$\boxed{\text{O}}$: Fragen? Auto-Kalender @RWTHonline
$\boxed{\text{G}}$: Gruppen, Körper
$\boxed{\text{A}}$: Reelle Zahlen, Inf & Sup
$\boxed{\text{LA}}$: Vektorraum, Norm

Globalübung 3 Mathe 1 - CES WS 25

31.10.2025
Lambert Theisen

Gruppe Menge A mit $\circ : A \times A \to A$, $(a,b) \mapsto c := a \circ b \in A$ (Abgeschlossen)

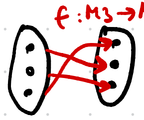
$(A, \circ)$ ist Gruppe falls:
a) $(a \circ b) \circ c = a \circ (b \circ c)$ (Assoziativ)
b) $\exists e \in A : \forall a \in A : a \circ e = e \circ a = a$, $e \,\hat{=}$ neutrales Element
c) $\forall a \in A : \exists a^{-1} \in A : a^{-1} \circ a = e$

Bsp $M_3 = \{1, 2, 3\}$

Aufgabe 4. (Gruppen)
Sei $M_3 = \{1,2,3\}$ und S_3 die Menge aller bijektiven Abbildungen auf M_3. Die Hintereinanderausführung zweier Abbildungen bezeichnen wir mit $\circ$. Zeigen Sie, dass $(S_3, \circ)$ eine Gruppe ist. Die Gruppe S_3 entspricht der Permutationsgruppe von 3 Objekten.

> **Hinweis:** Zeigen Sie zuerst, dass die Verknüpfung bijektiver Abbildungen wieder bijektiv ist.

$f : M_3 \to M_3$

"  " $\in S_3$

Wir haben $|M_3|! = 3! = 3 \cdot 2 \cdot 1 = 6$ Elemente.

$id_{M_3} = \Pi_1 = (1 \to 1, 2 \to 2, 3 \to 3)$
$\Pi_2 = (1 \to 2, 2 \to 1, 3 \to 3)$
$\Pi_3 = (1 \to 1, 2 \to 3, 3 \to 2)$
$\Pi_4 = (1 \mapsto 3, 2 \mapsto 2, 3 \mapsto 1)$
$\Pi_5 = (1 \mapsto 2, 2 \mapsto 3, 3 \mapsto 1)$
$\Pi_6 = (1 \mapsto 3, 2 \mapsto 1, 3 \mapsto 2)$

Abgeschlossenheit $\Pi_i \circ \Pi_j \in S_3$? $\to$ Ja, weil Verknüpfung bijektiver Abbildungen wieder bijektiv.
bijektiv

Beweis: Sei $f : X \to Y$, $g : Y \to Z$ bijektiv. Dann gilt für bel. $x_1, x_2 \in X$

$(g \circ f)(x_1) = (g \circ f)(x_2) \Leftrightarrow g(f(x_1)) = g(f(x_2)) \overset{g \text{ inj.}}{\Rightarrow} f(x_1) = f(x_2) \overset{f \text{ inj.}}{\Rightarrow} x_1 = x_2 \Rightarrow g \circ f$ injektiv. ✓

① g surjektiv, also $\forall z \in Z \; \exists y_0 \in Y$ mit $\overset{\text{Def.}}{} g(y_0) = z$
② f surjektiv, also $\exists x_0 \in X$ sodass $f(x_0) = y_0$

$\Rightarrow \forall z \in Z \; \exists x_0$ mit: $(g \circ f) x_0 \overset{②}{=} g(f(x_0)) \overset{①}{=} g(y_0) = z$ $\Rightarrow g \circ f$ surjektiv ✓

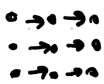
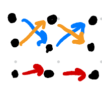
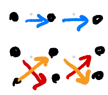
a) **Assoziativität**: $(\circ) \circ = \circ (\circ) \; \forall f, g, h \in S_3$ gilt. ✓

