	Eigenschaften . . . . .	53
5.4	Basiswechsel . . . . .	54
5.5	Ableitungsregeln . . . . .	54
5.5.1	Aktivität . . . . .	56
<b>Kapitel 6</b>	<b>Logarithmen</b>	<b>57</b>
6.1	Eigenschaften . . . . .	57
6.2	Rechengesetze . . . . .	58
6.3	Gleichungen lösen . . . . .	58
6.4	Logarithmusfunktionen . . . . .	58
6.4.1	Ableitungsregeln . . . . .	58
6.4.2	Funktionsuntersuchungsbeispiel . . . . .	58
<b>Kapitel 7</b>	<b>Integrale</b>	<b>59</b>
7.1	Einführung - Stammfunktionen . . . . .	59
7.2	Bestimmte Integrale . . . . .	59
7.3	Sätze über Integrale . . . . .	60
7.4	Integrationsregeln und -techniken . . . . .	62
7.4.1	Potenzregel . . . . .	62
7.4.2	Partielle Integration . . . . .	62
7.4.3	Substitution . . . . .	63
7.4.4	Substitution der Integrationsvariablen . . . . .	64
7.4.5	Integrale von $e$ -Funktionen . . . . .	64
7.4.6	Integrale von $\ln()$ -Funktionen . . . . .	64
7.4.7	Integrale von (un)geraden Funktionen . . . . .	65
7.4.8	Integrale von periodischen Funktionen . . . . .	65
7.5	Flächen und Volumen mit Integralen berechnen . . . . .	66
7.5.1	Fläche zwischen einer Funktion und der $x_1$ -Achse . . . . .	66
7.5.2	Fläche zwischen zwei Funktionen . . . . .	67
7.5.3	Volumenangaben mittels Integralen . . . . .	67
7.6	Uneigentliche Integrale . . . . .	68
7.7	Merkwürdige Integrale . . . . .	69

<b>Kapitel 8</b>	<b>Vektorielle Geometrie</b>	<b>70</b>
8.1	Vektoren . . . . .	70
8.1.1	Besondere Vektoren . . . . .	70
8.2	Basen und Erzeugendensystem . . . . .	71
8.2.1	Besondere Basen . . . . .	71
8.2.2	Basistransformation . . . . .	72
8.3	Winkel zwischen Vektoren . . . . .	72
8.3.1	Orientierte Winkel . . . . .	72
8.3.2	Rechnungen mit Winkeln . . . . .	73
8.4	Linearkombination . . . . .	74
8.5	Skalarprodukt . . . . .	74
8.6	Kreuzprodukt . . . . .	75
8.7	Geraden . . . . .	78
8.7.1	Darstellungen . . . . .	78
8.7.2	Lagebeziehungen zwischen Geraden . . . . .	79
8.7.3	Abstand zu einem Punkt . . . . .	80
8.7.4	Abstand zweier Geraden . . . . .	83
8.8	Ebenen . . . . .	83
8.8.1	Darstellungen . . . . .	83
8.8.2	Lagebeziehungen zwischen Ebenen und Geraden . . . . .	86
8.8.3	Lagebeziehungen zwischen Ebenen . . . . .	87
8.8.4	Winkel zwischen Ebenen (und Geraden) . . . . .	88
8.8.5	Abstand zu einem Punkt . . . . .	90
8.9	Kreise und Sphären . . . . .	91
8.9.1	Kreise . . . . .	91
8.9.2	Sphären . . . . .	94
8.10	Sätze . . . . .	97
8.10.1	Sätze des Pythagoras . . . . .	97
8.10.2	Euklids Sätze . . . . .	98
8.10.3	Strahlensätze . . . . .	100
8.10.4	Der Satz des Apollonios . . . . .	101
<b>Kapitel 9</b>	<b>Komplexe Zahlen</b>	<b>104</b>
9.1	Einführung . . . . .	104
9.2	Der Körper der komplexen Zahlen . . . . .	104
9.3	Die Gauß'sche Zahlenebene . . . . .	107
9.3.1	Hinführung . . . . .	107
9.3.2	Rechenoperationen . . . . .	109
<b>Kapitel 10</b>	<b>Algebra oder Zahlentheorie</b>	<b>111</b>
10.1	Körper . . . . .	111
10.2	Teilbarkeit . . . . .	112
10.2.1	Teilbarkeitseigenschaften . . . . .	112
10.2.2	Euklidische Division . . . . .	112
10.3	Primzahlen . . . . .	113
10.4	Restklassen oder Kongruenzklassen . . . . .	114
10.4.1	Mit Kongruenzen rechnen und beweisen . . . . .	116
10.4.2	Der Euklidische Algorithmus . . . . .	117
10.4.3	Der kleine Satz von Fermat . . . . .	118
10.4.4	Zusammenhänge zwischen ggT und kgV . . . . .	120
10.4.5	Die Sätze von Bézout, Gauß und der Fundamentalsatz des ggT . . . . .	120
10.4.6	Das RSA Verschlüsselungsverfahren . . . . .	121
10.5	Die vollständige Induktion . . . . .	123

## Kapitel 11 **Wahrscheinlichkeitstheorie** 127

11.1 Wiederholungen: Unter- & Mittelstufe . . . . .	127
11.1.1 Zufallsexperimente . . . . .	127
11.1.2 Zufallsvariable . . . . .	129
11.1.3 Das Pascal'sche Dreieck . . . . .	130
11.2 Kombinatorik . . . . .	130
11.2.1 Binomialkoeffizienten . . . . .	130
11.2.2 Kombinatorik . . . . .	132
11.3 Bedingte Wahrscheinlichkeiten . . . . .	133
11.3.1 Stochastische Unabhängigkeit . . . . .	133
11.4 Wahrscheinlichkeitsverteilung . . . . .	133
11.4.1 Binomialverteilung . . . . .	135
11.4.2 Sigmaumgebungen . . . . .	136

## Kapitel 12 **Matrizen** 138

12.1 Lineare Gleichungssysteme und Gaußalgorithmus . . . . .	138
12.2 LGS mit dem Taschenrechner lösen . . . . .	138
12.2.1 Eindeutig lösbare lineare Gleichungssysteme . . . . .	138
12.2.2 Nicht eindeutig lösbare lineare Gleichungssysteme . . . . .	139

## Kapitel 13 **Algorithmik** 140

13.1 Algorithmen und Programmierung . . . . .	140
13.1.1 Pseudocode . . . . .	140
13.1.2 Python . . . . .	140
13.2 Algorithmen und mathematische Anwendungen . . . . .	141
13.2.1 Iterationsverfahren . . . . .	141

## Kapitel 14 **ANHANG: Physik** 143

14.1 La physique des particules . . . . .	143
14.2 Interaction gravitationnelle . . . . .	143
14.2.1 Le champ de gravitation . . . . .	144
14.3 Interaction électromagnétique . . . . .	144
14.3.1 Le champ électrique . . . . .	145
14.3.2 Le champ magnétique . . . . .	146
14.4 Mouvement, vitesse et accélération d'un système physique . . . . .	146
14.5 Les 3 lois de Newton . . . . .	147
14.5.1 1 <sup>ère</sup> loi . . . . .	147
14.5.2 2 <sup>ème</sup> loi . . . . .	147
14.5.3 3 <sup>ème</sup> loi . . . . .	147
14.6 Énergies et TEC . . . . .	148
14.7 L'analyse dimensionnelle . . . . .	149
14.8 Mouvements dans le champ de pesanteur uniforme . . . . .	149
14.9 Mouvements de satellites et des planètes . . . . .	150
14.9.1 Les 3 lois de Kepler . . . . .	150
14.10 Systèmes oscillants . . . . .	151
14.11 Oscillateurs mécaniques en régime forcé . . . . .	151
14.12 Émission, propagation et réception des ondes . . . . .	152
14.13 Diffraction des ondes . . . . .	152
14.14 Particules chargées dans un champ électrique ou magnétique . . . . .	152
14.15 Action d'un champ magnétique sur un circuit parcouru par un courant . . . . .	153
14.16 Dipôles dans un circuit . . . . .	153

---

14.16.1Lois générales de dipôles . . . . .	153
14.16.2Le dipôle (R,L) . . . . .	154
14.16.3Le dipôle (R,C) . . . . .	155
14.16.4Le dipôle (R,L,C) et les oscillations électriques . . . . .	155

### Definition

Eine Funktion, bei der nur natürlichen Zahlen eine reelle Zahl zugeordnet wird, nennt man Folge. Folgen können auch nur für Teilbereiche von  $\mathbb{N}$  definiert sein.  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  bezeichnet die Folge, wobei  $a : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$

### Bemerkung:

In einem Ausdruck muss das  $n$  immer dasselbe bleiben!

### GTR-Tipp:

Um statt Funktionen Folgen zu behandeln:

- ON  $\rightarrow$  **MODE**  $\rightarrow$  Zeile 4: statt FUNC **SEQ** auswählen
- in Y=
- Mit  $nMin$  den Startindex angeben
- Mit  $u(n)$  die Folgenrechtschrift angeben
- Falls die Folge rekursiv anzugeben ist, muss mit  $u(nMin)$  das Startglied angegeben werden

### Bemerkung:

Es ist üblich eine rekursive Folge mit  $a_{n+1}$  in Abhängigkeit von  $a_n$  zu haben. Diese Darstellung ist mit dem GTR nicht direkt verwendbar. Man muss es umschreiben um  $a_n$  in Abhängigkeit von  $a_{n-1}$  zu haben.

## 1.1 Verschiedene Darstellungen

### 1.1.1 Explizite Darstellung

#### Definition

Wenn ein beliebiges Glied der Folge direkt berechenbar ist, ist ihre Darstellung explizit.

#### Beispiel:

1.  $a_n = 3^n \Rightarrow a_4 = 3^4 = 81$
2. Die Folge der  $n$ -ten positiven, ungeraden Zahl:  
 $a_n = 1 + 2 \cdot (n - 1) \Rightarrow$  Die 8. positive, ungerade Zahl ist  $a_8 = 1 + 2 \cdot (8 - 1) = 15$

### 1.1.2 Rekursive Darstellung

#### Definition

Wenn für die Berechnung des  $n$ -ten Gliedes eines (oder sogar mehrere) der vorherigen Glieder benötigt wird, ist ihre Darstellung rekursiv. In diesen Fällen braucht man immer ein Startglied, oft  $a_0$  oder  $a_1$ .



### Beispiel:

- $a_n = 3 \cdot a_{n-1} + 2; a_0 = 5$   
 $a_1 = 3 \cdot a_{1-1} + 2 = 3 \cdot a_0 + 2 = 3 \cdot 5 + 2 = 17$   
 $a_2 = 3 \cdot a_{2-1} + 2 = 3 \cdot a_1 + 2 = 3 \cdot 17 + 2 = 53$   
 $a_3 = 3 \cdot a_{3-1} + 2 = 3 \cdot a_2 + 2 = 3 \cdot 53 + 2 = 159$   
und so weiter...
- Die Folge der  $n - ten$  positiven, ungeraden Zahl:  
 $a_n = a_{n-1} + 2; a_1 = 1$

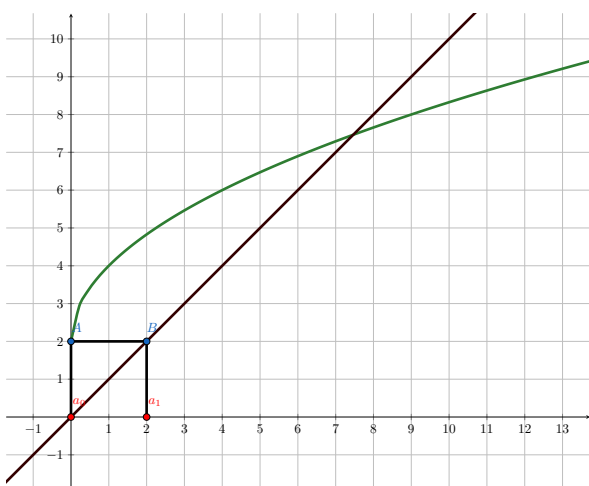
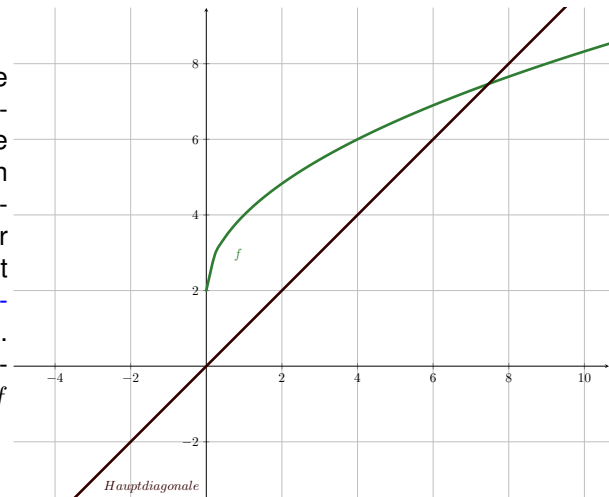
Bemerkung:

Für manche Folgen sind beide Darstellungen möglich, wobei die explizite Darstellung oftmals viel praktischer ist, da die Berechnung der Folgeglieder anhand der rekursiven Darstellung schnell sehr aufwendig wird.

## Web-Diagramme

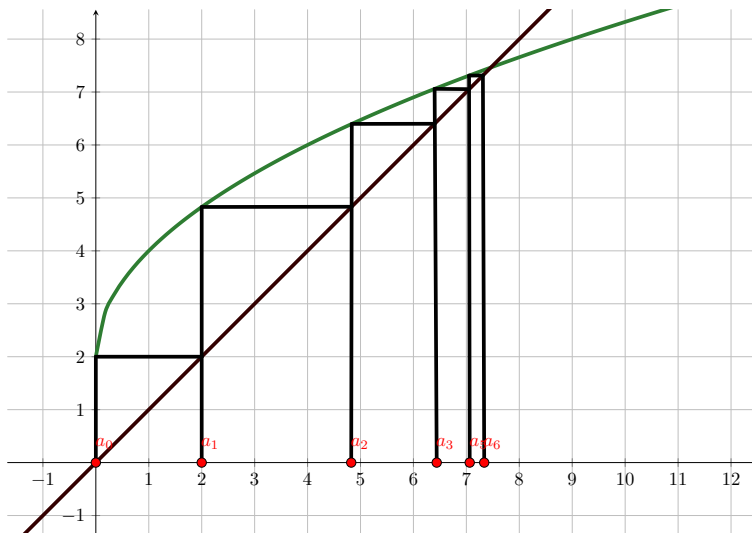
Hier handelt es sich um ein graphisches Verfahren, das dazu dient, das Verhalten einer Folge, deren Darstellung rekursiv ist, zu untersuchen. Es ermöglicht die Beobachtung des Langzeitverhaltens (Konvergenz, Divergenz oder Oszillation) einer rekursiven Folge.

Dazu muss man der rekursiven Folgenrechenschaft eine Funktion  $f(a_{n-1}) = a_n$  zuordnen, sodass - grob gesagt - "die Funktion das Gleiche mit  $x$  macht, dass die Folge macht, um von  $a_n$  auf  $a_{n+1}$  zu kommen". Man muss verstehen, dass es sich hierbei nicht um den Graphen der Folge handelt, die Werte der Folgenglieder sind nicht wie gewohnt abzulesen. Zusätzlich zeichnet man in ein kartesisches Koordinatensystem die Hauptdiagonale ein (entspricht dem Graphen von  $f(x) = x$ ). Exemplarisch wird hier die Folge  $a_{n+1} = 2\sqrt{a_n} + 2$  behandelt, dementsprechend ist die Hilfsfunktion hier  $f$  mit  $f(x) = 2\sqrt{x} + 2$ .



Dann trägt man den Wert des ersten Folgliedes auf die Abzissenachse ein und verbindet ihn mit der entsprechenden Funktion anhand eines vertikalen Striches. Der Ordinatenwert, der so erhalten wird (Punkt A), entspricht dem Wert von  $a_1$ . Um den Vorgang erneuern zu können, muss der gefundene Wert wieder auf die Abzissenachse, dazu benutzt man die Hauptdiagonale als "Spiegel". Ein horizontaler Strich bis zur Hauptdiagonale (zum Punkt B) und ein vertikaler bis zur Abzissenachse lösen das Problem. So ist der Wert von  $a_1$  auf der Abzissenachse, dort wird er für den nächsten Schritt benötigt.

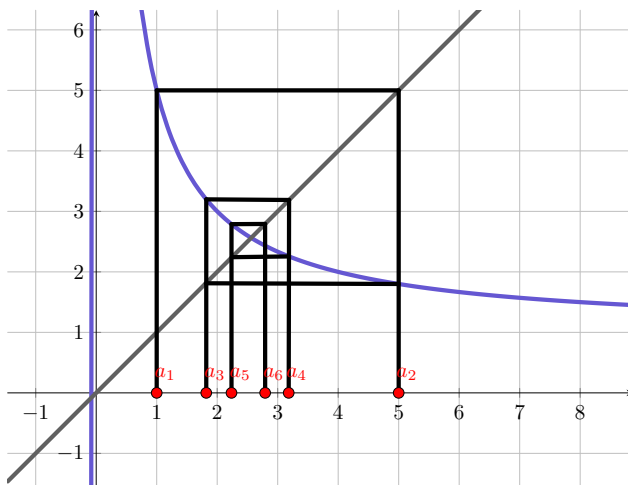
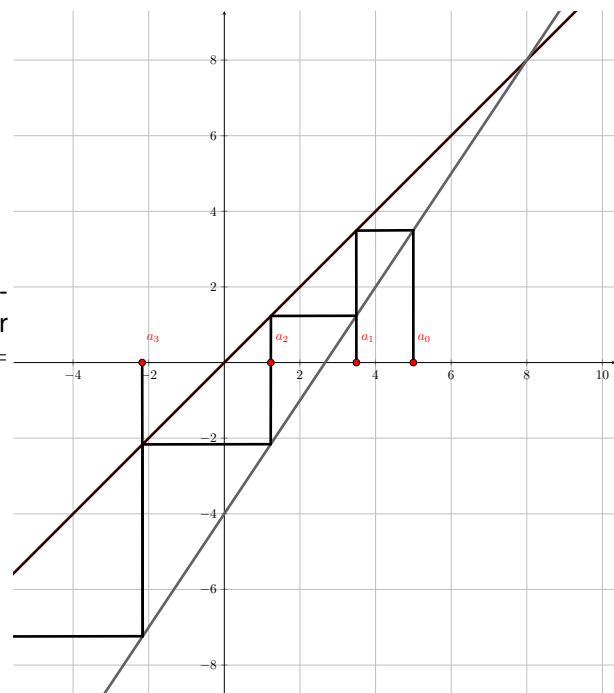
Dasselbe muss mehrmals wiederholt werden, so wird jeweils das nächste Folgeglied auf die Abzissenachse abgebildet (rote Punkte). Daraus kann man dann eine Tendenz erkennen, die die Entwicklung der Folgeglieder beschreibt. Je nach dem, was für eine Tendenz zu erkennen ist, kann man verschiedene Schlüsse bezüglich der Entwicklung der Folge schließen. In diesem Falle wird deutlich, dass die Folge konvergiert, der Grenzwert ist die Schnittstelle zwischen der Hilfsfunktion und der Hauptdiagonalen, es fehlt nur noch diesen zu berechnen.



$$\begin{aligned} h(x) &= x; \quad f(x) = 2\sqrt{x} + 2 \\ h(x) &= g(x) \Leftrightarrow x - 2\sqrt{x} - 2 = 0 \\ \Rightarrow x_1 &= \left( \frac{2 + \sqrt{12}}{2} \right)^2 \\ g &= x_1 \end{aligned}$$

Es gibt andere mögliche Tendenzen, hier ein paar Beispiele:

Die divergierende Treppe, es gibt also keinen Grenzwert, man kann den uneigentlichen Grenzwert aber ablesen, hier ist der Grenzwert der Folge  $a_n$  mit  $a_{n+1} = -\frac{3}{2}a_n - 4$  und  $a_0 = 5$ :  $-\infty$



Die konvergierende Spirale, es gibt also einen Grenzwert, den man erneut mit der Schnittstelle zwischen Funktion und Hauptdiagonale ermitteln kann. Hier konvergiert die Folge  $a_n$  mit  $a_{n+1} = \frac{4}{a_n} + 1$  und  $a_1 = 1$

Bemerkung:

Dieses Verfahren kann ausschließlich bei rekursiven Folgen angewendet werden, bei denen keine zusätzliche Abhängigkeit von  $n$  vorliegt (Beispiel:  $a_n = 3 \cdot a_{n-1} + 4n + 3$ ) oder die Rekursivitätsebene den 1. Grad überschreitet, was bedeutet, dass  $a_n$  nicht nur in Abhängigkeit von  $a_{n-1}$  beschrieben wird, sondern von anderen Rekursivitätsebenen wie  $a_{n-2}$  (Beispiel: die Fibonacci-Folge).

### GTR-Tipp:

Mit den GTR ist dieses Verfahren auch möglich, die Arbeit der Fertigstellung der Striche wird vom Rechner übernommen. Das Bild ist vom Benutzer nur noch zu deuten, gegebenenfalls ist die Schnittstelle auszurechnen.

- Der Rechner muss auf **SEQ** stehen
- in  $Y=$  die rekursive Folge angeben
- In 2nd **FORMAT** von Time auf **Web** stellen
- **TRACE** verwenden
- Sooft auf **ENTER** drücken, bis ausreichend Striche zu sehen sind.

## 1.2 Auffällige Folgen

### 1.2.1 Arithmetische Folgen

#### Definition

Eine Folge wird arithmetisch genannt, wenn die Differenz zweier aufeinander folgender Glieder konstant ist.

#### 1. Rekursive Darstellung:

$$a_n = a_{n-1} + d$$

#### 2. Explizite Darstellung:

Mit Startglied  $a_0$ :  $a_n = a_0 + n \cdot d$

Mit Startglied  $a_1$ :  $a_n = a_1 + (n - 1) \cdot d$

Mit Startglied  $a_x$ :  $a_n = a_x + (n - x) \cdot d$

### Bemerkung:

Letzteres gilt auch für beliebige Folgeglieder, also ist  $a_n = a_p + (n - p) \cdot d$ ;  $n, p \in \mathbb{N}$

### Beispiel:

$$a_n = a_{n-1} + 3; a_0 = 0 \Leftrightarrow a_n = 0 + n \cdot 3$$

### Bemerkung:

Jedes Folgeglied einer solchen Folge ist das arithmetische Mittel seines Vorgängers und Nachgängers:

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

## 1.2.2 Geometrische Folgen

### Definition

Eine Folge wird geometrisch genannt, wenn der Quotient zweier aufeinander folgender Glieder konstant ist.

- Rekursive Darstellung:

$$a_n = a_{n-1} \cdot q$$

- Explizite Darstellung:

Mit Startglied  $a_0$ :  $a_n = a_0 \cdot q^n$

Mit Startglied  $a_1$ :  $a_n = a_1 \cdot q^{n-1}$

Mit Startglied  $a_x$ :  $a_n = a_x \cdot q^{n-x}$

### Bemerkung:

Letzteres gilt auch für beliebige Folgeglieder, also ist  $a_n = a_p \cdot q^{n-p}$ ;  $n, p \in \mathbb{N}$

### Beispiel:

$$a_n = a_{n-1} \cdot 3; a_0 = 2 \Leftrightarrow a_n = 2 \cdot 3^n$$

### Bemerkung:

Jedes Folgeglied einer solchen Folge ist das geometrische Mittel seines Vorgängers und Nachgängers:

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

## 1.3 Klassifizierung von Folgen

### 1.3.1 Monotonie

#### Definition

Eine Folge  $(a_n)_n \in \mathbb{N}$  heißt monoton  $\begin{cases} \text{steigend/wachsend} \\ \text{fallend/abnehmend} \end{cases}$  wenn  $\begin{cases} a_{n+1} \geq a_n \\ a_{n+1} \leq a_n \end{cases}$ .

Gelten dabei sogar **strikte** Ordnungsrelationen ( $>$  oder  $<$ ), dann ist  $(a_n)$  **streng** monoton wachsend beziehungsweise abnehmend.

#### Strategie:

- Das **Vorzeichen von  $a_{n+1} - a_n$  bestimmen**, ist es  $\leq 0$  dann ist die Folge fallend, ist es  $\geq 0$ , dann ist die Folge wachsend.
- $\frac{a_{n+1}}{a_n}$  **mit 1 vergleichen**, ist es  $\leq 1$ , dann ist die Folge fallend, ist es  $\geq 1$ , dann ist die Folge wachsend.

#### Beispiel:

Untersucht wird die Monotonie der Folge  $a_n = \frac{8n}{n^2 + 1}$ .

$$\begin{aligned} a_{n+1} - a_n &= \frac{8(n+1)}{(n+1)^2 + 1} - \frac{8n}{n^2 + 1} \\ &= \frac{8n+8}{n^2+2n+1+1} - \frac{8n}{n^2+1} \\ &= \frac{8n^3+8n^2+8n+8 - (8n^3+16n^2+16n)}{(n^2+2n+2)(n^2+1)} \\ &= \frac{-8n^2-8n+8}{(n^2+2n+2)(n^2+1)} \end{aligned}$$

$\Rightarrow a_n$  ist für  $n \in \mathbb{N}$  weder steigend noch fallend.  
 $a_n$  ist für  $n \in \mathbb{N}^*$  streng monoton fallend.

### 1.3.2 Beschränktheit

#### Definition

Man nennt eine Folge  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  nach  $\begin{cases} \text{oben} \\ \text{unten} \end{cases}$  **beschränkt**  
 wenn es eine Zahl  $\begin{cases} S \in \mathbb{R} \\ s \in \mathbb{R} \end{cases}$  gibt mit  $\begin{cases} a_n \leq S \\ a_n \geq s \end{cases} \quad \forall n \in \mathbb{N}.$   
 $S$  ist eine **obere** Schranke  
 $s$  ist eine **untere** Schranke

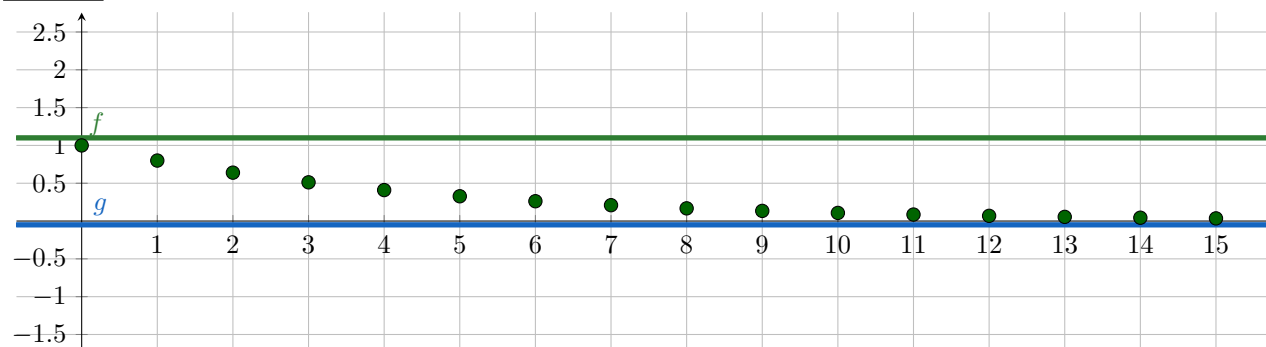
#### Definition

Die kleinste obere Schranke ist das **Supremum** der Menge  $\{a_n; n \in \mathbb{N}\}$ .  
 Die größte untere Schranke ist das **Infimum** der Menge  $\{a_n; n \in \mathbb{N}\}$ .

#### Definition

Eine nach **oben und unten** beschränkte Folge heißt **beschränkte** Folge (suite bornée).

Beispiel:



Die abgebildete Folge  $a_n = 0,8^n$  besitzt als mögliche obere Schranke die Gerade  $f: y = 1$ , unten die Gerade  $g: y = -0,05$ .  $a_n$  ist also **beschränkt**.

### Unbeschränktheit

Beispiel:

Unbeschränktheit mit Abschätzungen zeigen:

$$a_n = \frac{n^2}{n+2} \geq \frac{n^2}{n+2n} = \frac{n^2}{3n} = \frac{1}{3}n \quad \forall n \geq 1$$

$u_n = \frac{1}{3}n$  ist eine unbeschränkte Folge,  $a_n$  ist ab einem bestimmten Glied ( $a_1$ ) immer darüber:  
 $a_n$  ist ebenfalls unbeschränkt, sie divergiert nach  $+\infty$

### 1.3.3 Konvergenz

#### Definition

Eine Folge  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  ist konvergent, wenn sie einen Grenzwert besitzt.  
 Man sagt  $a_n$  konvergiert gegen  $g = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n$ .

## Theorem

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = g \Leftrightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} (a_n - g) = 0$$

Wörtlich: Eine Folge  $(a_n)$  konvergiert gegen  $g$  genau dann, wenn  $(a_n - g)$  gegen den Wert 0 konvergiert.

Beispiel:

$$a_n = \frac{3n^4 - 1}{n^4}$$

$a_n$  hat vermutlich den Grenzwert  $g = 3$ .

$$a_n - 3 = \frac{3n^4 - 1}{n^4} - 3 = \frac{3n^4 - 1 - 3n^4}{n^4} = -\frac{1}{n^4} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$$

## Monotone Konvergenz

## Theorem

Eine monotone Folge ist genau dann konvergent, wenn sie beschränkt ist.

## Beweis

Ohne Beschränkung der Allgemeinheit nehmen wir an, dass die Folge monoton wachsend sei und sei  $a$  die kleinste obere Schranke (Supremum).

- Sei  $\varepsilon \geq 0$  dann ist  $a - \varepsilon$  keine obere Schranke der Folgeglieder  $\{a_n; \in \mathbb{N}\}$ .
- $(a_n)$  ist wachsend
- $\exists n_0 \in \mathbb{N}$  mit  $a_{n_0} \geq a - \varepsilon$
- $\forall n > n_0$  gilt  $a - \varepsilon < a_{n_0} \leq a_n < a + \varepsilon$       $|-a$   
 $\Leftrightarrow -\varepsilon < a_{n_0} - a \leq a_n - a < \varepsilon$
- $\Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$

Analog kann man mit einer nach unten beschränkten monoton fallenden Folge argumentieren.  $\square$

Besser zu verstehen, wenn man es so sagt:

## Theorem

$$\exists S \in \mathbb{R} \quad \exists n_0 \in \mathbb{N} \quad \forall n \geq n_0 : a_n \leq a_{n+1} \wedge a_n \leq S$$

$$\Rightarrow \exists g \in \mathbb{R} : \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = g \wedge g \leq S$$

und

$$\exists s \in \mathbb{R} \quad \exists n_0 \in \mathbb{N} \quad \forall n \geq n_0 : a_n \geq a_{n+1} \wedge a_n \geq s$$

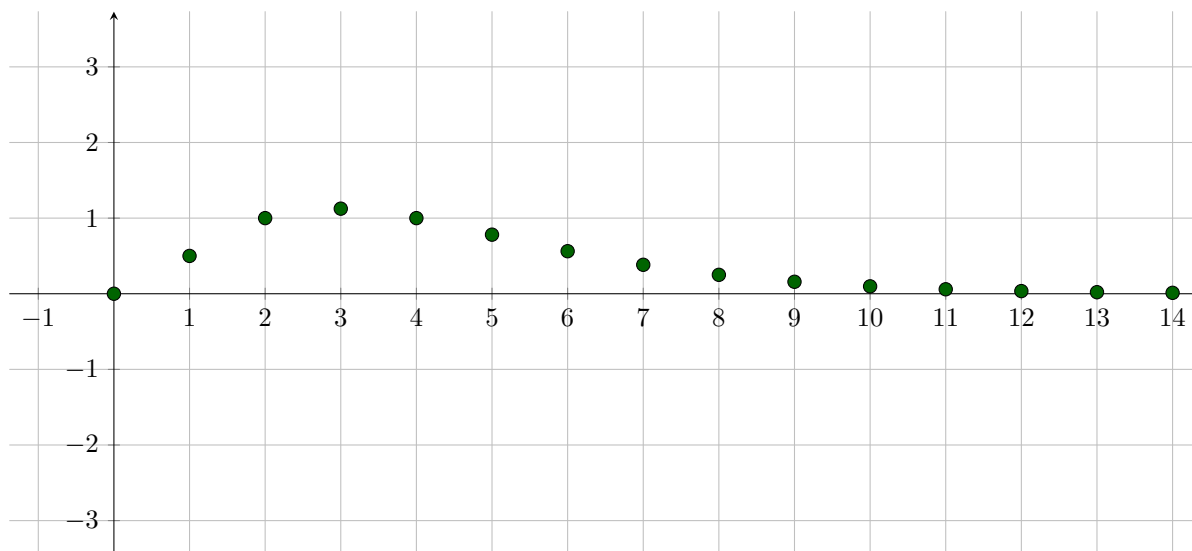
$$\Rightarrow \exists g \in \mathbb{R} : \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = g \wedge g \geq s$$

Wörtlich:

- Eine monoton **wachsende** Folge  $(a_n)$  ist genau dann **konvergent**, wenn sie nach **oben beschränkt** ist. Ihr Grenzwert  $g$  ist kleiner oder gleich der oberen Schranke  $S \in \mathbb{R}$ .
- Eine monoton **fallende** Folge  $(a_n)$  ist genau dann **konvergent**, wenn sie nach **unten beschränkt** ist. Ihr Grenzwert  $g$  ist größer oder gleich der oberen Schranke  $s \in \mathbb{R}$ .

Beispiel:

Untersucht wird die Folge  $u_n = \frac{n^2}{2^n}$



- Beschränktheit:

$\forall n \in \mathbb{N} \quad a_n \geq 0$ , für  $n = 0$ ,  $a_n = 0 \Rightarrow$  die untere Schranke  $s = 0$  ist das Infimum.

- Monotonie:

$$\begin{aligned} \frac{u_{n+1}}{u_n} &= \frac{(n+1)^2}{2^{n+1}} \cdot \frac{2^n}{n^2} \\ &= \frac{(n+1)^2}{2n^2} \\ &= \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{n+1}{n}\right)^2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{n}\right)^2 \leq \frac{8}{9} < 1 \quad \forall n \geq 3 \end{aligned}$$

$$\text{N.R.:} \quad 1 + \frac{1}{n} \leq \frac{4}{3} \quad \forall n \geq 3$$

$$\Rightarrow \left(1 + \frac{1}{n}\right)^2 \leq \frac{16}{9}$$

Somit ist  $u_n$  ab dem 3. Folgenglied **streng monoton fallend**  $\Rightarrow S = \frac{9}{8}$

$\Rightarrow a_n$  konvergiert gegen den Grenzwert  $g = 0$

14

## Divergenz

### Definition

Eine Folge  $(a_n)$ , die keinen Grenzwert  $g \in \mathbb{R}$  besitzt (nicht konvergiert), wird **divergent** genannt.

Kann man ihr trotzdem einen Grenzwert wie  $\pm\infty$  zuordnen ist sie **bestimmt divergent**.  
Besitzt die Folge überhaupt keinen Grenzwert, so heißt sie **unbestimmt divergent**.

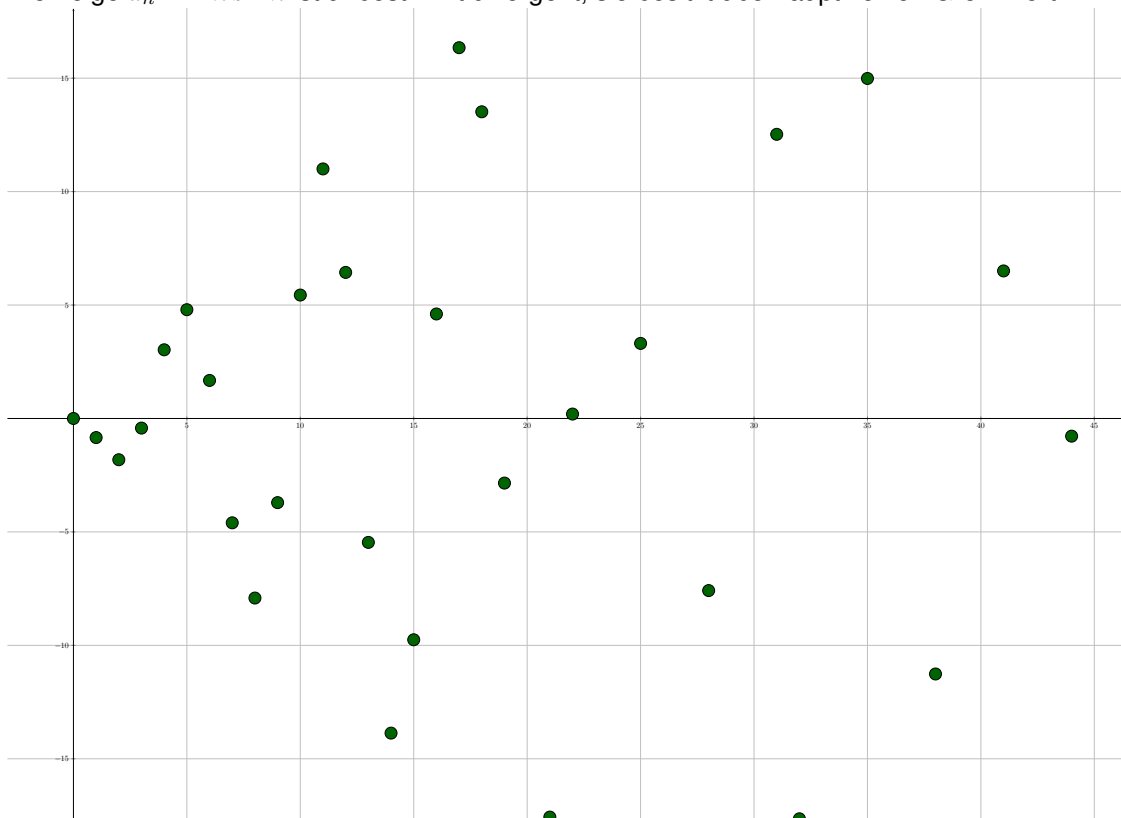
### Bemerkung:

Man nennt einen Grenzwert  $g = +\infty$  oder  $g = -\infty$  einen **uneigentlichen Grenzwert**.

### Beispiel:

- Die Folge  $u_n = -4n^5$  ist bestimmt divergent ( $g = -\infty$ ).

- Die Folge  $a_n = -n \sin n$  ist unbestimmt divergent, sie besitzt überhaupt keinen Grenzwert.



### Epsilon-n0-Definition

#### Definition

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = g \Leftrightarrow \forall \varepsilon > 0 \quad \exists n_0 \in \mathbb{N} \quad \forall n \geq n_0 : |a_n - g| < \varepsilon$$

#### Strategie:

- den Ausdruck  $|a_n - g|$  vereinfachen
- die Ungleichung  $|a_n - g| < \varepsilon$  zu einer Ungleichung der Form  $n > \dots$  umformen.
- man hat jetzt die Bedingung für  $n$ ,  $n_0$  ist das erste Glied, dass sie erfüllt.
- Beweis führen: sei  $n \geq n_0$  beliebig, dann ist  $|a_n - g| = \dots < \varepsilon$ .

#### Bemerkung:

Wenn ein bestimmtes  $\varepsilon$  angegeben ist, dann verwendet man, um das **gesuchte**  $n_0$  zu finden die Gaußklammern. Angewendet werden diese  $\lfloor x \rfloor$  um eine Zahl abzurunden, diese  $\lceil x \rceil$  um aufzurunden. In unserem Fall wollen wir eine ganze Zahl, für die die Ungleichung auf jeden Fall erfüllt wird, deshalb rundet man auf also **Gaußklammer**  $\lceil x \rceil$ .

#### Bemerkung:

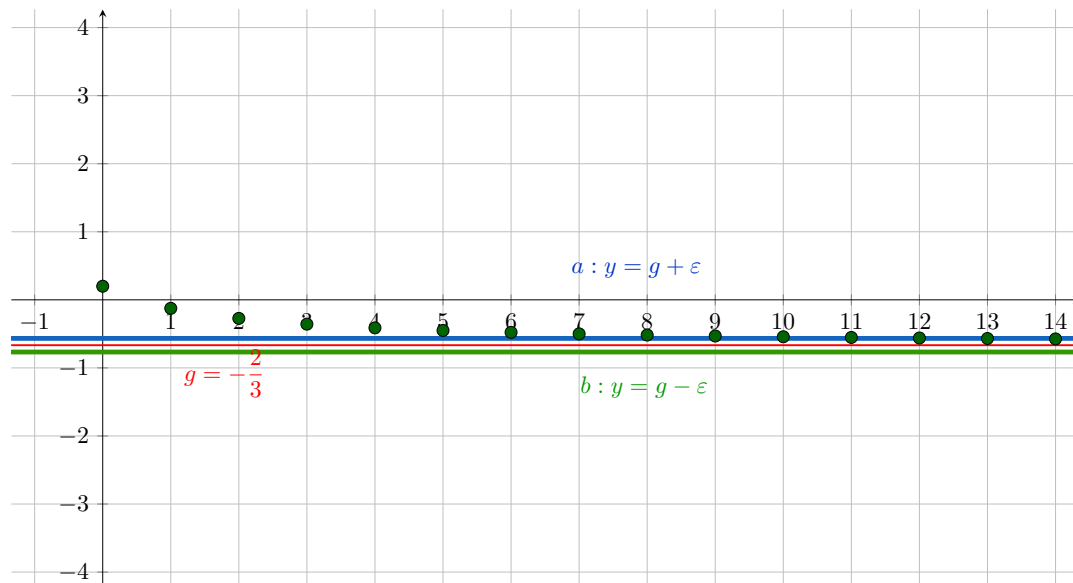
Auch Divergenz kann so gezeigt werden:

$$\forall a \in \mathbb{R} \quad \exists \varepsilon > 0 \quad \forall n_0 \in \mathbb{N} \quad \exists n \geq n_0 : |a_n - a| \geq \varepsilon$$

#### Beispiel:

Die Folge  $a_n = \frac{1 - 2n}{5 + 3n}$  wird untersucht, es wird geschätzt, dass  $(a_n)$  gegen  $-\frac{2}{3}$  konvergiert.





•

$$\begin{aligned}
 |a_n - g| &= \left| \frac{1-2n}{5+3n} + \frac{2}{3} \right| \\
 &= \left| \frac{3(1-2n) + 2(5+3n)}{3(5+3n)} \right| \\
 &= \left| \frac{3-6n+10+6n}{15+9n} \right| \\
 &= \left| \frac{13}{15+9n} \right| \\
 &= \frac{13}{15+9n}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{13}{15+9n} &< \epsilon \\
 \Leftrightarrow \frac{13}{15-15\epsilon} &< \epsilon(15+9n) \\
 \Leftrightarrow 13-15\epsilon &< 9n\epsilon \\
 \Leftrightarrow n &> \frac{13-15\epsilon}{9\epsilon}
 \end{aligned}$$

$$n_0 = \left\lceil \frac{13-15\epsilon}{9\epsilon} \right\rceil$$

$$\bullet \text{ Sei } \epsilon \text{ beliebig und } n \geq n_0, \text{ dann gilt } |a_n - g| = \left| \frac{1-2n}{5+3n} + \frac{2}{3} \right| = \frac{13}{15+9n} < \epsilon$$

### Grenzwertsätze

Die Grenzwertsätze führen die Grenzwerte komplizierter Folgen auf einfachere Grenzwertbetrachtungen bekannter Folgen zurück.

#### Theorem

Seien  $u_n$  und  $v_n$  sind konvergente Folgen mit Grenzwerten  $U$  und  $V$ .

- Die Folge  $u_n \pm v_n$  ist konvergent und besitzt den Grenzwert  $U \pm V$ .
- Die Folge  $u_n \cdot v_n$  ist konvergent und besitzt den Grenzwert  $U \cdot V$ .
- Die Folge  $\frac{u_n}{v_n}$  ist konvergent und besitzt für  $V \neq 0$  den Grenzwert  $\frac{U}{V}$ .

Beispiel:

$$a_n = \frac{4\sqrt{n} - n}{\sqrt{n} - 2n} = \frac{\cancel{n} \left( \frac{4}{\sqrt{n}} - 1 \right)}{\cancel{n} \left( \frac{1}{\sqrt{n}} - 2 \right)} = \frac{\frac{4}{\sqrt{n}} - 1}{\frac{1}{\sqrt{n}} - 2}$$
$$g = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{4}{\sqrt{n}} - 1}{\frac{1}{\sqrt{n}} - 2} = \frac{\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{4}{\sqrt{n}} - \lim_{n \rightarrow \infty} 1}{\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{n}} - \lim_{n \rightarrow \infty} 2} = \frac{0 - 1}{0 - 2} = \frac{1}{2}$$

### Definition

Eine Reihe ist eine Folge, deren Glieder die Partialsummen einer anderen Folge ist. Das bedeutet, dass das  $n$ -te Glied der Reihe, die Summe der ersten  $n$  Glieder einer anderen Folge ist. Man hat also:

- Mit Startglied  $a_0$ :  $s_n = \sum_{i=0}^{n-1} a_i$
- Mit Startglied  $a_1$ :  $s_n = \sum_{i=1}^n a_i$
- Mit Startglied  $a_x$ :  $s_n = \sum_{i=x}^{x+n-1} a_i$

### Bemerkung:

In manchen Fällen steht  $s_n$  für die Partialsumme einer anderen Folge bis zum  $n$ -ten Glied. Dann gilt für ein beliebiges Startglied  $a_x$  der Folge:  $s_n = \sum_{i=x}^n a_i$

## 2.1 Arithmetische Reihen

### 2.1.1 Gauß'sche Summenformel

Die Gauß'sche Summenformel bezeichnet die Summe der  $n$  ersten natürlichen Zahlen, also:

$$1 + 2 + 3 + \dots + n = \sum_{k=1}^n k = \frac{n(n+1)}{2}$$

### Begründung:

	1	2	3	4	...	$n$
	$n$	$n-1$	$n-2$	$n-3$	...	1
$\sum$	$n+1$	$n+1$	$n+1$	$n+1$	...	$n+1$

So sieht man also, dass wenn man die vorher bestimmte Reihe mit sich selbst addiert (ein Mal davon "falschrum"), man  $n$  Mal  $n+1$  bekommt. Um dann den Wert einer einzelnen Reihe zu bekommen teilt man durch zwei.

### Bemerkung:

Die Gauß'sche Summenformel ist ein Spezialfall der arithmetischen Reihe, ihre Glieder werden **Dreieckszahlen** genannt.

## Beweis

Um zu beweisen, dass für alle  $n \in \mathbb{N}$

$$\sum_{k=1}^n f(k) = g(n)$$

gilt, reicht es aus,

$$g(n) - g(n-1) = f(n)$$

für alle positiven  $n$  und

$$g(0) = 0$$

zu zeigen. In der Tat trifft dies hier zu:

$$g(n) - g(n-1) = \frac{n(n+1)}{2} - \frac{(n-1)n}{2} = \frac{n(n+1-n+1)}{2} = \frac{n \cdot 2}{2} = n = f(n)$$

für alle  $n$

$$\text{und } g(0) = \frac{0 \cdot 1}{2} = 0$$

Quelle: Wikipedia (Gaußsche Summenformel)

□

## Bemerkung:

Auch ein Beweis durch vollständige Induktion ist möglich, dieser wäre sogar empfehlenswert, da er einfacher durchzuführen ist (Siehe Kapitel 8)

## 2.1.2 Allgemein

## Definition

Wenn  $s_n$  die Summe der ersten  $n$  Folgenglieder einer arithmetische Folge ist, heißt sie arithmetische Reihe.

Sei eine arithmetische Folge  $a$  mit Startglied  $a_x$  und  $s$ , die entsprechende Reihe, dann gilt

$$s_n = \frac{n \cdot (a_x + a_{x+n-1})}{2}$$

## Bemerkung:

1. Am häufigsten wird verwendet:

- Mit Startglied  $a_0$  :  $s_n = \frac{n \cdot (a_0 + a_{n-1})}{2}$
- Mit Startglied  $a_1$  :  $s_n = \frac{n \cdot (a_1 + a_n)}{2}$

2. Alternativ kann auch folgende Darstellung verwendet werden:

$$s_n = \frac{n \cdot (2a_x + (n-1) \cdot d)}{2}$$

## Beweis

Sei eine arithmetische Folge  $a$ , mit Startglied  $a_x$  und Differenz  $d$ , und  $s$ , die entsprechende Reihe, dann gilt

$$\begin{aligned}
 s_n &= a_x + a_{x+1} + a_{x+2} + \dots + a_{x+n-1} \\
 &= a_x + (a_x + d) + (a_x + 2d) + \dots + (a_x + (n-1) \cdot d) \\
 &= n \cdot a_x + d + 2d + \dots + (n-1) \cdot d \\
 &= n \cdot a_x + (1 + 2 + \dots + (n-1)) \cdot d \quad (\text{Gau\ss}) \\
 &= n \cdot a_x + \frac{(n-1) \cdot n}{2} \cdot d \\
 &= n \cdot \frac{2a_x + (n-1) \cdot d}{2} \\
 &= n \cdot \frac{a_x + \overbrace{a_x + (n-1) \cdot d}^{a_{x+n-1}}}{2} \\
 &= n \cdot \frac{a_x + a_{x+n-1}}{2}
 \end{aligned}$$

□

## 2.2 Geometrische Reihen

### Definition

Wenn  $s_n$  die Summe der ersten  $n$  Folgenglieder einer geometrischen Folge ist, hei\ss t sie geometrischen Reihe.

Sei eine geometrische Folge  $a$  mit Startglied  $a_x$  und  $s$ , die entsprechende Reihe, dann gilt

$$s_n = \sum_{i=x}^{n+x-1} a_i = a_x \cdot \frac{1 - q^n}{1 - q}$$

### Bemerkung:

Am h\u00e4ufigsten wird verwendet:

- Mit Startglied  $a_0$  :  $s_n = a_0 \cdot \frac{1 - q^n}{1 - q}$
- Mit Startglied  $a_1$  :  $s_n = a_1 \cdot \frac{1 - q^n}{1 - q}$

## Beweis

Allgemein:

$$\begin{aligned}
 (1-q)(1+q+q^2+q^3+\dots+q^n) &= (1-q) + (q-q^2) + (q^2-q^3) + (q^3-q^4) + \dots + (q^n - q^{n+1}) \\
 &= 1 + (-q+q) + (-q^2+q^2) + (-q^3+q^3) + \dots + (-q^n+q^n) - q^{n+1} \\
 &= 1 - q^{n+1}
 \end{aligned}$$

Man hat also  $\sum_{k=0}^n q^k = 1 + q + q^2 + q^3 + \dots + q^n = \frac{1 - q^{n+1}}{1 - q}$

Entsprechend ergibt sich  $\sum_{k=0}^{n-1} q^k = \underbrace{1 + q + q^2 + q^3 + \dots + q^{n-1}}_{n \text{ Summanden}} = \frac{1 - q^n}{1 - q}$

Somit gilt für eine Reihe  $s$ , die die Partialsumme einer geometrischen Folge  $a$ , mit Quotient  $q$  und Anfangsglied  $a_x$ , ist, folgendes:

$$\begin{aligned}
 s_n &= \sum_{i=x}^{x+n-1} a_i \\
 &= a_x + a_{x+1} + a_{x+2} + \dots + a_{x+n-1} \\
 &= a_x + a_x \cdot q + a_x \cdot q^2 + \dots + a_x \cdot q^{n-1} \\
 &= a_x \cdot (1 + q + q^2 + \dots + q^{n-1}) \\
 &= a_x \cdot \sum_{k=0}^{n-1} q^k \\
 &= a_x \cdot \frac{1 - q^n}{1 - q}
 \end{aligned}$$

□

## FUNKTIONSUNTERSUCHUNG

by BRUNO

Die **Analysis** (griechisch *análysis*, deutsch „Auflösung“) ist ein Teilgebiet der Mathematik. Die Untersuchung von reellen und komplexen Funktionen hinsichtlich Stetigkeit, Differenzierbarkeit und Integrierbarkeit zählt zu den Hauptgegenständen der Analysis. Die hierzu entwickelten Methoden sind in allen Natur- und Ingenieurwissenschaften von großer Bedeutung.

### 3.1 Stetigkeit

#### Definition

Eine Funktion ist stetig an der Stelle  $x_0$ , wenn:

1.  $x_0 \in D$
2.  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)$  existiert
3.  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = f(x_0)$

Stetigkeit ist eine lokale Eigenschaft. Die Funktion  $f$  heißt dann stetig, wenn sie an jeder Stelle ihrer Definitionsmenge stetig ist.

#### Bemerkung:

#### Theorem

Ist  $f$  stetig und  $I \subset \mathbb{R}$  ein reelles Intervall, dann ist  $f(I)$  ebenfalls ein Intervall. Ist  $f$  zudem streng monoton, so ist die Umkehrfunktion  $f^{-1}$  ebenfalls stetig.

#### Bemerkung:

Stetige Funktionen haben sehr angenehme Eigenschaften, die intuitiv mit der "Definition" des Stiftes, welcher beim Zeichnen des Funktionsgraphen nicht angehoben wird, im Zusammenhang stehen.

So sagt der **Zwischenwertsatz** aus, dass eine reelle, im Intervall  $[a; b]$  stetige Funktion  $f$  jeden Wert zwischen  $f(a)$  und  $f(b)$  annimmt.

