



Mathematik I

Vorlesungsskript

Mitschrift von Falk-Jonatan Strube

Vorlesung von Herrn Meinhold

25. Januar 2016

Inhaltsverzeichnis

I. Elementare Grundlagen	1
1. Aussagen und Grundzüge der Logik	1
1.1. Aussagen, Wahrheitswert	1
1.2. Aussageschiebung	1
1.3. Logische Gesetze (Tautologien)	2
1.4. Aussagefunktionen, Quantoren, Prädikatenlogik	4
2. Mengen	5
2.1. Begriffe	5
2.2. Mengenverknüpfungen	6
2.3. Relationen	7
2.3.1. Grundbegriffe	7
2.3.2. Operationen auf Relationen	10
2.3.3. Äquivalenzrelationen	13
2.3.4. Ordnungsrelationen	14
2.3.5. Funktionen	16
2.4. Gleichmächtigkeit, Kardinalzahlen	19
2.5. Prinzip der vollständigen Induktion	21
3. Zahlen	22
3.1. Gruppen, Ringe, Körper	22
3.2. Zahlentheorie	23
3.3. Reelle Zahlen	26
3.3.1. Algebraische Struktur	26
3.3.2. Zahlendarstellung im Computer	29
3.3.3. Ordnungsstruktur	32
3.4. Komplexe Zahlen	35
3.4.1. Begriff, Rechenregeln	35
3.4.2. Darstellungsformen komplexer Zahlen	37
3.4.3. Spezielle Gleichungen	38
3.4.4. Anwendung im Wechselstromkreis	40
4. Reellwertige Funktionen einer reellen Veränderlichen	41
4.1. Elementare Funktionen (Teil 1)	41
4.1.1. Polynome	41
4.1.2. Gebrochen rationale Funktionen	42
4.1.3. Trigonometrische Funktion	43
4.1.4. Exponentialfunktion	43
4.1.5. Hyperbelfunktion	44
4.2. Umkehrfunktionen	44
4.3. Elementare Funktionen (Teil 2)	45
4.3.1. Wurzel- und Logarithmusfunktionen	45
4.3.2. Arcusfunktionen	46
4.3.3. Areafunktionen	47
5. Lineare Algebra	47
5.1. Vektorräume	47
5.2. Matrizen	50

5.3. Determinanten	53
5.4. Lineare Gleichungssysteme, Rang einer Matrix, Inverse	55
5.4.1. Das Austauschverfahren	55
5.4.2. Lineare Gleichungssysteme	57
5.4.3. Weitere Anwendungen des Austauschverfahrens	59
5.4.4. Die Inverse einer (n,n) -Matrix	60
5.5. Vektorrechnung im Raum	61
5.5.1. Kartesische Basis	61
5.5.2. Das Skalarprodukt	62
5.5.3. Das vektorielle Produkt	63
5.5.4. Das Spatprodukt	65
5.5.5. Geraden- und Ebenengleichungen	65
5.5.6. Einige geometrische Grundaufgaben	67
5.6. Eigenwerte und Eigenvektoren	70

II. Folgen, Reihen, Grenzwerte 74

1. Zahlenfolgen 74	
1.1. Grenzwerte von Zahlenfolgen	74
1.2. Lineare Rekursionsgleichungen (Differenzengleichungen)	77

Teil I.

Elementare Grundlagen

1. Aussagen und Grundzüge der Logik

1.1. Aussagen, Wahrheitswert

Aussage: (im weiteren Sinne) Sprachlich sinnvoller, konsatierender Satz. In diesem Abschnitt werden nur zweiwertige Aussagen betrachtet, d.h. Aussagen, die entweder wahr oder falsch sind.

Bsp. 1:

- (1) Es gibt unendlich viele Primzahlen (wahr)
- (2) Es gibt unendlich viele Primzahlzwillinge, z.B. (3,5), (5,7), (11,13), (17,19) usw. (Wahrheitswert nicht bekannt!)
- (3) $5 + 7 = 13$ (falsch)
- (4) Wie spät ist es? (keine Aussage)
- (5) Diese Aussage ist falsch! (keine Aussage, paradox)
- (6) Am 30.06.2016 wird es in Dresden regnen.

(1)–(3) sind zweiwertige Aussagen, (4) und (5) sind keine Aussagen, (6) ist keine zweiwertige Aussage (Wahrscheinlichkeit, d.h. Zahl zwischen 0 und 1 angebbbar).

Bezeichnungen:

- p, q, r, ... Aussagen,
 0 ... falsche Aussage,
 1 ... wahre Aussage

Wahrheitswert:

$$w(p) = \begin{cases} 1 & \text{(falls p wahr)} \\ 0 & \text{(falls p falsch)} \end{cases}$$

$p \equiv q$ (p *identisch* q) ... p und q haben denselben Wahrheitswert

1.2. Aussagenverschiebung

- 1.) *Negation* \bar{p} („nicht p“) [oft auch $p!$ bzw. $\neg p$]

p	\bar{p}
0	1
1	0

- 2.) *Konjunktion* $p \wedge q$ („p und q“)

3.) *Disjunktion* $p \vee q$ („p oder q“) [Alternative – nicht ausschließendes Oder!]

p	q	$p \wedge q$	$p \vee q$
1	1	1	1
1	0	0	1
0	1	0	1
0	0	0	0

4.) *Implikation* $(p \Rightarrow q) := \bar{p} \vee q$ („aus p folgt q“, „wenn p, dann q“)

p	q	\bar{p}	$p \Rightarrow q$
1	1	0	1
1	0	0	0
0	1	1	1
0	0	1	1

Begriffe: $p \Rightarrow q$ (p: *Prämisse*, q: *Konklusion*)

Eine Implikation ist genau dann falsch, wenn die Prämisse richtig und die Konklusion falsch ist!

Bsp. 2:

- $-1 = 1$ (falsch) $\Rightarrow 1 = 1$ (wahr) [durch Quadrieren]
- $-1 = 1$ (falsch) $\Rightarrow 0 = 2$ (falsch) [Addition von 1]

Aus einer falschen Aussage lassen sich durch richtiges Schließen sowohl falsche als auch richtige Aussagen gewinnen.

Andere Sprechweisen: „p ist *hinreichend* für q“, „q ist *notwendig* für p“

5.) *Äquivalenz* $(p \Leftrightarrow q) := (p \Rightarrow q) \wedge (q \Rightarrow p)$ („p äquivalent q“, „p ist notwendig und hinreichend für q“, „p genau dann wenn q“)
(ist genau dann wahr, wenn p und q den selben Wahrheitswert besitzen)

1.3. Logische Gesetze (Tautologien)

Eine Tautologie t ist eine Aussagenverbindung, die unabhängig vom Wahrheitswert der einzelnen Aussagen stets wahr ist (d.h. $t \equiv 1$).

Bsp. 3:

Einige wichtige Tautologien

1.) $p \Leftrightarrow \bar{\bar{p}}$

(Negation der Negation)

2.) $p \vee \bar{p}$

(Satz vom ausgeschlossenen Dritten)

3.) a) $\overline{p \wedge q} \equiv (\bar{p} \vee \bar{q})$

b) $\overline{p \vee q} \equiv (\bar{p} \wedge \bar{q})$

(de Morgansche Regeln)

4.) $(p \Rightarrow q) \equiv (\bar{q} \Rightarrow \bar{p})$
(Kontrapositionsgesetz)

5.) $p \wedge (p \Rightarrow q) \Rightarrow q$
(direkter Beweis)

6.) $p \wedge (\bar{q} \Rightarrow \bar{p}) \Rightarrow q$
(indirekter Beweis)

Beweise mittels Wahrheitstafeln (vgl. Übung 1).

Bemerkung zu 1., 3., 4.: Eine Äquivalenz ist genau dann eine Tautologie, wenn beide Seiten identisch sind, z.B. $p \equiv \bar{\bar{p}}$.

Beweistechniken:

Zu beweisen ist q .

1.) Direkter Beweis:

- Nachweis von p (Voraussetzung)
- Richtiger Schluss $p \Rightarrow q$
Dann q wahr (Behauptung)

2.) Indirekter Beweis: Annahme von \bar{q} auf Widerspruch führen (auf unterschiedliche Weise möglich, vgl. folgendes Bsp).

Bsp. 4:

$q = \sqrt{2}$ ist irrational“ (keine rationale Zahl)

Beweis indirekt:

Es gelte \bar{q} , d.h. $\sqrt{2}$ ist rational, dann gelten folgende Schlüsse: $\sqrt{2} = \frac{m}{n}$ mit teilerfremden natürlichen Zahlen m und n .

$$\Rightarrow 2 = \frac{m^2}{n^2} \Rightarrow 2 \cdot n^2 = m^2 \Rightarrow 2|m^2$$

$$\Rightarrow \boxed{2|m} \text{ (2 ist Teiler von m)}$$

$$\Rightarrow 4|m^2 \text{ (mit } m^2 = 2n^2)$$

$$\Rightarrow 4|2n^2 \Rightarrow 2|n^2 \Rightarrow \boxed{2|n}$$

Widerspruch: Da m und n teilerfremd sind. #

Weitere Gesetze

- $p \wedge q \equiv q \wedge p$
 $p \vee q \equiv q \vee p$

(Kommutativgesetze)

- $(p \wedge q) \wedge r \equiv p \wedge (q \wedge r)$
 $(p \vee q) \vee r \equiv p \vee (q \vee r)$

(Assoziativgesetze)

- $(p \wedge q) \vee r \equiv (p \vee r) \wedge (q \vee r)$
 $(p \vee q) \wedge r \equiv (p \wedge r) \vee (q \wedge r)$
(Distributivgesetze)

- $p \wedge 1 \equiv p, p \vee 1 \equiv 1, p \wedge p \equiv p$
 $p \wedge 0 \equiv 0, p \vee 0 \equiv p, p \wedge p \equiv p$
- $p \vee (p \wedge q) \equiv p$

(Absorptionsgesetz)

1.4. Aussagefunktionen, Quantoren, Prädikatenlogik

X sei eine Menge (Gesamtheit von Objekten x mit einem gemeinsamen Merkmal, vgl. Abschnitt 2)
 $x \in X \dots x$ ist Element von X . Die Objekte haben Eigenschaften (*Prädikate*)

Aussagefunktion (auch Aussageform) $p(x)$: Jedem $x \in X$ ist eine Aussage $p(x)$ zugeordnet. Dabei steht x für ein Objekt, p für ein Prädikat.

Bsp. 5:

$X \dots$ Menge der positiven natürlichen Zahlen $(1, 2, 3, \dots)$

$p(x) := „x$ ist eine Primzahl“

$p(5) \dots$ wahr, $p(10) \dots$ falsch

Quantoren:

Betrachtet werden folgende Aussagen:

- 1.) „Für alle x (aus X) gilt $p(x)$ “ $\equiv \boxed{\forall x p(x)}$ (*universeller Quantor* / Allquantor)
- 2.) „Es existiert (wenigstens) ein x , für welches $p(x)$ gilt“ $\equiv \boxed{\exists x p(x)}$ (*existenzieller Quantor*)

Zur Schreibweise:

- Bei Anwendungen (außerhalb der reinen Logik) wird oft die Grundmenge X mit angegeben:
 $\forall x \in X p(x)$ usw.
- Falls sich Quantoren auf eine Teilmenge M von X beziehen sollen, dann können folgende Schreibweisen verwendet werden:
 $a = \forall x \in M p(x), b = \exists x \in M p(x)$.
- Die Schreibweisen in der formalen Logik sind dann:
 $a = \forall x (x \in M \Rightarrow p(x))$

Rechenregeln:

$$\boxed{\forall x p(x) \equiv \exists x \overline{p(x)}}$$

$$\boxed{\exists x p(x) \equiv \forall x \overline{p(x)}}$$

Mehrstellige Aussagefunktionen

- $p(x_1, x_2, \dots, x_n), x_1 \in X_1, x_2 \in X_2, \dots, x_n \in X_n$
Die Grundmengen X_i können, müssen aber nicht für jede Stelle gleich sein.
- Wird ein Quantor auf eine n -stellige Aussagefunktion angewandt, so entsteht eine $(n-1)$ -stellige Aussagefunktion (eine 0-stellige Aussagefunktion ist eine Aussage)
z.B.: $\exists y p(x, y, z) =: q(x, z)$, die Variable y wird durch den Quantor \exists gebunden ($y \dots$ gebundene Variable). Wichtig ist der Platz, nicht der Name der Variable.
 $x, z \dots$ freie Variable, können durch weitere Quantoren gebunden werden.

Bsp. 6:

Ein Dorf bestehe aus 2 Teilen (Ober- und Unterdorf). Es sei M die Menge aller Bewohner des Dorfes. M_1 bzw. M_2 seien die Teilmengen von M , die dem Ober- bzw. Unterdorf entsprechen.

Wir betrachten folgende zweistellige Aussagefunktionen:

$k(x, y)$... Person x (aus M) kennt Person y (aus M)

a) $a(x) := \forall y k(x, y)$... Person x kennt jeden (\Rightarrow „Für alle y gilt: x kennt y “)

$b(y) := \exists x k(x, y)$... es gibt jemanden, der y kennt

$c := \forall x \forall y k(x, y)$... jeder kennt jeden

$d := \forall y \exists x k(x, y)$... jeder wird von wenigstens einer Person gekannt

$e := \exists x \forall y k(x, y)$... es gibt mindestens eine Person, die alle Personen kennt

Man beachte:

- d und e sind nicht das Gleiche: Die Reihenfolge unterschiedlicher Quantoren muss beachtet werden. Bei d kann für jedes y ein anderes x mit $k(x, y)$ existieren. Diese Abhängigkeit von y wird manchmal in Anwendungen durch $\forall y \exists x(y) k(x, y)$ ausgedrückt.
- Es gilt aber $e \Rightarrow d$ (stets wahr: Tautologie). Der Wahrheitsgehalt von z.B. c, d, e kann dagegen nicht mit logischen Mitteln bestimmt werden.

b) Negation der Aussagen bzw. Aussageformen aus a).

$\overline{a(x)} \equiv \exists y \overline{k(x, y)}$... x kennt wenigstens eine Person nicht

$\overline{b(y)} \equiv \forall x \overline{k(x, y)}$... keiner kennt y

$\overline{c} \equiv \exists x \forall y \overline{k(x, y)} \equiv \exists x \exists y \overline{k(x, y)}$... es gibt jemanden der wenigstens eine Person nicht kennt (jemanden, der nicht alle kennt)

$\overline{d} \equiv \exists y \forall x \overline{k(x, y)}$... es gibt jemanden, der von keiner Person gekannt wird $\overline{e} \equiv \forall x \exists y \overline{k(x, y)}$... jeder kennt wenigstens eine Person nicht.

c) Folgende Aussagen sind mit Hilfe von Quantoren auszudrücken:

f ... jeder aus dem Oberdorf kennt wenigstens eine Person aus dem Unterdorf.

g ... es gibt jemanden im Unterdorf, der alle Personen des Oberdorfs kennt.

$$\begin{aligned} f &= \forall x \in M_1 \exists y \in M_2 k(x, y) \\ &= \forall x (x \in M_1 \Rightarrow \exists y (y \in M_2 \wedge k(x, y))) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} g &= \exists x \in M_2 \forall y \in M_1 k(x, y) \\ &= \exists x (x \in M_2 \wedge \forall y (y \in M_1 \Rightarrow k(x, y))) \end{aligned}$$

2. Mengen

2.1. Begriffe

Menge: Zusammenfassung gewisser wohl unterscheidbarer Objekte (Elemente) mit einem gemeinsamen Merkmal zu einem Ganzen.

Diskussion: Naiver Mengenbegriff führt zu Widersprüchen. z.B. Menge X aller Mengen, die sich nicht selbst als Element enthalten.

$$X = \{A \mid A \text{ Menge}, A \notin A\}$$

$X \in X$? Wenn $X \in X \Rightarrow X \notin X$ und $X \notin X \Rightarrow X \in X$ (Widerspruch!).

Diese Widersprüche können umgangen werden, wenn nur Teilmengen einer sogenannten Grundmenge betrachtet werden.

Bezeichnungen:

- meist große Buchstaben für Mengen: A, B, \dots, M, \dots, X
- $x \in M$... x ist Element von M
- $x \notin M$... x ist kein Element von M

Schreibweise:

$$M = \{ \dots \}_{\text{Elemente}} \text{ oder } M = \{x | p(x)\}$$

mit $p(x)$ = Aussage, die genau für die Elemente x aus M wahr ist.

Wichtige Grundmengen:

- \mathbb{N} ... Menge der natürlichen Zahlen $\{0, 1, 2, 3, \dots\}$
- $\mathbb{N}^* = \mathbb{N} \setminus \{0\} = \{1, 2, 3, \dots\}$
- \mathbb{Z} ... Menge der ganzen Zahlen $\{\dots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots\}$
- \mathbb{Q} ... Menge der rationalen Zahlen $\{x | x = \frac{m}{n}, m \in \mathbb{Z}, n \in \mathbb{Z}, n \neq 0\}$
- \mathbb{R} ... Menge der reellen Zahlen
- \mathbb{C} ... Menge der komplexen Zahlen $\{z | z = x + i \cdot y, x, y \in \mathbb{R}, i^2 = -1\}$

Bsp. 1:

M_1 ... Menge der Primzahlen kleiner 10, $M_1 = \{2, 3, 5, 7\}$

M_2 ... Menge der reellen Zahlen zwischen 0 und 1 $M_2 = \{x \in \mathbb{R} | 0 < x < 1\} =: (0, 1)$
Intervallschreibweise

Def. 1: (Intervallschreibweisen)

Es seien a und b reelle Zahlen mit $a < b$:

$[a, b] := \{x \in \mathbb{R} | a \leq x \leq b\}$... abgeschlossenes Intervall

$(a, b) := \{x \in \mathbb{R} | a < x < b\}$... offenes Intervall

$[a, b) := \{x \in \mathbb{R} | a \leq x < b\}$

$(-\infty, a) := \{x \in \mathbb{R} | -\infty < x < a\} = \{x \in \mathbb{R} | x < a\}$

usw.

Leere Menge: z.B. $\{x \in \mathbb{R} | x = x + 1\} = \{x \in \mathbb{R} | x^2 + 1 = 0\}$ enthält kein Element.

Bezeichnung: \emptyset oder $\{\}$

2.2. Mengenverknüpfungen

Def. 2:

$$M_1 = M_2 := \forall x (x \in M_1 \Leftrightarrow x \in M_2) \text{ (Gleichheit)}$$

Def. 3:

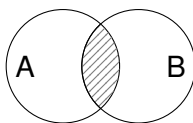
$$M_1 \subseteq M_2 := \forall x (x \in M_1 \Rightarrow x \in M_2) \text{ (Inklusion) „} M_1 \text{ ist Teilmenge von } M_2 \text{“}$$

Diskussion:

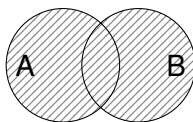
Ist $M_1 \subseteq M_2$ aber $M_1 \neq M_2$ so kann man schreiben $M_1 \subset M_2$ (echte Teilmenge).

Def. 4:

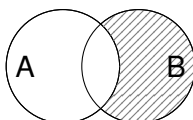
- 1.) $A \cap B := \{x | x \in A \wedge x \in B\}$
Durchschnitt von A und B



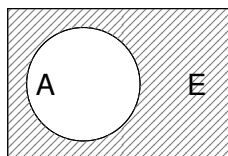
- 2.) $A \cup B := \{x | x \in A \vee x \in B\}$
Vereinigung von A und B



- 3.) $A \setminus B := \{x | x \in A \wedge x \notin B\}$
Differenz „A minus B“



- 4.) Bei Vorliegen einer Grundmenge E:
 $\bar{A} := E \setminus A$
Komplementärmenge von A


Diskussion: (ausgewählte Rechenregeln)

- 1.) \cup und \cap sind kommutativ und assoziativ
z.B. gilt $A \cup B = B \cup A$, $(A \cap B) \cap C = A \cap (B \cap C) = A \cap B \cap C$
- 2.) Allg. $I \dots$ Indexmenge, z.B. $\{1, 2, \dots, n\}$, \mathbb{N} , \mathbb{Z} , \mathbb{R} dann:

$$\bigcup_{i \in I} A_i := \{x | \exists i \in I \quad x \in A_i\}$$

$$\bigcap_{i \in I} A_i := \{x | \forall i \in I \quad x \in A_i\}$$

2.3. Relationen

2.3.1. Grundbegriffe

Def. 5:

Die Menge $M_1 \times M_2 := \{(x_1, x_2) | x_1 \in M_1 \wedge x_2 \in M_2\}$ heißt *kartesisches Produkt* der Mengen M_1 und M_2 (= Menge aller geordneten Paare)

Bsp. 2:

$\mathbb{R} \dots$ Menge der reellen Zahlen, veranschaulicht durch die Zahlengerade

$\mathbb{R}^2 := \mathbb{R} \times \mathbb{R} = \{(x, y) | x \in \mathbb{R} \wedge y \in \mathbb{R}\} \dots$ x-y-Ebene

Def. 6:

Eine Teilmenge $T \subseteq M_1 \times M_2$ heißt (*binäre*) *Relation*.

Diskussion:

- 1.) Verallgemeinerung: $M_1 \times M_2 \times \dots \times M_n = \{(x_1, x_2, \dots, x_n) | x_1 \in M_1, \dots, x_n \in M_n\}$ (= Menge geordneter n-Tupel)
Eine Teilmenge $T \subseteq M_1 \times M_2 \times \dots \times M_n$ heißt *n-stellige Relation*.

- 2.) Jede Teilmenge von $M_1 \times M_2$ ist eine Relation, also auch die Grenfälle \emptyset (gesamt leere Menge) und $M_1 \times M_2$ (vollständige Menge). Wichtig sind aber im allgemeinen die echten Teilmengen, die die verschiedensten Beziehungen zwischen den Elementen von M_1 und M_2 ausdrücken.

Def. 7: (Eigenschaften binärer Relationen in $M_1 \times M_2$)

Eine Relation $T \subseteq M_1 \times M_2$ heißt:

- linksvollständig (linkstotal)*, wenn für jedes $x_1 \in M_1$ (wenigstens) ein $x_2 \in M_2$ existiert mit $(x_1, x_2) \in T$.
- rechthvollständig (rechtstotal)*, wenn für jedes $x_2 \in M_2$ (wenigstens) ein $x_1 \in M_1$ existiert mit $(x_1, x_2) \in T$.
- rechteindeutig*, wenn für jedes $x_1 \in M_1$ höchstens ein $x_2 \in M_2$ existiert mit $(x_1, x_2) \in T$.
- linkseindeutig*, wenn für jedes $x_2 \in M_2$ höchstens ein $x_1 \in M_1$ existiert mit $(x_1, x_2) \in T$.

Bsp. 3:

Es seien S bzw. L folgende Mengen von Städten bzw. Ländern:

$S = \{\text{Berlin, Dresden, Köln, Paris, Rom, Neapel, Oslo}\}$

$L = \{D(\text{eutschland}), F(\text{rankreich}), B(\text{elgien}), I(\text{talien}), P(\text{olen}), N(\text{orwegen})\}$

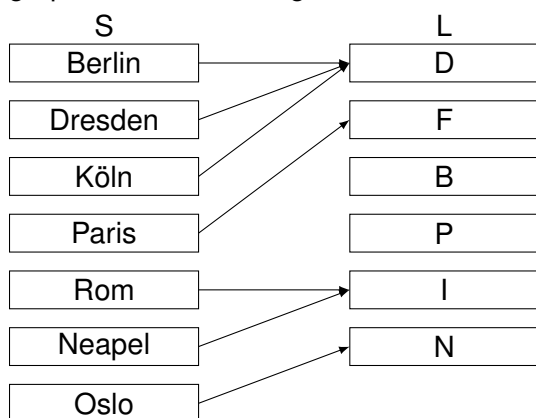
Die Relation $T \subseteq S \times L$ soll darstellen, welche Stadt in welchem Land liegt.

Man gebe T elementweise an und stelle die Relation graphisch dar!

Welche der Eigenschaften aus Def. 7 treffen zu?

- $T = \{(\text{Berlin}, D), (\text{Dresden}, D), (\text{Köln}, D), (\text{Paris}, F), (\text{Rom}, I), (\text{Neapel}, I), (\text{Oslo}, N)\}$

- graphische Darstellung:



$(x, y) \in T : x \rightarrow y$ (gerichteter Graph)

- Eigenschaften:
linksvollständig
nicht rechthvollständig
rechteindeutig
nicht linkseindeutig
(solche Relationen nennt man auch „Funktionen“, eindeutige Zuordnung [von Stadt \rightarrow Land])

Def. 8: (Eigenschaften binärer Relationen in $M \times M$)

Eine Relation $T \subseteq M \times M$ (Sprechweise auch „Relation auf M “) heißt. . .

- reflexiv*, wenn $(x, x) \in T$ für alle $x \in M$,

- b) *symmetrisch*, wenn $(x, y) \in T \Rightarrow (y, x) \in T$,
- c) *antisymmetrisch*, wenn $((x, y) \in T \wedge (y, x) \in T) \Rightarrow x = y$,
- d) *asymmetrisch*, wenn $(x, y) \in T \Rightarrow (y, x) \notin T$,
- e) *transitiv*, wenn $((x, y) \in T \wedge (y, z) \in T) \Rightarrow (x, z) \in T$

... jeweils für *alle* $x, y, z \in M$ gilt.

Bsp. 4:

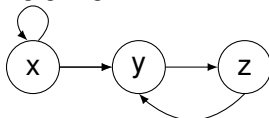
Welche Eigenschaften aus Def. 8 besitzen folgende Relationen?

Es sei P eine Menge von Personen.

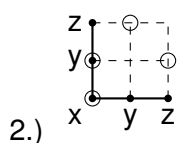
- a) Eine Person $x \in P$ sei jünger als $y \in P$, wenn ihr Geburtstag später als der von y ist.
 $\hookrightarrow J \subseteq P \times P$ mit $J = \{(x, y) | x \text{ ist jünger als } y\}$.
 J ist offensichtlich asymmetrisch (damit auch antisymmetrisch [Die Prämisse der Implikation $((x, y) \in J \wedge (y, x) \in J) \Rightarrow x = y$ ist stets falsch, damit die Implikation stets wahr]) und transitiv.
 Eine solche Relation nennt man auch *strikte Ordnungsrelation* (vgl. Abschnitt 2.3.4).
- b) Zwei Personen $x \in P$ und $y \in P$ heißen gleichaltrig, wenn x und y das gleiche Geburtsjahr besitzen.
 $\hookrightarrow G \subseteq P \times P$ mit $G = \{(x, y) | x \text{ und } y \text{ sind gleichaltrig}\}$.
 G ist offensichtlich reflexiv, symmetrisch und transitiv.
 Derartige Relationen nennt man *Äquivalenzrelationen*, vgl. Abschnitt 2.3.3. Sie teilen P in disjunkte sogenannte Äquivalenzklassen auf (x äquivalent y heißt, x und y besitzen gleiches Geburtsjahr).

Graphische Darstellung von Relationen T in $M \times M$ (auf M). Möglichkeiten:

- 1.) Elemente von M nur einmal darstellen, Pfeildarstellung wie bisher, bei $(x, x) \in T$ eine Schlinge zeichnen.



(gerichteter Graph)



(Koordinatensystem)

Diese Variante ist auch bei Relationen in $M_1 \times M_2$ möglich.

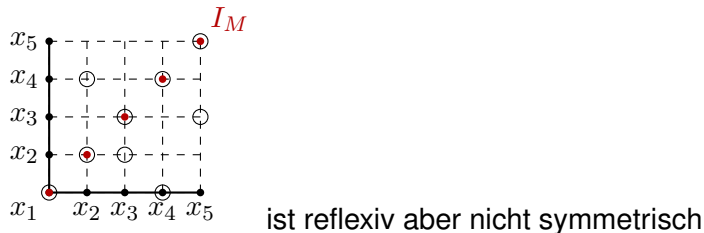
Diskussion:

- 1.) Die Eigenschaften Reflexivität, Symmetrie und Transitivität lassen sich beim gerichteten Graphen leicht nachprüfen.
Reflexivität: Bei jedem Element ist eine Schlinge.
Symmetrie: Jeder Pfeil $x \rightarrow y$ ($y \neq x$) besitzt „umkehrpfeil“ ($x \leftarrow y$).
Antisymmetrie: Schlinge möglich, aber keine Umkehrpfeile.
Asymmetrie: weder Schlingen noch Umkehrpfeile.
Transitivität: Falls ein Pfeil $x \rightarrow y$ eine „Fortsetzung“ $y \rightarrow z$ besitzt, so verläuft auch ein Pfeil von x nach z .

- 2.) Auch die Darstellung von Koordinatensystem lassen sich die Eigenschaften Reflexivität und Symmetrie sofort überprüfen.

Reflexivität: Die Diagonale $I_M = \{(x, x) | x \in M\}$ gehört zu T (I_M heißt auch *Identitätsrelation*, diese Relation ist eine spezielle Funktion, identische Funktion $y = f(x) = x$, $x \in M$ später als Funktion auch mit i_M bezeichnet)

Symmetrie: T ist spiegelsymmetrisch bzgl. I_M



Alternative Schreibweisen: Es sei $T \subseteq M_1 \times M_2$ eine binäre Relation.