Gilt nämlich sogar allgemeiner: $f : X \to Y$, $g : Y \to Z$, $h : Z \to W$

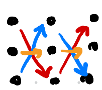
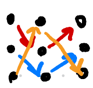
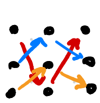
$[(h \circ g) \circ f](x) = [(h \circ g)(f(x))] = h(g(f(x))) = h((g \circ f)(x)) = [h \circ (g \circ f)](x)$

b) **Neutrales Element**: Π_1 denn $\forall i \in \{1, \dots, 6\}$: $\underbrace{\Pi_1}_{id_{M_3}} \circ \Pi_i = \Pi_i \circ \Pi_1 = \Pi_i$

c) **Inverses Element**: $\Pi_1 \circ \Pi_1 = id_{M_3}$, $\Pi_2 \circ \Pi_2 = id_{M_3}$, $\Pi_3 \circ \Pi_3 = id_{M_3}$

$\Pi_4 \circ \Pi_4 = id_{M_3}$, $\Pi_5 \circ \Pi_6 = id$, $\Pi_6 \circ \Pi_5 = id_{M_3}$

$\Rightarrow (S_3, \circ)$ Gruppe ✓

Körper: Menge $\mathbb{K}$ mit $+ : \mathbb{K}\times\mathbb{K} \to \mathbb{K}$, $\cdot : \mathbb{K}\times\mathbb{K} \to \mathbb{K}$. $(\mathbb{K},+,\cdot)$ Körper falls:
(english field, $\mathbb{F}$)

a) $(\mathbb{K},+)$ ist $\underbrace{\text{kommutative}}_{\forall a,b\in\mathbb{K}:\ a+b=b+a}$ Gruppe mit $0\in\mathbb{K}$ als neutrales Element:

b) $(\mathbb{K}\setminus\{0\},\cdot)$ ist kom. Gruppe mit $1\in\mathbb{K}$ als neutrales Element.

c) $\forall x,y,z\in\mathbb{K}$: $x\cdot(y+z) = x\cdot y + x\cdot z$ (Distributivgesetz)

Bsp)

Algebraischer Körper (Abstract Algebra)

Aufgabe. Zeige, dass $\mathbb{Q}(\sqrt{2}) = \{a+b\sqrt{2} \mid a,b\in\mathbb{Q}\}$ ein Körper ist, und bestimme zu $x = a+b\sqrt{2}\neq 0$ das Inverse.

Addition und Multiplikation sind die üblichen von $\mathbb{R}$ induzierten Operationen:

$$(a+b\sqrt{2})+(c+d\sqrt{2}) = (a+c)+(b+d)\sqrt{2},$$
$$(a+b\sqrt{2})(c+d\sqrt{2}) = (ac+2bd)+(ad+bc)\sqrt{2}.$$

$(K,+)$ ist eine kommutative Gruppe (NE $=0$)

- **Abgeschlossenheit:** $a+c\in\mathbb{Q}$, $b+d\in\mathbb{Q}$ ⇒ Summe liegt in K.
- **Assoziativität/Kommutativität:** von $(\mathbb{R},+)$ geerbt, also auch in K.
- **Neutrales Element:** $0 = 0+0\sqrt{2}$. weil $0+(a+b\sqrt{2}) = (a+b\sqrt{2})$
- **Inverses Element:** Zu $x = a+b\sqrt{2}$ ist $-x = (-a)+(-b)\sqrt{2}\in K$. $x+(-x)=0$

Distributivgesetz:

$x(y+z) \overset{!}{=} xy+xz$

einfach für allgemeine x,y,z überprüfen .... stimmt. ✓

$(K\setminus\{0\},\cdot)$ ist eine kommutative Gruppe (NE $=1$)

- **Abgeschlossenheit:** Für $x = a+b\sqrt{2}$, $y = c+d\sqrt{2}$ sind $ac+2bd$, $ad+bc\in\mathbb{Q}$ ⇒ $xy\in K$.
- **Assoziativität/Kommutativität:** von $(\mathbb{R},\cdot)$ geerbt.
- **Neutrales Element:** $1 = 1+0\sqrt{2}$.
- **Inverses Element:** Sei $x = a+b\sqrt{2}\neq 0$. Dann

$$x^{-1} = \frac{a-b\sqrt{2}}{a^2-2b^2}. = \left(\frac{a}{a^2-2b^2}\right)+\left(\frac{-b}{a^2-2b^2}\right)\cdot\sqrt{2}$$

Begründung: $(a+b\sqrt{2})(a-b\sqrt{2}) = a^2-2b^2$. $\Rightarrow x\cdot x^{-1} = 1$
Ist $a^2-2b^2 = 0$ und $b\neq 0$, dann $(a/b)^2 = 2$ — unmöglich für $a/b\in\mathbb{Q}$.
Ist $b=0$, dann $a\neq 0$ (weil $x\neq 0$) und der Nenner $a^2\neq 0$. $x = a+b\sqrt{2}$
Also $a^2-2b^2\neq 0$. Zudem

