Algebra 1

Vid Drobnič

Kazalo

1 Vektorji v trirazsežnem prostoru

$\mathcal{P}$ - prostor
$T \in \mathcal{P}$ - točka

$A, B \in \mathcal{P}$
$\overrightarrow{AB}$ - usmerjena daljica

Formalno: $\overrightarrow{AB} = (A, B) \in \mathcal{P} \times \mathcal{P}$ (urejen par)

Ekvivalentnost usmerjenih daljic:

$\overrightarrow{CD} \sim \overrightarrow{AB}$, kadar je $\overrightarrow{AB}$ z vzporednim premikom mogoče premakniti v $\overrightarrow{CD}$.

- $|AB| = |CD|$ (dolžini daljic sta enaki)
- imata isto smer (če potegnemo premico čez izhodišča daljic (AC), morata biti točki B in D na istem "bregu" te premice)
- $AB \parallel CD$ (premici skozi točke sta vzporedni)

$$\overrightarrow{CD} \sim \overrightarrow{AB} \iff \overrightarrow{AB} \sim \overrightarrow{CD}$$

Def: Vektor $\vec{AB}$ je množica $\vec{AB} = \{\overrightarrow{XY} : \overrightarrow{XY} \sim \overrightarrow{AB}\}$ (usmerjene daljice ekvivalentne daljici $\overrightarrow{AB}$)

- *ničelni vektor:* $\vec{AA} = \vec{0}$
- *nasprotni vektor* vektorja $\vec{AB}$ je $\vec{BA}$ ($\vec{BA} = -\vec{AB}$)

Dodatna oznaka: $\vec{a}$, $-\vec{a}$ nasprotni vektor

$V = \{\vec{v} : \vec{v} \text{ vektor}\}$ - *vektorski prostor.*

$O \in \mathcal{P}$; O fiksiramo (izberemo si neko točko v prostoru, ki jo fiksiramo)

$$f : \mathcal{P} \to V$$
$$f(T) = \vec{OT}$$

f je bijekcija (vsaki točki priredi natanko en vektor).
$\vec{a} = \vec{OT}$

1.1 Operacije z vektorji

Seštevanje:

$$\vec{a}, \vec{b} \in V$$
$$\vec{a} = \vec{AB}, \vec{b} = \vec{BC}$$
$$\vec{a} + \vec{b} = \vec{AC}$$
$$\vec{AB} + \vec{BC} = \vec{AC}$$

Lastnosti:[1]

(1) $(\vec{a} + \vec{b}) + \vec{c} = \vec{a} + (\vec{b} + \vec{c})$ asociativnost

(2) $\vec{a} + \vec{b} = \vec{b} + \vec{a}$ komutativnost

(3) $\vec{a} + \vec{0} = \vec{a}$

(4) $\vec{a} + (-\vec{a}) = \vec{0}$

Za lastnosti od (1) do (4) = $(V, +)$ **Abelova grupa**.

Razliko dveh vektorjev definiramo tako:

$$\vec{a} - \vec{b} := \vec{a} + (-\vec{b})$$

Množenje s skalarjem

Skalar je realno število.

$$\vec{a}, \alpha \in \mathbb{R}$$

$\alpha\vec{a}$ je vektor.

- ima isto smer kot $\vec{a}$ za $\alpha > 0$
- ima nasprotno smer kot $\vec{a}$ za $\alpha < 0$
- $|\alpha\vec{a}| = |\alpha||\vec{a}|$

[1]Dokaz lastnosti (1) in (2) s skico.

$$\vec{a} = \vec{OA} \neq \vec{0}$$
$$\alpha\vec{a} = \vec{OT}, O, A, T \text{ so na isti premici}$$

S tem uvedemo koordinatni sistem na premici OA.

LASTNOSTI:

(5) $\alpha(\beta\vec{a}) = (\alpha\beta)\vec{a}$

(6) $(\alpha + \beta)\vec{a} = \alpha\vec{a} + \beta\vec{a}$

(7) $\alpha(\vec{a}\vec{b}) = \alpha\vec{a} + \alpha\vec{b}$

(8) $1 \cdot \vec{a} = \vec{a}$

$V, +$ in množenje s skalaji je **vektorski prostor**: veljajo lastnosti od (1) do (8).

1.2 Linearna neodvisnost

$$\vec{a}, \vec{b} \in V$$

$\vec{a}, \vec{b}$ sta linearno odvisna kadar je:
bodisi $\vec{b} = \alpha\vec{a}$ za ustrezen $\alpha \in \mathbb{R}$,
bodisi $\vec{a} = \beta\vec{b}$ za ustrezen $\beta \in \mathbb{R}$.

V nasprotnem primeru sta $\vec{a}$ in $\vec{b}$ linearno neodvisna.

$$\vec{a} = \vec{OA}, \vec{b} = \vec{OB}$$

1. $\vec{OA}$ in $\vec{OB}$ sta linearno odvisna $\Leftrightarrow$ O, A, B kolinearne (ležijo na isti premici).
2. $\vec{a}, \vec{b}$ sta linearno neodvisna $\Leftrightarrow$ $(\alpha\vec{a} + \beta\vec{b} = \vec{0} \Rightarrow \alpha = \beta = 0)$

Privzamemo da sta $\vec{a}, \vec{b}$ linearno neodvisna:

$$\{T : \vec{OT} = \alpha\vec{a} + \beta\vec{b}, \alpha, \beta \in \mathbb{R}\} = \mathcal{R}$$

$\alpha\vec{a} + \beta\vec{b}$ - linearna kombinacija
$\mathcal{R}$ - ravnina določena z O, A, B (z vektorji $\vec{a}, \vec{b}$) in točko O.

$$\vec{r} = \vec{OT}, T \in \mathcal{R}$$
$$\exists \alpha, \beta \in \mathbb{R} : \vec{r} = \alpha\vec{a} + \beta\vec{b}$$

Pri tem sta α in β enolično določena skalarja.

V $\mathcal{R}$ smo z vektorjema $\vec{a}, \vec{b}$ vpeljali koordinatni sistem.

$\vec{a}, \vec{b}, \vec{c} \in V$ so linearno odvisni, kadar je vsaj eden od njih linearna kombinacija drugih dveh.
npr: $\vec{c} = \alpha\vec{a} + \beta\vec{b}$

V nasprotnem primeru so $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ linearno neodvisni.