Anstelle $(x, y) \in T$ kann man schreiben:

- xTy (x steht in Relation T zu y), für viele wichtige Relationen gibt es spezielle Zeichen, z.B. $x < y$, $x = y$, $g || h$ oder $A \subseteq B$ usw.
- Aussageformen (vgl. Prädikatenlogik): $T(x, y)$ (auch mit mehreren Variablen möglich)

2.3.2. Operationen auf Relationen

Da Relationen spezielle Mengen sind, gibt es Operationen wie \cup , \cap usw. auch hier. Weitere für Relationen wichtige Operationen in den folgenden Definitionen:

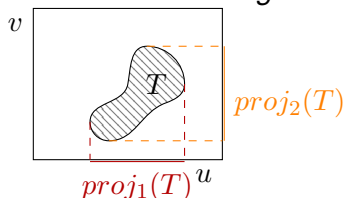
Def. 9:

Es sein T eine Relation in $U \times V$.

Die Menge $proj_1(T) = \{x \in U | \exists y \in V, (x, y) \in T\}$ heißt *Projektion* von T auf u (1. Faktor des kartesischen Produkts).

Analog ist $proj_2(T) = \{y \in V | \exists x \in U, (x, y) \in T\}$ die Projektion auf den 2. Faktor.

Veranschaulichung:



Bsp. 5:

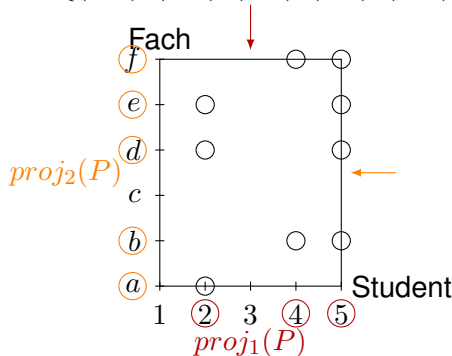
Es sei $S = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ eine Menge von Studenten und $F = \{a, b, c, d, e, f\}$ eine Menge von Fächern. Es sei $P \subseteq S \times F$ die Relation, die angibt, welcher Student in welchem Fach eine Nach- bzw. Wiederholungsprüfung im bevorstehenden Prüfungsabschnitt hat.

Die Studenten 1 und 3 haben keine Prüfung ausstehen, Student 2 muss die Prüfungen in a , d und e , 4 in b und f sowie 5 in b , d , e und f ablegen.

- a) Man gebe die Relation P elementweise an und stelle sie in einem Koordinatensystem dar.
- b) Man ermittle die Projektionen P auf S bzw. F und kennzeichne diese in der Skizze.

Lösung:

a) $P = \{(2, a), (2, d), (2, e), (4, b), (4, f), (5, b), (5, d), (5, e), (5, f)\}$



- b) $proj_1(P) = \{2, 4, 5\} \subseteq S$
 (= Menge der Studenten, die wenigstens eine N/W-Prüfung haben.)
 $proj_2(P) = \{a, b, d, e, f\} \subseteq F$
 (= Menge der Fächer, in denen Student(en) eine N/W-Prüfung haben.)

Def. 10:

Es sei $T \subseteq M_1 \times M_2$ eine binäre Relation.

Die Relation $T^{-1} := \{(y, x) | (x, y) \in T\} \subseteq M_2 \times M_1$ heißt *inverse Relation* (bzw. kurz: *Inverse*) von T .

Bsp. 6: (vgl. Bsp. 5)

$$P^{-1} = \{(a, 2), (b, 4), (b, 5), (d, 2), (d, 5), (e, 2), (e, 5), (f, 4), (f, 5)\}$$

Besonders wichtig ist die folgende Operation:

Def. 11:

Es seien $T_1 \subseteq M_1 \times M_2$ und $T_2 \subseteq M_2 \times M_3$ binäre Relationen.

Als *Komposition* (oder auch *Verkettung*) $T_1 \circ T_2$ („ T_2 nach T_1 “) wird die Relation $T_1 \circ T_2 := \{(x, z) \in M_1 \times M_3 | \exists y \in M_2 \quad (x, y) \in T_1 \wedge (y, z) \in T_2\}$ in $M_1 \times M_3$ bezeichnet.

Bsp. 7:

Es sei M die Menge aller Menschen, die zu einem bestimmten Zeitpunkt leben. Weiter seien $S = \{(x, y) | x \text{ ist Mutter von } y\} \subseteq M \times M$ und $T = \{(y, z) | y \text{ ist verheiratet mit } z\} \subseteq M \times M$.

Dann bedeutet $(x, z) \in S \circ T$: Es gibt ein y , sodass x die Mutter von y ist ($(x, y) \in S$) und y mit z verheiratet ($(y, z) \in T$) ist, d.h. „ x ist die Schwiegermutter von z “.

Diskussion: Wichtige Eigenschaft der Komposition \circ :

- Die Operation \circ ist *assoziativ*, d.h. seien $T_1 \subseteq A \times B$, $T_2 \subseteq B \times C$ und $T_3 \subseteq C \times D$, dann gilt:

$$\underbrace{(T_1 \circ T_2)}_{\subseteq A \times C} \circ T_3 = \underbrace{T_1}_{\subseteq A \times B} \circ \underbrace{(T_2 \circ T_3)}_{\subseteq B \times D} = T_1 \circ T_2 \circ T_3 \subseteq A \times D$$

Def. 12:

Es sei T eine Relation in $M \times M$ (auf M).

Als *transitive Hülle* T^+ von T bezeichnet man die kleinste Relation, die T enthält und transitiv ist.

Satz 1: Es gilt: $T^+ = T \cup (T \circ T) \cup (T \circ T \circ T) \cup \dots$

Bemerkung:

Bezeichnung für $\underbrace{T \circ T \circ \dots \circ T}_{n\text{-mal}}$ auch T^n

(Nicht verwechseln mit Mengenprodukt $\underbrace{T \times \dots \times T}_{n\text{-mal}}$ bzw. Funktionen mit n-ten Potenz f^n !)

Damit ist $T^+ = \bigcup_{j=1}^{\infty} T^j$

Beweis:

- 1.) T^+ ist transitiv, denn sei $(x, y) \in T^+$ und $(y, z) \in T^+$, dann existieren natürliche Zahlen $j_1, j_2 \geq 1$ mit $(x, y) \in T^{j_1}$ und $(y, z) \in T^{j_2}$,
d.h. y wird in j_1 Schritten von x aus erreicht und z in j_2 Schritten von y aus erreicht. Also wird z in $j_1 + j_2$ Schritten von x aus erreicht,
d.h. $(x, z) \in T^{j_1+j_2} \subseteq T^+$
- 2.) Es sei $T \subseteq S$ für eine transitive Relation S .
 $\Rightarrow T \circ T \subseteq S \circ S \subseteq S$ und für beliebiges $j \geq 1$:
 $T^j \subseteq S^j \subseteq S$ und somit:
 $T^+ = \bigcup_{j=1}^{\infty} T^j \subseteq S$,
d.h. T^+ ist tatsächlich die kleinste transitive Relation, die T enthält.

Diskussion:

- 1.) Analog zur transitiven Hülle einer Relation T in $M \times M$ (auf M) werden die reflexive Hülle bzw. die symmetrische Hülle von T als die jeweils kleinsten Relationen die T enthalten und reflexiv bzw. symmetrisch sind definiert.
Die Ermittlung gestaltet sich etwas „einfacher“ als bei der transitiven Hülle:
Reflexive Hülle von T : $T \cup I_M$ (dabei ist $I_M = \{(x, x) | x \in M\}$ [Diagonale / Identitätsrelation])
Symmetrische Hülle von T : $T \cup T^{-1}$
- 2.) Von Bedeutung ist auch die *reflexiv-transitive Hülle* von T :
 $T^* = T^+ \cup I_M$ (dabei T^+ ... transitive Hülle von T)

Bsp. 8:

Gegeben sei die Menge $M = \{a, b, c, d, e, f\}$

sowie die Relation $T = \{(a, b), (b, c), (c, e), (b, d), (d, e), (e, f)\}$.

a) *Transitive Hülle*: Zur Ermittlung der Komposition $S \circ T$:

Für jedes Element $(x, y) \in S$ alle Fortsetzungen $(y, z) \in T$ suchen $\leadsto (x, z)$ als Element von $S \circ T$ notieren, falls es noch nicht vorkommt.

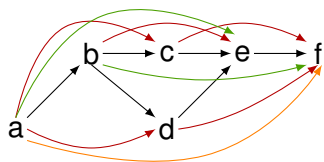
Bspw.:

- (a, b) , Fortsetzungen wären $(b, c), (b, d) \leadsto$ Elemente (a, c) und (a, d) notieren.
- (b, c) , Fortsetzung $(c, e) \leadsto (b, e)$ notieren
- usw.

$$\Rightarrow T \circ T = \{(a, c), (a, d), (b, e), (c, f), (d, f)\} = T^2$$

$$T^3 = T \circ (T \circ T) = \{(a, e), (b, f)\} \text{ (ausgehend von } T \text{ in } T \circ T \text{ nach Fortsetzung suchen)}$$

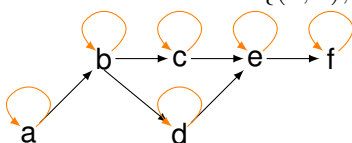
$$T^4 = T \circ T^3 = \{(a, f)\}$$



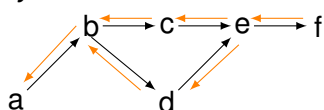
$$\Rightarrow T^+ = T \cup \underbrace{(T \circ T)}_{2 \text{ Schritte}} \cup \underbrace{(T \circ T \circ T)}_{3 \text{ Schritte}} \cup \underbrace{(T \circ T \circ T \circ T)}_{4 \text{ Schritte}} = T \cup T^2 \cup T^3 \cup T^4$$

(Formel bricht im endlichen Fall nach endlich vielen Schritten ab.)

b) **Reflexive Hülle:** $T \cup \{(a, a), (b, b), (c, c), (d, d), (e, e), (f, f)\}$



c) **Symmetrische Hülle:** $T \cup T^{-1} = T \cup \{(b, a), (c, b), (e, c), (d, b), (e, d), (f, e)\}$



Zur Überprüfung der Eigenschaften aus Def. 8 ist folgender Satz nützlich:

Satz 2:

Es sei $T \subseteq M \times M$ eine binäre Relation. Dann gilt:

- T ist reflexiv $\Leftrightarrow I_M \subseteq T$ ($I_M \dots$ Identitätsrelation)
- T ist symmetrisch $\Leftrightarrow T^{-1} \subseteq T$ [$\Leftrightarrow T^{-1} = T$]
- T ist antisymmetrisch $\Leftrightarrow T \cap T^{-1} \subseteq I_M$
- T ist asymmetrisch $\Leftrightarrow T \cap T^{-1} = \emptyset$
- T ist transitiv $\Leftrightarrow T \circ T \subseteq T$

Diskussion:

- Beweise ergeben sich unmittelbar aus Def. 8, vgl. Übungsaufgabe 1.24 (für b) und e))
- Aus c) und d) ergibt sich z.B.

$$\boxed{T \text{ asymmetrisch}} \Rightarrow \boxed{T \text{ antisymmetrisch}} \text{ (da } \emptyset \text{ Teilmenge jeder Menge ist)}$$

2.3.3. Äquivalenzrelationen

Def. 13:

Eine Relation $T \subseteq M \times M$ heißt **Äquivalenzrelation** auf M , wenn sie reflexiv, symmetrisch und transitiv ist.

Diskussion:

- 1.) Durch eine Äquivalenzrelation wird M vollständig in paarweise elementfremde (disjunkte) Äquivalenzklassen zerlegt. Die Menge aller Äquivalenzklassen von M bezüglich T heißt *Quotientenmenge* M/T .
Aufgrund der 3. Eigenschaft aus Def. 13 erhält eine Äquivalenzklasse alle Elemente, die untereinander erreichbar sind (=äquivalent) und nur diese.
- 2.) Äquivalenzklassen enthalten alle Elemente, die bezüglich einer bestimmten Eigenschaft nicht unterscheidbar sind, z.B. Bsp. 4 mit $M = P$ (Menge von Personen), Äquivalenzrelation $G \subseteq P \times P$ mit $G = \{(x, y) | x \text{ und } y \text{ haben gleiches Geburtsjahr}\}$, Äquivalenzklassen sind die Jahrgänge.
- 3.) Anstelle der Schreibweise $(x, y) \in T$, xTy oder $T(x, y)$ verwendet man bei beliebigen Äquivalenzrelationen auf $x \sim y$. Bei vielen speziellen Äquivalenzrelationen spezielle Symbole, siehe folgendes Beispiel.

Bsp. 9:

- a) M sei eine beliebige Menge $T_1 = I_M = \{(x, y) \in M \times M | x = y\}$ (Identitätsrelation) ist eine Äquivalenzrelation.
Äquivalent heißt hier gleich!
Äquivalenzklassen sind sämtliche einelementige Teilmengen $\{x\}, x \in M$. T_1 heißt die feinste Zerlegung von M die möglich ist. Die größte Zerlegung liefert die Relation $T_2 = M \times M$, die trivialerweise ebenfalls eine Äquivalenzrelation ist mit nur einer Äquivalenzklasse M . Für die Anwendungen sind natürlich Relationen wichtig, die eine feinere Zerlegung liefern.
- b) $M = \mathbb{Z}$ (ganze Zahlen), $m \in \mathbb{N}^*$, $T \subseteq \mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$ mit
 - $(x, y) \in T \equiv$ „ x und y lassen bei Division durch m den gleichen Rest“
 - Bezeichnung $x \equiv y \pmod{m}$... x kongruent y (modulo m), z.B. $29 \equiv 8 \pmod{7}$
 - T ist eine Äquivalenzrelation auf \mathbb{Z} , Äquivalenzklassen: Restklassen modulo m (siehe Übungsaufgabe 1.19)
- c) M ... Menge aller Geraden einer Ebene, $T \subseteq M \times M$ mit
 - $(x, y) \in T \equiv$ „ x ist zu y parallel“, Bezeichnung: $x \parallel y$
 - $\sim T$ ist Äquivalenzrelation auf M (siehe Übungsaufgabe 1.21.)

2.3.4. Ordnungsrelationen

Def. 14:

- a) Eine Relation $T \subseteq M \times M$ heißt *Ordnungsrelation* auf M , wenn sie reflexiv, antisymmetrisch und transitiv ist.
- b) Eine Ordnungsrelation heißt *vollständig* oder *linear*, wenn für alle $x, y \in M$ gilt $(x, y) \in T \vee (y, x) \in T$.

Def. 15:

Eine Relation $T \subseteq M \times M$ heißt *strikte Ordnungsrelation* auf M , wenn sie asymmetrisch und transitiv ist. Eine strikte Ordnungsrelation heißt *vollständig*, wenn für alle $x, y \in M$ mit $x \neq y$ gilt $(x, y) \in T \vee (y, x) \in T$.

Bsp. 10:

- $M = \mathbb{R}$, $T \subseteq \mathbb{R} \times \mathbb{R}$ mit $(x, y) \in T \equiv x \leq y$ ist eine vollständige Ordnungsrelation auf \mathbb{R} .
- Die Relation „ $<$ “ ist eine (vollständige) strikte Ordnungsrelation.
- E sei eine Menge, M sei die Menge aller Teilmengen von E , d.h. M ist die Potenzmenge $M = \mathcal{P}(E)$ von E .
 $T \subseteq M \times M$ mit $(A, B) \in T \equiv A \subseteq B$ ist eine Ordnungsrelation auf $\mathcal{P}(E) = M$ (Inklusion).

Diskussion:

- In der Literatur wird manchmal die Relation im Sinne von Def. 14 als Halbordnung und nur eine vollständige als Ordnung als Ordnungsrelation bezeichnet.
- Zu jeder Ordnung T_1 (auf M) gehört eine strikte Ordnung T_2 und umgekehrt: $T_2 = T_1 \setminus I_M$ bzw. $T_1 = T_2 \cup I_M$ (T_1 ist die reflexive Hülle von T_2), z.B. $(\leq, <)$ oder (\subseteq, \subset) .
- Die Symbole \leq (bzw. $<$) können anstelle der Paarschreibweise auch bei beliebigen Ordnungen verwendet werden, falls keine anderen Zeichen dafür üblich sind.

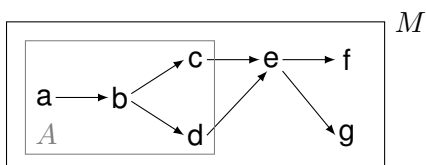
Def. 16:

T sei eine Ordnungsrelation auf eine Menge M . Weiter sei A eine Teilmenge von M .

- Ein Element $a \in M$ heißt obere Schranke von A , wenn gilt:
 $\forall x \in A \quad x \leq a$ ($x \leq a$ d.h. $(x, a) \in T$, vgl. 3.) der vorhergehenden Diskussion)
- Es sei B die Menge der oberen Schranken von A , diese sei nicht leer. Falls es eine *kleinste obere Schranke* s von A gibt, d.h. $\exists s \in B \quad \forall b \in B \quad s \leq b$, so heißt s das *Supremum* von A ,
 $s = \sup A$
- Gilt $s \in A$, so heißt s das Maximum von A : $s = \max A = \sup A$
- Ein Element $m \in A$ heißt maximal, wenn es kein größeres Element in A gibt, d.h. $\forall x \in A \quad (m \leq x \Rightarrow m = x)$

Diskussion:

- Die Begriffe aus Def. 16 lassen sich auf strikte Ordnungen S übertragen, indem anstelle von S die reflexive Hülle $T = S \cup I_M$ verwendet wird.
- Bei Ordnungsrelationen T (auch für strikte Ordnungen) auf endlichen Mengen M kann ein vereinfachter Graph, das sogenannte *HASSE-Diagramm*, betrachtet werden.
 $a \longrightarrow b$ ($a \neq b$) bedeutet $(a, b) \in T$ und es gibt kein Zwischenglied $c \neq a$ und $c \neq b$ mit $(a, c) \in T \wedge (c, b) \in T$ (a ist unmittelbarer Vorgänger von b bzw. b Nachfolger von a).
Diesem Diagramm entspricht eine Teilrelation $U \subseteq T$, deren transitiv-reflexive Hülle (bzw. transitive Hülle bei strikten Ordnungen) T ist.
- Veranschaulichung von Def. 16 mit einem HASSE-Diagramm einer nicht vollständigen Ordnung (nicht linear)



z.B. Arbeitsgänge, die in einer bestimmten Reihenfolge durchgeführt werden müssen, A bspw. Teilarbeiten einer Zweigfirma

obere Schranken: e, f, g

$\sup A = e$

Maximum von A : existiert nicht, da $e \notin A$

maximale Elemente von A : c, d

- 4.) Bei nichtlinearen Ordnungen müssen obere Schranken, Supremum und Maximum nicht existieren, es kann mehrere maximale Elemente $A \subseteq M$ geben.

Bei linearen Ordnungen auf *endlichen* Mengen gibt es genau ein maximales Element $= \max A = \max B$

- 5.) Analog zur Def. 16 werden die Begriffe *untere Schranken* a von A ($\forall x \in A \quad a \leq x$), *größte untere Schranke (Infinum)* s von A ($B \neq \emptyset \dots$ Menge der unteren Schranken, $\exists s \in B \quad \forall a \in B \quad a \leq s$), *Minimum von A* ($\min A = \inf A = s$ falls $s \in A$) und *minimales Element m von A* ($\forall x \in A \quad (x \leq m \Rightarrow x = m)$) definiert.

Bsp. 11:

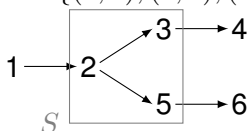
Eine bestimmte Arbeitsaufgabe besteht aus mehreren Arbeitsgängen.

Es sei $A = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ die Menge der Arbeitsgänge. Die Arbeitsgänge $\{2, 3, 5\} =: S$ werden von einer Subfirma durchgeführt. Für die Reihenfolge gilt: 1 muss vor 2, 2 vor 3 und 5, 3 vor 4 sowie 5 vor 6 durchgeführt werden.

- Man beschreibe diese Forderungen durch eine Relation $U \subseteq A \times A$ und stelle sie graphisch dar (HASSE-Diagramm).
- Man ermittle die transitive Hülle U^+ von U .
- Man gebe (falls vorhanden) obere Schranken, Supremum, Maximum, max. Elemente sowie untere Schranken, Infimum, Minimum, min. Elemente von S an.

Lösung:

- a) $U = \{(1, 2), (2, 3), (2, 5), (3, 4), (5, 6)\}$



- b) $U \circ U = \{(1, 3), (1, 5), (2, 4), (2, 6)\}$

$$U \circ (U \circ U) = \{(1, 4), (1, 6)\}$$

$$U^4 = \emptyset$$

2.3.5. Funktionen

Def. 17:

Eine Relation $f \subseteq X \times Y$ heißt *Funktion (Abbildung)* von X in Y , wenn sie linksvollständig und rechtseindeutig ist.

Diskussion:

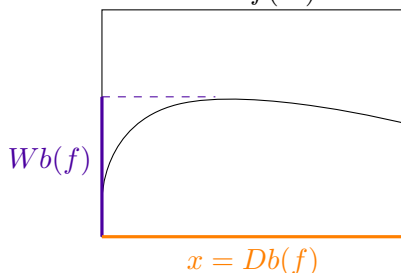
- Gemäß Def. 7 a+c aus Kapitel 2.3.1 bedeutet linksvollständig *und* rechtseindeutig, dass zu *jedem* $x \in X$ *genau ein* $y \in Y$ mit $(x, y) \in f$ existiert, also *eindeutige Zuordnung*:

$$x \mapsto y =: f(x)$$

Schreibweise: $f : X \rightarrow Y$ (manchmal $f|X \rightarrow Y$)

$y = f(x)$ heißt auch *Bild* von x , x *ein* Urbild von y (muss nicht eindeutig sein).

- $X = Db(f) \dots$ Definitionsbereich,
 $Wb(f) = \{y \in Y \mid \exists x \in X \ (x, y) \in f\} \subseteq Y \dots$ Wertebereich
 Schreibweise auch $f(X) := Wb(f)$ (Menge aller Bilder).



$$f : \mathbb{R} \rightarrow \{0, 1\}$$

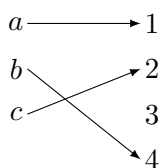
Def. 18:

- Eine Abbildung f heißt *surjektiv* (Auch Abbildung auf Y),
- Eine Funktion f heißt *injektiv*, wenn zu jedem $y \in Wb(f)$ genau ein $x \in Db(f)$ existiert mit $(x, y) \in f$:

$$\begin{array}{ccc} y & \mapsto & x =: f^{-1}(y) \\ \in Wb(f) & & \in Db(f) \end{array}$$
 („f oben -1“)
 Die dadurch erklärte Abbildung $f^{-1} : Wb(f) \rightarrow Db(f)$ heißt *Umkehrfunktion* von f , vgl. auch Kap 1.4.
- Eine injektive *und* surjektive Abb. von X auf Y heißt *bijektiv*.
- Gebräuchlich sind auch die Begriffe *Surjektion*, *Injektion* und *Bijektion*!

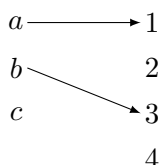
Bsp. 12:

Gegeben sind die Mengen $X = \{a, b, c\}$ und $Y = \{1, 2, 3, 4\}$ sowie folgende Relation in $X \times Y$:



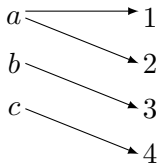
- T_1 : $(X) \quad (Y)$

T_1 ist eine Funktion $f(= T_1) : f : X \rightarrow Y$ (1) diese ist injektiv, $Db(f) = X = \{a, b, c\}$, $Wb(f) = \{1, 2, 4\} =: W$, $f : X \rightarrow W$ (2) ist surjektiv, also sogar bijektiv.
 Als Relation sind (1) und (2) nicht zu unterscheiden, aber als Funktion.



- T_2 : $(X) \quad (Y)$

T_2 ist keine Funktion, nicht linksvollständig. Betrachtet man $D = \{a, b\} \subset X$, so ist durch T_2 eine Funktion $f : D \rightarrow Y$ beschrieben, die Funktion ist injektiv und kann mit $W := f(D) = \{1, 2\}$ zu einer bijektiven Abbildung $f : D \rightarrow W$ umgewandelt werden.

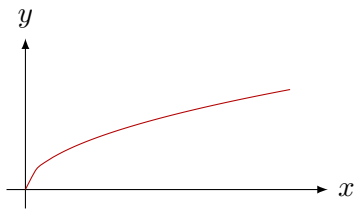


c) $T_3: (X) \quad (Y)$

T_3 ist keine Funktion, da nicht rechtseindeutig.

Bsp. 13:

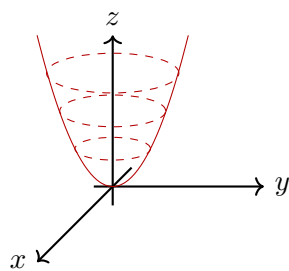
a) $f: [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ mit „ $x \rightarrow y = f(x) = \sqrt{x}$ “ ist eine *Funktion einer reellen Veränderlichen* (injektiv).



$$Wb(f) = [0, \infty)$$

$$Db(f) = [0, \infty)$$

b) $f: \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $(x, y) \mapsto x^2 + y^2 = f(x, y) =: z$ *Funktion zweier reeller Veränderlicher*.



(Paraboloid)

$$Db(f) = \mathbb{R} \times \mathbb{R} \text{ (x-y-Ebene)}$$

$$Wb(f) = [0, \infty)$$

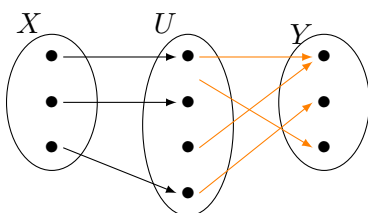
c) $f: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $n \mapsto f(n) = \frac{n}{n+1}$ ist eine (reelle) *Zahlenfolge*. $f(0) = 1, f(1) = \frac{1}{2}, f(2) = \frac{2}{3}, \dots$

Bezeichnung meist mit Index: $a_n = f(n) \leadsto ZF(a_n) \quad n \in \mathbb{N}$

Def. 19:

Es seien $g: X \rightarrow U$ mit $x \mapsto u = g(x)$ und $f: U \rightarrow Y$ mit $u \mapsto y = f(u)$ zwei Abbildungen. Dann stellt man die Zuordnung $x \mapsto y = f(g(x))$ eine Abbildung von X in Y dar, eine sogenannte *mittelbare Funktion (Komposition / Verkettung)*. *Bezeichnung:* $g \circ f: X \rightarrow Y$ mit $y = (g \circ f)(x) = f(g(x))$

Diskussion:



1.)

$$x \mapsto u = g(x) \quad u \mapsto f(u) = f(g(x))$$

$$\text{Paarschreibweise: } (x, u) \in g \quad (u, y) \in f \leadsto (x, y) \in g \circ f$$

- 2.) g wird zuerst angewendet, dann f . Wie bei beliebigen Relationen die die Schreibweise $g \circ f$
- 3.) In der Literatur findet man oft die Schreibweise $f \circ g$ angelehnt an die Schreibweise $f(g(x))$. Die Reihenfolge der Berechnung ist aber von innen nach außen, erst innere Funktion g , dann die äußere f .

Satz 3:

Es sei $f : X \rightarrow Y$ eine *Bijektion*, d.h. es existiert die Umkehrfunktion $f^{-1} : Y \rightarrow X$, weiter sei i_A für eine beliebige Menge A die identische Abbildung (Identitätsrelation): $i_A : A \rightarrow A$ mit $i_A(x) = x$ für alle $x \in A$.

Es gilt dann:

$f \circ f^{-1} = id_X$, d.h. $(f \circ f^{-1})(x) = f^{-1}(f(x)) = x (\forall x \in X)$ und

$f^{-1} \circ f = id_Y$, d.h. $(f^{-1} \circ f)(y) = f(f^{-1}(y)) = y (\forall y \in Y)$

(Funktion und Umkehrfunktion nacheinander angewandt heben sich auf).

Satz 4:

Es seien $g : X \rightarrow U$ und $h : U \rightarrow Y$ zwei Bijektionen. Dann ist die Komposition $f := g \circ h : X \rightarrow Y$ ebenfalls eine Bijektion und es gilt:

$$f^{-1} = (g \circ h)^{-1} = h^{-1} \circ g^{-1}$$

2.4. Gleichmächtigkeit, Kardinalzahlen

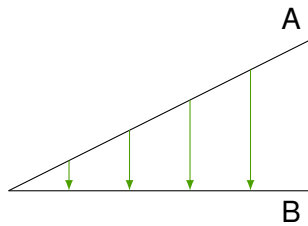
Es sei eine hinreichend umfassend Grundmenge, die alle für eine mathematische Theorie relevante Objekte (Zahlen, Funktionen, usw.) enthält. M sei die Potenzmenge von E (d.h. M ist die Menge aller Teilmengen von E , $M = \mathcal{P}(E)$).

Def. 20:

Zwei Mengen A und B ($A \subseteq E, B \subseteq E$ bzw. $A \in M, B \in M$) heißen *gleichmächtig* (Bezeichnung $A \sim B$), wenn eine bijektive Abbildung von A auf B (damit auch B auf A) existiert.