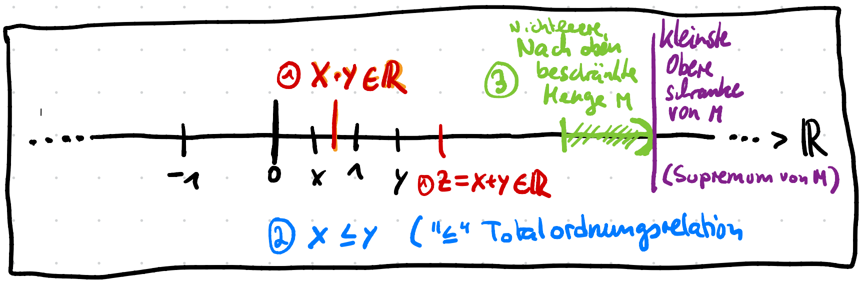
$$x^{-1} = \left(\frac{a}{a^2-2b^2}\right)+\left(\frac{-b}{a^2-2b^2}\right)\sqrt{2}\in K,$$

da Quotienten rationaler Zahlen wieder rational sind.

Nenner a^2-2b^2 wird nicht Null

A: **Reelle Zahlen $\mathbb{R}$** in a Nutshell

⤳ Axiome in der VL
⤳ $\mathbb{R}$ ist Körper & eindeutig



Notation

→ Intervalle: $[a,b] := \{x\in\mathbb{R} : a\le x\le b\}$ $\quad [a,b) := \{x\in\mathbb{R} : a\le x < b\}$
$(a,b) := \{x\in\mathbb{R} : a < x < b\}$ $\quad (a,b] := \{x\in\mathbb{R} : a < x \le b\}$

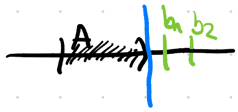
→ Betrag: $|x| := \begin{cases} x & x\geq 0 \\ -x & x<0 \end{cases}$

→ Dreiecksungleichung: Sei $x,y\in\mathbb{R}$: $|x+y|\le|x|+|y|$

Dichtheit von $\mathbb{Q}$ in $\mathbb{R}$: Für zwei reelle Zahlen $a,b\in\mathbb{R}$ mit $a<b$ existiert immer eine rationale Zahl $r=\frac{m}{n}$ mit $a<r<b$.
⇒ Jede reelle Zahl kann bel. gut mit rationalen Zahlen approximiert werden.

Supremum / Infimum : $A \subset \mathbb{R}$ heißt nach oben beschränkt falls $\exists$ eine obere Schranke $b \in \mathbb{R}$ mit $a \leq b$, $\forall a \in A$.

Supremum: kleinste obere Schranke $s \leq b$ $\forall$ anderen oberen Schranken



Infimum: größte untere Schranke (analog)

Maximum: Falls $\sup(A) \in A \Rightarrow \max(A) = \sup(A)$

Minimum: Falls $\inf(A) \in A \Rightarrow \min(A) = \inf(A)$

Bsp: $A = [-5,3)$, $\inf(A) = -5 \in A \Rightarrow \min(A) = -5$
$\sup(A) = 3 \notin A \Rightarrow \max(A)$ existiert nicht.

$\max(A) = 2{,}99$
$< 2{,}999$

Bsp:

Aufgabe 3. (Supremum und Infimum)
Bestimmen Sie, falls möglich, Supremum und Infimum der folgenden Mengen:

$$M_1 := \{1 + (-1)^n : n \in \mathbb{N}\}$$
$$M_2 := \{x \in \mathbb{R} : x^2 + x + 1 \geq 0\}$$
$$M_3 := \{x \in \mathbb{Q} : x^2 < 9\}$$
$$M_4 := \{2^{-m} + n^{-1} : m, n \in \mathbb{N}\}$$

Handelt es sich dabei auch um Maximum bzw. Minimum der Mengen?

a) Sei $a \in M_1 \overset{\text{Def.}}{\Rightarrow} \exists n \in \mathbb{N}$ sodass $a = 1 + (-1)^n \begin{cases} \text{I) } n \text{ gerade} \Rightarrow a = 2 \\ \text{II) } n \text{ ungerade} \Rightarrow a = 0 \end{cases} \Rightarrow M_1 = \{0, 2\}$