1. $\vec{a} = \vec{OA}, \vec{b} = \vec{OB}, \vec{c} = \vec{OC}$ so linearno odvisni $\Leftrightarrow O, A, B, C$ koplanarne (ležijo na isti ravnini)

2. $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ so linearno neodvisni $\Leftrightarrow (\alpha\vec{a} + \beta\vec{b} + \gamma\vec{c} = \vec{0} \Rightarrow \alpha = \beta = \gamma = 0)$

$\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ linearno neodvisni

$\vec{a} = \vec{OA}$
$\vec{b} = \vec{OB}$
$\vec{c} = \vec{OC}$

$$V = \{\alpha\vec{a} + \beta\vec{b} + \gamma\vec{c} : \alpha, \beta, \gamma \in \mathbb{R}\}$$

$\alpha\vec{a} + \beta\vec{b} + \gamma\vec{c}$ je linearna kombinacija vektorjev $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$.

V - množica vseh vektorjev prostora $\mathcal{P}$

$$\mathcal{P} = \{R \in \mathcal{P} : \vec{OR} = \alpha\vec{a} + \beta\vec{b} + \gamma\vec{c}, \alpha, \beta, \gamma \in \mathbb{R}\}$$

DODATEK: V zapisu vektorja $\vec{r} \in V$: $\vec{r} = \alpha\vec{a} + \beta\vec{b} + \gamma\vec{c}$, so koeficienti α, β, γ enolično določeni.

Dokaz: Recimo, da lahko vektor $\vec{r}$ izrazimo na 2 različna načina:

$$\begin{aligned}
\vec{r} &= \alpha\vec{a} + \beta\vec{b} + \gamma\vec{c} \\
\vec{r} &= \alpha_1\vec{a} + \beta_1\vec{b} + \gamma_1\vec{c} \\
\Rightarrow \alpha\vec{a} + \beta\vec{b} + \gamma\vec{c} &= \alpha_1\vec{a} + \beta_1\vec{b} + \gamma_1\vec{c}
\end{aligned}$$

$$(\alpha - \alpha_1)\vec{a} + (\beta - \beta_1)\vec{b} + (\gamma - \gamma_1)\vec{c} = \vec{0}$$

$$\vec{a}, \vec{b}, \vec{c} \text{ linearno neodvisni } \Rightarrow \alpha - \alpha_1 = \beta - \beta_1 = \gamma - \gamma_1 = 0$$

$$\alpha = \alpha_1, \beta = \beta_1, \gamma = \gamma_1$$

$\{\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}\}$ je **baza** vektorskega prostora V. $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ so linearno neodvisni.

$R \in \mathcal{P}$ (O - fiksirana točka) $\vec{OR} = \alpha\vec{a} + \beta\vec{b} + \gamma\vec{c}$

$$R \mapsto (\alpha, \beta, \gamma) \in \mathbb{R}^3 = \{(x, y, z) : x, y, x \in \mathbb{R}\}$$

Urejena trojica (α, β, γ) je s točko R enolično določena.
α, β, γ so koordinate točke R glede na koordinaten sistem, ki je določen z bazo $\{\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}\}$ in točko O (izhodišče koordinatnega sistema).

Imena koordinat: abscisa, ordinata, aplikata

$$\varphi : V \to \mathbb{R}^3$$
$$\vec{r} \mapsto (\alpha, \beta, \gamma); \vec{r} = \alpha\vec{a} + \beta\vec{b} + \gamma\vec{c}$$

φ je bijekcija.

S φ prenesemo operaciji seštevanja vektorjev in množenja vektorjev s skalarji iz V v $\mathbb{R}^3$.

$$\begin{aligned}
&\vec{r_1}, \vec{r_2} \in V \\
&\quad \vec{r_1} = \alpha_1\vec{a} + \beta_1\vec{b} + \gamma_1\vec{c} \\
&\quad \vec{r_2} = \alpha_2\vec{a} + \beta_2\vec{b} + \gamma_2\vec{c} \\
&\varphi(\vec{r_1}) = (\alpha_1, \beta_1, \gamma_1) \\
&\varphi(\vec{r_2}) = (\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)
\end{aligned}$$

$$\vec{r_1} + \vec{r_2} = (\alpha_1 + \alpha_2)\vec{a} + (\beta_1 + \beta_2)\vec{b} + (\gamma_1 + \gamma_2)\vec{c}$$
$$\varphi(\vec{r_1} + \vec{r_2}) = (\alpha_1 + \alpha_2, \beta_1 + \beta_2, \gamma_1 + \gamma_2)$$

Torej velja:

$$(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1) + (\alpha_2, \beta_2, \gamma_2) = (\alpha_1 + \alpha_2, \beta_1 + \beta_2, \gamma_1 + \gamma_2)$$

seštevanje je definirano po komponentah.

Podobno velja za množenje s skalarji:

$$\lambda(\alpha, \beta, \gamma) = (\lambda\alpha, \lambda\beta, \lambda\gamma)$$

$\mathbb{R}^3$ je za te operaciji **vektorski prostor** (zadošča A1-A8).

$$\begin{aligned} \varphi(\vec{a}) &= (1, 0, 0) \\ \varphi(\vec{b}) &= (0, 1, 0) \\ \varphi(\vec{c}) &= (0, 0, 1) \end{aligned}$$

$$\{(1, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 0, 1)\}$$

je **standardna baza** vektorskega prostora $\mathbb{R}^3$.

$$(\alpha, \beta, \gamma) = \alpha(1, 0, 0) + \beta(0, 1, 0) + \gamma(0, 0, 1)$$

OZNAKE:

$$\begin{aligned} \vec{i} &= (1, 0, 0) \\ \vec{j} &= (0, 1, 0) \\ \vec{k} &= (0, 0, 1) \end{aligned}$$

Dodatna zahteva za standardno bazo vektorskega prostora $\mathbb{R}^3$: baza je **ortonormirana**, torej:

- $|\vec{i}| = |\vec{j}| = |\vec{k}| = 1$
- $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ so paroma pravokotni.

Opomba: Po dogovoru je trojica $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ pozitivno orientirana (pri določanju orientacije si v 3D koordinatnem sistemu pomagamo z pravilom desnega vijaka).