Diskussion:

- 1.) Offensichtlich ist die Relation $T \subseteq M \times M$ mit $(A, B) \in T \equiv A \sim B$ eine Äquivalenzrelation auf M .
- 2.) Äquivalenzklassen sind Mengen gleichmächtiger Teilmengen von E . Diese Äquivalenzklassen nennt man *Kardinalzahlen*.
- 3.) Bei endlichen Mengen bedeutet Gleichmächtigkeit:
Gleiche Anzahl von Elementen
 $A = \{a, b, c\}, B = \{X, Y, Z\}$
(Abbildung bspw. $a \rightarrow X \quad b \rightarrow Y \quad c \rightarrow Z$)
Bezeichnung: $\text{card} A = |A| = 3 \quad (= |B|)$
Natürliche Zahlen sind die Kardinalzahlen endlicher Mengen.
- 4.) Die Anschauung versagt bei unendlichen Mengen.



Die Strecken A und B sind gleichmächtig, obwohl A länger als B ist.

Def. 21:

Eine Menge heißt *abzählbar unendlich*, wenn sie mit der Menge $\mathbb{N} = \{1, 2, 3, 4, \dots\}$ der natürlichen Zahlen gleichmächtig ist.

Diskussion:

- 1.) M ist abzählbar unendlich heißt, es existiert eine *Zählvorschrift*, bei der jedes Element von M nach endlich vielen Schritten erreicht wird.
- 2.) Die Menge \mathbb{Z} der ganzen Zahlen ist abzählbar unendlich.
Andordnen nach steigendem Betrag:
 $\mathbb{Z} = \{0, -1, 1, -2, 2, -3, 3, \dots\}$
- 3.) \mathbb{Q}^+ ... Menge der pos. rationalen Zahlen

$$\mathbb{Q}^+ : \begin{array}{cccc} \boxed{\frac{1}{1}}, & \frac{1}{2}, & \frac{1}{3}, & \dots \\ & \swarrow & \swarrow & \swarrow \\ \frac{2}{1}, & \frac{2}{2}, & \frac{2}{3}, & \dots \\ & \swarrow & \swarrow & \swarrow \\ \frac{3}{1}, & \frac{3}{2}, & \frac{3}{3}, & \dots \\ & \swarrow & \swarrow & \swarrow \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{array}$$

Zählvorschrift:

- a) (aufsteigend) Ordnen nach Summen von Zähler und Nenner
- b) Zahlen mit gleicher Summe der Größe nach aufsteigend anordnen.
- c) Bereits enthaltene Zählen (=kürzbare Brücke) weglassen.

$$\mathbb{Q}^+ = \left\{ \frac{1}{1}, \frac{1}{2}, \frac{2}{1}, \frac{1}{3}, \frac{3}{2}, \frac{3}{1}, \dots \right\}$$

analog zu \mathbb{Z} : Die Menge \mathbb{Q} aller rationalen Zahlen (also \mathbb{Q}^- zusammen mit \mathbb{Q}^+) ist abzählbar unendlich.

- 4.) Es gibt Mengen, die mächtiger sind als die Menge der natürlichen Zahlen: *überabzählbare Mengen* (B heißt *mächtiger* als A , wenn se eine injektive Abbildung $f : A \rightarrow B$ gibt, aber keine bijektive. Schreibweise: $|A| < |B|$).

z. B. gilt:

Satz 5: Die Menge $M = \{x \in \mathbb{R} | 0 < x < 1\} = (0, 1)$ ist überabzählbar.

Beweis: (CANTORsches Diagonalverfahren)

Indirekt, angenommen $M = (0, 1)$ sei abzählbar unendlich, d.h. $M = \{x_1, x_2, x_3, \dots\}$.

Für die Zahlen x_k wählen wir z.B. die eindeutige Darstellung als Dezimalbruch (9er Periode vermeiden). Also bspw. $0,39999\dots = 0,3\bar{9} = 0,4 = 0,40000\dots$

$$x_1 = 0, a_1^{(1)} a_2^{(1)} a_3^{(1)} \dots$$

$$x_2 = 0, a_1^{(2)} a_2^{(2)} a_3^{(2)} \dots$$

$$x_3 = 0, a_1^{(3)} a_2^{(3)} a_3^{(3)} \dots$$

...

$$\text{Es sei } z = 0, b_1 b_2 b_3 \dots \text{ mit } b_k = \begin{cases} 1 & \text{falls } a_k^{(k)} \neq 1 \\ 2 & \text{falls } a_k^{(k)} = 1 \end{cases} \text{ für } k = 1, 2, 3, \dots$$

Damit unterscheiden sich x_k und z an der k -ten Stelle, d.h. $z \neq x_k$ für alle $k \geq 1$. z ist also nicht in der Folge x_1, x_2, x_3, \dots enthalten, also $z \notin M$.

Andererseits ist $0 < z < 1$ also $z \in (0, 1) = M$. \nrightarrow Widerspruch! #

Satz 6:

Es sei E eine Menge. Dann ist die Potenzmenge $M = \mathcal{P}(E)$ mächtiger als E .

Beweis:

- 1.) Die Abbildung $f : E \rightarrow M$ mit $f(x) = \{x\}$, die jedem $x \in E$ die einelementige Menge $\{x\} \in M$ zuordnet, ist injektiv.
- 2.) Angenommen, es gäbe eine bijektive (damit auch surjektive) Abbildung $g : E \rightarrow M$. Es sei $A = \{x \in E \mid x \notin g(x)\} \in M$ (A Teilmenge von E). Da g surjektiv ist, gibt ein $a \in E$ mit $g(a) = A$. Fallunterscheidung:

a) $a \in A = g(a) \Rightarrow a \notin g(a) \nrightarrow$ Widerspruch!

b) $a \notin A = g(a) \Rightarrow a \in g(a) \nrightarrow$ Widerspruch!

Beide Fälle führen auf einen Widerspruch, es gibt keine surjektive und damit auch keine bijektive Abbildung von E auf $\mathcal{P}(E)$. #

Diskussion:

Satz 6 zeigt, dass es unendlich viele unendliche Mächtigkeiten gibt. So gilt bspw. $|\mathbb{N}| < |\mathcal{P}(\mathbb{N})| < |\mathcal{P}(|\mathcal{P}(\mathbb{N})|)|$ usw.

Satz 7:

Die Potenzmenge $\mathcal{P}(\mathbb{N})$ der Menge der natürlichen Zahlen ist gleichmächtig mit dem Intervall $(0, 1)$, also überabzählbar (Beweis: siehe Übungsaufgabe 1.38).

2.5. Prinzip der vollständigen Induktion

Es sei $n_0 \in \mathbb{N}$. Zu beweisen ist: „Für alle natürlichen Zahlen $n \geq n_0$ gilt die Aussage $p(n)$.“ (Es sind also abzählbar unendlich viele Einzelaussagen zu beweisen!)

Satz 8:

- 1.) Es sei $\boxed{p(n_0)}$ wahr (Induktionsanfang)
- 2.) Für alle nat. Zahlen $n \geq n_0$ sei die Implikation $\boxed{p(n) \Rightarrow p(n+1)}$ wahr (Induktionsschluss)

Dann gilt: $p(n)$ ist für alle nat. Zahlen $n \geq n_0$ wahr.

Zum Beweis:

- 1.) $\neg p(n_0)$ ist wahr,
- 2.) $p(n_0) \Rightarrow p(n_0 + 1) \dots \neg$ Konklusion wahr usw. (Dominoeffekt)

Bsp. 14:

Zu beweisen ist $\sum_{k=1}^n k^2 = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}$ für alle $n \in \mathbb{N}^*$

1.) $p(1): 1^2 = \frac{1 \cdot 2 \cdot 3}{6} = 1$ (wahr) Induktionsanfang (IA)

2.) Es gelte $p(n): \sum_{k=1}^n k^2 = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}$ Induktionsannahme/-voraussetzung (IV)

3.) zu zeigen $p(n+1): \sum_{k=1}^{n+1} k^2 = \frac{(n+1)(n+2)(2n+3)}{6}$ Induktionsschritt (IS)

4.) **Induktionsschluss:** $(p(n) \Rightarrow p(n+1))$

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{n+1} k^2 &= \sum_{k=1}^n k^2 + (n+1)^2 \\ &\stackrel{IA}{=} \frac{n \cdot (n+1)(2n+1)}{6} + (n+1)^2 \\ &= \frac{n+1}{6} (n(2n+1) + 6(n+1)) \\ &= \frac{n+1}{6} (2n^2 + 7n + 6) \\ &= \frac{n+1}{6} (n+2)(2n+3) \quad \# \end{aligned}$$

3. Zahlen

3.1. Gruppen, Ringe, Körper

- Gegeben sei eine Menge M und eine zweistellige Operation \circ (d.h. Abb. von $M \times M$ in M)
Bezeichnung: (M, \circ) , analog $(M, \circ, *)$
- Die Operation \circ heißt *kommutativ*, wenn $a \circ b = b \circ a$ für alle $a, b \in M$.
- Die Operation \circ heißt *assoziativ*, wenn $(a \circ b) \circ c = a \circ (b \circ c)$ für alle $a, b, c \in M$.

Def. 1:

(M, \circ) heißt *Gruppe*, wenn gilt:

- 1.) Die Operation \circ ist assoziativ
- 2.) Es gibt genau ein *neutrales Element* $e \in M$ mit $a \circ e = e \circ a = a$ (für alle $a \in M$)
- 3.) Es gibt zu jedem $a \in M$ genau ein *inverses Element* a^{-1} mit $a \circ a^{-1} = a^{-1} \circ a = e$
- 4.) Eine Gruppe heißt *ABELsch*, wenn zusätzlich folgendes gilt:
 \circ ist kommutativ

Def. 2:

$(M, \oplus, *)$ heißt *Ring*, wenn gilt:

- 1.) (M, \oplus) ist eine ABELsche Gruppe.
- 2.) Die Operation $*$ ist assoziativ.
- 3.) Es gelten für beliebige $a, b, c \in M$:

$$a * (b \oplus c) = (a * b) \oplus (a * c)$$

$$(a \oplus b) * c = (a * c) \oplus (b * c) \quad (\text{Distributivgesetze})$$
- 4.) Ein Ring heißt *kommutativer Ring*, wenn gilt:
 $*$ ist kommutativ

Def. 3:

$(M, \oplus, *)$ heißt *Körper*, wenn gilt:

- 1.) $(M, \oplus, *)$ ist ein Ring
 (mit dem neutralen Element E_0 für die Operation \oplus)
- 2.) $(M \setminus \{E_0\}, *)$ ist eine ABELsche Gruppe
 (mit dem neutralen Element E_1 für die Operation $*$)

3.2. Zahlentheorie

- Eine natürliche Zahl $p > 1$, die nur durch 1 und sich selbst teilbar ist heißt *Primzahl*.
- Jede natürliche Zahl $n > 1$ ist entweder eine Primzahl, oder sie lässt sich als Produkt von Primzahlen schreiben.
 Diese sogenannte *Primfaktorzerlegung* ist bis auf die Reihenfolge der Faktoren eindeutig.

Def. 4:

Zwei natürliche Zahlen aus \mathbb{N}^* heißen *teilerfremd*, wenn sie außer 1 keine gemeinsamen Teiler besitzen.

- Es sei $a \in \mathbb{Z}$ und $m \in \mathbb{N}^*$. Dann gibt es eine eindeutige Darstellung der Gestalt $a = q \cdot m + r$ mit $0 \leq r < m$ und $q \in \mathbb{Z}$.
 Bezeichnung: $m \dots \text{Modul}$ $r \dots$ (kleinste nichtnegative) *Rest modulo* m ($r \equiv \text{mod}(a, m)$)
- Zur Erinnerung: a und b seien ganze Zahlen, $m \in \mathbb{N}^*$, dann $a \equiv b \pmod{m}$ [a kongruent b modulo m]
 $\Leftrightarrow a$ und b haben den gleichen Rest modulo m
 $\Leftrightarrow a - b$ ist durch m teilbar (d.h. $\exists k \in \mathbb{Z} \quad a - b = k \cdot m$)

Satz 1:

Es sei $a \equiv b \pmod{m}$, $c \equiv d \pmod{m}$, dann gilt: $a + c \equiv b + d \pmod{m}$ und $a \cdot c \equiv b \cdot d \pmod{m}$ (d.h. in Summen und Produkten darf jede Zahl durch einen beliebigen Vertreter der gleichen Restklasse ersetzt werden).

Bsp. 1:

a) $307 + 598 \equiv 1 + (-2) \equiv -1 \equiv 5 \pmod{6}$

b) $307 \cdot 598 \equiv 1 \cdot (-2) \equiv -2 \equiv 4 \pmod{6}$

c) $598^6 \equiv (-2)^6 \equiv 64 \equiv 4 \pmod{6}$

- Man wählt aus jeder Restklasse den kleinsten nichtnegativen Vertreter

↪ Menge von Resten modulo m : $\mathbb{Z}_m := \{0, 1, \dots, m-1\}$

↪ „modulare Arithmetik“: Operation \oplus und \odot für Zahlen aus \mathbb{Z}_m erklärbar, in dem für das Ergebnis jeweils der kleinste nichtnegative Rest modulo m gewählt wird (vgl. Satz 1)

z.B. $\mathbb{Z}_7 = \{0, 1, \dots, 6\}$, $5 \oplus 4 = 2$, da $5 + 4 \equiv 9 \equiv 2 \pmod{7}$ $5 \odot 6 = 2$, da $5 \cdot 6 \equiv 30 \equiv 2 \pmod{7}$

Falls keine Verwechslung zu befürchten ist, wird die übliche Schreibweise $+$ und \cdot anstelle von \oplus und \odot verwendet.

Def. 5:

Wenn es zu $c \in \mathbb{Z}_m$ eine Zahl $d \in \mathbb{Z}_m$ gibt, mit $c \cdot d \equiv 1 \pmod{m}$ (bzw. $c \odot d \equiv 1$), so heißt d die (multiplikative) modulare Inverse zu c in \mathbb{Z}_m .

Bezeichnung: $d = c^{-1}$

Bsp. 2:

$c = 3 \in \mathbb{Z}_7$, wegen $3 \cdot 5 \equiv 1 \pmod{7}$ ist (in \mathbb{Z}_7) $3^{-1} = 5$.

Satz 2: Zu $a \in \mathbb{Z}_m, a \neq 0$, gibt es genau dann eine modulare Inverse in \mathbb{Z}_m , wenn a und m teilerfremd sind ($\text{ggT}(a, m) = 1$).

Satz 3: Es sei p eine Primzahl. Dann ist $(\mathbb{Z}_p, \oplus, \odot)$ ein Körper.

Bemerkung: Falls m keine Primzahl ist, so ist $(\mathbb{Z}_m, \oplus, \odot)$ ein kommutativer Ring.

EUKLIDischer Algorithmus

- Verfahren zur Ermittlung des größten gemeinsamen Teilers t zweier positiver natürlicher Zahlen, $t = \text{ggT}(a, b)$.
- In erweiterter Form bietet der Algorithmus eine Möglichkeit zur Bestimmung der modularen Inversen von a zum Modul m (mit $a < m$ und a, m teilerfremd).

Satz 4: (EUKLIDischer Algorithmus)

Es seien $a, b \in \mathbb{N}^*, a > b$. Man bildet die endliche Folge

$r_0 := b, r_1 = \text{mod}(a, b), r_2 = \text{mod}(r_0, r_1), \dots, r_n = \text{mod}(r_{n-2}, r_{n-1})$, Abbruch falls $r_n = 0$.

In diesem Fall gilt $\text{ggT}(a, b) = r_{n-1}$ (letzter nicht verschwindender Rest).

Bezeichnung: j -te Division ... $r_{j-2} : r_{j-1} = q_j \text{ Rest } r_j$ ($j = 1, \dots, n$) (dabei $r_1 := a$).

Satz 5: (erweiterter EUKLIDischer Algorithmus)

Zusätzlich zur Folge (r_n) aus Satz 4 bilde man die Folgen

$x_0 = 0, x_1 = 1, x_2 = x_0 - q_2 x_1, \dots, x_j = x_{j-2} - q_j x_{j-1} \quad (j \leq n-1)$ und

$y_0 = 1, y_1 = -q_1, y_2 = y_0 - q_2 y_1, \dots, y_j = y_{j-2} - q_j y_{j-1} \quad (j \leq n-1)$

Dann gilt für alle $j = 0, \dots, n-1$: $r_j = x_j \cdot a + y_j \cdot b$

Insbesondere gilt $\text{ggT}(a, b) = x_{n-1} \cdot a + y_{n-1} \cdot b$

Diskussion:

- Der Sinn der erweiterten EUKLIDischen Algorithmus besteht darin, in jedem Schritt den *Divisionsrest* r als *linearkombination* von a und b mit *ganzzahligen Koeffizienten* x und y darzustellen:

$$r = x \cdot a + y \cdot b$$

Der Mechanismus wird am besten im Rechenschema des nachfolgenden Bsp. 4 deutlich.

- Sind c und m teilerfremd, $1 \leq c < m$, d.h. $\text{ggT}(m, c) = 1$, so erhält man mit dem erweiterten EUKLIDischen Algorithmus ($a = m, b = c$) eine Darstellung in der Form $\boxed{1 = x \cdot m + y \cdot c}$.

$\leadsto y \cdot c \equiv 1 \pmod{m}$ und damit $c^{-1} \equiv y \pmod{m}$ (für die modulare Inverse muss eventuell noch der in \mathbb{Z}_m liegende, zu y kongruente, Wert gebildet werden!).

Bsp. 3:

Man ermittle den größten gemeinsamen Teiler t sowie das kleinste gemeinsame Vielfache v der Zahlen 132 und 84.

- Es genügt der „einfache“ Algorithmus:

$$132 : 84 = 1 \text{ Rest } 48$$

$$84 : 48 = 1 \text{ Rest } 36$$

$$48 : 36 = 1 \text{ Rest } 12 \quad \leadsto t = \text{ggT}(132, 84) = \underline{\underline{12}}$$

$$36 : 12 = 3 \text{ Rest } \boxed{0} \leadsto \text{Ende.}$$

$$\bullet v = \frac{a \cdot b}{t} = \frac{132 \cdot 84}{12} = \underline{\underline{924}} = \text{kgV}(132, 84)$$

Bsp. 4:

Man ermittle die modulare Inverse von $\overbrace{11}^b$ zum Modul $\overbrace{25}^a$.

25 : 11 = 2 Rest 3	3 = 25 - 2 · 11	11 = 0 · 25 + 1 · 11 (1)
11 : 3 = 3 Rest 2	2 = 11 - 3 · 3	3 = 1 · 25 - 2 · 11 (2)
3 : 2 = 1 Rest 1	1 = 3 - 2	2 = -3 · 25 + 7 · 11 (3)
2 : 1 = 2 Rest 0		$\boxed{1} = 4 \cdot 25 - 9 \cdot 11$

$$\leadsto (-9) \cdot 11 \equiv 1 \pmod{25}$$

$$\leadsto 11^{-1} \equiv -9 \equiv 16 \pmod{25}, \text{ die Inverse von } 11 \text{ in } \mathbb{Z}_{25} \text{ ist } 16.$$

Zu den Schritten:

$$(1) b = 0 \cdot a + 1 \cdot b$$

(2) mittleres Feld als Linearkombination

(3) ab hier Rechnung links spaltenweise durchführen, dabei Faktoren a und b beibehalten.

EULERSche φ -Funktion, Satz von EULER

Def. 6:

Es sei $n \in \mathbb{N}^*$. Dann *EULERSche φ -Funktion*:

$\varphi(n) :=$ Anzahl der zu n teilerfremden Elemente aus $\{1, 2, \dots, n\}$. Eigenschaften der φ -Funktion:

- Es sei p eine Primzahl, dann ist $\boxed{\varphi(p) = p - 1}$, $\boxed{\varphi(p^k) = p^{k-1}(p - 1)}$ ($k \in \mathbb{N}^*$)
- Falls $\text{ggT}(m, n) = 1$, so gilt $\varphi(m \cdot n) = \varphi(m) \cdot \varphi(n)$.
- Speziell: $n = p \cdot q$ (p, q Primzahlen), dann $\boxed{\varphi(n) = (p - 1) \cdot (q - 1)}$ (1).

Satz 6: (Satz von EULER)

Es sei $\text{ggT}(a, n) = 1$, dann gilt:

$$\boxed{a^{\varphi(n)} \equiv 1 \pmod{n}} \quad (2).$$

RSA-Verschlüsselung

- Die Formeln (1) und (2) [siehe oberhalb] bilden die Grundlage für die sogenannte RSA-Verschlüsselung (RIVES, SHAMIR, ADLEMAN - 1978)
- Schlüsselerzeugung:
 - 1.) Man wählt (in der Praxis sehr große) Primzahlen d und q .
 - 2.) $n := p \cdot q$, $m := \varphi(n) \stackrel{(1)}{=} (p - 1)(q - 1)$
 - 3.) e wird so gewählt, dass $\text{ggT}(e, m) = 1$
 - 4.) $d := e^{-1} \pmod{m}$ (modulare Inverse)
 - 5.) $(n, e) \dots$ öffentlicher Schlüssel
 $(n, d) \dots$ geheimer Schlüssel (geheim ist nur d)
 p, q und m werden nicht mehr benötigt, bleiben aber geheim!
- Verschlüsselung:
 Klartext a teilerfremd zu n verschlüsseln mit e , d.h. $b := a^e \pmod{n}$ bilden ($b \dots$ Geheimtext)
- Entschlüsselung:
 Der Empfänger und Besitzer des geheimen Schlüssels bildet $b^d \pmod{m}$ und erhält $b^d \equiv a \pmod{n}$ denn $b^d \equiv (a^e)^d \equiv a^{ed} \equiv a^{1+k \cdot m} \equiv a \cdot \underbrace{\left(a^{\varphi(n)}\right)^k}_{\equiv 1 \text{ wegen Satz 5}} \equiv a \pmod{n}$.
- Praktische Durchführung vgl Übungsaufgabe 2.4

3.3. Reelle Zahlen

$\mathbb{R} \dots$ Menge der reellen Zahlen.

Auf \mathbb{R} existiert eine algebraische Struktur und eine Ordnungsstruktur.

3.3.1. Algebraische Struktur

$(\mathbb{R}, +, \cdot)$ mit den arithmetischen Operationen $+$ (Addition) und \cdot (Multiplikation) ist ein Körper.

Def. 7:

- a.) $\boxed{0! := 1, n! = n \cdot (n - 1)!}$ mit $n \in \mathbb{N}^*$ *Fakultät* (rekursive Funktion)

b.) Sei $\alpha \in \mathbb{R}, k \in \mathbb{N}^*$, dann sei $\binom{\alpha}{0} := 1, \binom{\alpha}{k} := \frac{\alpha}{k} \binom{\alpha-1}{k-1}$ Binominalkoeffizient α über k .

$$\text{d.h.} \quad \binom{\alpha}{k} = \frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)\dots(\alpha-k-1)}{k!}$$

Diskussion:

1.) Für $k, n \in \mathbb{N}$, $0 \leq k \leq n$ gilt $\binom{n}{k} = \binom{n}{n-k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$

2.) Für $k \in \mathbb{N}, \alpha \in \mathbb{R}$ gilt $\binom{\alpha}{k} + \binom{\alpha}{k+1} = \binom{\alpha+1}{k+1}$

3.) *Binomischer Lehrsatz:* $(a + b)^k = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} a^{n-k} \cdot b^k = a^n + n \cdot a^{n-1} \cdot b + \binom{n}{2} a^{n-2} \cdot b^2 + \dots + b^n$

Pascalsches Dreieck:

				1					$n = 0$
			1		1				1
		1		2		1			2
	1		3		3		1		3
		1	4		6		4		4
	1		5		10		10		5
		1		6		15		6	
			1		7		21		
				1		8		28	
					1		9		
						1		10	
							1		
								1	
									1

(Spalte $\hat{=}$ k in $\binom{n}{k}$)

Stellenwertsysteme:

- Es sei $k > 1$ eine natürliche Zahl (die sogenannte Basis)
- $x = (\underbrace{x_p x_{p-1} \dots x_1 x_0}_{\text{Vorkomma}}, \underbrace{x_{-1} x_{-2} \dots x_{-q}}_{\text{Nachkomma}})_b$

$$:= \underbrace{x_p \cdot b^p + x_{p-1} \cdot b^{p-1} + \dots + x_1 \cdot b^1 + x_0 \cdot b^0}_{\text{Vorkomma}} + \underbrace{x_{-1} \cdot b^{-1} + x_{-2} \cdot b^{-2} + \dots + x_{-q} \cdot b^{-q}}_{\text{Nachkomma}}$$
 heißt Darstellung zur Basis b (*).

Bsp. 5:

- $b = 2 \dots$ *Dual- oder Binärsystem* (Ziffern $\{0, 1\}$)
- $b = 3 \dots$ *Trialsystem*
- $b = 10 \dots$ *Dezimalsystem*
- $b = 16 \dots$ *Hexadezimalsystem* (Ziffern $\{0, 1, 2, \dots, 9, \overset{10}{A}, \overset{11}{B}, \overset{12}{C}, \overset{13}{D}, \overset{14}{E}, \overset{15}{F}\}$)

z.B. $(47)_{10} = (101111)_2 = (1202)_3 = (57)_8 = (2F)_{16}$

Übergang von einem Ziffernsystem zu einem anderen

z.B. $p = 3, q = 2$

$$\begin{aligned} x &= x_3 b^3 + x_2 b^2 + x_1 b^1 + x_0 + x_{-1} b^{-1} + x_{-2} b^{-2} \\ &= (x_3 b^2 + x_2 b^1 + x_1) b + x_0 + (x_{-1} + x_{-2} b^{-1}) b^{-1} \\ &= ((x_3 b^1 + x_2) b + x_1) b + x_0 + (x_{-1} + x_{-2} b^{-1}) b^{-1} \end{aligned}$$

Grundlage: fortgesetztes Klammern:

$$\begin{aligned} x &= (((...((x_p b + x_{p-1}) b + x_{p-2}) b + ... + x_2) b + x_1) b + x_0 + \\ &\quad ((...((x_{-q} b^{-1} + x_{-(q-1)}) b^{-1} + ... + x_{-2}) b^{-1} + x_{-1}) b^{-1} \end{aligned}$$

(**)

Bsp. 6: Übergang Dezimalsystem \rightarrow anderes System

- ganzer Teil: fortgesetzte Division durch b und Restabspaltung liefert b -Ziffern in der Reihenfolge x_0, x_1, x_2, \dots
- gebrochener Teil: fortgesetzte Multiplikation mit b und Abspaltung des ganzzahligen Anteils liefert b -Ziffern in der Reihenfolge x_{-1}, x_{-2}, \dots

z.B. Dezimalsystem \rightarrow Hexadezimalsystem ($b = 16$)

$$x = 435,9$$

ganzer Teil:

$$435 : 16 = 27 \text{ Rest } 3 \rightarrow x_0$$

$$27 : 16 = 1 \text{ Rest } 11 \rightarrow x_1$$

$$1 : 16 = 0 \text{ Rest } 1 \rightarrow x_2$$

gebrochener Teil:

$$0,9 \cdot 16 = 14,4 \rightarrow x_{-1}$$

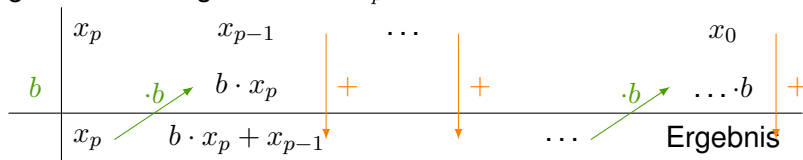
$$0,4 \cdot 16 = 6,4 \rightarrow x_{-2} \text{ (Periode, da gleicher „Nachkommarest“)}$$

$$\hookrightarrow x = (1B3, E\bar{6})_{16}$$

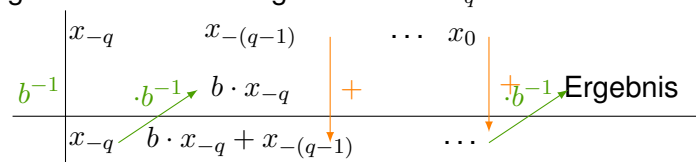
Bsp. 7: Übergang anderer Systeme \rightarrow Dezimalsystem

Entweder direkte Auswertung von (*) (v.a. beim Dualsystem \rightarrow Addition von 2er-Potenzen) oder Klammern in (**) von innen nach außen berechnen (zweckmäßig HORNER-Schema).