Haben  $a$  und  $b$  zudem verschiedene Vorzeichen, so verspricht der Zwischenwertsatz mindestens eine Nullstelle von  $f$  in diesem abgeschlossenen Intervall. Dieser Sonderfall ist als **Nullstellensatz** von Bolzano bekannt.

#### Theorem - Zwischenwertsatz

Ist  $f : [a; b] \Rightarrow$  eine stetige reelle Funktion die auf einem Intervall definiert ist, dann existiert zu **jedem**  $s \in [f(a); f(b)]$  bzw.  $[f(b); f(a)]$  (vom Vorzeichen der Funktionswerte abhängig) **ein**  $c \in [a; b]$  mit  $f(c) = s$

### Stetige Fortsetzungen

Beim Vereinfachen von gebrochenrationalen Funktionen ist Vorsicht geboten, denn eine hebbare Definitionslücke "aufzuheben" verändert den Definitionsbereich der Funktion. Die daraus resultierende Funktion wird **stetige Fortsetzung** genannt.

## 3.2 Differenzierbarkeit

### Definition

Eine Funktion ist differenzierbar an der Stelle  $x_0 \in D$ , wenn der beidseitige Grenzwert des Differenzenquotienten für  $h \rightarrow 0$  existiert. Anschaulich soll Die Funktion links und rechts des  $x_0$  die selbe Ableitung haben.

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

Dieser Grenzwert ist die **Ableitung** von  $f$  an der Stelle  $x_0$ .

Die Funktion heißt differenzierbar, wenn sie  $\forall x \in D$  differenzierbar ist.

Die Funktion  $f(x) = |x|$  ist nicht differenzierbar, da bei der Stelle  $x_0 = 0$  der linksseitige Grenzwert des Differenzenquotienten ( $\lim_{h \rightarrow 0^-} f'(x_0) = -1$ ) nicht mit dem rechtsseitigen Grenzwert (1) übereinstimmt.

### 3.2.1 Zusammenhang zwischen Stetigkeit und Differenzierbarkeit

Ist eine Funktion  $f$  an der Stelle  $x_0$  differenzierbar, so ist sie an dieser Stelle auch stetig. Die Umkehrung gilt erst einmal nicht, aber es gibt eine verneinende Aussage: Ist  $f$  an der Stelle  $x_0$  nicht stetig, so ist sie hier auch nicht differenzierbar.

### Theorem

$f$  differenzierbar  $\Rightarrow f$  stetig.

### Bemerkung:

Ist eine Funktion differenzierbar und ist ihre Ableitung zusätzlich stetig, dann wird sie **Stetig differenzierbar** genannt.

## 3.3 Ableitungsregeln

Ein Ableitungswert gibt die Steigung an einem bestimmten Punkt an. Im Allgemeinen und zum Beweisen wird der Differenzenquotient benötigt, um eine Ableitungsfunktion zu definieren, es geht aber in vielen Fällen schneller.

### Theorem - Produktregel

Sind die Funktionen  $u$  und  $v$  an der Stelle  $x_0 \in D$  differenzierbar, dann ist die Funktion  $f(x) = u(x) \cdot v(x)$  bei  $x_0$  auch differenzierbar und es gilt:

$$f'(x_0) = u'(x_0)v(x_0) + u(x_0)v'(x_0)$$

### Beweis

$$\begin{aligned} \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h} &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{u(x_0)v(x_0 + h) - u(x_0)v(x_0)}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{u(x_0 + h)v(x_0 + h) - u(x_0)v(x_0 + h) + u(x_0)v(x_0 + h) - u(x_0)v(x_0)}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{u(x_0 + h)v(x_0 + h) - u(x_0)v(x_0 + h)}{h} + \lim_{h \rightarrow 0} \frac{u(x_0)v(x_0 + h) - u(x_0)v(x_0)}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} v(x_0 + h) \frac{u(x_0 + h) - u(x_0)}{h} + \lim_{h \rightarrow 0} u(x_0) \frac{v(x_0 + h) - v(x_0)}{h} \\ &= v(x_0) \lim_{h \rightarrow 0} \frac{u(x_0 + h) - u(x_0)}{h} + u(x_0) \lim_{h \rightarrow 0} \frac{v(x_0 + h) - v(x_0)}{h} \\ &= u'(x_0)v(x_0) + u(x_0)v'(x_0) \end{aligned}$$

□



## Theorem - Quotientenregel

Sind die Funktionen  $u$  und  $v$  an der Stelle  $x_0 \in D$  differenzierbar, dann ist die Funktion  $f(x) = \frac{u(x)}{v(x)}$  bei  $x_0$  auch differenzierbar und es gilt:

$$f'(x_0) = \frac{u'(x_0) \cdot v(x_0) - u(x_0) \cdot v'(x_0)}{v^2(x_0)}$$

## Beweis

[illegible]

## Theorem - Kettenregel

Die Funktion  $v$  sei an der Stelle  $x_0$  differenzierbar und die Funktion  $u$  an der Stelle  $v(x_0)$ . Dann ist die Funktion  $f = u \circ v$  mit der Gleichung  $f(x) = u(v(x))$  an der Stelle  $x_0$  differenzierbar. Es gilt:

$$f'(x_0) = v'(x_0) \cdot u'(v(x_0))$$

### 3.3.1 Tangente und Normale

## Theorem

Ist die Funktion  $f$  differenzierbar an der Stelle  $x_0$ , dann hat die **Tangente** an dem Graphen von  $f$  die Steigung  $a = f'(x_0)$  und den Y-Achsenabschnitt  $b = -f'(x_0) \cdot x_0 + f(x_0)$ . Daraus ergibt sich die Tangentengleichung:

$$T_{x_0}(x) = f'(x_0) \cdot (x - x_0) + f(x_0)$$

**Bemerkung:**

Eine Merkhilfe dazu ist das Wort „Fuxufu“, wobei „u“ dem  $x_0$  entspricht.

**Definition**

Die **Normale** an der Stelle  $x_0$  bezeichnet die Gerade, die genau senkrecht zur Tangente steht und diese im Berührungspunkt des Graphen schneidet.

$$N_{x_0}(x) = -\frac{1}{f'(x_0)} \cdot (x - x_0) + f(x_0)$$

## 3.4 Vollständige Funktionsuntersuchung

### 3.4.1 Definitionsbereich

Am Anfang muss der Definitionsbereich angegeben werden, um eventuelle Divisionen durch null zu vermeiden. Man achte dabei auch auf hebbare Definitionslücken (siehe "Stetigkeit")

### 3.4.2 Achsenschnittpunkte

Es gibt zwei Arten von Achsenschnittpunkten:

1. X-Achsenschnittpunkte (Nullstellen), die man mit der notwendigen und hinreichenden Bedingung für Nullstellen  $f(x) = 0$  herausfindet
2. Y-Achsenschnittpunkt, den man durch einsetzen bekommt:  $f(0)$

### 3.4.3 Symmetrie

#### Y-Achsensymmetrie

Durch Lösung der Gleichung  $f(x) = f(-x)$  findet man heraus ob die Funktion achsensymmetrisch ist. Zudem ist die Funktion dann achsensymmetrisch, wenn nur gerade Exponenten vorhanden sind. Die Funktion nennt man **gerade**.

#### Symmetrie zum Origo

Durch Lösung der Gleichung  $f(x) = -f(-x)$  findet man heraus ob die Funktion punktsymmetrisch ist. Zudem ist die Funktion dann punktsymmetrisch, wenn nur ungerade Exponenten vorhanden sind. Die Funktion nennt man **ungerade**.

#### Symmetrie zu einem beliebigen Punkt

**Definition**

Symmetrie zu einem Punkt liegt vor, wenn für den Punkt  $P(x_0|y_0)$  gilt:

$$f(x_0 + h) - y_0 = -f(x_0 - h) + y_0$$

**Beispiel:**

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

Aus dem Schnittpunkt der Asymptoten kann man vermuten, dass  $f(x)$  achsensymmetrisch zum Punkt

$P(1|1)$  ist.

$$\left. \begin{aligned} \Rightarrow f(x_0 + h) - y_0 &= \frac{1+h}{1+h-1} - 1 = \frac{1}{h} \\ \Rightarrow -f(x_0 - h) + y_0 &= -\left[\frac{1-h}{1-h-1} + 1\right] = \frac{1}{h} \end{aligned} \right\} \frac{1}{h} = \frac{1}{h} \text{ Die Funktion } f \text{ ist zu } P \text{ symmetrisch.}$$

### 3.4.4 Grenzwerte

#### Definition

Das Symbol  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)$  mit  $x_0 \in \overline{\mathbb{R}}$  ( $\pm\infty$  eingeschlossen) bezeichnet den Limes der reellen Funktion  $f : D \rightarrow \mathbb{R}$  für den Grenzübergang von  $x$  gegen eine Stelle  $x_0$ , wobei  $x_0$  nicht unbedingt in der Definitionsmenge von  $f$  enthalten sein muss.

Eine Zahl  $g \in \overline{\mathbb{R}}$  ist der Grenzwert einer Funktion  $f : D \rightarrow \mathbb{R}$  für  $x \rightarrow x_0$ , falls für jede Folge  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  mit Folgengliedern aus  $D$  und Grenzwert  $x_0$  die Folge  $(f(a_n))_{n \in \mathbb{N}}$  den Grenzwert  $g$  hat.

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = g \Leftrightarrow \forall (a_n)_{n \in \mathbb{N}} \text{ mit } \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = x_0 : \lim_{n \rightarrow \infty} f(a_n) = g$$

#### Definition

Regel von l'Hospital: für Grenzwerte des Typs  $0/0$  und  $\infty/\infty$

Seien zwei differenzierbare Funktionen  $f$  und  $g$  und eine Zahl  $x_0 : g(x_0) \neq 0$  und gelte entweder

$$\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \infty \quad \text{ODER} \quad \lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = 0$$

(sie sind also entweder konvergent gegen 0 oder bestimmt divergent) dann gilt:

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

#### Bemerkung:

1. Falls die Funktionsvorschrift nicht direkt ein Bruch ist (siehe 2. Beispiel) sollte man diese erst zu einem Bruch umformen, um mit der Hospital-Regel fortfahren zu können.
2. ACHTUNG: Die Hospital-Regel ist nicht umkehrbar!

#### Beispiel:

$$f(x) = \frac{\sin(x)}{x} \quad x_0 = 0 \quad D = \mathbb{R} \setminus \{0\}$$

$$\Rightarrow \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{\sin(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{\cos(x)}{1} = 1$$

$$g(x) = x \cdot \log\left(\frac{x+1}{x-1}\right) \quad \text{für } x \rightarrow \infty \quad D = \mathbb{R} \setminus \{1\}$$

$$\begin{aligned}
\Rightarrow \lim_{x \rightarrow \infty} g(x) &= \lim_{x \rightarrow \infty} x \cdot \log \left( \frac{x+1}{x-1} \right) \\
&= \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\log \left( \frac{x+1}{x-1} \right)}{\frac{1}{x}} \\
&= \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\frac{x-1}{x+1} \cdot \frac{-2}{(x-1)^2}}{-\frac{1}{x^2}} \\
&= \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\frac{-2}{x^2-1}}{-\frac{1}{x^2}} \\
&= \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{2x^2}{x^2-1} = 2
\end{aligned}$$

### 3.4.5 Asymptoten

Eine Asymptote ist eine Gerade oder Kurve, die sich dem Graphen einer Funktion immer weiter annähert. Dabei unterscheidet man verschiedene Fälle:

#### Definition

##### 1. Senkrechte Asymptote:

Hat  $f$  an der Stelle  $x_0$  eine Polstelle, und gilt:

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

dann ist die Gerade  $x = x_0$  eine senkrechte Asymptote von  $f$ .

##### 2. Waagerechte Asymptote:

Konvergiert  $f$  für  $x \rightarrow \infty$  gegen eine reelle Zahl  $g \in \mathbb{R}$ , das heißt  $\lim_{x \rightarrow x_0+} f(x) = g$ , dann ist die Gerade  $y = g$  die **waagerechte** Asymptote von  $f$ . Das Gleiche gilt für  $\lim_{x \rightarrow -\infty}$ .

Bei gebrochenrationalen Funktionen ist dies der Fall, wenn der Zählergrad kleiner (dann ist  $g = 0$ ) oder gleich dem Nennergrad  $m$  ist.

##### 3. Schräge Asymptote:

Sie ist eine Gerade ( $g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ ), der sich  $f$  mit  $|x| \rightarrow \infty$  beliebig annähert:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} [f(x) - g(x)] = 0 \text{ oder } \lim_{x \rightarrow -\infty} [f(x) - g(x)] = 0$$

Bei einer gebrochenrationalen Funktion ist der "Fehlergrad", das heißt der Abstand von  $g$  zu  $f$  durch den Rest der Polynomdivision von Zähler mit Nenner gegeben.

##### 4. Asymptotische Kurven:

Indem man in der Definition der schrägen Asymptote auch Polynome zulässt, erhält man Näherungskurven, die die gleiche Limesbedingung erfüllen müssen:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} [f(x) - P(x)] = 0 \text{ oder } \lim_{x \rightarrow -\infty} [f(x) - P(x)] = 0$$

Diese erscheinen bei gebrochenrationalen Funktionen mit  $n > m + 1$ .

### 3.4.6 Monotonie

#### Definition

Eine stetige Funktion  $f$  mit  $a, b \in I \subset D_f$  ist:

1. ... auf dem Intervall  $I$  monoton wachsend, wenn  $\forall a < b : f(a) \leq f(b)$
2. ... auf dem Intervall  $I$  monoton fallend, wenn  $\forall a < b : f(a) \geq f(b)$

Wenn die Ordnungsrelation strikt sind, dann wird die Funktion als **streng monoton** bezeichnet. Die Funktion  $f$  hat eine Ableitungsfunktion  $f'$ . Falls  $f$ ...

1. monoton wachsend auf  $I$  ist, dann ist  $f'(x) \geq 0, \quad \forall x \in I$
2. monoton fallend auf  $I$  ist, dann ist  $f'(x) \leq 0, \quad \forall x \in I$
3. konstant auf  $I$  ist, dann ist  $f'(x) = 0, \quad \forall x \in I$

Beim Aufstellen der Monotonietabelle sind Definitionslücken zu beachten.

Es handelt sich dabei um eine Tabelle, die die Definitionsmenge in Intervalle mit monotonen Steigungsverhalten unterteilt wird. Das Monotonieverhalten verändert sich an Extrem- oder Polstellen.

#### Bemerkung:

$f$  sei eine Funktion...

- dann ist die Zahl  $S$  obere Schranke, wenn  $\forall x : f(x) \leq S$ .  $f$  heißt in diesem Fall nach oben beschränkt. Die in diesem Fall kleinstmögliche Zahl wird **Supremum** genannt:  $\sup f$
- dann ist die Zahl  $s$  untere Schranke, wenn  $\forall x : f(x) \geq s$ .  $f$  ist in diesem Fall nach unten beschränkt. Die in diesem Fall größtmögliche Zahl wird **Infimum** genannt:  $\inf f$

#### Bemerkung:

Eine Funktion  $f$  ist...

- **konvergent**, wenn sie einen Grenzwert  $g \in \mathbb{R}$  hat
- **bestimmt divergent**, wenn sie **keinen** reellen Grenzwert, also  $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = \pm\infty$
- **unbestimmt divergent**, wenn es keine Zahl  $g \in \overline{\mathbb{R}}$  ( $\overline{\mathbb{R}} = \mathbb{R}$  mit  $\infty$  und  $-\infty$ ) gibt mit  $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = g$

#### Beispiel:

$$f(x) = x \cdot \sin x$$

### 3.4.7 Extremstellen

Für die Bestimmung von Extremstellen gilt es zwei Bedingungen zu überprüfen:

Hat an einer Stelle  $x_0$  die erste Ableitung von  $f$  eine Nullstelle, also  $f'(x_0) = 0$ , dann handelt es sich um eine Extremstelle **oder** um einen Sattelpunkt. Diese Bedingung ist die notwendige Bedingung für eine Extremstelle. Mit ihr ist eine grobe Kategorisierung gemacht, eine Extremstelle ist noch nicht bewiesen.

Hat  $f'$  an der Stelle  $x_0$  einen Vorzeichenwechsel oder ist  $f''(x_0) \neq 0$ , dann ist der Sonderfall des Wendepunktes ausgeschlossen und es handelt sich um eine Extremstelle. Es gilt also:

$$\exists! x_0 \in I \subseteq D_f : f(x_0) \geq \text{oder} \leq f(x)$$

Der Punkt  $P(x_0 | f(x_0))$  heißt Hochpunkt oder Tiefpunkt. Diese Bedingung ist die hinreichende Bedingung für

eine Extremstelle.

### 3.4.8 Wendestellen

Für die Bestimmung von Wendestellen gilt es auch zwei Bedingungen zu überprüfen:

Hat an einer Stelle  $x_0$  die zweite Ableitung von  $f$  eine Nullstelle, also  $f''(x_0) = 0$ , dann handelt es sich um eine Wendestelle **oder** um einen geraden Abschnitt. Diese Bedingung ist die notwendige Bedingung für eine Wendestelle.

Hat  $f''$  an der Stelle  $x_0$  einen Vorzeichenwechsel oder ist  $f'''(x_0) \neq 0$ , dann ist der Sonderfall ausgeschlossen und es handelt sich um eine Wendestelle. Der Punkt  $W(x_0|f(x_0))$  heißt Wendepunkt. Diese Bedingung ist die hinreichende Bedingung für eine Wendestelle.

#### Bemerkung:

Eine Hilfsformel, die den Zusammenhang zwischen den verschiedenen Ableitungen einfach darstellt ist die NEW-Regel:

N = Nullstellen  
E = Extremstellen  
W = Wendestellen

$f$	$N$	$E$	$W$		
$f'$		$N$	$E$	$W$	
$f''$			$N$	$E$	$W$

### 3.4.9 Funktionseinordnung

#### Definition

Jede Funktion  $f$  bildet auf verschiedene Weise eine Definitionsmenge  $D_f$  auf eine Wertmenge  $W_f$  ab. Hat eine Menge  $G$  eine größere Mächtigkeit (notiert  $|G|$ ) als  $K$ , dann besitzt  $G$  mehr Elemente als  $K$ . Dies gilt eigentlich nicht für überabzählbar unendlich große Mengen, diese sind theoretisch alle gleich groß (unendlich groß!).

Eine Funktion  $f$  ist ...

- **surjektiv**, wenn sie jedes Element der Zielmenge mindestens einmal als Funktionswert annimmt. Das heißt, jedes Element der Zielmenge hat mindestens ein Urbild.

$$\forall y \in W_f \quad \exists x \in D_f : f(x) = y$$

$$|D_f| \geq |W_f|. \quad \text{Beispiel:} \quad f(x) = \sin x$$

- **injektiv**, wenn zu jedem Element der Wertmenge höchstens ein (oder auch gar kein) Element der Definitionsmenge existiert. Zwei verschiedene Elemente  $x_1$  und  $x_2$  der Definitionsmenge bilden also nie auf den gleichen Term  $y$  der Wertmenge ab.

$$\forall x_1, x_2 \in D_f : f(x_1) = f(x_2) \Rightarrow x_1 = x_2$$

⚠ Dies bedeutet **nicht**:  $\forall x_1, x_2 \in D_f : x_1 = x_2 \Rightarrow f(x_1) = f(x_2)$

$$|D_f| \leq |W_f|. \quad \text{Beispiel:} \quad f(x) = 2x \quad \text{mit} \quad D_f = \mathbb{Z}$$

- **bijektiv**, wenn eine vollständige Paarbildung existiert. Jedes Element der Wertmenge besitzt genau ein Element der Definitionsmenge und jedes Element der Definitionsmenge besitzt genau ein Element der Wertmenge. Eine Funktion ist genau dann bijektiv, wenn sie sowohl surjektiv, als auch injektiv ist.

$$|D_f| = |W_f|. \quad \text{Beispiel:} \quad f(x) = x^3$$

#### Bemerkung:

Ausführlichere Erklärungen hier, einfach auf die Links klicken:

[Uni Vorlesungsskript](#) oder [Überschaubar\(er\) mit Graphen](#)

### 3.4.10 Umkehrbarkeit

#### Definition

Sei  $f$  eine Funktion mit  $f : D_f \mapsto W_f$  mit  $x \mapsto y$ , dann ist die Funktion genau dann eindeutig umkehrbar, wenn es zu jedem  $y \in W_f$  **genau ein**  $x \in D_f$  existiert.

Wenn diese Funktion umkehrbar ist, dann existiert auch eine Umkehrfunktion  $\bar{f}(x)$  die jedem  $x \in W_f$  genau ein  $y \in D_f$  zuordnet, analog zur Funktion, nur andersrum, also mit  $y \mapsto x$

Es gilt:  $D_{\bar{f}} = W_f$  und  $W_{\bar{f}} = D_f$

**Bemerkung:**

Es gibt viele Funktionen (surjektive Funktionen) die nicht in ihrer vollständigen Definitionsmenge umkehrbar sind, zum Beispiel  $x^n$  mit  $n$  als gerade Zahl,  $\sin(x)$ ,  $\tan(x)$ , und viele mehr. Hier beschränkt man die Funktion auf ein bestimmtes Intervall, um sie umkehren zu können.

Die Funktion  $f(x) = x^2$  mit  $D_f = \mathbb{R}$  und  $W_f = \mathbb{R}_0^+$  hat für  $y = 4$  zwei Urbilder:  $-2$  und  $2$ . Beschränkt man die Funktion auf  $D_f = \mathbb{R}_0^+$ , ist sie umkehrbar und die Umkehrfunktion lautet  $\bar{f}(x) = \sqrt{x}$

**Definition****Umkehrregel oder Inversenregel**

Sei  $f$  eine bijektive (also umkehrbare), differenzierbare, reelle Funktion bei der gilt:  $f'(x) \neq 0$ , dann ist die Umkehrfunktion auch differenzierbar mit der Ableitung

$$\bar{f}'(y) = \frac{1}{f'(\bar{f}(y))} = \frac{1}{f'(x)}$$

**Beweis**

$$\Rightarrow \quad \bar{f}(f(x)) = x \quad | \text{ ableiten}$$

$$\Leftrightarrow \bar{f}'(f(x)) \cdot f'(x) = 1$$

$$\Leftrightarrow \bar{f}'(f(x)) = \frac{1}{f'(x)} \quad \square$$

$$\Leftrightarrow \bar{f}'(y) = \frac{1}{f'(x)} \quad | \text{ mit } y = f(x)$$

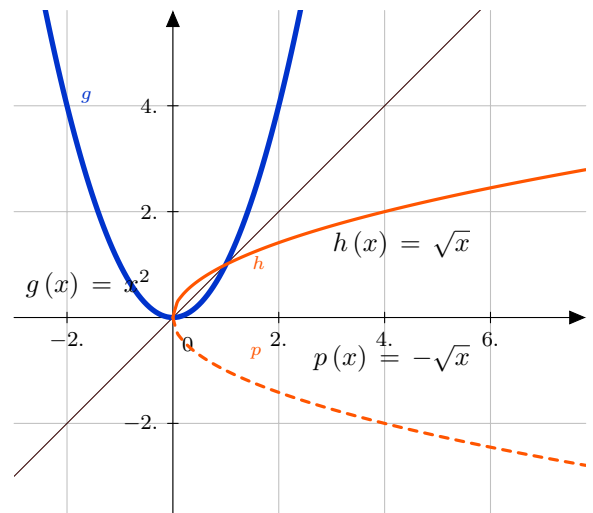
**Bemerkung:**

Anschaulich ist eine Umkehrfunktion eine Axenspiegelung entlang der Winkelhalbierenden am Ursprung, also dem Funktionsgraphen von  $f(x) = x$

**Beispiel:**

Die Funktion  $f(x) = x^2$  mit  $D_f = \mathbb{R}_0^+$  ist umzukehren. Leichtes Spiel...

$$\begin{aligned} \Rightarrow y &= x^2 \\ \Leftrightarrow x &= \sqrt{y} \\ \Leftrightarrow y &= \sqrt{x} \\ \Rightarrow \bar{f}(x) &= \sqrt{x} \end{aligned} \quad \text{Variablen tauschen}$$

**3.4.11 Beispiel**

$$f(x) = \frac{4x^2 - 8x + 4}{2x - 1} = \frac{(2x - 2)^2}{2x - 1} \quad D_f = \mathbb{R} \setminus \left\{ \frac{1}{2} \right\}$$

$$f'(x) = \frac{(8x - 8)(2x - 1) - (4x^2 - 8x + 4)(2)}{(2x - 1)^2} = \frac{16x^2 - 8x - 16x + 8 - 8x^2 + 16x - 8}{4x^2 - 4x + 1} = \frac{8x^2 - 8x}{(2x - 1)^2}$$



$$\begin{aligned}
 f''(x) &= \frac{(16x-8)(4x^2-4x+1) - (8x^2-8x)(8x-4)}{((2x-1)^2)^2} \\
 &= \frac{\cancel{(2x-1)} \cdot 8 \cdot (4x^2-4x+1) - (8x^2-8x) \cdot 4 \cdot \cancel{(2x-1)}}{(2x-1)^4} = \frac{8}{8x^3 - 12x^2 + 6x - 1}
 \end{aligned}$$

### Achsenschnittpunkte

Bestimmung der Nullstelle(n):

$$\begin{aligned}
 \Rightarrow f(x) &= 0 \quad D = \mathbb{R} \setminus \{\tfrac{1}{2}\} \\
 \Leftrightarrow \frac{(2x-2)^2}{(2x-1)} &= 0 \\
 \Leftrightarrow 2x-2 &= 0 \\
 \Leftrightarrow x &= 1 \quad L = \{1\}
 \end{aligned}$$

Die Gleichung für die senkrechte Asymptote lautet deshalb  $x = 1$

Bestimmung des Y-Achsenabschnitts:

$$\Rightarrow f(0) = \frac{4}{-1} = -4$$

Symmetrie:

Man kann anhand des GTR vermuten dass  $f$  punktsymmetrisch ist. Dieser Symmetriepunkt  $P_0$  lässt sich entweder dort ablesen oder ist (häufig) den Schnittpunkt der Asymptoten.  $P_0(\frac{1}{2} | -2)$

$$\begin{aligned}
 \Rightarrow f(x_0 + h) - y_0 &= f(\tfrac{1}{2} + h) + 2 \\
 &= \frac{4(\tfrac{1}{2} + h)^2 - 8(\tfrac{1}{2} + h) + 4}{2(\tfrac{1}{2} + h) - 1} + 2 \\
 &= \frac{4(\tfrac{1}{4} + h + h^2) - 4 - 8h + 4}{2h} + \frac{4h}{2h} \\
 &= \frac{1 + 4h + 4h^2 - 8h + 4h}{2h} = \frac{4h^2 + 1}{2h} \\
 \Rightarrow -f(x_0 - h) + y_0 &= -f(\tfrac{1}{2} - h) - 2 \\
 &= -\frac{4(\tfrac{1}{2} - h)^2 - 8(\tfrac{1}{2} - h) + 4}{2(\tfrac{1}{2} - h) - 1} - 2 \\
 &= -\frac{4(\tfrac{1}{4} - h + h^2) - 4 + 8h + 4}{-2h} - \frac{4h}{2h} \\
 &= \frac{1 - 4h + 4h^2 + 8h - 4h}{2h} = \frac{4h^2 + 1}{2h}
 \end{aligned}$$

Hiermit hat man die Punktsymmetrie von  $f$  zu  $P_0$  bewiesen.

Bestimmung der Grenzwerte der Funktion:

$$\Rightarrow \lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{4x^2 - 8x + 4}{2x - 1} = \frac{\lim_{x \rightarrow +\infty} (4 - \frac{8}{x} + \frac{4}{x^2})}{\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{2}{x} - \frac{1}{x^2}} = \frac{4 - 0 + 0}{0 - 0} = +\infty$$

$$\Rightarrow \lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{4x^2 - 8x + 4}{2x - 1} = \frac{\lim_{x \rightarrow -\infty} (-4 + \frac{8}{x} + \frac{4}{x^2})}{\lim_{x \rightarrow -\infty} -\frac{2}{x} - \frac{1}{x^2}} = \frac{-4 + 0 + 0}{-0 - 0} = -\infty$$

**Bemerkung:**

Da die Punktsymmetrie vorher bewiesen wurde hätte der  $\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x)$  gar nicht errechnet werden müssen!

$$\begin{aligned} \Rightarrow \lim_{x \rightarrow \frac{1}{2}^+} f(x) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{4(\frac{1}{2} + h)^2 - 8(\frac{1}{2} + h) + 4}{2(\frac{1}{2} + h) - 1} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1 + 4h + 4h^2 - 4 + h + 4}{2h} \\ &= \frac{\lim_{h \rightarrow 0} 1 + 5h + 4h^2}{\lim_{h \rightarrow 0} 2h} \\ &= \frac{1}{0} = +\infty \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \lim_{x \rightarrow \frac{1}{2}^-} f(x) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{4(\frac{1}{2} - h)^2 - 8(\frac{1}{2} - h) + 4}{2(\frac{1}{2} - h) - 1} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1 - 4h + 4h^2 - 4 - 4h + 4}{-2h} \\ &= \frac{\lim_{h \rightarrow 0} 1 - 8h + 4h^2}{\lim_{h \rightarrow 0} -2h} \\ &= -\frac{1}{0} = -\infty \end{aligned}$$

**Asymptoten:**

Es liegt eine nicht hebbare Definitionslücke bei  $x = \frac{1}{2}$  vor, also ist dies die Gleichung der senkrechten Asymptote.

Da der Grenzwert  $\rightarrow \pm\infty$  keinen eindeutigen Wert annimmt, macht man eine Polynomdivision ...

$$\begin{aligned} \Rightarrow \quad (4x^2 \quad -8x \quad +4) : (2x - 1) &= 2x - 3 + \frac{1}{2x - 1} \\ -(4x^2 \quad -2x) & \\ \quad -6x \quad +4 & \\ \quad -(-6x \quad +3) & \\ \quad \quad 1 & \end{aligned}$$

... und erhält die Gleichung der schiefen Asymptote  $y = 2x - 3$

**Monotonieverhalten:**

Untersuchung auf Extremstellen:

- Notwendige Bedingung:  $\Rightarrow f'(x) = 0$

$$\Leftrightarrow \frac{8x^2 - 8x}{4x^2 - 4x + 1} = 0 \quad D = \mathbb{R} \setminus \{\frac{1}{2}\}$$

$$\Leftrightarrow x(8x - 8) = 0$$

$$\Leftrightarrow x = 0 \quad \vee \quad x = 1 \quad L = \{1; 0\}$$

- Hinreichende Bedingung: Vorzeichenwechsel  $f'(x)$  oder  $f''(x) \neq 0$

$x$	$-\infty$	$0$	$\frac{1}{2}$	$1$	$+\infty$
$x$	$-$	$0$	$+$	$+$	$+$
$(8x - 8)$	$-$	$-$	$-$	$0$	$+$
$(2x - 1)^2$	$+$	$+$	$+$	$+$	$+$
$f'(x)$	$+$	$0$	$-$	$-$	$+$
$f(x)$	$-\infty$	$(0 f(0))$	$-\infty$	$(1 f(1))$	$+\infty$

### Krümmungsverhalten:

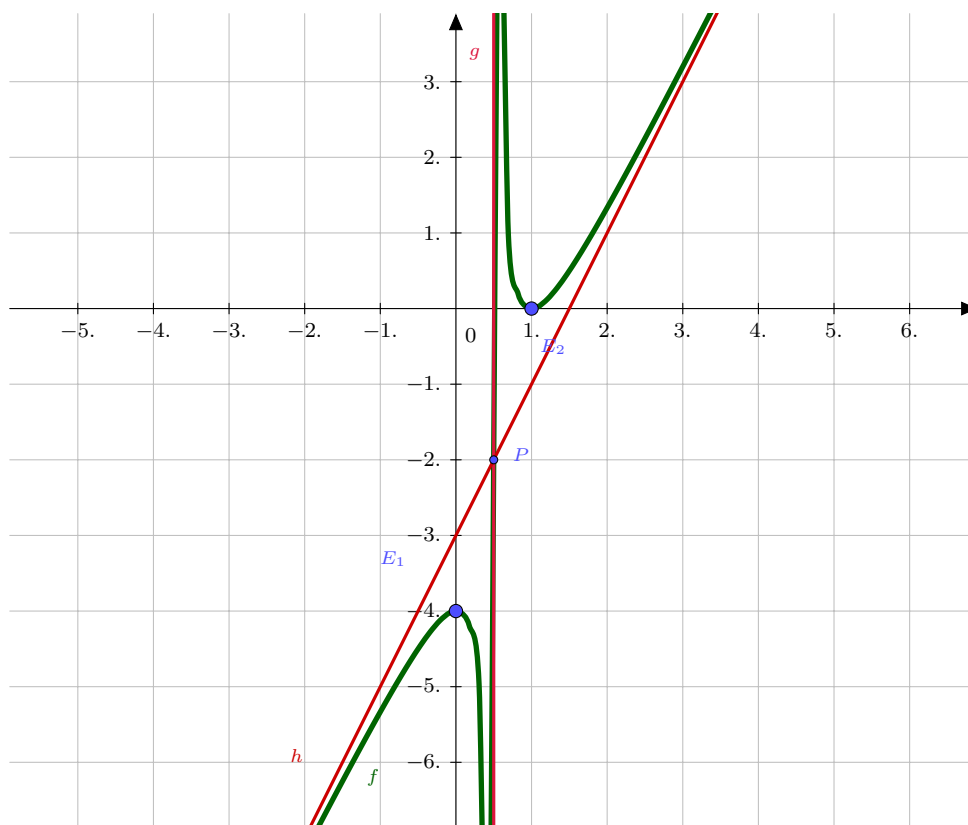
#### Untersuchung auf Wendestellen:

- Notwendige Bedingung:  $\Rightarrow f''(x) = 0$

$$\Leftrightarrow \frac{8}{(2x - 1)^3} = 0$$

$$\Leftrightarrow 8 = 0 \quad \text{!}$$

Die Funktion weist keine Wendestellen vor. Bei Lösbarkeit der Gleichung ist als hinreichende Bedingung ein Vorzeichenwechsel von  $f''(x)$  zu zeigen oder  $f''' \neq 0$  zu beweisen. Dann kann die Skizze beginnen:



## 3.5 Funktionenschar

Erklärung:

Eine **Funktionenschar** ist eine Menge von Funktionen, die neben der Variable auch noch einen veränderlichen Parameter im Funktionsterm enthält. Jedem Wert des Parameters ist ein Graph der Schar zugeordnet. Der Parameter, oft  $a$ , wird hierbei überall wie eine Konstante behandelt.

Der Punkt, den alle Graphen, unabhängig von ihren Parametern, beinhalten, nennt man Bündel. Die Graphen einer Funktionenschar bilden gemeinsam eine Kurvenschar.

Hier ist die Kurvenschar der Funktion  $f(x) = ax^3$ . Sie verlaufen alle durch das Bündel  $P(0|0)$

kap3/BundelFunktionenscharen-eps-converted-to.pdf

### 3.5.1 Beispiel

$$f_a(x) = \frac{x^2 - 3ax}{x + a} \quad D_f = \mathbb{R} \setminus \{-a\}, \quad a \in \mathbb{R}^+$$

Sei  $K_a$  der Graph der Funktion.

**Bestimmen Sie die Schnittpunkte von  $K_a$  mit den Koordinatenachsen**

$$f_a(0) = \frac{0}{x + a} = 0$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow f_a(x) = 0 &\Leftrightarrow x^2 - 3ax = 0 \\ &\Leftrightarrow x(x - 3a) = 0 \\ &\Leftrightarrow x = 0 \quad \vee \quad x = 3a \end{aligned}$$

Es ergeben sich die Punkte  $P_1(0|0)$  und  $P_2(3a|0)$

**Bestimmen Sie die Asymptoten von  $K_a$**

$$\begin{aligned} \Rightarrow (x^2 - 3ax + 0) : (x + a) &= x - 4a + \frac{4a^2}{x + a} \\ &-(x^2 + ax) \\ &\quad -4ax + 0 \\ &\quad -(-4ax - 4a^2) \\ &\quad \quad 4a^2 \end{aligned}$$

Man erhält die schiefe Asymptote  $y = x - 4a$

Es liegt eine nicht hebbare Definitionslücke bei  $-a$  vor, daraus ergibt sich eine vertikale Asymptote  $\Rightarrow x = -a$

**Zeigen Sie  $f_a''(x) = \frac{8a^2}{(x+a)^3}$**

$$\begin{aligned} f_a'(x) &= \frac{(2x - 3a)(x + a) - (x^2 - 3ax)(1)}{(x + a)^2} \\ &= \frac{2x^2 + 2ax - 3ax - 3a^2 - x^2 - 3ax}{x^2 + 2ax + a^2} \\ &= \frac{x^2 + 2ax - 3a^2}{(x + a)^2} \\ f_a''(x) &= \frac{(2x + 2a)(x^2 + 2ax + a^2) - (x^2 - 2ax - 3a^2)(2(x + a))}{(x + a)^4} \\ &= \frac{2x^2 + 4ax + 2a^2 - 2x^2 + 4ax + 6a^2}{(x + a)^3} \\ &= \frac{8a^2}{(x + a)^3} \end{aligned}$$

**Weisen Sie nach, dass  $K_a$  genau einen Hochpunkt und genau einen Tiefpunkt besitzt. Geben Sie die Koordinaten dieser Punkte in Abhängigkeit von  $a$  an und erstellen Sie eine Monotonietabelle der Funktionen  $f_a$**

Notwendige Bedingung für Extremstellen:  $\Rightarrow f'(x) = 0$

$$\Leftrightarrow x^2 + 2ax - 3a^2 = 0 \quad D = \mathbb{R} \setminus \{-a\}$$

$$\Rightarrow \Delta = 4a^2 + 12a^2 = 16a^2$$

$$\Leftrightarrow x_1 = a \quad \vee \quad x_2 = -3a \quad L = \{a; -3a\}$$

$$\Rightarrow f(a) = \frac{a^2 - 3a^2}{2a} = -a$$

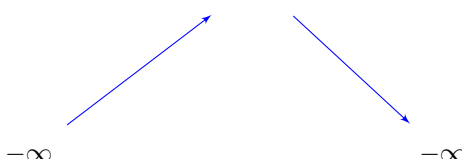
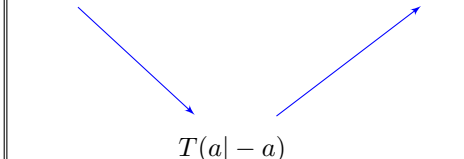
$$\Rightarrow f(-3a) = \frac{9a^2 + 9a^2}{-2a} = -9a$$

Es ergeben sich somit die Extremstellen  $H(-3a | -9a)$  und  $T(a | -a)$ . Bevor man mit der Monotonietabelle beginnt, muss die Polstelle untersucht werden.

$$\lim_{x \rightarrow -a^+} f_a = \lim_{x \rightarrow -a^+} \frac{x^2 - 3ax}{x + a} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{(-a + h)^2 - 3a(-a + h)}{(-a + h) + a} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{h^2 - 5ah + 4a^2}{h} = +\infty$$

$$\lim_{x \rightarrow -a^-} f_a = \lim_{x \rightarrow -a^-} \frac{x^2 - 3ax}{x + a} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{(-a - h)^2 - 3a(-a - h)}{(-a - h) + a} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{h^2 + 5ah + 4a^2}{-h} = -\infty$$

Jetzt kann die Monotonietabelle erstellt werden:

$x$	$-\infty$	$-3a$	$-a$	$a$	$+\infty$	
$x^2 - 2ax - 3a$	$+$	$0$	$-$	$-$	$0$	$+$
$(x + a)^2$	$+$		$+$	$+$		$+$
$f'_a(x)$	$+$	$0$	$-$	$-$	$0$	$+$
$f_a(x)$	<div><math>H(-3a -9a)</math> </div>			<div><math>+\infty</math> </div>		
	$-\infty$		$-\infty$	$T(a -a)$		

**Zeigen Sie, dass es genau einen Punkt gibt, durch den alle Graphen  $K_a$  gehen.**

Diesen Punkt haben wir schon per "Zufall" herausgefunden, da wir eine Nullstelle gefunden haben, die nicht von  $a$  abhängt. Wenn man diesen aber nicht gefunden hat, geht man diesen Lösungsweg:

$$\begin{aligned} \Rightarrow f_1 = f_2 &\Leftrightarrow \frac{x^2 - 3x}{x + 1} = \frac{x^2 - 6x}{x + 2} & D = \mathbb{R} \setminus \{-1; -2\} \\ &\Leftrightarrow \frac{x - 3}{x + 1} = \frac{x - 6}{x + 2} \\ &\Leftrightarrow -x = -5x \\ &\Leftrightarrow x = 0 & L = \{0\} \end{aligned}$$

**Bestimmen Sie  $a \in \mathbb{R}^+$  so, dass der Graph  $K_a$  durch den Punkt  $P(5|\frac{5}{3})$  verläuft**

$$\Rightarrow f_a(5) = \frac{5}{3} \Leftrightarrow \frac{5^2 - 15a}{5 + a} = \frac{5}{3} \quad D = \mathbb{R} \setminus \{-5\}$$

$$\Leftrightarrow 15 - 9a = 5 + a$$

$$\Leftrightarrow a = 1 \quad L = \{1\}$$

**Berechnen Sie die Schnittpunkte von  $K_1$  mit der Geraden  $j(x) = -15x - 4$**

$$\Rightarrow f_1(x) = \frac{x^2 - 3x}{x + 1} = -15x - 4 = y$$

$$\Leftrightarrow x^2 - 3x = -15x^2 - 19x - 4$$

$$\Leftrightarrow 4x^2 + 4x + 1 = 0$$

$$\Delta = 0 \Rightarrow x = -\frac{1}{2}$$

$$\Rightarrow f_1\left(-\frac{1}{2}\right) = \frac{\left(\frac{1}{2}\right)^2 - 3 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)}{-\frac{1}{2} + 1} = \frac{7}{2}$$

Es existiert genau ein Schnittpunkt von  $K_1$  mit der Geraden  $j$ :  $P_{K_1 j}\left(-\frac{1}{2}|\frac{7}{2}\right)$

**Vom Punkt  $A(0|-4)$  wird die Tangente an  $K_1$  gelegt. Bestimmen Sie eine Gleichung der Tangente und die Koordinaten des Berührungspunktes**

Sei  $B(x_0|f(x_0))$ , dann lautet die Tangentengleichung:

$$\begin{aligned} \Rightarrow T_{x_0}(x) &= f'(x_0) \cdot (x - x_0) + f(x_0) \\ &= \frac{x_0^2 + 2x_0 - 3}{(x_0 + 1)^2} \cdot (x - x_0) + \frac{x_0^2 - 3x_0}{x_0 + 1} \end{aligned}$$

Jetzt werden die Koordinaten des Punktes  $A(0|-4)$ , durch den die Tangente auch noch geht, eingesetzt.

$$\Rightarrow T_{x_0}(0) = -4 = \frac{x_0^2 + 2x_0 - 3}{(x_0 + 1)^2} \cdot (-x_0) + \frac{x_0^2 - 3x_0}{x_0 + 1} \quad D = \mathbb{R} \setminus \{-1\}$$

$$\Leftrightarrow -4(x_0 + 1)^2 = (x_0^2 + 2x_0 - 3)(-x_0) + (x_0^2 - 3x_0)(x_0 + 1)$$

$$\Leftrightarrow -4x_0^2 - 8x_0 - 4 = -x_0^3 - 2x_0^2 + 3x_0 + x_0^3 + x_0^2 - 3x_0^2 - 3x_0$$

$$\Leftrightarrow 4x_0^2 + 8x_0 + 4 = 4x_0^2$$

$$\Leftrightarrow x_0 = -\frac{1}{2} \quad L = \left\{-\frac{1}{2}\right\}$$

Nun werden die Koordinaten des Berührungspunktes mit der Ursprünglichen Funktion  $f$  durch einsetzen errechnet.

$$\Rightarrow f_1\left(-\frac{1}{2}\right) = \frac{\left(-\frac{1}{2}\right)^2 - 3 \cdot -\frac{1}{2}}{-\frac{1}{2} + 1} = \frac{7}{2}$$

$$\Rightarrow B\left(-\frac{1}{2}|\frac{7}{2}\right)$$

Da es sich um eine Tangente handelt, muss nun die Steigung am Berührungspunkt errechnet werden, um die Tan-

gentengleichung bestimmen zu können.

$$\Rightarrow f'_1\left(-\frac{1}{2}\right) = \frac{\left(-\frac{1}{2}\right)^2 + 2\left(-\frac{1}{2}\right) - 3}{\left(-\frac{1}{2}\right)^2} = -15$$

Die Tangentengleichung lautet:

$$t(x) = -15x - 4 \quad \text{mit} \quad D_t = \mathbb{R}$$



## TRIGONOMETRIE

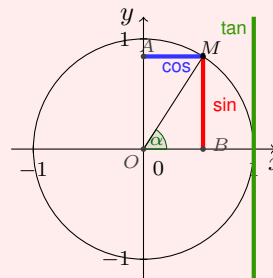
by RÉMY

### 4.1 Kurze Wiederholung

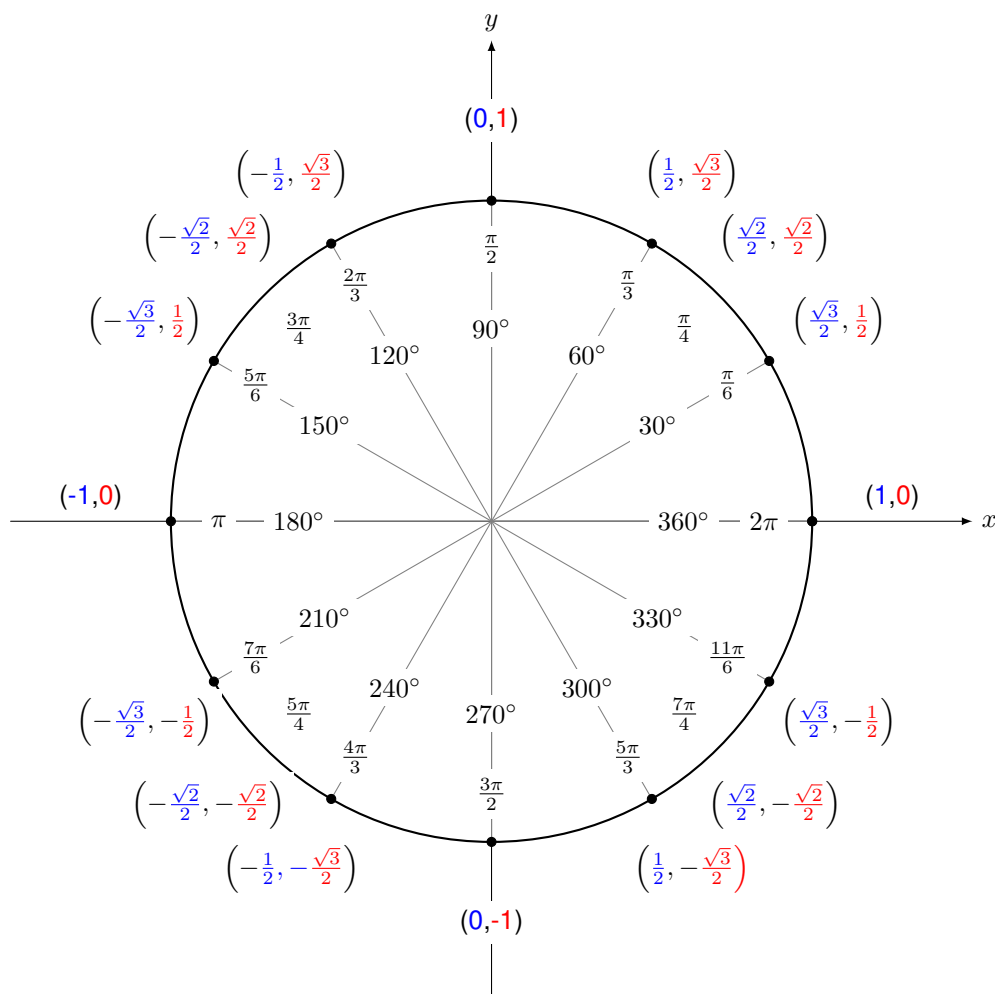
#### Definition

In einem Kreis mit Radius 1 gelte:

- $\cos(\alpha) = x_M$
- $\sin(\alpha) = y_M$
- $\tan(\alpha) = \frac{\sin(\alpha)}{\cos(\alpha)}$



Es ergeben sich folgende (wissenswerte) Werte:



Des Weiteren gilt:

	$15^\circ$ $\frac{\pi}{12}$	$45^\circ$ $\frac{\pi}{4}$	$75^\circ$ $\frac{5\pi}{12}$
$\sin(\alpha)$	$\frac{\sqrt{6} - \sqrt{2}}{4}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{\sqrt{6} + \sqrt{2}}{4}$
$\cos(\alpha)$	$\frac{\sqrt{6} + \sqrt{2}}{4}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{6} - \sqrt{2}}{4}$

## 4.2 Additions- und Verdopplungssätze

### Theorem

$$\cos(a - b) = \cos(a) \cos(b) + \sin(a) \sin(b)$$

$$\sin(a - b) = \sin(a) \cos(b) - \cos(a) \sin(b)$$

$$\cos(a + b) = \cos(a) \cos(b) - \sin(a) \sin(b)$$

$$\sin(a + b) = \sin(a) \cos(b) + \cos(a) \sin(b)$$

### Bemerkung:

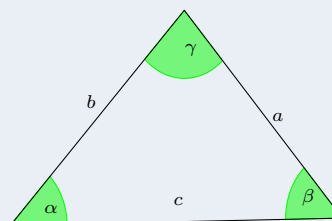
Hieraus ergeben sich einige weitere Relationen, wie z.B.  $\sin(2a)$ . Diese lassen sich jedoch schnell und leicht herleiten.

## 4.3 Allgemeine Sinus- und Kosinussätze

In einem beliebigen Dreieck gelten abgewandelte Formen der aus der 8. Klasse bekannten Sätze:

### Theorem

- $\frac{a}{\sin(\alpha)} = \frac{b}{\sin(\beta)} = \frac{c}{\sin(\gamma)}$
- $c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos(\gamma)$



### Bemerkung:

Man bemerkt, dass sich die bekannten Relationen ergeben, wenn einer der Winkel den Wert  $\frac{\pi}{2}$  annimmt.

## 4.4 Sinusfunktionen

Zur Vollständigen Funktionsdiskussion einer Sinus-Funktion sind einige Besonderheiten zu beachten:

### 1. Amplitude und Periodizität

Eine Funktion der Form  $f(x) = a \cdot \sin(b(x - c)) + d$  hat:

- die Periode  $P = \frac{2\pi}{|b|}$
- die Amplitude  $A = |a|$
- die Verschiebung entlang der  $x$ -Achse um  $d$  und entlang der  $y$ -Achse um  $c$

## 2. Symmetrieeigenschaften

Hier sollte zumindest bekannt sein, dass  $f(x) = \sin(x)$  punktsymmetrisch zum Origo ist, und dass  $f(x) = \cos(x)$  Achsensymmetrisch zur  $y$ -Achse ist.

## 3. Die Null-, Extrem- und Wendestellen sind in Form einer Menge anzugeben. (Es sei denn, die Aufgabenvorschrift fordert explizit zu einer Begrenzung auf ein angegebenes Intervall auf)

**Beispiel:**

Die Nullstellen der Funktion  $f(x) = \sin(x)$  lassen sich darstellen als:  $x \in \{k\pi | k \in \mathbb{Z}\}$

## 4. Bei der Teilung durch eine Sinusfunktion können Definitionslücken an dessen Nullstellen entstehen. Auch diese können in der bereits gezeigten Form angegeben werden.

**4.4.1 Zusammengesetzte Sinusfunktionen****4.5 Polarkoordinaten**

In der Kursstufe beschränken wir uns auf die Benutzung von Polarkoordinaten für Punkte in der Ebene (2D).

**Definition**

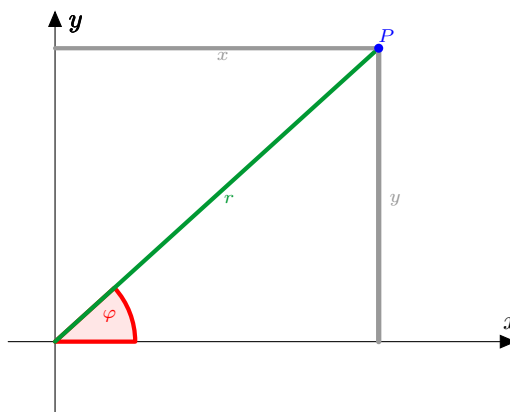
Polarkoordinaten sind eine Form der eindeutigen Punktangaben, doch anstatt wie kartesische Koordinaten 2 Entfernungen  $x$  und  $y$  zu verwenden, haben sie die Form  $(r|\varphi)$ .  $r$  ist hierbei die Entfernung zum Origo und  $\varphi$  ein orientierter Winkel (in  $rad$ ).

**4.5.1 Umrechnung****Kartesisch  $\rightarrow$  Polar**

- $r = \sqrt{x^2 + y^2}$
- $\varphi = \tan\left(\frac{y}{x}\right)$

**Polar  $\rightarrow$  Kartesisch**

- $x = r \cdot \cos(\varphi)$
- $y = r \cdot \sin(\varphi)$

**4.6 Beispiele einer Funktionsdiskussion****4.6.1  $f(x) = 2 \cos(x) + 2 \sin(x) \cos(x)$** 

Sei die Funktion  $f(x) = 2 \cos(x) + 2 \sin(x) \cos(x)$ , ihr Schaubild sei K.