1.3 Skalarni produkt

$\vec{a}, \vec{b} \in V$
Kot med njima je $\varphi, 0 \leq \varphi \leq \pi$

Definicija $\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cos \varphi$

V **identificiramo**[2] z $\mathbb{R}^3$ (glede na standardno bazo in dano izhodišče O).

$$\begin{aligned} O &= (0,0,0) \\ \vec{i} &= (1,0,0) \\ \vec{j} &= (0,1,0) \\ \vec{k} &= (0,0,1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \vec{a} &= (a_1, a_2, a_3) \in \mathbb{R}^3 \\ \vec{b} &= (b_1, b_2, b_3) \in \mathbb{R}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \vec{a} \cdot \vec{b} &= ? \\ \vec{a} = (a_1, a_2, a_3) &= \vec{OA} \\ |\vec{a}| = |OA| &= \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2} \\ d(A,B) &= \sqrt{(a_1 - b_1)^2 + (a_2 - b_2)^2 + (a_3 - b_3)^2} \end{aligned}$$

Kosinusni izrek:

$$(\vec{a} - \vec{b})^2 = |\vec{a}|^2 + |\vec{b}|^2 - 2|\vec{a}||\vec{b}| \cos \varphi$$

$$(a_1 - b_1)^2 + (a_2 - b_2)^2 + (a_3 - b_3)^2 = a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 - 2|\vec{a}||\vec{b}| \cos \varphi$$
$$\Rightarrow |\vec{a}||\vec{b}| \cos \varphi = a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3$$

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3$$

Lastnosti:

(1) $\vec{a}\vec{a} = |\vec{a}|^2 \geq 0$ (enačaj le za $\vec{a} = \vec{0}$)

(2) $(\vec{a} + \vec{b})\vec{c} = \vec{a}\vec{c} + \vec{b}\vec{c}$

[2] Prej smo vse izpeljevali za splošen vektorski prostor, sedaj pa za V vzamemo $\mathbb{R}^3$.

(3) $(\alpha\vec{a})\vec{b} = \alpha(\vec{a}\vec{b})$

(4) $\vec{a}\vec{b} = \vec{b}\vec{a}$

$$\vec{a}\perp\vec{b} \Leftrightarrow \varphi\frac{\pi}{2}, \vec{a} \neq \vec{0}, \vec{b} \neq \vec{0}$$
$$\varphi = \frac{\pi}{2} \Leftrightarrow \cos\varphi = 0 (0 \leq \varphi \leq \pi)$$
$$\vec{a}\perp\vec{b} \Leftrightarrow \vec{a} \cdot \vec{b} = 0$$

Primer:

$$\mathbb{R}^3 \equiv \mathbb{R}^2 \times \{0\}$$
$$\vec{a} = (a_1, a_2, 0)$$
$$\vec{a} \text{ v } \mathbb{R}^2 : \vec{a} = (a_1, a_2)$$
$$\vec{a}\vec{b} = a_1b_1 + a_2b_2$$

p - ploščina paralelograma
p si želimo izraziti z a_1, a_2, b_1, b_2

$$p = |\vec{a}||\vec{b}|\sin\varphi$$

$$\vec{a'}\perp\vec{a}$$
$$|\vec{a'}| = |\vec{a}|$$

$\vec{a}, \vec{a'}$ pozitivno orientirana
$\vec{a'} = (-a_2, a_1)$
$\psi = \frac{\pi}{2} - \varphi$ ali $\varphi - \frac{\pi}{2}$ če je orienacija $(\vec{a}, \vec{b})$ pozitivna.

$$|\vec{a}||\vec{b}|\sin\varphi = |\vec{a}||\vec{b}|\cos\theta = \vec{a'}\vec{b} = (-a2, a_1) \cdot (b_1, b_2) = a_1b_2 - a_2b_1$$

$p = a_1b_2 - a_2b_1$, če je orientacija $\vec{a}, \vec{b}$ pozitivna, če pa je negativna velja: $p = -(a_1b_2 - a_2b_1)$

1.4 Vektorski produkt

Vzamemo vektorja $\vec{a}, \vec{b}$ iz prostora. Njun vektorski produkt označimo:

$$\vec{a} \times \vec{b}$$

(1) $\vec{a} \times \vec{b}$ je pravokoten na $\vec{a}$ in $\vec{b}$.

(2) $|\vec{a} \times \vec{b}|$ je enaka ploščini paralelograma, ki ga določata $\vec{a}$ in $\vec{b}$. ($= 0$, kadar sta $\vec{a}$ in $\vec{b}$ linearno odvisna)

(3) Urejena trojica $(\vec{a}, \vec{b}, \vec{a} \times \vec{b})$ je pozitivno orientirana.

$$
\begin{aligned}
\vec{a} &= (a_1, a_2, a_3) \\
\vec{b} &= (b_1, b_2, b_3) \\
\vec{a} \times \vec{b} &= (x, y, z)
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
\vec{k} &= (0, 0, 1) \\
z &= (\vec{a} \times \vec{b}) \cdot \vec{k} = \\
&= |\vec{a} \times \vec{b}||\vec{k}| \cos \delta = \\
&= p \cos \delta
\end{aligned}
$$

p - ploščina paralelograma, ki ga določata vektorja $\vec{a}$ in $\vec{b}$
δ - kot med ravninama, ki ju določata osi (1),(2) in vektorja $\vec{a}, \vec{b}$.

$$
\begin{aligned}
\vec{a'} &= (a_1, a_2, 0) \\
\vec{b'} &= (b_1, b_2, 0) \\
p' &= \pm(a_1 b_2 - a_2 b_1)
\end{aligned}
$$

p' je ploščina paralelograma, ki ga določata pravokotni projekciji vektorjev $\vec{a}$ in $\vec{b}$ na ravnino $(\vec{i}, \vec{j})$, tj. ploščina paralelograma, ki ga določata vektorja $\vec{a'}$ in $\vec{b'}$.

p' ima predznak $+$, kadar sta $\vec{a'}$ in $\vec{b'}$ pozitivno orientirana, ter $-$, kadar sta negativno orientirana.