- ganzer Teil: beginnend mit x_p



- gebrochener Teil: beginnend mit x_{-q}



$$x = (1E2, B8)_{16}$$

ganzer Teil:

	1	14	2
16		16	480
	1	30	482

gebrochener Teil:

	8	11	*
$\frac{1}{16} = 0,0625$		0,5	0,71875
	8	11,5	

$$\curvearrowright x = \underline{\underline{482,71875}}$$

Bsp. 8: Hexadezimalsystem \leftrightarrow Dualsystem

4 Dualziffern entsprechen einer Hexadezimalziffer ($2^4 = 16$) \curvearrowright 4er Gruppen von Dualziffern ab Komma bilden.

a.) $(A8C, B2)_{16} = (1010\ 1000\ 1100, 1011\ 1011\ 001(0))_2$

b.) $((0)110\ 1110, 101(0))_2 = (6E, A)_{16}$

3.3.2. Zahlendarstellung im Computer

1.) Ganze Binärzahlen in Zweierkomplementdarstellung (n Bit, meist $n = 8, 16, 32, 64$)

- Bsp.: $n = 8$ $(100)_{10} = (64)_{16}$

0	1	1	0	0	1	0	0
2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0

MSB: most significant bit

(LSB: least significant bit)

- Um auch negative Zahlen darstellen zu können, wird das MSB als Vorzeichen reserviert. Negative Zahlen $-a$ ($1 \leq a \leq 2^{n-1}$) werden im sogenannten Zweierkomplement $\bar{a} := 2^n - a$ dargestellt ($\curvearrowright \bar{a} \geq 2^{n-1} \curvearrowright MSB = 1$)
- Negative Zahlen $0 \leq a \leq 2^{n-1} - 1$ werden unverändert dargestellt ($MSB = 0$)
- Damit Darstellung ganzer Zahlen von -2^{n-1} bis $2^{n-1} - 1$ (Anzahl 2^n) möglich, $n = 8$: $-128 \text{ bis } 127$.
- Umwandlung negativer Zahlen \rightarrow Zweierkomplement

Bsp. 9: $n = 8$, umzuwandeln sei -100 (dezimal)

zwei Möglichkeiten:

1.) (für die Handrechnung): $\overline{100} = \underbrace{2^8}_{=256} - 100 = \underbrace{156}_{(9C)_{16}} = \boxed{1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0}$

Bemerkung: Das Zweierkomplement der positiven Zahl 100 ist die positive Zahl $156 = \overline{100}$, diese wird wegen $MSB = 1$ als negative Zahl -100 interpretiert.

2.) (am schnellsten): Rechts (beim LSB) beginnend alle Ziffern bis einschließlich der ersten 1 übernehmen (unverändert lassen), für alle höherwertigen Ziffern Z das *Einerkomplement* $1 - z$ bilden:

$$(100)_{10} = \boxed{0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0}$$

$$\boxed{1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0} = (\overline{100})_{10} = (156)_2$$

Rückumwandlung (Zahl mit $MSB = 1 \rightarrow$ neg. Zahl) analog:

$$\overline{156} = 256 - 156 = 100 \rightarrow \underline{\underline{-100}}$$

Die Subtraktion wird damit auf die Addition des Zweierkomplements zurückgeführt.

Bsp. 10: $a = 64 - 100 = 64 + (-100)$

$$64 = 2^6 = 0100\ 0000$$

$$-100 = 1001\ 1100 \quad +$$

$$\text{Summe} = 1101\ 1100 \quad \text{Ergebnis negativ}$$

$$36 = 0010\ 0100 \quad \text{dargestellt ist aber } \bar{z} = 2^n - z$$

$$\hookrightarrow \text{Ergebnis: } a = -36 = -z$$

Ein **Überlauf** (Ergebnis $\geq 2^{n-1}$ oder $< -2^{n-1}$) entsteht in folgenden Fällen (\rightarrow ERROR!)

	a	b	$a + b$
MSB	0	0	1 ($MSB = 0$ erwartet!)
MSB	1	1	0 ($MSB = 1$ erwartet!)

Bemerkung: Für die Handrechnung (z.B. $2 - 5 =: a$) kleinere Zahl von größerer Subtrahieren $a = -(5 - 2)$, dabei genügt es für n die Binärstellenzahl des Minuenden $(5)_{10} = (101)_2$ also $n = 3$ zu verwenden. Es wird dabei ausschließlich mit nicht-negativen Zahlen gerechnet $(0, 1, \dots, 2^n - 1)$:

$$(5 - 2)_{10} = ((5 + 2^n - 2) - 2^n)_{10} = (5 + \bar{2} - 2^n)_{10}$$

$$(2)_{10} = (010)_2 \hookrightarrow \bar{2} = (110)_2$$

$$(5)_{10} = (101)_2$$

$$5: \quad 101$$

$$\bar{2}: \quad 110 \quad +$$

$$1 \quad 011$$

vordere Stelle 2^n ignorieren

$$\hookrightarrow 5 - 3 = 3 = (011)_2 \hookrightarrow \underline{\underline{a = -3}}$$

2.) Gleitkommasysteme

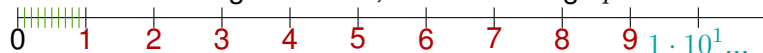
$$x = v \cdot m \cdot b^e \quad \text{dabei}$$

- $v = (-1)^V \dots$ Vorzeichen $\begin{cases} V = 0 & \text{positive Zahl} \\ V = 1 & \text{negative Zahl} \end{cases}$
- $m \dots$ Mantisse, Stellenzahl p , die Mantisse heißt *normalisiert* falls sie folgende Gestalt besitzt:
 m_1, m_2, \dots, m_p oder $0, m_1, m_2, \dots, m_p$ mit $m \neq 0$. Dabei sind m_1, m_2, \dots, m_p die Ziffern zur Basis b .
- $e \dots$ Exponent, ganzzahlig $e_{\min} \leq e \leq e_{\max}$.

In jedem Gleitkommasystem sind nur endlich viele Zahlen darstellbar, die Menge der reellen Zahlen ist aber überabzählbar (unendlich).

Gleitkommazahlen liegen auf der Zahlengeraden diskret verteilt (fester Exponent \hookrightarrow gleiche Abstände, wächst Exponent um k , so wachsen die Abstände auf b^k -fache!)

Veranschaulichung für $b = 10$, Mantissenlänge $p = 1$:



Exponent 0: $1 \cdot 10^0, 2 \cdot 10^0, \dots, 9 \cdot 10^0$

Exponent -1: $1 \cdot 10^{-1}, 2 \cdot 10^{-1}, \dots, 9 \cdot 10^{-1}$

Exponent 1: $1 \cdot 10^1, 2 \cdot 10^1, \dots, 9 \cdot 10^1$

Rundung: Zahlen, die nicht in diesem „Raster“ enthalten sind, werden auf die nächstgelegene darstellbare Gleitkommazahl gerundet. Falls die Zahl genau in der Mitte zwischen zwei darstellbaren Zahlen liegt, wird auf die gerade Zahl gerundet (Bsp. $3,75 \rightarrow 3,8$ oder $4,65 \rightarrow 4,6$ bei Rundung auf eine Stelle nach dem Komma).

Numerische Probleme beim Rechnen mit Gleitkommazahlen

- Kommutativ-, Assoziativ- und Distributivgesetze gelten im allgemeinen nicht mehr. Ursachen sind bspw. Ziffernauslöschung bei der Subtraktion fast gleicher Zahlen, Addition oder Subtraktion von Zahlen unterschiedlicher Größenordnung.

Bsp. 11:

1.) Man berechne $(a + b) + c$ und $a + (b + c)$ in einem System mit 3-stelliger Mantisse:

$$a = 3,73 \cdot 10^6, b = -3,71 \cdot 10^6 \text{ und } c = 6,42 \cdot 10^3$$

$$- a + b = 0,02 \cdot 10^6 = 2,00 \cdot 10^4 \text{ (Normalisierung)}$$

$$c = 0,642 \cdot 10^4 = 0,64 \cdot 10^4 \text{ (Exponentenangleichung und Rundung)}$$

$$(a + b) + c = 2,64 \cdot 10^4 = \underline{26400}$$

$$- c = 0,00642 \cdot 10^6 = 0,01 \cdot 10^6 \text{ (Exponentenangleichung und Rundung)}$$

$$b + c = -3,70 \cdot 10^6$$

$$a + (b + c) = 0,03 \cdot 10^6 = 3,00 \cdot 10^4 = \underline{30000}$$

$$- \text{exakter Wert: } a + b + c = \underline{26420}$$

2.) Aufgabe der numerischen Mathematik ist es, die unvermeidlichen Genauigkeitsverluste beim Rechnen mit Maschinenzahlen durch optimale Organisation (Reihenfolge) der Rechnung und Fehleranalyse in Grenzen zu halten.

3.) Gleitkommaformat IEEE 754 (single precision, 32 Bit)

$$x = v \cdot m \cdot b^e = (-1)^V \cdot 1, m_2 m_3 \dots m_{24} \cdot 2^{E-B} \quad (b = 2, \text{ Binärsystem})$$

- Vorzeichen $V = 0 \rightarrow$ positiv, $V = 1 \rightarrow$ negativ (1 Bit)
- Mantisse m_1 im Binärsystem stets gleich 1.
 \rightarrow nur Abspeicherung von $M = m_2 m_3 \dots m_{24}$ (23 Bit)
- Exponent: Abgespeichert wird $E := e + B$
mit dem sogenannten **Biaswert** $B = 127$ (Bias = Verzerrung) als nichtnegative 8-stellige Binärzahl, $e_{\min} = -126$ ($E = 1$), $e_{\max} = 127$ ($E = 254 = (1111\ 1110)_2$), die Grenzfälle $E = (0000\ 0000)_2$ und $E = (1111\ 1111)_2$ sind für Sonderfälle (0, ∞ , nichtdefinierte Werte) vorgesehen.

Abspeicherung in der Reihenfolge VEM (32 Bit)

Bsp. 12: Umwandlung einer Dezimalzahl in das IEEE 754-Format (32-Bit), $x = 435,9$ (vgl. Bsp. 6)

1.) Konvertierung in Dualzahl (unter Verwendung von Bsp. 6/Hexadez.)

$$x = 1B3, E6_{16} = (1\ 1011\ 0011, 1100\ 0110\ 0110 \dots)_2$$

2.) Normalisierte Gleitkommadarstellung, Mantisse mit 23 Stellen nach dem Komma, Komma-verschiebung um 8 Stellen.

$$\rightarrow x = 1, \underbrace{1011\ 0011\ 1110\ 0110\ 0110\ 011}_{M} (0\ 0110 \dots)_2 \cdot 2^8 \quad (\text{Abrundung!})$$

$$3.) \text{ Exponent } e = 8 \curvearrowright E = e + B = 8 + 127 = 135 = \underbrace{(1000 \ 0111)}_E)_2$$

4.) Vorzeichenbit $V = 0$ (da x positiv)

$$\curvearrowright x : \boxed{0 \ 1000 \ 0111 \ 1011 \ 0011 \ 1110 \ 0110 \ 0110 \ 011}$$

Bsp. 13: IEEE 754 \rightarrow Dezimalzahl

$$\boxed{1 \ 1000 \ 0011 \ 0111 \ 1100 \ 0000 \ 0000 \ 0000 \ 000}$$

$$1.) \ E = (1000 \ 0011)_2 = 131 \curvearrowright e = E - B = 131 - 127 = \underline{4}$$

2.) $V = 1 \curvearrowright$ negativ, normalisierte Mantisse 1, M

$$\curvearrowright x = -(1, 01111)_2 \cdot 2^4 = -(10111, 11)_2$$

$$\curvearrowright x = -23,75$$

Bemerkung:

1.) Neben dem single-Format gibt es in IEEE 754 das double-Format (54 Bit, $V=1$ Bit, $E=11$ Bit, $M=52$ Bit, $B=1023$) sowie das erweiterbare Format

2.) Zahlbereiche single: $1,401 \cdot 10^{-45} \dots 3,403 \cdot 10^{38}$, double: $4,941 \cdot 10^{-324} \dots 1,798 \cdot 10^{308}$

3.3.3. Ordnungsstruktur

- Durch \leq (auch \leq) ist auf \mathbb{R} eine vollständige Ordnungsrelation erklärt.
- Verträglichkeit mit der algebraischen Struktur (für alle $x, y, z \in \mathbb{R}$):

$$(1) \ x \leq y \Rightarrow x + z \leq y + z$$

$$(2) \ (x \leq y) \wedge (z \geq 0) \Rightarrow x \cdot z \leq y \cdot z$$

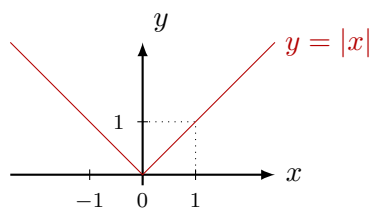
$$(x \leq y) \wedge (z \leq 0) \Rightarrow x \cdot z \geq y \cdot z$$

Für die strikte Ordnung $<$ gilt:

$$\boxed{(x < y) \wedge (z < 0) \Rightarrow x \cdot z > y \cdot z}$$

Def. 8:

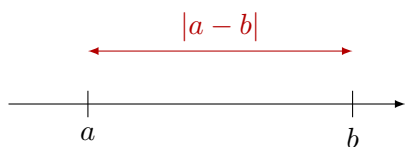
Sei x eine reelle Zahl. Dann heißt $|x| := \begin{cases} x & \text{für } x \geq 0 \\ -x & \text{für } x < 0 \end{cases}$ der (absolute) Betrag von x .



$$\text{Vorzeichenfunktion } sgn(x) := \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases}$$

Diskussion: Es gilt:

- 1.) $|a - b|$ = „Abstand der Zahlen a und b auf der Zahlengeraden“



(speziell: $|a|$ = „Abstand von a zum Ursprung“)

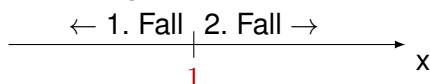
- 2.) $a = |a| \cdot \operatorname{sgn}(a)$
- 3.) $|a| = |-a|$, $|ab| = |a| \cdot |b|$, $\left|\frac{a}{b}\right| = \frac{|a|}{|b|}$ (falls $b \neq 0$)
- 4.) $|a \pm b| \leq |a| + |b|$ (Dreiecksungleichung) für alle $a, b \in \mathbb{R}$

Lösung von Ungleichung

Bsp. 14: (Ungleichung mit Beträgen)

Gesucht sei die Lösungsmenge L der reellen Zahlen, die die Ungleichung $|x - 1| < 3 + \frac{1}{2}x$ (*) erfüllen.

- kritische Stelle(n): Nullstellen des Terms innerhalb der Betragsstriche d.h. $x = 1 \leadsto$ Fallunterscheidung



- 1. Fall: $x - 1 < 0$ d.h. $x < 1$
in (*):

$$-(x - 1) < 3 + \frac{1}{2}x \Leftrightarrow$$

$$-\frac{3}{2}x < 2 \Leftrightarrow$$

$$x > -\frac{4}{3}$$

$$\leadsto L_1 = \left\{x \mid (x < 1) \wedge x > -\frac{4}{3}\right\} = \left(-\frac{4}{3}, 1\right)$$

- 2. Fall $x - 1 \geq 0$ d.h. $x \geq 1$
in (*):

$$x - 1 < 3 + \frac{1}{2}x \Leftrightarrow$$

$$\frac{1}{2}x < 4 \Leftrightarrow$$

$$x < 8$$

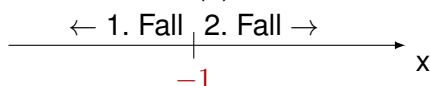
$$\leadsto L_2 = \{x \mid (x \geq 1) \wedge (x < 8)\} = [1, 8)$$

- $\Rightarrow L = L_1 \cup L_2 = \left(-\frac{4}{3}, 8\right)$

Bsp. 15: (Ungleichung mit gebrochen rationalen Termen)

$$\frac{x}{x+1} < 1 \quad (*)$$

- kritische Stelle(n): Nenner-Nullstellen, hier: $x = -1$.



- 1. Fall: $x < -1$
in (*):
 $\Leftrightarrow x > x + 1 \Leftrightarrow 0 > 1$ (Widerspruch)
 $L_1 = \emptyset$.
- 2. Fall: $x > -1$
in (*):
 $\Leftrightarrow x < x + 1 \Leftrightarrow 0 < 1$ (wahre Aussage)
 $L_2 = \{x | x > -1\} = (-1, \infty)$
- $\Rightarrow L = L_1 \cup L_2 = \underline{\underline{(-1, \infty)}}$

Bsp. 16: (quadratische Ungleichungen)

$$\begin{aligned}
 x^2 + 3x < 10 &\Leftrightarrow \\
 \left(x + \frac{3}{2}\right)^2 - \frac{9}{4} < 10 &\Leftrightarrow \text{(vereinfacht durch quadratische Ergänzung)} \\
 \left(x + \frac{3}{2}\right)^2 < \frac{49}{4} &\Leftrightarrow \\
 \left|x + \frac{3}{2}\right| < \frac{7}{2} &\Leftrightarrow \text{(Äquivalenz siehe Übung)} \\
 -\frac{7}{2} < x + \frac{3}{2} < \frac{7}{2} &\Leftrightarrow \\
 -5 < x < 2 & \\
 L = \underline{\underline{(-5, 2)}} &
 \end{aligned}$$

Bemerkung:

In vielen Fällen ist auch ein graphischer Lösungsansatz möglich. Dabei sind geeignete Schnittpunkte ($\hat{=}$ Gleichung) exakt rechnerisch zu ermitteln, ausschließend Ungleichheitszeichen betrachten.

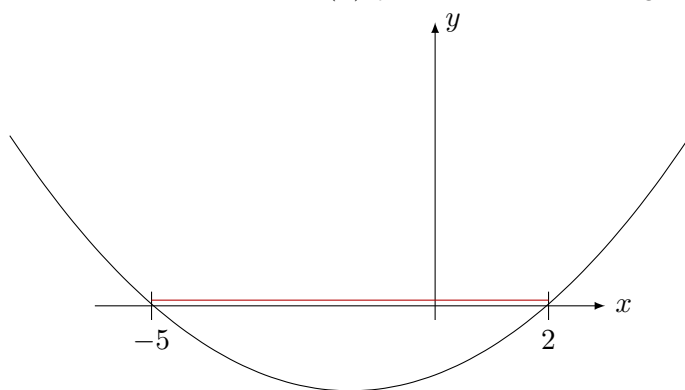
in Bsp. 16:

$$x^2 + 3x < 10 \quad \Leftrightarrow \quad \underbrace{x^2 + 3x - 10}_{=f(x)} < 0$$

Nullstellen von $f(x)$:

$$\begin{aligned}
 x^2 + 3x - 10 &= 0 \\
 x_{1,2} &= -\frac{3}{2} \pm \sqrt{\frac{9}{4} + 10} = \begin{cases} -5 \\ 2 \end{cases}
 \end{aligned}$$

\hookrightarrow Grobskizze von $y = f(x)$ (Parabel, nach oben geöffnet)



$$\hookrightarrow L = (-5, 2)$$

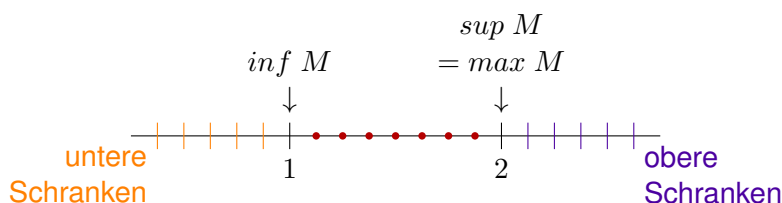
Schranken und Grenzen

- Eine Menge $M \subseteq \mathbb{R}$ heißt nach oben beschränkt, wenn es eine obere Schranke gibt, vgl. 2. Man kann zeigen, dass es bei diesen Ordnungsrelationen (\leq) auf \mathbb{R} dann auch eine kleinste obere Schranke (*Supremum*, $\sup M$, $s = \max M$ falls $s \in M$)
- Analog: nach unten beschränkt, *Infimum*, *Minimum*.
- Falls M nicht nach oben beschränkt ist, d.h. es gilt:
 $\exists a \in \mathbb{R} \quad \forall x \in M \quad x \leq a = \forall a \in \mathbb{R} \quad \exists x \in M \quad x > a$, dann Schreibweise $\sup M := \infty$
- Analog: in $\inf M := -\infty$ falls M nicht nach unten beschränkt.
- M heißt *beschränkt*, falls M nach oben und unten beschränkt ist.

Bsp. 17:

$$M = \left\{ 1 + \frac{1}{n} \mid n \in \mathbb{N}^* \right\}$$

- *obere Schranken*: $\pi, 2300, 7, 2, 01$ usw.
 kleinste obere Schranke: $\sup M = 2 = \max M$
- *untere Schranken*: $-31, 0, 0, 99$ usw.
 größte untere Schranke: $\inf M = 1$ ($1 \notin M \leadsto \min M$ existiert nicht)



3.4. Komplexe Zahlen

Motivation: z.B. $x^2 + 1 = 0$ ($\Leftrightarrow x^2 = -1$) im Bereich der reellen Zahlen nicht lösbar. \leadsto Zahlenbereichserweiterung

3.4.1. Begriff, Rechenregeln

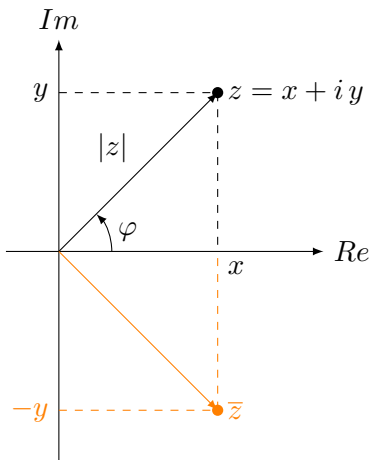
Die Menge \mathbb{C} der komplexen Zahlen ist eine Obermenge der Menge der reellen Zahlen mit folgenden Eigenschaften:

- 1.) \mathbb{C} enthält eine Zahl i mit $i^2 = -1$ (oft auch mit j bezeichnet)
- 2.) Jede komplexe Zahl z lässt sich in der Form $z = x + i \cdot y$ ($x, y \in \mathbb{R}$) darstellen.
 Dabei $x = \operatorname{Re}(z)$ (Realteil) und $y = \operatorname{Im}(z)$ (Imaginärteil)
- 3.) Auf \mathbb{C} werden die Operationen $+$ (Addition) und \cdot (Multiplikation) wie folgt erklärt:
 Sei $z_1 = x_1 + i \cdot y_1$, $z_2 = x_2 + i \cdot y_2$ Dann gilt:
 $z_1 + z_2 := (x_1 + x_2) + i(y_1 + y_2)$
 $z_1 \cdot z_2 := (x_1 x_2 - y_1 y_2) + i(x_1 y_2 + x_2 y_1)$
 Die Menge \mathbb{C} wird mit diesen Operationen zum *Körper der komplexen Zahlen*. Die arithmetischen Operationen erfolgen unter Beachtung von $i^2 = -1$ wie im Reellen.

4.) Auf \mathbb{C} gibt es keine natürliche Ordnungsrelation.

Veranschaulichung: GAUSSsche Zahlenebene

Zahl $z \leftrightarrow$ Punkt $(x, y) \leftrightarrow$ Vektor \overrightarrow{OP}



- **Betrag von z :**
 $|z| = \sqrt{x^2 + y^2}$
- **Hauptargument von z :** orientierter Winkel zwischen positiver x-Achse und \overrightarrow{OP} (gemessen auf kürzestem Wege)
 $\text{Arg}(z) := \varphi \quad (-\pi < \varphi \leq \pi)$
- **zu z konjugiert komplexe Zahl \bar{z} :**
 $\bar{z} := x - i \cdot y$

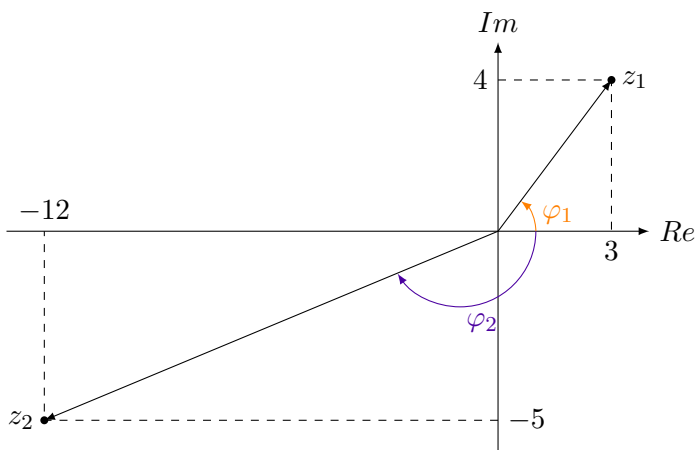
Diskussion:

- Falls nicht notwendig kürzester Weg gewählt wird: Argument $\arg(z) = \text{Arg}(z) + 2\pi k \quad (k \in \mathbb{Z})$
z.B. $z = 1 - i$: $\text{Arg}(z) = -45^\circ = -\frac{\pi}{4}$, ein (Neben-)argument bspw. $\arg(z) = 315^\circ$
- Berechnung von $\text{Arg}(z)$ ($z \neq 0$): $\cos \varphi = \frac{x}{|z|}$, $\sin \varphi = \frac{y}{|z|}$

$$\text{Arg}(z) = \begin{cases} +\arccos \frac{x}{|z|} & \text{falls } y \geq 0 \\ -\arccos \frac{x}{|z|} & \text{falls } y < 0 \end{cases}$$

Bsp. 18:

$$z_1 = 3 + 4i, z_2 = -12 - 5i$$



a.) Betrag und Hauptargument

$$|z_1| = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5$$

$$\varphi_1 = \operatorname{Arg}(z_1) = \arccos \frac{3}{5} \approx 53,13^\circ$$

$$|z_2| = 13$$

$$\varphi_2 = \operatorname{Arg}(z_2) = -\arccos \frac{12}{13} \approx -157,38^\circ$$

b.) Arithmetische Operationen:

$$z_1 + z_2 = -9 - i$$

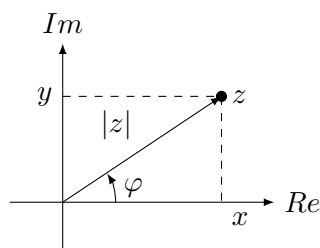
$$z_1 - z_2 = 15 + 9i$$

$$z_1 \cdot z_2 = -16 - 63i$$

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{z_1 \cdot \overline{z_2}}{z_2 \cdot \overline{z_2}} = \frac{z_1 \cdot \overline{z_2}}{|z_2|^2} = -\frac{56}{169} - \frac{33}{169}i$$

3.4.2. Darstellungsformen komplexer Zahlen

- Trigonometrische Darstellung
- EULERSche Form
- exponentielle Darstellung



$$z = x + iy \quad (\text{arithmetische Darstellung})$$

$$x = |z| \cdot \cos \varphi$$

$$y = |z| \cdot \sin \varphi$$

$$\leadsto z = |z| \cdot (\cos \varphi + i \sin \varphi) \quad (\text{trigonometrische Darstellung})$$

(und $\varphi = \arg z$, meist $\varphi = \operatorname{Arg} z$)

Diskussion:

$$z_1 = |z_1| \cdot (\cos \varphi_1 + i \sin \varphi_1)$$

$$z_2 = |z_2| \cdot (\cos \varphi_2 + i \sin \varphi_2)$$

$$z_1 \cdot z_2 = |z_1| \cdot |z_2| \cdot \underbrace{(\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 - \sin \varphi_1 \sin \varphi_2)}_{\cos(\varphi_1 + \varphi_2)} + i \underbrace{(\sin \varphi_1 \cos \varphi_2 + \sin \varphi_2 \cos \varphi_1)}_{\sin(\varphi_1 + \varphi_2)}$$

$$z_1 \cdot z_2 = |z_1| \cdot |z_2| \cdot (\cos(\varphi_1 + \varphi_2) + i \sin(\varphi_1 + \varphi_2))$$

Folgerung:

$$|z_1 \cdot z_2| = |z_1| \cdot |z_2|$$

$$\arg(z_1 \cdot z_2) = \arg(z_1) + \arg(z_2)$$

Analog:

$$\left| \frac{z_1}{z_2} \right| = \frac{|z_1|}{|z_2|} \quad (z_2 \neq 0)$$

$$\arg\left(\frac{z_1}{z_2}\right) = \arg(z_1) - \arg(z_2)$$

Es ist also sinnvoll zu definieren:

Def. 10:

$$e^{i\varphi} = \cos\varphi + i \sin\varphi \quad (\text{EULERSche Form})$$

Diskussion:

1.) Exponentielle Darstellung von z : $z = |z| \cdot e^{i\varphi}$

2.) Wegen der obigen Formeln bleiben für diese Darstellung die vom Reellen bekannten Potenzgesetze gültig.