Untersuchen Sie K im Intervall  $[0; 2\pi]$  auf gemeinsame Punkte mit der  $x$ -Achse, sowie Extrem- und Wendepunkte. Zeichnen Sie K im Intervall  $[0; 2\pi]$ . Untersuchen Sie K auf Symmetrie.

**Definitionsmenge**

$$D = \mathbb{R}$$

**Periodizität und Amplitude**

Die Periode von  $f$  ist  $P = 2\pi$ . Die Amplitude  $A$  beträgt  $\frac{3}{2}\sqrt{3}$ .

**Nullstellen**Notwendige und hinreichende Bedingung:

$$\begin{aligned}
 f(x) &= 0 \\
 \Leftrightarrow 2 \cos(x) + 2 \sin(x) \cos(x) &= 0 \\
 \Leftrightarrow 2 \cos(x)(1 + \sin(x)) &= 0 \\
 \stackrel{s.d.N}{\Rightarrow} \begin{cases} 2 \cos(x) &= 0 \\ 1 + \sin(x) &= 0 \end{cases} \\
 \Leftrightarrow \begin{cases} \cos(x) &= 0 \\ \sin(x) &= -1 \end{cases} \\
 \Leftrightarrow \begin{cases} x_1 &= \frac{1}{2}\pi \\ x_2 &= \frac{3}{2}\pi \end{cases} \\
 \Rightarrow \mathbb{L} &= \left\{ \left( \frac{1}{2}\pi \middle| 0 \right); \left( \frac{3}{2}\pi \middle| 0 \right) \right\}
 \end{aligned}$$

**Extremstellen**Notwendige Bedingung:

$$f'(x) = 0$$

$$\Leftrightarrow 4 \sin^2(x) - 2 \sin(x) + 2 = 0$$

Substitution:  $y = \sin(x)$ 

$$\Rightarrow 4y^2 - 2y + 2 = 0$$

$$\stackrel{ABC-Formel}{\Rightarrow} y_{1,2} = \frac{2 \pm \sqrt{(-2)^2 - 4 * (-4) * 2}}{-8}$$

Resubstitution:

$$\Rightarrow \begin{cases} \sin(x) &= \frac{2 + \sqrt{20}}{-8} \\ \sin(x) &= \frac{2 - \sqrt{20}}{-8} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \mathbb{L} = \left\{ \frac{1}{6}\pi; \frac{5}{6}\pi; \frac{3}{2}\pi \right\}$$

Ergebnis

Auf dem Intervall  $[0; 2\pi]$  besitzt K den Hochpunkt  $H\left(\frac{1}{6}\pi \middle| f\left(\frac{1}{6}\pi\right)\right)$  und den Tiefpunkt  $T\left(\frac{5}{6}\pi \middle| f\left(\frac{5}{6}\pi\right)\right)$ .

$$\Leftrightarrow H\left(\frac{1}{6}\pi \middle| \frac{3}{2}\sqrt{3}\right) \text{ und } T\left(\frac{5}{6}\pi \middle| -\frac{3}{2}\sqrt{3}\right).$$

**Wendestellen****Ableitungen**

$$\begin{aligned}
 f'(x) &= -2 \sin(x) + 2(\cos(x) \cos(x) - \sin(x) \sin(x)) \\
 &= -2 \sin(x) + 2(\cos^2(x) - \sin^2(x)) \\
 &= -2 \sin(x) + 2(1 - \sin^2(x) - \sin^2(x)) \\
 &= -4 \sin^2(x) - 2 \sin(x) + 2 \\
 f''(x) &= -4(\cos(x) \sin(x) + \sin(x) \cos(x)) - 2 \cos(x) \\
 &= -8 \sin(x) \cos(x) - 2 \cos(x) \\
 f'''(x) &= -8(\cos(x) \cos(x) - \sin(x) \sin(x)) + 2 \sin(x) \\
 &= -8(1 - \sin^2(x) - \sin^2(x)) + 2 \sin(x) \\
 &= 16 \sin^2(x) + 2 \sin(x) - 8
 \end{aligned}$$

Hinreichende Bedingung:

$$f''(x) \neq 0$$

$$\Rightarrow \begin{cases} f''\left(\frac{1}{6}\pi\right) &\stackrel{?}{=} 0 \\ f''\left(\frac{5}{6}\pi\right) &\stackrel{?}{=} 0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} f''\left(\frac{5}{6}\pi\right) &\stackrel{?}{=} 0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} f''\left(\frac{3}{2}\pi\right) &\stackrel{?}{=} 0 \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} 8 \sin\left(\frac{1}{6}\pi\right) \cos\left(\frac{1}{6}\pi\right) - 2 \sin\left(\frac{1}{6}\pi\right) &\stackrel{?}{=} 0 \\ 8 \sin\left(\frac{5}{6}\pi\right) \cos\left(\frac{5}{6}\pi\right) - 2 \sin\left(\frac{5}{6}\pi\right) &\stackrel{?}{=} 0 \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} 8 \sin\left(\frac{5}{6}\pi\right) \cos\left(\frac{5}{6}\pi\right) - 2 \sin\left(\frac{5}{6}\pi\right) &\stackrel{?}{=} 0 \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} 8 \sin\left(\frac{3}{2}\pi\right) \cos\left(\frac{3}{2}\pi\right) - 2 \sin\left(\frac{3}{2}\pi\right) &\stackrel{?}{=} 0 \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} 8 * \frac{1}{2} * \frac{\sqrt{3}}{2} - 2 * \frac{\sqrt{3}}{2} &\stackrel{!}{\neq} 0, < 0 \Rightarrow HP \\ 8 * \frac{1}{2} * -\frac{\sqrt{3}}{2} - 2 * -\frac{\sqrt{3}}{2} &\stackrel{!}{\neq} 0, > 0 \Rightarrow TP \\ 8 * (-1)(0) - 2(0) &\stackrel{!}{=} 0 \Rightarrow \text{kein EP} \end{cases}$$

Notwendige Bedingung:

$$\begin{aligned}
 f''(x) &= 0 \\
 \Leftrightarrow -8 \sin(x) \cos(x) - 2 \cos(x) &= 0 \\
 \Leftrightarrow \cos(x)(-2 - 8 \sin(x)) &= 0 \\
 \stackrel{SdN}{\Rightarrow} \begin{cases} \cos(x) &= 0 \\ \sin(x) &= -\frac{1}{4} \end{cases} \\
 \Rightarrow \mathbb{L} &= \left\{ \frac{1}{2}\pi; \frac{3}{2}\pi; \sim 3,394; \sim 6,031 \right\}
 \end{aligned}$$

Hinreichende Bedingung:

$$\begin{aligned}
 &f'''(x) \neq 0 \\
 \Rightarrow &\begin{cases} f''' \left( \frac{1}{2}\pi \right) \stackrel{?}{=} 0 \\ f''' \left( \frac{3}{2}\pi \right) \stackrel{?}{=} 0 \\ f'''(3,394) \stackrel{?}{=} 0 \\ f'''(6,031) \stackrel{?}{=} 0 \end{cases} \\
 \Leftrightarrow &\begin{cases} 16 \sin^2 \left( \frac{1}{2}\pi \right) + \sin \left( \frac{1}{2}\pi \right) - 8 \stackrel{?}{=} 0 \\ 16 \sin^2 \left( \frac{3}{2}\pi \right) + \sin \left( \frac{3}{2}\pi \right) - 8 \stackrel{?}{=} 0 \\ 16 \sin^2(3,394) + \sin(3,394) - 8 \stackrel{?}{=} 0 \\ 16 \sin^2(6,031) + \sin(6,031) - 8 \stackrel{?}{=} 0 \end{cases} \\
 \Leftrightarrow &\begin{cases} 16 * 1 + 1 - 8 \stackrel{!}{\neq} 0, > 0 \Rightarrow WP \\ 16 * 1 - 1 - 8 \stackrel{!}{\neq} 0, > 0 \Rightarrow WP \\ -7,5 \stackrel{!}{=} 0, < 0 \Rightarrow WP \\ -7,5 \stackrel{!}{=} 0, < 0 \Rightarrow WP \end{cases}
 \end{aligned}$$

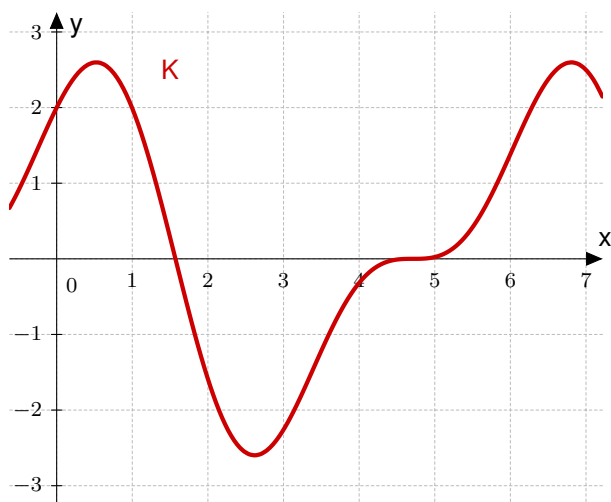
Bemerkung:

Außerdem:  $f' \left( \frac{3}{2}\pi \right) = 0 \Rightarrow$  Sattelpunkt

Ergebnis

Auf dem Intervall  $[0; 2\pi]$  besitzt K die Wendepunkte  $\left( \frac{1}{2}\pi \middle| f \left( \frac{1}{2}\pi \right) \right)$ ,  $(3,394 | f(3,394))$ ,  $(6,031 | f(6,031))$  und den Sattelpunkt  $\left( \frac{3}{2}\pi \middle| f \left( \frac{3}{2}\pi \right) \right)$ .

$$\Leftrightarrow W_1 \left( \frac{1}{2}\pi \middle| 0 \right), W_2(3,394 | -1,452), W_3(6,031 | 1,452), S \left( \frac{3}{2}\pi \middle| 0 \right).$$

**Schaubild****Symmetrie**

K ist punktsymmetrisch zu  $W_1$ , denn es gilt:

$$f\left(\frac{1}{2}\pi + x\right) = -1 * f\left(\frac{1}{2}\pi - x\right)$$

$$\Leftrightarrow 2\cos\left(\frac{1}{2}\pi + x\right) + 2\sin\left(\frac{1}{2}\pi + x\right)\cos\left(\frac{1}{2}\pi + x\right) = -1 * (2\cos\left(\frac{1}{2}\pi - x\right) + 2\sin\left(\frac{1}{2}\pi - x\right)\cos\left(\frac{1}{2}\pi - x\right))$$

$$\Leftrightarrow -2\sin(x) - 2\cos(x)\sin(x) = -1 * (2\sin(x) + 2\cos(x)\sin(x))$$

K ist außerdem zu  $S$  punktsymmetrisch, denn es gilt:

$$f\left(\frac{3}{2}\pi + x\right) = -1 * f\left(\frac{3}{2}\pi - x\right)$$

$$\Leftrightarrow 2\cos\left(\frac{3}{2}\pi + x\right) + 2\sin\left(\frac{3}{2}\pi + x\right)\cos\left(\frac{3}{2}\pi + x\right) = -1 * (2\cos\left(\frac{3}{2}\pi - x\right) + 2\sin\left(\frac{3}{2}\pi - x\right)\cos\left(\frac{3}{2}\pi - x\right))$$

$$\Leftrightarrow 2\sin(x) + 2\cos(x)\sin(x) = -1 * (-2\sin(x) - 2\cos(x)\sin(x))$$

## EXPONENTIALFUNKTIONEN

by CLARA

### Definition

Man bezeichnet als Exponentialfunktion eine Funktion der Form  $x \rightarrow a^x$  mit  $a \in \mathbb{R}^+ \setminus 1$ .  
 $x$  ist die Variable und wird *Exponent* oder *Hochzahl* genannt.  
 $a$  nennt man *Basis* oder *Grundzahl*, sie ist für jede Funktion fest vorgegeben.

Allgemeiner gilt jede Funktion, bei der die Variable im Exponenten steht als Exponentialfunktion.

### 5.1 Wiederholung: Potenzgesetze

#### Theorem

Seien  $a, b \in \mathbb{R}$ , sowie  $n, m \in \mathbb{N}$ , dann gilt:

1.  $a^0 = 1$  (für  $a \neq 0$ )

2.  $a^1 = a$

3.  $a^n = \underbrace{a \cdot a \cdot \dots \cdot a}_{n \text{ Mal}}$

4.  $a^m \cdot a^n = a^{m+n}$

5.  $(a^n)^m = a^{n \cdot m}$

6.  $a^{-n} = \frac{1}{a^n}$

7.  $\frac{a^n}{a^m} = a^{n-m}$

8.  $\left(\frac{a}{b}\right)^n = \frac{a^n}{b^n}$

9.  $a^{\frac{1}{n}} = \sqrt[n]{a}$

10.  $a^{\frac{m}{n}} = \sqrt[n]{a^m}$

### 5.2 Die Eulersche Zahl ( $e$ )

#### Definition

$e = 2,71828182845904523536028747135266249775724709369995\dots$

Die **Eulersche Zahl** ( $e$ ) ist eine irrationale, transzendente und reelle Zahl, die die Basis des (natürlichen) Logarithmus und der (natürlichen) Exponentialfunktion ist.

Die Darstellung, der man am Häufigsten begegnet ist diese:  $e = \lim_{t \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{t}\right)^t$ ;  $t \in \mathbb{R}$

Benannt nach dem bekannten Mathematiker Leonhard Euler ist diese Zahl eine der wichtigsten Konstanten der Mathematik. Sie ist die Basis des natürlichen Logarithmus und der natürlichen Exponentialfunktion. Diese besondere Exponentialfunktion wird aufgrund dieser Beziehung zur Zahl  $e$  häufig kurz  $e$ -Funktion genannt, sie eignet sich zur Modellierung von Wachstums- und Zufallsprozessen.

#### Bemerkung:

Eine alternative Definition wäre folgende: Die positive Zahl  $a$ , für die die Exponentialfunktion  $f$  mit  $f(x) = a^x$  mit ihrer Ableitungsfunktion  $f'$  übereinstimmt, heißt Eulersche Zahl. (siehe 12.5)

**Definition**

Eine reelle Zahl heißt (oder allgemeiner eine komplexe Zahl) transzendent, wenn sie nicht Nullstelle eines Polynoms mit ganzzahligen Koeffizienten ist. Andernfalls handelt es sich um eine algebraische Zahl. Jede reelle transzendente Zahl ist überdies irrational.

**5.2.1 Verschiedene Darstellungen**

$e$  ist darstellbar bzw. ergibt sich durch:

- $\sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!}$
- $\lim_{t \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{t}\right)^t ; t \in \mathbb{R}$
- $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n ; n \in \mathbb{N}$

**5.2.2 Herleitung zur Zahl  $e$** 

Wir definieren eine Folge  $(e_n)_{n \in \mathbb{N}}$  durch  $e_n = \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n$  und beweisen ihre Konvergenz.

•

$$\begin{aligned} \frac{e_{n+1}}{e_n} &= \frac{\left(1 + \frac{1}{n+1}\right)^{n+1}}{\left(1 + \frac{1}{n}\right)^n} \\ &= \left(\frac{n(n+2)}{(n+1)^2}\right)^{n+1} \cdot \left(1 + \frac{1}{n}\right) \\ &= \left(1 - \frac{1}{(n+1)^2}\right)^{n+1} \cdot \frac{n+1}{n} \end{aligned}$$

- Die Umformung ermöglicht uns auf den Term  $\left(1 - \frac{1}{(n+1)^2}\right)^{n+1}$  die Ungleichung von Bernoulli anzuwenden. Diese besagt Folgendes:  $(1+x)^n > 1 + nx$  für  $n \geq 2$  und  $x > -1$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \left(1 - \frac{1}{(n+1)^2}\right)^{n+1} &> 1 + (n+1) \cdot \left(-\frac{1}{(n+1)^2}\right) \\ &= 1 - \frac{1}{n+1} \\ &= \frac{n}{n+1} \end{aligned}$$

- Dies kann man für den ersten Ausdruck verwenden:

$$\begin{aligned} \Rightarrow \frac{e_{n+1}}{e_n} &= \left(1 - \frac{1}{(n+1)^2}\right)^{n+1} \cdot \frac{n+1}{n} \\ &> \frac{n}{n+1} \cdot \frac{n+1}{n} \\ &= 1 \end{aligned}$$

$\Leftrightarrow e_n$  ist streng monoton steigend

Sei eine Folge  $f_n$  mit  $f_n = \left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n+2}$ , deren Monotonieverhalten wir untersuchen wollen. Dazu formen wir den Term so um, dass die Bernoulli-Ungleichung angewandt werden kann.



•

$$\begin{aligned}
\frac{f_n}{f_{n+1}} &= \frac{\left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n+1}}{\left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n+2}} \\
&= \left(\frac{1 + \frac{1}{n}}{1 + \frac{1}{n+1}}\right)^{n+2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{n}} \\
&= \left(\frac{\frac{n+1}{n}}{\frac{n+2}{n+1}}\right)^{n+2} \cdot \frac{n}{n+1} \\
&= \left(\frac{(n+1)^2}{n(n+2)}\right)^{n+2} \cdot \frac{n}{n+1} \\
&= \left(\frac{n^2 + 2n + 1}{n^2 + 2n}\right)^{n+2} \cdot \frac{n}{n+1} \\
&= \left(1 + \frac{1}{n(n+2)}\right)^{n+2} \cdot \frac{n}{n+1}
\end{aligned}$$

- Bernoulli:  $(1+x)^n > 1+nx$  für  $n \geq 2$  und  $x > -1$

$$\begin{aligned}
\Rightarrow \left(1 + \frac{1}{n(n+2)}\right)^{n+2} &> 1 + (n+2) \cdot \frac{1}{n(n+2)} \\
&= \frac{n+1}{n}
\end{aligned}$$

- $\Rightarrow \frac{f_n}{f_{n+1}} = \left(1 + \frac{1}{n(n+2)}\right)^{n+2} \cdot \frac{n}{n+1} > \frac{n+1}{n} \cdot \frac{n}{n+1} = 1$

- $\frac{f_n}{f_{n+1}} > 1 \Leftrightarrow \frac{f_{n+1}}{f_n} < 1 \Leftrightarrow f_n$  ist streng monoton fallend

Als Letztes zeigt man, dass  $f_n$  zu  $e_n$  eine obere Schranke ist:

$$\begin{aligned}
\left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n+1} &> \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n \\
\Leftrightarrow \frac{\left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n+1}}{f_n} &> e_n
\end{aligned}$$

Eine streng monoton steigende Folge, die eine monoton fallende Folge, als obere Schranke hat, konvergiert. Es gilt also, dass  $e_n$  konvergent ist.  $e_n$  besitzt einen besonderen Grenzwert, der **Eulersche Zahl** genannt wird.

### 5.2.3 $e$ ist irrational

Wie schon erwähnt, handelt es sich bei der Eulerschen Zahl um eine transzendente Zahl, daraus ergibt sich schon, dass sie irrational ist. Trotzdem ist es interessant, dies zu beweisen.

#### Beweis

##### Teil A: unnötig

Sei  $f$  eine Funktion mit  $f(x) = xe^{1-x}$  mit Schaubild  $\mathcal{C}$

##### 1. Monotonieverhalten:

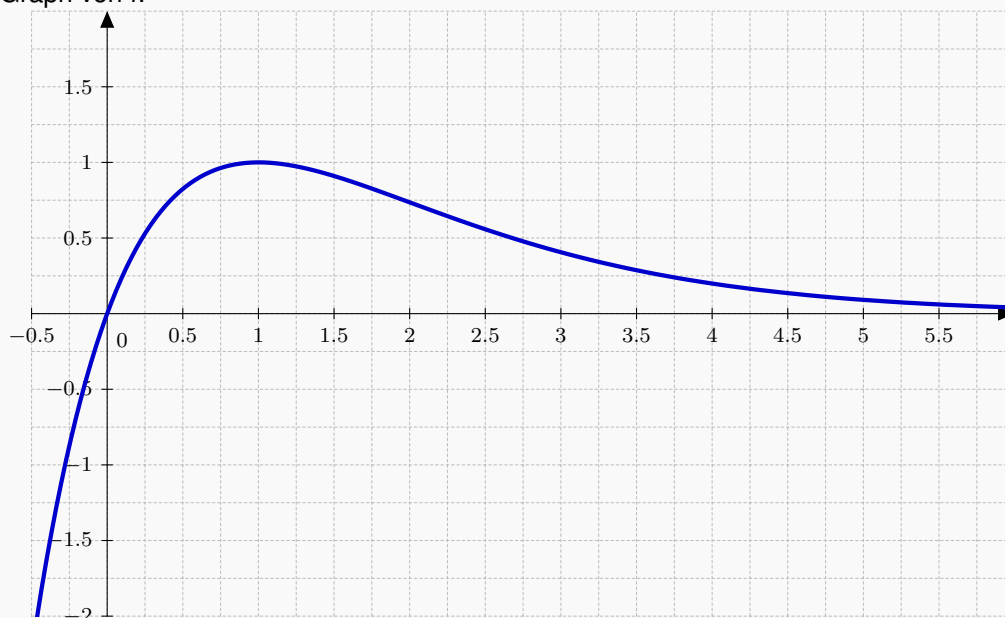
$$\begin{aligned} f'(x) &= e^{1-x} - xe^{1-x} \\ &= (1-x) \cdot e^{1-x} \end{aligned}$$

$$\begin{array}{llll} \forall x < 1: & f'(x) > 0 & & \Leftrightarrow f \nearrow \\ \text{für } x = 1: & f'(x) = 0 & \text{und VZW } + \rightarrow - & \Leftrightarrow \text{Hochpunkt} \\ \forall x > 1: & f'(x) < 0 & & \Leftrightarrow f \searrow \end{array}$$

##### Grenzwerte:

- $\lim_{x \rightarrow +\infty} \underbrace{x}_{\rightarrow +\infty} \underbrace{e^{1-x}}_{\rightarrow 0} = 0$  (Croissance comparée)
- $\lim_{x \rightarrow -\infty} \underbrace{x}_{\rightarrow -\infty} \underbrace{e^{1-x}}_{\rightarrow +\infty} = -\infty$

##### 2. Graph von $f$ :



##### 3. Man hat $I_1$ , das Integral mit $I_1 = \int_0^1 f(x)dx$

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \int_0^1 x e^{1-x} dx \\
 &= [-x e^{1-x}]_0^1 - \int_0^1 -e^{1-x} dx \\
 &= -1 e^{1-1} - 0^1 - [e^{1-x}]_0^1 \\
 &= -1 - 1 + e \\
 &= e - 2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 u(x) &= x & u'(x) &= 1 \\
 v'(x) &= e^{1-x} & v(x) &= -e^{1-x}
 \end{aligned}$$

Teil B:  $n \in \mathbb{N}$

Sei  $I_n$  das Integral mit  $I_n = \int_0^1 x^n e^{1-x} dx$ ,  $n \geq 1$

1. (a)  $\mathbb{Z}$ :  $\forall x \in [0; 1]$  gilt  $x^n \leq x^n e^{1-x} \leq e x^n$

$$\begin{array}{ccccc}
 x^n & \stackrel{?}{\leq} & x^n e^{1-x} & \stackrel{?}{\leq} & e x^n \\
 1 & \stackrel{!}{\leq} & e^{1-x} & \stackrel{!}{\leq} & e
 \end{array} \quad | : x^n$$

N.R.: für  $x \in [0; 1]$  ist  $(1-x) \in [0; 1]$  und entsprechen  $e^{1-x} \in [e^0; e^1] = [1; e]$

(b) Sei  $J_n$  das Integral mit  $J_n = \int_0^1 x^n dx$

$$\begin{aligned}
 J_n &= \int_0^1 x^n dx \\
 &= \left[ \frac{1}{n+1} \cdot x^{n+1} \right]_0^1 \\
 &= \frac{1^{n+1}}{n+1} - \frac{0^{n+1}}{n+1} \\
 &= \frac{1}{n+1}
 \end{aligned}$$

(c)  $\mathbb{Z}$ :  $\forall n \geq 1$  gilt  $\frac{1}{n+1} \leq I_n \leq \frac{e}{n+1}$

$$\begin{aligned}
 x^n &\leq f(x) = x^n e^{1-x} \leq e x^n & | \int_0^1 () dx \\
 \Leftrightarrow \int_0^1 x^n dx &\leq I_n \leq \int_0^1 e x^n dx \\
 \Leftrightarrow J_n &\leq I_n \leq e \cdot \int_0^1 x^n dx = e \cdot J_n \\
 \Leftrightarrow \frac{1}{n+1} &\leq I_n \leq \frac{e}{n+1}
 \end{aligned}$$

2.  $\mathbb{Z}$ :  $\forall n \geq 1$  gilt  $I_{n+1} = (n+1)I_n - 1$

$$\begin{aligned} I_{n+1} &= \int_0^1 x^{n+1} \cdot e^{1-x} dx \\ &= \left[ -e^{1-x} \cdot x^{n+1} \right]_0^1 - \int_0^1 -(n+1)x^n e^x - 1 dx \\ &= -e^{1-1} \cdot 1^{n+1} - 0 + (n+1) \cdot I_n \\ &= (n+1)I_n - 1 \end{aligned}$$
$$\begin{aligned} u(x) &= x^{n+1} & u'(x) &= (n+1)x^n \\ v'(x) &= e^{1-x} & v(x) &= -e^{1-x} \end{aligned}$$

3. Sei  $k_n = n!e - I_n$ ,  $n \geq 1$

(a)

$$\begin{aligned} k_{n+1} &= (n+1)!e - I_{n+1} \\ &= (n+1)n!e - (n+1)I_n + 1 && \text{siehe 2.} \\ &= (n+1)(n!e - I_n) + 1 \\ &= (n+1)k_n + 1 \end{aligned}$$

(b)  $\mathbb{Z}$ :  $\forall n \geq 1$  gilt  $k_n \in \mathbb{Z}$ :

**IA:** für  $n = 1$ :  $k_1 = 1!e - I_1 = e - (e - 2) = 2$  (wahr)

**IV:** für ein beliebiges aber festes  $n \in \mathbb{N}$  gelte:  $k_n \in \mathbb{Z}$

**IB:** dann gelte für  $(n+1)$ :  $k_{n+1} \in \mathbb{Z}$

$$\text{IS: } k_{n+1} = \underbrace{(n+1)}_{\in \mathbb{Z} \text{ da } n \in \mathbb{N}} \underbrace{k_n}_{\in \mathbb{Z} \text{ (IB)}} + \underbrace{1}_{\in \mathbb{Z}} \in \mathbb{Z}$$

(c)  $\mathbb{Z}$ :  $\forall n \geq 2$  gilt  $n!e = k_n + I_n \notin \mathbb{Z}$

$$\text{Wir haben: } \frac{1}{n+1} \leq I_n \leq \frac{e}{n+1} \quad (1.(c))$$

Und es gilt:

- $k_n \in \mathbb{Z}$
- $\forall n \geq 0: \frac{1}{n+1} \geq 0$
- $\forall n \geq 2: n+1 \geq 3 \Rightarrow \frac{1}{n+1} \leq \frac{1}{3}$   
und  $e \leq 3 \Rightarrow \frac{e}{n+1} \leq 1$

$$\Rightarrow \forall n \geq 2: 0 < I_n < 1 \Rightarrow I_n \notin \mathbb{N} \Rightarrow k_n + I_n \notin \mathbb{N} \Rightarrow n!e \notin \mathbb{N}$$

4. Seien  $p, q \in \mathbb{N}$

Dann gilt für  $n \geq q$ :  $\frac{n!p}{q} \in \mathbb{N}$

Das stimmt weil  $n! = n \cdot (n-1) \cdot \dots \cdot (q+1) \cdot q \cdot (q-1) \cdot \dots \cdot 2 \cdot 1 \Rightarrow q$  teilt  $n! \Rightarrow \frac{n!}{q} \in \mathbb{N} \Rightarrow \frac{n!p}{q} \in \mathbb{N}$  da  $p \in \mathbb{N}$

Hypothese:  $e \in \mathbb{Q}$

$$\Rightarrow \exists p, q \in \mathbb{N}, \text{ sodass } e = \frac{p}{q}$$

$$\Rightarrow n!e = \frac{n!p}{q} \in \mathbb{N}$$

Im Voraus wurde aber gezeigt, dass  $n!e \notin \mathbb{N}$ : **Widerspruch**

$$\Leftrightarrow \boxed{e \notin \mathbb{Q}}$$

### 5.3 Eigenschaften

- $f(x) = a^x$
- $a \in \mathbb{R}^+ \setminus 1$
- $D_f = \mathbb{R}$
- $W_f = \mathbb{R}^+$
- für  $0 > a > 1$ :  $f$  ist streng monoton fallend  
für  $a > 1$ :  $f$  ist streng monoton wachsend
- für  $0 > a > 1$ :  $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = -\infty$   
 $\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = 0$   
für  $a > 1$ :  $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 0$   
 $\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = +\infty$
- $f(0) = 1$
- x-Achse ist waagerechte Asymptote

#### Zusammengesetzte Funktionen

Sei  $f(x) = a^x$  mit  $a > 1$  und  $g(x) = x^n$  mit  $n \in \mathbb{R}$ :

- $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) \cdot g(x) = \lim_{x \rightarrow +\infty} a^x \cdot x^n = +\infty$
- $\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) \cdot g(x) = \lim_{x \rightarrow -\infty} a^x \cdot x^n = 0$
- $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{a^x}{x^n} = +\infty$
- $\lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{a^x}{x^n} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{g(x)}{f(x)} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x^n}{a^x} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{g(x)}{f(x)} = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{x^n}{a^x} = \pm\infty$

Croissances comparées

#### Bemerkung:

Diese Grenzwerte gelten auch wenn  $g$  ein Polynom beliebig hohen Grades ist.

Allgemein kann man also sagen, dass eine Exponentialfunktion ihr Wachstum bezüglich dem jedes Polynoms immer durchsetzt.

#### Bemerkung:

⚠ Das Vorzeichen der anderen Funktion(en) muss natürlich immer beachtet werden.

Da die Wertemenge einer Exponentialfunktion immer  $\mathbb{R}^+$  ist, hängt das Vorzeichen ausschließlich von der(den) anderen Funktion(en) ab. Wenn der (höchste) Exponent also eine gerade Zahl ist, dann bleiben die Grenzwerte dieselben (0 oder  $+\infty$ ). Im Falle eines höchsten Exponenten, der ungerade ist, ändert sich dementsprechend das Vorzeichen (0 oder  $-\infty$ ) des Grenzwertes für  $x \rightarrow -\infty$ . Der Grenzwert für  $x \rightarrow +\infty$  bleibt derselbe, selbst wenn der höchste Exponent eine negative Zahl ist.

Für  $f(x) = a^x$  mit  $0 < a < 1$  und  $g(x) = x^n$  mit  $n \in \mathbb{R}$ :

Es gilt weiterhin, dass sich das Wachstum der Exponentialfunktion durchsetzt, anhand dieser Aussage können die Grenzwerte von Funktionen, die Exponentialfunktionen mit Basis  $< 1$  beinhalten, leicht bestimmt werden.

⚠ Auch hier gilt es, auf das Vorzeichen der anderen Funktion(en) zu achten.

## 5.4 Basiswechsel

Seien,  $a, b \in \mathbb{R}^+ \setminus 1$  :

### Theorem

$$a^x = b^{x \cdot \log_b a}$$

### Beweis

$$\begin{aligned} a^x &= (b^{\log_b a})^x \\ &= b^{x \cdot \log_b a} \end{aligned}$$

□

## 5.5 Ableitungsregeln

Anhand der Definition des Differenzialquotienten kann man ermitteln, wie man Exponentialfunktionen ableitet.

### Beweis

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx}(a^x) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{a^{x_0+h} - a^{x_0}}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{a^{x_0} \cdot a^h - a^{x_0}}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} a^{x_0} \cdot \frac{a^h - 1}{h} \\ &= a^{x_0} \cdot \underbrace{\lim_{h \rightarrow 0} \frac{a^h - 1}{h}}_{\text{eine Konstante } \lambda} \end{aligned}$$

□

So erkennen wir, dass die Ableitung einer Funktion  $f$  der Form  $a^x$  diese selbe Funktion mal einem konstanten Vorfaktor  $\lambda$  ist:  $(a^x)' = a^x \cdot \lambda$

Nun versucht man, Weiteres über  $\lambda$  zu erfahren:  $\lambda = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{a^h - 1}{h}$  ist ein Grenzwert, der sich ausschließlich in Abhängigkeit von  $a$  verändert, ist also für jede definierte Funktion eine Konstante.

Wenn man mehrere Graphen der Funktionenschar  $g_a(h) = \frac{a^h - 1}{h}$  zeichnet, erkennt man, dass es sich um stetige Funktionen handelt. Somit kann man behaupten, dass  $\lim_{h \rightarrow 0} g_a(h) = g_a(0)$  ist, dies entspricht auch  $\lambda$ .

GRAPEHN VERSCHIEDEN A AUCH E UND LAMBDA SAGEN

Hier ist auffällig, dass wenn man  $a$  so verändert, dass der y-Achsenschnittpunkt (0|1) wird, man sich immer mehr der Zahl  $e$  nähert. Wenn man für  $a$  genau  $e$  einsetzt hat man  $g_e(0) = 1$ .  $\lambda$  ist also 1 für die Funktion  $e^x$ , was gut zeigt, dass die natürliche Exponentialfunktion ihre eigene Ableitung darstellt:

$$\frac{d}{dx}e^x = \left(\lim_{h \rightarrow 0} \frac{e^h - 1}{h}\right) \cdot e^x = 1 \cdot e^x = e^x$$

Eine wichtige Eigenschaft ist auch, dass  $f'(0) = \lambda$  ist. Dies kann man auf zwei verschiedene aber gleichermaßen einfache Arten herausfinden, beide verwenden die vorher angewendete Definition des Differenzialquotienten.

Differentialquotient neu angewendet:  $f'(0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{a^{0+h} - a^0}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{a^h - 1}{h} = \lambda$

Vorheriges Ergebnis genutzt:  $f'(x) = a^x \cdot \lim_{h \rightarrow 0} \frac{a^h - 1}{h} \Rightarrow f'(0) = a^0 \cdot \lim_{h \rightarrow 0} \frac{a^h - 1}{h} = 1 \cdot \lim_{h \rightarrow 0} \frac{a^h - 1}{h} = \lambda$

$\lambda$  entspricht also auch der Steigung der Tangenten der Ausgangsfunktion an der y-Achse.

### Exponentialfunktionen mit natürlicher Basis

#### Theorem

Die natürliche Exponentialfunktion überstimmt mit ihrer Ableitungsfunktion.

$$f(x) = e^x \Rightarrow f' = e^x$$

#### Theorem

Die Funktion  $f$  mit  $f(x) = e^{v(x)}$  ist eine Verkettung der Funktion  $v : x \rightarrow v(x)$  mit der Exponentialfunktion  $u : v \rightarrow e^v$ . Existiert die Ableitung  $v'$ , so gilt nach der Kettenregel

$$f'(x) = v'(x) \cdot e^{v(x)}$$

#### Bemerkung:

Letzteres kann natürlich auch verwendet werden, um eine Stammfunktion zu ermitteln.

Die Funktion  $f$  mit  $f(x) = e^{v(x)}$  mit  $v$  differenzierbar hat als mögliche Stammfunktion  $F$  mit

$$F(x) = \frac{1}{v'(x)} \cdot e^{v(x)} + C$$

#### Beispiel:

1.  $f(x) = \frac{2}{3} \cdot e^{-\frac{1}{2}x^2+1}$   
 $\Rightarrow f'(x) = \frac{2}{3} \cdot (-x) \cdot e^{\frac{1}{2}x^2+1} = -\frac{2}{3}x \cdot e^{-\frac{1}{2}x^2+1}$   
 $\Rightarrow F(x) = \frac{2}{3} : (-x) \cdot e^{\frac{1}{2}x^2+1} + C = -\frac{2}{3x} \cdot e^{\frac{1}{2}x^2+1} + C$
2.  $f(t) = \frac{\sin(tx)}{e^{tx}}$   
 $\Rightarrow f'(x) = \frac{t \cdot \cos(tx) \cdot e^{tx} - \sin(tx) \cdot t \cdot e^{tx}}{(e^{tx})^2} = \frac{t \cdot e^{tx} \cdot (\cos(tx) - \sin(tx))}{(e^{tx})^2} = \frac{t \cdot (\cos(tx) - \sin(tx))}{e^{tx}}$
3.  $f(x) = x \cdot e^{t\sqrt{x}+0,5}$   
 $\Rightarrow f'(x) = e^{t\sqrt{x}+0,5} + x \cdot \left(-\frac{t}{\sqrt{x}}\right) \cdot e^{t\sqrt{x}+0,5} = (1 - t\sqrt{x}) \cdot e^{t\sqrt{x}+0,5}$

### Exponentialfunktionen mit beliebiger Basis

Der vorher erwähnte Wert  $\lambda$  ist für beliebige Basen schwierig festzulegen. Viel einfacher geht es nach einem Basiswechsel. Wenn man nämlich  $e$  als Grundzahl wählt, kann wiederum die Ableitungsregel für Funktionen mit natürlicher Basis angewendet werden, so wurde das Problem umgangen.

#### Theorem

Sei  $f$  eine Funktion mit  $f(x) = a^x$ ,  $a \in \mathbb{R}^+ \setminus 1$ . dann ist ihre Ableitungsfunktion  $f'$ , für die gilt:

$$f'(x) = \ln(a) \cdot a^x$$



## Beweis

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dx}(a^x) &= \frac{d}{dx}(e^{x \cdot \ln(a)}) \\
 &= (x \cdot \ln(a))' \cdot e^{x \cdot \ln(a)} \\
 &= \ln(a) \cdot e^{x \cdot \ln a} \\
 &= \ln(a) \cdot a^x
 \end{aligned}$$

Basiswechsel und Kettenregel anwenden

Ableiten ( $\ln a$  ist eine Konstante)

Auf ursprüngliche Basis bringen

□

Dasselbe Prinzip kann auch für verkettete Funktionen angewendet werden.

## Theorem

Die Funktion  $f$  mit  $f(x) = a^{v(x)}$ ,  $a \in \mathbb{R}^+ \setminus 1$  ist eine Verkettung der Funktion  $v : x \rightarrow v(x)$  mit der Exponentialfunktion  $u : v \rightarrow a^v$ . Existiert die Ableitung  $v'$ , so gilt nach der Kettenregel

$$f'(x) = v'(x) \cdot \ln(a) \cdot a^{v(x)}$$

## Beweis

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dx}(a^{v(x)}) &= \frac{d}{dx}(e^{v(x) \cdot \ln(a)}) \\
 &= (v(x) \cdot \ln(a))' \cdot e^{v(x) \cdot \ln(a)} \\
 &= v'(x) \cdot \ln(a) \cdot e^{v(x) \cdot \ln a} \\
 &= v'(x) \cdot \ln(a) \cdot a^{v(x)}
 \end{aligned}$$

Basiswechsel und Kettenregel anwenden

Ableiten ( $\ln a$  ist eine Konstante)

Auf ursprüngliche Basis bringen

□

## 5.5.1 Aktivität

Quelle: Déclic 1ère????? ich weiß nicht ob ich das noch mache

## LOGARITHMEN

by CLARA

### Definition

Der Logarithmus einer Zahl ist der Exponent, mit dem die Basis des Logarithmus' potenziert werden muss, um die gegebene Zahl zu erhalten. Logarithmen sind nur für positive reelle Zahlen definiert, die Basis muss positiv und ungleich 1 sein

$$\log_b a = x \Leftrightarrow b^x = a$$

### Definition

Man bezeichnet als Logarithmusfunktion eine Funktion der Form  $x \rightarrow \log_b x$  mit  $b \in \mathbb{R}^+ \setminus 1$   
 $x$  ist die Variable und wird *Argument* oder *Numerus* genannt, Logarithmusfunktionen sind nur für positive, reelle Zahlen definiert:  $x \in \mathbb{R}^+$   
 $b$  nennt man *Basis* oder *Grundzahl*, sie ist für jede Funktion fest vorgegeben.

Hier Graphen

### Besondere Logarithmen

Logarithmus naturalis	:	$\ln a$	:=	$\log_e a$
Logarithmus dualis	:	$\lg a$	:=	$\log_2 a$
Dekadischer Logarithmus	:	$\lg a$	:=	$\log_{10} a$

## 6.1 Eigenschaften

- $f(x) = \log_b x$
- $b \in \mathbb{R}^+ \setminus 1$
- $D_f = \mathbb{R}^+$
- $W_f = \mathbb{R}$
- für  $0 < b < 1$ :  $f$  ist streng monoton wachsend  
für  $b > 1$ :  $f$  ist streng monoton fallend
- für  $0 < b < 1$ :  $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = -\infty$   
 $\lim_{x \rightarrow 0} f(x) = +\infty$   
für  $b > 1$ :  $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = +\infty$   
 $\lim_{x \rightarrow 0} f(x) = -\infty$
- $f(1) = 0$
- y-Achse ist senkrechte Asymptote

## 6.2 Rechengesetze

Aus den Potenzgesetzen kann man die Logarithmussätze erhalten.

### Theorem

Seien  $a, b, c \in \mathbb{R}^+$  und  $n \in \mathbb{N}$

$\log_c(a \cdot b)$	$=$	$\log_c a + \log_c b$	Produktregel
$\log_c\left(\frac{a}{b}\right)$	$=$	$\log_c a - \log_c b$	Quotientenregel
$\log_c a^n$	$=$	$n \cdot \log_c a$	1. Potenzregel
$\log_c \sqrt[n]{a}$	$=$	$\frac{1}{n} \cdot \log_c a$	2. Potenzregel

### Bemerkung:

Die zweite Potenzregel ist nur ein Sonderfall der ersten, da  $\sqrt[n]{a} = a^{\frac{1}{n}}$

## 6.3 Gleichungen lösen

## 6.4 Logarithmusfunktionen

### 6.4.1 Ableitungsregeln

### 6.4.2 Funktionsuntersuchungsbeispiel

### 7.1 Einführung - Stammfunktionen

#### Definition

Sei  $f$  eine Funktion, die über einem Intervall  $I \in \mathbb{R}$  definiert ist. Man nennt jede Funktion  $F$ , die auf  $I$  differenzierbar ist, für die gilt  $F'(x) = f(x), \forall x \in I$  eine *Stammfunktion* von  $f$ .

Ist  $F$  irgendeine Stammfunktion von  $f$ , dann ist auch  $F(x) + C$  (mit konstantem  $C$ ) eine Stammfunktion, denn beim Ableiten fällt  $C$  als konstanter Summand weg. Jede Funktion hat also unendlich viele Stammfunktionen, die sich aber nur um einen konstanten Summanden unterscheiden.

#### Theorem

Jede auf  $I$  stetige Funktion besitzt eine Stammfunktion über  $I$ .

### 7.2 Bestimmte Integrale

#### Definition

Sei  $f$  eine auf einem Intervall  $I$  stetige Funktion und zwei reelle Zahlen  $a, b \in I$ . Die reelle Zahl, dargestellt durch  $\int_a^b f(t)dt$  und gegeben durch  $F(b) - F(a)$ , mit  $F$  als beliebige Stammfunktion von  $f$ , wird *bestimmtes Integral* von  $a$  bis  $b$  von  $f$  genannt. Eine weitere Darstellungsmöglichkeit des bestimmten Integrals sieht folgendermaßen aus:

$$\begin{aligned}\int_a^b f(x)dx &= \lim_{n \rightarrow \infty} U_n = \lim_{n \rightarrow \infty} s_n \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} O_n = \lim_{n \rightarrow \infty} S_n \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{b-a}{n} \sum_{k=1}^n f\left(\frac{b-a}{n} \cdot k\right)\end{aligned}$$

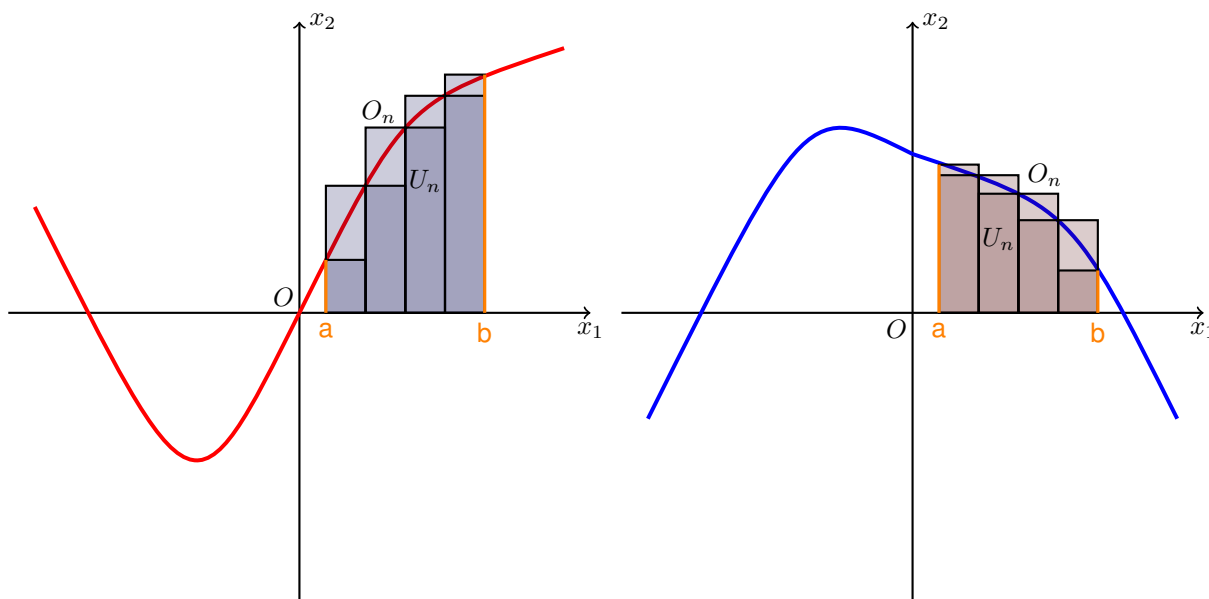
$S_n$  und  $O_n$  bezeichnen die Obersumme, wohingegen  $s_n$  und  $U_n$  die Untersumme bezeichnen.

#### Bemerkung:

Der Hauptunterschied zwischen einem bestimmten und einem unbestimmten Integral ist die Existenz (bestimmtes Integral) bzw. das Fehlen (unbestimmtes Integral) der Integrationsgrenzen.

Bei einem bestimmten Integral ist die Lösung ein Flächeninhalt, also ein einfacher Zahlenwert.

Bei einem unbestimmten Integral erhält man als Lösung eine (wie soeben eingeführte) Stammfunktion.



#### Bemerkung:

$a$  und  $b$  bezeichnen jeweils die untere und obere Grenze des zu berechnenden Integrals. Sie bezeichnen anschaulich die  $x$ -Werte, zwischen denen die Fläche berechnet wird. Tatsächlich ist die geometrische Interpretation von  $\int_a^b f(t)dt$  die Fläche zwischen dem Schaubild der Funktion und der  $x_1$ -Achse, die durch die Geraden  $x = a$  und  $x = b$  begrenzt wird.

#### Theorem

Für eine auf einem Intervall  $I$  stetige Funktion  $f$  und einer reellen Zahl  $a \in I$  gilt: Die Funktion, die über  $I$  definiert ist durch  $x \mapsto \int_a^x f(t)dt$ , ist die Stammfunktion von  $f$ , die bei  $a$  gleich 0 ist.

Aus diesen Sätzen stellt sich der **Hauptsatz der Differenzial- und Integralrechnung** zusammen. Wir beschränken uns in diesem Kapitel auf die Integralrechnung, da die Differentialrechnung bereits in Kapitel 3 behandelt wird.

#### Bemerkung:

Man beobachtet hier eine Erweiterung der NEW-Regel (siehe 3.4.8, NEW-Regel):

N = Nullstellen  
E = Extremstellen  
W = Wendestellen

$F$	$N$	$E$	$W$
$f$		$N$	$E$
$f'$			$N$

## 7.3 Sätze über Integrale

#### Theorem

$\int_a^b f(x)dx = -\int_b^a f(x)dx$	Invertieren der Integrationsgrenzen
$\int_a^b (f(x) + g(x))dx = \int_a^b f(x)dx + \int_a^b g(x)dx$	Summenregel
$\int_a^b r * f(x)dx = r * \int_a^b f(x)dx$	Linearität
$\int_a^b f(x)dx + \int_b^c f(x)dx = \int_a^c f(x)dx$	Abschnittweise Integration

## Beweis - Invertieren der Integrationsgrenzen

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

□

## Beweis - Summenregel

$$\begin{aligned}\int_a^b f(x) + g(x)dx &= [F(x) + G(x)]_a^b = F(b) + G(b) - (F(a) + G(a)) = F(b) - F(a) + G(b) - G(a) \\ &= \int_a^b f(x)dx + \int_a^b g(x)dx\end{aligned}$$

□

## Beweis - Linearität

$$\int_a^b r * f(x)dx = [r * F(x)]_a^b = r * F(b) - r * F(a) = r * (F(b) - F(a)) = r * \int_a^b f(x)dx$$

□

## Beweis - Abschnittweise Integration

$$\int_a^b f(x)dx + \int_b^c f(x)dx = F(b) - F(a) + (F(c) - F(b)) = F(c) - F(a) = \int_a^c f(x)dx$$

□

## Theorem

Sei eine in  $[a; b]$  stetige Funktion  $f$ . Wenn für  $m, M \in \mathbb{R}$  gilt:  $m \leq f(t) \leq M \forall t \in [a; b]$ , dann gilt:

$$m(b-a) \leq \int_a^b f(t)dt \leq M(b-a)$$

## Beweis

Es reicht,  $m \leq f(t) \leq M$  als Ungleichung zwischen  $a$  und  $b$  zu integrieren.