$$p' = \pm p \cos \delta$$

$+$ kadar: $0 \leq \delta \leq \frac{\pi}{2}$
$-$ kadar: $\frac{\pi}{2} \leq \delta \leq \pi$

$$z = \pm p' = a_1 b_2 - a_2 b_1$$

$\pm$ se izniči, ker se predznak, ki nastane zaradi cos in predznak, ki nastane pri izračunu ploščine paralelograma z vektorjema ujemata.

$$
\begin{aligned}
x &= a_2 b_3 - a_3 b_2 \\
y &= a_3 b_1 - a_1 b_3
\end{aligned}
$$

$$\vec{a} \times \vec{b} = (a_2b_3 - a_3b_2, a_3b_1 - a_1b_3, a_1b_2 - a_2b_1)$$
$$\begin{vmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{vmatrix} = \alpha\delta - \beta\gamma$$
determinanta (reda 2)
$$\vec{a} \times \vec{b} = \left(\begin{vmatrix} a_2 & a_3 \\ b_2 & b_3 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} a_3 & a_1 \\ b_3 & b_1 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{vmatrix} \right)$$
$$\begin{vmatrix} a_3 & a_1 \\ b_3 & b_1 \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ b_1 & b_3 \end{vmatrix}$$
$$\vec{a} \times \vec{b} = \begin{vmatrix} a_2 & a_3 \\ b_2 & b_3 \end{vmatrix} \vec{i} + \begin{vmatrix} a_3 & a_1 \\ b_3 & b_1 \end{vmatrix} \vec{j} + \begin{vmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{vmatrix} \vec{k}$$
$$\vec{a} \times \vec{b} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \end{vmatrix}$$

Lastnosti:

- $(\alpha\vec{a}) \times \vec{b} = \alpha(\vec{a} \times \vec{b}), \forall \alpha \in \mathbb{R}$
- $(\vec{a} + \vec{b}) \times \vec{c} = \vec{a} \times \vec{c} + \vec{b} \times \vec{c}$
- $\vec{c} \times (\vec{a} + \vec{b}) = \vec{c} \times \vec{a} + \vec{c} \times \vec{b}$
- $\vec{a} \times \vec{b} = -\vec{b} \times \vec{a}$

$\vec{a}, \vec{b}$ linearno neodvisna $\Rightarrow \{\vec{a}, \vec{b}, \vec{a} \times \vec{b}\}$ je baza.
$$\vec{r} = \alpha\vec{a} + \beta\vec{b} + \gamma(\vec{a} \times \vec{b})$$
Poseben primer:
$$|\vec{a}| = |\vec{b}| = 1, \vec{a} \cdot \vec{b} = 0 (\vec{a} \perp \vec{b})$$
$\Rightarrow \{\vec{a}, \vec{b}, \vec{a} \times \vec{b}\}$ je ortonormirana baza.
$$\vec{r} = \alpha\vec{a} + \beta\vec{b} + \gamma(\vec{a} \times \vec{b}) / \cdot \vec{a} \text{ (ali } \vec{b}, \vec{c})$$
$$\vec{r} \cdot \vec{a} = \alpha$$
$$\vec{r} \cdot \vec{b} = \beta$$
$$\vec{r} \cdot (\vec{a} \times \vec{b}) = \gamma$$

$$
\begin{aligned}
(|\vec{a} \times \vec{b}|)^2 &= (|\vec{a}||\vec{b}| \sin\varphi)^2 \\
(\vec{a} \cdot \vec{b})^2 &= (|\vec{a}||\vec{b}| \cos\varphi)^2 \\
\Rightarrow |\vec{a} \times \vec{b}|^2 + (\vec{a} \cdot \vec{b})^2 &= |\vec{a}|^2 \cdot |\vec{b}|^2
\end{aligned}
$$

1.5 Mešani produkt

$(\vec{a} \times \vec{b}) \cdot \vec{c}$

Paralelepiped je prizma, ki ima za osnovno ploskev paralelogram. V - prostornina pralelepipeda

$$
\begin{aligned}
P &= |\vec{a} \times \vec{b}| \\
V &= |\vec{a} \times \vec{b}| \cdot v \\
v &= \pm|\vec{c}| \cos\delta \\
V &= \pm|\vec{a} \times \vec{b}||\vec{c}| \cos\delta = \\
&= \pm(\vec{a} \times \vec{b}) \cdot \vec{c} \\
(\vec{a} \times \vec{b}) \cdot \vec{c} &= \pm V
\end{aligned}
$$

$+$: $(\vec{a}, \vec{b}, \vec{c})$ pozitivno orienirani
$-$: $(\vec{a}, \vec{b}, \vec{c})$ negativno orientirani $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ linearno odvisni $\Leftrightarrow (\vec{a} \times \vec{b})\vec{c} = 0$.

Orientacija se pri cikličnih zamenjavah ohrani:

$$(\vec{a} \times \vec{b})\vec{c} = (\vec{b} \times \vec{c})\vec{a} = \vec{a}(\vec{b} \times \vec{c})$$

$$(\vec{a} \times \vec{b})\vec{c} = \vec{a}(\vec{b} \times \vec{c}) = [\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}]$$

$$
\begin{aligned}
\vec{a} &= (a_1, a_2, a_3) \\
\vec{b} &= (b_1, b_2, b_3) \\
\vec{c} &= (c_1, c_2, c_3)
\end{aligned}
$$

$$[\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}] = \vec{a}(\vec{b} \times \vec{c}) = a_1 e_1 + a_2 e_2 + a_3 e_3 =$$

$$\begin{vmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{vmatrix} \equiv a_1 \begin{vmatrix} b_2 & b_3 \\ c_2 & c_3 \end{vmatrix} - a_2 \begin{vmatrix} b_1 & b_3 \\ c_1 & c_3 \end{vmatrix} + a_3 \begin{vmatrix} b_1 & b_2 \\ c_1 & c_2 \end{vmatrix}$$

$$[\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}] = \begin{vmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{vmatrix}$$