Insbesondere gilt die Formel von MOIVRE:

$$z^n = (|z| \cdot e^{i\varphi})^n = |z|^n \cdot e^{i\varphi n} = |z|^n (\cos(n\varphi) + i \sin(n\varphi))$$

Bsp. 19:

$$\begin{aligned} \text{a.) } z_1 &= \underbrace{3 + 4i}_{\text{arithmetisch}} = \underbrace{5 \cdot (\cos 53,13^\circ + i \sin(53,13^\circ))}_{\text{trigonometrisch}} = \underbrace{5 \cdot e^{i \cdot 53,13^\circ}}_{\text{exponentiell}} \\ z_2 &= -12 - 5i = 13 \cdot (\cos(-157,38^\circ) + i \sin(-157,38^\circ)) = 13 \cdot e^{-i \cdot 157,38^\circ} \end{aligned}$$

b.) $z = -1 + i$, gesucht: z^{12}

$$|z| = \sqrt{2}, \operatorname{Arg}(z) = \arccos\left(-\frac{1}{\sqrt{2}}\right) = 135^\circ = \frac{3}{4}\pi$$

$$z = \sqrt{2} \cdot e^{i \cdot \frac{3}{4}\pi} \Rightarrow z^{12} = \left(\sqrt{2} \cdot e^{i \cdot \frac{3}{4}\pi}\right)^{12} = 2^6 \cdot e^{i \cdot \frac{3}{4}\pi \cdot 12} = 64 \cdot e^{i \cdot 9\pi} = 64 \cdot e^{i\pi}$$

$$\text{arithmetische Darstellung: } z^{12} = 64 \cdot (\cos\pi + i \sin\pi) = \underline{\underline{-64}}$$

3.4.3. Spezielle Gleichungen

Quadratische Gleichung: $z^2 + p \cdot z + q = 0 \quad (p, q \in \mathbb{R})$

$$\text{quadratische Ergänzung: } \left(z + \frac{p}{2}\right)^2 = \frac{p^2}{4} - q$$

$$1. \text{ Fall: } \frac{p^2}{4} - q \geq 0 \leadsto z_{1/2} = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\frac{p^2}{4} - q}$$

$$2. \text{ Fall: } \frac{p^2}{4} - q < 0$$

$$\Leftrightarrow \left(z + \frac{p}{2}\right)^2 + \underbrace{q - \frac{p^2}{4}}_{\substack{\cong a^2 \\ > 0}} = 0$$

$$\Leftrightarrow \left(\left(z + \frac{p}{2}\right) + i \cdot a\right) \cdot \left(\left(z + \frac{p}{2}\right) - i \cdot a\right) = 0$$

$$\Leftrightarrow \boxed{z_{1,2} = -\frac{p}{2} \pm i \sqrt{q - \frac{p^2}{4}}}$$

praktisches Vorgehen:

Lösungsformel aus dem ersten Fall stets anwenden, im Fall 2 Formel $\sqrt{-1} = \pm i$.

Bsp. 20:

$$z^2 + 28z + 200 = 0$$

$$z_{1,2} = -14 \pm \sqrt{-4} = \underline{\underline{-14 \pm 2i}}$$

Kreisteilungsgleichung:

$$z^n = b, b \in \mathbb{C}, n \in \mathbb{N}^*$$

Lösung:

- b exponentiell darstellen: $b = |b| \cdot e^{i\beta}$, $\beta = \text{Arg}(b)$
- Gleichung besitzt n Lösungen $z_k = \sqrt[n]{|b|} \cdot e^{i \frac{\beta + k \cdot 360^\circ}{n}}$ mit $k = 0, 1, \dots, n-1$

zum Beweis:

Ansatz: $z = r \cdot e^{i\varphi}$

$$z^n = r^n \cdot e^{i\varphi n} = |b| \cdot e^{i\beta}$$

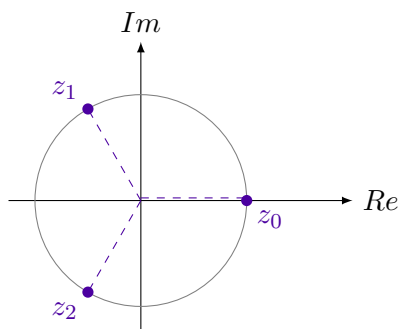
Zwei Gleichungen stimmen überein, wenn jeweils der **Betrag** gleich und **Winkel** bis auf ein vielfaches von π gleich ist.

1.) $r^n = |b| \leadsto r = \sqrt[n]{|b|}$

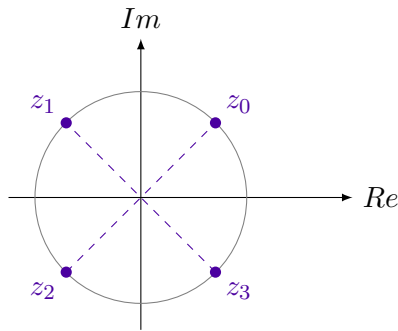
2.) $\varphi \cdot n = \beta + k \cdot 360^\circ \quad (k \in \mathbb{Z})$
 $\leadsto \varphi = \frac{\beta + k \cdot 360^\circ}{n} \quad (\text{nur } n \text{ verschiedene Argumente})$

Beispiele:

a.) $z^3 = 1 = 1 \cdot e^{i \cdot 0}$
 $z_k = 1^{\frac{1}{3}} \cdot e^{i \frac{0 + k \cdot 2\pi}{3}} \quad (k = 0, 1, 2)$
 $z_0 = e^{i \cdot 0} = \underline{\underline{1}}$
 $z_1 = e^{\frac{2}{3}\pi} = \cos\left(\frac{2}{3}\pi\right) + i \sin\left(\frac{2}{3}\pi\right) = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{3}i$
 $z_2 = e^{i \frac{4}{3}\pi} = \cos\left(\frac{4}{3}\pi\right) + i \sin\left(\frac{4}{3}\pi\right) = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{3}i$

Allgemein: Lösungen der Gleichung $z^n = b$ teilen Kreis mit Radius $\sqrt[n]{|b|}$ um 0 in n gleiche Teile.


b.) $z^4 = -16 = 16 \cdot e^{i \cdot \pi}$
 $z_k = 2 \cdot e^{i \frac{\pi + k \cdot 2\pi}{4}} \quad (k = 0, 1, 2, 3, 4)$
 $z_0 = 2 \cdot e^{i \frac{\pi}{4}} = \underline{\underline{\sqrt{2} + \sqrt{2}i}}$
 $z_1 = 2 \cdot e^{i \frac{3\pi}{4}} = \underline{\underline{-\sqrt{2} + \sqrt{2}i}}$
 $z_2 = 2 \cdot e^{-i \frac{3\pi}{4}} = \underline{\underline{-\sqrt{2} - \sqrt{2}i}}$
 $z_3 = 2 \cdot e^{-i \frac{\pi}{4}} = \underline{\underline{\sqrt{2} - \sqrt{2}i}}$



Anwendung:

Faktorisierung des Polynoms $p(x) = x^4 + 16$

$$\begin{aligned} x^4 + 16 &= (x - z_0) \cdot (x - z_1) \cdot (x - z_2) \cdot (x - z_3) \\ &= (x - \sqrt{2} - \sqrt{2}i) \cdot (x - \sqrt{2} + \sqrt{2}i) \cdot (x + \sqrt{2} - \sqrt{2}i) \cdot (x + \sqrt{2} + \sqrt{2}i) \\ &= (x^2 - 2\sqrt{2}x + 4)(x^2 + 2\sqrt{2}x + 4) \end{aligned}$$

3.4.4. Anwendung im Wechselstromkreis

1.) Spule:

Stromstärke $I = I_m \cdot (\cos(\omega t) + i \sin(\omega t))$

Spannung $U = \omega \cdot L \cdot I_m \cdot (\cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) + i \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}))$

(formale Ergänzung zu komplexer Größe)

$$\hookrightarrow I = I_m \cdot e^{i\omega t}, U = I_m \cdot \omega \cdot L \cdot e^{i(\omega t + \frac{\pi}{2})} = \underbrace{I_m \cdot \omega \cdot L}_{I \cdot \omega \cdot L} \cdot \underbrace{e^{i\frac{\pi}{2}}}_i$$

$$R = \frac{U}{I} \hookrightarrow \boxed{R_L = \omega \cdot L \cdot i} \text{ (induktiver Widerstand)}$$

2.) Kondensator:

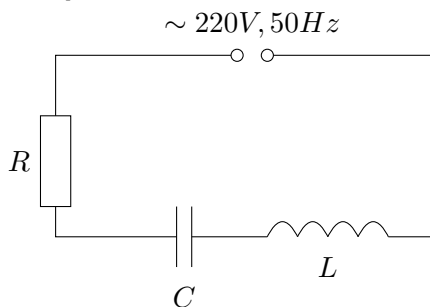
$$\boxed{R_C = \frac{1}{\omega \cdot C \cdot i}} \text{ (kapazitiver Widerstand)}$$

Bezeichnung in E-Technik:

$$Z := R_{ges} = R + i \cdot X$$

Wirkwiderstand R , Blindwiderstand X , Scheinwiderstand $|Z|$, Leitwert $Y = \frac{1}{Z}$

Bsp. 22:



$$R = 100\Omega, C = 20\mu F = 20 \cdot 10^{-6} \frac{As}{V}, L = 1H = 1 \frac{Vs}{A}, \omega = 2\pi \cdot \underbrace{50}_{f} \frac{1}{s}$$

Gesucht ist der Gesamtwiderstand Z .

$$Z = R + R_C + R_L = R + i\omega L + \frac{1}{i\omega C} = R + i(\omega L - \frac{1}{\omega C})$$

$$Z = (100 + 155,04i)\Omega = 184,44 \cdot e^{i \cdot 57,17^\circ} \Omega$$

↷

Wirkwiderstand: $Re(Z) = 100\Omega$

Blindwiderstand: $Im(Z) = 155,04\Omega$

Scheinwiderstand: $|Z| = 184,44\Omega$

Phasenverschiebung: $Arg(Z) = 57,17^\circ$

4. Reellwertige Funktionen einer reellen Veränderlichen

4.1. Elementare Funktionen (Teil 1)

4.1.1. Polynome

Def. 1:

$y = f(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_2 x^2 + a_1 x + a_0$ mit $(a_0, \dots, a_n \in \mathbb{R}, x \in \mathbb{R})$ heißt ganze rationale Funktion oder *Polynom* vom Grad n (falls $a_n \neq 0$).

Zur Beschreibung der Funktionswerte zweckmäßig: HORNER-Schema (vgl. Stellenwertsysteme 3.3.1)

	a_n	a_{n-1}	a_{n-2}	\dots	a_1	a_0
x_0		$b_{n-1} \cdot x_0$	$b_{n-2} \cdot x_0$	\dots	$b_1 \cdot x_0$	$b_0 \cdot x_0$
	$\boxed{b_{n-1}}$	$\boxed{b_{n-2}}$	$\boxed{b_{n-3}}$	\dots	$\boxed{b_0}$	$f(x_0) = r_0$
	$\underbrace{\hspace{1cm}}_{=a_n}$					

Polynomdivision: $\frac{f(x)}{x - x_0} = b_{n-1} x^{n-1} + b_{n-2} x^{n-2} + \dots + b_1 x + b_0 + \frac{r_0}{x - x_0}$

Bsp. 1:

$f(x) = x^5 - 2x^3 + x^2 - 6, \quad x_0 = 3, \quad \text{ges: } f(x_0), \quad \frac{f(x)}{x - x_0}$

	1	0	-2	1	0	-6
$x_0 = 3$		3	9	21	66	198
	1	3	7	22	66	192

$f(x) : (x - 3) = x^4 + 3x^3 + 7x^2 + 22x + 66 + \frac{192}{x - 3}$

Satz 1:

Es sei $f(x) = p_n(x) = a_n x^n + \dots + a_0$ ein Polynom vom Grad n (d.h. $a_n \neq 0$). Dann besitzt f (in \mathbb{C}) genau n Nullstellen x_1, \dots, x_n und es gilt: $f(x) = a_n(x - x_1) \cdot (x - x_2) \cdot \dots \cdot (x - x_n)$. (Zerlegung in Linearfaktoren)

Diskussion:

- 1.) Falls in der Linearfaktorzerlegung der Faktor $(x - x_0)$ genau k -mal ($1 \leq k \leq n$) vorkommt, so heißt x_0 *k-fache Nullstelle* (Nullstelle der Vielfachheit k).
- 2.) Nichtreelle Nullstellen sind möglich, sie treten stets paarweise als konjugiert komplexe Zahlen auf $(x_0, \overline{x_0})$. In diesem Falle Zusammenfassung der Linearfaktoren zu reellen quadratischen Faktoren möglich: $(x - x_0) \cdot (x - \overline{x_0}) = x^2 - (x_0 + \overline{x_0})x + x_0 \cdot \overline{x_0} = x^2 - 2 \cdot Re(x_0) \cdot x + |x_0|^2$

- 3.) Falls a_0, a_1, \dots, a_n ganze Zahlen sind, dann sind ganzzahlige Nullstellen Teiler von a_0 (falls vorhanden).
- 4.) Allgemeine Methoden zur Nullstellenbestimmung später (Kap. 3 3.1)

Bsp. 2:

$$p(x) = x^4 + x^3 - 5x^2 + x - 6, \quad \text{ges: Nullstellen}$$

Durch Probieren $x_1 = 2$

mit HORNER-Schema:

	1	1	-5	1	-6	
$x_1 = 2$		2	6	2	6	
	1	3	1	3	0	$\leadsto p(x) = (x-2) \cdot \underbrace{(x^3 + 3x^2 + x + 3)}_{\text{durch Probieren } x_2 = -3}$
$x_2 = -3$		-3	0	-3		
	1	0	1	0		$\leadsto p(x) = (x-2)(x+3) \underbrace{(x^2 + 1)}_{x_{3,4} = \pm i}$

$$\leadsto \text{Zerlegung: } p(x) = (x-2)(x+3)(x-i)(x+i)$$

4.1.2. Gebrochen rationale Funktionen

Def. 2:

$y = f(x) = \frac{p(x)}{q(x)} = \frac{a_m x^m + a_{m-1} x^{m-1} + \dots + a_1 x + a_0}{b_n x^n + b_{n-1} x^{n-1} + \dots + b_1 x + b_0}$ mit $a_m \neq 0, b_n \neq 0$ und $Db(f) = \{x \in \mathbb{R} \mid q(x) \neq 0\}$ heißt gebrochenrationale Funktion. f heißt *echt gebrochen*, falls $m < n$ und *unecht gebrochen*, falls $m \geq n$.

Diskussion:

- Wir nehmen ohne Beschränkung der Allgemeinheit an, dass Zähler- und Nennerpolynom keine gemeinsamen Nullstellen besitzen (ansonsten: Kürzen gemeinsamer Linearfaktoren von Zähler und Nenner [unter Beachtung des Definitionsbereichs])
- Die Nullstellen des Nennerpolynoms heißen *Polstellen* der gebrochen rationalen Funktion (bei Polstelle $x_P: |f(x)| \rightarrow \infty$ für $x \rightarrow x_P$).
- Die Nullstellen des Zählerpolynoms sind die Nullstellen von f .
- Verhalten von $f(x)$ bei k -facher reeller Nullstelle oder Polstelle:
Vorzeichenwechsel $\Leftrightarrow k$ ungerade

- Polynomdivision $p(x) : q(x) = \underbrace{s(x)}_{\text{Polynom}} + \underbrace{\frac{r(x)}{q(x)}}_{\text{echt gebrochen}}$
 $y = a(x)$ ist die sogenannte Asymptote

Bsp. 3:

$$y = \frac{x^3 + 2x^2}{x^2 - x - 2} = \frac{x^2(x+2)}{(x+1)(x-2)} = x + 3 + \frac{5x+6}{x^2 - x - 2}$$

Daraus lassen sich leicht erste Werte der Kurvendiskussion ableiten:

- Nullstellen: $x_{1,2} = 0$ (doppelt), $x_3 = -2$

- Polstellen: $x = -1$, $x = 2$ (einfach \Rightarrow Vorzeichenwechsel)
- Asymptote: $y = x + 3$
Schnittstellen und Asymptoten: $5x + 6 = 0 \leadsto x = -1, 2$

4.1.3. Trigonometrische Funktion

Übliche Definition der trigonometrische Funktionen (Kreisfunktionen wie $\sin()$ $\cos()$ usw.):

Def. 3:

Eine Funktion $y = f(x)$ heißt periodisch, wenn es eine Zahl $p > 0$ gibt mit $f(x) = f(x+p)$ (für alle $x \in Db(f)$). Die kleinste positive Zahl p mit dieser Eigenschaft heißt Periode f .

Def. 4: (Symmetrieeigenschaft)

Eine Funktion $y = f(x)$ heißt:

- 1.) gerade (symmetrische zur y-Achse), wenn $f(-x) = f(x)$ für alle $x \in Db(f)$ gilt.
- 2.) ungerade (punktsymmetrisch zum Ursprung), wenn $f(-x) = -f(x)$ für alle $x \in Db(f)$ gilt.

Diskussion:

	Funktion	Db	Periode	Symmetrie
Einige Funktionen	$\sin x$	\mathbb{R}	2π	ungerade
	$\cos x$	\mathbb{R}	2π	gerade
	$\tan x$	$\mathbb{R} \setminus \left\{ \frac{\pi}{2} + k\pi k \in \mathbb{Z} \right\}$	π	ungerade
	$\cot x$	$\mathbb{R} \setminus \{k\pi k \in \mathbb{Z}\}$	π	ungerade

Einige wichtige Formeln:

- $\sin^2 x + \cos^2 x = 1$
- $\tan x = \frac{\sin x}{\cos x}$
- $\cot x = \frac{1}{\tan x}$
- $\sin 2x = 2 \sin x \cos x$
- $\cos 2x = 2 \cos^2 x - 1 = 1 - 2 \sin^2 x$

4.1.4. Exponentialfunktion

$y = f(x) = a$ ($a > 0, x \in \mathbb{R}$)

- Wichtig: Potenzgesetze, z.B. $a^{x_1} \cdot a^{x_2} = a^{x_1+x_2}$ usw.
- Besondere Bedeutung besitzt die Funktion $y = e^x$ ($x \in \mathbb{R}$ mit $e = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = 2,7182\dots$)

4.1.5. Hyperbelfunktion

Def. 5: Hyperbolicus

- $y = \cosh x := \frac{1}{2}(e^x + e^{-x}) \quad (x \in \mathbb{R})$
- $y = \sinh x := \frac{1}{2}(e^x - e^{-x}) \quad (x \in \mathbb{R})$
- $y = \tanh x := \frac{\sinh x}{\cosh x} \quad (x \in \mathbb{R})$
- $y = \coth x := \frac{1}{\tanh x} \quad (x \neq 0)$

Wichtig: $\cosh^2 x - \sinh^2 x = 1$

Fourier: $y = \cosh x$ ist gerade, alle anderen Hyperbelfunktionen ungerade.

4.2. Umkehrfunktionen

- Zur Erinnerung: $y = f(x), x \in Db(f)$ heißt injektiv (umkehrbar eindeutig), wenn es zu jedem Bild $y \in Wb(f)$ genau ein Urbild $x \in Db(f)$ mit $y = f(x)$ gibt. D.h.:

$$\underbrace{y}_{\in Wb(f)} \rightarrow \underbrace{x}_{\in Db(f)} =: f^{-1}(y)$$

Die dadurch erklärte Funktion f^{-1} („f oben -1“) ist die Umkehrfunktion von f .

Es gilt: $Db(f^{-1}) = Wb(f)$, $Wb(f^{-1}) = Db(f)$

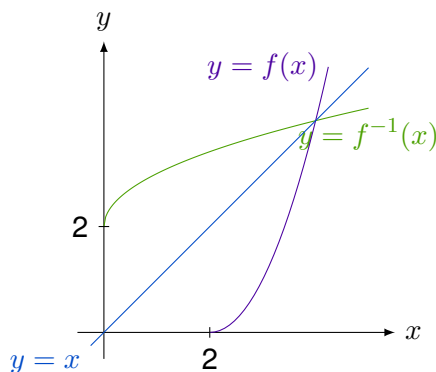
- Bilden der Umkehrfunktion zu $y = f(x), x \in Db(f)$:
 - 1.) Auflösen der Funktionsgleichung nach x : $x =: f^{-1}(y)$ (falls dies eindeutig möglich ist, andernfalls existiert f^{-1} nicht!)
 - 2.) Oft erfolgt anschließend eine Vertauschung von x und y :
 $y = f^{-1}(x), x \in Db(f^{-1}) = Wb(f)$.
 Vertauschung entspricht geometrisch Spiegelung an der Geraden $x = y$, vgl. Bsp. 4.

Bsp. 4:

$$y = f(x) = \sqrt{x} + 2, \quad x \in [0, \infty)$$

$$1.) \text{ Auflösen nach } x: y - 2 = \sqrt{x} \Rightarrow x = (y - 2)^2 = f^{-1}(y)$$

$$2.) \text{ Vertauschen von } x \text{ und } y: y = f^{-1}(x) = (x - 2)^2, Db(f^{-1}) = Wb(f) = [2, \infty)$$



! $Db(f^{-1})$ nur $[2, \infty)$, obwohl $(x - 2)^2$ für alle $x \in \mathbb{R}$ erklärt ist.

Def. 6:

Die reellwertige Fkt. $y = f(x)$ heißt

- streng monoton wachsend*, falls $x_1 < x_2 \Rightarrow f(x_1) < f(x_2)$ gilt.
- monoton wachsend* (=nicht fallend), falls $x_1 < x_2 \Rightarrow f(x_1) \leq f(x_2)$ gilt für alle $x_1, x_2 \in Db(f)$.
- Analog: *Streng monoton fallend* bzw *monoton fallend* (=nicht wachsend).

Satz 2:

f streng monoton $\Rightarrow f$ ist injektiv (d.h. f^{-1} existiert)

4.3. Elementare Funktionen (Teil 2)
4.3.1. Wurzel- und Logarithmusfunktionen
Def. 7:

$y = x^{\frac{1}{n}} = \sqrt[n]{x}$ ($x \in [0, \infty), n \in \mathbb{N}^*$) ist die Umkehrfunktion zu $y = x^n$ ($x \in [0, \infty)$)

Diskussion:

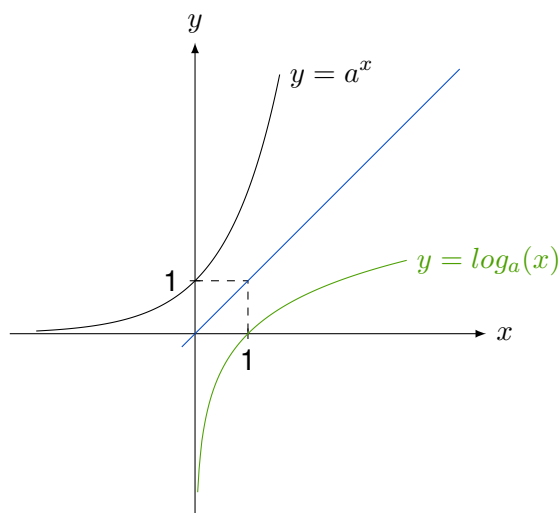
- Im Bereich der reellen Zahlen ist $\sqrt[n]{x}$ nur für $x \geq 0$ erklärt, der Funktionswert ist selber nicht negativ.
- Lässt man in $x^{\frac{1}{3}}$ negative x zu (etwa $\sqrt[3]{-8} = -2$), so ergeben sich Widersprüche:
z.B.: $\sqrt[3]{-8} = -2 \Rightarrow -2 = -8^{\frac{1}{3}} = (-8)^{\frac{2}{6}} = ((-8)^2)^{\frac{1}{6}} = 64^{\frac{1}{6}} = 2$
- Es gilt $\sqrt{x^2} = |x|$ für alle $x \in \mathbb{R}$

Def. 8:

$y = \log_a(x)$ ($a > 0 \wedge a \neq 1, x \in (0, \infty)$) ist Umkehrfunktion zu $y = a^x$ ($x \in \mathbb{R}$).

Speziell:

- $lg(x) := \log_{10}(x)$
- $ln(x) := \log_e(x)$



Diskussion:

1.) Log-Gesetze:

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

$$\log_a\left(\frac{x}{y}\right) = \log_a x - \log_a y$$

$$\log_a(x^\alpha) = \alpha \log_a x$$

$$\log_c b = \frac{\log_a b}{\log_a c}$$

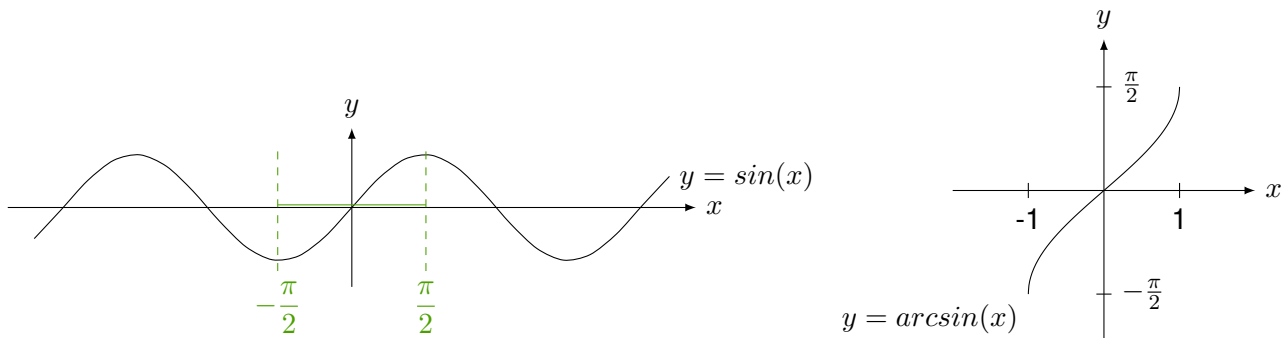
2.) Es gilt $x = a^{\log_a x}$ ($f(f^{-1}(x)) = x \forall y \in Db(f^{-1})$)

3.) Ferner gilt $a^x = e^{\ln(a^x)} = e^{x \cdot \ln a}$

4.3.2. Arcusfunktionen

Vorbetrachtung: $y = f(x) = \sin x (x \in \mathbb{R})$ ist nicht injektiv, also existiert keine Umkehrfunktion.

Aber: $y = \sin(x)$, eingeschränkt auf z.B. $\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$ ist injektiv und damit umkehrbar.



Def. 9:

Umkehrfunktionen

	Db	Wb	Umkehrfunktion von ...	
$y = \arcsin x$	$[-1, 1]$	$\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$	$y = \sin x$	$-\frac{\pi}{2} \leq x \leq \frac{\pi}{2}$
$y = \arccos x$	$[-1, 1]$	$[0, \pi]$	$y = \cos x$	$0 \leq x \leq \pi$
$y = \arctan x$	\mathbb{R}	$\left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$	$y = \tan x$	$-\frac{\pi}{2} < x < \frac{\pi}{2}$
$y = \operatorname{arccot} x$	\mathbb{R}	$(0, \pi)$	$y = \cot x$	$0 < x < \pi$

Bsp. 5:

Gesucht sind alle Lösungen der folgenden Gleichung: $\tan(2x) = y$

Es sei $2x \in \left(-\frac{\pi}{2} + k \cdot \pi, \frac{\pi}{2} + k \cdot \pi\right)$, mit $k \in \mathbb{Z}$.

$$y = \tan(2x) = \tan(2x - k \cdot \pi) \text{ mit } 2x - k\pi \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$$

$$\Rightarrow 2x - k\pi = \arctan(y) \Rightarrow x = \frac{\arctan(y) + k\pi}{2}$$

4.3.3. Areafunktionen

Def. 10:

Die Umkehrfunktionen der Hyperbelfunktionen

	Db	Wb	Umkehrfunktion von ...
$y = \operatorname{arsinh} x$	\mathbb{R}	\mathbb{R}	$y = \sinh x \quad x \in \mathbb{R}$
$y = \operatorname{arcosh} x$	$[1, \infty)$	$[0, \infty)$	$y = \cosh x \quad x \geq 0$
$y = \operatorname{artanh} x$	$(-1, 1)$	\mathbb{R}	$y = \tanh x \quad x \in \mathbb{R}$
$y = \operatorname{arcoth} x$	$\mathbb{R} \setminus [-1, 1]$	$\mathbb{R} \setminus \{0\}$	$y = \coth x \quad x \neq 0$

Aus der Def. der Hyperbelfunktionen (Def. 5) folgt:

$$\operatorname{arsinh} x = \ln(x + \sqrt{x^2 + 1})$$

$$\operatorname{artanh} x = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+x}{1-x} \right)$$

$$\operatorname{arcosh} x = \ln(x + \sqrt{x^2 - 1})$$

$$\operatorname{arcoth} x = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{x+1}{x-1} \right)$$

5. Lineare Algebra

5.1. Vektorräume

Begriff:

- 1.) Gegeben seien ein Körper $(K, +, \cdot)$, dessen Elemente *Skalare* heißen (meist $(\mathbb{R}, +, \cdot)$) und eine ABELSche Gruppe (V, \oplus) ($V \dots$ Menge, Elemente heißen Vektoren, $\oplus \dots$ Vektoraddition).
- 2.) Es gibt eine Abbildung \odot von $K \times V$ in V die jedem $x \in V$ und jedem $\lambda \in K$ ein Element $\lambda \odot x$ in V mit folgenden Eigenschaften zuordnet.

- Distributivgesetze:

$$(\lambda + \mu) \odot x = (\lambda \odot x) \oplus (\mu \odot x)$$

$$\lambda \odot (x \oplus y) = (\lambda \odot x) \oplus (\lambda \odot y)$$

- Assoziativgesetz:

$$(\lambda \cdot \mu) \odot x = \lambda \odot (\mu \odot x)$$

- Neutrales Element:

$$1 \odot x = x$$

(für alle $\lambda, \mu \in K$ und $x, y \in V$)

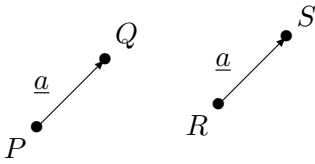
Eine Menge V mit den in 1.) und 2.) aufgeführten Operationen \oplus und \odot heißt *Vektorraum* (VR) über K .