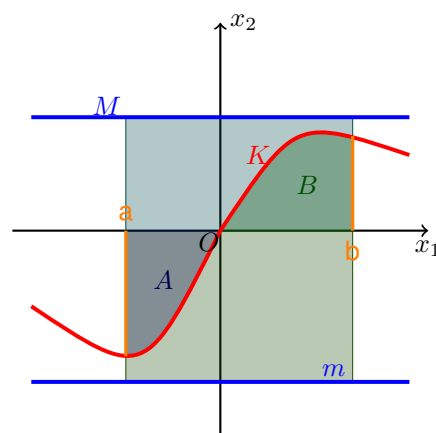
□

## Bemerkung:

Eine Konsequenz davon ist, dass falls  $|f(t)| \leq M \forall t \in [a; b]$ , dann gilt:

$$\left| \int_a^b f(t)dt \right| \leq M(b-a)$$

Außerdem:



**Definition**

Für eine auf  $[a; b]$  stetige Funktion  $f$  mit  $a \neq b$  gilt: Der Mittelwert von  $f$  auf  $[a; b]$  ist gegeben durch

$$\mu = \frac{1}{b-a} \int_a^b f(t) dt$$

## 7.4 Integrationsregeln und -techniken

### 7.4.1 Potenzregel

Hoffentlich einleuchtend und selbstverständlich:

**Theorem**

$$\forall n \in \mathbb{Z} \setminus \{-1\} : \int x^n dx = \frac{1}{n+1} x^{n+1} + C$$

Bemerkung:

Die einzige Ausnahme stellt der Fall  $n = -1$  dar:

**Theorem**

$$\int \frac{1}{x} dx = \ln(|x|) + C$$

Eine Konsequenz dessen ist:

**Theorem**

$$\int \frac{a}{bx+c} dx = \frac{a}{b} \ln(|bx+c|) + C$$

**Beweis**

$$\left( \frac{a}{b} \ln(|bx+c|) \right)' = \frac{a}{b} \cdot \frac{1}{bx+c} \cdot b = \frac{a}{bx+c}$$

□

### 7.4.2 Partielle Integration

**Theorem**

Seien  $u$  und  $v$  zwei stetig differenzierbare Funktionen auf dem Intervall  $I$ . Dann gilt:

$$\int u(x)' v(x) dx = u(x)v(x) - \int u(x)v'(x) dx$$

## Beweis

$$\begin{aligned}
& (u(x) * v(x))' = u'(x)v(x) + u(x)v'(x) \\
\Rightarrow & \int (u(x) * v(x))' dx = \int u'(x)v(x) dx + \int u(x)v'(x) dx \\
\Leftrightarrow & u(x) * v(x) = \int u'(x)v(x) dx + \int u(x)v'(x) dx \\
\Leftrightarrow & \int u(x)v'(x) dx = u(x) * v(x) - \int u'(x)v(x) dx
\end{aligned}$$

□

Beispiel:

$$\begin{aligned}
\int x \sin(x) dx & \quad \text{Mit } u(x) = x; u'(x) = 1; v(x) = \sin(x); v'(x) = -\cos(x) \\
& = \int x(-\cos(x))' dx \\
& = -x \cos(x) - \int -\cos(x) * 1 dx \\
& = -x \cos(x) + \int \cos(x) dx \\
& = -x \cos(x) + \sin(x)
\end{aligned}$$

**7.4.3 Substitution****Theorem**

Sei  $f$  eine auf  $[a; b]$  stetige Funktion und  $g$  eine auf diesem Intervall differenzierbare Funktion mit stetiger Ableitung  $g'$ . Wenn die Verkettung  $f \circ g$  existiert, gilt:

$$\int_a^b f(g(x)) \cdot g'(x) dx = \int_{g(a)}^{g(b)} f(z) dz$$

Eine abgespeckte Variante dieses Theorems, genannt lineare Substitution ist gegeben durch:

**Theorem**

Für eine Funktion  $f$  mit einer Stammfunktion  $F$  und  $r \neq 0$  gilt:

$$\int_a^b f(rx + s) dx = \frac{1}{r} [F(rx + s)]_a^b + C$$

Beispiel:

Zu berechnen:

$$\int_0^4 \frac{x\sqrt{x}}{1+x^2\sqrt{x}} dx$$



**Substitution:**

$$g(x) = x^2\sqrt{x} \quad (\text{alternativ: } g(x) = x^2\sqrt{x} + 1)$$

$$\frac{dg}{dx} = (x^2\sqrt{x})'$$

$$= \frac{5}{2} \cdot x\sqrt{x}$$

$$\left( \Leftrightarrow dx = \frac{2}{5x\sqrt{x}} dg \Rightarrow \int_0^4 \frac{x\sqrt{x}}{1+x^2\sqrt{x}} dx = \int_{g(0)}^{g(4)} \frac{\cancel{x\sqrt{x}}}{1+g} \cdot \frac{2}{5\cancel{x\sqrt{x}}} dg \right)$$

**Berechnung des Integrals:**

$$\begin{aligned} \int_0^4 \frac{x\sqrt{x}}{1+x^2\sqrt{x}} dx &= \int_0^4 f(g(x)) \cdot g'(x) dx && \text{mit } f(x) = \frac{2}{5} \cdot \frac{1}{1+x} \text{ und } g(x) = x^2\sqrt{x} \\ &= \int_{g(0)}^{g(4)} \frac{2}{5} \cdot \frac{1}{1+z} dz \\ &= \frac{2}{5} \cdot \int_{0^2 \cdot \sqrt{0}}^{4^2 \cdot \sqrt{4}} \frac{1}{1+z} dz \\ &= \frac{2}{5} \cdot [\ln(|1+z|)]_0^{32} \\ &= \frac{2}{5} \cdot \ln(33) \end{aligned}$$

**7.4.4 Substitution der Integrationsvariablen****Theorem**

Sei  $f$  eine auf  $[a; b]$  stetige Funktion und  $g$  eine auf diesem Intervall differenzierbare und umkehrbare Funktion mit stetiger Ableitungsfunktion  $g'$ . Wenn die Verkettung  $f \circ g$  existiert, gilt:

$$\int_a^b f(x) dx = \int_{\bar{g}(a)}^{\bar{g}(b)} f(g(t)) \cdot g'(t) dt$$

**7.4.5 Integrale von  $e$ -Funktionen****Theorem**

Für  $f(x) = e^{l(x)}$  mit  $l(x) = ax + b$  gilt:  $F(x) = \frac{1}{a} e^{l(x)}$

**Beweis**

Man bilde  $F'(x)$ . □

**7.4.6 Integrale von  $\ln()$ -Funktionen**

Es handelt sich hierbei streng genommen auch um eine Substitution:

**Theorem**

Für  $x \in \mathbb{R}^+$  ist  $F$  eine Stammfunktion zur Funktion  $f(x) = \ln(x)$  mit  $F(x) = x \ln(x) - x$

**Beweis**

Der Beweis erfolgt über partielle Integration und wird dem Schüler als Übung überlassen. □

### 7.4.7 Integrale von (un)geraden Funktionen

#### Theorem

Sei  $f$  eine auf einem Intervall  $I$  stetige und auf 0 zentrierte Funktion. Wenn  $f$  gerade ist, gilt  $\forall a \in \mathbb{R}$ :  $\int_{-a}^a f(t)dt = 2 \int_0^a f(t)dt$ , und wenn  $f$  ungerade ist:  $\int_{-a}^a f(t)dt = 0$

#### Beweis

Sei die Funktion  $\varphi(x) = \int_{-x}^x f(t)dt = F(x) - F(-x)$  mit  $F$ , einer Stammfunktion von  $f$ . Also ist  $\varphi$  auf  $I = [-x; x]$  differenzierbar und  $\varphi'(x) = F'(x) - F'(-x) = f(x) + f(-x)$ .

- Wenn  $f$  auf  $I$  ungerade ist, gilt:  $f(x) = -f(-x) \Rightarrow \varphi'(x) = 0$  und somit konstant. Deshalb gilt  $\varphi(x) = \varphi'(x) = 0$  auf  $I$ , was  $\int_{-a}^a f(t)dt = 0$  beweist.
- Wenn  $f$  gerade ist, gilt:  $f(x) = f(-x) \Rightarrow \varphi'(x) = 2f(x)$ . Also gilt für  $\varphi(x) = \int_0^x 2f(t)dt$ , einer Stammfunktion von  $2f(x)$ ,  $\varphi(0) = 0$ , was  $\int_{-a}^a f(t)dt = 2 \int_0^a f(t)dt$  beweist.

□

### 7.4.8 Integrale von periodischen Funktionen

#### Theorem

Für jede in  $\mathbb{R}$  stetige und periodische Funktion  $f$  gilt:

$$\int_a^{a+T} f(x)dx \text{ ist unabhängig von } a \text{ und } \int_a^{a+T} f(x)dx = \int_0^T f(x)dx$$

#### Beweis

Sei die Funktion  $\varphi = \int_x^{x+T} f(t)dt = F(x+T) - F(x)$  mit  $F$ , einer Stammfunktion von  $f$ . Dann ist  $\varphi(x)$  auf  $f$  differenzierbar und  $\varphi'(x) = F'(x+T) - F'(x) = f(x+T) - f(x) = 0$  (denn  $f$  hat die Periode  $T$ ). Also ist  $\varphi(x)$  auf  $\mathbb{R}$  konstant. Daraus folgt, dass  $\int_a^{a+T} f(t)dt$  nicht von  $a$  abhängt und dass

$$\int_a^{a+T} f(x)dx = \int_0^T f(x)dx.$$

□

## 7.5 Flächen und Volumen mit Integralen berechnen

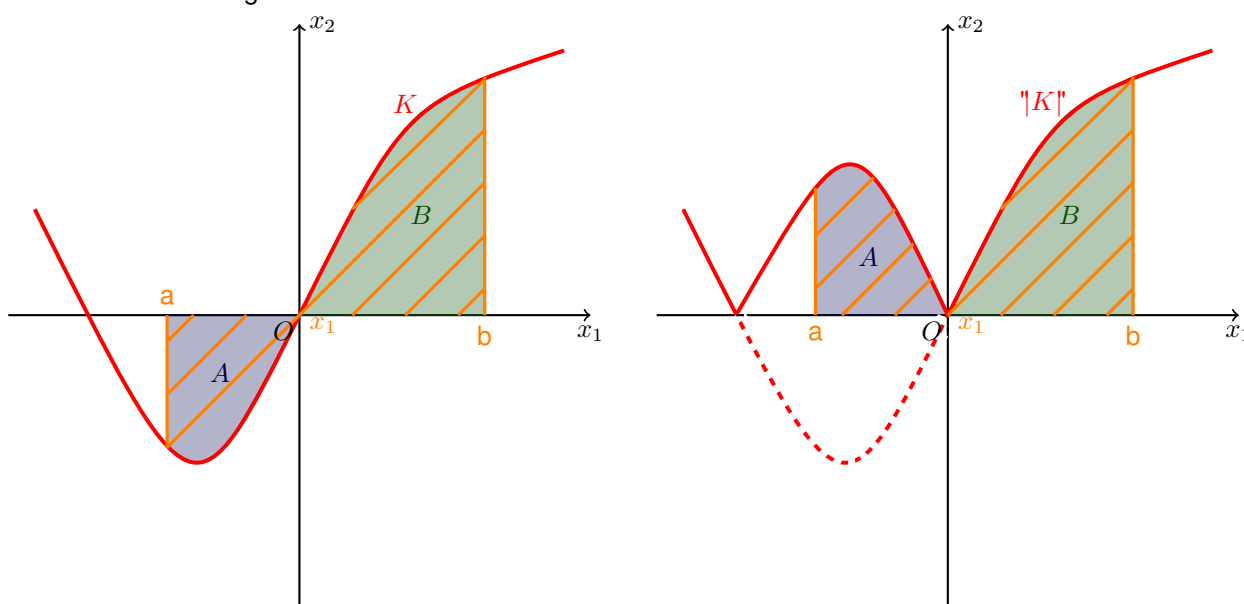
### 7.5.1 Fläche zwischen einer Funktion und der $x_1$ -Achse

#### Definition

Für die auf dem Intervall  $[a; b]$  (also stückweise) stetige Funktion  $f$  mit Nullstellen und  $x_1, x_2, \dots, x_n$  mit  $a \leq x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n \leq b$  ist der Flächeninhalt  $A$  zwischen dem Graphen von  $f$  und der  $x_1$ -Achse im Intervall  $[a; b]$  gegeben durch:

$$\begin{aligned} A &= \left| \int_a^{x_1} f(x) dx \right| + \left| \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx \right| + \dots + \left| \int_{x_{n-1}}^{x_n} f(x) dx \right| + \left| \int_{x_n}^b f(x) dx \right| \\ &= \left| \int_a^b f(x) dx \right| \end{aligned}$$

Bildhaft sieht das folgendermaßen aus:



$$C = A + B$$

$$= \left| \int_a^{x_1} f(x) dx \right| + \left| \int_{x_1}^b f(x) dx \right|$$

$$C = A + B$$

$$\begin{aligned} &= \int_a^{x_1} f(x) dx + \int_{x_1}^b f(x) dx \\ &= \int_a^b f(x) dx \end{aligned}$$

Beispiel:

$$f(x) = x^2 - 2x^3; x \in \mathbb{R}$$

notwendige und hinreichende Bedingung für Nullstellen:  $f(x) = 0$

$$\Leftrightarrow x^2(1 - 2x) = 0$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} x^2 = 0 \\ 1 - 2x = 0 \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} x_1 = 0 \\ x_2 = \frac{1}{2} \end{cases}$$

Also gilt:

$$\begin{aligned}
A_{-1}^1 &= \left| \int_{-1}^0 x^2 - 2x^3 dx \right| + \left| \int_0^{0.5} x^2 - 2x^3 dx \right| + \left| \int_{0.5}^1 x^2 - 2x^3 dx \right| \\
&= \left| \left[ \frac{1}{3}x^3 - \frac{1}{2}x^4 \right]_{-1}^0 \right| + \left| \left[ \frac{1}{3}x^3 - \frac{1}{2}x^4 \right]_0^{0.5} \right| + \left| \left[ \frac{1}{3}x^3 - \frac{1}{2}x^4 \right]_{0.5}^1 \right| \\
&= \left| 0 - \left( -\frac{1}{3} - \frac{1}{2} \right) \right| + \left| \frac{1}{24} - \frac{1}{32} - 0 \right| + \left| \frac{1}{3} - \frac{1}{2} - \left( \frac{1}{24} - \frac{1}{32} \right) \right| \\
&= 1 + \frac{1}{12} - \frac{1}{16} \\
&= \frac{49}{48} \text{ FE}
\end{aligned}$$

**GTR-Tipp:**

Mit  $Y_1 = f(x)$  und  $Y_2 = \text{abs}(Y_1)$  bzw.  $Y_2 = |Y_1|$  (zu finden in MATH > NUM oder über F2, also ALPHA+WINDOW) lässt sich die Fläche berechnen über MATH > MATH mit der Option `fnInt`. Hierzu wählt man  $Y_2$  aus und gibt  $a$  und  $b$  an.

**7.5.2 Fläche zwischen zwei Funktionen****Theorem**

Für zwei auf  $[a; b]$  stetige Funktionen  $f$  und  $g$  gilt: Die Fläche zwischen ihren Schaubildern  $C_f$  und  $C_g$  ist gegeben durch:  $\int_a^b (g(x) - f(x)) dx$ .

**7.5.3 Volumenangaben mittels Integralen****Theorem**

Man betrachtet einen Körper, der durch zwei parallele Ebenen mit den Gleichungen  $x_3 = a$  und  $x_3 = b$  begrenzt wird. Für alle  $a \leq z \leq b$  nennt man  $P_z$  die zur  $x_1$ -Achse orthogonale Fläche mit der Seite  $z$  und  $S(z)$  die Fläche des Schnitts des Körpers durch  $P_z$ . Ist  $S$  stetig, so ist das Volumen  $V$  des Körpers gegeben durch:

$$V = \int_a^b S(z) dz$$

**Bemerkung:**

Analog zur Unterteilung einer Fläche in kleine Balken, kann man ein Volumen in kleine Scheiben unterteilen.

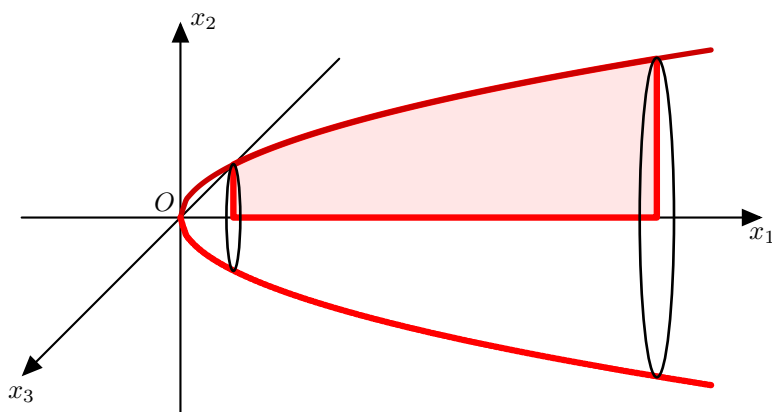
**Bemerkung:**

Dieses Theorem nehmen wir hin, ohne es zu beweisen, uns geht es ohnehin um die Schlussfolgerungen, die wir daraus ziehen können:

**Theorem**

Ein Körper, der durch die Rotation der Kurve von  $f$  um die  $x_1$ -Achse entsteht, hat ein Volumen von  $\pi \int_a^b f^2(z) dz$ .

Tatsächlich ist die Fläche eines zur  $x_3$ -Achse parallelen Querschnitts die der Scheibe mit Radius  $f(z)$ .



## 7.6 Uneigentliche Integrale

### Definition

Ist die Funktion  $f$  auf  $[a; +\infty)$  stetig und existiert der Grenzwert  $\lim_{Z \rightarrow \infty} \int_a^Z f(x) dx$ , so heißt dieser Grenzwert *uneigentliches Integral* von  $f$  über  $[a; +\infty)$ .

Schreibweise:  $\int_a^{+\infty} f(x) dx$

Analog dazu spricht man von einem uneigentlichen Integral für  $\int_{-\infty}^b f(x) dx$

### Beispiel:

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

$$A(z) = \int_z^{-2} \frac{-3}{x^3} dx = \left[ \frac{3}{2} x^{-2} \right]_z^{-2} = \frac{3}{8} - \frac{3}{2} z^{-2}$$

$$\lim_{z \rightarrow -\infty} \frac{3}{8} - \frac{3}{2} z^{-2} = \frac{3}{8}$$

$\Rightarrow$  Das uneigentliche Integral hat den Wert  $\frac{3}{8}$ .

### Beispiel:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{x}}$$

$$A(z) = \int_z^Z \frac{1}{\sqrt{x}} dx = [2\sqrt{x}]_z^Z = 2\sqrt{Z} - 2$$

$$\lim_{Z \rightarrow \infty} 2\sqrt{Z} - 2 = \infty$$

$\Rightarrow$  Das uneigentliche Integral existiert nicht.

### Definition

Ist die Funktion  $f$  auf  $(a; b]$  stetig und existiert der Grenzwert  $\lim_{Z \rightarrow a} \int_Z^b f(x) dx$ , so heißt dieser Grenzwert *uneigentliches Integral* von  $f$  über  $(a; b]$ .

Schreibweise:  $\int_a^b f(x) dx$

Analog dazu spricht man von einem uneigentlichen Integral für  $\int_c^a f(x) dx$

### Bemerkung:

Diese Berechnung ergibt nur dann Sinn, wenn bei  $a$  eine Definitionslücke vorliegt.

## 7.7 Merkwürdige Integrale

Hier eine (möglicherweise unvollständige) rückblickende Liste mit Integralen, die insbesondere zum Abitur beherrscht werden sollten.

Diese sollten ohne weitere Rechtfertigung oder Beweis verwendet werden dürfen. (Diese Angabe ist ohne Gewähr)

$$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} + C$$

$$\int \frac{1}{x} dx = \ln(|x|) + C$$

$$\int \sin x dx = -\cos x + C$$

$$\int \cos x dx = \sin x + C$$

$$\int \frac{1}{\cos^2 x} dx = \tan x + C$$

$$\int \frac{1}{\sqrt{x}} dx = 2\sqrt{x} + C$$

$$\int \frac{u'(x)}{u(x)} dx = \ln(|u(x)|) + C$$

$$\int e^{ax+b} dx = \frac{1}{a} e^{ax+b} + C$$

⚠ Definitionsmengen sind zu beachten.

# VEKTORIELLE GEOMETRIE

by PASCAL

## 8.1 Vektoren

### Definition

Ein Vektor ist Element eines Vektorraums.

Vektorräume, wir erinnern uns zurück. Verknüpfungen, inverse Elemente und die dazugehörigen Gesetze, konsequente Definitionen und mathematische Korrektheit, die guten alten Zeiten...  
Tatsächlich kann ein Vektor in den meisten Fällen als Verschiebung bezeichnet werden, **nicht aber als Pfeil oder Strich!**

### 8.1.1 Besondere Vektoren

#### Definition - Der Ortsvektor

Der Vektor von  $O$  auf den Punkt  $P$ , geschrieben als  $\overrightarrow{OP}$  oder  $\vec{p}$ .

Hat  $P$  die Koordinaten  $(P_1|P_2|\dots|P_n)$ , so besitzt  $\vec{p}$  die Darstellung  $\begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \\ P_n \end{pmatrix}$ .

#### Definition - Der Nullvektor

Der Vektor mit Wert  $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix}$ , er hat keine und alle Richtungen zugleich.

#### Bemerkung:

Er ist somit das neutrale Element der Vektoraddition.

#### Definition - Der Verbindungsvektor

Der Vektor  $\overrightarrow{AB}$  ist der Vektor, der den Punkt  $A$  auf den Punkt  $B$  abbildet. Er ist definiert als:  
 $\overrightarrow{AB} = \overrightarrow{OB} - \overrightarrow{OA}$ , woraus folgt, dass:

$$\overrightarrow{AB} = \begin{pmatrix} b_1 - a_1 \\ b_2 - a_2 \\ \dots \\ b_n - a_n \end{pmatrix}.$$

#### Definition - Der Gegenvektor

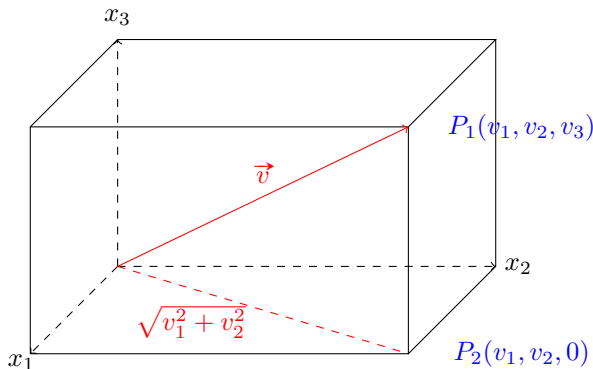
Der Gegenvektor zu  $\overrightarrow{AB}$  ist  $\overrightarrow{BA}$ , definiert als  $-\overrightarrow{AB}$ .

Bemerkung:

Er ist somit das inverse Element der Vektoraddition.

Bemerkung:**Definition - Norm eines Vektors**

Die Norm eines Vektors ist anschaulich als seine Länge zu interpretieren. Der Betrag, wie sie ebenfalls genannt wird, eines Vektors  $\vec{v}$  ist folgendermaßen definiert:  $|\vec{v}| = \sqrt{\sum_{i=1}^n v_i^2}$ ;  $\vec{v} \in \mathbb{R}^n$ .



Anhand dieser Graphik lässt sich die Berechnung der Norm eines Vektors  $\vec{v} \in \mathbb{R}^3$  verdeutlichen. Für diesen gilt:  $|\vec{v}| = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2}$ .

**Definition - Der Einheitsvektor**

Ein Vektor, dessen Norm 1 beträgt wird als normiert oder Einheitsvektor bezeichnet. Für jeden Vektor  $\vec{v} \in \mathbb{R}^3$  existiert ein Einheitsvektor  $\vec{v}^*$ , der folgendermaßen definiert wird:  $\vec{v}^* = \frac{1}{|\vec{v}|} \cdot \vec{v}$ .

## 8.2 Basen und Erzeugendensystem

**Definition**

Eine endliche Anzahl von Vektoren  $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \dots, \vec{a}_n \in V$  heißt Erzeugendensystem, wenn sich jeder Vektor  $\vec{v} \in V$  als Linearkombination dieser Vektoren schreiben lässt. Um ein Erzeugendensystem zu bilden benötigt man mindestens die Anzahl Vektoren, die der Anzahl von Dimensionen von  $\vec{v}$  entspricht. Wenn man **genau** diese Anzahl besitzt, spricht man von einer Basis.

### 8.2.1 Besondere Basen

**Definition - Orthogonalbasis**

Sind die Vektoren der Basis paarweise orthogonal zueinander, so spricht man von einer **Orthogonalbasis**.

**Definition - Orthonormalbasis**

Sind die Vektoren zusätzlich zu dieser Bedingung normiert, wird sie als **Orthonormalbasis** bezeichnet.

Die einfachste und meist benutzte Basis des  $\mathbb{R}^3$  besteht aus den drei Vektoren  $\vec{e}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{e}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{e}_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ . Sie wird als **Standardbasis** des  $\mathbb{R}^3$  bezeichnet. Vektoren wie  $\vec{v} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 8 \end{pmatrix}$  lassen sich als eine Linearkombination der drei Vektoren der Standardbasis darstellen:  $\vec{v} = 2 \cdot \vec{e}_1 + 3 \cdot \vec{e}_2 + 8 \cdot \vec{e}_3$ .



## 8.2.2 Basistransformation

Bilden die Vektoren  $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \dots, \vec{a}_n$  eine Basis des  $n$ -dimensionalen Vektorraums  $V$  und sei der Vektor  $\vec{v} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \dots \\ v_n \end{pmatrix}$ ;  $\vec{v} \in V$ . Dann gilt wie üblich:  $\vec{v} = v_1 \cdot \vec{a}_1 + v_2 \cdot \vec{a}_2 + \dots + v_n \cdot \vec{a}_n$ . Sei eine weitere Basis  $\vec{b}_1, \vec{b}_2, \dots, \vec{b}_n$

des selben Vektorraumes, so besitzt der Vektor  $\vec{v}$  andere Koordinaten:  $\vec{v} = \begin{pmatrix} v'_1 \\ v'_2 \\ \dots \\ v'_n \end{pmatrix}$ . Dabei muss gelten:

$$\vec{v} = v_1 \cdot \vec{a}_1 + v_2 \cdot \vec{a}_2 + \dots + v_n \cdot \vec{a}_n = v'_1 \cdot \vec{b}_1 + v'_2 \cdot \vec{b}_2 + \dots + v'_n \cdot \vec{b}_n.$$

### Bemerkung:

Um die Koordinaten eines Vektors in einer anderen Basis als der Aktuellen zu bestimmen, löst man diese Gleichung, die sich ergibt.

### Beispiel:

Basis 1: Standardbasis des  $\mathbb{R}^3$ , Basis 2:  $\vec{b}_1 = \begin{pmatrix} 4 \\ 9 \\ -1 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{b}_2 = \begin{pmatrix} -2 \\ -2 \\ 8 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{b}_3 = \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix}$ , Vektor  $\vec{v} = \begin{pmatrix} -5 \\ 3 \\ 2 \end{pmatrix}$

(in der Standardbasis des  $\mathbb{R}^3$ )

$$\vec{v} = -5 \cdot \vec{a}_1 + 3 \cdot \vec{a}_2 + 2 \cdot \vec{a}_3 = r \cdot \vec{b}_1 + s \cdot \vec{b}_2 + t \cdot \vec{b}_3 \Leftrightarrow \begin{vmatrix} 4r & -2s & t & = & -5 \\ 9r & -2s & 3t & = & 3 \\ -r & 8s & t & = & 2 \end{vmatrix}$$

$$\Leftrightarrow \begin{vmatrix} -r & 8s & t & = & 2 \\ 0 & 30s & 5t & = & 3 \\ 0 & 70s & 12t & = & 21 \end{vmatrix}$$

$$\Leftrightarrow \begin{vmatrix} -r & 8s & t & = & 2 \\ 0 & 30s & 5t & = & 3 \\ 0 & 0 & \frac{1}{3} \cdot t & = & 14 \end{vmatrix}$$

$$\Leftrightarrow \begin{vmatrix} r & = & -15.2 \\ s & = & -6.9 \\ t & = & 42 \end{vmatrix}$$

$$\mathbb{L} = \{-15.2 | -6.9 | 42\}$$

Daraus lässt sich folgern:  $\vec{v} = -15.2 \cdot \vec{b}_1 - 6.9 \cdot \vec{b}_2 + 42 \cdot \vec{b}_3 = \begin{pmatrix} -15.2 \\ -6.9 \\ 42 \end{pmatrix}$  (in der anderen Basis).

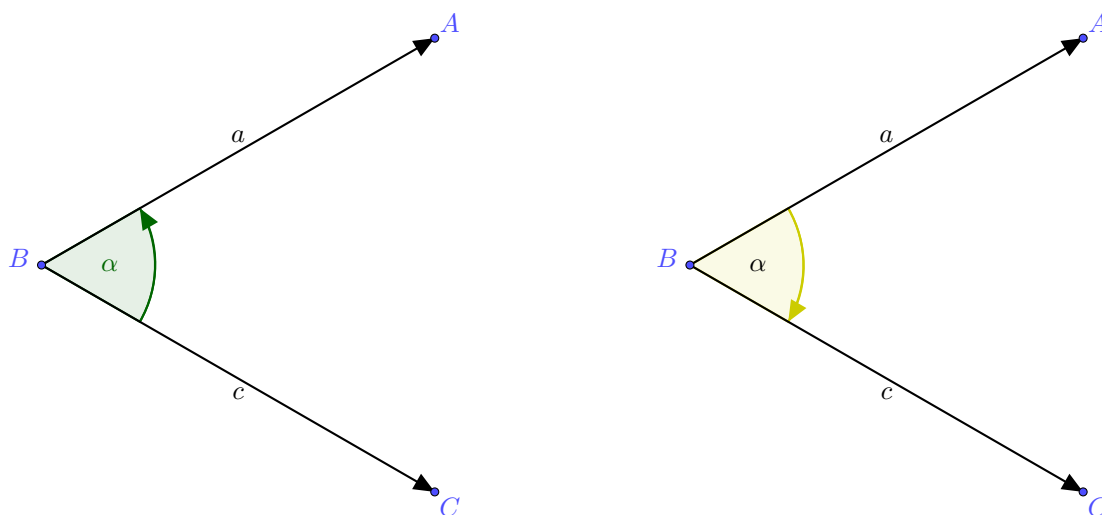
## 8.3 Winkel zwischen Vektoren

### Definition

Unter einem Winkel zwischen zwei Vektoren versteht man den Winkel, der entsteht, wenn man beide Vektoren an einen **gemeinsamen Startpunkt** verschiebt ohne dabei ihre Ausrichtung zu verändern.

### 8.3.1 Orientierte Winkel

Wenn man in der Mathematik mit Winkeln arbeitet, werden sie immer im **mathematisch positiven** Sinn angegeben. Dies bedeutet, dass man von einem Vektor oder Schenkel, der an den Winkel grenzt, ausgeht und über Rotation um den Schnittpunkt „gegen den Uhrzeigersinn“ zum anderen gelangt, bis beide übereinanderliegen (wenn man davon ausgeht, dass sich beide schneiden).



So ergibt sich  $\alpha = \angle ABC = \angle ac = (\overrightarrow{BA}, \overrightarrow{BC}) = \frac{\pi}{3}$ . Ein Winkel  $\alpha$  wird zudem immer so angegeben, dass  $\alpha \in I; I = [-\pi, \pi]$  gilt. Dies bedeutet, dass man nur Winkel zwischen 0 und 180 erhält, und das in beide „Richtungen“, als im mathematisch positiven und negativen Sinn. Diese Einschränkung kennzeichnet man mit dem Ausdruck „**modulo**  $2\pi$ “.

### 8.3.2 Rechnungen mit Winkeln

Bei Berechnungen von Winkeln zwischen Vektoren geht man genau wie in der elementaren Geometrie vor. So wird die Differenz zwischen zwei Winkeln  $\theta_1$  und  $\theta_2$  wie gehabt berechnet:  $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$ . Jedoch benötigt man weitere Rechenregeln, um mit Winkeln rechnen zu können.

#### Theorem - Relation de Chasles

$$(\vec{u}, \vec{w}) + (\vec{w}, \vec{v}) = (\vec{u}, \vec{v}); \quad \text{modulo } 2\pi$$

Umformungen:

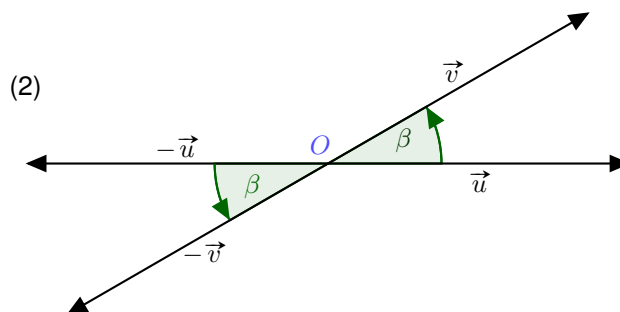
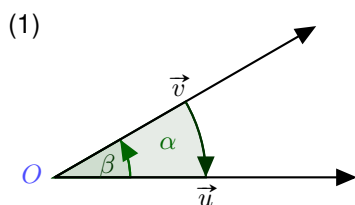
$$(1) \quad (\vec{u}, \vec{v}) = -(\vec{v}, \vec{u})$$

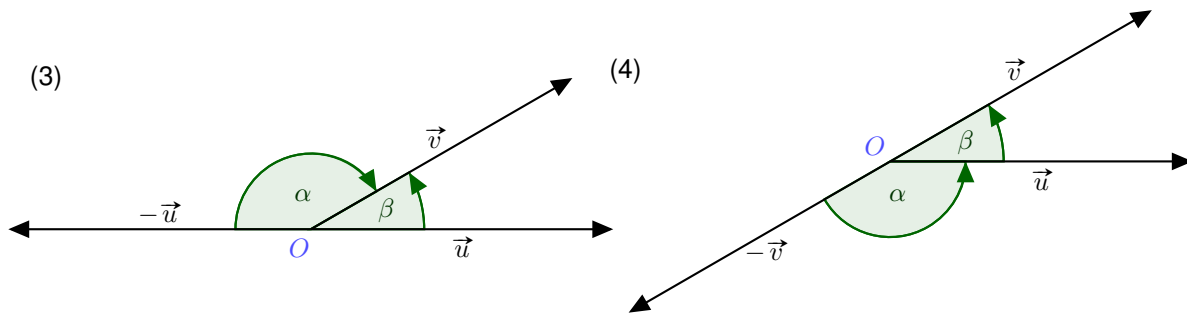
$$(2) \quad (-\vec{u}, -\vec{v}) = (\vec{u}, \vec{v})$$

$$(3) \quad (\vec{u}, \vec{v}) = \pi + (-\vec{u}, \vec{v})$$

Aus der ersten und letzten dieser Relationen lässt sich analog dazu bestimmen:

$$(4) \quad (\vec{u}, \vec{v}) = -(\vec{v}, \vec{u}) = \pi - (-\vec{v}, \vec{u})$$





## 8.4 Linearkombination

Vektoren lassen sich allgemein mit der additiven Verknüpfung des Vektorraums verknüpfen. Diese Verknüpfung zwischen zwei beliebigen Vektoren  $\vec{v}$  und  $\vec{u}$  erfolgt, wie auch schon im Teil Verbindungsvektor gezeigt wird, wie folgt:  $\vec{v} + \vec{u} = \begin{pmatrix} v_1 + u_1 \\ v_2 + u_2 \\ \vdots \\ v_n + u_n \end{pmatrix}$ . Anschaulich wird  $\vec{u}$  an  $\vec{v}$  angehängt und der Schaft von  $\vec{v}$  mit der Spitze von  $\vec{u}$  verbunden, um den neuen Vektor zu bilden.

### Definition

Eine Familie von Vektoren  $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \dots, \vec{a}_n \in V$  wird als linear abhängig bezeichnet, wenn die Gleichung:  $r_1 \cdot \vec{a}_1 + r_2 \cdot \vec{a}_2 + \dots + r_n \cdot \vec{a}_n = \vec{0}; r_i \in \mathbb{R}$  nicht nur die triviale Lösung  $r_1 = r_2 = \dots = r_n = 0$  besitzt. Existiert nur diese Lösung, ist die Familie linear unabhängig.

Anders gesagt, ist eine Familie von Vektoren linear abhängig, wenn sich einzelne Vektoren dieser Familie als Linearkombination von einer beliebigen Anzahl anderer Vektoren der Familie darstellen lassen.

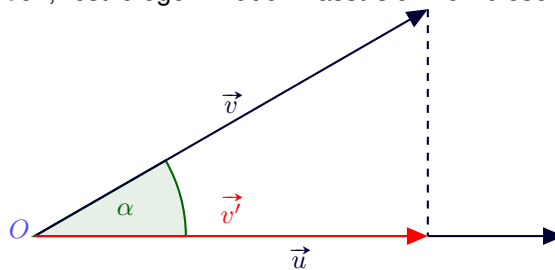
### Bemerkung:

Eine linear abhängige Familie **aus genau zwei** Vektoren wird als kollinear bezeichnet.

Eine linear abhängige Familie **aus genau drei** Vektoren dagegen nennt man komplanar.

## 8.5 Skalarprodukt

Das Skalarprodukt ist eine ("multiplikative") Verknüpfung des Vektorraums. Seinen Namen trägt es, da es aus zwei Vektoren einen Skalar, alias eine Zahl macht. Es dient dazu ein Maß für den Winkel, den zwei Vektoren  $\vec{u}$  und  $\vec{v}$  einschließen, festzulegen. Zudem lässt sich von dieser Definition aus der Winkel selber



anhand der [4]r[1cm]0.45

Vektoren bestimmt werden. Es wird als die Multiplikation der Norm der Projektion des Vektors  $\vec{v}$  in die Richtung von  $\vec{u}$ , das heißt, der Anteil von  $\vec{v}$  der auf der Geraden liegt, entlang welcher  $\vec{u}$  liegt, mit der Norm von  $\vec{u}$  definiert. Im Klartext bedeutet das:

## Definition

$$\begin{aligned}\vec{u} \odot \vec{v} &= |\vec{u}| \cdot |\vec{v}| \\ &= |\vec{u}| \cdot |\vec{v}| \cdot \cos(\alpha)\end{aligned}$$

Daraus lässt sich ableiten, dass:

- $0 \leq \alpha < 90$  (spitzer Winkel)  $\Leftrightarrow \cos \alpha > 0 \Leftrightarrow \vec{u} \odot \vec{v} > 0$
- $90 < \alpha \leq 180$  (stumpfer Winkel)  $\Leftrightarrow \cos \alpha < 0 \Leftrightarrow \vec{u} \odot \vec{v} < 0$
- $\alpha = 90$  (rechter Winkel)  $\Leftrightarrow \cos \alpha = 0 \Leftrightarrow \vec{u} \odot \vec{v} = 0$

Da wir nun aber selten Zugriff auf den Winkel haben, und dieser in den meisten Fällen die gesuchte Variable ist, benötigen wir eine praktikablere Berechnung, welche dasselbe Ergebnis liefert. Als Ansatz kann man auf eine im Abschnitt "Orthonormalbasis" bereits besprochene Schreibweise von Vektoren zurückgreifen:

$$\begin{aligned}\vec{u} &= u_1 \cdot \vec{e}_1 + u_2 \cdot \vec{e}_2 + u_3 \cdot \vec{e}_3 \\ \vec{v} &= v_1 \cdot \vec{e}_1 + v_2 \cdot \vec{e}_2 + v_3 \cdot \vec{e}_3\end{aligned}$$

Somit erreicht man folgendes Ergebnis:  $\vec{u} \odot \vec{v} = (u_1 \cdot \vec{e}_1 + u_2 \cdot \vec{e}_2 + u_3 \cdot \vec{e}_3) \odot \vec{v} = v_1 \cdot \vec{e}_1 + v_2 \cdot \vec{e}_2 + v_3 \cdot \vec{e}_3$   
Um hiermit allerdings weiterrechnen zu können, müssen einige Rechenregeln bezüglich des Skalarprodukts aufgestellt werden. Zunächst gilt, dass das Skalarprodukt symmetrisch ist:  $\vec{u} \odot \vec{v} = \vec{v} \odot \vec{u}$ , da

Bemerkung:

Aus dieser Gleichung folgt:  $\cos(\alpha) = \frac{\vec{u} \odot \vec{v}}{|\vec{u}| \cdot |\vec{v}|}$ .

## 8.6 Kreuzprodukt

Das Kreuzprodukt ist das zweite nützliche Werkzeug, welches in der Vektorgeometrie genutzt wird. Es dient hauptsächlich zur einfachen Berechnung eines zu zwei **nicht kollinearen** Vektoren  $\vec{u}$  und  $\vec{v}$  orthogonalen Vektors  $\vec{i}$ .

## Definition

$$\vec{i} = \vec{u} \times \vec{v} = \begin{pmatrix} u_2 \cdot v_3 - u_3 \cdot v_2 \\ u_3 \cdot v_1 - u_1 \cdot v_3 \\ u_1 \cdot v_2 - u_2 \cdot v_1 \end{pmatrix}$$

## Beweis

Seien  $\vec{u}$  und  $\vec{v}$  beliebige zueinander nicht kollineare Vektoren des  $\mathbb{R}^3$ . Ein zu beiden Vektoren orthogonaler Vektor ergibt sich durch:

$$\begin{cases} \vec{u} \odot \vec{i} = 0 & (1) \\ \vec{v} \odot \vec{i} = 0 & (2) \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} u_1 i_1 + u_2 i_2 + u_3 i_3 = 0 & (1) & | \cdot v_1 \\ v_1 i_1 + v_2 i_2 + v_3 i_3 = 0 & (2) & | \cdot (-u_1) \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} u_1 v_1 i_1 + u_2 v_1 i_2 + u_3 v_1 i_3 = 0 & (1) \\ -u_1 v_1 i_1 - u_1 v_2 i_2 - u_1 v_3 i_3 = 0 & (2) & |(1) + (2) \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} u_1 v_1 i_1 + u_2 v_1 i_2 + u_3 v_1 i_3 = 0 & (1) \\ u_2 v_1 i_2 + u_3 v_1 i_3 - u_1 v_2 i_2 - u_1 v_3 i_3 = 0 & (2) \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} u_1 v_1 i_1 + u_2 v_1 i_2 + u_3 v_1 i_3 = 0 & (1) \\ (u_2 v_1 - u_1 v_2) \cdot i_2 + (u_3 v_1 - u_1 v_3) \cdot i_3 = 0 & (2) \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} u_1 v_1 i_1 + u_2 v_1 i_2 + u_3 v_1 i_3 = 0 & (1) \\ (u_2 v_1 - u_1 v_2) \cdot i_2 = -(u_3 v_1 - u_1 v_3) \cdot i_3 & (2) \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} u_1 v_1 i_1 + u_2 v_1 i_2 + u_3 v_1 i_3 = 0 & (1) \\ i_2 = (u_3 v_1 - u_1 v_3) \wedge i_3 = -(u_2 v_1 - u_1 v_2) & (2) \end{cases} \quad \text{Eine mögliche Lösung}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} u_1 v_1 i_1 + u_2 v_1 i_2 + u_3 v_1 i_3 = 0 & (1) \\ i_2 = u_3 v_1 - u_1 v_3 & (2) \\ i_3 = u_1 v_2 - u_2 v_1 & (3) \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} u_1 v_1 i_1 + (u_3 v_1 - u_1 v_3) \cdot u_2 v_1 + (u_1 v_2 - u_2 v_1) \cdot u_3 v_1 = 0 & (1) \\ i_2 = u_3 v_1 - u_1 v_3 & (2) \\ i_3 = u_1 v_2 - u_2 v_1 & (3) \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} i_1 = \frac{-(u_3 v_1 - u_1 v_3) \cdot u_2 v_1 - (u_1 v_2 - u_2 v_1) \cdot u_3 v_1}{u_1 v_1} & (1) \\ i_2 = u_3 v_1 - u_1 v_3 & (2) \\ i_3 = u_1 v_2 - u_2 v_1 & (3) \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} i_1 = \frac{(u_1 v_3 - u_3 v_1) \cdot u_2 + (u_2 v_1 - u_1 v_2) \cdot u_3}{u_1} & (1) \\ i_2 = u_3 v_1 - u_1 v_3 & (2) \\ i_3 = u_1 v_2 - u_2 v_1 & (3) \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} i_1 = u_2 v_3 - u_3 v_2 + \frac{-u_3 v_1 u_2 + u_2 v_1 u_3}{u_1} & (1) \\ i_2 = u_3 v_1 - u_1 v_3 & (2) \\ i_3 = u_1 v_2 - u_2 v_1 & (3) \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} i_1 &= u_2 v_3 - u_3 v_2 & (1) \\ i_2 &= u_3 v_1 - u_1 v_3 & (2) \\ i_3 &= u_1 v_2 - u_2 v_1 & (3) \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \vec{i} = \begin{pmatrix} u_2 v_3 - u_3 v_2 \\ u_3 v_1 - u_1 v_3 \\ u_1 v_2 - u_2 v_1 \end{pmatrix}$$

□

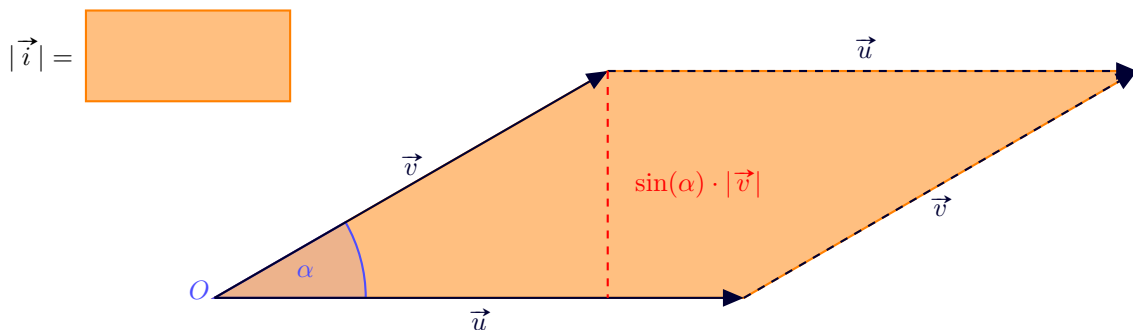
Bemerkung:

$$\vec{u} \times \vec{v} = 0 \Leftrightarrow \vec{u} \parallel \vec{v} (\vec{u} = r \cdot \vec{v}; r \in \mathbb{R})$$

Zudem gilt:

$$\begin{aligned} |\vec{i}| &= |\vec{u}| \cdot (\sin(\alpha) \cdot |\vec{v}|) \\ &= |\vec{u}| \cdot \left( \sin \left( \cos^{-1} \left( \frac{|\vec{u} \odot \vec{v}|}{|\vec{u}| \cdot |\vec{v}|} \right) \right) \cdot |\vec{v}| \right) \end{aligned}$$

Einfacher gesagt ist der Betrag des Vektors  $\vec{i}$  gleich der Fläche des Parallelogramms, welches die zwei Vektoren  $\vec{u}$  und  $\vec{v}$  aufspannen. Um diese doch recht verwirrende Erklärung etwas zu verdeutlichen folgt eine visuelle Darstellung:



## Beweis

$$\begin{aligned}
|\vec{u}| \cdot (\sin(\alpha) \cdot |\vec{v}|) &= \sqrt{(|\vec{u}|)^2 \cdot (|\vec{v}|)^2 \cdot \sin^2(\alpha)} \\
&= \sqrt{(|\vec{u}|)^2 \cdot (|\vec{v}|)^2 \cdot (1 - \cos^2(\alpha))} \\
&= \sqrt{(\vec{u})^2 \cdot (\vec{v})^2 \cdot (1 - \cos^2(\alpha))} \\
&= \sqrt{(\vec{u})^2 \cdot (\vec{v})^2 - (\vec{u})^2 \cdot (\vec{v})^2 \cdot \cos^2(\alpha)} \\
&= \sqrt{\vec{u} \odot \vec{u} \cdot \vec{v} \odot \vec{v} - (|\vec{u}|)^2 \cdot (|\vec{v}|)^2 \cdot \cos^2(\alpha)} \\
&= \sqrt{\vec{u} \odot \vec{u} \cdot \vec{v} \odot \vec{v} - |\vec{u}| \cdot |\vec{v}| \cdot \cos(\alpha) \cdot |\vec{u}| \cdot |\vec{v}| \cdot \cos(\alpha)} \\
&= \sqrt{\vec{u} \odot \vec{u} \cdot \vec{v} \odot \vec{v} - \vec{u} \odot \vec{v} \cdot \vec{u} \odot \vec{v}} \\
&= \sqrt{(u_1^2 + u_2^2 + u_3^2) \cdot (v_1^2 + v_2^2 + v_3^2) - (u_1 v_1 + u_2 v_2 + u_3 v_3)^2} \\
&= \sqrt{(u_1^2 v_1^2 + u_1^2 v_2^2 + u_1^2 v_3^2 + u_2^2 v_1^2 + u_2^2 v_2^2 + u_2^2 v_3^2 + u_3^2 v_1^2 + u_3^2 v_2^2 + u_3^2 v_3^2) - (u_1^2 v_1^2 + u_1 v_1 u_2 v_2 + u_1 v_1 u_3 v_3 + u_2 v_2 u_1 v_1 + u_2^2 v_2^2 + u_2 v_2 u_3 v_3 + u_3 v_3 u_1 v_1 + u_3 v_3 u_2 v_2 + u_3^2 v_3^2)} \\
&= \sqrt{u_1^2 v_2^2 + u_1^2 v_3^2 + u_2^2 v_1^2 + u_2^2 v_3^2 + u_3^2 v_1^2 + u_3^2 v_2^2 + - (2u_1 v_1 u_2 v_2 + 2u_1 v_1 u_3 v_3 + 2u_2 v_2 u_3 v_3)} \\
&= \sqrt{u_1^2 v_2^2 - 2u_1 v_1 u_2 v_2 + u_2^2 v_1^2 + u_1^2 v_3^2 - 2u_1 v_1 u_3 v_3 + u_3^2 v_1^2 + u_2^2 v_3^2 - 2u_2 v_2 u_3 v_3 + u_3^2 v_2^2} \\
&= \sqrt{(u_1 v_2 - u_2 v_1)^2 + (u_1 v_3 - u_3 v_1)^2 + (u_2 v_3 - u_3 v_2)^2} \\
&= \left| \begin{pmatrix} u_2 v_3 - u_3 v_2 \\ u_3 v_1 - u_1 v_3 \\ u_1 v_2 - u_2 v_1 \end{pmatrix} \right| \quad (\text{unter anderem, aber auch}) \\
&= |\vec{i}|
\end{aligned}$$

□

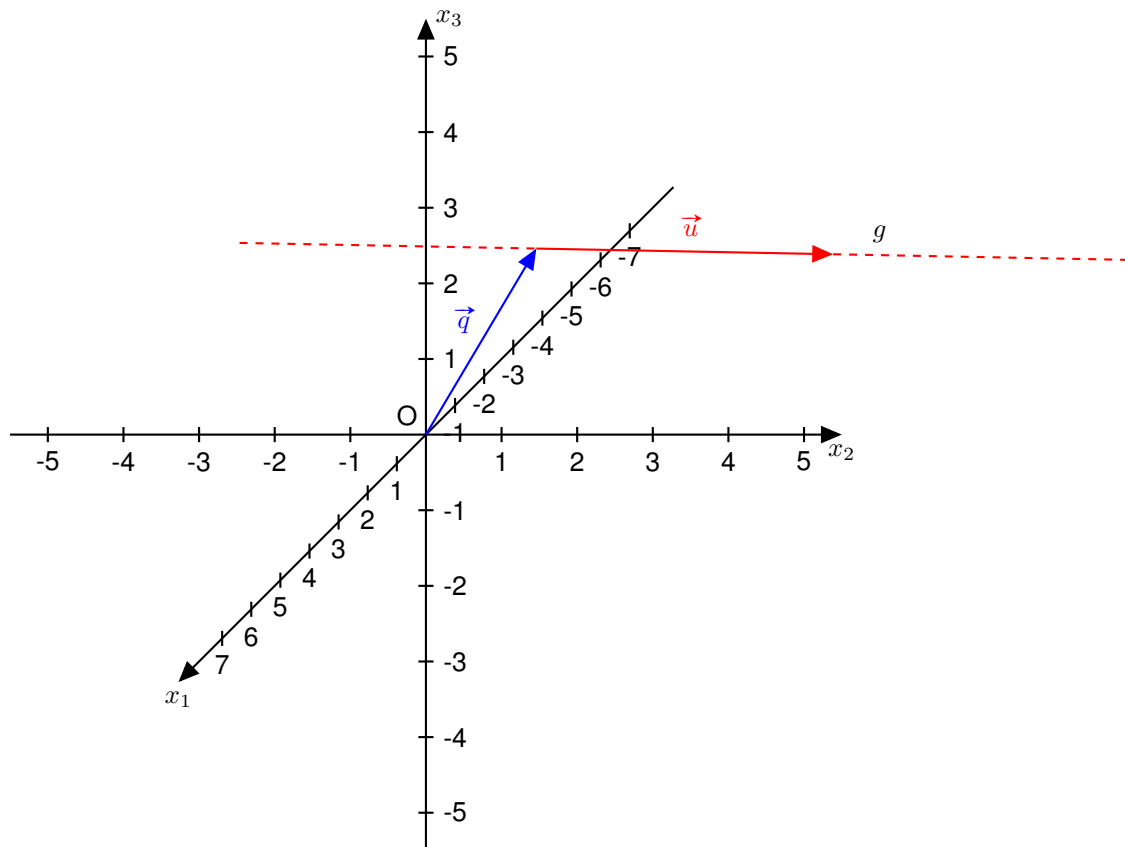
## 8.7 Geraden

### 8.7.1 Darstellungen

Eine Gerade ist ein sehr bekannter Bestandteil der elementaren Geometrie. Bezogen auf die Vektorgeometrie ist sie nichts anderes als ein unendlich langer Vektor, beziehungsweise eine Linearkombination aus unendlich vielen (identischen / kollinearen) Vektoren. Somit ergibt sich die eindeutige **Parameterform** einer Geraden  $g$ :  $g: \vec{x} = \vec{q} + s \cdot \vec{u}; s \in \mathbb{R}$ . Diese Schreibweise beschreibt die der Geraden zugehörigen Punktmenge. Der Vektor  $\vec{q}$  bestimmt die **Position** der Geraden im Raum und trägt folglich den Namen **Stützvektor**, wohingegen der Vektor  $\vec{u}$  die **Ausrichtung** der Geraden anzeigt und **Richtungsvektor** genannt wird.

#### Bemerkung:

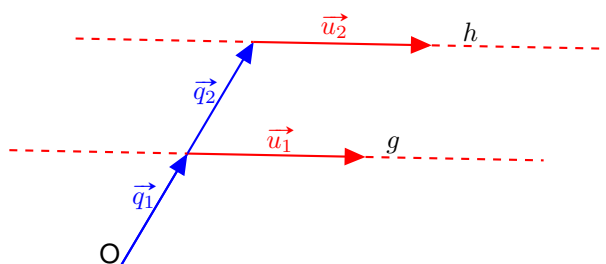
Die Parameterform ist die einzige mögliche Darstellungsform einer Geraden im  $\mathbb{R}^3$ , da ihr Normalvektor nicht eindeutig bestimmt werden kann. Im  $\mathbb{R}^2$  jedoch ist dies möglich, ähnlich wie für Kreise. Zudem kann eine Gerade in Koordinatenform durch **die Schnittmenge zweier Ebenen** beschrieben werden (siehe auch „5.7.3 Lagebeziehungen zwischen Ebenen“).



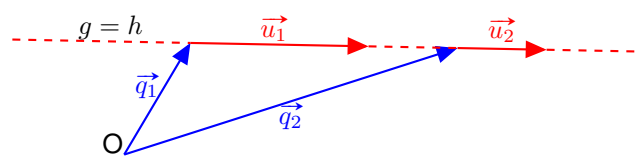
### 8.7.2 Lagebeziehungen zwischen Geraden

Es gibt bezüglich Geraden vier verschiedene Beziehungen, vorausgesetzt diese befinden sich im  $\mathbb{R}^3$ . Zwei Geraden  $g$  und  $h$  können...

1)...**parallel** sein...