1.6 Dvojni vektorski produkt

$$(\vec{a} \times \vec{b}) \times \vec{c} = \vec{e} = ?$$

$$\vec{e} \perp \vec{a} \times \vec{b}$$
$$\vec{e} \perp \vec{c}$$

$\vec{a}, \vec{b}$ linearno neodvisna $\Rightarrow \vec{e} = \alpha\vec{a} + \beta\vec{b}$.
$\vec{e} \cdot \vec{c} = 0$

$$\alpha(\vec{a}\vec{c}) + \beta(\vec{b}\vec{c}) = 0$$

$$\beta = \lambda\vec{a}\vec{c}$$
$$\alpha = -\lambda\vec{b}\vec{c}$$

$$\vec{e} = \lambda(\vec{b}\vec{c})\vec{a} + \lambda(\vec{a}\vec{c})\vec{b}$$
$$\vec{e} = \lambda(-(\vec{b}\vec{c})\vec{a} + (\vec{a}\vec{c})\vec{b})$$

Če razpišemo po komponentah dobimo $\lambda = 1$.

$$(\vec{a} \times \vec{b}) \times \vec{c} = -(\vec{b}\vec{c})\vec{a} + (\vec{a}\vec{c})\vec{b}$$

2 Analitična geomterija v $\mathbb{R}^3$

2.1 Premica

p podana s točko R_0 na njej in *smernim vektorjem* $\vec{e}$.

$\vec{r_0} = \vec{OR_0} = (x_0, y_0, z_0)$
$R \in p$
$\vec{r} = \vec{OR} = (x, y, z)$

Koorinatizirali smo premico.

$$\vec{R_0R} = \vec{r} - \vec{r_0}$$

$$\vec{r} = \vec{r_0} + \lambda\vec{e}, \lambda \in \mathbb{R}$$

Enačba premice p (vektorska parametrična) (λ je parameter)

$$\vec{e} = (a, b, c)$$

$$\begin{aligned} x &= x_0 + \lambda a \\ y &= y_0 + \lambda b \\ z &= z_0 + \lambda c \end{aligned}$$

(Parametrična) enačba premice.

$$\frac{x - x_0}{a} = \frac{y - y_0}{b} = \frac{z - z_0}{c}$$

enačba premice (brez parametra)

$a = 0$?

$$\frac{x - x_0}{0} \equiv (x = x_0 \text{ ali a}x - x_0 = 0)$$

Podobno za $b = 0$ in $c = 0$.

$\vec{R_0R}, \vec{e}$ linearno odvisna $\Leftrightarrow R \in p$

To je kadar: $\vec{R_0R} \times \vec{e} = \vec{0} \Leftrightarrow (\vec{r} - \vec{r_0}) \times \vec{e} = \vec{e} \times (\vec{r} - \vec{r_0}) = \vec{0}$
(vektorska enačba premice)

Če imamo točko R_1 izven premice, je razdalja med premico p in to točko enaka:

$$\Delta = |\vec{r_1} - \vec{r_0}| \sin \varphi$$

To enačbo lahko preoblikujemo da dobimo:

$$\Delta = \frac{|\vec{e} \times (\vec{r_1} - \vec{r_0})|}{|\vec{e}|}$$

To je posebej ugodno, kadar $|\vec{e}| = 1$, saj iz tega sledi $\Delta = |\vec{e} \times (\vec{r_1} - \vec{r_0})|$.

Razdaljo med točko in premico lahko zapišemo tudi kot: $\Delta = d(R_1, p)$.

2.2 Ravnina

Da določimo ravnino Σ, potrebujemo točko $R_0 \in \Sigma$ in vektor normale $\vec{n}$, kjer $\vec{n} \perp \Sigma$ in $\vec{n} \neq \vec{0}$.

Da določimo kdaj točka leži na ravnini zapišemo:

$$R \in \Sigma \Leftrightarrow \vec{r} - \vec{r_0} \perp \vec{n} \Leftrightarrow \vec{n} \cdot (\vec{r} - \vec{r_0}) = 0$$

To pomeni da nam ravnino Σ določa enačba:

$$\vec{n} \cdot (\vec{r} - \vec{r_0}) = 0$$

Če zapišemo vektorje $\vec{r_0}, \vec{r}$ in $\vec{n}$ kot:

$$\begin{aligned} \vec{r_0} &= (x_0, y_0, z_0) \\ \vec{r} &= (x, y, z) \\ \vec{n} &= (a, b, c) \end{aligned}$$

lahko zapišemo enačbo ravnine kot:

$$a(x - x_0) + b(y - y_0) + c(z - z_0) = 0$$

To enačbo lahko naprej pretvorimo v *implicitno obliko*:

$$ax + by + cz + d = 0$$

kjer je $d = -ax_0 - by_0 - cz_0$.

Če imamo podane točke R_0, R_1 in R_2, lahko izračunamo vektor normale kot:

$$\vec{n} = (\vec{r_1} - \vec{r_0}) \times (\vec{r_2} - \vec{r_0})$$

če to vstavimo v en"acbo ravnine, dobimo da lahko ravnino Σ zapišemo kot:

$$((\vec{r_1} - \vec{r_0}) \times (\vec{r_2} - \vec{r_0})) \cdot (\vec{r} - \vec{r_0}) = 0$$

Opazimo, da nam ta enačba predstavlja mešani produkt kar lahko zapišemo z determinanto reda 3:

$$\begin{vmatrix} x - x_0 & y - y_0 & z - z_0 \\ x_1 - x_0 & y_1 - y_0 & z_1 - z_0 \\ x_2 - x_0 & y_2 - y_0 & z_2 - z_0 \end{vmatrix} = 0$$

kjer je vektor $\vec{r_n}$ zapisan kot: $\vec{r_n} = (x_n, y_n, z_n)$.

Če imamo točko R_1, ki ni na ravnini, lahko zapišemo razdaljo te točke do ravnine kot:

$$\Delta = \pm|\vec{r_1} - \vec{r_0}| \cos\varphi \tag{1}$$

To enačbo lahko s pomočjo enačbe ravnine preoblikujemo v:

$$\Delta = \frac{|\vec{n} \cdot (\vec{r_1} - \vec{r_0})|}{|\vec{n}|}$$

v števcu lahko uprabimo absolutno vrednost s katero se znebimo predznaka, ki se pojavi v (1), ker je razdalja vedno pozitivna.

Razdaljo med ravnino Σ in točko R_1 lahko zapišemu tudi kot:

$$\Delta = d(R_1, \Sigma)$$

Če si pomagamo z že izpeljano implicitno enačbo ravnine, se lahko znebimo vektorjev in dobimo naslednjo ena"bo:

$$d(R_1, \Sigma) = \frac{|ax_1 + by_1 + cz_1 + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}$$

kjer $\vec{OR_1} = \vec{r_1} = (x_1, y_1, z_1)$.