$\Rightarrow \min M_1 = \inf M_1 = 0$, $\max M_2 = \sup M_2 = 2$

b) $x^2 + x + 1 \geq 0 \iff \underbrace{(x + \tfrac{1}{2})^2}_{\geq 0} + \underbrace{\tfrac{3}{4}}_{> 0} \geq 0$ gilt $\forall x \in \mathbb{R} \Rightarrow M_2 = \mathbb{R} \Rightarrow$ kein Sup/Inf und erst recht kein Min/Max

c) $x^2 < 9 \iff |x| < 3 \Rightarrow M_3 = (-3,3) \cap \mathbb{Q}$

weil Satz

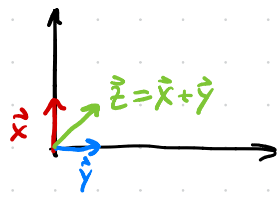
Also $\inf((-3,3)) = -3$, $\sup((-3,3)) = 3$ $\overset{\mathbb{Q} \text{ dicht in } \mathbb{R}}{\Rightarrow}$ $\inf(M_3) = \inf((-3,3)) = -3 \notin M_3$
$\sup(M_3) = 3 \notin M_3$ $\Rightarrow$ Es existiert kein Min/Max

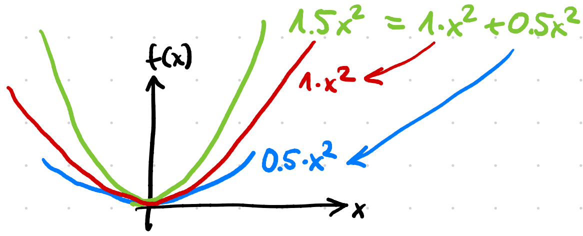
d) $\frac{1}{2^m} + \frac{1}{n} \geq 0$ $\forall n, m \in \mathbb{N} = \{1,2,3,\dots\}$, $\frac{1}{2^1} > \frac{1}{2^2} > \dots$ & $\frac{1}{1} > \frac{1}{2} > \frac{1}{3} > \dots$ (monoton fallend)

$\Rightarrow a = \frac{1}{2^m} + \frac{1}{n} \leq \frac{1}{2} + \frac{1}{1} = 3/2$. Weil $\frac{3}{2} \in M_4 \Rightarrow \sup(M_4) = \max(M_4) = \frac{3}{2}$

Weil $\frac{1}{2^m} + \frac{1}{n} \to 0$ für $n, m \to \infty$ gilt $\inf(M_4) = 0$. $0 \notin M_4 \Rightarrow$ kein Minimum.

LA Lineare Algebra: ⇝ Was heißt "Vektor"?





Vektorraum: Menge V zsm. mit Körper $\mathbb{K}$ heißt Vektorraum falls:

a) $(V,+)$ ist kommutative Gruppe

b) Es gibt $\begin{cases} "\bullet": \mathbb{K} \times V \to V \\ (\alpha, v) \mapsto \alpha v \end{cases}$ mit

Skalar (α), Vektor (v)

Mult. in $\mathbb{K}$

$(\alpha \cdot \beta) \bullet v = \alpha \bullet (\beta \bullet v)$ (Assoziativ)

$(\alpha + \beta) \bullet v = \alpha \bullet v + \beta \bullet v$

$\alpha \bullet (v + w) = \alpha \bullet v + \alpha \bullet w$

$1 \bullet v = v$

→ $\bullet : \mathbb{K} \times V$ ist skalare Multiplikation

→ $\vec{0} \in V$ (oder 0_V) ist neutrales Element in $(V,+)$

Bsp:

Aufgabe

Entscheiden Sie jeweils, ob die angegebene Struktur ein Vektorraum über $\mathbb{R}$ ist. Begründen Sie kurz.