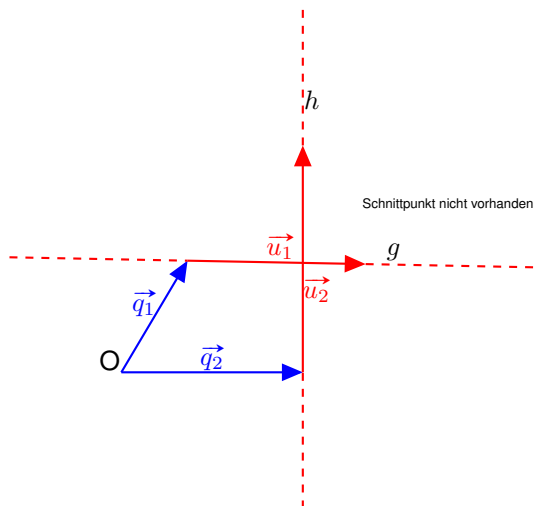


2)...**identisch** sein...

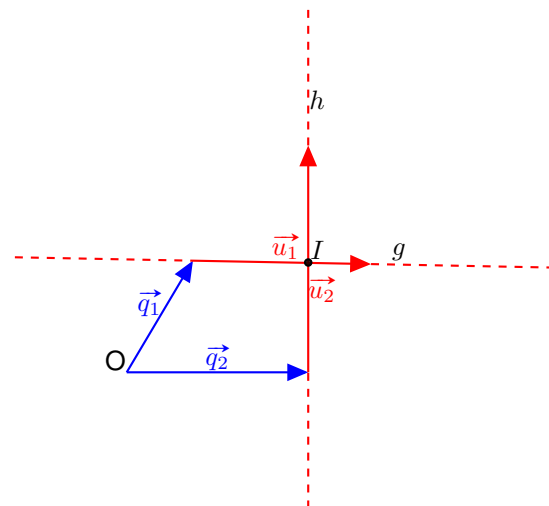
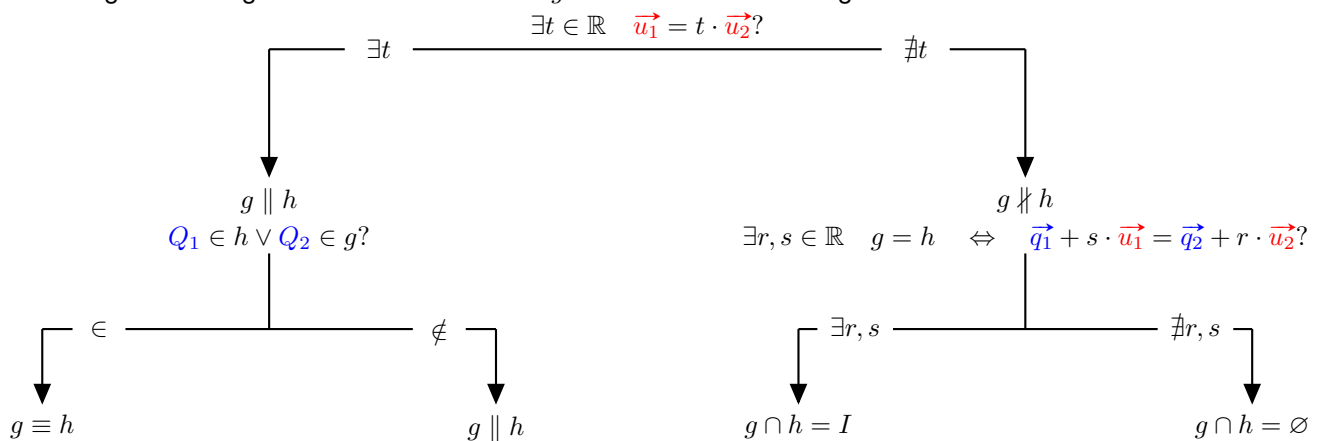




3) ...windschief zueinander sein...



4) ...sich schneiden


 Die Lagebeziehung zwischen zwei Geraden  $g$  und  $h$  lässt sich wie folgt ermitteln:


### 8.7.3 Abstand zu einem Punkt

#### Definition

Der **Lotfußpunkt**  $L$  einer Geraden  $g: \vec{x} = \vec{q} + t \cdot \vec{u}; t \in \mathbb{R}$  zu einem Punkt  $P \notin g$  ist definiert durch:  $\overrightarrow{LP} \odot \vec{u} = 0$ . Er ist somit der dem Punkt  $P$  am nächsten gelegenen Punkt der Gerade  $g$  und wird folglich hauptsächlich zur Abstandsberechnung genutzt.

Der Abstand von einer Geraden  $g$  zu einem Punkt  $P$  ist äquivalent zur **Norm des Verbindungsvektors**  $\overrightarrow{LP}$ , wobei  $L$  der Lotfußpunkt der Geraden  $g$  zu  $P$  ist. Für die Berechnung des Abstands gibt es drei verschiedene Lösungsansätze (OHG) von denen zwei gebräuchlicher sind als der dritte.

#### Orthogonalität:

Da die Norm des Verbindungsvektors gesucht wird, gilt es nun diesen eindeutig zu bestimmen. Folgender Ablauf führt zum Ziel:

1) Punkt  $L$  auf der Geraden  $g$  in Abhängigkeit des Faktors des Richtungsvektors bestimmen:

$$\vec{l} = \begin{pmatrix} q_1 + t \cdot u_1 \\ q_2 + t \cdot u_2 \\ q_3 + t \cdot u_3 \end{pmatrix}$$

2) Verbindungsvektor bestimmen:

$$\overrightarrow{LP} = \begin{pmatrix} p_1 - (q_1 + t \cdot u_1) \\ p_2 - (q_2 + t \cdot u_2) \\ p_3 - (q_3 + t \cdot u_3) \end{pmatrix}$$

3)  $\overrightarrow{LP} \odot \vec{u} = 0$  und Gleichung lösen (nach t auflösen):

$$0 = u_1 \cdot (p_1 - (q_1 + t \cdot u_1)) + u_2 \cdot (p_2 - (q_2 + t \cdot u_2)) + u_3 \cdot (p_3 - (q_3 + t \cdot u_3))$$

$$\Leftrightarrow t = \frac{u_1 \cdot (p_1 - q_1) + u_2 \cdot (p_2 - q_2) + u_3 \cdot (p_3 - q_3)}{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}$$

4) Verbindungsvektor berechnen:

$$\overrightarrow{LP} = \begin{pmatrix} p_1 - \left( q_1 + \frac{u_1 \cdot (p_1 - q_1) + u_2 \cdot (p_2 - q_2) + u_3 \cdot (p_3 - q_3)}{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \cdot u_1 \right) \\ p_2 - \left( q_2 + \frac{u_1 \cdot (p_1 - q_1) + u_2 \cdot (p_2 - q_2) + u_3 \cdot (p_3 - q_3)}{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \cdot u_2 \right) \\ p_3 - \left( q_3 + \frac{u_1 \cdot (p_1 - q_1) + u_2 \cdot (p_2 - q_2) + u_3 \cdot (p_3 - q_3)}{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \cdot u_3 \right) \end{pmatrix}$$

5) Norm des Verbindungsvektors berechnen:

$$d(g, P) = |\overrightarrow{LP}|$$

$$= \left| \begin{pmatrix} p_1 - \left( q_1 + \frac{u_1 \cdot (p_1 - q_1) + u_2 \cdot (p_2 - q_2) + u_3 \cdot (p_3 - q_3)}{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \cdot u_1 \right) \\ p_2 - \left( q_2 + \frac{u_1 \cdot (p_1 - q_1) + u_2 \cdot (p_2 - q_2) + u_3 \cdot (p_3 - q_3)}{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \cdot u_2 \right) \\ p_3 - \left( q_3 + \frac{u_1 \cdot (p_1 - q_1) + u_2 \cdot (p_2 - q_2) + u_3 \cdot (p_3 - q_3)}{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \cdot u_3 \right) \end{pmatrix} \right|$$

$$= \sqrt{\left( p_1 - \left( q_1 + \frac{u_1 \cdot (p_1 - q_1) + u_2 \cdot (p_2 - q_2) + u_3 \cdot (p_3 - q_3)}{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \cdot u_1 \right) \right)^2 + \left( p_2 - \left( q_2 + \frac{u_1 \cdot (p_1 - q_1) + u_2 \cdot (p_2 - q_2) + u_3 \cdot (p_3 - q_3)}{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \cdot u_2 \right) \right)^2 + \left( p_3 - \left( q_3 + \frac{u_1 \cdot (p_1 - q_1) + u_2 \cdot (p_2 - q_2) + u_3 \cdot (p_3 - q_3)}{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \cdot u_3 \right) \right)^2}$$

### Hilfsebene:

Diese Methode hat sich Platz zwei erkämpft:

1) Hilfsebene  $E$  bestimmen ( $\vec{n} \equiv \vec{u}$   $P \in E$ , da die Gerade  $g$  die Ebene im rechten Winkel durchstößt und der Verbindungsvektor somit orthogonal zur Geraden ist):

$$E : \vec{u} \odot [\vec{x} - \vec{p}] = 0$$

$$\Leftrightarrow u_1 x_1 + u_2 x_2 + u_3 x_3 = u_1 p_1 + u_2 p_2 + u_3 p_3$$

2)  $g = E$  und Gleichung lösen (nach t auflösen):

$$u_1(q_1 + t \cdot u_1) + u_2(q_2 + t \cdot u_2) + u_3(q_3 + t \cdot u_3) = u_1 p_1 + u_2 p_2 + u_3 p_3$$

$$\Leftrightarrow t = \frac{u_1 \cdot (p_1 - q_1) + u_2 \cdot (p_2 - q_2) + u_3 \cdot (p_3 - q_3)}{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}$$

3) Siehe Schritt 4 Orthogonalität

4) Siehe Schritt 5 Orthogonalität

### Grenzwertberechnung:

Zu guter Letzt wollen wir die Analysis Fanatiker befriedigen:

- 1) Siehe Schritt 1 Orthogonalität
- 2) Siehe Schritt 2 Orthogonalität
- 3) Norm des Vektors in Abhängigkeit von t bestimmen:

$$\begin{aligned} |\vec{LP}| &= \sqrt{(p_1 - (q_1 + t \cdot u_1))^2 + (p_2 - (q_2 + t \cdot u_2))^2 + (p_3 - (q_3 + t \cdot u_3))^2} \\ &= \sqrt{(u_1^2 + u_2^2 + u_3^2)t^2 + 2((q_1 - p_1) \cdot u_1 + (q_2 - p_2) \cdot u_2 + (q_3 - p_3) \cdot u_3)t} \\ &\quad + ((p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2 + (p_3 - q_3)^2) \end{aligned}$$

Somit ergibt sich eine Funktion  $f(t)$ :

$$f(t) = \sqrt{(u_1^2 + u_2^2 + u_3^2)t^2 + 2((q_1 - p_1) \cdot u_1 + (q_2 - p_2) \cdot u_2 + (q_3 - p_3) \cdot u_3)t} + ((p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2 + (p_3 - q_3)^2)$$

- 4) Tiefpunkt von  $f(t)$  berechnen:

$$\begin{aligned} f'(t) &= \frac{2(u_1^2 + u_2^2 + u_3^2)t + 2((q_1 - p_1) \cdot u_1 + (q_2 - p_2) \cdot u_2 + (q_3 - p_3) \cdot u_3)}{2\sqrt{(u_1^2 + u_2^2 + u_3^2)t^2 + 2((q_1 - p_1) \cdot u_1 + (q_2 - p_2) \cdot u_2 + (q_3 - p_3) \cdot u_3)t} + ((p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2 + (p_3 - q_3)^2)} \dots \\ &\dots \end{aligned}$$

notwendige Bedingung TP:

$$\begin{aligned} f'(t) &= 0 \\ \Leftrightarrow 0 &= 2(u_1^2 + u_2^2 + u_3^2)t + 2((q_1 - p_1) \cdot u_1 + (q_2 - p_2) \cdot u_2 + (q_3 - p_3) \cdot u_3) \\ \Leftrightarrow t &= \frac{u_1 \cdot (p_1 - q_1) + u_2 \cdot (p_2 - q_2) + u_3 \cdot (p_3 - q_3)}{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \end{aligned}$$

Die hinreichende Bedingung ist nicht zu prüfen, sie gilt (der Minimalabstand existiert immer), und die Art des Extremwerts ist ebenfalls vorbestimmt, da der Verbindungsvektor unendlich lang wird wenn man den Lotfußpunkt in beide Richtungen entlang der Geraden verschiebt.

- 5) Siehe Schritt 4 Orthogonalität
- 6) Siehe Schritt 5 Orthogonalität

#### Bemerkung:

Wie sich unschwer erkennen lässt, sind die Formeln für die Berechnung von t bei allen drei Lösungsansätzen identisch. Die Methoden unterscheiden sich somit nur am Anfang voneinander.

#### Bemerkung:

Zur Abstandsberechnung gibt es eine allgemeine Formel, welche die oben aufgelisteten Vorgehensweisen überflüssig macht. Da sie für das Abitur allerdings nicht zugelassen ist, wird sie hier nicht bewiesen beziehungsweise graphisch ergänzt:  $d(g, P) = \frac{|\vec{u} \times \vec{QP}|}{|\vec{u}|}$ .

### 8.7.4 Abstand zweier Geraden

Zwei nicht sich schneidende oder identische Geraden haben einen **eindeutig definierten Minimalabstand**. Bei zwei parallelen Geraden ist dies einfach zu visualisieren, der Abstand zweier windschiefer Geraden jedoch weniger. Im Folgenden sollen beide Fälle untersucht werden.

#### Parallele Geraden:

Der Abstand zweier paralleler Geraden  $g$  und  $h$  entspricht genau dem Abstand eines Punktes  $P \in g \vee P \in h$  zur jeweiligen gegenüberliegenden Geraden. Somit genügt es den Abstand zwischen dem Stützpunkt einer Geraden und der anderen zu berechnen.

#### Windschiefe Geraden:

Der minimale Abstand zweier windschiefer Geraden lässt sich mithilfe einer **Hilsebene** verbildlichen und bestimmen. Gegeben seien zwei Geraden  $g: \vec{x} = \vec{p} + r \cdot \vec{u}; r \in \mathbb{R}$  und  $h: \vec{x} = \vec{q} + s \cdot \vec{v}; s \in \mathbb{R}$ . Daraus folgt, dass:  $E: \vec{x} = \vec{p} + r \cdot \vec{u} + s \cdot \vec{v} \vee E: \vec{x} = \vec{q} + r \cdot \vec{u} + s \cdot \vec{v}; s, r \in \mathbb{R}$ . Somit ergibt sich eine Ebene, welche entweder die Gerade  $g$  oder  $h$  enthält und parallel zur anderen ist. Der Minimalabstand ist äquivalent zum Abstand zwischen einem Punkt der Geraden, die nicht in der Ebene enthalten ist, und der Ebene. Für die genaue Vorgehensweise von diesem Punkt aus empfiehlt es sich den Teil „Abstand zu einem Punkt“ unter Ebenen zuzuwenden.

#### Bemerkung:

Zur Berechnung des Abstands zweier windschiefer Geraden gibt es zudem eine Formel, welche zugleich das **Ergebnis des Skalarprodukts** veranschaulicht. Aus zwei Geraden

$$g: \vec{x} = \vec{p} + r \cdot \vec{u}; r \in \mathbb{R} \quad \text{und} \quad h: \vec{x} = \vec{q} + s \cdot \vec{v}; s \in \mathbb{R}$$

lässt sich mit dem Kreuzprodukt ein normierter Normalenvektor  $n_0$  zu beiden Richtungsvektoren  $\vec{u}$  und  $\vec{v}$  errechnen, den man mit dem Verbindungsvektor der beiden Ortsvektoren  $(\vec{q} - \vec{p})$  zur Minimalabstandsrechnung der beiden Geraden skaliert:

$$d(g, h) = |n_0 \odot (\vec{q} - \vec{p})| = \left| \frac{\vec{u} \times \vec{v}}{|\vec{u} \times \vec{v}|} \odot (\vec{q} - \vec{p}) \right|$$

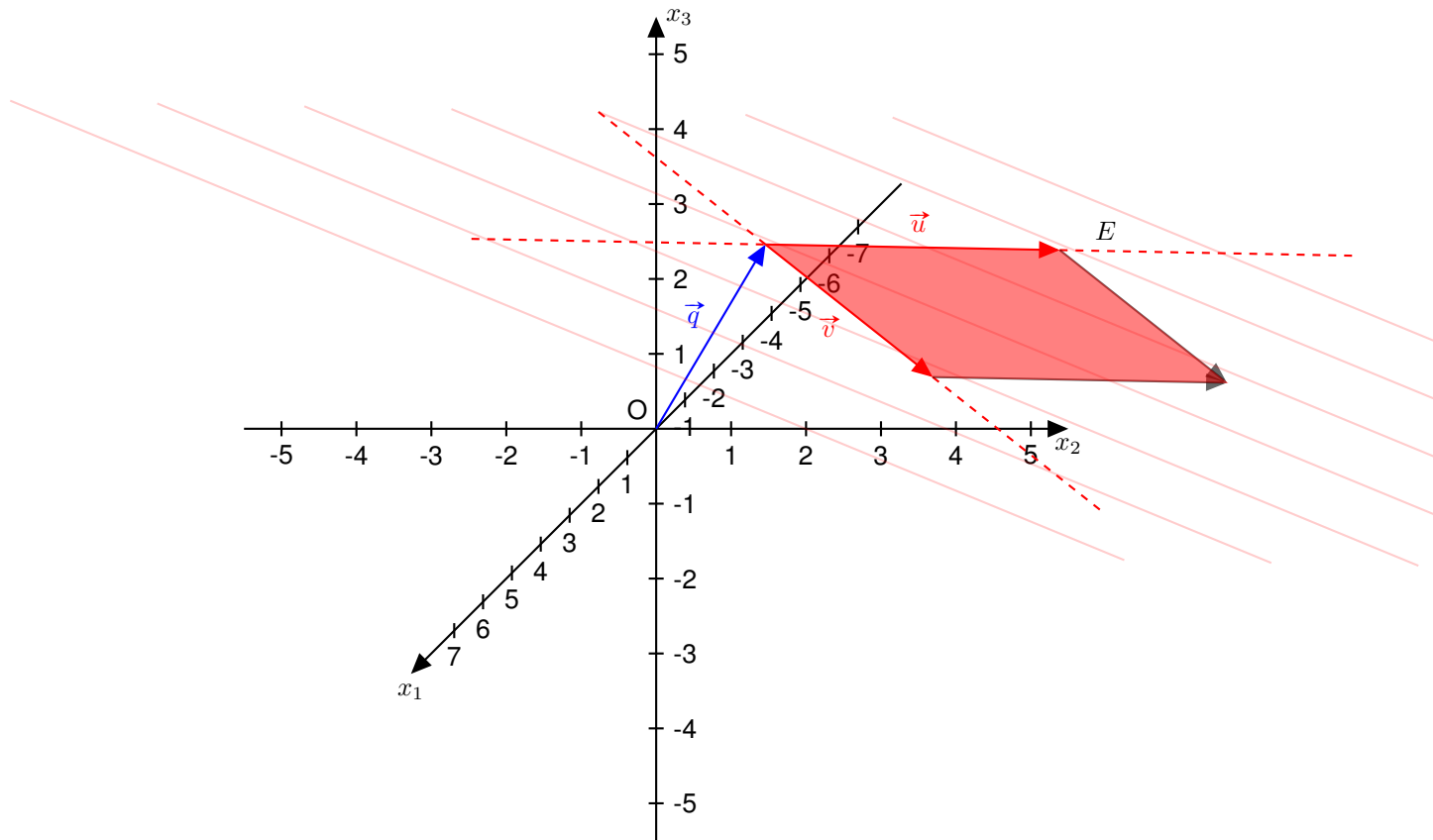
## 8.8 Ebenen

### 8.8.1 Darstellungen

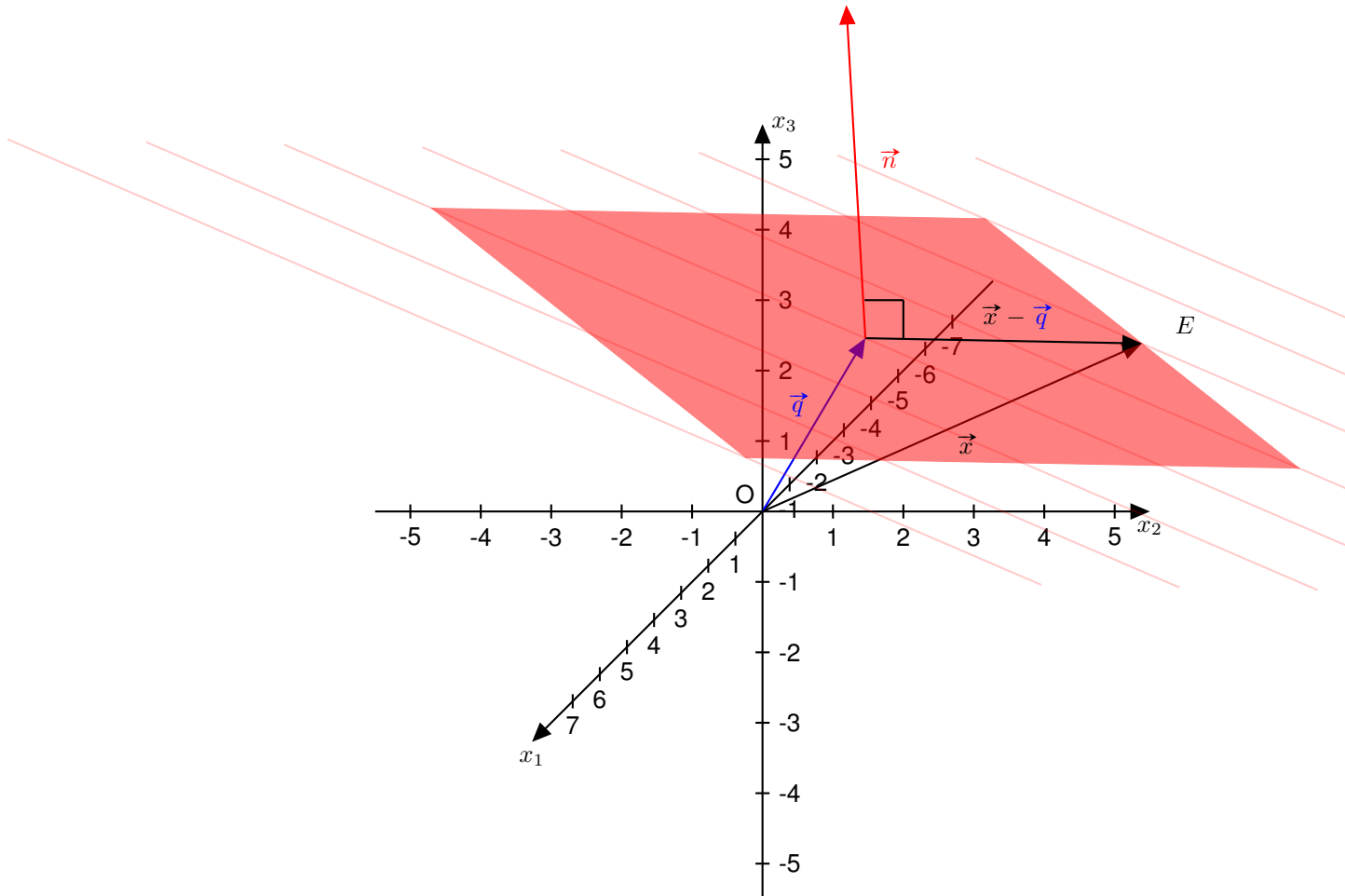
Die Darstellung einer Ebene beinhaltet immer die gleichen Informationen: Ihre **Position** im Raum und ihre **Ausrichtung**:

Name	Darstellung
Parameterform	$E: \vec{x} = \vec{p} + s \cdot \vec{u} + t \cdot \vec{v}; \quad s, t \in \mathbb{R}$
Normalenform	$E: (\vec{x} - \vec{q}) \odot \vec{n} = 0$
Koordinatenform	$E: n_1 \cdot x_1 + n_2 \cdot x_2 + n_3 \cdot x_3 = d; \quad d = n_1 \cdot q_1 + n_2 \cdot q_2 + n_3 \cdot q_3$

Die erste bei Geraden bereits eingeführte Form ist leicht zu verstehen. An den Stützvektor setzt man anschließend einen zweiten Richtungsvektor; die beiden Vektoren werden **Spannvektoren** genannt, da sie gemeinsam die Ebene aufspannen. Da man sich über diese beliebig in zwei Dimensionen bewegen kann, ist jeder Punkt in einer Ebene erreichbar. Bei der Bildung der Ebene muss man beachten, dass die Spannvektoren **nicht kollinear** sind. In diesem Fall erhält man wieder eine Gerade.



Die Normalenform und Koordinatenform sind weitaus weniger intuitiv und erfordern eine genauere Erklärung. Sie lässt sich zudem leichter anhand einer Graphik erklären:



Somit ist jeder Punkt  $X \in E$ , wenn der Verbindungsvektor  $(\vec{x} - \vec{q})$  orthogonal zum Vektor  $\vec{n}$  ist. Dabei spielt die Position des sogenannten **Normalenvektors** keine Rolle, ebenso wenig wie seine Norm. Allein seine Ausrichtung bestimmt die der Ebene. Um die Position im Raum genau zu bestimmen, benötigt man zudem einen Punkt  $Q \in E$ . Diese zusätzliche Information schließt alle anderen parallelen Ebenen aus, die durch einen kollinearen Normalenvektor definiert sind.

Aus der Normalenform lässt sich die Koordinatenform ableiten. Man macht häufiger Gebrauch von letzterer, da sich leichter mit ihr rechnen lässt. Man bildet sie wie folgt:

$$\begin{aligned}
 E : (\vec{x} - \vec{q}) \odot \vec{n} &= 0 \\
 \Leftrightarrow E : \vec{x} \odot \vec{n} &= \vec{q} \odot \vec{n} \\
 \Leftrightarrow E : n_1 \cdot x_1 + n_2 \cdot x_2 + n_3 \cdot x_3 &= d; \quad d = n_1 \cdot q_1 + n_2 \cdot q_2 + n_3 \cdot q_3
 \end{aligned}$$

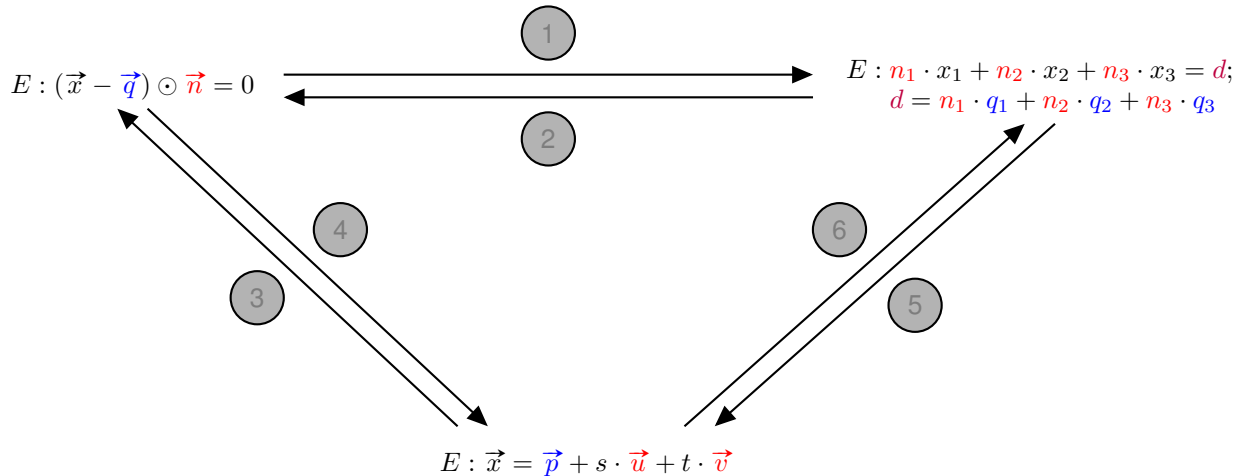
#### Bemerkung:

Ebenen lassen sich auch mittels **Spurpunkten** und **Spurgeraden** lokalisieren. Spurpunkte sind die der Achsen des Koordinatensystems, welche in der Ebene enthalten sind. Aus diesen lassen sich anschließend die Spurgeraden bilden (durch Verbinden der Punkte). Folgende Möglichkeiten bieten sich an:

- 1) 3 Spurpunkte
- 2) 2 Spurpunkte  $\Rightarrow E \parallel \vec{x}_1 \vee E \parallel \vec{x}_2 \vee E \parallel \vec{x}_3$
- 3) 1 Spurpunkt  $\Rightarrow E \parallel E_{x_1 x_2} \vee E \parallel E_{x_2 x_3} \vee E \parallel E_{x_1 x_3}$
- 4) Ausnahme des vorherigen Falls:  $P \equiv O \Rightarrow$  Ausrichtung von  $E$  lässt sich nicht bestimmen

- 5)  $\infty$  Punkte  $\Rightarrow$  Eine der Achsen des Koordinatensystems  $\in E$ , Ausrichtung von  $E$  lässt sich nicht bestimmen
- 6)  $\infty$  „2“ Punkte  $\Rightarrow E \equiv E_{x_1x_2} \vee E \equiv E_{x_2x_3} \vee E \equiv E_{x_1x_3}$

Drei beziehungsweise zwei (falls man Normalenform und Koordinatenform als eine ansieht) verschiedene Darstellungsweisen sind zwar interessant und eine nicht ganz unwichtige Überlegung, jedoch scheint das auf den ersten Blick unnütz. Im Laufe dieser section wird sich der jeweilige Nutzen noch offenbaren. Dann wird einem auch deutlich, dass es manchmal von Vorteil sein kann die Formen umzuformen. Die Herangehensweisen für jede Umformung unterscheiden sich nur wenig voneinander, Folgendes Diagramm stellt eine Möglichkeit vor:

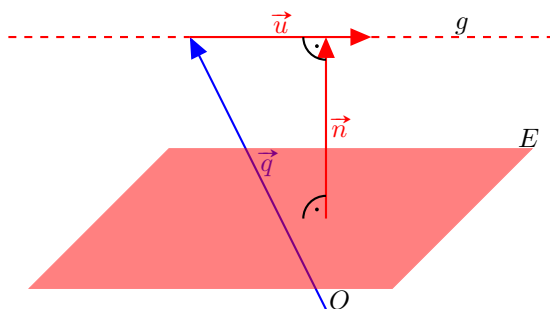


- 1) Siehe oben
- 2)  $\vec{n}$  aus den einzelnen Faktoren herausarbeiten  $\wedge$  Per Punktprobe (Koordinaten einsetzen) einen Punkt  $Q$  von  $E$  ermitteln
- 3)  $\vec{n}$  mittels Kreuzprodukt ermitteln  $\wedge$  Stützpunkt  $P$  als Punkt  $Q$  einsetzen
- 4) Zwei Punkte  $U, V \neq Q$  von  $E$  ermitteln  $\wedge Q$  als Stützpunkt  $P \wedge (\vec{u} - \vec{q})$  und  $(\vec{v} - \vec{q})$  als Spannvektoren einsetzen
- 5) Siehe 4 (gleiches Prinzip)
- 6) Siehe 3 (gleiches Prinzip)  $\wedge$  Skalarprodukt „ausmultiplizieren“

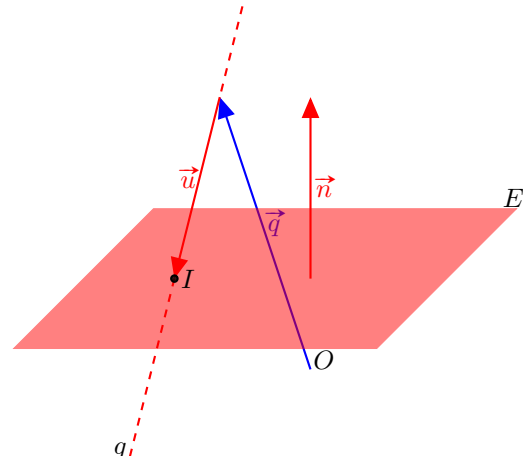
## 8.8.2 Lagebeziehungen zwischen Ebenen und Geraden

Ebenen und Geraden können im Gegensatz zu zwei Geraden nur eine von den drei folgenden Beziehungen zueinander haben. Eine Ebene  $E$  und eine Gerade  $g$  können...

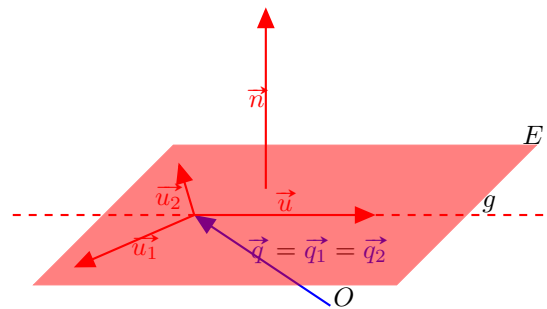
1)...parallel sein ...



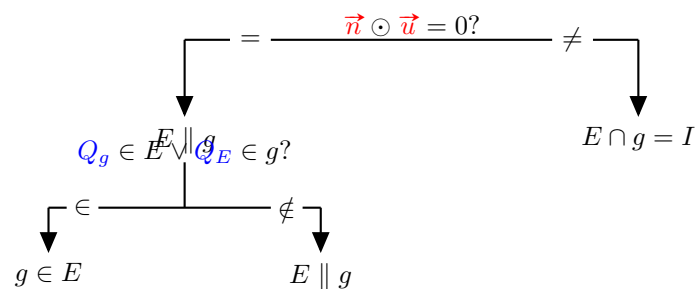
2)...sich schneiden



3) Zudem kann  $g$  in  $E$  liegen



Die Lagebeziehung zwischen einer Ebene  $E$  und einer Geraden  $g$  lässt sich wie folgt ermitteln:

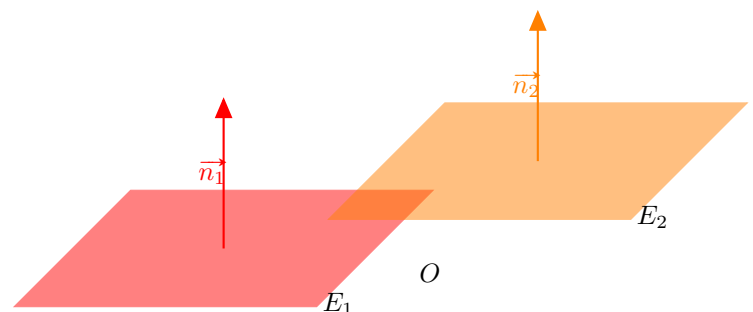
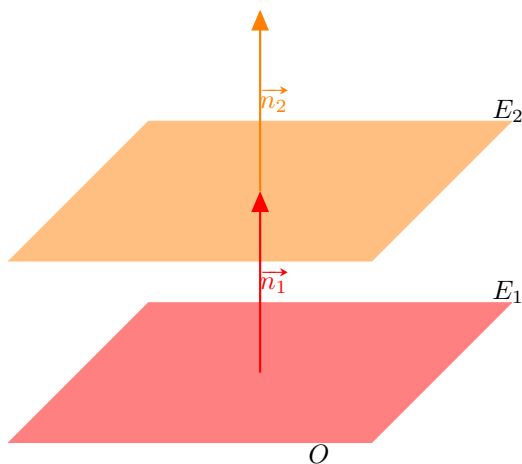


### 8.8.3 Lagebeziehungen zwischen Ebenen

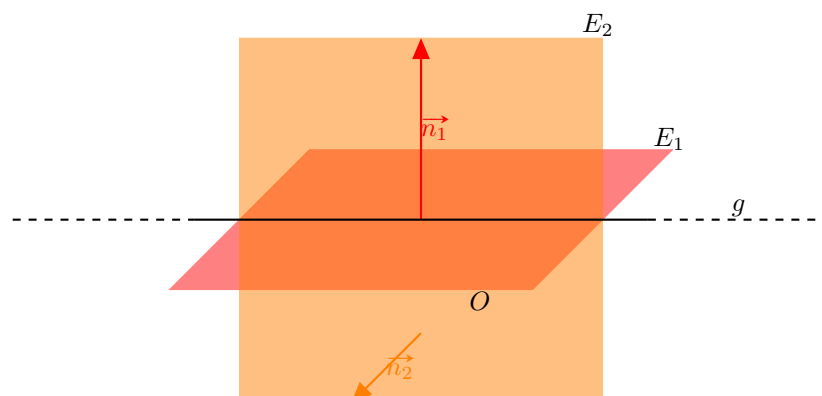
Ebenen teilen bezüglich ihrer Lage zueinander eine Eigenschaft mit einer Ebene und einer Geraden. Zwei Ebenen  $E_1$  und  $E_2$  können ebenfalls:

1) ...**parallel** sein...

2) ...**identisch** sein

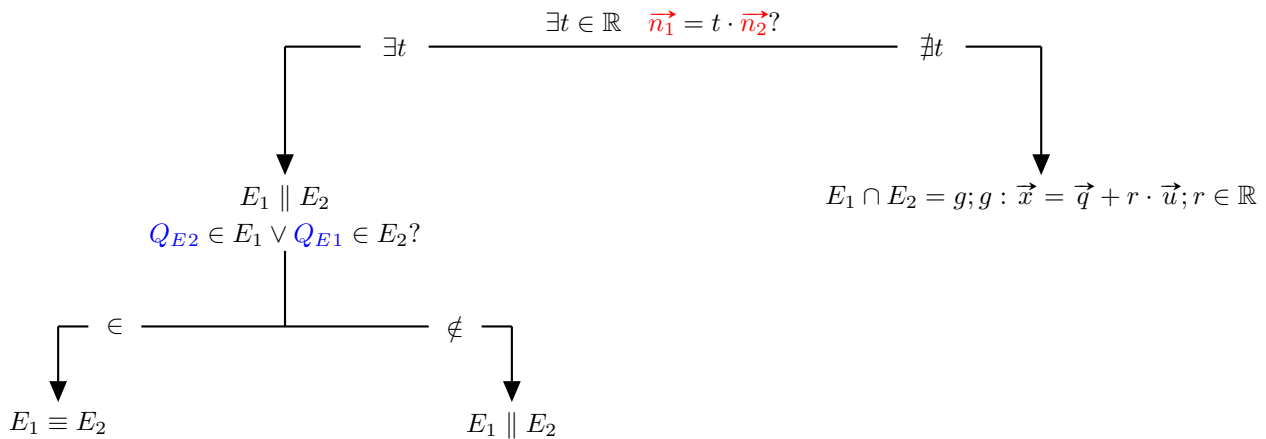


3) ...**sich schneiden**





Die Lagebeziehung zwischen zwei Ebenen  $E_1$  und  $E_2$  lässt sich wie folgt ermitteln:



Für die Berechnung der Schnittgeraden gibt es unterschiedliche Ansätze abhängig von der Ausgangssituation, welche durch die zwei möglichen Darstellungsweisen von Ebenen bedingt sind. Drei mögliche Fälle können auftreten:

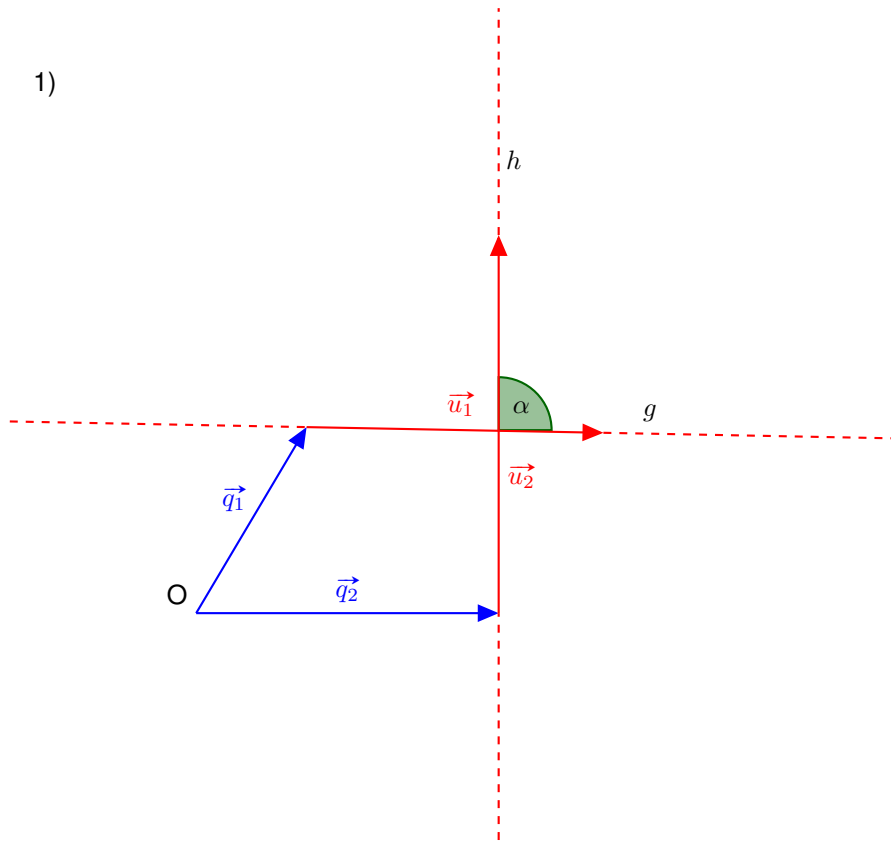
- 1)  $E_1: \vec{n}_1 \cdot x_1 + \vec{n}_2 \cdot x_2 + \vec{n}_3 \cdot x_3 = d; \quad d = \vec{n}_1 \cdot \vec{q}_1 + \vec{n}_2 \cdot \vec{q}_2 + \vec{n}_3 \cdot \vec{q}_3 \wedge E_2: \vec{n}_1 \cdot x_1 + \vec{n}_2 \cdot x_2 + \vec{n}_3 \cdot x_3 = d; \quad d = \vec{n}_1 \cdot \vec{q}_1 + \vec{n}_2 \cdot \vec{q}_2 + \vec{n}_3 \cdot \vec{q}_3$
- 2)  $E_1: \vec{n}_1 \cdot x_1 + \vec{n}_2 \cdot x_2 + \vec{n}_3 \cdot x_3 = d; \quad d = \vec{n}_1 \cdot \vec{q}_1 + \vec{n}_2 \cdot \vec{q}_2 + \vec{n}_3 \cdot \vec{q}_3 \wedge E_2: \vec{x} = \vec{p} + s \cdot \vec{u} + t \cdot \vec{v}; \quad s, t \in \mathbb{R}$
- 3)  $E_1: \vec{x} = \vec{p} + s \cdot \vec{u} + t \cdot \vec{v}; \quad s, t \in \mathbb{R} \wedge E_2: \vec{x} = \vec{p} + s \cdot \vec{u} + t \cdot \vec{v}; \quad s, t \in \mathbb{R}$

### 8.8.4 Winkel zwischen Ebenen (und Geraden)

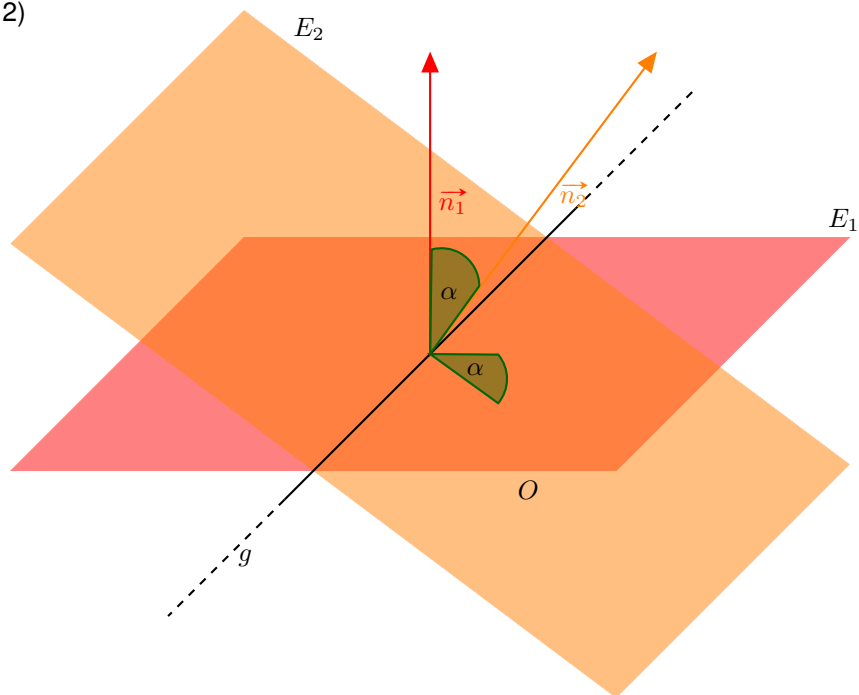
Die einzige bisher angesprochene Möglichkeit den Winkel zwischen zwei geometrischen Formen zu ermitteln macht sich der Definition des Skalarprodukts zunutze. Wie bereits erläutert gilt:  $\cos(\alpha) = \frac{|\vec{v} \odot \vec{u}|}{|\vec{v}| \cdot |\vec{u}|}$ . Hierbei soll erneut hervorgehoben werden, dass der Winkel der "kleinere" der beiden möglichen ist. Den anderen erhält man in Abhängigkeit des ersten. Daraus lässt sich ableiten wie zwei Geraden oder Ebenen oder auch eine Gerade und eine Ebene zueinander stehen:

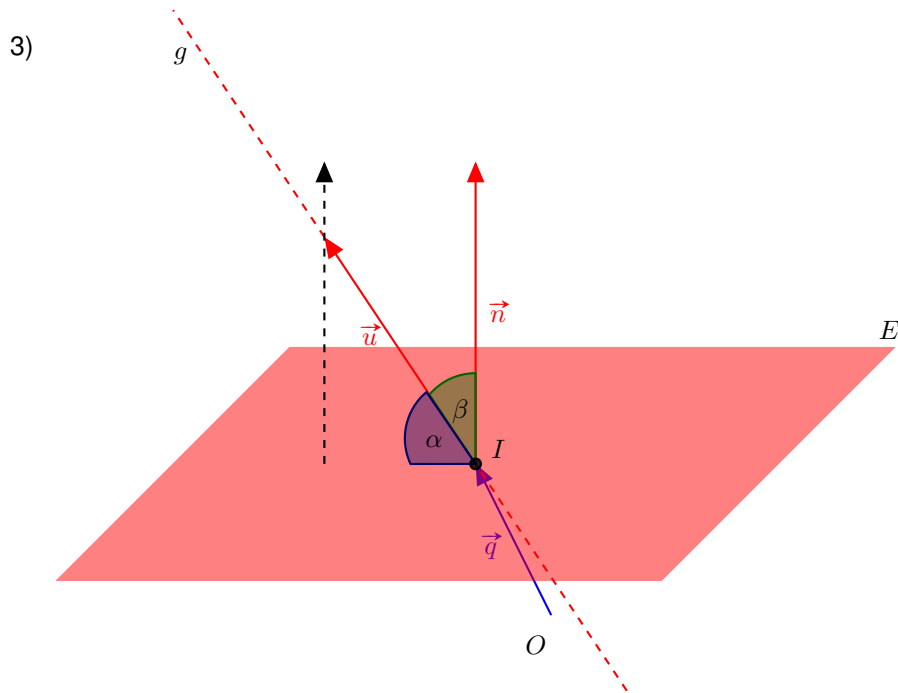
- 1) Geraden:  $\cos(\alpha) = \frac{|\vec{u}_1 \odot \vec{u}_2|}{|\vec{u}_1| \cdot |\vec{u}_2|}$
- 2) Ebenen:  $\cos(\alpha) = \frac{|\vec{n}_1 \odot \vec{n}_2|}{|\vec{n}_1| \cdot |\vec{n}_2|}$
- 3) Gerade / Ebene:  $\sin(\alpha) = \frac{|\vec{u} \odot \vec{n}|}{|\vec{u}| \cdot |\vec{n}|}$

1)



2)



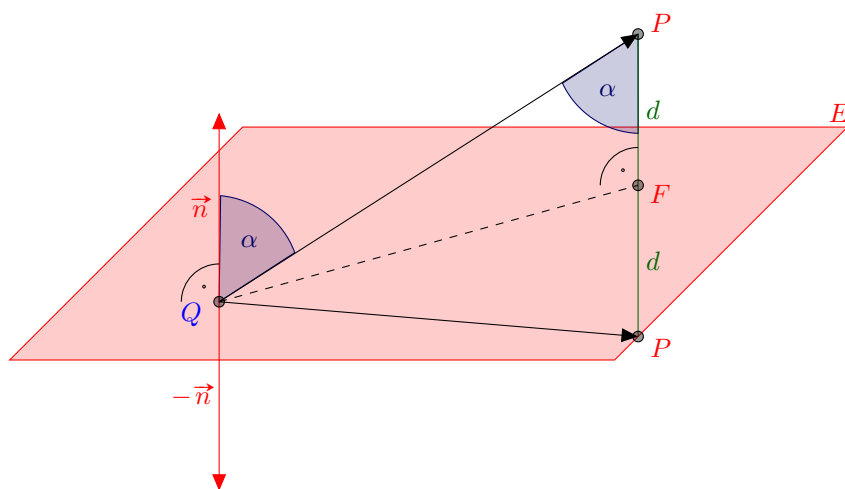


### 8.8.5 Abstand zu einem Punkt

Eine simple und intuitive Art den Abstand einer Ebene  $E$  zu einem Punkt  $P$  zu bestimmen, wäre eine Gerade zu erstellen, welche durch  $P$  geht und die als Richtungsvektor den Normalenvektor  $E$ s hat, da  $\vec{n}$  per Definition orthogonal zu  $E$  ist und somit ein anderer kollinearer Vektor den "schnellst möglichen Weg zum Punkt" darstellt. Anschließend müsste man den Schnittpunkt der Geraden und  $E$  und die Norm des somit erhaltenen Vektors berechnen. Es sticht einem schnell ins Auge, dass dies ein großer Aufwand ist. Tatsächlich gibt es einen für das Abitur zugelassenen schnelleren Lösungsweg: die **Hess'sche Normalenform**.

#### Definition - Hess'sche Normalenform

Die Hess'sche Normalenform ist eine besondere Normalenform einer Ebene, dadurch besonders, dass der Normalenvektor normiert ist. Sie lässt sich wie folgt ableiten:  $E_h : \frac{\vec{n} \odot [\vec{x} - \vec{q}]}{|\vec{n}|} = 0$



Anhand dieser Graphik lässt sich die Formel zur Berechnung des Abstands eines Punktes zu einer Ebene ablesen:  $d = \frac{|\vec{n} \odot (\vec{p} - \vec{q})|}{|\vec{n}|}$

## Beweis

$$\overrightarrow{FP} = r \cdot \vec{n}; r \in \mathbb{R}^+:$$

Nach Theoremen der Trigonometrie und der Definition des Skalarprodukts gilt:

$$\begin{aligned} \cos(\alpha) &= \frac{d}{|\overrightarrow{QP}|} \\ \cos(\alpha) &= \frac{\vec{n} \odot \overrightarrow{QP}}{|\vec{n}| \cdot |\overrightarrow{QP}|} \end{aligned}$$

Daraus folgt:

$$\begin{aligned} \frac{d}{|\overrightarrow{QP}|} &= \frac{\vec{n} \odot \overrightarrow{QP}}{|\vec{n}| \cdot |\overrightarrow{QP}|} \\ d &= \frac{\vec{n} \odot \overrightarrow{QP}}{|\vec{n}|} \\ d &= \frac{\vec{n} \odot (\vec{p} - \vec{q})}{|\vec{n}|} \end{aligned}$$

$$\overrightarrow{FP} = r \cdot \vec{n}; r \in \mathbb{R}^-:$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{|\overrightarrow{QP}|} &= \frac{-\vec{n} \odot \overrightarrow{QP}}{|-\vec{n}| \cdot |\overrightarrow{QP}|} \\ d &= -\frac{\vec{n} \odot \overrightarrow{QP}}{|\vec{n}|} \\ d &= -\frac{\vec{n} \odot (\vec{p} - \vec{q})}{|\vec{n}|} \end{aligned}$$

Somit lautet die gesuchte Formel:  $d = \frac{|\vec{n} \odot (\vec{p} - \vec{q})|}{|\vec{n}|}$

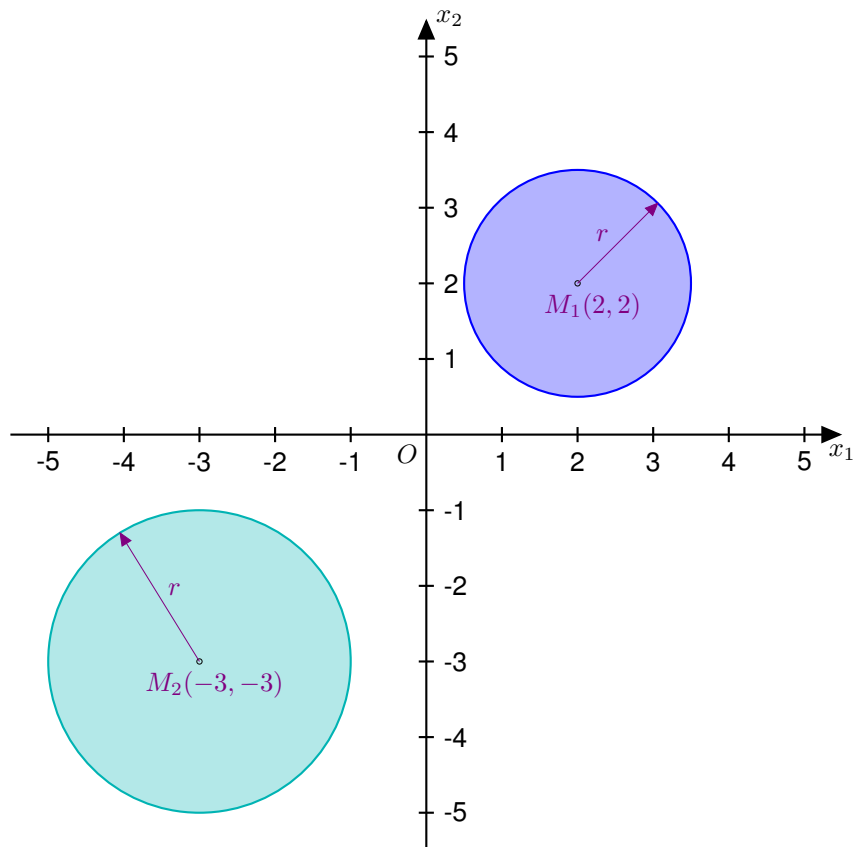
□

## 8.9 Kreise und Sphären

Letzte relevant Objektgruppe ist die der Kreise und Sphären, wobei Letztere lediglich auf den  $\mathbb{R}^3$  angewandte Formen der Ersten sind.