2.3 Razdalja med mimobežnima premicama

p_1: e_1 je smerni vektor; $R_1 \in p_1, r_1$
p_2: e_2 je smerni vektor; $R_2 \in p_2, r_2$

Da sta premici mimobežni imamo dva pogoja:

- $\vec{e_1} \times \vec{e_2} \neq \vec{0} (p_1 \nparallel p_2)$
- $p_1 \cap p_2 = \varnothing$ (ne sekata se)

$$d(p_1, p_2) = \min\{d(T_1, T_2) : T_1 \in p_1, T_2 \in p_2\}$$

Z pomočjo skice in premisleka opazimo, da je najmanjša razdalja takrat, ko $S_1S_2 \perp p_1, p_2$. To pomeni:

$$\vec{S_1S_2} \perp \vec{e_1}, \vec{e_2}$$
$$\vec{S_1S_2} = \lambda \vec{e_1} \times \vec{e_2}, \lambda \in \mathbb{R}$$

Tu je spet v veliko pomoč skica. Ideja je, da z vzporednim premikom premaknemo vektor $\vec{e_2}$ v izhodišče vektorja $\vec{e_1}$. S tem lahko naredimo ravnino Σ_1, ki jo tvorita ta dva vektorja. Nato naredimo ravnino Σ_2 na podoben način – z vzporednim premikom premaknemo vektor $\vec{e_1}$ v izhošče vektorja $\vec{e_2}$. Velja $\Sigma_1 \parallel \Sigma_2$. Ker sta si ravnini vzporedni lahko premico p_1 z vzporednim premikom premaknemo iz Σ_1 v Σ_2 in dobimo premico p_1^*, ki se seka s premico p_2 v točko S_2. Podobno lahko premaknemo premico p_2 v ranino Σ_1 in dobimo točko S_1 kjer se sekata p_1 in p_2^*. Opazimo, da je daljica S_1S_2 pravokotna na premici p_1 in p_2 in je tudi najkrajša razdalja med tema premicama. To pomeni, da je dolžina daljice S_1S_2 razdalja med premicama p_1 in p_2.

Z nadaljnim premislekom in zelo natančno narisano skico opazimo, da vektorji $\vec{e_1}, \vec{e_2}$ in $\vec{r_1} - \vec{r_2}$ tvorijo paralelepiped, katerega višina je enaka daljici S_1S_2. To pomeni, da lahko uporabimo naše znanje o mešanem produktu in naredimo naslednje:

$$V = |[\vec{r_1} - \vec{r_2}, \vec{e_1}, \vec{e_2}]$$
$$V = |\vec{e_1} \times \vec{e_2}| \cdot \Delta$$

kjer je $\Delta = |S_1S_2|$.

To lahko izenačimo in dobimo:

$$\Delta = \frac{|[\vec{r_1} - \vec{r_2}, \vec{e_1}, \vec{e_2}]|}{|\vec{e_1} \times \vec{e_2}|}$$

3 Osnovne algebrske strukture

3.1 Preslikave in relacije

A, B sta neprazni množici.

Preslikavo, ki slika iz A v B lahko zapišemo kot $f : A \to B$ ali $A \xrightarrow{f} B$.

$\forall x \in A$ predpis f določi natanko en element, ki je iz množice B. Množici A rečemo domena (včasih tudi definicijsko območje), množici B pa rečemo kodomena. $f(x)$ pravimo slika elementa x. $(x \mapsto f(x))$

Zaloga (vrednosti) preslikave $f : A \to B$ je množica $\{f(x) : x \in A\} \subseteq B$.

$f : A \to B$ je *surjektivna* (surjekcija), kadar je njena zaloga B.

$$\forall y \in B \ \exists x \in A : y = f(x)$$

$f : A \to B$ je *injektivna* (injekcija), kadar velja sklep:

$$x_1, x_2 \in A, x_1 \neq x_2 \Rightarrow f(x_1) \neq f(x_2)$$

Za preverjanje uporabimo:

$$f(x_1) = f(x_2) \Rightarrow x_1 = x_2, x_1, x_2 \in A$$

$f : A \to B$ je *bijektivna* (bijekcija), kadar je injektivna in hkrati surjektivna. Če je $f : A \to B$ bijekcija, obstaja točno določena preslikava $g : B \to A$, da velja:

$$(\forall x \in A : g(f(x)) = x) \wedge (\forall y \in B : f(g(y)) = y)$$

Preslikavo $g : B \to A$ imenujemo *inverz* preslikave $f : A \to B$ in jo označimo z:

$$g = f^{-1}$$

Kompozitum preslikav $f : A \to B$ in $g : B \to C$ je:

$$g \circ f \text{ ali } gf$$
$$g \circ f : A \to C$$
$$(g \circ f)(x) = g(f(x))$$

za vsak $x \in A$.

Preslikavo $A \to A$ imenujemo *identična preslikava* ali *identiteta*:

$$id_A : A \to A$$
$$\forall x \in A : id_A(x) = x$$

$$f : A \to B \text{ bijekcija}$$
$$g : B \to A$$
$$g \circ f = id_A$$
$$f \circ g = id_B$$

$f : A \to B$ je bijekcija in $g : B \to A$ je inverzana preslikava $f \iff (g \circ f = id_A \wedge f \circ g = id_B)$

Graf preslikave $f : A \to B$ je množica:

$$G(f) = \{(x, f(x)) : x \in A\}$$
$$G(f) \subseteq A \times B$$

Relacija med elementi množice A in elementi množice B je podmnožica množice $A \times B$.

$R \subseteq A \times B$ (R je relacija)
$(x, y) \in R \equiv xRy$

Primeri kjer $A = B$ (relacija $R \subseteq A \times A$ je *binarjna relacija* na množici A).