Bemerkung: Schreibweise meist $+$ anstelle von \oplus und \cdot anstelle von \odot (ergibt sich aus Zusammenhang der Elemente).

Bsp. 1:

Skalarbereich \mathbb{R} .

Vektoren: Größen, die durch eine Zahlenangabe (Länge) und eine Richtung charakterisiert sind (z.B. Kräfte, Geschwindigkeiten, Translatimen).

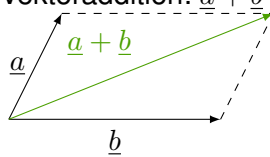


Pfeile als Repräsentanten eines Vektors \underline{a} .

Bezeichnung: $\underline{a} = \vec{a} = \overrightarrow{PQ} = \overrightarrow{RS}$

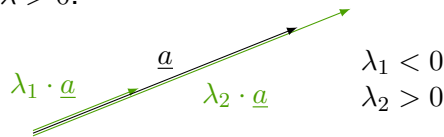
Ortskurven: Angeheftet in gemeinsamen Anfangspunkt O (Ursprung).

- Vektoraddition: $\underline{a} + \underline{b}$

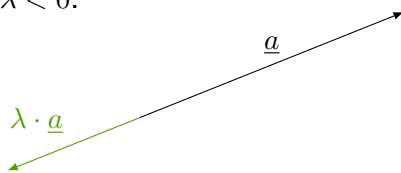


- Multiplikation mit Skalar: $\lambda \cdot \underline{a}$:

$\lambda > 0$:

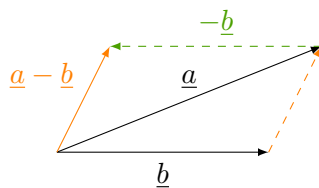


$\lambda < 0$:



Länge von $\lambda \cdot \underline{a}$ ist das $|\lambda|$ -fache der Länge von \underline{a} .

- Subtraktion: $\underline{a} - \underline{b} = \underline{a} + (-\underline{b}) = \underline{a} + ((-1) \cdot \underline{b})$



- Nullvektor: $\underline{0}$ (Länge 0, keine Richtung)

Bsp. 2:

$$K = \mathbb{R}, V = \left\{ \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}, x_1, x_2, \dots, x_n \in \mathbb{R} \right\}$$

$$\text{Vektoraddition: } \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 + y_1 \\ x_2 + y_2 \\ \vdots \\ x_n + y_n \end{pmatrix}$$

Multiplikation mit Skalar: $\lambda \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda \cdot x_1 \\ \lambda \cdot x_2 \\ \dots \\ \lambda \cdot x_n \end{pmatrix}$

$\hookrightarrow V$ Vektorraum über \mathbb{R} , Bezeichnung: \mathbb{R}^n , Nullvektor $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix}$

Def. 1:

Die Vektoren $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n$ heißen *linear unabhängig*, wenn die Gleichung $x_1 \underline{a}_1 + \dots + x_n \underline{a}_n = \underline{0}$ nur die triviale Lösung $x_1 = x_2 = \dots = x_n = 0$ besitzt.

Diskussion:

- 1.) $x_1 \underline{a}_1 + \dots + x_n \underline{a}_n$ heißt *Linearkombination* (LK) der Vektoren $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n$.
- 2.) Falls es eine Darstellung der Gestalt wie in Def. 1 gibt, in der nicht alle x_i gleich 0 sind, so heißen $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n$ *linear unabhängig*.
In diesem Falle lässt sich (wenigstens) einer der Vektoren als LK der anderen darstellen.

Def. 2:

Es sei $V_1 \subseteq V$ eine nichtleere Teilmenge von V . Wir bezeichnen mit $L(V_1)$ die Menge *aller* LK von jeweils endlich vielen Vektoren aus V_1 . $L(V_1)$ ist die sogenannte *lineare Hülle* von V_1 .

Bemerkung:

$L(V_1)$ ist selbst ein Vektorraum, nämlich der von V_1 aufgespannte Teilraum von V (kleinster VR, welcher V_1 enthält).

Def. 3:

- Ein Vektorraum V heißt *n-dimensional*, wenn es n linear unabhängige Vektoren $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n$ gibt, die den gesamten Raum aufspannen ($L(\{\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n\}) = L(\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n) = V$).
- Die Menge der Vektoren $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n$ nennt man in diesem Falle eine *Basis* von V .

Diskussion:

In einem Vektorraum gibt es unterschiedliche Basen, jedoch ist die Anzahl der Vektoren, die eine Basis bilden, stets gleich (Dimension des VR).

Satz 1:

Es sei $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n$ eine Basis des VRs V . Dann gibt es für *jedes* $\underline{x} \in V$ eine *eindeutige* Darstellung der Gestalt $\underline{x} = x_1 \underline{a}_1 + \dots + x_n \underline{a}_n$.

Bemerkung:

- Die Koeffizienten x_1, \dots, x_n heißen *Koordinaten* von \underline{x} bezüglich der Basis $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n$.
- Die Summanden $x_1 \underline{a}_1, \dots, x_n \underline{a}_n$ heißen *Komponenten* von \underline{x} bezüglich der Basis $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n$.

Bsp. 3:

Die Vektoren $\underline{e}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix}, \underline{e}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix}, \dots, \underline{e}_N = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 1 \end{pmatrix}$ des Raumes \mathbb{R}^n bilden offensichtlich eine Basis von \mathbb{R}^n .

$\hookrightarrow \underline{e}_1, \dots, \underline{e}_n$ sind linear unabhängig. Ferner gilt für beliebiges $\underline{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_n \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n$: $\underline{x} = x_1 \cdot \underline{e}_1 + \dots + x_n \cdot \underline{e}_n$.

Bsp. 4:

Zwei Vektoren $\underline{a}_1 \neq \underline{0}$ und $\underline{a}_2 \neq \underline{0}$ in einer Ebene bilden genau dann eine Basis, wenn sie nicht parallel sind.

5.2. Matrizen

Def. 4:

Ein aus $m \cdot n$ Zahlen $a_{ij} \in \mathbb{R}$, welche in m Zeilen und n Spalten angeordnet sind, bestehendes Schema heißt *Matrix vom Typ (m, n)* .

$$\underline{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} = (a_{ij})_{\substack{i=1, \dots, m \text{ (Zeilenindex)} \\ j=1, \dots, n \text{ (Spaltenindex)}}}$$

Def. 5 Rechenoperationen

1.) $\underline{A} = (a_{ij}), \underline{B} = (b_{ij})$ seien vom gleichen Typ (m, n) .

$$\underline{A} + \underline{B} := (a_{ij} + b_{ij}) \quad \text{Addition von Matrizen}$$

2.) Sei $\lambda \in \mathbb{R}$ und $\underline{A} = (a_{ij})$ vom Typ (m, n) .

$$\lambda \cdot \underline{A} = (\lambda \cdot a_{ij}) \quad \text{Multiplikation einer Matrix mit einem Skalar}$$

3.) $\underline{A} = (a_{ij})$ sei vom Typ (m, n)

$\underline{B} = (b_{ij})$ sei vom Typ (n, p)

\underline{A} und \underline{B} heißen in dieser Reihenfolge *verkettet* (Spaltenzahl von \underline{A} = Zeilenzahl von \underline{B}).

$$\underline{A} \cdot \underline{B} = \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot b_{jk} \right)_{\substack{i=1, \dots, m \\ k=1, \dots, p}} \quad \text{Matrizenmultiplikation}$$

Das Produkt ist also vom Typ (m, p) .

Diskussion:

Zweckmäßig FALK-Schema zur Matrizenmultiplikation (vgl. folgendes Bsp. 5).

Def. 6

Die aus der (m, n) -Matrix \underline{A} durch Vertauschung von Zeilen und Spalten entstehende (n, m) -Matrix heißt *Transformierte* von \underline{A} . Bezeichnung: \underline{A}^T .

Bsp. 5:

$$\underline{A} = \begin{pmatrix} 5 & -3 \\ 1 & 4 \end{pmatrix}, \underline{B} = \begin{pmatrix} 3 & 6 & 4 \\ -2 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \underline{C} = \begin{pmatrix} -1 & 5 \\ 0 & 3 \end{pmatrix}$$

a.) $\underline{A} + \underline{B}$ existiert nicht (unterschiedliche Typen).

b.) $\underline{A} + \underline{C} = \begin{pmatrix} 4 & 2 \\ 1 & 7 \end{pmatrix}$

c.) $2 \cdot \underline{A} = \begin{pmatrix} 10 & -6 \\ 2 & 8 \end{pmatrix}$

d.) $\underline{B}^T = \begin{pmatrix} 3 & -2 \\ 6 & 0 \\ 4 & 1 \end{pmatrix}$

e.) $\underline{B} \cdot \underline{A}$ existiert nicht ((2, 3) und (2, 2) nicht verkettet)

f.) $\underline{A} \cdot \underline{B} = \begin{pmatrix} 21 & 30 & 17 \\ -5 & 6 & 8 \end{pmatrix}$

(mit FALK-Schema:)

		3	6	4
		-2	0	1
5	-3	21	30	17
1	4	-5	6	8

Bemerkung: Die Matrizenmultiplikation ist nicht kommutativ!

Diskussion: (ausgewählte Rechenregeln)

1.) Die Menge der Matrizen vom gleichen Typ bilden mit den Operationen Addition und Multiplikation mit einem Skalar einen Vektorraum.

Bsp: $V = \{\text{Matrizen vom Typ } (2, 2)\}$

Basis: $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$

2.) Falls die entsprechenden Typvoraussetzungen erfüllt sind, gelten:

- $(\underline{A} \cdot \underline{B}) \cdot \underline{C} = \underline{A} \cdot (\underline{B} \cdot \underline{C})$ (Assoziativgesetz)
- $(\underline{A} \cdot \underline{B}) + \underline{C} = \underline{A} \cdot \underline{B} + \underline{A} \cdot \underline{C}$
 $(\underline{A} + \underline{B}) \cdot \underline{C} = \underline{A} \cdot \underline{C} + \underline{B} \cdot \underline{C}$ (Distributivgesetze)
- $(\lambda \cdot \underline{A}) \cdot \underline{B} = \lambda \cdot (\underline{A} \cdot \underline{B}) = \underline{A} \cdot (\lambda \cdot \underline{B})$
- $(\lambda \cdot \underline{A})^T = \lambda \cdot \underline{A}^T \quad (\underline{A}^T)^T = \underline{A}$
- $(\underline{A} + \underline{B})^T = \underline{A}^T + \underline{B}^T \quad \boxed{(\underline{A} \cdot \underline{B})^T = \underline{B} \cdot \underline{A}^T}$

3.) Achtung: Im Allgemeinen gilt $\underline{A} \cdot \underline{B} \neq \underline{B} \cdot \underline{A}$!

4.) FALK-Schema bei fortgesetzter Multiplikation $\underline{A} \cdot \underline{BC}$

\underline{A}	\underline{B}	\underline{C}	oder	\underline{B}	\underline{C}	(2 Varianten, gemäß Assoziativgesetz)
\underline{A}	$\underline{A} \cdot \underline{B}$	$(\underline{A} \cdot \underline{B}) \cdot \underline{C}$		\underline{A}	$\underline{B} \cdot \underline{C}$	

Spezielle Matrizen

1.) Quadratische Matrizen: Typ (n, n)

Eine quadratische Matrix \underline{A} heißt

a) *symmetrisch*, wenn $\underline{A}^T = \underline{A}$ gilt.

b) obere *Dreiecksmatrix*, wenn $a_{ij} = 0$ für $i > j$.

untere *Dreiecksmatrix*, wenn $a_{ij} = 0$ für $i < j$.

c) *Diagonalmatrix*, wenn $a_{ij} = 0$ für $i \neq j$.

d) *Einheitsmatrix* \underline{E} , wenn $a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{für } i = j \\ 0 & \text{für } i \neq j \end{cases}$ (spezielle Diagonalmatrix).

$$\underline{E} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

2.) Nullmatrix $\underline{0}$ (sämtliche Elemente 0, nicht notwendig quadratisch).

3.) Matrizen vom Typ $(n, 1)$ (n Zeilen, eine Spalte) heißen (Spalten-)Vektoren.

$$\underline{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_n \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n \text{ (vgl. 5.1)}$$

Es ist $\underline{a}^T = (a_1 | a_2 | \dots | a_n) = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & \dots & a_n \end{pmatrix}$ vom Typ $(1, n)$ (Zeilenvektor).

Diskussion:

1.) Die quadratischen Matrizen vom Typ (n, n) bilden mit den Operationen Addition und Multiplikation von Matrizen einen (nicht kommutativen) Ring.

2.) Für quadratische Matrizen \underline{A} sind Potenzen bildbar:

$$\underline{A}^0 = \underline{E} \quad \underline{A}^n = \underbrace{\underline{A} \cdot \underline{A} \cdot \dots \cdot \underline{A}}_{n\text{-Faktoren}}, n \in \mathbb{N}$$

3.) Falls die entsprechenden Typvoraussetzungen erfüllt sind, gelten:

$$\underline{A} \cdot \underline{E} = \underline{A}$$

$$\underline{E} \cdot \underline{A} = \underline{A}$$

$$\underline{0} \cdot \underline{A} = \underline{0}$$

$$\underline{A} \cdot \underline{0} = \underline{0}$$

$$\underline{A} + \underline{0} = \underline{A}$$

$$\underline{0} + \underline{A} = \underline{A}$$

(analog 0 und 1 bei den reellen Zahlen)

4.) Sei \underline{A} vom Typ (m, n) , $x \in \mathbb{R}^n$, d.h. vom Typ $(n, 1)$.

Dann ist $\underline{y} = \underline{A} \cdot \underline{x}$ vom Typ $(m, 1)$.

Durch die Zuordnung $\underline{x} \mapsto \underline{A} \cdot \underline{x} = \underline{y}$ wird eine *lineare Abbildung* von \mathbb{R}^n in \mathbb{R}^m beschrieben (Fkt. f heißt linear, wenn gilt $f(x+y) = f(x) + f(y)$ und $f(\alpha \cdot x) = \alpha \cdot f(x)$ für alle $\alpha \in \mathbb{R}$, $x, y \in \text{Db}(f)$ gilt).

5.3. Determinanten

Def. 7:

Jeder n -reihigen quadratischen Matrix ist eindeutig eine Zahl $\det \underline{A}$, die sogenannte *Determinante* von \underline{A} , wie folgt zugeordnet.

$$n = 1: \det((a_{11})) := a_{11}$$

$$n \geq 2: \det \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \dots & & \dots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} := a_{11}A_{11} + a_{12}A_{12} + \dots + a_{1n}A_{1n}.$$

Dabei ist $A_{ij} = (-1)^{i+j} \det U_{ij}$ die *Adjunkte* des Elements a_{ij} .

U_{ij} ist die $(n-1)$ -reihige (*Unter-*)*Matrix*, die durch Streichen der i -ten Zeile und der j -ten Spalte von \underline{A} entsteht.

$$\text{Bezeichnung: } \det(\underline{A}) = \det \begin{pmatrix} \dots & \dots \\ \dots & \dots \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \dots & & \dots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{vmatrix}$$

Bsp. 6:

a.) $n = 2$:

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} \\ = a_{11}A_{11} + a_{12}A_{12} = a_{11} \cdot (-1)^{1+1} \cdot a_{22} + a_{12} \cdot (-1)^{1+2} \cdot a_{21} \\ = \underline{\underline{a_{11} \cdot a_{22} - a_{12} \cdot a_{21}}}$$

b.) $n = 3$:

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} \\ = a_{11}A_{11} + a_{12}A_{12} + a_{13}A_{13} \\ = a_{11} \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} - a_{12} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{23} \\ a_{31} & a_{33} \end{vmatrix} + a_{13} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{vmatrix} \\ = a_{11}a_{22}a_{33} + a_{12}a_{23}a_{31} + a_{13}a_{21}a_{32} - (a_{13}a_{22}a_{31} + a_{11}a_{23}a_{32} + a_{12}a_{21}a_{33})$$

(Alternativ auch: Regel von SARRUS [diese gilt NUR für 3-reihige Determinanten] \Rightarrow (Summe der Produkte der Diagonalen nach rechts unten)-(Summe der Produkte der Diagonalen nach links unten))

Satz 2:

$$\text{a.) } \det(\underline{A} \cdot \underline{B}) = \det(\underline{A}) \cdot \det(\underline{B})$$

$$\text{b.) } \det(\underline{A}) = \det(\underline{A}^T)$$

Wegen Satz 2b gelten für alle folgenden, für die Zeilen formulierten Eigenschaften auch sinngemäß für die Spalten.

Satz 3: (Eigenschaften der Determinante)

(E1) \underline{B} gehe aus \underline{A} durch Vertauschen zweier Zeilen hervor, dann gilt $\det(\underline{B}) = -\det(\underline{A})$.

(E2) Es gilt $\det(\underline{A}) = 0$ falls zwei Zeilen elementweise proportional sind bzw. falls alle Elemente einer Zeile gleich 0 sind.

(E3) Es gilt
$$\begin{vmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \dots & & \dots \\ \lambda a_{i1} & \dots & \lambda a_{in} \\ \dots & & \dots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{vmatrix} = \lambda \begin{vmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \dots & & \dots \\ a_{i1} & \dots & a_{in} \\ \dots & & \dots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{vmatrix}$$
 (steht ein Faktor in einer Zeile einer Determinante, so kann er auch vorgezogen werden).

(E4) Der Wert einer Determinante ändert sich nicht, wenn das λ -fache einer Zeile elementweise zu einer anderen Zeile addiert wird.

(E5) $\det(\underline{A}) = \sum_{j=1}^n a_{ij} A_{ij}$ (Entwicklung nach i -ter Zeile, ($i = 1, \dots, n$))
 $\det(\underline{A}) = \sum_{i=1}^n a_{ij} A_{ij}$ (Entwicklung nach j -ten Spalte, ($j = 1, \dots, n$))
 \rightarrow Entwicklungssatz

Bsp. 7:

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 3 & -1 \\ -2 & 2 & -5 & -4 \\ -1 & 1 & -4 & 2 \\ 6 & 2 & -1 & 0 \end{vmatrix}$$

3. Spalte = Arbeitsspalte (bleibt unverändert)

Um in der untersten Spalte mehr Nullen zu erzeugen (mit Regel E4):

$$S_{1,neu} := S_1 + 6 \cdot S_3$$

$$S_{2,neu} := S_2 + 2 \cdot S_3$$

$$\Rightarrow \begin{vmatrix} 19 & 7 & 3 & -1 \\ -32 & -8 & -5 & -4 \\ -26 & -7 & -4 & 2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{vmatrix}$$

Nun kann mit der letzten Zeile relativ einfach die Determinante berechnet werden:

$$= (-1) \cdot (-1)^{4+3} \cdot \begin{vmatrix} 19 & 7 & -1 \\ -32 & -8 & -4 \\ -26 & -7 & 2 \end{vmatrix}$$

Auf gleiche Weise werden nun wieder in Zeilen Nullen erzeugt:

$$Z_{2,neu} := Z_2 - 4Z_1$$

$$Z_{3,neu} := Z_3 + 2Z_1$$

$$\Rightarrow \begin{vmatrix} 19 & 7 & 1 \\ -108 & -36 & 0 \\ 12 & 7 & 0 \end{vmatrix}$$

$$= (-1) \cdot (-1)^{1+3} \begin{vmatrix} -108 & -36 \\ 12 & 7 \end{vmatrix}$$

$$\stackrel{E3}{=} (-1) \cdot (-36) \cdot \begin{vmatrix} 3 & 1 \\ 12 & 7 \end{vmatrix} = 36 \cdot 9 = \underline{\underline{324}}$$

Prinzip: Nullen erzeugen mit (E4), dann mit Entwicklungssatz lösen (E5).

Anwendungen

1.) Vektorrechnung in \mathbb{R}^3 (vgl. später, Abschnitt 5.5)

2.) Gegeben sei ein lineares Gleichungssystem (n Gleichungen, n Unbekannte)

Matrixform $\boxed{\underline{A} \cdot \underline{x} = \underline{b}}$ mit $\underline{A} = (a_{ij})$, $\underline{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_n \end{pmatrix}$, $\underline{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ \dots \\ b_n \end{pmatrix}$. Diese Matrixform besitzt genau dann eine eindeutige Lösung \underline{x} , wenn $\det(\underline{A}) \neq 0$.

In diesem Falle gilt $\boxed{x_j = \frac{\det(\underline{B}_j)}{\det(\underline{A})}}$ ($j = 1, \dots, n$). Wobei \underline{B}_j aus \underline{A} hervorgeht, indem man die j -te Spalte durch \underline{b} ersetzt (*CRAMERSche Regel*, theoretische Bedeutung, praktisches Vorgehen zur Lösung der Matrixform vgl. folgenden Abschnitt).

5.4. Lineare Gleichungssysteme, Rang einer Matrix, Inverse

5.4.1. Das Austauschverfahren

Gegeben sei System von m linearen Funktionen mit den unabhängigen Veränderlichen x_1, \dots, x_n und den abhängigen Veränderlichen y_1, \dots, y_m .

$$y_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n + a_{10}$$

$$y_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n + a_{20}$$

...

$$y_m = a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n + a_{m0}$$

Bsp. 8:

Betrieb, in Abteilungen, n Produkte P_1, \dots, P_n :

a_{ij} ... Kosten pro Einheit von P_j die in Abteilung i entstehen.

a_{i0} ... Fixkosten in Abteilung i .

x_j ... produzierte Mengen von P_j .

y_i ... Gesamtkosten in Abteilung i .

Matrix-Schreibweise: $\underline{y} = \underline{A} \underline{x} + \underline{a}$ mit $\underline{A} = (a_{ij})_{\substack{i=1,\dots,m \\ j=1,\dots,n}}$, $\underline{a} = \begin{pmatrix} a_{01} \\ \dots \\ a_{0m} \end{pmatrix}$

Tabellenform:

	x_1	x_2	...	x_n	1	
y_1	a_{11}	a_{12}	...	a_{1n}	a_{10}	bzw. $\begin{array}{c cc} & x^T & 1 \\ \hline \underline{y} & \underline{A} & \underline{a} \end{array}$
y_2	a_{21}	a_{22}	...	a_{2n}	a_{20}	
...	...					
y_m	a_{m1}	a_{m2}	...	a_{mn}	a_{m0}	

Aufgaben:

1.) \underline{x} vorgegeben, \underline{y} ist zu berechnen (klar!).

2.) \underline{y} vorgegeben, \underline{x} zu berechnen (nicht immer lösbar, falls lösbar, nicht immer eindeutig lösbar).

Lösungsprinzip:

Man tausche so oft wie möglich y_r gegen x_s aus, Austauschschritt AS ($y_r \leftrightarrow x_s$) \rightarrow Austauschverfahren.

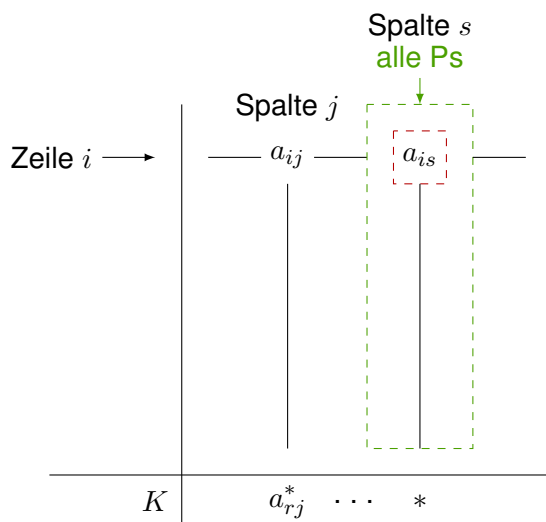
Austauschschritt $y_r \leftrightarrow x_s$ bedeutet:

- 1.) r -te Zeile $y_r = \dots$ nach x_s auflösen $x_s = \dots$
- 2.) in allen anderen Zeilen x_s durch die rechte Seite vom obigen x_s ersetzen.
 \hookrightarrow neue Tabelle

FOLIEN IM NETZ (Neumann)

Praktisches Vorgehen:

- 1.) Pivotelement (Pivot) kennzeichnen \circ
- 2.) Austauschregeln Austauschregel (AR) 1 bis AR 4 abarbeiten
Dabei für AR 4 unter der alten Tabelle die neue Pivotzeile (PZ) als Kellerzeile notieren.



$$a_{ij}^* = a_{ij} + a_{is} \cdot a_{rj}^* \text{ (Rechteckregel)}$$

Bsp. 8 (Fortsetzung)

$$y_1 = 2x_1 + 3x_2 + x_3 + 50 \text{ (Kosten in Abt. 1)}$$

$$y_2 = x_1 + 2x_3 + 40 \text{ (Kosten in Abt. 2)}$$

T_1	x_1	x_2	x_3	1	T_2	x_1	x_2	y_1	1	T_3	y_2	x_2	y_1	1
y_1	2	3	1	50	x_3	-2	-3	1	-50	x_3	$\frac{2}{3}$	1	$-\frac{1}{3}$	-10
y_2	1	0	2	40	y_2	-3	-6	2	-60	x_1	$-\frac{1}{3}$	-2	$\frac{2}{3}$	-20
K	-2	-3	*	-50	K	*	-2	$\frac{2}{3}$	-20					

d.h.:

$$x_3 = \frac{2}{3}y_2 + x_2 - \frac{1}{3}y_1 - 10$$

$$x_1 = -\frac{1}{3}y_2 - 2x_2 + \frac{2}{3}y_1 - 20$$

\hookrightarrow bei vorgegebenen Kosten y_1, y_2 ist die Lösung $\underline{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}$ nicht eindeutig bestimmbar.

z.B. $y_1 = 600, y_2 = 300$:

$$x_2 = t \text{ (frei wählbar)}$$

$$x_3 = \frac{2}{3} \cdot 300 + t - \frac{1}{3} \cdot 600 - 10 = t - 10$$

$$x_1 = -\frac{1}{3} \cdot 300 - 2t + \frac{2}{3} \cdot 600 - 20 = 280 - 2t$$

$$\Rightarrow \underline{x} = \begin{pmatrix} 280 - 2t \\ t \\ t - 10 \end{pmatrix}$$

hier für $x_i \geq 0$: $10 \leq t \leq 140$.

Varianten des Austauschverfahrens (AV)

- 1.) AVZ ... Austauschverfahren mit *Zeilentilgung*, d.h. neue PZ in neuer Tabelle weglassen.
- 2.) AVS ... Austauschverfahren mit *Spaltentilgung*, d.h. neue Pivotspalte in neuer Tabelle weglassen (nur anwendbar, wenn Variable über der weggelassenen Spalte = Null ist, siehe folgender Abschnitt).
- 3.) AVSZ ... AVZ+AVS gleichzeitig.

5.4.2. Lineare Gleichungssysteme

- Gegeben sei das lineare Gleichungssystem (m Gleichungen, n Unbekannte x_1, \dots, x_n)

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1$$

...

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n = b_m$$

- Gleichungssystem heißt *homogen*, falls $b_1 = \dots = b_m = 0$ gilt, sonst *unhomogen*.

- Matrixform $\underline{A}\underline{x} = \underline{b}$ mit $\underline{A} = (a_{ij})_{\substack{i=1,\dots,m \\ j=1,\dots,n}}$, $\underline{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_n \end{pmatrix}$, $\underline{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ \dots \\ b_m \end{pmatrix}$

- Äquivalente Form: $\underline{y} = \underline{A}\underline{x} - \underline{b} \cdot 1$ mit $\underline{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ \dots \\ y_m \end{pmatrix} = \underline{0} = \begin{pmatrix} 0 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix}$

Hilfsgrößen $y_1 = y_2 = \dots = y_m = 0$

- Tabellenform: $\begin{array}{c|cc} & \underline{x}^T & 1 \\ \hline \underline{y} & \underline{A} & \underline{b} \end{array}$

Lösungsprinzip:

Austauschverfahren, Variante AVS (da $y_i = 0$: Pivotspalte in neuer Tabelle weglassen!)

Fall 1:

Alle y_i sind austauschbar \Rightarrow Gleichungssystem ist lösbar, Lösung aus letzter Tabelle (TE) ablesbar.

z.B.:	TE	x_3	1	
	x_1	0	4	$\leadsto x_1 = 4$,
	x_2	2	-3	$x_2 = 2x_3 - 3$ (x_3 frei wählbar)

Fall 2:

Wenigstens ein y_i ist gegen kein x_j austauschbar.

		(evtl.) noch nicht ausgetauschte x_j		1
\curvearrowright Tabelle:	...			
	y_i	0...0...0		α
	...			

$\curvearrowright y_i = \alpha$

Fall 2a: $\alpha = 0$

Zeile y_i kann gestrichen werden ($0 = 0$).

Fall 2b: $\alpha \neq 0$

Gleichungssystem nicht lösbar (Widerspruch, da $y_i = 0$)

Das Verfahren endet also im Fall 2b (unlösbar) oder mit einer Tabelle, in der kein y_i mehr vorkommt (Fall 1 oder 2a).

TE	x_{S1}	x_{S2}	...	x_{Sq}	1
x_{r1}	...				
x_{r2}	...				
...					
x_{rp}	...				