### 8.9.1 Kreise

Kreise werden über einen **Mittelpunkt** und einen **Radius** definiert. Alle Punkte, welche einen Distanz gleich dem Radius zum Mittelpunkt aufweisen, sind teil der Kreismenge, die den Kreis algebraisch beschreibt. Wie bei allen anderen Sektoren der Geometrie ist es von Nöten, das Ganze zu visualisieren:



Hieraus ergibt sich eine einfache Formel, um einen Kreis zu definieren, aus welcher auch die allgemeine Kreisgleichung folgt:

$$\begin{aligned}
 |\overrightarrow{MP}| &= r; P \in M_K \text{ mit } M_K \text{ Kreismenge} \\
 \Leftrightarrow |\overrightarrow{MP}|^2 &= r^2 \\
 \Leftrightarrow |\vec{p} - \vec{m}|^2 &= r^2 \\
 \Leftrightarrow \left| \begin{pmatrix} x - a \\ y - b \end{pmatrix} \right|^2 &= r^2; (x, y) = (p_x, p_y) \wedge (a, b) = (m_x, m_y) \\
 \Leftrightarrow \left( \sqrt{(x - a)^2 + (y - b)^2} \right)^2 &= r^2 \\
 \Leftrightarrow (x - a)^2 + (y - b)^2 &= r^2
 \end{aligned}$$

Wie die Graphik es bereits verdeutlicht, kann es von Nutzen sein mit einer Kreisscheibe zu arbeiten. Diese wird über die Menge der Punkte, die innerhalb des Kreises liegen, definiert. Somit erschließt sich, dass jeglicher Punkt, der eine Entfernung zum Mittelpunkt, welche kleiner als der oder gleich dem Radius ist, teil dieser Kreisscheibe ist:

$$|\overrightarrow{MP}| \leq r; P \in M_K$$

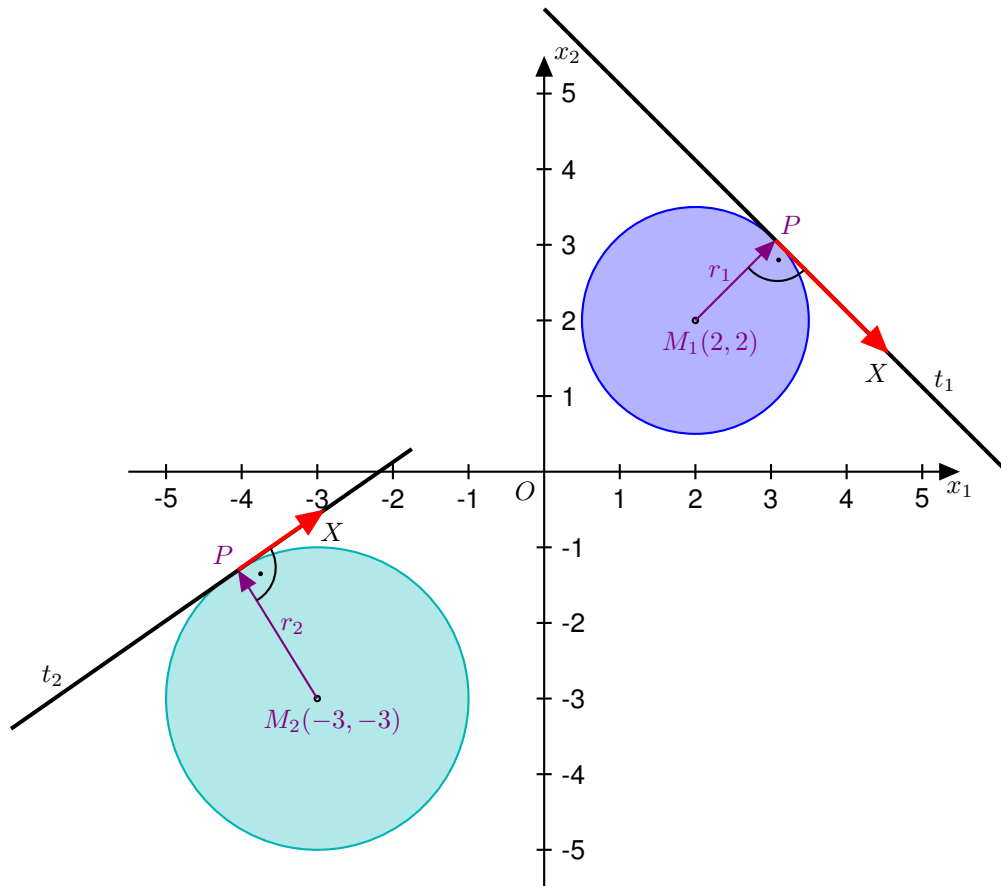
#### Bemerkung:

Anhand dessen lässt sich bereits eine Eigenschaft eines Kreises im Vektorraum erkennen: **er ist lediglich im  $\mathbb{R}^2$  definierbar**. Überträgt man diese Formel in einen Raum mit mehr Dimensionen erhält man eine Sphäre oder gar eine Hypersphäre.

## Tangenten an einen Kreis

### Definition

Eine Tangente an einen Punkt eines Kreises ist vergleichbar mit der an einen Punkt einer Kurve. Sie ist gerade zu der Geraden äquivalent, die **den Kreis in diesem Punkt berührt**. Dies impliziert auch, dass es nur eine Menge identischer Geraden gibt, welche erfolgreich als Tangente kandidieren können.



Erneut liefert uns die Graphik eine generelle Formel:

$$\begin{aligned}
 \overrightarrow{MP} \odot \overrightarrow{PX} &= 0; P \in M_K, X \in M_T \text{ mit } M_K \text{ und } M_T \text{ Kreis- und Tangentenmenge} \\
 \Leftrightarrow (\vec{p} - \vec{m}) \odot (\vec{x} - \vec{p}) &= 0 \quad | + (\vec{p} - \vec{m})^2 \\
 \Leftrightarrow (\vec{p} - \vec{m}) \odot (\vec{x} - \vec{p}) + (\vec{p} - \vec{m})^2 &= (\vec{p} - \vec{m})^2 \\
 \Leftrightarrow (\vec{p} - \vec{m}) \odot ((\vec{x} - \vec{p}) + (\vec{p} - \vec{m})) &= (\vec{p} - \vec{m})^2 \\
 \Leftrightarrow (\vec{p} - \vec{m}) \odot (\vec{x} - \vec{m}) &= r^2
 \end{aligned}$$

## Polare an einen Kreis

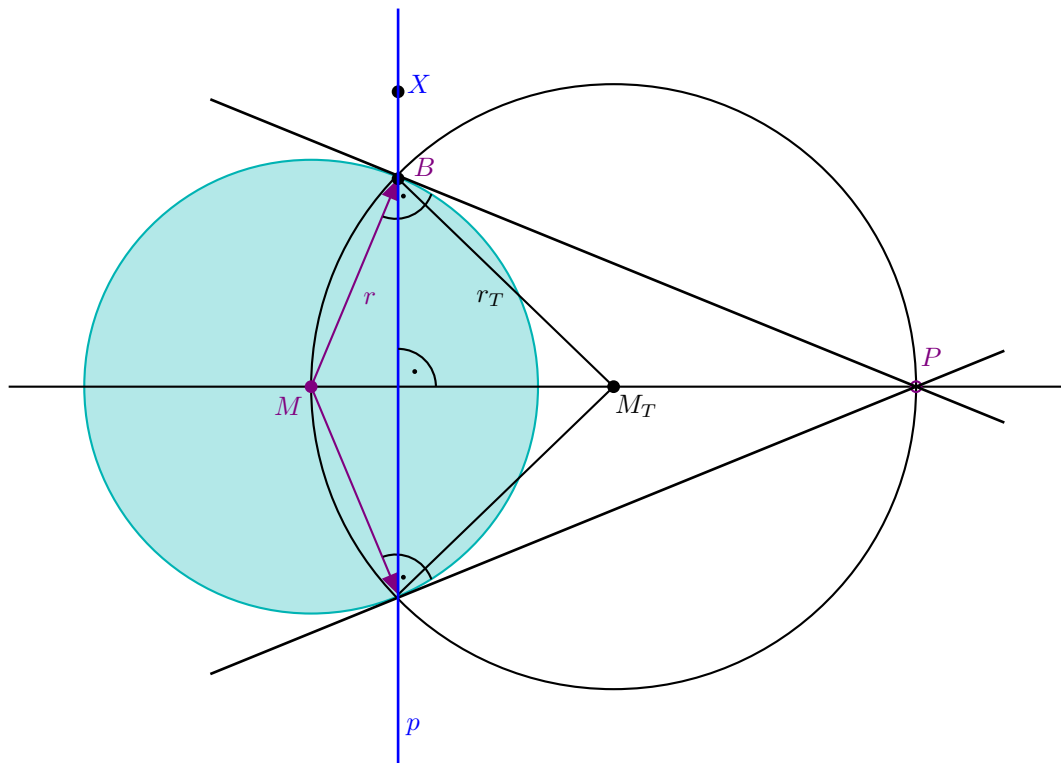
### Definition

Sei  $\mathcal{C}$  ein Kreis mit Mittelpunkt  $M$  und  $P$  ein Punkt mit  $|\overrightarrow{MP}| \not\leq r$ . Des Weiteren seien die zwei Tangenten(mengen) an den Kreis, die durch den Punkt  $P$  gehen, gegeben. Dann bezeichnet man die Gerade, welche die Berührungspunkte der Tangenten beinhaltet, als **Polare an den Kreis  $\mathcal{C}$  zum Punkt  $P$** .

Bemerkung:

Tatsächlich ist das nur die halbe Wahrheit, die Polare existiert für alle  $P$  ungleich  $M$ . Sie landet dann außerhalb des Kreises und schneidet diesen nicht (berührt ihn in einem, wenn gilt  $|\overrightarrow{MP}| = r$ ).

Die Prozedur sollte allmählich bekannt vorkommen:

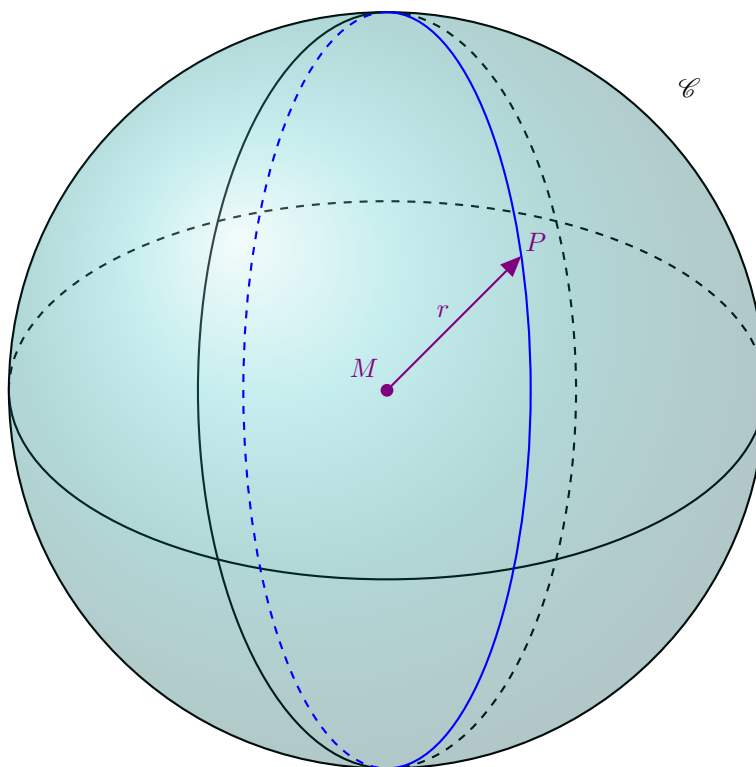


Wenn auch ein wenig um mehr Ecken gedacht als üblich:

$$\begin{aligned} & \left| \begin{array}{l} \overrightarrow{MB} \odot \overrightarrow{PB} = 0 \\ \overrightarrow{MP} \odot \overrightarrow{BX} = 0 \end{array} \right| \\ \Leftrightarrow & \left| \begin{array}{l} (\vec{b} - \vec{m}) \odot (\vec{b} - \vec{p}) = 0 \\ (\vec{p} - \vec{m}) \odot (\vec{x} - \vec{b}) = 0 \end{array} \right| \quad \text{Nach der bereits aufgestellten Formel für Tangenten} \\ \Leftrightarrow & \left| \begin{array}{l} (\vec{b} - \vec{m}) \odot (\vec{p} - \vec{m}) = r^2 \\ (\vec{p} - \vec{m}) \odot (\vec{x} - \vec{b}) = 0 \end{array} \right| \quad (1) + (2) \\ \Leftrightarrow & (\vec{p} - \vec{m})((\vec{x} - \vec{b}) + (\vec{b} - \vec{m})) = r^2 \\ \Leftrightarrow & (\vec{p} - \vec{m})(\vec{x} - \vec{m}) = r^2 \end{aligned}$$

### 8.9.2 Sphären

Sphären werden wie Kreise über einen **Mittelpunkt** und einen **Radius** definiert. Alle Punkte, welche einen Distanz gleich dem Radius zum Mittelpunkt aufweisen, sind teil der Sphärenmenge, die die Sphäre algebraisch beschreibt:



### Theorem - Sphärengleichung

Eine Sphäre im  $\mathbb{R}^n; n \geq 3$  mit Mittelpunkt  $M$  und Radius  $r$  ist eindeutig über die folgende Gleichung definiert:

$$|\overrightarrow{MP}| = r; P \in M_{\mathcal{C}}$$

Die algebraische Formel lautet somit wie folgt:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 + (z - c)^2 = r^2; (x, y, z) = (p_x, p_y, p_z) \wedge (a, b, c) = (m_x, m_y, m_z)$$

### Beweis

$$\begin{aligned} & |\overrightarrow{MP}| = r; P \in M_{\mathcal{C}} \text{ mit } M_{\mathcal{C}} \text{ Kreismenge} \\ \Leftrightarrow & |\overrightarrow{MP}|^2 = r^2 \\ \Leftrightarrow & |\vec{p} - \vec{m}|^2 = r^2 \\ \Leftrightarrow & \left| \begin{pmatrix} x - a \\ y - b \\ z - c \end{pmatrix} \right|^2 = r^2; (x, y, z) = (p_x, p_y, p_z) \wedge (a, b, c) = (m_x, m_y, m_z) \\ \Leftrightarrow & \left( \sqrt{(x - a)^2 + (y - b)^2 + (z - c)^2} \right)^2 = r^2 \\ \Leftrightarrow & (x - a)^2 + (y - b)^2 + (z - c)^2 = r^2 \end{aligned}$$

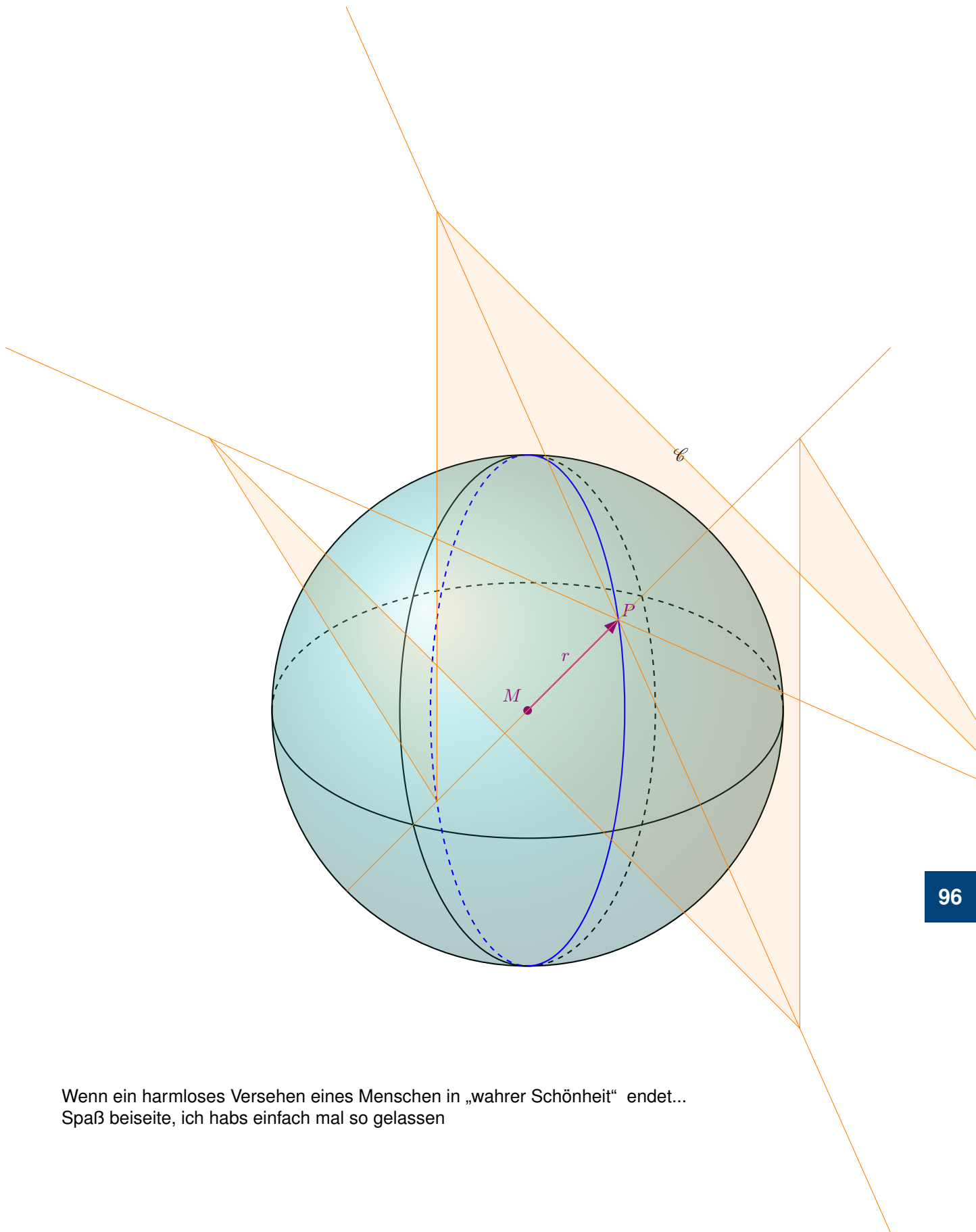
□

### Tangenten an eine Sphäre

#### Definition

Die Tangente in einem Punkt an eine Sphäre unterscheidet sich nur in einer Eigenschaft von der an einen Kreis: mehrere nicht identische Geraden berühren eine Sphäre in einem Punkt. Tatsächlich stellt diese Menge von Geraden eine Ebene dar: die **Tangentialebene**.





Wenn ein harmloses Versehen eines Menschen in „wahrer Schönheit“ endet...  
Spaß beiseite, ich habs einfach mal so gelassen

## Theorem - Tangentialebene

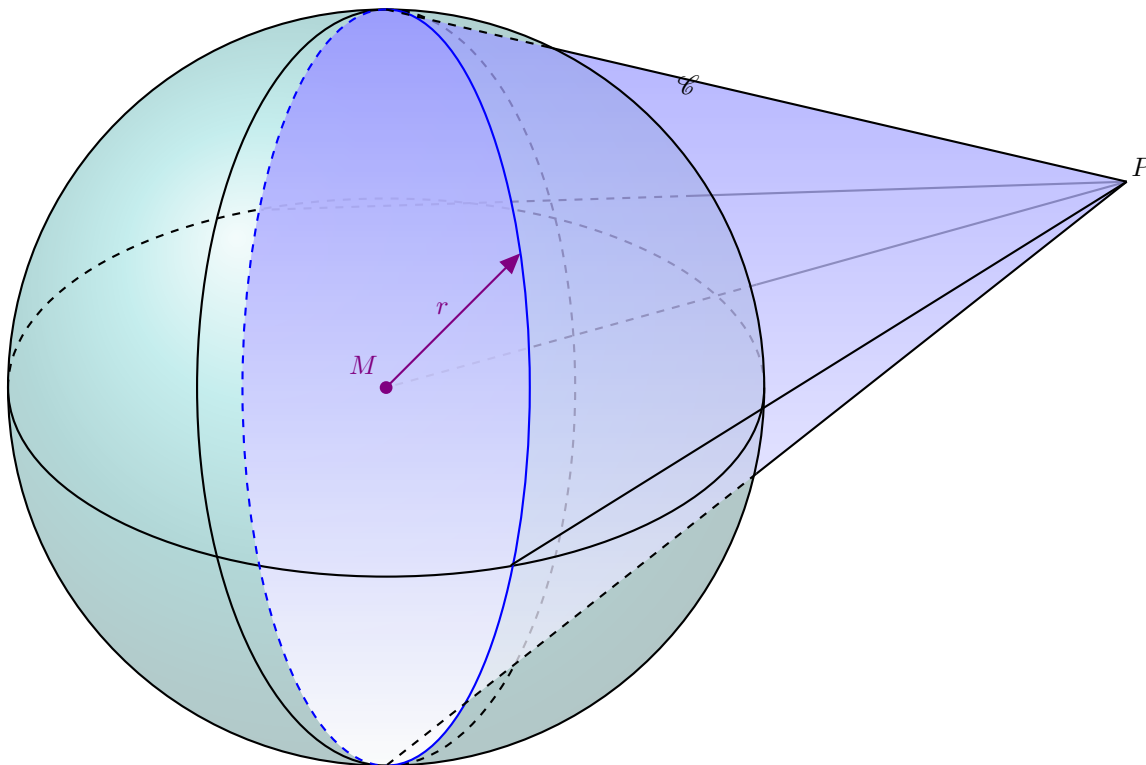
Für die Tangentialebene an eine Sphäre  $\mathcal{C}$ , mit Mittelpunkt  $M$  und Radius  $r$ , in einem Punkt  $P$  gilt:

$$|\overrightarrow{MP}| = r$$

## Polarebene?

## Definition

Sei  $\mathcal{C}$  eine Sphäre mit Mittelpunkt  $M$  und  $P$  ein Punkt mit  $|\overrightarrow{MP}| \neq r$ . Des Weiteren seien die überabzählbar vielen Tangenten(mengen) an  $\mathcal{C}$ , die durch den Punkt  $P$  gehen, gegeben. Dann bezeichnet man die Ebene, welche die Berührungspunkte der Tangenten beinhaltet, als **Polare an die Sphäre  $\mathcal{C}$  zum Punkt  $P$** .



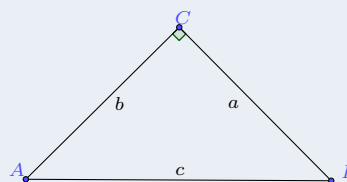
## 8.10 Sätze

## 8.10.1 Sätze des Pythagoras

## Theorem

In einem rechtwinkligen Dreieck  $\triangle ABC$  gilt:

$$a^2 + b^2 = c^2$$



## Beweis

Man modelliere die 3 Seiten durch Vektoren,  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  und  $\vec{c}$ .  
Es gilt:

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = 0$$

$$a_1 b_1 + a_2 b_2 = 0$$

Außerdem:

$$\begin{aligned} |\vec{a} + \vec{b}| &= \sqrt{(b_1 - a_1)^2 + (b_2 - a_2)^2} \\ &= \sqrt{b_1^2 - 2b_1 a_1 + a_1^2 + b_2^2 - 2b_2 a_2 + a_2^2} \\ &= \sqrt{b_1^2 + b_2^2 + a_1^2 + a_2^2 - 2(b_1 a_1 + b_2 a_2)} \\ &= \sqrt{b_1^2 + b_2^2 + a_1^2 + a_2^2} \\ &= |\vec{c}|, \text{ denn } \vec{a} + \vec{b} = \vec{c} \\ \Leftrightarrow |\vec{c}|^2 &= b_1^2 + b_2^2 + a_1^2 + a_2^2 \\ \Leftrightarrow |\vec{c}|^2 &= |\vec{a}|^2 + |\vec{b}|^2 \\ \Leftrightarrow c^2 &= a^2 + b^2 \end{aligned}$$

□

## Bemerkung:

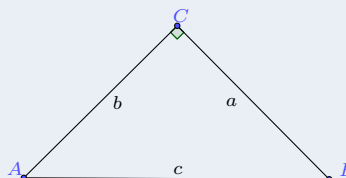
Dieser Beweis ist weitaus intuitiver und einfacher, wenn er in der klassischen Geometrie vollführt wird, aber das Ziel ist der Beweis über Vektoren, und somit analytisch.

## Theorem - Umkehrung

Falls für ein Dreieck  $\triangle ABC$  gilt:

$$a^2 + b^2 = c^2$$

Dann ist dieses Dreieck in  $C$  rechtwinklig.



## Beweis

Sind Äquivalenzumformungen nicht schön?

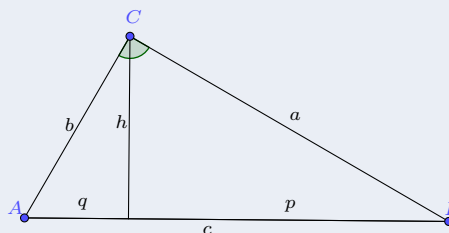
□

## 8.10.2 Euklids Sätze

## Theorem - Kathetensatz

In einem in  $C$  rechtwinkligen Dreieck  $\triangle ABC$  mit  $h$  der Höhe zu  $C$  gilt:

- $a^2 = p \cdot c$
- $b^2 = q \cdot c$



## Beweis

•

$$a^2 = c^2 - b^2 \quad | \text{Pythagoras}$$

$$= c^2 - (q^2 + h^2)$$

$$= c^2 - ((c-p)^2 + (a^2 - p^2))$$

$$= c^2 - c^2 + 2cp - p^2 - a^2 + p^2$$

$$\Leftrightarrow 2a^2 = 2cp$$

$$\Leftrightarrow a^2 = cp$$

•

$$b^2 = c^2 - a^2 \quad | \text{Pythagoras}$$

$$= c^2 - (p^2 + h^2)$$

$$= c^2 - ((c-q)^2 + (b^2 - q^2))$$

$$= c^2 - c^2 + 2cq - q^2 - b^2 + q^2$$

$$\Leftrightarrow 2b^2 = 2cq$$

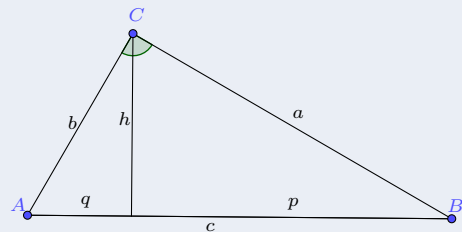
$$\Leftrightarrow b^2 = cq$$

□

## Theorem - Höhensatz

In einem in  $C$  rechtwinkligen Dreieck  $\triangle ABC$  mit  $h$  der Höhe zu  $C$  gilt:

$$h^2 = p \cdot q$$



## Beweis

 $\Leftrightarrow$ 

$$a^2 + b^2 = c^2$$

 $\Leftrightarrow$ 

$$p^2 + h^2 + q^2 + h^2 = (p+q)^2$$

 $\Leftrightarrow$ 

$$p^2 + h^2 + q^2 + h^2 = p^2 + 2pq + q^2$$

 $\Leftrightarrow$ 

$$h^2 + h^2 = 2pq$$

 $\Leftrightarrow$ 

$$2h^2 = 2pq$$

 $\Leftrightarrow$ 

$$h^2 = pq$$

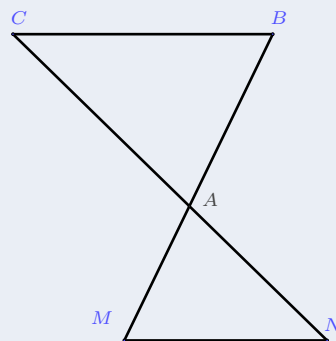
□

## 8.10.3 Strahlensätze

## Theorem

Sei ein Dreieck  $\triangle ABC$  mit M einem Punkt der Geraden  $(AB)$  und N einem Punkt der Geraden  $(AC)$ . Wenn  $(BC) \parallel (MN)$ , dann gilt:

$$\frac{AM}{AB} = \frac{AN}{AC} = \frac{MN}{BC}$$



## Beweis

$$\begin{aligned} (BC) \parallel (MN) &\Leftrightarrow \overrightarrow{BC} = k \cdot \overrightarrow{MN}, k \in \mathbb{R} \\ &= k \cdot (\overrightarrow{MA} + \overrightarrow{AN}) \\ &= \overrightarrow{BA} + \overrightarrow{AC} \end{aligned}$$

|Die Vektoren sind kollinear.

$$\overrightarrow{MN} = \overrightarrow{MA} + \overrightarrow{AN}$$

Da  $\overrightarrow{MA}$  und  $\overrightarrow{BA}$  kollinear sind, und  $\overrightarrow{AN}$  und  $\overrightarrow{AC}$  auch, gilt:

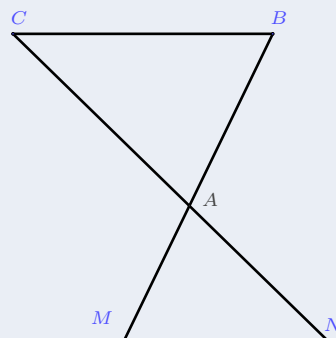
$$\left\{ \begin{array}{l} |\overrightarrow{BA}| = k \cdot |\overrightarrow{MA}| \\ |\overrightarrow{AC}| = k \cdot |\overrightarrow{AN}| \\ |\overrightarrow{BC}| = k \cdot |\overrightarrow{MN}| \end{array} \right\} \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \frac{|\overrightarrow{BA}|}{|\overrightarrow{MA}|} = k \\ \frac{|\overrightarrow{AC}|}{|\overrightarrow{AN}|} = k \\ \frac{|\overrightarrow{BC}|}{|\overrightarrow{MN}|} = k \end{array} \right\} \Leftrightarrow \frac{|\overrightarrow{BA}|}{|\overrightarrow{MA}|} = \frac{|\overrightarrow{AC}|}{|\overrightarrow{AN}|} = \frac{|\overrightarrow{BC}|}{|\overrightarrow{MN}|} \Leftrightarrow \frac{|\overrightarrow{MA}|}{|\overrightarrow{BA}|} = \frac{|\overrightarrow{AN}|}{|\overrightarrow{AC}|} = \frac{|\overrightarrow{MN}|}{|\overrightarrow{BC}|} \quad \square$$

## Theorem - Umkehrung

Sei ein Dreieck  $\triangle ABC$  mit M einem Punkt der Geraden  $(AB)$  und N einem Punkt der Geraden  $(AC)$ . Wenn gilt:

$$\frac{AM}{AB} = \frac{AN}{AC}$$

Dann ist  $(BC) \parallel (MN)$ .



## Beweis

Auch hier profitieren wir von Äquivalenzumformungen. □

### 8.10.4 Der Satz des Apollonios

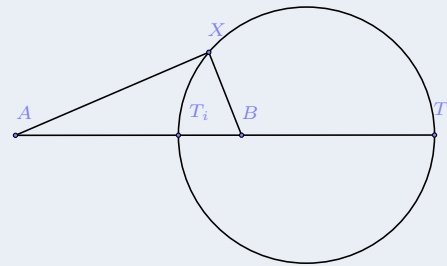
#### Theorem

Gegeben sind: Eine Strecke  $[AB]$  und eine positive Zahl  $\lambda \in \mathbb{R}^+ \setminus \{1\}$ . Dann ist die Punktmenge

$$M_A = \left\{ X \mid \frac{AX}{BX} = \lambda \right\}$$

ein Kreis, den man **Kreis des Apollonios** nennt.

Anschaulich:



## Beweis

Anfangen kann man den Beweis damit, dass man zwei Punkte sucht, die die Bedingung erfüllen **und** auf der Geraden  $AB$  liegen. Logisch ist, dass einer dieser Punkte zwischen  $A$  und  $B$  sein wird, dieser wird **innerer Teilungspunkt**  $T_i$  genannt. Der andere Punkt liegt außerhalb der Strecke  $[AB]$  und wird **äußerer Teilungspunkt**  $T_a$  genannt.

Im letzten Schritt des Beweises wird man anhand des Skalarprodukts zeigen, dass für alle Punkte  $X$ , die ebenfalls die Verhältnisgleichung erfüllen, die Vektoren  $\overrightarrow{T_i X}$  und  $\overrightarrow{T_a X}$  orthogonal zueinander sind. Somit liegen diese Punkte auf dem Thaleskreis (frz.: Theoreme du triangle rectangle) über  $T_i$  und  $T_a$ , der dann **Apolliniuskreis** genannt wird.

1. Für möglichst einfache Koordinaten platziert man  $A$  auf den Origo,  $[AB]$  entlang der  $x$ -Achse, und kürzt  $\overline{AB}$  mit  $b$  ab. Gleichmaßen verfährt man mit den Längen  $\overline{AT_i} = t_i$  und  $\overline{AT_a} = t_a$ , und man führt den Punkt  $X(x|y)$  ein.

Hier nochmal ein Überblick:

$$\triangleright A(0|0) \quad \triangleright B(b|0) \quad \triangleright T_i(t_i|0) \quad \triangleright T_a(t_a|0) \quad \triangleright X(x|y)$$

2. Nun gilt:

$$\begin{aligned} \frac{\overline{AT_i}}{\overline{T_i B}} &= \lambda & \frac{\overline{AT_a}}{\overline{T_a B}} &= \lambda \\ \Leftrightarrow \frac{t_i}{b - t_i} &= \lambda & \Leftrightarrow \frac{t_a}{t_a - b} &= \lambda \\ \Leftrightarrow t_i &= \lambda \cdot b - \lambda \cdot t_i & \Leftrightarrow t_a &= \lambda \cdot t_a - \lambda \cdot b \\ \Leftrightarrow \lambda \cdot t_i + t_i &= \lambda \cdot b & \Leftrightarrow \lambda \cdot t_a - t_a &= \lambda \cdot b \\ \Leftrightarrow (\lambda + 1) \cdot t_i &= \lambda \cdot b & \Leftrightarrow (\lambda - 1) \cdot t_a &= \lambda \cdot b \\ \Leftrightarrow t_i &= \frac{\lambda}{\lambda + 1} \cdot b & \Leftrightarrow t_a &= \frac{\lambda}{\lambda - 1} \cdot b \end{aligned}$$

$$\bullet t_i + t_a = \frac{\lambda}{\lambda + 1} \cdot b + \frac{\lambda}{\lambda - 1} \cdot b = \left( \frac{\lambda}{\lambda + 1} + \frac{\lambda}{\lambda - 1} \right) \cdot b = \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - 1} \cdot 2b \quad (1)$$

$$\bullet t_i \cdot t_a = \frac{\lambda}{\lambda + 1} \cdot b \cdot \frac{\lambda}{\lambda - 1} \cdot b = \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - 1} \cdot b^2 \quad (2)$$

Diese Zusammenhänge werden gleich benötigt.

3. Jetzt wo wir  $T_i$  und  $T_a$  in Abhängigkeit von  $b$  und  $\lambda$  bestimmt haben, kann man die Voraussetzung auch noch auf den Punkt  $X$  anwenden.

$$\begin{aligned} \frac{\overline{AX}}{\overline{XB}} &= \lambda \\ \Leftrightarrow \frac{(\overline{AX})^2}{(\overline{XB})^2} &= \lambda^2 \\ \Leftrightarrow \frac{x^2 + y^2}{(x - b)^2 + y^2} &= \lambda^2 \\ \Leftrightarrow \frac{x^2 + y^2}{x^2 + y^2} &= \frac{\lambda^2[(x - b)^2 + y^2]}{x^2 + y^2} \\ \Leftrightarrow 0 &= \lambda^2 \cdot (x - b)^2 + \lambda^2 y^2 - x^2 - y^2 \\ &= x^2 \cdot \lambda^2 - 2bx \cdot \lambda^2 + b^2 \cdot \lambda^2 + y^2 \cdot \lambda^2 - x^2 - y^2 \quad (3) \end{aligned}$$

4. Jetzt prüft man auf Orthogonalität zwischen  $\overrightarrow{T_i X} = \begin{pmatrix} x - t_i \\ y \end{pmatrix}; \overrightarrow{T_a X} = \begin{pmatrix} x - t_a \\ y \end{pmatrix}$ .

$$\begin{aligned}
\overrightarrow{T_i X} \cdot \overrightarrow{T_a X} &= (x - t_i) \cdot (x - t_a) + y^2 \\
&= x^2 - (t_i + t_a)x + t_i \cdot t_a + y^2 && \text{Benutze (1) und (2)} \\
&= x^2 - \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - 1} \cdot 2bx + \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - 1} \cdot b^2 + y^2 \\
&= \frac{x^2 \cdot (\lambda^2 - 1) - 2bx \cdot \lambda^2 + b^2 \cdot \lambda^2 + y^2 \cdot (\lambda^2 - 1)}{\lambda^2 - 1} \\
&= \frac{x^2 \cdot \lambda^2 - 2bx \cdot \lambda^2 b^2 \cdot \lambda^2 + y^2 \cdot \lambda^2 - x^2 - y^2}{\lambda^2 - 1} && \text{Benutze (3)} \\
&= 0
\end{aligned}$$

⇒ Man hat bewiesen, dass für alle Punkte X die Vektoren  $\overrightarrow{T_i X}$  und  $\overrightarrow{T_a X}$  orthogonal zueinander sind, weshalb sie auf dem Thaleskreis über  $T_i$  und  $T_a$  liegen müssen.

□

#### Bemerkung:

Die Figur und die Zusammenhänge, die man durch den Satz des Apollonios erhalten hat, kann man benutzen, um ein wenig mit Winkeln zu spielen:

Über diese 10 Winkel lassen sich einige Beziehungen aufstellen:

$$\begin{aligned}
\triangleright \alpha + \beta + \gamma &= 180 & \triangleright \beta + \gamma_2 + \delta_2 &= 180 & \triangleright \delta_1 + \delta_2 &= 180 & \triangleright \alpha + \gamma + \epsilon + \zeta &= 180 & \triangleright \epsilon + \zeta + \eta &= 180 \\
\triangleright +\gamma_1 + \delta_1 &= 180 & \triangleright \gamma_1 + \gamma_2 &= \gamma & \triangleright \gamma_2 + \epsilon &= 90 & \triangleright \beta + \eta &= 180 & \triangleright \gamma_2 + \delta_2 + \epsilon + \zeta &= 180
\end{aligned}$$

Löst man dieses Gleichungssystem, erhält man  $\gamma_1 = \gamma_2$ , was bedeutet, dass die Gerade  $T_i X$  Winkelhalbierende des Winkels  $\gamma = \angle AXB$  ist:



## KOMPLEXE ZAHLEN

by PASCAL

### 9.1 Einführung

Die Ursache für die Einführung der komplexen Zahlen ist vergleichbar mit der jeglicher anderer Zahlenmengen (abgesehen von  $\mathbb{N}$ ). Alles basiert auf einer Rechnung oder einer Menge an Rechnungen, welche für die vorhandenen Zahlenmengen **keine Lösung besitzen** oder aber diese Zahlenmengen einem nicht erlauben eine Lösung zu finden. Ein Beispiel hierfür ist die Einführung der negativen Zahlen. Gleichungen der Form  $2 + x = 1$  waren eine Zeit lang nicht lösbar. Ebenso galt einmal, dass  $x^2 - 2 = 0$  keine Lösung besitzt, da hierfür die reellen Zahlen benötigt werden. Analog dazu wird die Erweiterung auf die komplexen Zahlen begründet. Dies wird an folgendem klassischen Beispiel erläutert:

$$x^2 + 1 = 0$$

$$\Leftrightarrow x = \sqrt{-1} \quad \text{!}$$

Um dieser und anderen Gleichungen eine Lösung zuzuteilen ist es nicht nur notwendig die Zahlenmenge zu erweitern, sondern auch, neue Symbole und Zeichen einzuführen um die neuen Zahlen zu kennzeichnen. Für die  $\mathbb{Z}$  ist es das Symbol "-", für  $\mathbb{Q}$  "und  $\frac{a}{b}$ ", für  $\mathbb{R}$   $\sqrt{a}$  und die Zeichen  $\pi$  und  $e$  zum Beispiel (auch wenn beide sich anders darstellen lassen). (Ein gewisse(r) Mathematiker (Leibniz glaube ich) hat entschieden, dass das einzige benötigte Zeichen  $i$  sein sollte, da er sie imaginäre Zahl nannte (Für den Fall, dass ich hier ein bisschen was durcheinander bringe, sind Direktverbesserungen kommentarlos erlaubt und erwünscht). Und dem war so, weshalb nun gilt:

$$i \in \mathbb{C} : i^2 = -1; \mathbb{C} = \mathbb{R} \cup \{i\}$$

#### Definition

Komplexe Zahlen werden standardmäßig mit dem Buchstaben  $z$  dargestellt. Die allgemeine Formel einer solchen Zahl lautet:

$$z = \underbrace{x}_{\text{Re}(z)} + \underbrace{y \cdot i}_{\text{Im}(z)}; x, y \in \mathbb{R}; i \in \mathbb{C}$$

Hierbei wird  $x = \text{Re}(z)$  Realteil und  $y = \text{Im}(z)$  und zwar **nur**  $y$  Imaginärteil genannt.

#### Bemerkung:

Eine Zahl  $z = x + yi \in \mathbb{C}$  heißt rein imaginäre Zahl für  $x = 0$ . Analog dazu wird sie für  $y = 0$  als reell bezeichnet.

### 9.2 Der Körper der komplexen Zahlen

Da wir nun wissen (oder halt auch nicht), weshalb wir die komplexen Zahlen benötigen, gilt es nun die verschiedenen Verknüpfungen, mit welchen wir zwei komplexe Zahlen verbinden, zu definieren. Wie alle anderen bekannten Mengen (außer  $\mathbb{N}$ ), ist  $\mathbb{C}$  teil eines **Körpers** welcher die zwei Verknüpfungen, denen wir allgemein die Namen **Addition** und **Multiplikation** geben. Das 3-Tupel (oder auch Tripel)  $(\mathbb{C}, +, \cdot)$  ist somit der Körper, mit welchem wir arbeiten werden (jemals gefragt warum keine weiteren Verknüpfungen eingeführt wurden?). Jedoch muss auch erstmal bewiesen werden, dass dieses Tripel ein Körper ist:

## Beweis

**Die Addition:**

Für die Addition gilt bekanntlich zu beweisen, dass  $(\mathbb{C}, \oplus)$  eine abelsche oder auch kommutative Gruppe ist:

1)

$$\begin{aligned}\forall z_1, z_2 \in \mathbb{C} : z_1 \oplus z_2 &= (x_1 + y_1 i) \oplus (x_2 + y_2 i) \\ &= ((x_1 + x_2) + (y_1 + y_2) i) \\ &\in \mathbb{C} \\ \Rightarrow \forall z_1, z_2 \in \mathbb{C} : \oplus : \mathbb{C} \times \mathbb{C} &\rightarrow \mathbb{C} \quad (\text{Abgeschlossenheit})\end{aligned}$$

2)

$$\begin{aligned}(z_1 \oplus z_2) \oplus z_3 &= ((x_1 + x_2) + (y_1 + y_2) i) \oplus (x_3 + y_3 i) \\ &= ((x_1 + x_2 + x_3) + (y_1 + y_2 + y_3) i) \\ &= (x_1 + y_1 i) \oplus ((x_2 + x_3) + (y_2 + y_3) i) \\ &= (x_1 + y_1 i) \oplus ((x_2 + y_2 i) \oplus (x_3 + y_3 i)) \\ &= z_1 \oplus (z_2 \oplus z_3) \\ \Rightarrow \forall z_1, z_2, z_3 \in \mathbb{C} : (z_1 \oplus z_2) \oplus z_3 &= z_1 \oplus (z_2 \oplus z_3) \quad (\text{Assoziativität})\end{aligned}$$

3)

$$\begin{aligned}0 &= (0 + 0i) \in \mathbb{C}, \forall z \in \mathbb{C} : \\ z \oplus 0 &= (x + yi) \oplus (0 + 0i) \\ &= ((x + 0) + (y + 0) i) \\ &= (x + yi) \\ &= z \\ \Rightarrow \exists! 0 : z \oplus 0 &= z; z \in \mathbb{C} \quad (\text{Neutrales Element})\end{aligned}$$

4)

$$\begin{aligned}-z &= -(x + yi) \in \mathbb{C}, z \in \mathbb{C} : \\ z \oplus (-z) &= (x + yi) \oplus (-(x + yi)) \\ &= ((x - x) + (y - y) i) \\ &= (0 + 0i) \\ &= 0 \\ \Rightarrow \forall z \in \mathbb{C} \exists -z : z \oplus -z &= 0 \quad (\text{Inverses Element})\end{aligned}$$

5)

$$\begin{aligned}z_1 \oplus z_2 &= (x_1 + y_1 i) \oplus (x_2 + y_2 i) \\ &= ((x_1 + x_2) + (y_1 + y_2) i) \\ &= ((x_2 + x_1) + (y_2 + y_1) i) \\ &= (x_2 + y_2 i) \oplus (x_1 + y_1 i) \\ &= z_2 \oplus z_1 \\ \Rightarrow \forall z_1, z_2 \in \mathbb{C} : z_1 \oplus z_2 &= z_2 \oplus z_1 \quad (\text{Kommutativität})\end{aligned}$$

**Die Multiplikation:**

Für die Multiplikation gilt ebenfalls zu beweisen, dass  $(\mathbb{C}, \otimes)$  eine kommutative Gruppe ist:

1)

$$\begin{aligned}\forall z_1, z_2 \in \mathbb{C} : z_1 \otimes z_2 &= (x_1 + y_1 i) \otimes (x_2 + y_2 i) \\ &= ((x_1 x_2 - y_1 y_2) + (x_1 y_2 + x_2 y_1) i) \\ &\in \mathbb{C}\end{aligned}$$

$$\Rightarrow \forall z_1, z_2 \in \mathbb{C} : \otimes : \mathbb{C} \times \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C} \quad (\text{Abgeschlossenheit})$$

2)

$$\begin{aligned}(z_1 \otimes z_2) \otimes z_3 &= ((x_1 x_2 - y_1 y_2) + (x_1 y_2 + x_2 y_1) i) \otimes (x_3 + y_3 i) \\ &= ((x_1 x_2 x_3 - y_1 y_2 x_3 - x_1 y_2 y_3 - x_2 y_1 y_3) + (x_1 x_2 y_3 - y_1 y_2 y_3 + x_1 y_2 x_3 + x_2 y_1 x_3) i) \\ &= (x_1 + y_1 i) \otimes ((x_2 x_3 - y_2 y_3) + (x_2 y_3 + x_3 y_2) i) \\ &= (x_1 + y_1 i) \otimes ((x_2 + y_2 i) \otimes (x_3 + y_3 i)) \\ &= z_1 \otimes (z_2 \otimes z_3)\end{aligned}$$

$$\Rightarrow \forall z_1, z_2, z_3 \in \mathbb{C} : (z_1 \otimes z_2) \otimes z_3 = z_1 \otimes (z_2 \otimes z_3) \quad (\text{Assoziativität})$$

3)

$$1 = (1 + 0i) \in \mathbb{C}, \forall z \in \mathbb{C} :$$

$$\begin{aligned}z \otimes 1 &= (x + yi) \otimes (1 + 0i) \\ &= ((1 \cdot x - 0 \cdot y) + (1 \cdot y + 0 \cdot x) i) \\ &= (x + yi) \\ &= z\end{aligned}$$

$$\Rightarrow \exists! 1 : z \otimes 1 = z; z \in \mathbb{C} \quad (\text{Neutrales Element})$$

4)

$$z^{-1} = (x + yi)^{-1} \in \mathbb{C}, z \in \mathbb{C} :$$

$$\begin{aligned}z \otimes z^{-1} &= (x + yi) \otimes \frac{1}{(x + yi)} \\ &= \frac{(x + yi) \cdot (x - yi)}{(x + yi) \cdot (x - yi)} \\ &= \frac{((x^2 + y^2) + (0i))}{((x^2 + y^2) + (0i))} \\ &= (1 + 0i) \\ &= e\end{aligned}$$

$$\Rightarrow \forall z \in \mathbb{C} \exists z^{-1} : z \otimes z^{-1} = 1 \quad (\text{Inverses Element})$$

5)

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

$$\Rightarrow \forall z_1, z_2 \in \mathbb{C} : z_1 \otimes z_2 = z_2 \otimes z_1 \quad (\text{Kommutativität})$$

□

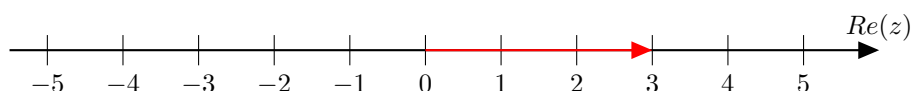
## 9.3 Die Gauß'sche Zahlenebene

### 9.3.1 Hinführung

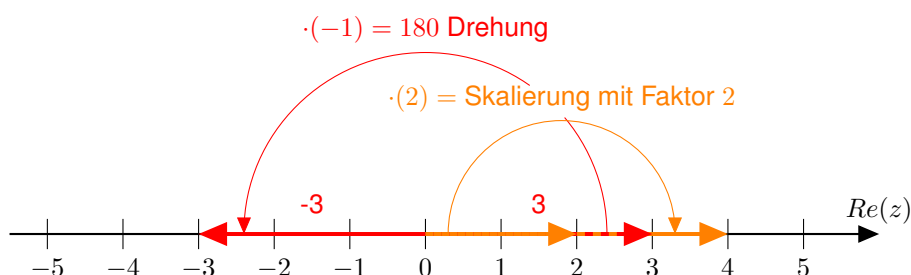
Da jetzt der Körper der komplexe Zahlen definiert wurde, gilt es ihn nun in unser bekanntes Zahlensystem zu integrieren. Hierfür kann man zum Beispiel beobachten, wie sich komplexe Zahlen auf der **reellen Zahlengerade** (welche eine Veranschaulichung des euklidischen Vektorraums  $\mathbb{R}^1$  ist) verhalten. Nun sollte erstmal der Begriff des **Zeigers** eingeführt werden.

#### Definition

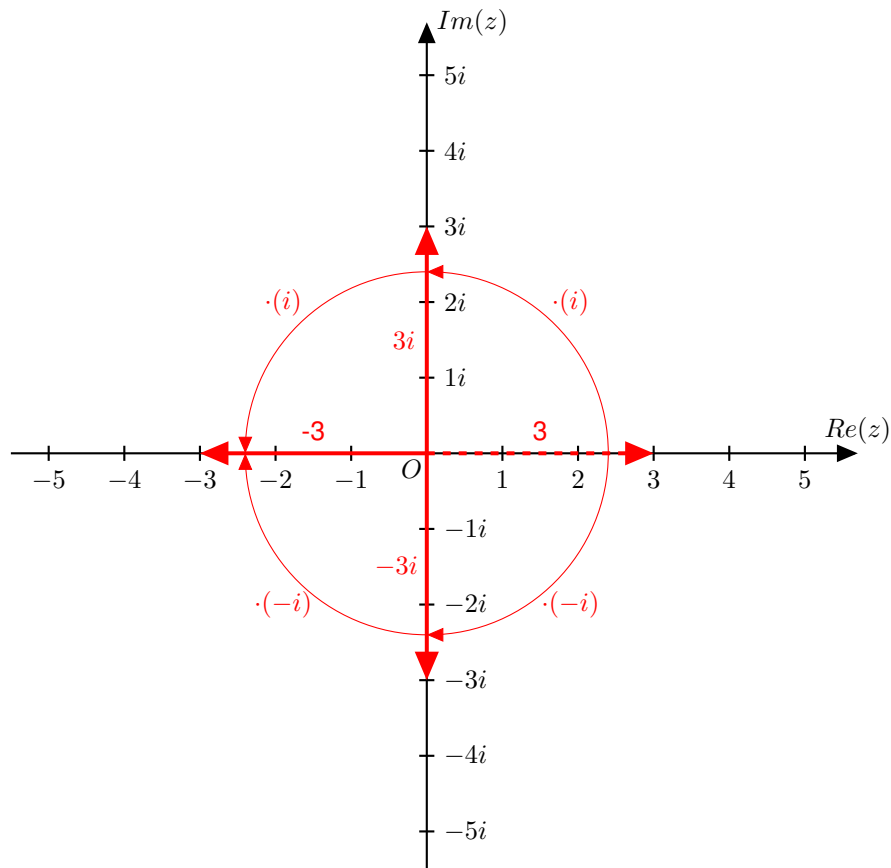
Als Zeiger definieren wir ein visuelles Hilfsmittel, welches dem Darstellungsmodul eines Vektors, einem Pfeil, sehr ähnlich ist, jedoch sich durch eine kleine Nuance von Letzterem zu unterscheiden ist.