(1) $A = \mathbb{R}$

R relacija na $\mathbb{R}$: $\leq$

$$(x, y) \in R \subseteq \mathbb{R} \times \mathbb{R} \iff x \leq y$$
$$R = \leq$$
$$R = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x \leq y\}$$

(2) $A = \{p : p$ - premica v prostoru$\}$

R relacija vzporednosti

$$p, q \in A \qquad pRq \equiv p \parallel q$$

(3) $M \neq \varnothing, \qquad A = \mathcal{P}M$ R relacija *inkluzije* $\subseteq$

$$x, y \in A \qquad (x \subseteq A, y \subseteq A)$$
$$xRy \equiv x \subseteq y$$

Definicije:

(1) Relacija R nad A je *refleksivna*, kadar velja xRx za vsak $x \in A$.

(2) Relacija R nad A je *tranzitivna*, kadar velja sklep:

$$(xRy \wedge yRz) \Rightarrow xRz$$

(3) Relacija R nad A je *antisimetrična*, kadar velja sklep:

$$(xRy \wedge yRx) \Rightarrow x = y$$

(4) Relacija R nad A je *simetrična*, kadar velja sklep:

$$xRy \Rightarrow yRx$$

(5) R je relacija *delne urejenosti*, kadar je refleksivna, antisimetrična in tranzitivna ($R \equiv\leq$).

(6) R je relacija *ekvivalence* (ali ekvivalenčna relacija), kadar je refleksivna, simetrična in tranzitivna ($R \equiv\sim$).

Naj bo A neprazna množica, $\sim$ ekvivalenčna relacija na A in $a \in A$.

$$[a] = \{x \in A : x \sim a\}$$

$[a]$ je *ekvivalenčni razred* elementa a.

$$a \sim a \Rightarrow a \in [a]$$

a je predstavnik tega ekvivalnečnega razreda.

$$[a] = [b]?$$

Predpostavimo $b \sim a$ (zaradi simetričnosti sledi $a \sim b$).

$$x \in [a] \Rightarrow x \sim a \sim b \Rightarrow x \sim b \Rightarrow x \in [b]$$

Torej velja:

$$[a] \subseteq [b]$$
$$[b] \subseteq [a]$$

Zato $[a] = [b]$.

Velja tudi $[a] = [b] \Rightarrow a \sim b$

$$[a] = [b] \Rightarrow a \in [a] \Rightarrow a \in [b] \Rightarrow a \sim b$$

$$a \sim b \iff [a] = [b]$$

Naj velja $[a] \cap [b] \neq \varnothing$:

$$\begin{aligned} &\exists c \in [a] \cap [b] \\ &\Rightarrow c \sim a \wedge c \sim b \Rightarrow a \sim b \Rightarrow [a] = [b] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &[a] \cap [b] \neq \varnothing \Rightarrow [a] = [b] \\ &[a] \neq [b] \Rightarrow [a] \cap [b] = \varnothing \end{aligned}$$

$A/_\sim = \{[a] : a \in A\}$ je *kvocientna* ali *faktorska* množica glede na ekvivalenčno relacijo $\sim$.

$A = \cup[a]$ pravimo *razčlenitev* A-ja.

Primera:

(1) $A = \{\overrightarrow{MN} : M, N - \text{točki v prostoru}\}$
$\overrightarrow{MN}$ je usmerjena daljica
$\overrightarrow{XY} \sim \overrightarrow{MN} \iff$ obstaja translacija, ki XY prenese v MN. $\sim$ je ekvivalenčna relacija.

$$\left[\overrightarrow{MN}\right] = \left\{\overrightarrow{XY} : \overrightarrow{XY} \sim \overrightarrow{MN}\right\} = \vec{MN}$$

(2) $A = \mathbb{Z} \times \mathbb{N} = \{(m, n); m \in \mathbb{Z}, n \in \mathbb{N}\}$

$$\sim: (m, n) \sim (p, q) \iff mq = np$$

$\sim$ je ekvivalenčna relacija

$A/_\sim = \mathbb{Q}$

$$[(m, n)] = \{(p, q) : (p, q) \sim (m, n)\}$$

3.2 Operacije

$M \neq \varnothing$

Operacija na M je preslikava $M \times M \to M, (a, b) \mapsto a \circ b$

$a \circ b$ je *kompozitum* elementov a in b.

PRIMERI:

1) $M = \mathbb{N}$ ali $\mathbb{Z}$ ali $\mathbb{Q}$ ali $\mathbb{R}$.

$\circ$ je lahko $+$ ali $\cdot$.

2) $A \neq \varnothing$

$$M = \{f : A \to A\} \equiv F(A)$$

$\circ$ je kompozitum preslikav

M z dano operacijo $\circ$ je *grupoid* $(M, \circ)$.

Zapis operacije brez znaka $(a, b) \mapsto ab$ je *multiplikativen* zapis operacije.

Imamo grupoid $(M, \sim, \circ)$. Radi bi prenesli $\circ$ v $M/_\sim$.

Operacija $\circ$ je usklajena z ekvivalenčno relacaijo $\sim$, kadar velja sklep:

$$(m_1 \sim m \wedge n_1 \sim n) \Rightarrow m_1 \circ n_1 \sim m \circ n$$

kjer $m, n, m_1, n_1 \in M$.

Primer: $M = \mathbb{Z} \times \mathbb{N}$

$\sim$ iz primera (2)

$$(p_1, q_1) \sim (p, q) \wedge (m_1, n_1) \sim (m, n) \Rightarrow (p_1, q_1) + (m_1, n_1) \sim (p, q) + (m, n)$$
$$(p, q) + (m, n) := (pn + mq, nq)$$

v $+$ iz $\mathbb{Z} \times \mathbb{N}$ lahko prenesemo na $\mathbb{Q} = (\mathbb{Z} \times \mathbb{N})/_\sim$.

$(M, \sim, \circ)$, $\sim$ in $\circ$ usklajeni.

V $M/_\sim$ lahko uvedemo operacijo $\tilde{\circ}$ s predpisom:

$$[a] \,\tilde{\circ}\, [b] = [a \circ b]$$

Definicija je dobra zaradi uklajenosti operacije $\circ$ z relacijo $\sim$:

$$[a_1] = [a] \text{ in } [b_1] = [b] \Rightarrow [a_1 \circ b_1 \sim a \circ b]$$

3.3 Grupe

Definicije:

- $(M, \circ)$ grupoid

  $e \in M$ je *enota* ali *nevtralni element* grupoida $(M, \circ)$ kadar velja:

  $$\forall a \in M : a \circ e = e \circ a = a$$

  Če enota obstaja je ena sam

  $e_1, e_2 \in M$ sta enoti. Sledi:

  $$e_1 \circ e_2 = e_2$$

  če upoštevamo da je e_1 enota,

  $$e_1 \circ e_2 = e_1$$

  če upoštevamo da je e_2 enota

  $$\Rightarrow e_1 = e_2$$

  $\square$

- Grupoid $(M, \circ)$ je *polgrupa*, kadar je opracije $\circ$ *asociativna*:

  $$\forall a, b, c \in M : (a \circ b) \circ c = a \circ (b \circ c)$$

  V polgrupi oklepaji niso potrebni: $a \circ b \circ c$.