$x_{S...}$: NBV ... *Nichtbasisvariablen* (nicht ausgetauschte x_i)

$x_{r...}$: BV ... *Basisvariablen* (ausgetauschte x_i)

- Allgemeine Lösung ergibt sich aus Endtabelle: NBV beliebig vorgeben, BV daraus berechenbar.
- Falls keine NBV vorhanden sind, ist die Lösung eindeutig.

Def. 8:

Die Darstellung der Endtabelle heißt Basisdarstellung des lin. Gleichungssystems.

Bemerkung: Aus einer Basisdarstellung lassen sich weitere Basisdarstellungen durch Austausch $x_{ri} \leftrightarrow x_{sj}$ gewinnen.

Bsp. 9

$$3x_1 + x_2 + 2x_3 = -2$$

$$-5x_1 - 3x_2 - 2x_3 = -2$$

$$x_1 + 3x_2 - 2x_3 = 10$$

T1	x_1	x_2	x_3	1		T2	x_1	x_3	1		T3	x_3	1
y_1	3	1	2	2	mit AVS:	x_2	-3	-2	-2		x_2	1	4
y_2	-5	-3	-2	2		0	4	4	8		x_1	1	-2
y_3	1	3	-2	10		0	-8	-8	-16		0	0	0
K	-3	*	-2	-2		K	*	-1	-2				

(in T3 kann letzte 0-Zeile gestrichen werden)

\curvearrowright T3 ist Endtabelle (BV: x_1, x_2 , NBV: x_3)

allg. Lösung:

$$x_2 = x_3 + x_4$$

$$x_1 = -x_3 - 2$$

$x_3 \in \mathbb{R}$ frei wählbar

andere Form: $x_3 = t$ (Parameter), $\underline{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -t - 2 \\ t + 4 \\ t \end{pmatrix}, t \in \mathbb{R}$ Bemerkung:

- 1.) Bei homogenen System $\underline{A}\underline{x} = \underline{0}$ muss die 1-Spalte $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix}$ nicht geschrieben werden (nur „gedacht“).
- 2.) Die Methode AVS entspricht dem sogenannten *Gauß-Jordan-Verfahren*.
Der *Gauß-Algorithmus* (siehe folgendes Beispiel):
- AVSZ (Spalten- und Zeilentilgung)
 - weggelassene Zeilen merken (\rightarrow Kellerzeilen)
 - Rückrechnung durchführen

Bsp. 10:

$$-x_1 + 2x_2 + 2x_3 = 4$$

$$2x_1 + 5x_2 + 2x_3 = 4$$

$$2x_1 + x_2 - 4x_3 = -3$$

T_1	x_1	x_2	x_3	1
0	-1	2	2	-4
0	2	5	2	-4
0	2	1	-1	+3
x_2	-2	*	4	-3

T_2	x_1	x_3	1
0	5	10	-10
0	-8	22	-19
x_1	*	2	-2

T_3	x_3	1
0	6	-3
x_3	*	$\frac{1}{2}$

Rückrechnung:

$$T_3 \curvearrowright x_3 = \frac{1}{2}$$

$$T_2 \curvearrowright x_1 = 2x_3 - 2 = \underline{\underline{-1}}$$

$$T_1 \curvearrowright x_2 = -2x_1 + 4x_3 - 3 = \underline{\underline{1}}$$

Lösung: $\underline{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ \frac{1}{2} \end{pmatrix}$ Bemerkung:

m Gleichungen, n Unbekannte

$m \leq n \quad \curvearrowright$ AVS günstiger

$m \geq n \quad \curvearrowright$ Gauß oder AVS

5.4.3. Weitere Anwendungen des Austauschverfahrens

- 1.) Lineare Unabhängigkeit von Vektoren $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n \in \mathbb{R}^m$ überprüfen.

Ansatz: $x_1 \underline{a}_1 + x_2 \underline{a}_2 + \dots + x_n \underline{a}_n = \underline{0} \Leftrightarrow \underline{A}\underline{x} = \underline{0}$ mit $\underline{A} = \begin{pmatrix} \underline{a}_1 \\ \underline{a}_2 \\ \dots \\ \underline{a}_n \end{pmatrix}$ (Spalten von \underline{A} sind die

(Spalten-)Vektoren $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n$). Homogenes GLS mit AVS mit Starttabelle: $\begin{array}{c|c} & \underline{x}^T \\ \hline \underline{y} & \underline{A} \end{array}$

- Unabhängigkeit genau dann, wenn alle x_i ausgetauscht werden können.

- Allgemein: Die zu den ausgetauschten x_i , d.h. BV, gehörenden a_i sind unabhängig. Sie bilden die Basis von $L(\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n)$.

2.) Rang einer Matrix $\underline{A} = \begin{pmatrix} \underline{a}_1 \\ \dots \\ \underline{a}_n \end{pmatrix} \dots \text{rang}(\underline{A})$ (auch: $\text{rank}(\underline{A}), rk(\underline{A}), \dots$)

Def.: $\text{rang}(\underline{A}) := \dim L(\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n)$

(Dimension des von den Spaltenvektoren aufgespannten Teilraumes).

Berechnung: $\text{rang}(\underline{A}) = \text{Anzahl der ausführbaren Austauschschritte im AVSZ mit } \begin{array}{c|c} & \underline{x}^T \\ \hline \underline{y} & \underline{A} \end{array} \text{ als}$

Starttabelle (1-Spalte entfällt).

Bemerkung: Es gilt $\text{rang}(\underline{A}^T) = \text{rang}(\underline{A})$.

3.) Berechnung der Determinante einer (n, n) -Matrix (vgl. Merkblatt „Lineare Algebra“)

5.4.4. Die Inverse einer (n, n) -Matrix

Def. 9:

Es sei \underline{A} vom Typ (n, n) . Das Gleichungssystem $\underline{y} = \underline{A} \underline{x}$ sei für jedes \underline{y} *eindeutig* nach \underline{x} auflösbar, d.h. $\underline{x} = \underline{B} \underline{y}$. Dann heißt die (n, n) -Matrix \underline{B} *Inverse* von \underline{A} . Bezeichnung: $\underline{A}^{-1} = \underline{B}$.

Falls \underline{A}^{-1} existiert, so heißt \underline{A} *regulär*, sonst *singulär*.

Bemerkung:

1.) \underline{A} ist regulär $\Leftrightarrow \det \underline{A} \neq 0$

2.) \underline{A} regulär, dann hat $\underline{A} \underline{x} = \underline{b}$ die eindeutige Lösung $\underline{x} = \underline{A}^{-1} \underline{b}$.

Rechenregeln: Seien \underline{A} und \underline{B} regulär. Dann gilt:

- $\underline{A} \cdot \underline{A}^{-1} = \underline{E}, \underline{A}^{-1} \cdot \underline{A} = \underline{E}$
- $(\underline{A}^{-1})^{-1} = \underline{A}$
- $\underline{A} \underline{B} = \underline{E}$
- $(\underline{A} \underline{B})^{-1} = \underline{B}^{-1} \underline{A}^{-1}$
- $(\underline{A}^T)^{-1} = (\underline{A}^{-1})^T$

Verfahren zur Ermittlung der Inversen:

- vollständiges AV mit Starttabelle $\begin{array}{c|c} & \underline{x}^T \\ \hline \underline{y} & \underline{A} \end{array}$

Fall 1: alle x_i austauschbar $\leadsto \underline{A}$ regulär.

Fall 2: nicht alle x_i austauschbar $\leadsto \underline{A}$ singulär.

im Fall 1: \leadsto nach Ordnen der Zeilen und Spalten: \underline{A}^{-1} aus TE ablesbar.

- Probe: $\underline{A} \cdot \underline{A}^{-1} = \underline{E}$

Bsp. 11:

$$\underline{A} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \\ 1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \text{ gesucht: } \underline{A}^{-1} \text{ (falls diese existiert).}$$

Lösung:

T_1	x_1	x_2	x_3	T_2	y_1	x_2	x_3	T_3	y_1	x_2	y_2	T_4	y_1	y_3	y_2
y_1	1	2	1	x_1	1	-2	-1	x_1	2	-4	-1	x_1	$\frac{2}{3}$	$\frac{4}{3}$	-1
y_2	1	0	2	y_2	1	-2	1	x_3	-1	-2	1	x_3	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$	1
y_3	1	-1	1	y_3	1	-3	0	y_2	1	-3	0	x_2	$\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
K	*	-2	-1	K	-1	2	*	K	$\frac{1}{3}$	*	0				

$$\leadsto \underline{A}^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & -1 & \frac{4}{3} \\ \frac{1}{3} & 0 & -\frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & 1 & -\frac{2}{3} \end{pmatrix}$$

Probe: $\underline{A} \underline{A}^{-1} = \underline{E} = \underline{A}^{-1} \underline{A}$

5.5. Vektorrechnung im Raum

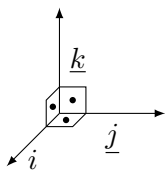
5.5.1. Kartesische Basis

Einige Begriffe:

1.) *Betrag* eines Vektors \underline{a} : Länge des Pfeils, der \underline{a} repräsentiert.
Bezeichnung: $|\underline{a}|$

2.) *Einheitsvektor*: Vektor mit $|\underline{a}| = 1$.

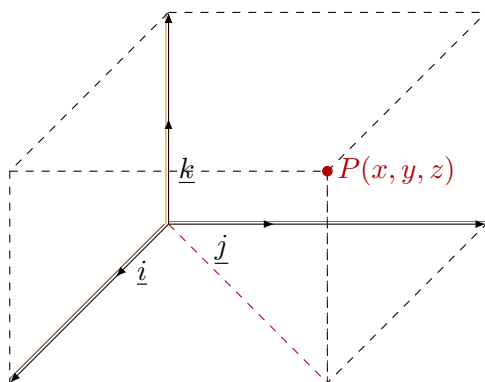
3.) zu $|\underline{a}| \neq 0$ gehörender Einheitsvektor $\underline{a}^0 = \frac{1}{|\underline{a}|} \underline{a}$

4.) *Kartesische Basis* $\{\underline{i}, \underline{j}, \underline{k}\}$ $\underline{i}, \underline{j}, \underline{k}$ besitzen Betrag 1, stehen \perp aufeinander und bilden in dieser Reihenfolge ein Rechtssystem (Rechtsschraubregel: Rechtsschraube \perp zu \underline{i} und \underline{j} halten, auf kürzestem Weg von \underline{i} nach \underline{j} drehen. \leadsto Bewegung in Richtung \underline{k}).

5.) *Kartesisches Koordinatensystem*:

- Fester Punkt O als Ursprung
- kartesische Basis $\{\underline{i}, \underline{j}, \underline{k}\}$ (jeweils linear unabhängig)

Damit eineindeutige Zuordnung:

$$\begin{matrix} P \\ \text{Punkt} \end{matrix} \xleftrightarrow[1]{1} \begin{matrix} \overrightarrow{OP} \\ \text{Ortsvektor} \end{matrix} = \underline{r} = x \cdot \underline{i} + y \cdot \underline{j} + z \cdot \underline{k}$$



$$\underline{r} = x \cdot \underline{i} + y \cdot \underline{j} + z \cdot \underline{k} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (\text{Kurzschreibweise – beide Schreibweisen gleichberechtigt})$$

$$\text{Betrag eines Vektors } \underline{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} : \boxed{|\underline{a}| = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2}}$$

Bemerkung:

$$\text{Bezeichnung auch } \underline{e}_1 = \underline{i} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \underline{e}_2 = \underline{j} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \underline{e}_3 = \underline{k} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\underline{r} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \underline{x} = \overrightarrow{x} = \mathbf{x}$$

5.5.2. Das Skalarprodukt

Def. 10:

Die Zahl $(\underline{a}, \underline{b}) := |\underline{a}| \cdot |\underline{b}| \cdot \cos(\varphi)$ heißt *Skalarprodukt* der Vektoren \underline{a} und \underline{b} . Dabei ist φ der Winkel zwischen den Vektoren \underline{a} und \underline{b} .

Eigenschaften des Skalarproduktes:

- a.) $(\underline{a}, \underline{a}) > 0$ für $\underline{a} \neq \underline{0}$
- b.) $(\underline{a}, \underline{b}) = (\underline{b}, \underline{a})$ (Symmetrie)
- c.) $(\lambda \underline{a} + \mu \underline{b}, \underline{c}) = \lambda \cdot (\underline{a}, \underline{c}) + \mu (\underline{b}, \underline{c})$ (Linearität)

Satz 4:

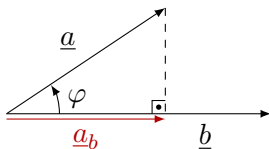
$$\text{Es sei } \underline{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix}, \underline{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix}. \text{ Dann gilt } \boxed{(\underline{a}, \underline{b}) = a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3}.$$

$$\text{Folgerung: } \boxed{(\underline{a}, \underline{b}) = \underline{a}^T \cdot \underline{b} = \underline{b}^T \cdot \underline{a}}$$

$$\text{Schreibweisen: } (\underline{a}, \underline{b}) = \underline{a} \circ \underline{b} = \dots$$

Anwendungen:

1.) Projektion \underline{a}_b von \underline{a} auf \underline{b} : $\underline{a}_b = (\underline{a}, \underline{b}) \frac{\underline{b}}{|\underline{b}|^2} = \frac{(\underline{a}, \underline{b})}{|\underline{b}|^2} \underline{b}$



Herleitung:

$$|\underline{a}_b| = |\underline{a}| \cdot \cos(\varphi)$$

$$\underline{a}_b = |\underline{a}| \cdot \cos(\varphi) \frac{\underline{b}}{|\underline{b}|} = |\underline{a}| \cdot |\underline{b}| \cdot \cos(\varphi) \frac{\underline{b}}{|\underline{b}|^2} = (\underline{a}, \underline{b}) \cdot \frac{1}{|\underline{b}|^2} \cdot \underline{b}$$

2.) Winkel φ zwischen zwei Vektoren: $\cos(\varphi) = \frac{(\underline{a}, \underline{b})}{|\underline{a}| \cdot |\underline{b}|}$

Bsp. 12:

$$\underline{a} = \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \\ 3 \end{pmatrix}, \underline{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ -4 \\ 7 \end{pmatrix}$$

$$\text{a.) } |\underline{a}| = \sqrt{1^2 + (-2)^2 + 3^2} = \sqrt{14}, |\underline{b}| = \sqrt{0^2 + (-4)^2 + 7^2} = \sqrt{65}$$

$$\cos(\varphi) = \frac{(\underline{a}, \underline{b})}{|\underline{a}| \cdot |\underline{b}|} = \frac{1 \cdot 0 + (-2) \cdot (-4) + 3 \cdot 7}{\sqrt{14} \cdot \sqrt{65}} = \frac{29}{\sqrt{14} \cdot \sqrt{65}}$$

$$\varphi = \arccos\left(\frac{29}{\sqrt{14} \cdot \sqrt{65}}\right) \approx 15,92^\circ$$

$$\text{b.) Projektion von } \underline{b} \text{ auf } \underline{a}: \underline{b}_a = \frac{(\underline{a}, \underline{b})}{|\underline{a}|^2} \underline{a} = \frac{29}{14} \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \\ 3 \end{pmatrix} = \frac{29}{14} \underline{e}_1 - \frac{29}{7} \underline{e}_2 + \frac{29 \cdot 3}{14} \underline{e}_3$$

3.) Orthogonalitätskriterium:

$$(\underline{a}, \underline{b}) = 0 \Leftrightarrow (\underbrace{|\underline{a}| = 0}_{\underline{a}=\underline{0}} \vee \underbrace{|\underline{b}| = 0}_{\underline{b}=\underline{0}} \vee \cos(\varphi) = 0)$$

$$\text{Vereinbarung: } \underline{0} \text{ orthogonal zu jedem Vektor } \curvearrowright (\underline{a}, \underline{b}) = 0 \Leftrightarrow \underline{a} \perp \underline{b}$$

5.5.3. Das vektorielle Produkt

Def. 11:

Das vektorielle Produkt $\underline{a} \times \underline{b}$ zweier Vektoren $(\underline{a}, \underline{b} \in \mathbb{R}^3)$ ist ein Vektor, der eindeutig festgelegt ist durch:

$$(1) |\underline{a} \times \underline{b}| = |\underline{a}| \cdot |\underline{b}| \cdot \sin(\varphi)$$

$$(2) \underline{a} \times \underline{b} \text{ ist senkrecht zu } \underline{a} \text{ und senkrecht zu } \underline{b}.$$

$$(3) \underline{a}, \underline{b} \text{ und } \underline{a} \times \underline{b} \text{ bilden in dieser Reihenfolge ein Rechtssystem.}$$

Eigenschaften des vektoriellen Produktes:

- $\underline{a} \times \underline{b} = -(\underline{b} \times \underline{a})$ (Anti-Kommutativgesetz)
- $\underline{a} \times (\underline{a} + \underline{c}) = \underline{a} \times \underline{b} + \underline{a} \times \underline{c}$ (Distributivgesetz)
- $\lambda(\underline{a} \times \underline{b}) = (\lambda \underline{a}) \times \underline{b} = \underline{a} \times (\lambda \underline{b})$

- Speziell: $\underline{a} \times \underline{a} = \underline{0}$
- $\underline{e}_1 \times \underline{e}_2 = \underline{e}_3$, $\underline{e}_2 \times \underline{e}_3 = \underline{e}_1$ usw.

Satz 5:

Es sei $\underline{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix}$ und $\underline{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix}$, dann gilt:

$$\underline{a} \times \underline{b} \underset{\text{Schema}}{=} \begin{vmatrix} \underline{i} & a_1 & b_1 \\ \underline{j} & a_2 & b_2 \\ \underline{k} & a_3 & b_3 \end{vmatrix} \hat{=} \begin{vmatrix} a_2 & b_2 \\ a_3 & b_3 \end{vmatrix} \underline{i} - \begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_3 & b_3 \end{vmatrix} \underline{j} + \begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix} \underline{k}$$

$$\underline{a} \times \underline{b} = (a_2b_3 - a_3b_2)\underline{i} - (a_1b_3 - a_3b_1)\underline{j} + (a_1b_2 - a_2b_1)\underline{k} = \begin{pmatrix} a_2b_3 - a_3b_2 \\ a_2b_1 - a_1b_3 \\ a_1b_2 - a_2b_1 \end{pmatrix}$$

Bsp. 13:

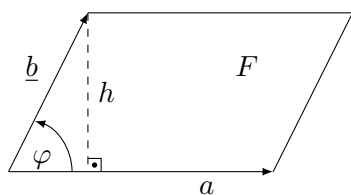
$$\underline{a} = \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \\ 3 \end{pmatrix}, \underline{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ -4 \\ 7 \end{pmatrix}$$

$$\underline{a} \times \underline{b} = \begin{vmatrix} -2 & -4 \\ 3 & 7 \end{vmatrix} \underline{i} - \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 3 & 7 \end{vmatrix} \underline{j} + \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -2 & -4 \end{vmatrix} \underline{k} = -2\underline{i} - 7\underline{j} - 4\underline{k} = \begin{pmatrix} -2 \\ -7 \\ -4 \end{pmatrix}$$

Kontrolle: $(\underline{a} \times \underline{b}, \underline{a}) = 0$, $(\underline{a} \times \underline{b}, \underline{b}) = 0$!

Anwendungen:

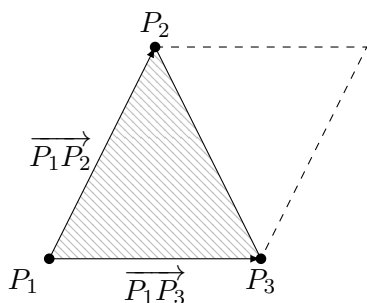
1.) Flächeninhalt des von \underline{a} und \underline{b} aufgespannte Parallelogramms: $F = |\underline{a} \times \underline{b}|$



$$\sin(\alpha) = \frac{h}{|\underline{b}|}$$

$$F = |\underline{a}| \cdot h = |\underline{a}| \cdot |\underline{b}| \cdot \sin(\alpha) = |\underline{a} \times \underline{b}|$$

2.) Flächeninhalt eines Dreiecks $\triangle P_1P_2P_3$: $F = \frac{1}{2} |\overrightarrow{P_1P_2} \times \overrightarrow{P_1P_3}|$ (halbes Parallelogramm)



3.) **Parallelitätskriterium:** $\underline{a} \times \underline{b} = \underline{0} \Leftrightarrow |\underline{a} \times \underline{b}| = 0 \Leftrightarrow (|\underline{a}| = 0 \vee |\underline{b}| = 0 \vee \sin(\varphi) = 0)$

Vereinbarung: $\underline{0} \parallel$ zu jedem Vektor

$$\hookrightarrow \underline{a} \times \underline{b} = \underline{0} \Leftrightarrow \underline{a} \parallel \underline{b}$$

5.5.4. Das Spatprodukt

Def. 12:

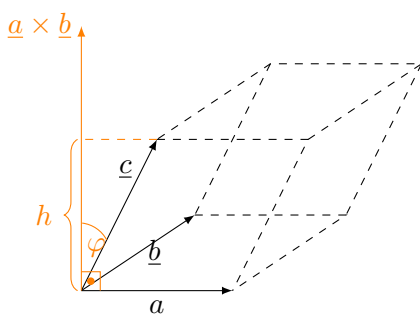
Die Zahl $(\underline{a} \times \underline{b}, \underline{c})$ heißt Spatprodukt der Vektoren \underline{a} , \underline{b} und \underline{c} .

Eigenschaften: $(\underline{a} \times \underline{b}, \underline{c}) = (\underline{b} \times \underline{c}, \underline{a}) = (\underline{c} \times \underline{a}, \underline{b})$ (durch zyklisches Vertauschen)

Berechnung: $(\underline{a} \times \underline{b}, \underline{c}) = \det(\underline{a}|\underline{b}|\underline{c}) = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix}$

Anwendung:

1.) Volumen des von \underline{a} , \underline{b} und \underline{c} aufgespannten Spates (Parallelotop): $V = |(\underline{a} \times \underline{b}, \underline{c})|$



$$V = F_{\text{Grundfläche}} \cdot h = |\underline{a} \times \underline{b}| \cdot |\underline{c}| \cdot |\cos(\alpha)| = |(\underline{a} \times \underline{b}, \underline{c})|$$

Bemerkung:

$$\text{Spatprodukt} \begin{cases} > 0 & \dots \text{ Rechtssystem} \\ < 0 & \dots \text{ Linkssystem} \end{cases}$$

2.) **Komplanaritätskriterium:**

Die Vektoren \underline{a} , \underline{b} , \underline{c} sind komplanar, d.h. sie liegen in einer (in O angehefteten) Ebene

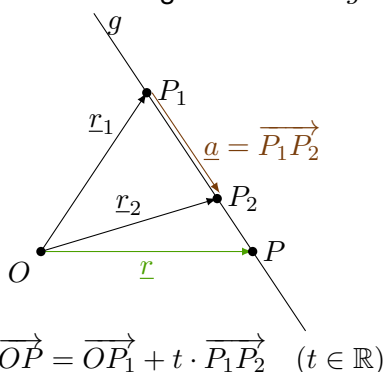
$$\Leftrightarrow (\underline{a} \times \underline{b}, \underline{c}) = 0$$

$$\Leftrightarrow \underline{a}, \underline{b}, \underline{c} \text{ sind linear abhängig.}$$

5.5.5. Geraden- und Ebenengleichungen

1.) Parameterdarstellung einer Geraden g durch P_1 und P_2 :

$P \dots$ beliebiger Punkt von g



$$\overrightarrow{OP} = \overrightarrow{OP_1} + t \cdot \overrightarrow{P_1P_2} \quad (t \in \mathbb{R})$$

$$\underline{r} = \underline{r}_1 + t \cdot \underline{a} \quad (\text{Punkt-Richtungs-Form})$$

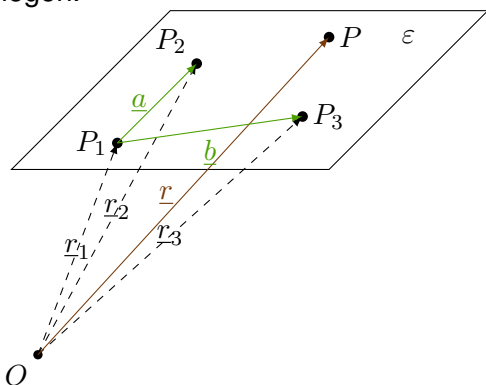
$$\underline{r} = \underline{r}_1 + t \cdot (\underline{r}_2 - \underline{r}_1) \quad (t \in \mathbb{R}) \quad (\text{Zwei-Punkte-Form})$$

Bsp.:

Gerade durch die Punkte $P_1 = (1, 2, -1), P_2 = (0, 1, 4)$

$$g: \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ -1 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ 5 \end{pmatrix} \quad (t \in \mathbb{R})$$

- 2.) Parameterdarstellung einer Ebene ε durch 3 Punkte P_1, P_2, P_3 , die nicht auf einer Geraden liegen.



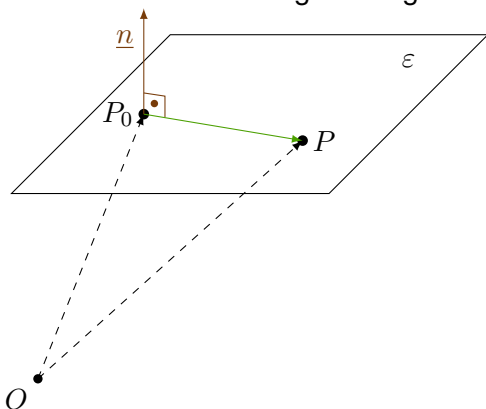
$P \dots$ beliebiger Punkt von ε

$$\overrightarrow{OP} = \overrightarrow{OP_1} + u \cdot \overrightarrow{P_1P_2} + v \cdot \overrightarrow{P_1P_3} \quad (u, v \in \mathbb{R})$$

$$\underline{r} = \underline{r}_1 + u \cdot \underline{a} + v \cdot \underline{b} \quad (u, v \in \mathbb{R})$$

$$\underline{r} = \underline{r}_1 + u \cdot (\underline{r}_2 - \underline{r}_1) + v(\underline{r}_3 - \underline{r}_1)$$

- 3.) Parameterfreie Ebenengleichung



Normalenvektor \underline{n} ($\underline{n} \neq 0, \underline{n} \perp \varepsilon$):

$$\underline{n} = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}, \quad \underline{n} \perp \overrightarrow{P_0P}$$

Dabei sei $P(x, y, z)$ ein beliebiger Punkt in ε und $P_0(x_0, y_0, z_0)$ ein fester Punkt in ε mit Orthogonalitätskriterium $(\underline{n}, \overrightarrow{P_0P}) = 0$ bzw. $\underline{(n, r - r_0) = 0}$.

Ausführlich: $\left(\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{pmatrix} \right) = 0$, d.h. $a \cdot (x - x_0) + b(y - y_0) + c(z - z_0) = 0$

Allgemeine Form: $\boxed{ax + by + cz + d = 0}$ mit $d = -ax_0 - by_0 - cz_0$.

Bsp. 15:

Ebene durch $P_1(1, 0, 0), P_2(3, 1, 5), P_3(-2, 0, 2)$

- P.d. (Parameterdarstellung) $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + u \underbrace{\begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 5 \end{pmatrix}}_{\underline{a}} + v \underbrace{\begin{pmatrix} -3 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix}}_{\underline{b}} \quad (u, v \in \mathbb{R})$

- Ein Normalenvektor ist bpsw. $\underline{u} = \underline{a} \times \underline{b} = \begin{pmatrix} 2 \\ -19 \\ 3 \end{pmatrix}$

\hookrightarrow Parameterfreie Darstellung: $2x - 19y + 3z + d = 0$

d berechnen: Einsetzen von $x = 1, y = z = 0$ (P_1) liefert $2 \cdot 1 + d = 0 \Rightarrow d = -2$

$\hookrightarrow \boxed{2x + 19y + 3z - 2 = 0}$

5.5.6. Einige geometrische Grundaufgaben

1.) Schnitt von Gerade und Ebene

Bsp. 16:

Gegeben:

Ebene $\varepsilon: 2x - 4y + z + 3 = 0$

Gerade $g: \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ -2 \end{pmatrix}$

Gesucht:

a.) Schnittpunkt (Spurpunkt) $S(x_S, y_S, z_S)$

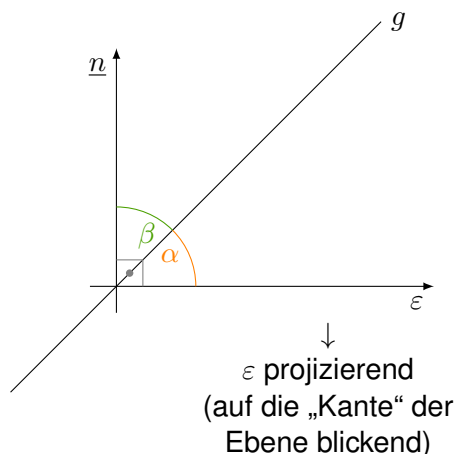
b.) Schnittwinkel

zu a.) $g: x = 3 - t, y = t, z = 1 - 2t$ einsetzen in Ebenengleichung: $2(3 - t) - 4 \cdot t + 1 - 2t + 3 = 0 \Rightarrow -8t + 10 = 0 \Rightarrow t = \frac{5}{4}$

$t = \frac{5}{4}$ in Geradengleichung einsetzen: $x_S = 3 - \frac{5}{4} = \frac{7}{4}, y_S = \frac{5}{4}, z_S = 1 - 2 \cdot \frac{5}{4} = -\frac{3}{2}$

$\hookrightarrow \underline{\underline{S\left(\frac{7}{4}, \frac{5}{4}, -\frac{3}{2}\right)}}$

zu b.) Schnittwinkel:



$\beta = \angle(\underline{n}, \underline{a})$ (Richtungsvektor von g)

$$\alpha = |90^\circ - \beta|$$

$$\underline{n} = \begin{pmatrix} 2 \\ -4 \\ 1 \end{pmatrix}, \underline{a} = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ -2 \end{pmatrix}, \beta = \arccos\left(\frac{(\underline{n}, \underline{a})}{|\underline{n}| \cdot |\underline{a}|}\right) \approx 135,45^\circ$$

$$\hookrightarrow \alpha = |90^\circ - \beta| \approx 45,45^\circ$$

2.) Schnitt zweier Ebenen: 2 Gleichungen, 3 Unbekannte

Bsp. 17:

Schnitt der Ebenen $\varepsilon_1: x + y + z - 1 = 0$ und $\varepsilon_2: x - 2y + 3z + 4 = 0$.