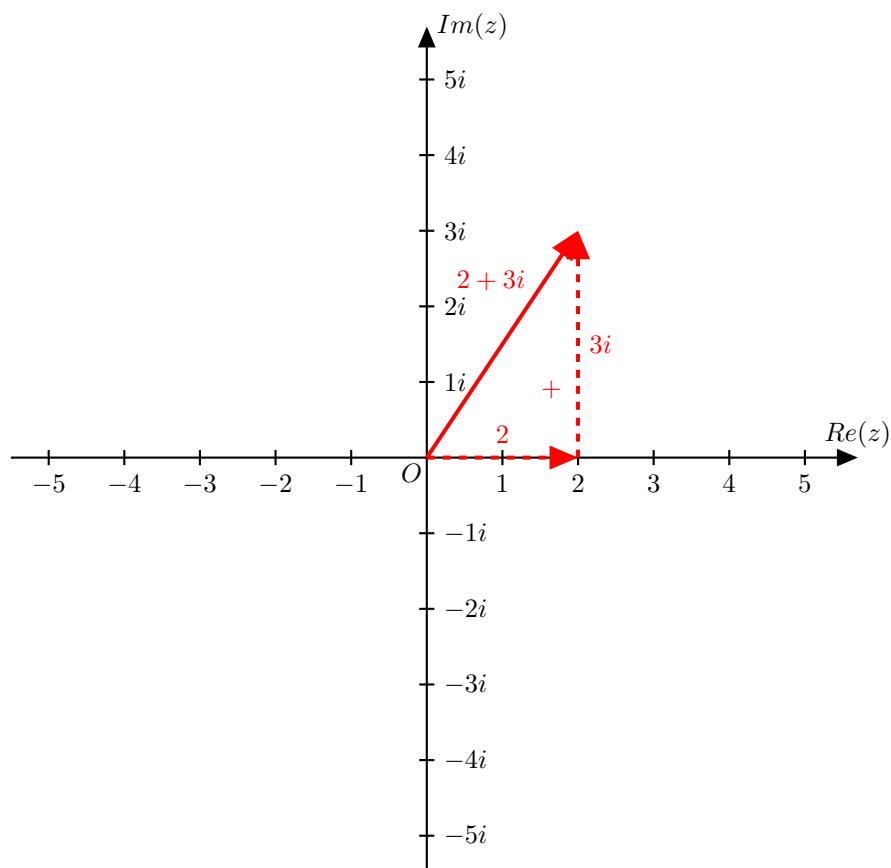
Zunächst muss verstanden werden, welche Transformation jeweils Addition und Multiplikation im  $\mathbb{R}^1$  auf reelle Zahlen ausführt. Das lässt sich am einfachsten anhand einer Graphik erklären:



Da gilt, dass:  $i^2 = -1$  ist die Multiplikation einer reellen Zahl mit  $i^2$  äquivalent zu einer 180 - Grad Drehung. Daraus lässt sich schließen, dass die Multiplikation mit  $i$  einer 90 - Grad Drehung entspricht, da:  $a \cdot i^2 = a \cdot i \cdot i; a \in \mathbb{R}$  und man davon ausgeht, dass  $\cdot(i)$  beides mal dieselbe Transformation anwendet. Somit entsteht eine wunderschöne Ebene, in der alle Zahlen zusammen spielen und sich amüsieren können:



Eine komplexe Zahl  $z = x + yi$  kann somit über einen Zeiger in der Gauß'schen Zahlenebene dargestellt werden. Für  $z = 2 + 3i$  gilt beispielsweise:



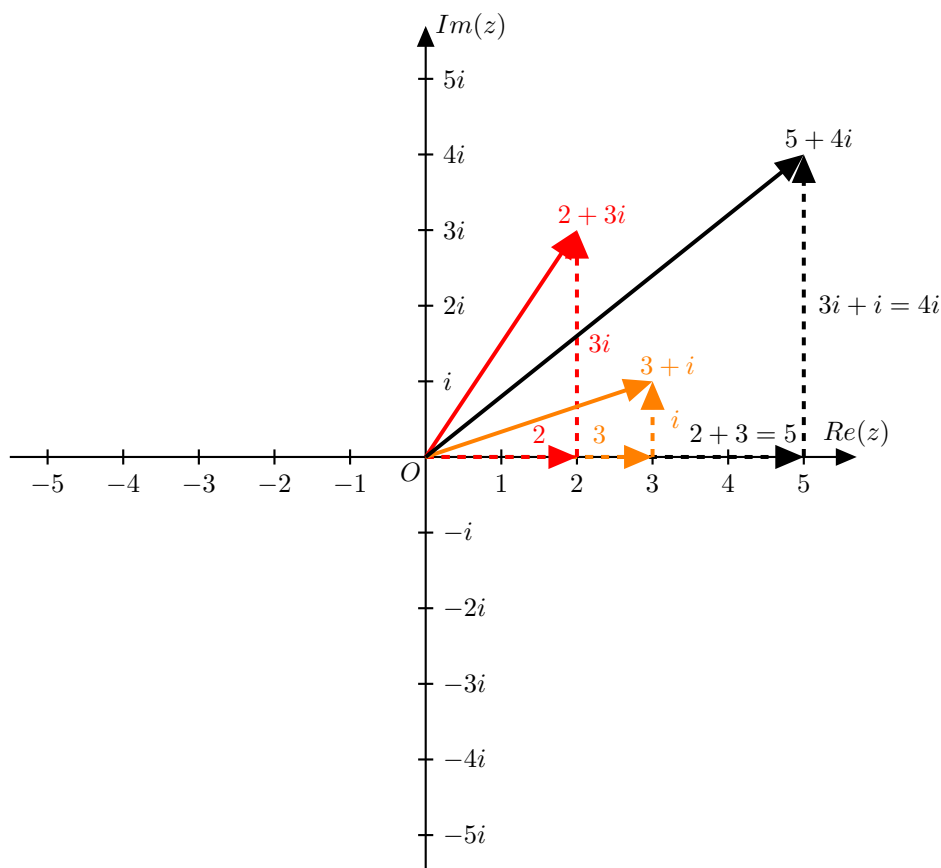
### 9.3.2 Rechenoperationen

Die bereits angesprochenen basischen Rechenoperationen lassen sich in der Gauß'schen Zahlenebene als Transformation darstellen. Weshalb dies interessant ist, wird im Verlauf dieses Abschnitts hoffentlich noch deutlich.

Die Addition ist die einfachste Transformation, weil sie equivalent zur Linearkombination bei Vektoren ist, da gilt:

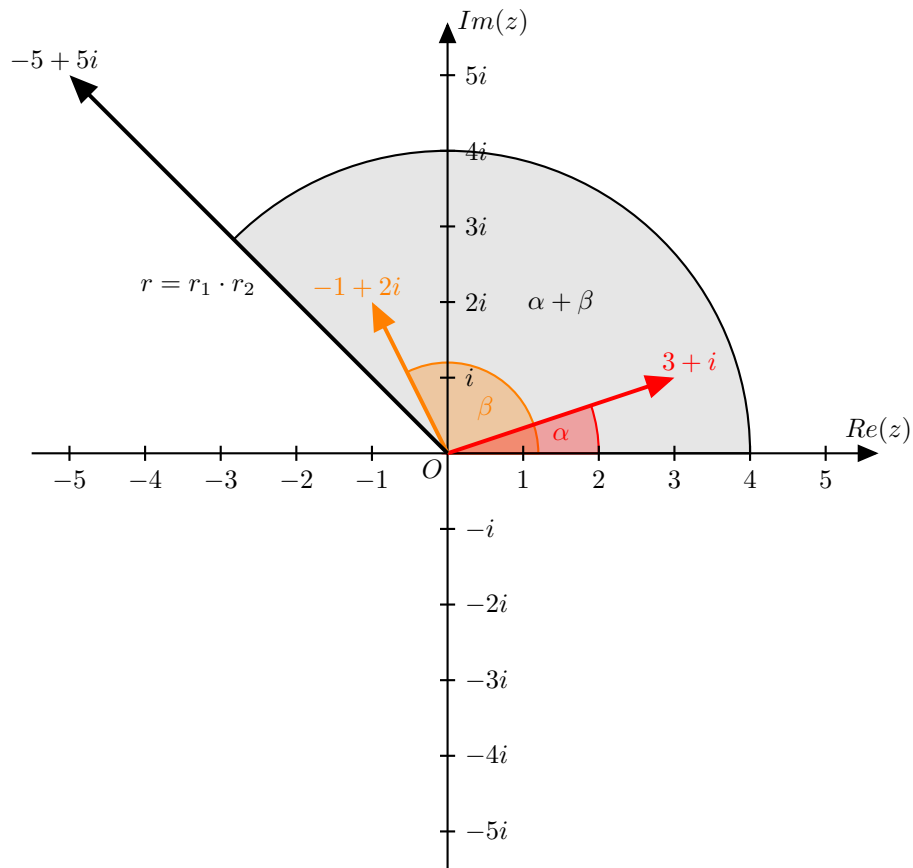
$$(z_1 + z_2) = ((x_1 + x_2) + (y_1 + y_2)i)$$

Bildlich bedeutet das:



Im Gegensatz dazu ist die Multiplikation weniger intuitiv. Aus logistischen Gründen wird sie trotz allem in diesem Abschnitt besprochen. Bildlich stellt sie eine Drehstreckung dar (auch dies wird gegen Ende des Kapitels genauer beschrieben), da gilt:

$$(z_1 \cdot z_2) = r_{1\alpha} \cdot r_{2\beta} = (r_1 \cdot r_2)_{\alpha+\beta}$$



## ALGEBRA ODER ZAHLENTHEORIE

by BRUNO

### 10.1 Körper

Ein Körper ist eine Menge  $K$ , versehen mit zwei inneren zweistelligen Verknüpfungen  $+$  und  $\cdot$ , also Addition und Multiplikation, für welche eine Addition

$$\oplus : K \times K \rightarrow K$$

$$(a; b) \mapsto a + b$$

und eine Multiplikation

$$\odot : K \times K \rightarrow K$$

$$(a; b) \mapsto a \cdot b$$

gegeben sind, sodass

*Assoziativgesetz* (A1)  $a + (b + c) = (a + b) + c$

*Kommutativgesetz* (A2)  $a + b = b + a$

*Neutrale Element* (A3)  $\exists! 0$  mit:

$$a + 0 = 0 + a = a$$

*Inverse Element* (A4)  $\forall a \in K \quad \exists! -a \in K$  mit:

$$a + (-a) = 0$$

*Assoziativgesetz* (M1)  $a \cdot (b \cdot c) = (a \cdot b) \cdot c$

*Kommutativgesetz* (M2)  $a \cdot b = b \cdot a$

*Neutrale Element* (M3)  $\exists! 1 \in K$  mit

$$1 \cdot a = a \cdot 1 = a$$

*Inverse Element* (M4)  $\exists! \frac{1}{a}$  zu jedem  $a \in K \setminus \{0\}$  mit:

$$a \cdot \frac{1}{a} = 1$$

*Distributivgesetz* (D)  $a \cdot (b + c) = ab + ac$

Dies erfüllen  $\mathbb{Q}$ ,  $\mathbb{R}$ ,  $\mathbb{R}^n$  (Vektorräume),  $\mathbb{C}$ , Matrizen, prime Restklassengruppen  $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$  ...



## 10.2 Teilbarkeit

### 10.2.1 Teilbarkeitseigenschaften

#### Definition

Die ganze Zahl  $a \in \mathbb{Z}$  teilt  $b \in \mathbb{Z}$ , wenn es ein  $x$  gibt, mit  $b = a \cdot x$ . Man schreibt:

$$a|b$$

$a$  ist ein **Teiler** von  $b$  und  $b$  ist **Vielfaches** von  $a$

Zwei Zahlen  $a, b \in \mathbb{Z}$  sind **teilerfremd**, wenn aus  $c|a$  und  $c|b$  folgt  $|c| = 1$

#### Theorem

Aus dieser Teilbarkeitsrelation ergeben sich mehrere Eigenschaften:

Sei  $a, b, c, t \in \mathbb{Z}$  und  $t \neq 0$ :

- (0)  $a|b$  und  $a|c$  dann  $a|b \pm c$
- (1)  $a|b$  und  $b|c$  dann  $a|c$
- (2)  $a|b$  dann  $a|bc$
- (3)  $at|bt \Leftrightarrow a|b$
- (4)  $a|b$  dann  $b = 0$  oder  $|a| \leq |b|$
- (5)  $a|b$  und  $b|a$  dann  $a = \pm b$

#### Beweis

- (1) Wenn  $a|b$  und  $b|c$ , dann gibt es  $x, y \in \mathbb{Z}$  mit  $b = a \cdot x$  und  $c = b \cdot y$ . Also gilt auch  $c = b \cdot y = a \cdot (xy)$  und somit  $a|c$
- (2) Weil offensichtlich  $b|bc$  gilt, folgt die Aussage sofort aus Aussage (3)
- (3)  $at|bt \Leftrightarrow \exists x \in \mathbb{Z} : bt = atx \Leftrightarrow b = ax \Leftrightarrow a|b$
- (4) Sei  $b = ax$  mit  $x \in \mathbb{Z}$ . Wenn  $x = 0$ , dann ist  $b = 0$ . In allen anderen Fällen ist  $|x| > 1$  und daher  $|b| = |a| \cdot |x| \geq |a|$
- (5) Wenn weder  $a = 0$  noch  $b = 0$  ist, dann folgt aus (4)  $|a| \geq |b| \geq |a|$  und daher  $a = \pm b$ . Wenn also  $a = 0$ , dann folgt  $b = 0$

□

### 10.2.2 Euklidische Division

#### Definition

Seien  $a$  und  $b$  zwei natürliche Zahlen. Es gibt dann immer  $q, r \in \mathbb{N}$  sodass

$$a = b \cdot q + r \quad 0 \leq r < b$$

$q$  heißt **Quotient** und  $r$  heißt **Rest**. Man schreibt:  $q = a \div b$  und  $r \equiv a \pmod{b}$

## 10.3 Primzahlen

Hier die Liste der Primzahlen bis 100:

2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29, 31, 37, 41, 43, 47, 53, 59, 61, 67, 71, 73, 79, 83, 89, 97

### Definition

Eine natürliche Zahl heißt Primzahl, wenn sie in  $\mathbb{N}$  genau zwei Teiler besitzt.

### Theorem

Es gibt unendlich viele Primzahlen

### Beweis

Es gibt unendlich viele Primzahlen: Beweis nach Euklid

Jede ganze Zahl  $n > 1$  ist durch eine Primzahl teilbar. Entweder ist  $n$  selber eine Primzahl oder  $n = a \cdot b$  mit  $a, b \in \mathbb{N}$ .

Also ist  $1 < a = \frac{n}{b} < n$ . Wenn man diesen Schritt endlich oft macht, kommt man am Ende auf ein neues  $a' \in \mathbb{P}$ .

⚠: Nehmen wir jetzt an, es gäbe nur endlich viele Primzahlen  $p_1, p_2, \dots, p_{r-1}, p_r$ .

Dann ist

$$N = p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_{r-1} \cdot p_r + 1 = \left( \prod_{r=1}^r P_r \right) + 1$$

eine ganze Zahl  $> 1$  und hat daher mindestens einen Primteiler  $p_l \in \mathbb{P}$  und  $l \in \{1, 2, \dots, r-1, r\}$ . Dann hat man:

$$\Rightarrow \begin{cases} p_l & | & p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_{r-1} \cdot p_r \\ p_l & | & p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_{r-1} \cdot p_r + 1 \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow p_l | p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_{r-1} \cdot p_r - (p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_{r-1} \cdot p_r + 1)$$

$$\Leftrightarrow p_l | (-1) \quad \text{oder} \quad p_l | 1 \quad \text{WIDERSPRUCH, da } p_l = 1 \text{ aber } 1 \notin \mathbb{P}$$

$N$  muss also einen Primteiler haben ungleich  $p_r$  mit  $r \in \{1, 2, 3, \dots, r-1, r\}$  oder **selber prim sein**.  $\square$

### Theorem

Jede natürliche Zahl  $n \geq 2$ , die nicht prim ist, besitzt einen Primfaktor  $p$ , für den gilt

$$p^2 \leq n \quad \Leftrightarrow \quad p \leq \sqrt{n}$$

Also lässt sich jede Zahl, die nicht prim ist, in Primfaktoren zerlegen.

Jede natürliche Zahl  $n \geq 2$  besitzt eine eindeutige **Primfaktorzerlegung** der Form

$$n = (p_1)^{a_1} \cdot (p_2)^{a_2} \cdot \dots \cdot (p_{k-1})^{a_{k-1}} \cdot (p_k)^{a_k}$$

mit  $p_1 < p_2 < \dots < p_{k-1} < p_k$  und  $\{p_1, p_2, \dots, p_{k-1}, p_k\} \in \mathbb{P}$  und  $a_1, a_2, \dots, a_{k-1}, a_k \in \mathbb{N}$

## 10.4 Restklassen oder Kongruenzklassen

### Definition

Seien drei natürliche Zahlen  $a, b, n \in \mathbb{N}$  mit  $n \geq 2$ .

Wenn  $a = q_1 \cdot n + r_1$  und  $b = q_2 \cdot n + r_2$  und  $r_1 = r_2$ , also falls  $a$  und  $b$  bei der euklidischen Division durch  $n$  den gleichen Rest besitzen, dann gilt

$$a \equiv b \pmod{n}$$

### Beispiel:

- $29 \equiv -121 \pmod{5}$  da  $29 \equiv 5 \cdot 5 + 4$  und  $-121 = 5 \cdot (-25) + 4$
- $88 \equiv 24 \pmod{8}$  da  $8|88$  und  $8|24$
- $87 \equiv 23 \pmod{8}$

### Theorem

Seien  $a, b$  zwei ganze Zahlen und  $n \in \mathbb{N}$  mit  $n \geq 2$ , dann gilt

- (1)  $a \equiv b \pmod{n} \Leftrightarrow n|(a-b)$
- (2)  $a \equiv 0 \pmod{n} \Leftrightarrow n|a$
- (3) falls  $n' \geq 2$  und  $n'|n$  dann gilt:  $a \equiv b \pmod{n} \Rightarrow a \equiv b \pmod{n'}$

### Beweis

- (1)  $a \equiv b \pmod{n} \Leftrightarrow a - b \equiv 0 \pmod{n} \Leftrightarrow n \text{ teilt } (a - b)$

□

### Beispiel:

- (1)  $61 \equiv 29 \pmod{8}$  (Rest 5)  $\Leftrightarrow 8|(61 - 29) = 32$
- (3)  $4 \geq 2$  und  $4|12$   $43 \equiv 67 \pmod{12}$  ( $r = 7$ )  $\Rightarrow 43 \equiv 67 \pmod{4}$

### Theorem

Für jedes  $n \in \mathbb{N}$  mit  $n \geq 2$  gilt:

Jede ganze Zahl  $a$  ist modulo  $n$  kongruent zu einer natürlichen Zahl  $r$  mit  $0 \leq r \leq n - 1$

Anders gesagt gibt es zu jeder Zahl immer Kongruenzklassen.

**Definition**

Es seien  $n \in \mathbb{N}$  mit  $n \geq 2$  und  $r \in \mathbb{N}$  mit  $0 \leq r < n$

Die Menge  $[r] \bmod n$  ist die Menge aller ganzen Zahlen  $z$ , die bei der euklidischen Division durch  $n$  den Rest  $r$  liefern.

Sie ist eine Menge von Zahlen, die den Abstand  $n$  zueinander haben.

Kongruenzen sind mit der Addition und der Multiplikation verträglich. Seien  $a, b, a^*, b^*$  ganze Zahlen:

$$\Rightarrow \begin{cases} a \equiv a^* \pmod{n} \\ b \equiv b^* \pmod{n} \end{cases}$$

$$\Rightarrow a + b \equiv a^* + b^* \pmod{n} \quad \text{und} \quad a \cdot b \equiv a^* \cdot b^* \pmod{n}$$

**Beispiel:**

- $[1] \bmod 4 = \{\dots, -7, -3, 1, 5, 9, \dots\}$
- $[2] \bmod 4 = \{\dots, -6, -2, 2, 6, 10, \dots\}$
- $[3] \bmod 4 = \{\dots, -5, -1, 3, 7, 11, \dots\}$
- $[4] \bmod 4 = [0] \bmod 4 = \{\dots, -8, -4, 0, 4, 8, 12, \dots\}$

**Theorem**

Seien  $a, b \in \mathbb{N}$  mit  $a, b \geq 2$  und  $a|b$ , dann gilt

$$[r] \bmod b \subseteq [r] \bmod a$$

( $\subseteq$  heißt "Teilmenge")

**Beispiel:**

So gilt zum Beispiel:

$$[2] \bmod 10 \subseteq [2] \bmod 5$$

$$\Leftrightarrow \{\dots, -28, -18, -8, 2, 12, 22, \dots\} \subseteq \{\dots, -18, -13, -8, -3, 2, 7, 12, 17, \dots\}$$

### 10.4.1 Mit Kongruenzen rechnen und beweisen

#### Definition

Kongruenzen sind mit der Addition und der Multiplikation verträglich. Daraus folgen diese Eigenschaften:

Sei  $n \in \mathbb{N}$  mit  $n \geq 2$ .  $a$  und  $a^*$  zwei (beliebige) ganze Zahlen.

1. Für jede ganze Zahl  $k$  gilt:

$$a \equiv a^* \pmod{n} \Rightarrow k \cdot a \equiv k \cdot a^* \pmod{n}$$

2. Für jede natürliche Zahl  $p \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$  gilt:

$$a \equiv a^* \pmod{n} \Rightarrow a^p \equiv a^{*p} \pmod{n}$$

Diese Eigenschaften sind **keine** Äquivalenzen, sondern Folgerungen! Bei Beweisen kann man also nicht vom Ergebnis ausgehen, und dann durch das dividieren auf beiden Seiten des Kongruenzzeichens auf ein einfaches Ergebnis kommen. Man muss von etwas einfachem ausgehen, und das dann so umformen, dass man auf die gewünschte Kongruenz kommt.

#### Beispiel:

$$\mathbb{Z} : 35^{228} + 84^{501} \equiv 0 \pmod{17}$$

$$\begin{array}{lcl} \Rightarrow 35 & = & 34 + 1 = 17 \cdot 2 + 1 \\ \Rightarrow 35 & \equiv & 1 \pmod{17} \\ \Rightarrow 35^{228} & \equiv & 1 \pmod{17} \end{array} \quad \left| \quad \begin{array}{lcl} \Rightarrow 84 & = & 85 - 1 = 17 \cdot 5 - 1 \\ \Rightarrow 84 & \equiv & -1 \pmod{17} \\ \Rightarrow 84^{501} & \equiv & -1 \pmod{17} \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow 35^{228} + 84^{501} \equiv 1 - 1 \pmod{17} \equiv 0 \pmod{17}$$

#### Definition

Es seien  $a$  und  $b$  zwei natürliche Zahlen größer Null mit  $a > b$ .  $r$  sei der Rest der Euklidischen Division von  $a$  durch  $b$ . Dann gilt:

1. Wenn  $r = 0$ , dann sind die gemeinsamen Teiler von  $a$  und  $b$  die Teiler von  $b$ . Da die Division aufgeht, teilt  $b$  die Zahl  $a$ .  $a$  ist also ein Vielfaches von  $b$ , deshalb sind die Teiler von  $a$  auch die Teiler von  $b$ .
2. Wenn  $r \neq 0$ , dann sind die gemeinsamen Teiler von  $a$  und  $b$  gerade die gemeinsamen Teiler von  $b$  und  $r$ . (Äquivalenz  $\Leftrightarrow$ )

#### Beweis

Die Euklidische Division sagt  $a = b \cdot q + r$

$$\begin{array}{lcl} n \mid a & \wedge & n \mid b \Rightarrow n \mid q \cdot b \Rightarrow n \mid a - q \cdot b \\ & & \Rightarrow n \mid r \end{array}$$

Alle Teiler  $n$  haben die Eigenschaften:  $n \mid a$ ,  $n \mid b$  und  $n \mid r$ .  $n$  ist also Teiler von  $a$ ,  $b$  und  $r$ .

Umgekehrt gilt: wenn  $n \mid b$  und  $n \mid r$ :

$$\begin{array}{lcl} \Rightarrow n \mid q \cdot b + r \\ \Rightarrow n \mid a \\ \square \end{array}$$

### 10.4.2 Der Euklidische Algorithmus

Der Euklidische Algorithmus ist eine effiziente Methode um den ggT (größter gemeinsamer Teiler) zweier Zahlen zu finden, wenn die Primfaktorzerlegung nicht vorliegt.

#### Definition

Seien  $a, b \in \mathbb{N}$ . Sei  $a$  die größere Zahl, also  $a > b$ . Sei  $b$  kein Teiler von  $a$ . Nun wiederholt man immer wieder die Euklidische Division mit den Resten der vorherigen Division. Nach [diesem Satz](#) sind die Teiler von  $a$  und  $b$  auch die Teiler von  $b$  und  $r$ . Man möchte ja den ersten gemeinsamen Teiler der Zahlen  $a$  und  $b$  finden.

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

Deshalb ist  $r_n$  der größte gemeinsame Teiler der Zahlen  $a$  und  $b$ :

Die Folge der Reste  $r_k \in \mathbb{N}$  mit  $k = \{1, 2, \dots, n-1, n\}$  ist streng monoton fallend. Diese Folge hat den Grenzwert  $g = 0$ . Deshalb gibt es immer **ein** letztes  $r_n$  der Folge.

Die **Existenz** von der letzten Zahl  $r_n$  ist sicher, da  $b \nmid a$ . Die Teiler von  $a$  und  $b$  sind also auch die Teiler von  $b$  und  $r_1$ . Da die Folge der Reste monoton fallend ist, kommt man am Ende auf jeden Fall auf eine Zahl  $r_n$ , die Teilerin von  $a$  und  $b$  ist. (zum [Satz](#))

#### Theorem

Aus vorheriger Definition des Euklidischen Algorithmus ergeben sich diese Eigenschaften der Zahl  $r_n$ :

1.  $r_n$  ist gleichzeitig Teiler von  $a$  und  $b$ .
2. Jeder andere Teiler von  $a$  und  $b$  ist auch Teiler von  $r_n$

$r_n$  ist der größte gemeinsame Teiler von  $a$  und  $b$ .  $\text{ggT}(a; b) = r_n$ . Es gilt also:

- $\text{ggT}(a; b) = \text{ggT}(b; a)$
- $a|c \text{ und } b|d \Rightarrow \text{ggT}(a; b) | \text{ggT}(c; d)$
- $\text{ggT}(a^2; b^2) = (\text{ggT}(a; b))^2$

#### Beispiel:

Man sucht den ggT von  $a = 780$  und  $b = 567$ .

$$\left. \begin{array}{l} 780 = 1 \cdot 567 + 213 \\ 567 = 2 \cdot 213 + 141 \\ 213 = 1 \cdot 141 + 72 \\ 141 = 1 \cdot 72 + 69 \\ 72 = 1 \cdot 69 + 3 \\ 69 = 23 \cdot 3 + 0 \end{array} \right\} \quad \text{ggT}(780; 567) = \text{ggT}(567; 780) = 3$$

Jetzt sucht man den ggT von  $c = 3 \cdot 780 = 2340$  und  $d = 567 \cdot 5 = 2835$ .

$$\left. \begin{array}{rcl}
 2835 & = & 1 \cdot 2340 + 495 \\
 2340 & = & 4 \cdot 495 + 360 \\
 495 & = & 1 \cdot 360 + 135 \\
 360 & = & 2 \cdot 135 + 90 \\
 135 & = & 1 \cdot 90 + 45 \\
 90 & = & 2 \cdot 45 + 0
 \end{array} \right\} \quad \text{ggT}(2340; 2835) = \text{ggT}(2835; 2340) = 45$$

Aus  $780 \mid 2340$  und  $567 \mid 2835$  folgt  $\text{ggT}(780, 567) \mid \text{ggT}(2340, 2835)$  oder auch  $3 \mid 45$

### 10.4.3 Der kleine Satz von Fermat

#### Definition

Sei  $a$  eine ganze Zahl und  $p \in \mathbb{P}$  kein Teiler von  $a$ . Dann gilt

$$a^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}$$

$$\Rightarrow a^p \equiv a \pmod{p}$$

## Beweis

Seien  $p$  eine Primzahl und  $a \in \mathbb{Z}$  und zwei Listen (oder Mengen) von Zahlen

$$M : a, 2a, 3a, 4a, \dots, (p-2)a, (p-1)a$$

$$N : 1, 2, 3, 4, \dots, (p-2), (p-1)$$

Erst wird bewiesen, dass bei der Division von 2 Zahlen  $k, k' \in \mathbb{N}$  mit  $k \neq k'$  ein anderer Rest rauskommt. Dies wird und später hilfreich sein.

$$\begin{aligned} \Rightarrow k &\not\equiv k' \pmod{p} \quad (\text{da } k \neq k' \text{ und } k < p \text{ und } k' < p) \\ \Rightarrow k \cdot a &\not\equiv k' \cdot a \pmod{p} \end{aligned}$$

Die Reste von beliebigen Zahlen  $x \in M$  durch  $p \in \mathbb{P}$  ergeben genau die Zahlen  $y \in N$ , da in beiden Mengen genau  $(p-1)$  verschiedene Elemente sind und da gerade gezeigt wurde dass jedes Element aus  $M$  bei der Division durch  $p$  einen unterschiedlichen Rest hat. Die Reihenfolge der zu  $x \in M$  zugehörigen Reste  $y \in N$  ist natürlich nicht klar (ganz normal bei Mengen).

Wir benennen um, damit es klarer wird:

$$\begin{aligned} a &\equiv r_1 \pmod{p} \\ 2a &\equiv r_2 \pmod{p} \\ 3a &\equiv r_3 \pmod{p} \\ &\vdots \\ (p-2)a &\equiv r_{p-2} \pmod{p} \\ (p-1)a &\equiv r_{p-1} \pmod{p} \end{aligned}$$

$r_1, r_2, \dots, r_{p-1}$  sind alle voneinander verschieden ( $\hat{=}$  paarweise verschieden) und sind genau alle Elemente aus der Menge  $N$

Demnach gilt die Schreibweise:

$$r_1 \cdot r_2 \cdot r_3 \cdot \dots \cdot r_{p-2} \cdot r_{p-1} = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (p-2) \cdot (p-1) = (p-1)!$$

Daraus folgt:

$$\begin{aligned} a \cdot 2a \cdot 3a \cdot \dots \cdot (p-1)a &\equiv r_1 \cdot r_2 \cdot r_3 \cdot \dots \cdot r_{p-1} \pmod{p} \\ (p-1)! a^{p-1} &\equiv (p-1)! \pmod{p} \end{aligned}$$

Da  $\text{ggT}((p-1)!; p) = 1$ , kann man durch  $(p-1)!$  teilen, ohne dass sich das Modulo verändert

$$\Rightarrow a^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}$$

□



### 10.4.4 Zusammenhänge zwischen ggT und kgV

#### Theorem

Das kgV besitzt ähnliche Eigenschaften wie der ggT. Seien  $a, b, c, d, k$  ganze Zahlen ungleich Null. Dann gilt:

1.  $\text{kgV}(a; b) = \text{kgV}(b; a)$
2.  $\text{kgV}(k \cdot a; k \cdot b) = |k| \cdot \text{kgV}(a; b)$
3. Falls  $a|c$  und  $b|d$ , dann gilt auch  $\text{kgV}(a; b) | \text{kgV}(c; d)$

Eine wichtige Eigenschaft, die oft benutzt wird, ist folgende:

$$\text{ggT}(a; b) \cdot \text{kgV}(a; b) = |a \cdot b|$$

Eine andere Art, den ggT und den kgV zu ermitteln ist die über die Primfaktorzerlegung. Diese wird gleich mithilfe eines Beispiels erklärt.

#### Beispiel:

$$\begin{aligned} a = 12474 &= 2 \cdot 3^4 \cdot 7 \cdot 11 = 2^1 \cdot 3^4 \cdot 5^0 \cdot 7^1 \cdot 11^1 \cdot 17^0 \\ b = 33320 &= 2^3 \cdot 5 \cdot 7^2 \cdot 17 = 2^3 \cdot 3^0 \cdot 5^1 \cdot 7^2 \cdot 11^0 \cdot 17^1 \end{aligned}$$

Daraus ergeben sich

$$\text{ggT}(a; b) = 2^1 \cdot 7^1 = 14$$

$$\text{kgV}(a; b) = 2^3 \cdot 3^4 \cdot 5^1 \cdot 7^2 \cdot 11^1 \cdot 17^1 = 29688120$$

### 10.4.5 Die Sätze von Bézout, Gauß und der Fundamentalsatz des ggT

#### Definition

Der **Fundamentalsatz des ggT** besagt, dass für  $a, b \in \mathbb{N}$  ganze Zahlen  $u$  und  $v$  existieren, sodass gilt:

$$a \cdot u + b \cdot v = \text{ggT}(a; b)$$

Wenn  $a$  und  $b$  teilerfremd sind, dann gilt im Sonderfall:  $\exists u, v \in \mathbb{Z}$ :

$$a \cdot u + b \cdot v = \text{ggT}(a; b) = 1$$

Daraus folgt der **Satz von Bézout**. Zwei ganze Zahlen ungleich Null sind genau dann teilerfremd, wenn  $\exists u, v \in \mathbb{Z}$  gibt, sodass gilt:

$$a \cdot u + b \cdot v = 1$$

Der **Satz von Gauß** ist bei diophantischen Gleichungen nützlich: Es seien  $a, b$  und  $c$  ganze Zahlen ungleich Null und seien  $a$  und  $b$  teilerfremd.

$$a|bc \Rightarrow a|c$$

Daraus folgt:

$$\text{ggT}(a; b_1) \text{ und } \text{ggT}(a; b_2) \Leftrightarrow \text{ggT}(a; b_1 \cdot b_2)$$

#### Beispiel:

Musterlösung einer diophantischen Gleichung:

$$(1) \quad 12597a - 3813b = 3$$

Entweder man sucht mit dem Taschenrechner eine Lösung oder man verwendet den oft längeren Weg mit einer hohen Vorzeichenfehlerwahrscheinlichkeit. Wir sind mutig und die Zahlen sind groß, deshalb nehmen wir den Weg mit dem Gaus'schen Algorithmus. Man merkt dass 12597, 3813 mit 3 gekürzt werden kann.

$$(1) \quad \Leftrightarrow \quad 4199a - 1271b = 1$$

$$\begin{aligned} 4199 &= 3 \cdot 1271 + 386 \\ 1271 &= 3 \cdot 386 + 113 \\ 386 &= 3 \cdot 113 + 47 \\ 113 &= 2 \cdot 47 + 19 \\ 47 &= 2 \cdot 19 + 9 \\ 19 &= 2 \cdot 9 + 1 \end{aligned}$$

Jetzt wird zurück eingesetzt, um auf eine Lösung zu kommen

$$\begin{aligned} 1 &= 19 - 2 \cdot (9) \\ 1 &= 19 - 2 \cdot (47 - 2 \cdot 19) = 5 \cdot 19 - 2 \cdot 47 \\ 1 &= 5 \cdot (113 - 2 \cdot 47) - 2 \cdot 47 = 5 \cdot 113 - 12 \cdot 47 \\ 1 &= 5 \cdot 113 - 12 \cdot (386 - 3 \cdot 113) = 41 \cdot 113 - 12 \cdot 386 \\ 1 &= 41 \cdot (1271 - 3 \cdot 386) - 12 \cdot 386 = 41 \cdot 1271 - 135 \cdot 386 \\ 1 &= 41 \cdot 1271 - 135 \cdot (4199 - 3 \cdot 1271) = 446 \cdot 1271 - 135 \cdot 4199 \end{aligned}$$

Eine Lösung dieser Gleichung ist also das Zahlentupel  $(-135; -446)$ . Jetzt zieht man eine Gleichung von der anderen ab:

$$\begin{aligned} \Rightarrow \quad 4199(a + 135) - 1271(b + 446) &= 0 \\ \Leftrightarrow \quad 4199(a + 135) &= 1271(b + 446) \end{aligned}$$

Unter Verwendung des Satzes von Gauß folgert man

$$\begin{aligned} \Rightarrow \quad 4199 \mid b + 446 \\ \Rightarrow \quad 4199k &= b + 446 \\ \Leftrightarrow \quad b &= 4199k - 446 \end{aligned}$$

Jetzt wird eingesetzt

$$\begin{aligned} \Rightarrow \quad 4199a + 135 \cdot 4199 &= 1271(4199k - 446 + 446) = 1271 \cdot 4199k \\ \Leftrightarrow \quad a &= 1271k - 135 \end{aligned}$$

Die Lösungsmenge Für die Gleichung (1) lautet

$$\mathbb{L} = \{(1271k - 135; 4199k - 446); \quad k \in \mathbb{Z}\}$$

Jetzt kann man jede ganze Zahl  $F$  durch unendlich viele Linearkombinationen von 1271 und 4199 darstellen. Sei die Aufgabe

$$4199a - 1271b = F$$

$$\mathbb{L}_F = \{(1271k - (F \cdot 135); 4199k - (F \cdot 446)); \quad k \in \mathbb{Z}\}$$

### 10.4.6 Das RSA Verschlüsselungsverfahren

Die RSA-Verschlüsselung ist eine sehr sichere Verschlüsselungsmethode, welche auch sehr viele Kommunikationsdienste benutzen. Mit einem langen Schlüssel kann ein brute force Angriff (Rumprobieren) mehrere

Generationen dauern und noch ist kein Algorithmus (öffentlich) bekannt, der entschlüsseln kann.

### Konstruktion der Schlüssel

1. Man nimmt 2 sehr große Primzahlen  $p$  und  $q$ , die privat bleiben.
2. Man rechnet das Rsa-Modul  $N = p \cdot q$  aus.  $N$  ist ein Teil des öffentlichen Schlüssels und hat mehrere hunderte von Dezimalstellen
3. Man bestimmt die Anzahl der zu  $N$  teilerfremden Zahlen. Wenn man dazu nur  $N$  kennt, brauchen Computer Jahre. Da wir aber die Primfaktorzerlegung haben, ist  $\varphi(N) = (p-1) \cdot (q-1)$ .  $\varphi$  sei die Funktion die die Anzahl an teilerfremden Zahlen angibt. Die Anzahl der zu  $N$  teilerfremden Zahlen ist das Produkt der zu  $p$  teilerfremden Zahlen mit den zu  $q$  teilerfremden Zahlen.  $p$  und  $q$  sind prim, deshalb ist  $\varphi(p) = (p-1)$ .
4. Man wählt eine Zahl  $e$  mit  $1 < e < (p-1) \cdot (q-1)$  mit  $\text{ggT}(e; (p-1)(q-1)) = 1$ . Sie ist also teilerfremd mit  $\varphi(N)$   
Der öffentliche Schlüssel ist  $(e, N)$ . Geheim bleiben  $p$ ,  $q$ , und  $(p-1) \cdot (q-1)$ .
5. Jetzt bestimmt man eine Zahl  $d$  mit  $e \cdot d \equiv 1 \pmod{(p-1)(q-1)}$ . Man bestimmt also das Inverse Element zu  $e$  bei der Rechnung mit  $\pmod{(p-1)(q-1)}$ . Dies macht man mithilfe des Euklidischen Algorithmus:

$$e \cdot d \equiv 1 \pmod{(p-1)(q-1)}$$

$$\Leftrightarrow (p-1)(q-1) \cdot k = e \cdot d - 1 \quad (k \in \mathbb{Z})$$

$$\Leftrightarrow e \cdot d - k \cdot (p-1)(q-1) = 1 \quad \text{Eine lösbare Diophantische Gleichung! } (\text{ggT}(e; (p-1)(q-1)) = 1)$$

$$\Leftrightarrow e \cdot d + k \cdot (p-1)(q-1) = 1 \quad \text{da } k \in \mathbb{Z}$$

Der private Schlüssel ist  $(d, N)$

### Ver- und Entschlüsselung der Nachricht

Sei  $T$  der Klartext, also der unverschlüsselte Text und  $G$  der geheime, verschlüsselte Text.

- Verschlüsselung:  $G = T^e \pmod{N}$

- Entschlüsselung:  $T = G^d \pmod{N}$

Damit diese Rechnung funktioniert, muss  $(T^e)^d \equiv T \pmod{N}$  gelten. Um dies zu prüfen, schauen wir uns die Ausgangsgleichheiten an:

$$e \cdot d \equiv 1 \pmod{(p-1)(q-1)} \quad \Leftrightarrow \quad e \cdot d = r \cdot (p-1)(q-1) + 1 \quad r \in \mathbb{Z}$$

Und es sei die (Eulersche) Formel gegeben (Voraussetzung:  $\text{ggT}(a; pq) = 1$ ):

$$a^{(p-1)(q-1)} \equiv 1 \pmod{pq}$$

Dann müssen nur Potenzgesetze angewandt werden:

$$\begin{aligned} (T^e)^d &= T^{e \cdot d} = T^{r \cdot (p-1)(q-1) + 1} \\ &= T^{r \cdot (p-1)(q-1)} \cdot T \\ &= (T^{(p-1)(q-1)})^r \cdot T \\ &\equiv 1^r \cdot T \pmod{pq} \\ &\equiv T \pmod{N} \end{aligned}$$

Beispiel:

Nehmen wir zur Veranschaulichung lieber kleine Primzahlen

1.  $p = 7$  und  $q = 23$
2.  $N = p \cdot q = 161$
3.  $\varphi(N) = (p - 1)(q - 1) = 132$
4.  $e = 5$  passt, da  $\text{ggT}(5; 161) = 1$  und  $1 < 5 < 132$
5. Sei  $d$  mit  $5d \equiv 1 \pmod{132}$  oder auch äquivalent  $5d + 132r = 1$ . Ein Lösungstupel ist  $(53; -2)$ .

Der öffentliche Schlüssel ist  $(5; 161)$  und der geheime Schlüssel ist  $(53; 161)$

Nun verschlüsseln wir die Nachricht „ADVENT“. Der Absender bekommt den öffentlichen Schlüssel.

Nachricht	A	D	V	E	N	T
Zugehörige Zahl	1	4	22	5	14	20
$G = T^5 \pmod{161}$	1	58	22	66	84	125

Übermittlung der Nachricht

$T = G^{53} \pmod{161}$	1	4	22	5	14	20
Entschlüsselte Nachricht	A	D	V	E	N	T

## 10.5 Die vollständige Induktion

Die vollständige Induktion ist eine mathematische Beweismethode, nach der eine Aussage für alle natürlichen Zahlen bewiesen wird, die größer oder gleich einem bestimmten Startwert sind.

Daher wird der Beweis in zwei Etappen durchgeführt; mit dem **Induktionsanfang** beweist man die Aussage für die kleinste Zahl, mit dem **Induktionsschritt** für die nächste Zahl, also logischerweise für alle darauffolgenden Zahlen.

### Beweis

Beweis der Gaußschen Summenformel

$$\mathbb{Z} : S(n) = \sum_{i=1}^n i = \frac{n(n+1)}{2}$$

$$\text{Induktionsanfang : } 1 = \frac{1(1+1)}{2} = 1$$

$$\text{Induktionsvoraussetzung : für ein beliebiges, aber festes } k \in \mathbb{N} \text{ gilt: } \sum_{i=1}^k = \frac{k(k+1)}{2}$$

$$\text{Induktionsbehauptung : man behauptet, dass } \forall n \in \mathbb{N} \text{ gilt: } \sum_{i=1}^{n+1} = \frac{(n+1)((n+1)+1)}{2} \quad \square$$

$$\text{Induktionsschluss : } \sum_{i=1}^n + (n+1) = \frac{n(n+1)}{2} + \frac{2(n+1)}{2} = \frac{(n+1)((n+1)+1)}{2}$$

## Beweis

Beweis der Summe ungerader Zahlen

$$\mathbb{Z} \forall n \in \mathbb{N} : \sum_{k=1}^n (2k-1) = n^2$$

$$\text{Induktionsanfang : } \sum_{k=1}^1 (2k-1) = 2 \cdot 1 - 1 = 1 = 1^2$$

$$\text{Induktionsvoraussetzung : } \text{für ein beliebiges, aber festes } i \in \mathbb{N} \text{ gilt: } \sum_{k=1}^i (2k-1) = i^2$$

$$\text{Induktionsbehauptung : } \text{man behauptet, dass } \forall n \in \mathbb{N} : \sum_{k=1}^{n+1} (2k-1) = (n+1)^2$$

$$\text{Induktionsschluss : } \sum_{k=1}^{n+1} (2k-1) = \sum_{k=1}^n (2k-1) + 2(n+1) - 1 = n^2 + 2n + 1 = (n+1)^2$$

□

## Beweis

Beweis der Bernoullischen Ungleichung

$$\mathbb{Z} : \forall n \in \mathbb{N} \quad n > 0 : \quad (1+x)^n \geq 1+nx \quad ; x \geq -1$$

$$\text{Induktionsanfang : } (1+x)^0 = 1 \geq 1 = 1+0x$$

$$\text{Induktionsvoraussetzung : } \text{Es gelte nun: } (1+x)^n \geq 1+nx; n \in \mathbb{N}_0$$

$$\text{Induktionsbehauptung : } (1+x)^{n+1} \geq 1+(n+1)x$$

$$\begin{aligned} \text{Induktionsschluss : } (1+x)^{n+1} &= (1+x)^n \cdot (1+x) \stackrel{\text{I.V.}}{\geq} (1+nx) \cdot (1+x) = nx^2 + nx + x + 1 \\ &\geq 1+x+nx = 1+(n+1)x \end{aligned}$$

□

## Beweis

Beweis der Summe der Quadratzahlen

Mittels Induktion lässt sich "nur" eine vorhandene Formel beweisen.

$$\mathbb{Z} : S(n) = \sum_{i=1}^n i^2 = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}$$

$$\text{Induktionsanfang : } S(1) = \sum_{i=1}^1 i^2 = 1^2 = 1 = \frac{1(1+1)(2+1)}{6}$$

**Induktionsvoraussetzung :** keine Ahnung was hier rein soll

$$\text{Induktionsbehauptung : } S(n+1) = \sum_{i=1}^{n+1} i^2 = \frac{(n+1)(n+2)(2(n+1)+1)}{6}$$

$$\begin{aligned} \text{Induktionsschluss : } S(n) + (n+1)^2 &= \frac{n(n+1)(2n+1)}{6} + (n+1)^2 = \frac{2n^3 + 9n^2 + 13n + 6}{6} \\ &= \frac{(n+1)(n+2)(2(n+1)+1)}{6} = \frac{2n^3 + 9n^2 + 13n + 6}{6} \end{aligned}$$

□

## Beweis

Beweis für eine Abschätzung der Summe der Quadratzahlen

$$\mathbb{Z} : \sum_{i=1}^n i^2 > \frac{n^3}{3}$$

$$\text{Induktionsanfang : } 1^2 > \frac{1^3}{3}$$

**Induktionsvoraussetzung :** für ein beliebiges, aber festes  $k \in \mathbb{N}$  gilt:  $\sum_{i=1}^k i^2 > \frac{k^3}{3}$

**Induktionsbehauptung :** man behauptet, dass  $\forall n \in \mathbb{N}$  gilt:  $\sum_{i=1}^{n+1} i^2 > \frac{(n+1)^3}{3}$

$$\begin{aligned} \text{Induktionsschluss: } \sum_{i=1}^{n+1} i^2 &= \sum_{i=1}^n i^2 + (n+1)^2 > \underbrace{\frac{n^3}{3}}_{> \frac{n^3}{3}} + (n+1)^2 \\ &= \frac{n^3 + 3n^2 + 6n + 3}{3} \\ &= \frac{n^3 + 3n^2 + 3n + 1 + 3n + 2}{3} \\ &= \frac{(n+1)^3}{3} + \frac{3n+2}{3} \underbrace{> \frac{n^3}{3}}_{n \geq 0} = \frac{(n+1)^3}{3} \end{aligned}$$

□

## Beweis

Beweis einer Abschätzung der Fakultät

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad n \geq 4 : \quad n! > n^2$$

$$\textbf{Induktionsanfang} : \quad n_0 = 4 : \quad 4! = 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 0! = 24 > 16 = 4^2$$

$$\textbf{Induktionsvoraussetzung} : \quad \exists n \in \mathbb{N}, \quad n \geq 4 : \quad n! > n^2$$

$$\textbf{Induktionsbehauptung} : \quad n! \geq n^2 \Rightarrow (n+1)! > (n+1)^2 = (n+1) \cdot (n+1)$$

$$\textbf{Induktionsschluss} : \quad (n+1)! = (n+1) \cdot n! > (n+1) \cdot n^2$$

$$\Rightarrow n^2 \stackrel{?}{>} (n+1)$$

$$\textbf{Mini-induktion} : \quad n_0 = 4 : \quad 4^2 = 16 > 5 = 4 + 1$$

$$\Rightarrow (n^2)' \stackrel{?}{>} (n+1)'$$

$$\Leftrightarrow 2n \stackrel{!}{>} 1 \quad \forall n \in \mathbb{N}$$

□

## WAHRSCHEINLICHKEITSTHEORIE

by RÉMY

### Bemerkung:

Der Oberbegriff **Stochastik** wird hier nicht verwendet, da wir uns SMP nicht mit der überflüssigen **Statistik** beschäftigen.

## 11.1 Wiederholungen: Unter- & Mittelstufe

### 11.1.1 Zufallsexperimente

#### Definition

Als Zufallsexperiment bezeichnet man Versuche, deren Ergebnisse sich nicht vorhersagen lassen, also vom Zufall abhängig sind.

Vor der Durchführung eines Zufallsexperiments muss eine **Ergebnismenge**  $S$  festgelegt werden. Sie beinhaltet alle möglichen Ergebnisse:  $S = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$

Ein Versuch heißt Zufallsexperiment, falls:

- er unter gleichen Bedingungen beliebig oft wiederholbar ist
- alle möglichen Ergebnisse vor Durchführung bekannt sind
- sein Ergebnis sich nicht mit Sicherheit vorhersagen lässt
- bei jeder Durchführung genau ein Ergebnis aus  $S$  auftritt

### Beispiel:

Bekannte Zufallsexperimente sind:

- das Werfen einer Münze
- das Werfen eines Würfels
- das Ziehen einer Kugel aus einer Urne
- ...

#### Definition - Laplace-Experiment

Laplace-Experimente sind Experimente, deren Ergebnisse jeweils gleichwahrscheinlich sind.

### Beispiel:

Ein Beispiel hierfür wäre der Wurf eines **perfekten** Würfels.

#### Theorem

In einem Laplace-Experiment gilt für die Wahrscheinlichkeit  $P$ , dass ein Ergebnis  $A$  von  $n$  möglichen Ergebnis eintritt:

$$P(A) = \frac{1}{n}$$



## Mehrstufige Zufallsexperimente

### Definition

Werden mehrere ( $n$ ) Zufallsexperimente nacheinander ausgeführt, so kann man sie als ein einziges Zufallsexperiment zusammenfassen. Man nennt dies ein **mehrstufiges Zufallsexperiment**. Die Ergebnisse eines solchen Experiments kann man als geordnete  $n$ -Tupel auffassen.

### Beispiel:

Zweifaches Werfen einer Münze:  $S = \{(Z/Z), (Z/K), (K/Z), (K/K)\}$ .

### Bemerkung:

Alternativ kann man  $S$  als einfache Menge definieren. Bei zweifachem Münzwurf wäre eine mögliche Darstellung  $S = \{0, 1, 2\}$  mit der Anzahl an Kopf-Würfen als Ergebnis möglich.

## Ereignisse

### Definition - Ereignisse

Jede Teilmenge  $A$  von der Ergebnismenge  $S$  nennt man ein Ereignis. Endet das Zufallsexperiment mit einem Ergebnis aus  $A$ , sagt man:  $A$  ist eingetreten.