1. $U := \{(x,y,z) \in \mathbb{R}^3 \mid x - y + 2z = 0\}$ mit **üblichen** Verknüpfungen.
2. $V := \mathbb{R}^2$ mit **üblicher** Addition, aber modifizierter Skalarmultiplikation

$$\alpha \odot (x,y) := (\alpha x,\ \alpha y + (\alpha - 1)).$$

1) Nullvektor $\begin{pmatrix}0\\0\\0\end{pmatrix} \in U$ weil $0 - 0 + 2\cdot 0 = 0$ ✓

Abschluss Addition: $u = \begin{pmatrix}x\\y\\z\end{pmatrix}$, $u' = \begin{pmatrix}x'\\y'\\z'\end{pmatrix} \in U$, $u + u' = \begin{pmatrix}x+x'\\y+y'\\z+z'\end{pmatrix}$ wieder $\in U$ weil:

es gilt $(x+x') - (y+y') + 2(z+z') = \underbrace{(x - y + 2z)}_{=0,\ u \in U} + \underbrace{(x' - y' + 2z')}_{=0 \text{ weil } u' \in U} = 0$ ✓

Abschluss Skalare Multipl.: Für $\alpha \in \mathbb{R}, u \in U$: $\alpha u = \begin{pmatrix}\alpha x\\\alpha y\\\alpha z\end{pmatrix}$ mit $\alpha x - \alpha y + 2\alpha z = \alpha(x - y + 2z) = 0$

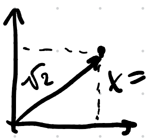
2) $0 \odot (x,y) = (0\cdot x, 0y + (0-1)) = (0,-1) \neq (0,0)$ ⇒ kein Vektorraum weil $0_V \overset{!}{=} 0 \cdot x$

Norm: $\|\cdot\| : V \to \mathbb{R}_{\geq 0}$ ist Norm falls:

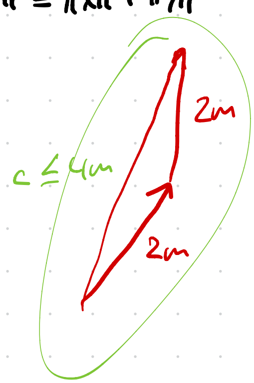
a) $\forall x \in V$: $\|x\| \geq 0$ und $\|x\| = 0 \Leftrightarrow x = 0_V$ (Nullvektor)

b) $\forall \alpha \in \mathbb{R}$: $\forall x \in V$: $\|\alpha \cdot x\| = |\alpha| \cdot \|x\|$

c) $\forall x, y \in V$: $\|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|$



$x = \begin{pmatrix}1\\1\end{pmatrix}$ $\|x\|_2 = \sqrt{1^2 + 1^2} = \sqrt{2}$



Bsp.:

Aufgabe 75. (Normen)

a) Berechnen sie die euklidische Norm $\| \cdot \|_2$, die Maximumsnorm $\| \cdot \|_\infty$ und die Betragssummennorm (1-Norm) $\| \cdot \|_1$ der folgenden Vektoren:

$$\vec{a} := \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \\ 5 \end{pmatrix}, \quad \vec{b} := \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \vec{c} := \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \vec{d} := \begin{pmatrix} 0 \\ -4 \\ 3 \end{pmatrix}.$$

Was fällt Ihnen auf?

$$\|\vec{a}\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^{3} |a_i|^2} = \sqrt{2^2 + (-1)^2 + 5^2} = \ldots = \sqrt{30}$$

$$\|\vec{a}\|_\infty = \max_{i \in \{1,..3\}} |a_i| = \max(\{ |a_i| : 1 \leq i \leq 3 \}) = 5$$

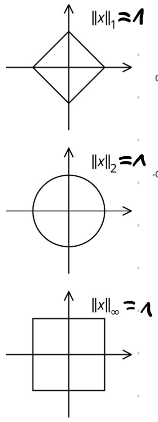
$$\|\vec{a}\|_1 = \sum_{i=1}^{3} |a_i| = |2| + |-1| + |5| = 8$$

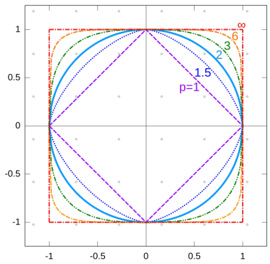
$\vec{b} \;\hat{=}$ Einheitsvektor $\Rightarrow \|b\|_2 = \|b\|_\infty = \|b\|_1 = 1$

$\vec{c}, \vec{d}$ analog...

Es fällt auf $\|x\|_1 \leq \|x\|_2 \leq \|x\|_\infty$

$\rightsquigarrow$ Normäquivalenzen





(p-Normen)

$$\|x\|_p := \sqrt[p]{\sum_{i=1}^{n} |x_i|^p}$$