Austauschverfahren:

T_1	x	y	z	1	T_2	x	z	1	T_3	y	1
0	1	1	1	-1	x	-1	-1	1	x	$-\frac{5}{2}$	$\frac{7}{2}$
0	1	-2	3	4	0	-3	2	5	z	$\frac{3}{2}$	$-\frac{5}{2}$
K	*	-1	-1	1	K	$\frac{3}{2}$	*	$-\frac{5}{2}$			

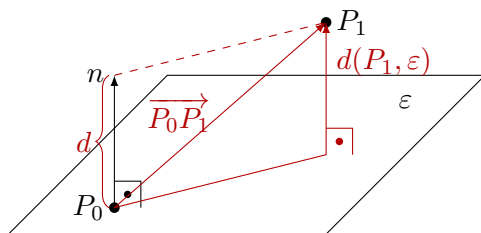
$y \dots$ NBV, $y = t$ (beliebig), $x = -\frac{5}{2}t + \frac{7}{2}$, $z = \frac{3}{2}t - \frac{5}{2}$

$$\text{also } \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{5}{2}t + \frac{7}{2} \\ t \\ \frac{3}{2}t - \frac{5}{2} \end{pmatrix}, \text{ oder } \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = t \begin{pmatrix} -\frac{5}{2} \\ 1 \\ \frac{3}{2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{7}{2} \\ 0 \\ -\frac{5}{2} \end{pmatrix} \quad (t \in \mathbb{R})$$

3.) Abstand $d(P_1, \varepsilon)$ eines Punktes P_1 in einer Ebene ε .

$\varepsilon: ax + by + cz + d = 0$, Punkt $P_1(x_1, y_1, z_1)$

$$d(P_1, \varepsilon) = \frac{|ax_1 + by_1 + cz_1 + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}$$



$$\underline{n} = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}, P_0 \in \varepsilon, \text{ d.h. } ax_0 + by_0 + cz_0 + d = 0$$

$$d(P_1, \varepsilon) = \left| \overrightarrow{P_0 P_1} \cdot \frac{\underline{n}}{|\underline{n}|} \right| = \frac{\left| \overrightarrow{P_0 P_1} \cdot \underline{n} \right|}{|\underline{n}|}$$

$$\overrightarrow{P_0 P_1} = \begin{pmatrix} x_1 - x_0 \\ y_1 - y_0 \\ z_1 - z_0 \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow d(P_1, \varepsilon) = \frac{|a(x_1 - x_0) + b(y_1 - y_0) + c(z_1 - z_0)|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} = \frac{|ax_1 + by_1 + cz_1 + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}$$

Bsp. 18:

Abstand von $P_1(2, -9, -16)$ von der Ebene $\varepsilon : 3x - 7y + 8z + 26 = 0$.

$$d(P_1, \varepsilon) = \frac{|3 \cdot 2 - 7 \cdot (-9) + 8 \cdot (-16) + 26|}{\sqrt{3^2 + (-7)^2 + 8^2}} = \frac{|-33|}{\sqrt{122}} = \frac{33}{\sqrt{122}}$$

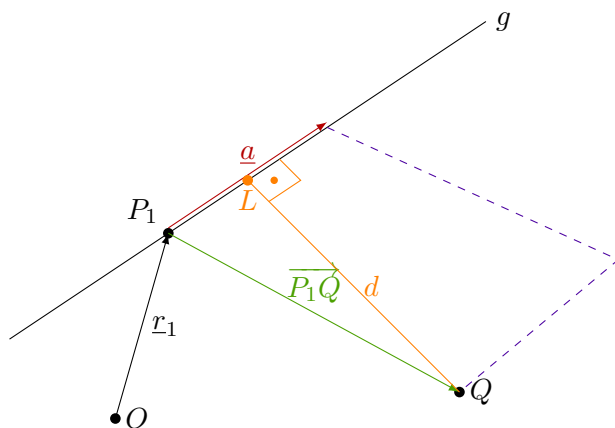
Bemerkung: Gerade g in der x-y-Ebene, Gleichung $ax + by + c = 0$, NV: $\underline{n} = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$, Abstand

eines Punktes $P_1(x_1, y_1)$ von g :

$$d(P_1, g) = \frac{|ax_1 + by_1 + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

4.) Abstand $d(Q, g)$ eines Punktes Q von einer Geraden g (in \mathbb{R}^3).

$$g : \underline{r} = \underbrace{\overrightarrow{OP_1}}_{\underline{r_1}} + t\underline{a} \quad t \in \mathbb{R} \text{ (Parameterdarstellung)}$$



(d ist Höhe \overline{LQ} des von \underline{a} und $\overrightarrow{P_1 Q}$ aufgespannten Parallelogramms)

$$\text{Lotfußpunkt: } \overrightarrow{OL} = \overrightarrow{OP_1} + \overrightarrow{P_1 Q_a}$$

Bsp. 19:

$$g : \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} \quad t \in \mathbb{R}, Q(1, 1, 1)$$

a) Abstand $d(Q, g)$:

$$\underline{a} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}, \underline{r}_1 = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix}, \overrightarrow{OQ} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \overrightarrow{P_1Q} = \begin{pmatrix} -1 \\ -2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\overrightarrow{P_1Q} \times \underline{a} = 2\underline{i} - \underline{j} + 2\underline{k} = \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \\ 2 \end{pmatrix}$$

$$|\overrightarrow{P_1Q} \times \underline{a}| = \sqrt{2^2 + (-1)^2 + 2^2} = \sqrt{9} = 3$$

$$d(Q, g) = \frac{3}{\sqrt{2}} = \underline{\underline{\frac{3}{2}\sqrt{2}}}$$

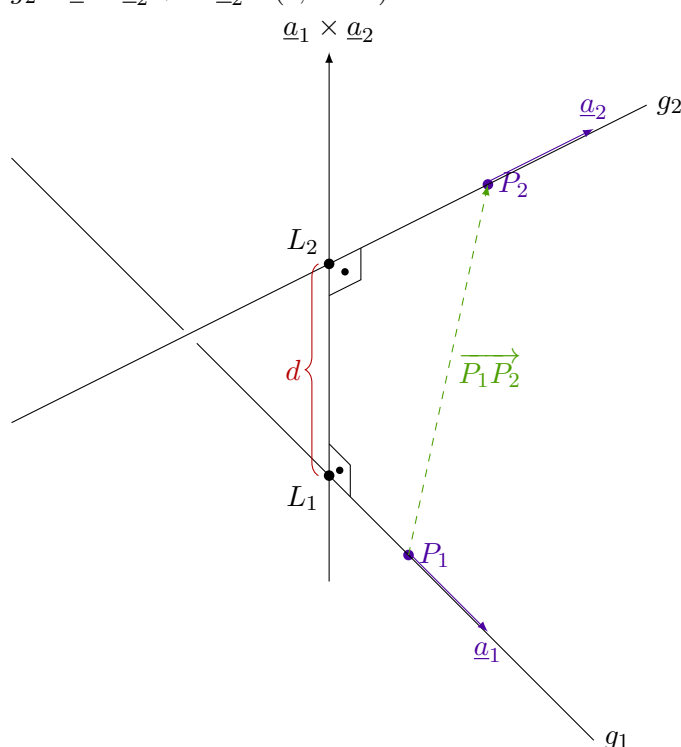
$$\text{b) Lotfußpunkt: } \overrightarrow{P_1Q_a} = \frac{(\overrightarrow{P_1Q}, \underline{a})}{|\underline{a}|^2} \cdot \underline{a} = -\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow \overrightarrow{OL} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix} - \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{3}{2} \\ 3 \\ \frac{3}{2} \end{pmatrix} \Rightarrow L \left(\frac{3}{2}, 3, \frac{3}{2} \right)$$

5.) Abstand $d(g_1, g_2)$ zweier nicht paralleler Geraden g_1 und g_2 .

$$g_1 : \underline{r} = \underline{r}_1 + s \cdot \underline{a}_1$$

$$g_2 : \underline{r} = \underline{r}_2 + t \cdot \underline{a}_2 \quad (s, t \in \mathbb{R})$$



$$d = |\overrightarrow{P_1P_2}_{a_1 \times a_2}| = d(g_1, g_2) = \frac{|(\underline{r}_2 - \underline{r}_1, \underline{a}_1 \times \underline{a}_2)|}{|\underline{a}_1 \times \underline{a}_2|}$$

Bemerkung: Lotfußpunkte L_1 und L_2 aus Bedingungen $\overrightarrow{L_1L_2} \perp \underline{a}_1$ und $\overrightarrow{L_1L_2} \perp \underline{a}_2$ ermittelbar.

5.6. Eigenwerte und Eigenvektoren

Es sei \underline{A} eine (n, n) -Matrix.

Def. 13:

Die Zahl $\lambda \in \mathbb{C}$ heißt *Eigenwert* (EW) der quadratischen Matrix \underline{A} , falls die Gleichung $\underline{A}\underline{x} = \lambda\underline{x}$ nichttriviale Lösungsvektoren \underline{x} besitzt. Diese heißen dann *Eigenvektoren* (EV) von \underline{A} zum Eigenwert λ .

Diskussion:

$$1.) \underline{A}\underline{x} = \lambda\underline{x} \Leftrightarrow (\underline{A} - \lambda\underline{E})\underline{x} = \underline{0}$$

D.h. nichttriviale Lösungen existieren genau dann, wenn $\det(\underline{A} - \lambda\underline{E}) = 0$ (*charakteristische Gleichung*) gilt.

Vorgehensweise zur Ermittlung von EW und EV:

- charakt. Gleichung lösen (n i.a. komplexe Lösungen $\lambda_1, \dots, \lambda_n$)
- Gleichungssystem $(\underline{A} - \lambda_i\underline{E})\underline{x} = \underline{0}$ für $i = 1, \dots, n$ lösen.

Im folgenden werden nur symmetrische (n, n) -Matrizen \underline{S} betrachtet, d.h. $\underline{S}^T = \underline{S}$.

Satz 6:

Es sei \underline{S} eine symmetrische (n, n) -Matrix. Dann gilt:

- (1) Alle Eigenwerte von \underline{S} sind reell.
- (2) Zu verschiedenen EW λ_1 bzw. λ_2 ($\lambda_1 \neq \lambda_2$) gehörende EV \underline{v}_1 bzw. \underline{v}_2 sind orthogonal (vgl. Diskussion).
- (3) Es gibt eine Basis des Raumes \mathbb{R}^n , die aus n paarweise orthonormierten EV $\underline{v}_1, \dots, \underline{v}_n$ von \underline{S} besteht.
- (4) Es sei $\underline{V} = (\underline{v}_1 | \dots | \underline{v}_n)$ eine Matrix, deren Spaltenvektoren n paarweise orthonormierte EV von \underline{S} sind. Dann gilt:

- $\underline{V} \cdot \underline{V}^T = \underline{V}^T \cdot \underline{V} = \underline{E}$ (d.h. $\underline{V}^{-1} = \underline{V}^T$, \underline{V} ist sogenannte orthogonale Matrix)

$$\bullet \underline{V}^T \cdot \underline{S} \cdot \underline{V} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_n \end{pmatrix} = \underline{\Lambda} \leadsto \underline{S} = \underline{V} \cdot \underline{\Lambda} \cdot \underline{V}^T$$

$$\bullet \text{ Es gilt } \underline{S}^{-1} = \underline{V} \cdot \underline{\Lambda}^{-1} \cdot \underline{V}^T \text{ mit } \begin{pmatrix} \frac{1}{\lambda_1} & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\lambda_n} \end{pmatrix} = \underline{\Lambda}^{-1}$$

$$\underline{S}^n = \underline{V} \cdot \underline{\Lambda}^n \cdot \underline{V}^T$$

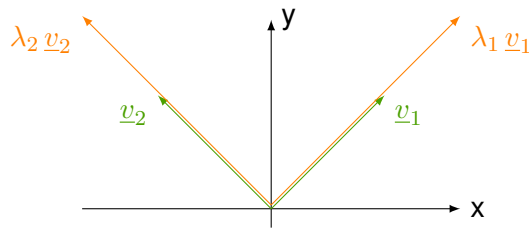
Betrag (Norm) eines Vektors $|\underline{a}| = \sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2}$ paarweise orthonormiert bedeutet:

$$(\underline{v}_i, \underline{v}_j) = \begin{cases} 1 & \text{für } i = j \\ 0 & \text{für } i \neq j \end{cases}$$

2.) Veranschaulichung im Fall $n = 2$:

Die symmetrische Matrix \underline{A} habe die Eigenwerte λ_1 und λ_2 und orthonormierte EV \underline{v}_1 und \underline{v}_2 , $\underline{V} = (\underline{v}_1 | \underline{v}_2)$. Es gilt $\underline{A} \cdot \underline{v}_1 = \lambda_1 \underline{v}_1$, $\underline{A} \cdot \underline{v}_2 = \lambda_2 \underline{v}_2$.

D.h. \underline{A} bewirkt eine Skalierung mit den Faktoren λ_1 bzw. λ_2 in Richtung \underline{v}_1 bzw. \underline{v}_2 .



Def. 14: Es sei \underline{S} eine reelle symmetrische Matrix vom Typ (n, n) . Die Funktion $y = Q(\underline{x}) := \underline{x}^T \underline{S} \underline{x}$ ($\underline{x} \in \mathbb{R}^n$, $y \in \mathbb{R}$) heißt *quadratische Form*.

Diskussion:

1.) Im Falle $n = 2$ stellt $Q(\underline{x}) = \text{const}$ (bzw. $Q(\underline{x}) + \underline{a}^T \underline{x} = \text{const}$) eine Kurve 2. Ordnung dar. Deren Gestalt kann durch die sogenannte Hauptachsentransformation ermittelt werden.

2.) Ausführliche Schreibweise $\underline{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$, $\underline{S} = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{pmatrix}$ (mit $s_{12} = s_{21}$).

$$Q(x, y) = \begin{pmatrix} x & y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = s_{11}x^2 + 2s_{12}xy + s_{22}y^2$$

3.) Es seien λ_1 und λ_2 die EV von \underline{S} und \underline{v}_1 bzw. \underline{v}_2 orthonormierte EV. Für einen beliebigen Vektor $\underline{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^2$ seien x^* und y^* die Koordinaten bzgl. der Basis $\underline{v}_1, \underline{v}_2$:

$$\underline{x} = x^* \underline{v}_1 + y^* \underline{v}_2 = (\underline{v}_1 | \underline{v}_2) \begin{pmatrix} x^* \\ y^* \end{pmatrix} = \underline{V} \underline{x}^*$$

Dann gilt:

$$Q(x, y) = \lambda_1 x^{*2} + \lambda_2 y^{*2} \quad (\text{Darstellung bzgl. der sog. Hauptachsen})$$

$$\text{Dann: } Q(x, y) = \underline{x}^T \underline{S} \underline{x} = (\underline{V} \underline{x}^*)^T \underline{S} (\underline{V} \underline{x}^*) = \underline{x}^{*T} \underbrace{\underline{V}^T \underline{S} \underline{V}}_{\underline{\Lambda}} \underline{x}^* = \begin{pmatrix} x^* & y^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x^* \\ y^* \end{pmatrix}$$

$$\Leftrightarrow Q(x, y) = \lambda_1 x^{*2} + \lambda_2 y^{*2}$$

Bsp. 20:

$$Q(x, y) = 13x^2 - 32xy + 37y^2 = 45$$

Welche Kurve ist das?

- Matrix \underline{S} (vgl. Gleichung aus 2.) aus obiger Diskussion):

$$\underline{S} = \begin{pmatrix} 13 & -16 \\ -16 & 37 \end{pmatrix}$$

- charakteristische Gleichung:

$$\det(\underline{S} - \lambda \underline{E}) \stackrel{!}{=} 0 \Leftrightarrow \begin{vmatrix} 13 - \lambda & -16 \\ -16 & 37 - \lambda \end{vmatrix} = \lambda^2 + 50\lambda + 225 \stackrel{!}{=} 0$$

$$\underline{\underline{\lambda_1 = 5}}, \underline{\underline{\lambda_2 = 45}} \quad (\text{Eigenwerte})$$

- EV zu $\lambda_1 = 5$ ($(\underline{S} - \lambda \underline{E})\underline{x} \stackrel{!}{=} \underline{0}$):

$$\begin{aligned} 8x - 16y &= 0 \\ -16x + 32y &= 0 \end{aligned}$$

$$\curvearrowright x = 2y \curvearrowright \underline{\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}} = \underline{\begin{pmatrix} 2t \\ t \end{pmatrix}} = t \underline{\begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix}} \quad (t \in \mathbb{R}, t \neq 0)$$

- EV zu $\lambda_2 = 45$:

$$\underline{\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}} = u \cdot \underline{\begin{pmatrix} 1 \\ -2 \end{pmatrix}} \quad (u \in \mathbb{R}, u \neq 0)$$

- orthonormierte EV:

$$\text{z.B. } \underline{v}_1 = \frac{1}{\sqrt{5}} \underline{\begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix}}, \underline{v}_2 = \frac{1}{\sqrt{5}} \underline{\begin{pmatrix} 1 \\ -2 \end{pmatrix}} \quad (\text{Rechtssystem!})$$

Mit Gleichung aus 3.) aus obiger Diskussion:

$$Q(x, y) = \lambda_1 x^{*2} + \lambda_2 y^{*2} = 5x^{*2} + 45y^{*2} = 45$$

$$\Leftrightarrow \boxed{\frac{x^{*2}}{9} + \frac{y^{*2}}{1} = 1} \quad (\text{Ellipse mit Halbachsen } a = 3, b = 1)$$

Teil II.

Folgen, Reihen, Grenzwerte

1. Zahlenfolgen

1.1. Grenzwerte von Zahlenfolgen

Def. 1:

Es sei $n_0 \in \mathbb{N}$. Eine Funktion f mit $Db(f) = \{u \in \mathbb{N} | n \geq n_0\}$ und $Wb(f) \subset \mathbb{R}$ heißt reelle Zahlenfolge.
Schreibweise:

$$a_n = f(n) \quad (n \in Db(f))$$

$$(a_n)_{n \geq n_0} = (a_{n_0}, a_{n_0+1}, a_{n_0+2}, \dots)$$

oft $n_0 = 0$ oder $n_0 = 1$.

Bsp. 1:

a.) $a_n = (-1)^n \cdot n \quad (n \in \mathbb{N})$
 $(a_n) = (0, -1, 2, -3, 4, \dots)$

b.) $a_0 = -1, a_n = n \cdot a_{n-1} \quad (n \in \mathbb{N}^*) \quad (\text{rekursive Def.})$
 $(a_n) = (-1, -1, -2, -6, -24, \dots), a_n = -n!$

c.) $a_n = \frac{3}{10} + \frac{3}{10^2} + \dots + \frac{3}{10^n} \quad (n \in \mathbb{N}^*)$
 $(a_n) = (0.3, 0.33, 0.333, \dots)$

d.) $a_n = 1 + (-1)^n \frac{1}{n^2} \quad (n \in \mathbb{N}^*)$
 $(a_n) = \left(\frac{5}{4}, \frac{8}{9}, \frac{17}{16}, \frac{24}{25}, \dots \right)$

Def. 2:

- (a_n) heißt *konvergent*, wenn es eine Zahl $a \in \mathbb{R}$ gibt mit folgender Eigenschaft:
Zu jedem $\varepsilon > 0$ existiert eine natürliche Zahl $n_0(\varepsilon)$, sodass für alle $n \geq n_0(\varepsilon)$ gilt: $|a_n - a| < \varepsilon$.

- Die Zahl a heißt *Grenzwert* von (a_n) .

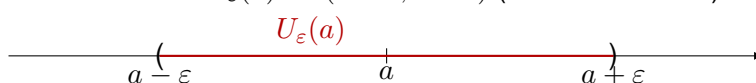
Schreibweisen:

$$\boxed{a = \lim_{n \rightarrow \infty} (a_n)} \quad \text{oder} \quad \boxed{a_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} a}$$

- (a_n) heißt *divergent*, falls (a_n) nicht konvergent ist.

Diskussion

1.) Für $\varepsilon > 0$ heißt $U_\varepsilon(a) := (a - \varepsilon, a + \varepsilon)$ (offenes Intervall) ε -Umgebung von a .



$$\left(\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a \right) \equiv (\forall \varepsilon > 0 \exists n_0(\varepsilon) \forall n \geq n_0(\varepsilon) a_n \in U_\varepsilon(a))$$

d.h. für jedes (noch so kleine) ε , liegen ab einem bestimmten (von ε abhängigen) Index $n_0(\varepsilon)$ alle Glieder $a_n (n \geq n_0(\varepsilon))$ in $U_\varepsilon(a)$.

2.) Im Bsp. 1 sind:

konvergente Folgen:

c.) mit $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \frac{1}{3}$

d.) mit $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 1$

divergente Folgen: a.) und b.)

3.) Ist $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$, so heißt (a_n) *Nullfolge*.

Def. 3:

(a_n) heißt:

- *streng monoton wachsend*, falls für jedes n gilt: $a_n < a_{n+1}$.
- *monoton wachsend*, falls für jedes n gilt: $a_n \leq a_{n+1}$.
- *streng monoton fallend*, falls für jedes n gilt: $a_n > a_{n+1}$.
- *monoton fallend*, falls für jedes n gilt: $a_n \geq a_{n+1}$.

Def. 4:

(a_n) heißt beschränkt, wenn es eine Konstante $C > 0$ gibt mit $|a_n| \leq C$ für alle n .

Diskussion:

1.) (a_n) beschränkt

$$\Leftrightarrow \exists c > 0 \forall n \quad |a_n| \leq c$$

$$\Leftrightarrow \exists c_1 \in \mathbb{R} \exists c_2 \in \mathbb{R} \forall n \quad c_1 \leq a_n \leq c_2$$

2.) Folgen aus Bsp. 1:

Folge	Monotonie	Beschränktheit
a.) $a_n = (-1)^n \cdot n$	–	–
b.) $a_n = -n!$	streng monoton fallend (ab $n = 1$)	–
c.) $a_n = \frac{3}{10} + \frac{3}{10^2} + \dots + \frac{3}{10^n}$	streng monoton wachsend	$0,3 \leq a_n < \frac{1}{3}$
d.) $a_n = 1 + (-1)^n \frac{1}{n^2}$	–	$0 \leq a_n < \frac{5}{4}$

Satz 1:

Jede konvergente Folge ist beschränkt.

Satz 2:

Jede monotone und beschränkte Folge ist konvergent.

Def. 5:

(a_n) heißt *bestimmt konvergent* gegen $\begin{cases} +\infty \\ -\infty \end{cases}$, falls gilt: $\forall c \in \mathbb{R} \exists n_0(c) \forall n \geq n_0(c) \begin{cases} a_n > c \\ a_n < c \end{cases}$.

Schreibweise: $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \begin{cases} +\infty \\ -\infty \end{cases}$

Bsp. 2:

a.) aus Bsp. 1c.): $a_n = \frac{3}{10} + \dots + \frac{3}{10^n}$, (a_n) monoton wachsend und beschränkt $\Rightarrow (a_n)$ ist konvergent, $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \frac{1}{3}$.

b.) aus Bsp. 1b.): $a_n = -n!$, (a_n) monoton fallend und unbeschränkt $\Rightarrow (a_n)$ ist bestimmt divergent, $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = -\infty$

Diskussion:

Eine divergente Folge, die nicht bestimmt divergent ist, heißt *unbestimmt divergent*.

Bpsw. Folge aus Bsp. 1a.) $a_n = (-1)^n \cdot n$.

Einige wichtige Grenzwerte:

a.) $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = e = 2.71\dots$ (EULERSche Zahl)

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

c.) $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln n}{n} = 0$

d.) $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a} = 1 \quad (a > 0)$

Satz 4: Rechenregeln (Grenzwertsätze)

(a_n) und (b_n) seien zwei konvergente Folgen mit $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$, $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = b$. Dann gilt:

- $\lim_{n \rightarrow \infty} (a_n + b_n) = a + b$
- $\lim_{n \rightarrow \infty} (c \cdot a_n) = c \cdot a$
- $\lim_{n \rightarrow \infty} (a_n \cdot b_n) = a \cdot b$
- $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{a_n}{b_n}\right) = \frac{a}{b} \quad (b_n \neq 0, b \neq 0)$

Bsp. 3:

$$\begin{aligned} \text{a.) } a_n &= \frac{2n^2 - 1}{3n^2 + n} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \\ a_n &= \frac{n^2 \left(2 - \frac{1}{n^2}\right)}{n^2 \left(3 + \frac{1}{n}\right)} = \frac{2 - \frac{1}{n^2}}{3 + \frac{1}{n}} = \frac{\lim_{n \rightarrow \infty} \left(2 - \frac{1}{n^2}\right)}{\lim_{n \rightarrow \infty} \left(3 + \frac{1}{n}\right)} = \frac{2}{3} \end{aligned}$$

Ausklammern der höchsten Potenzen in Zähler und Nenner

$$\begin{aligned} \text{b.) } a_n &= n \cdot \left(\sqrt{n^2 + 1} - n\right) \\ &\text{(in Klammern: „}\infty - \infty\text{“} \curvearrowright \text{Erweitern mit 3. binomischer Formel)} \\ a_n &= \frac{n \cdot \left(\sqrt{n^2 + 1} - n\right) \cdot \left(\sqrt{n^2 + 1} + n\right)}{\left(\sqrt{n^2 + 1} + n\right)} = \frac{n \cdot (n^2 + 1 - n^2)}{n \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n^2}} + n} = \frac{n \cdot 1}{n \left(\sqrt{1 + \frac{1}{n^2}} + 1\right)} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2} \\ \text{oder: } \lim_{n \rightarrow \infty} &= \frac{1}{2} \end{aligned}$$

$$\text{c.) } a_n = \frac{\sin n}{n} \quad \left(0 \leq |a_n| = \frac{|\sin n|}{n} \leq \frac{1}{n} \right) \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$$

Allgemein: (a_n) beschränkt und (b_n) bestimmt divergent $\Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = 0$.

1.2. Lineare Rekursionsgleichungen (Differenzengleichungen)

- Allgemeine Form einer Rekursionsgleichung k -ter Ordnung:

$$x_n = f(n, x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_{n-k}) \quad (k \geq 1, n \geq n_0 + k)$$
- Wir betrachten nur *lineare Rekursionsgleichungen mit konstanten Koeffizienten* (d.h. a_j nicht von n abhängig):

$$x_n = a_1 x_{n-1} + a_2 x_{n-2} + \dots + a_k x_{n-k} + h_n \quad k \geq 1, a_k \neq 0, n \geq n_0 + k$$
 x_n gesucht, $a_1, a_2, \dots, a_k, h_n$ ($n \geq n_0$) bekannt.
- Indexverschiebung möglich:

$$x_{n+k} = a_1 x_{n+k-1} + a_2 x_{n+k-2} + \dots + a_k x_n + h_{n+k} \quad (n \leq n_0)$$
Wichtig ist die Differenz zwischen höchstem und niedrigstem Index von x (=Ordnung der Rekursionsgleichung).
- Da die Größen $x_n, x_{n-1}, x_{n-2}, \dots$ auch durch x_n und die Differenzen $\Delta x_n := x_n - x_{n-1}, \Delta^2 x_n := \Delta x_n - \Delta x_{n-1} = x_n - 2x_{n-1} + x_{n-2}, \dots$ ausgedrückt werden können, ist der Name *Differenzengleichung* sehr verbreitet.
- Die Differenzengleichung (aus erstem Punkt) heißt homogen, falls $h_n = 0$ (für alle n), sonst inhomogen.

Zur Lösung von der Differenzengleichung (aus erstem Punkt oberhalb):

- 1.) Allgemeine Lösung: $x_n = x_n^{(h)} + x_n^{(p)}$, dabei ist $x_n^{(h)}$ die *allgemeine Lösung der zugehörigen homogenen Gleichung* $x_n = a_1 x_{n-1} + \dots + a_k x_{n-k}$ und $x_n^{(p)}$ eine *partikuläre (spezielle) Lösung der inhomogenen Gleichung*.