### Beispiel:

Werfen eines Würfels:  $S = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$

$A$ : Augenzahl ist gerade:	$A = \{2, 4, 6\}$
$B$ : Augenzahl ist ungerade:	$B = \{1, 3, 5\}$
$C$ : Augenzahl ist Primzahl:	$C = \{2, 3, 5\}$
$D$ : Augenzahl $< 7$ :	$D = S$
$E$ : Augenzahl $= 6$ :	$E = \{6\}$
$F$ : Augenzahl $> 6$ :	$F = \{\}$

### Bemerkung:

#### Definition

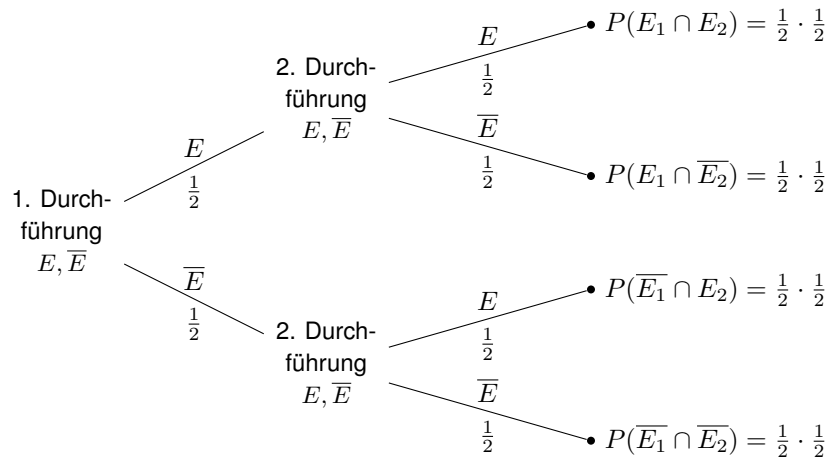
- Ein Ereignis, das nur aus einem Ergebnis besteht, heißt **Elementarereignis**.
- $B = \bar{A}$  ( $A$  quer) ist das **Gegenereignis** von  $A$ . Es gilt:  $B = S \setminus A$
- Ein Ereignis, das immer eintritt, heißt **sicheres Ereignis**
- Ein Ereignis, das niemals eintritt, heißt **unmögliches Ereignis**

## Baumdiagramme

### Definition - Bernoulli-Experiment

Bei Bernoulli-Experimenten gibt es nur 2 mögliche Ausgänge: Erfolg / Misserfolg ( $= \bar{\text{Erfolg}}$ ). Mehrfaches Ausführen ( $l$  Mal) von Bernoulli-Experimenten ergibt eine **Bernoulli-Kette** der Länge  $l$ .

Eine Bernoulli-Kette kann als **Baumdiagramm** dargestellt werden:



$E$  bezeichnet das Erfolgs-Ereignis,  $\bar{E}$  bezeichnet somit den Misserfolg. Jeder Pfad trägt 2 Informationen: das jeweilige Ereignis und seine Wahrscheinlichkeit.

#### Definition - Pfadregeln

- Die Summe der Wahrscheinlichkeiten auf den Ästen, die von einem Knoten (Ort der Verzweigung), ist  $= 1$ .
- Die Wahrscheinlichkeit eines Pfades (also eines Elementarereignisses) ist gleich dem **Produkt** der Wahrscheinlichkeiten aller Äste des Pfades.
- Die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses  $b$  ist gleich der **Summe** der Wahrscheinlichkeit der Pfade, die zu diesem Ereignis führen.

#### Bemerkung:

Besonders beim Urnenmodell eines Zufallsexperiments muss beachtet werden, ob nach dem Ziehen zurückgelegt wird, oder nicht, weil sich die Wahrscheinlichkeiten der Äste sonst entsprechend verändern.

### Empirisches Gesetz der großen Zahlen

#### Definition - Häufigkeiten

Nach der  $n$ -fachen Durchführung eines Zufallsexperiments betrachtet man, wie oft Ereignisse eingetreten sind.

Ist das Ereignis  $A$   $H$ -mal eingetreten, so nennt man  $H$  die **absolute Häufigkeit** und  $\frac{H}{n}$  die **relative Häufigkeit** von  $A$ .

#### Theorem

Wird ein Zufallsexperiment sehr häufig durchgeführt, so stabilisieren sich die relativen Häufigkeiten der Ereignisse. Es gilt:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{H_n(E)}{n} \right) = P(E)$$

mit  $E$  einem Ereignis, und  $H_n$  seiner Häufigkeit nach  $n$  Wiederholungen.

### 11.1.2 Zufallsvariable

#### Definition

Sind die Ergebnisse eines Zufallsexperiments Zahlen, oder kann man den Ergebnissen Zahlen zuordnen, so nennt man die Variable für diese Zahlen **Zufallsvariable**  $X$ .

Mit Hilfe von Zufallsvariablen kann man Zufallsexperimente einfacher beschreiben.

Beispiel:

Zählen von Erfolgen (1) und Misserfolgen (0) bei Bernoulli-Ketten: statt  $P((\text{Erfolg}, \text{Erfolg}, \dots, \text{Erfolg}))$  ( $n$  Mal) schreibt man einfach:  $P(x = k * 1)$  mit  $k$  der gewünschten Anzahl an Erfolgen.

**11.1.3 Das Pascal'sche Dreieck**

$$\begin{array}{ccccccc}
 & & & & & & (1) \\
 & & & & & (1) & (1) \\
 & & & (1) & (2) & (1) & \\
 & & (1) & (3) & (3) & (1) & \\
 & (1) & (4) & (6) & (4) & (1) & \\
 (1) & (5) & (10) & (10) & (5) & (1) & \\
 (1) & (6) & (15) & (21) & (15) & (6) & (1) \\
 (1) & (7) & (21) & (35) & (35) & (21) & (7) & (1)
 \end{array}$$

Bekannt aus der Mittelstufe. Es ergibt sich, wenn man die Summe von zwei Werten eine Stufe tiefer, zwischen die beiden Werte schreibt. Es wird vor Allem für Binomialkoeffizienten verwendet, findet aber auch in der Wahrscheinlichkeitsrechnung Verwendung.

**11.2 Kombinatorik****11.2.1 Binomialkoeffizienten****Definition**

Der Binomialkoeffizient ist die Anzahl der  $k$ -elementigen Teilmengen einer  $n$ -elementigen Menge.

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{(n-k)!k!} \quad (\text{gesprochen "n über k"}) \quad \forall 0 \leq k \leq n$$

Bemerkung:

Anschaulich entspricht das den Möglichkeiten, genau  $k$  bestimmte Kugeln von  $n$  Kugeln zu ziehen, wobei die gezogenen Kugeln nicht zurückgelegt werden, und die Reihenfolge, in der sie gezogen wurden, nicht beachtet wird.

Bemerkung:

Die gefundenen Werte entsprechen den Vorfaktoren, die man für das  $k$ -te Element aus der  $n$ ten Reihe aus dem Pascalschen Dreieck ablesen kann.

Das bedeutet, dass Potenzen von Binomen auch über Binomialkoeffizienten darstellbar sind:

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

Bemerkung:

Die obige Definition gilt nur für  $0 \leq k \leq n$  da die Fakultät (!) nicht für negative Zahlen definiert ist.

GTR-Tipp:

Im englischen wird  $\binom{n}{r}$  als " $n$  choose  $r$ " gesprochen. Auf dem GTR findet sich die Option unter MATH > PRB. Es handelt sich um nCr.

Benutzung: <ZAHL<sub>1</sub>> nCr <ZAHL<sub>2</sub>>. (Entspricht  $\binom{Z_1}{Z_2}$ )

## Theorem

Für Binomialkoeffizienten gelten mehrere Eigenschaften, unter ihnen wollen wir folgende zwei hervorheben:

1.

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

2.

$$\binom{n}{k} = \binom{n}{n-k}$$

## Beweis

1.

$$\begin{aligned} \binom{n+1}{k+1} &= \frac{(n+1)!}{(n-k)!k!} \\ &= \frac{n!}{k!} \frac{(n+1)}{(n-k)(k+1)} \\ &= \frac{n!}{k!} \frac{n-k+k+1}{(n-k)(k+1)} \\ &= \frac{n!}{k!} \left( \frac{n-k}{(n-k)(k+1)} + \frac{k+1}{(n-k)(k+1)} \right) \\ &= \frac{n!}{k!} \left( \frac{1}{(n-k-1)(k+1)} + \frac{1}{(n-k)!} \right) \\ &= \frac{n!}{k!} \left( \frac{1}{(n-(k+1))(k+1)} + \frac{1}{(n-k)!} \right) \\ &= \frac{n!}{(n-k)!k!} + \frac{n!}{(n-k-1)(k+1)!} \\ &= \binom{n}{k} + \binom{n}{k+1} \end{aligned}$$

2.

$$\begin{aligned} \binom{n}{k} &= \frac{n!}{(n-k)!k!} \\ &= \frac{n!}{k!(n-k)!} \\ &= \frac{n!}{(n-(k-n))!(n-k)!} \\ &= \binom{n}{n-k} \end{aligned}$$

□

Bemerkung:

1. Entspricht der Aussage, dass ein Glied im Pascal'schen Dreieck sich aus der Summe der zwei überliegenden Glieder ergibt.
2. Entspricht der Aussage, dass das Pascal'sche Dreieck symmetrisch ist.

## 11.2.2 Kombinatorik

### Theorem

Kombinatorik bezeichnet die Anzahl der Möglichkeiten der Anordnung von  $k$  Elementen auf  $n$  Stellen. Es werden 2 Fälle unterschieden:

- Die Reihenfolge der Elemente wird berücksichtigt:

$$n(n-1)(n-2)\dots(n-(k-1))$$

- Die Reihenfolge der Elemente wird **nicht** berücksichtigt:

$$\binom{n}{k}$$

### Bemerkung:

Auch hier gilt die Einschränkung  $0 \leq k \leq n$ . Diese ist sinnvoll, denn es ist nicht möglich, eine  $k$ -elementige Teilmenge einer  $n$ -elementigen Menge zu nehmen, wenn  $k > n$ . Deshalb gilt:

$$\text{Anzahl Möglichkeiten} = 0 \quad \text{für } n \leq k$$

### Beweis

Es handelt sich hier eher um eine logische Begründung:

- Reihenfolge berücksichtigt:

1. Auswahl:  $n$  Möglichkeiten

2. Auswahl:  $n-1$  Möglichkeiten

..

$k$ -te Auswahl:  $n-(k-1)$  Möglichkeiten

$$\Rightarrow \text{Möglichkeiten insgesamt: } n(n-1)(n-2)\dots(n-(k-1))$$

- Reihenfolge **nicht** berücksichtigt:

1. Auswahl:  $n$  Möglichkeiten, 1 mögliche Permutation

2. Auswahl:  $n-1$  Möglichkeiten, 2 mögliche Permutationen

..

$k$ -te Auswahl:  $n-(k-1)$  Möglichkeiten,  $k$  mögliche Permutationen

$$\begin{aligned} \Rightarrow \text{Möglichkeiten insgesamt: } & \frac{n(n-1)(n-2)\dots(n-(k-1))}{1 * 2 * \dots * (k-1)(k-2)k} \quad \left. \begin{array}{l} \text{\{ 1 neue Möglichkeit pro unterschiedlichem Fall \\ \text{\{ Anzahl der Wege, die zur selben Teilmenge führen} \end{array} \right\}} \\ &= \frac{n(n-1)(n-2)\dots(n-(k-1))}{k!} \\ &= \frac{n!}{(n-k)!k!} \\ &= \binom{n}{k} \end{aligned}$$

□

### Beispiel:

Nehmen wir das Ereignis  $E$ : bei einer Lotto-Ziehung "6 aus 49" sind genau 4 Zahlen richtig.

$$P(E) = \frac{\binom{6}{4} \binom{43}{2}}{\binom{49}{6}}$$

Zunächst nimmt man die Anzahl an Möglichkeiten, 4 richtige Kugeln von 6 zu ziehen, man multipliziert diese durch die Anzahl an Möglichkeiten, 2 Kugeln aus den 43 "unerwünschten" zu ziehen. Um die Wahrscheinlichkeit zu erhalten teilt man durch die Gesamtanzahl an Möglichkeiten, 6 Kugeln aus 49 zu ziehen.

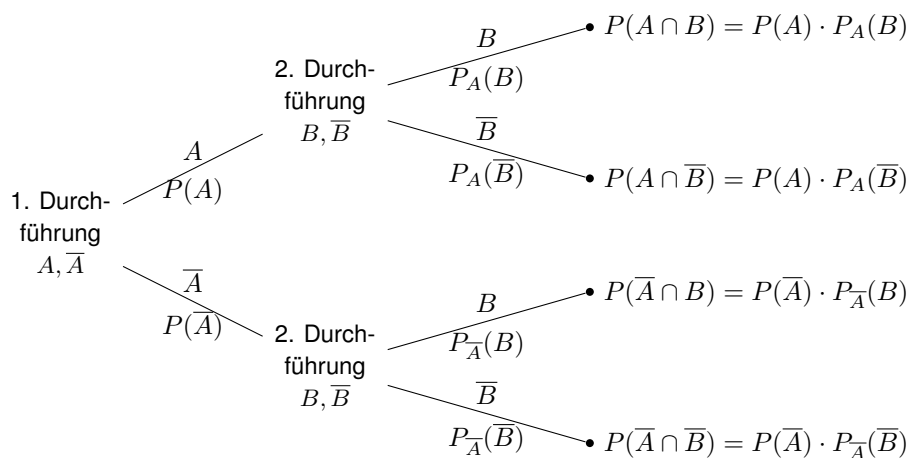
## 11.3 Bedingte Wahrscheinlichkeiten

### Definition

Sind  $A$  und  $B$  beliebige Ereignisse mit  $P(A) \neq 0$ , so bezeichnet man  $P_A(B)$  oder  $P(B|A)$  die **durch  $A$  bedingte Wahrscheinlichkeit von  $B$** . Es gilt:

$$P_A(B) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)}$$

Daraus ergibt sich die korrekte Darstellung als Baumdiagramm:



### 11.3.1 Stochastische Unabhängigkeit

#### Definition

Die Ergebnisse  $A$  und  $B$  werden stochastisch unabhängig genannt, wenn das Eintreten  $A$ s die Wahrscheinlichkeit  $B$ s nicht verändert. Es gilt dann:

$$P_A(B) = P(B)$$

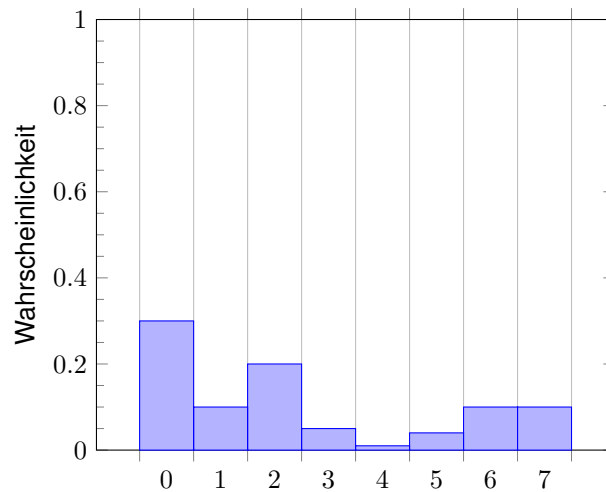
## 11.4 Wahrscheinlichkeitsverteilung

### Definition

Man nennt  $P(e_i)$  **Wahrscheinlichkeit** und die Zuordnung  $e_i \mapsto P(e_i)$  **Wahrscheinlichkeitsverteilung**, wenn gilt:

- $e_i \in S = \{e_1, e_2, \dots, e_n\} \wedge P(e_i) \in \mathbb{R}$
- $\exists P(e_i) \forall e_i \in S$
- $0 \leq P(e_i) \leq 1 \forall i \leq n$
- $P(e_1) + P(e_2) + \dots + P(e_n) = 1$
- ?

Darstellung:

**Bemerkung:**

Dieses Balkendiagramm wird als Histogramm bezeichnet und ist in vielen Fällen eine gute Darstellungsmöglichkeit.

**GTR-Tipp:**

1. Mit `seq()` (in LIST > OPS) wird die Liste mit allen X-Werten generiert:  
`seq(X,X,0,<Anzahl an Versuchen>,1)→<Variable>.`  
 (→ wird durch die Taste `STO>` aufgerufen)
2. Mit `<gewünschte Verteilung>()` (in DISTR > DISTR) wird die Liste mit allen Y-Werten generiert:  
`<Verteilung>(<Anzahl an Versuchen>,<Erfolgswahrscheinlichkeit>)→<Variable>.`
3. Im Menü STAT PLOT > Plot 1 kann der gewünschte Anzeigemodus gewählt werden, für die Xlist wird die erste Liste gewählt, für Freq die zweite. Beim Anzeigende auf die richtigen Maßstäbe: Die Anzahl an Versuchen für Xmax, 1 für Ymax.

**Bemerkung:**

Der GTR ist ab einer Anzahl von über 48 überfordert, dann können die Balken wegen der niedrigen Auflösung nicht alle angezeigt werden. In einem solchen Fall kann nur ein Ausschnitt des Histogramms angezeigt werden, sonst erscheint eine Fehlermeldung.

**Bemerkung:**

Alternativ kann eine Funktion definiert werden über  
`<Verteilung>(<Anzahl an Versuchen>,<Erfolgswahrscheinlichkeit>,round(X,0))` und anschließend angezeigt werden.

Dies funktioniert nur für ganze  $x$ , weshalb  $X$  durch `round(X,0)` (zu finden in... (KP, catalog durchsuchen)) auf den nächsten ganzen Wert gerundet wird.

**Definition - Erwartungswert**

Es sei eine Zufallsvariable  $X$  mit Werten  $x_1, x_2, \dots, x_n$  und die zugehörige Wahrscheinlichkeitsverteilung  $P(X)$ . Als Erwartungswert  $\mu$  wird das arithmetische Mittel der Werte von  $P(X)$  bezeichnet:

$$E(X) = \mu = \sum_{i=1}^n x_i P(X = x_i)$$

**Definition - Median einer Wahrscheinlichkeitsverteilung**

Als Median einer Wahrscheinlichkeitsverteilung bezeichnen wir den Wert  $X_n$ , ab dem die kumulierte Wahrscheinlichkeit von  $P(X = x_i)$  den Wert von 50% überschreitet.

Bemerkung:

Anschaulich bezeichnet der Erwartungswert den durchschnittlichen Wert, den eine Zufallsgröße annimmt, wenn ein Zufallsexperiment unendlich oft durchgeführt wird.

**11.4.1 Binomialverteilung****Theorem**

Für eine Bernoulli-Kette der Länge  $l \in \mathbb{N}$  und der Trefferwahrscheinlichkeit  $P$  (Wahrscheinlichkeit für einen Pfad) gilt:

$$P(X = k) = \binom{l}{k} p^k (1-p)^{l-k}$$

mit  $k$  der gewünschten Anzahl an Erfolgen.

Außerdem gilt:

$$P(X \leq k) = \sum_{i=0}^k \binom{l}{i} p^i (1-p)^{l-i}$$

Bemerkung:**Definition**

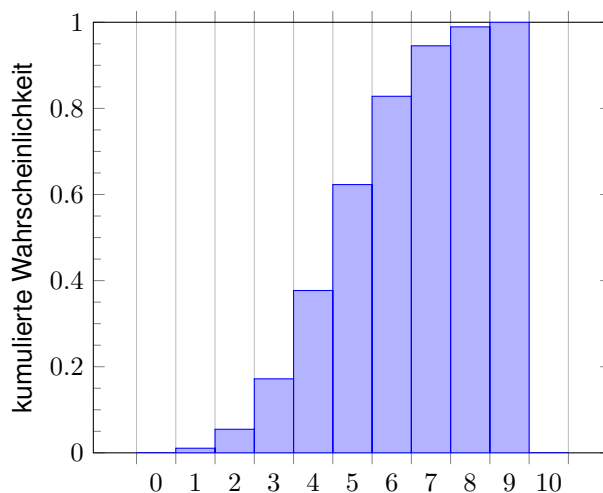
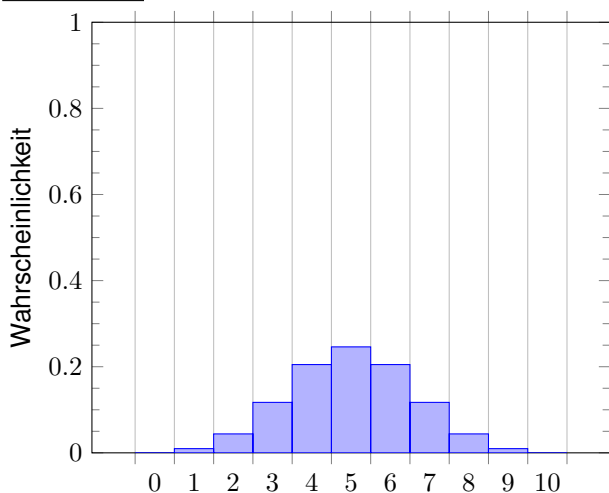
$X$  heißt in diesem Fall **binomialverteilte Zufallsvariable**. Die entsprechende Wahrscheinlichkeitsverteilung heißt Binomialverteilung  $B_{l,p}(k)$ .  $l$  ist die Länge der Bernoulli-Kette,  $p$  die Erfolgswahrscheinlichkeit und  $k$  ist die gewünschte Anzahl an Erfolgen.

GTR-Tipp:

Beide Berechnungen werden durch einen GTR-Befehl automatisiert:

- $\binom{l}{k} p^k (1-p)^{l-k}$  wird durch den Befehl `binomPDF(1,p,k)` berechnet.
- $\sum_{i=0}^k \binom{l}{i} p^i (1-p)^{l-i}$  wird durch den Befehl `binomCDF(1,p,k)` berechnet.

Beide Befehle befinden sich im DISTR-Menü (2ND+VARS)

Darstellung:



## Erwartungswert

### Theorem - Erwartungswert einer Binomialverteilung

Für eine binomialverteilte Zufallsvariable  $X$  gilt:

$$E(x) = n \cdot p$$

mit  $n$  der Anzahl an Versuchen, und  $p$  der Erfolgswahrscheinlichkeit eines Versuchs.

### Beweis

$$\begin{aligned} E(x) &= \sum_{k=0}^n x_k \cdot P(X = x_k) \\ &= \sum_{k=0}^n k \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k} \\ &= \sum_{k=0}^n k \frac{n!}{(n-k)!k!} \cdot p^k (1-p)^{n-k} \\ &= n \cdot p \cdot \sum_{k=0}^n k \frac{(n-1)!}{(n-k-1)!k!} p^{k-1} (1-p)^{n-k} \\ &= n \cdot p \cdot \sum_{k=0}^n k \binom{n-1}{k-1} p^k (1-p)^{n-k} \\ &= n \cdot p \cdot \sum_{k=1}^n k \binom{n-1}{k-1} p^k (1-p)^{n-k} \\ &= n \cdot p \end{aligned}$$

#### Bemerkung:

Der Startindex der Summe kann verändert werden, da die kumulierte Wahrscheinlichkeiten sich nicht verändert. Für  $k=0$  ist  $\binom{n-1}{k-1} = 0$ .

□

## 11.4.2 Sigmaumgebungen

### Einschub: Normalverteilung

#### Definition

Eine stetige Zufallsvariable  $X$  hat eine (Gauß- oder) Normalverteilung mit Erwartungswert  $\mu$  und Varianz  $\sigma^2$ , oft geschrieben als  $X \sim \mathbb{N}(\mu, \sigma^2)$ , wenn  $X$  die folgende Wahrscheinlichkeitsdichte hat:

$$f(x | \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}; \quad -\infty < x < \infty$$

Warum interessiert uns das? Weil die Binomialverteilung diese symmetrische Kurve für  $n \rightarrow \infty$  Versuche annähert. Nicht überzeugt? Über die Varianz können wir interessante Aussagen über die Verteilung der Wahrscheinlichkeiten machen.

## Theorem

Für eine binomialverteilte Zufallsvariable  $X$  mit den Parametern  $n, p$  und der Varianz  $\sigma = \sqrt{np(1-p)}$  erhält man folgende Näherungen:

- $P(\mu - \sigma \leq X \leq \mu + \sigma) \approx 68,3\%$
- $P(\mu - 2\sigma \leq X \leq \mu + 2\sigma) \approx 95,4\%$
- $P(\mu - 3\sigma \leq X \leq \mu + 3\sigma) \approx 99,7\%$

## Beweis

$$\begin{aligned} & e^{-\frac{(\mu - \sigma - \mu)^2}{2\sigma^2}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sqrt{np(1-p)})^2}} e^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi np(1-p)}} e^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

□

### 12.1 Lineare Gleichungssysteme und Gaußalgorithmus

Lineare Gleichungssysteme lassen sich aufwendig mit Einsetzungsverfahren oder Additionsverfahren lösen, Carl Friedrich Gauß (1777-1855) hat ein Algorithmus erfunden, mit dem sie sich ohne Taschenrechner leicht und relativ schnell lösen lassen.

Am Besten wird dieser mit einem Beispiel Erläutert:

$$\Rightarrow \begin{cases} 4x + 3y + z = 13 & (1) \\ 2x - 5y + 3z = 1 & (2) \\ 7x - y - 2z = -1 & (3) \end{cases} \quad \{ 1 \cdot (1) - 2 \cdot (2) \} \text{ und } \{ 7 \cdot (1) - 4 \cdot (3) \} \quad D = \mathbb{R}^3$$

Hier versucht man in Zeile (2) und (3) die erste Variabel zu eliminieren

$$\Leftrightarrow \begin{cases} 4x + 3y + z = 13 \\ 0x + 13y - 5z = 11 \\ 0x + 25y + 15z = 95 \end{cases} \quad \{ 25 \cdot (2) - 13 \cdot (3) \}$$

Jetzt versucht man die zweite Variabel in der dritten Gleichung zu eliminieren

$$\Leftrightarrow \begin{cases} 4x + 3y + z = 13 \\ 0x + 13y - 5z = 11 \\ 0x + 0y - 320z = -960 \end{cases} \quad \Leftrightarrow z = 3$$

Jetzt wird eingesetzt

$$\Leftrightarrow \begin{cases} 4x + 3y + z = 13 \\ 0x + 13y - 5 \cdot 3 = 11 \\ 0x + 0y + z = 3 \end{cases} \quad \Leftrightarrow y = 2$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} x + 0y + 0z = 1 \\ 0x + y + 0z = 2 \\ 0x + 0y + z = 3 \end{cases}$$

$\mathbb{L} = \{(1; 2; 3)\}$  Die Lösungsmenge wird als n-Tupel (geordnete Objekte) alphabetisch sortiert.

### 12.2 LGS mit dem Taschenrechner lösen

#### 12.2.1 Eindeutig lösbare lineare Gleichungssysteme

Ein lineares Gleichungssystem lässt sich sehr viel schneller mit dem Taschenrechner lösen:

$$\Rightarrow \begin{cases} 4x + 3y + z = 13 \\ 2x - 5y + 3z = 1 \\ 7x - y - 2z = -1 \end{cases}$$

Hierfür geht man beim Taschenrechner auf [matrix] und auf [edit]. Dann gibt man seine Matrix (hier als Beispiel) ein:

$$\Rightarrow \left| \begin{array}{cccc} 4 & 3 & 1 & 13 \\ 2 & -5 & 3 & 1 \\ 7 & -1 & -2 & -1 \end{array} \right|$$

Dann geht man wieder in den rechnen-Modus und gibt ein: [matrix], dann geht man auf [math], [rref]. dann geht man nochmal auf [matrix], [A] (die gerade bearbeitete Matrix):

$$\Leftrightarrow \left| \begin{array}{cccc} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 3 \end{array} \right| \Rightarrow \mathbb{L} = \{(1; 2; 3)\}$$

Die Lösungsmenge wird als n-Tupel angegeben.

Wenn sich Werte mit Kommazahlen ergeben, ist es nützlich, im Taschenrechner [Math] + [1](Frac) einzugeben, um sich die Werte in Brüchen anzeigen zu lassen.

### 12.2.2 Nicht eindeutig lösbare lineare Gleichungssysteme

Oft begegnen einem auch unterbestimmte LGS, sei es in der Geometrie (Zwei Ebenengleichungen, die in einem Gleichungssystem als Lösung die Schnittgerade ergeben) oder in anderen Teilbereichen. Sie sind auch recht aufwendig von Hand zu lösen, deshalb hier den schnelleren GTR-Lösungsweg:

$$\Rightarrow \begin{cases} x_1 - 2x_2 + 0x_3 = 10 \\ x_1 - x_2 - x_3 = 5 \end{cases}$$

Unterbestimmte LGS erkennt man daran, dass es mehr unbekannte als Gleichungen gibt:

$$\Rightarrow \left| \begin{array}{cccc} 1 & -2 & 0 & 10 \\ 1 & -1 & -1 & 5 \end{array} \right|$$

$$\Leftrightarrow \left| \begin{array}{cccc} 1 & -2 & 0 & 10 \\ 0 & 0 & 1 & 5 \end{array} \right| \Rightarrow \mathbb{L} = \{(2t + 10; t; t + 5 | t \in \mathbb{R})\}$$

Auch hier wird die Lösungsmenge als n-Tupel angegeben, in Abhängigkeit eines Faktors, dessen Wertebereich in der Lösungsmenge ebenfalls angegeben werden muss.

### 13.1 Algorithmen und Programmierung

#### Definition

Algorithmen besitzen die folgenden charakteristischen Eigenschaften:

- Eindeutigkeit: ein Algorithmus darf keine widersprüchliche Beschreibung haben. Diese muss eindeutig sein.
- Ausführbarkeit: jeder Einzelschritt muss ausführbar sein.
- Finitheit (= Endlichkeit): die Beschreibung des Algorithmus muss endlich sein.
- Terminierung: nach endlich vielen Schritten muss der Algorithmus enden und ein Ergebnis liefern.
- Determiniertheit: der Algorithmus muss bei gleichen Voraussetzungen stets das gleiche Ergebnis liefern.
- Determinismus: zu jedem Zeitpunkt der Ausführung besteht höchstens eine Möglichkeit der Fortsetzung. Der Folgeschritt ist also eindeutig bestimmt.

Diese Eigenschaften können in der Mathematik genutzt werden, um Probleme zu lösen. Hierfür bedarf es einer einheitlichen Schreibweise.

Insbesondere vor dem Abitur stehen den Schülern mehrere Möglichkeiten zur Verfügung, die im Folgenden behandelt werden.

#### 13.1.1 Pseudocode

Pseudocode ist ein Programmcode, der nicht zur maschinellen Interpretation, sondern lediglich zur Veranschaulichung eines Algorithmus dient. Meistens ähnelt er höheren Programmiersprachen, gemischt mit natürlicher Sprache und mathematischer Notation. Er ist leichter verständlich als realer Programmcode aber klarer und weniger missverständlich als eine Beschreibung in natürlicher Sprache.

Beispiel:

Ein Beispiel erübrigt sich.

#### 13.1.2 Python

Programmiersprache, bekannt durch ihre einfach verständliche Syntax, sie gilt als höhere Sprache, was sie zu einer auf die (gesprochene) Sprache angepasste Sprache macht. Sie ist somit gerade für Einsteiger interessant und eignet sich dennoch für größere Projekte. Ein weiterer Vorteil ist die mittlerweile allgegenwärtige Präsenz der Sprache, denn sie wird auch für Apps und Web-Entwicklung verwendet.

#### Syntax

Folgendes macht die Syntax Pythons aus:

- gute Lesbarkeit des Quellcodes

- englische Schlüsselwörter
- wenig syntaktische Konstruktionen

## Funktionsweise

Python verwendet Schleifen und Verzweigungen.

```
#Schleifen:
for: #(Wiederholung ueber Elemente einer Sequenz (Zahl, Liste, Zeit...))
    #Inhalt der Schleife
while: #(Wiederholung, solange ein logischer Ausdruck wahr ist)
    #Inhalt der Schleife

#Verzweigungen:
if: #(prueft, ob ein logischer Ausdruck wahr ist)
    #Inhalt der Verzweigung
elif: #(prueft, ob ein anderer logischer Ausdruck wahr ist)
    #Inhalt der Verzweigung
else: #(letzter Fall, tritt ein, wenn keine der obigen Bedingungen erfuehlt wurde)
    #Inhalt der Verzweigung
```

### Beispiel:

Man nehme den Algorithmus, der die Fibonacci-Sequenz bis zum  $n$ -ten Glied generiert:

```
a = 0
b = 1
n = 10
for iteration in range(n):
    print(a)
    a = a+b
    b = a-b
```

## 13.2 Algorithmen und mathematische Anwendungen

### 13.2.1 Iterationsverfahren

Unter Iteration versteht man ein Verfahren zur schrittweisen Annäherung an die Lösung einer Gleichung unter Anwendung eines sich wiederholenden Rechengangs. Das bedeutet, (wenn es möglich ist) aus einer Näherungslösung durch Anwenden eines Algorithmus zu einer besseren Näherungslösung zu kommen und die Lösung beliebig gut an die exakte Lösung heranzuführen. Man sagt dann, dass die Iteration konvergiert.

Beispiele für Verfahren dieser Art werden im Folgenden behandelt.

#### Newton-Rhapson Verfahren

Das Newton-Rhapson Verfahren, auch bekannt als Newtonmethode dient der Nullstellenbestimmung komplexer Polynome und allgemein jeder differenzierbaren Funktion.

Die Grundidee ist, die Nullstelle der Tangente an der Stelle  $x_0$  von  $f$  zu nehmen und den Vorgang mit  $f(NS_T)$  zu wiederholen.

Eine mögliche Umsetzung in Python wäre:

```
def fx(x):
    return 3*x**3+5*x**2+3          #beliebige Funktion (muss angegeben werden)

def f_strich(x):
    return 9*x**2+10*x             #muss auch manuell angegeben werden

def NS_Tangente(x):
```

```

    NS_T = x - fx(x)/f_strich(x)
    return NS_T

Startwert=1
altwert = NS_Tangente(Startwert)
Genauigkeit = 0.00001

while abs(altwert-NS_Tangente(altwert))>Genauigkeit:
    altwert=NS_Tangente(altwert)
print(altwert)

```

### Heron-Verfahren

Es handelt sich hierbei um eine vereinfachte Version des Newton-Rhapson Verfahrens, da es zur Berechnung einer Näherung der Quadratwurzel einer reellen Zahl  $a > 0$  dient.

Man erhält das gewünschte Ergebnis durch die Berechnung der Nullstelle einer Funktion  $f(x) = x^2 - a$ . Es gilt also:  $f'(x) = 2x$ .

Durch die Verwendung des Newton-Rhapson Verfahrens erhält man die Iterationsvorschrift:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \Leftrightarrow x_{n+1} = x_n - \frac{x_n^2 - a}{2x_n} = \frac{x_n^2 + a}{2x_n} = \frac{1}{2} \left( x_n + \frac{a}{x_n} \right)$$

Als kluger, ungefähr zutreffender Startwert gilt  $x_0 = \frac{a+1}{2}$

Eine mögliche Umsetzung in Python wäre:

```

a=2                                     #Muss manuell angegeben werden
def fx(x):
    return x**2-a

def f_strich(x):
    return 2*x

def next_val(wert):
    return 0.5*(wert+(a/wert))

Startwert=(a+1)/2
altwert = next_val(Startwert)
Genauigkeit = 0.00001

while abs(altwert-next_val(altwert))>Genauigkeit:
    altwert=next_val(altwert)
print(altwert)

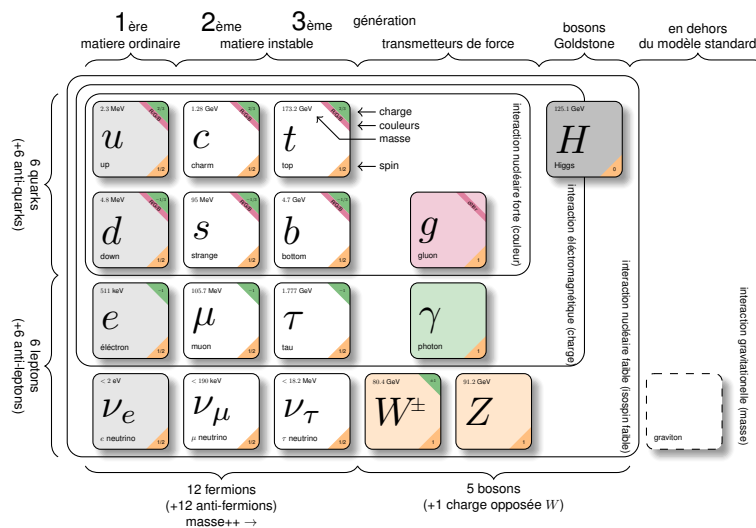
```

## ANHANG: PHYSIK

by BRUNO

### 14.1 La physique des particules

Le modele standard de la physique dans sa beauté incontestée.



### 14.2 Interaction gravitationnelle

#### Definition

L'interaction gravitationnelle est une force toujours **attractive** qui agit sur tout ce qui possde une masse, mais avec une intensité extrmement faible (c'est l'interaction la plus faible). Son domaine d'action est **l'infini**.

Un corps est considéré ponctuel si sa taille  $\leq \frac{\text{distance d'observation}}{100}$

$$\vec{F}_g = -\frac{G \cdot m_a \cdot m_b}{r^2} \cdot \vec{u}_{AB}$$

Si:  $r = AB$   $G = 6,67 \cdot 10^{-11}(\text{S.I})$   $\vec{u}_{AB} \rightarrow$  vecteur normé



### 14.2.1 Le champ de gravitation

#### Definition

Tout objet de Masse  $M$  et d'origine spaciale  $O$  crée autour de lui un champ gravitationnel.

En un point quelconque  $P$ , ce champ s'écrit  $\vec{\mathcal{G}}_{(P)}$ .

Un deuxime objet de masse  $m$  placé en ce point  $P$  est soumis a la force de gravitation:

$$\vec{F}_{O/P} = m \cdot \vec{\mathcal{G}}_{(P)}$$

D'ou on peut tirer la formule pour le champ de gravitation d'un objet considéré ponctuel de masse  $M$  a une distance  $d$ :

$$\mathcal{G}_o = \frac{G \cdot M}{d^2}$$

### 14.3 Interaction électromagnétique

#### Definition

L'interaction électromagnétique est une force **attractive** ou **répulsive** qui agit sur tout ce qui possde une charge électrique. Son domaine d'action est également **l'infini**.

### 14.3.1 Le champ électrique

#### Definition

La loi de Coulomb

Dans le vide, 2 corps ponctuels A et B de charges  $q_a$  et  $q_b$  exercent l'un sur l'autre des forces :

$$\vec{F}_{A/B} = K \cdot \frac{q_a \cdot q_b}{r^2} \cdot \vec{U}_{A/B}$$

avec

$$K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9,0 \cdot 10^9 (S.I.)$$

$\epsilon_0$ : permittivité du vide (réponse d'un milieu donné a un champ électrique appliqué) ( $8,85 \cdot 10^{-12}$ )

⚠ [5ex]  $\vec{F}$  et  $\vec{E}$  n'ont pas forcément le même sens, cela dépend de la charge  $q$

La relation entre force électrique et champ électrique s'exprime avec  $q$  (Coulombs), charge de source:

$$\vec{F}_e = q \cdot \vec{E}$$

$$\Rightarrow F_e = |q| \cdot E$$

Le champ électrique s'exprime donc de cette manière:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \cdot \vec{U}_{A/B}$$

$J$ 
 $C$ 
 $m^2$

$\vec{E}$  va dans le sens des potentiels décroissants

Les lignes de champ sont tangentes aux vecteurs champ électrique tandis que les équipotentiels relient les points où le champ électrique possède la même valeur (intensité)

Dans un condensateur plan, le champ électrique est uniforme (lignes de champ parallèles) et la valeur du champ électrique est

$$E = \frac{|U_{ab}|}{d}$$

$J$ 
 $V$ 
 $m$

et, avec  $Q$  (charge totale) et  $S$  (surface des armatures)

$$E = \frac{Q}{\epsilon_0 \cdot S}$$

$J$ 
 $C$ 
 $m^2$ 
 $S.I.$

### 14.3.2 Le champ magnétique

#### Definition

**Dans une bobine:** Soit  $B_i$  l'intensité du champ magnétique,  $I$  l'intensité du courant,  $N$  le nombre de spires (jointives) et  $l$  la longueur de la bobine,

$$B_i = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{l}$$

$T$  ———  $B_i$  ———  $N \cdot I$  ———  $l$  ———  $m$   
 $S.I.$

avec la perméabilité du vide

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$$

On obtient deux bobines de Helmholtz quand  $d = R$ ; Le champ est donc uniforme

## 14.4 Mouvement, vitesse et accélération d'un système physique

#### Definition

Dans la base de Frenet: avec  $a_\tau$  l'accélération tangentielle et  $a_\eta$  l'accélération normale et  $\rho$  le rayon de courbure,

$$a_\tau = \frac{dV}{dt} \quad \text{et} \quad a_\eta = \frac{v^2}{\rho}$$

$m$

$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_\eta^2}$$

Voici les trois formules magiques pour un mouvement rectiligne uniformément varié:

$$a_x = \text{cste}$$

$$v_x = a_x \cdot t + v_{x0}$$

$$x = \frac{1}{2}a_x \cdot t^2 + v_{x0} \cdot t + x_0$$

Dans un mouvement circulaire de rayon  $R$ , avec  $\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$  étant la vitesse angulaire,

$$V = \omega \cdot R$$

rad/s

La fréquence  $f$  est définie

$$f(\text{Hz}) = \frac{1}{T(\text{s})} = \frac{\omega(\text{rad/s})}{2\pi(\text{rad})}$$

## 14.5 Les 3 lois de Newton

### 14.5.1 1<sup>ère</sup> loi

#### Definition

Dans un référentiel galiléen, le centre d'inertie d'un solide isolé ou pseudo-isolé est animé d'un mouvement **rectiligne uniforme** (et réciproquement) :

$$\sum \vec{F}_{ext} = \vec{0} \quad \Leftrightarrow \quad \text{Mvt rect. uniforme}$$

### 14.5.2 2<sup>ème</sup> loi

#### Definition

Dans un référentiel galiléen, le PFD prédit que

$$\sum \vec{F}_{ext} = m \cdot \vec{a}$$

### 14.5.3 3<sup>ème</sup> loi

#### Definition

C'est le principe de l'action et de la réaction. Soient  $A$  et  $B$  deux centres d'inertie de deux objets dans un référentiel galiléen :

$$\vec{F}_{A \rightarrow B} = -\vec{F}_{B \rightarrow A}$$

## 14.6 Énergies et TEC

### Definition

L'énergie fait bouger des choses... Il existe plusieurs formes d'énergie :

- $E_c$  L'énergie cinétique, Vitesse  $v$  :  $E_c = 1/2 \cdot m \cdot v^2$
- $E_{pp}$  L'énergie potentielle de pesanteur, Altitude  $z$  :  $E_{pp} = m \cdot g \cdot z$
- $E_{pe}$  L'énergie potentielle élastique, Longueur déformée  $x$  :  $E_{pe} = 1/2 \cdot k \cdot x$
- $E_{th}$  L'énergie thermique, Température  $T$
- $E_c$  L'énergie potentielle électrique :  $E_c = 1/2 \cdot C \cdot U_c^2$
- $E_m$  L'énergie potentielle magnétique :  $E_m = 1/2 \cdot L \cdot i^2$
- Les énergies physique, chimique et nucléaire, Masse des corps  $m$

L'énergie peut cependant changer de forme par un travail, transfert d'énergie :

- travail mécanique  $W_m$  (force) :  $W_{A \rightarrow B}(\vec{F}) = W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \overrightarrow{AB} = F \cdot AB \cdot \cos \alpha$
- travail électrique  $W_e$  (courant électrique) :  $W_{A \rightarrow B}(\vec{F}_e) = q \cdot (V_A - V_B)$
- travail rayonnant  $W_r$  (rayonnement)
- chaleur  $Q$  (chaleur)

On retient aussi :

$$\begin{aligned} W_{AB}(\vec{P}) &= m \cdot g \cdot (z_A - z_B) \\ W_{AB}(\vec{f}) &= -f \cdot \widetilde{AB} \\ W_{AB}(\vec{R}_n) &= 0 \\ W_{AB}(\vec{F}_R) &= 1/2 \cdot k \cdot (x_B^2 - x_A^2) \end{aligned}$$

La **puissance moyenne** mesure la quantité d'énergie transférée par seconde :

$$P_m(\vec{F}) = \frac{W_{AB}(\vec{F})}{\Delta t}$$

$\xrightarrow{J}$   
 $\xleftarrow{s}$

La **puissance instantanée**:

$$P(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \vec{v} = F \cdot v \cdot \cos \alpha$$

Le **TEC** :

$$\Delta E_{cA \rightarrow B} = \sum W_{AB}(\vec{F}_{ext})$$

## 14.7 L'analyse dimensionnelle

### Definition

Les différentes dimensions sont :

- Longueur  $L$
- Masse  $M$
- Durée  $T$
- Température  $\theta$
- Intensité électrique  $I$
- Intensité lumineuse  $J$
- Quantité de matière  $N$

Il ne faut pas oublier les grandeurs sans dimensions, comme les angles ou les facteurs...

## 14.8 Mouvements dans le champ de pesanteur uniforme

### Definition

La force de frottement du fluide sur le corps peut être donnée par l'expression:

$$f = k \cdot v^n$$

où  $k$  contient le coefficient de pénétration du corps et la nature du fluide et  $n$  est réel. Ce sont des coefficients seulement déterminables par des expériences.

Pour des petites vitesses (quelques cm/s),  $n = 1$ , la force de frottement est donc proportionnelle à la vitesse du corps. Dans le cas d'une sphère de rayon  $R$  et  $\eta$  la viscosité,

$$f = (6\pi \cdot R \cdot \eta) \cdot v$$

Pour des vitesses plus grandes (quelques m/s),  $n = 2$  convient mieux. Si  $S$  est la section,  $C_x$  le coefficient de traînée,  $\rho_{fluide}$  la masse volumique,

$$f = \frac{1}{2} C_x \cdot \rho_{fluide} \cdot S \cdot v^2$$

Dans une chute non libre, le régime **permanent** est atteint quand  $\vec{P} = -\vec{f}$ , donc quand  $a = \frac{dv}{dt} = 0$ .

## 14.9 Mouvements de satellites et des planètes

### Definition

L'accélération d'un satellite terrestre est égal au champ de gravitation:

$$\vec{a} = \vec{\mathcal{G}}$$

Des formules souvent retrouvées sont :

$$g_0 \approx \mathcal{G}_0 = \frac{G \cdot M_T}{R_T^2} \Leftrightarrow G \cdot M_T = g_0 \cdot R_T^2$$

$$a = a_n = \frac{G \cdot M_T}{r^2} = \frac{v^2}{r} \Leftrightarrow v = \sqrt{\frac{G \cdot M_T}{r}} = \sqrt{\frac{g_0 \cdot R_T^2}{(R_T + h)}}$$

$$V = \frac{d}{t} = \frac{2\pi r}{T} \Leftrightarrow T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi r}{\sqrt{\frac{G \cdot M_T}{r}}} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{r^3}{G \cdot M_T}} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{(R_T + h)^3}{g_0 \cdot R_T^2}}$$

### 14.9.1 Les 3 lois de Kepler

#### Definition

**1<sup>ère</sup> loi :**

La trajectoire d'un astre (solaire) est une ellipse dont le soleil est un des foyers

**2<sup>ème</sup> loi :**

Si la planète met la même durée pour aller de  $A \rightarrow B$  que de  $C \rightarrow D$ , alors  $\mathcal{A}_{AMB} = \mathcal{A}_{CMD}$

**3<sup>ème</sup> loi :**

$$\frac{T^2}{a^3} = cste$$

## 14.10 Systèmes oscillants

### Definition

A COMPLETER APRES AVOIT FAIT LES OSCILLATEURS ÉLECTRIQUES

La période propre d'un pendule simple, non amorti est :

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

Bien que  $T_0$  est aussi proportionnel à l'amplitude  $\theta$ , ce facteur peut être négligé dans nos calculs

La période propre d'un pendule élastique horizontal non amorti est :

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

On remarque que la **pulsation propre**  $\omega_0$  d'un pendule élastique horizontal non amorti est un peu comme la vitesse angulaire pour un oscillateur :

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Dans le cas d'un système oscillant amorti, on distingue entre un régime **pseudo-périodique** et un régime **apériodique** (aucune oscillation)

## 14.11 Oscillateurs mécaniques en régime forcé

### Definition

La bande passante est l'intervalle des fréquences pour lesquelles le résonnateur donne une réponse importante en amplitude. Elle est déterminable sur le graphique de l'amplitude en fonction de la fréquence.

On fait  $\frac{X_{mres}}{\sqrt{2}}$  et on retrouve la largeur de la bande passante  $\Delta f = f_2 - f_1$ . Il en résulte le facteur de qualité  $Q$  :

$$Q = \frac{f_{res}}{\Delta f} \approx \frac{f_0}{f_2 - f_1}$$



## 14.12 Émission, propagation et réception des ondes

### Definition

La célérité (vitesse de propagation) de l'onde est constante dans un milieu non dispersif.

$$v = \frac{d}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$$

Une onde est périodique dans l'espace et dans le temps. Dans un moment donné, les points  $P_1$  et  $P_2$  du milieu (en gros, deux courbes d'onde) sont en phase si

$$d(P_1; P_2) = k \cdot \lambda \quad ; k \in \mathbb{Z}$$

et ils sont en opposition de phase si

$$d(P_1; P_2) = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} ; k \in \mathbb{Z}$$

L'indice de réfraction  $n$  et la célérité  $v_\Phi$  des ondes électromagnétiques sont proportionnels:

$$v_\Phi = \frac{c}{n}$$

## 14.13 Diffraction des ondes

### Definition

Il y a seulement diffraction si l'obstacle de l'onde a une dimension du même ordre de grandeur que celle-ci.

L'écart angulaire pour la diffraction par une fente est, avec  $a$  largeur de la fente,  $\theta$ , mesuré entre le milieu de la tache centrale et la première extinction :

$$\theta = \frac{\lambda}{a}$$

## 14.14 Particules chargées dans un champ électrique ou magnétique

### Definition

La force magnétique s'exerçant sur une particule de charge  $q$  est

$$\vec{F}_m = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$

, d'après la loi de Lorentz. On utilise la règle de la main droite pour le produit vectoriel.

Et dans la plupart des cas,  $\alpha$  vaut 90

$$\Rightarrow F_m = |q| \cdot v \cdot B \cdot \sin(\alpha)$$

La trajectoire d'une particule chargée dans un champ magnétique est circulaire, lorsqu'on reste dans un plan. La trajectoire dans un champ électrique est une parabole. La trajectoire rectiligne suivant l'accélération dans  $E$  passe par le milieu d'une des faces du condensateur.

## 14.15 Action d'un champ magnétique sur un circuit parcouru par un courant

### Definition

L'intensité instantanée dans un circuit électrique est définie par :

$$i = \frac{dQ}{dt}$$

Un conducteur rectiligne de longueur  $l$ , parcouru par un courant continu d'intensité  $I$  et placé dans un champ magnétique uniforme  $\vec{B}$  ( $\vec{l}$  : ponce,  $\vec{B}$  : index,  $\vec{F}_l$  : majeur) :

$$\vec{F}_l = I \cdot (\vec{l} \times \vec{B})$$

Le flux magnétique dans une bobine a l'unité Weber (Wb) :

$$\Phi = N \cdot \vec{B} \cdot \vec{S} = N \cdot B \cdot S \cdot \cos \alpha$$

La fem d'induction suite a une variation du flux :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}$$

$$\Rightarrow i = \frac{e}{R} = -\frac{1}{R} \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

## 14.16 Dipôles dans un circuit

### 14.16.1 Lois générales de dipôles

#### Definition

La loi d'Ohm généralisée, avec  $e$ , force électromotrice éventuelle

$$U_{AB} = R_{AB} \cdot I_{AB} - e_{AB}$$

La puissance électrique instantanée aux bornes d'un dipôle AB est exprimée en Watt (W) :

$$\mathcal{P} = U_{AB} \cdot i_{AB}$$

La puissance électrique instantanée (la bobine reçoit un travail électrique W) :

$$P = \frac{dW}{dt}$$

### 14.16.2 Le dipôle (R,L)

#### Definition

La Loi de Faraday-Lenz, avec  $L$ , inductance de la Bobine (Henri [H](#))

$$e = -L \cdot \frac{di}{dt}$$

Le flux propre appelé flux d'autoinduction de la bobine ([WB](#))

$$\Phi = L \cdot i$$

La constante de temps  $\tau$  :

$$\tau = \frac{L}{R}$$

La tension aux bornes d'une Bobine avec une résistance propre  $r$  si  $i_{A \rightarrow B}$

$$u_{AB} = r \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt}$$

L'équation différentielle à établir aura toujours des +

$$U_G = R_T \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt}$$

L'énergie (potentielle) magnétique emmagasinée par une bobine est :

$$E_m = \frac{1}{2} \cdot L \cdot i^2$$

### 14.16.3 Le dipôle (R,C)

#### Definition

La capacité du condensateur  $C$  (Farad **F**) est sa capacité à acquérir une certaine charge :

$$q = C \cdot U_c$$

La capacité  $C$  en fonction de l'aire de la surface des armatures  $A$ , de la distance entre les armatures  $d$  et la permittivité absolue de l'isolant  $\varepsilon$ .  $\varepsilon_0$  est la permittivité du vide et  $\varepsilon_r$  la permittivité relative ou constante diélectrique du matériau utilisé :

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A}{d}$$

Lors de l'association en série, l'inverse des capacités est additionné :

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

Branchés en parallèle, les capacités des condensateurs sont additionnées.

La constante de temps  $\tau$  :  $\tau = R \cdot C$

L'intensité aux bornes du condensateur lors de la charge et de la décharge :

$$i = C \cdot \frac{dU_C}{dt} = C \cdot \frac{dU_{AB}}{dt}$$

L'équation différentielle à établir aura toujours des +

$$U_G = \frac{dq}{dt} + \frac{q}{RC}$$

L'énergie (potentielle) électrique emmagasinée par le condensateur initialement déchargé est :

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_c^2$$

### 14.16.4 Le dipôle (R,L,C) et les oscillations électriques

#### Definition

On rappelle la pulsation propre  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$

La période propre  $T_0$  des oscillations électriques est :

$$T_0 = 2\pi\sqrt{LC}$$

$$\Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$