- Naj bo $(M, \circ)$ polgrupa z enoto e.

  Element $b \in M$ je *inverz* elementa $a \in M$, kadar velja:

  $$a \circ b = b \circ a = e$$

  Kadar ima element $a \in M$ inverz, pravimo, da je a *invertabilen* ali *obrnljiv*.

  Če ima $a \in M$ inverz, je ta en sam

  b_1, b_2 inverza elementa a.

  $$a \circ b_1 = b_1 \circ a = e$$
  $$a \circ b_2 = b_2 \circ a = e$$

  $$\Rightarrow b_1 = b_1 \circ e = b_1 \circ (a \circ b_2) = (b_1 \circ a) \circ b_2 = e \circ b_2 = b_2$$

  $\square$

  Če je $a \in M$ obrnljiv, njegov inverz zaznamujemo (v splošnem) z a^{-1}.

  $$a \circ a^{-1} = a^{-1} \circ a = e$$

- Polgrupa z enoto, v kateri je vsak element obrnljiv se imenuje *grupa.*

  Z multiplikativnim zapisom: $(G, \circ)$ je grupa, kadar velja:

  (1) $\forall a, b, c \in G : (ab)c = a(bc)$

  (2) $\exists e \in G \forall a \in G : ae = ea = a$

  (3) $\forall a \in G \exists b \in G : ab = ba = e$

- $(M, \circ)$ grupoid je *komutativen*, kadar velja:

$$\forall a, b \in M : a \circ b = b \circ a$$

PRIMERI:

(1) $(\mathbb{N}, +)$ polgrupa brez enote (če $0 \notin \mathbb{N}$).

(2) $(\mathbb{N}, \cdot)$ polgrupa z enoto 1

(3) $(\mathbb{Z}, +)$ grupa

(4) $(\mathbb{Z}, \cdot)$ polgrupa z enoto 1

(5) $A \neq \varnothing, M = F(A) = \{f : A \to A\}$
operacija: komponiranje preslikave
$(M, \circ)$ je polgrupa z enoto $e = id$

(6) $M = S(A) = \{f : A \mapsto A, f \text{ je bijekcija}\}$
$(M, \circ)$ je grupa

Prejšen primer lahko nekoliko spremenimo in dobimo:

$$A = \{1, 2, \ldots, n\}$$
$$S(A) \equiv S_n$$

S_n je *simetrična grupa.*

$$\pi \in S_n$$
$$\pi : \{1, 2, \ldots, n\} \to \{1, 2, \ldots, n\}$$

Če preslikamo vse elemente s preslikavo π dobimo:

$$\{\pi(1), \pi(2), \ldots, \pi(n)\} = \{1, 2, \ldots, n\}$$

Pravimo, da je π *permutacija* in jo zapišemo kot:

$$\pi = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ \pi(1) & \pi(2) & \dots & \pi(n) \end{pmatrix}$$

Zapis $\pi(k)$ je ralitvno dolg, zato ga skrajšamo na:

$$\pi(k) = i_k$$

S tem lahk permutacijo π zapišemo kot:

$$\pi = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ i_1 & i_2 & \dots & i_n \end{pmatrix}$$

Zelo lahko je izplejati, da S_n ima $n!$ elementov.

Ker so permutacije elementi grupe, ki ima za operacijo komponiranje preslikav (kompozitum), lahko z njimi računamo. Poglejmo si primer:

$$\rho = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix}$$
$$\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 3 & 2 \end{pmatrix}$$

kjer $\rho, \sigma \in S_3$

$$\rho\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix}$$
$$\sigma\rho = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

Opazimo, da $\rho\sigma \neq \sigma\rho$.

Poglejmo si, kako lahko v grupi krajšamo. Naj bo $(G, \cdot)$ grupa.

$$\begin{aligned} ab &= ac \\ a^{-1}(ab) &= a^{-1}(ac) \\ (a^{-1}a)b &= (a^{-1}a)c \\ eb &= ec \\ b &= c \end{aligned}$$

Pozorni moramo biti na vrstni red, ker v grupi ni obvezno da velja komutativnost. Pri tem primeru smo na obeh straneh enačbe a imeli na levi strani.

Analogno bi lahko pravilo krajšanja izpeljali, če bi bil a na desni strani, vendar ne če je na eni strani enačbe desni, na drugi pa levi člen. To pomeni da v grupi vlejajo naslednje trditve:

$$ab = ac \Rightarrow b = c$$
$$ab = ca \not\Rightarrow b = c$$
$$b \neq c \Rightarrow ab \neq ac$$

Grupa s tremi elementi je samo ena

Naj bo G grupa s tremi elementi.

$$G = \{e, a, b\}$$

kjer je e enota.

Zapišimo naslednjo tabelo:

	e	a	b
e			
a			
b			

Prva vrstica in prvi stolpec sta trivialna, saj imamo na eni strani enoto. Tabelo lahko dopolnimo in dobimo:

	e	a	b
e	e	a	b
a	a		
b	b		

Potrebujemo premisliti drugo vrstico. Vemo že, da $ae = a$, potrebujemo pa se odločiti, kaj bomo zapisali pri aa in pri ab.

Zgoraj smo zapisali pravilo, ki nam pravi naslednje: $b \neq c \Rightarrow ab \neq ac$. V grupi so trije različni elementi, to pomeni: $e \neq a \neq b \Rightarrow ae \neq aa \neq ab$. Drugače povedano, v vsaki vrstici bo vsak element nastopil natanko enkrat in tudi v vsakem stolpcu bo vsak element nastopil natanko enkrat. To si lahko predstavljamo kot nekakšen sudoku.

Če se vrnemo na prejšen problem - odločitev kaj je aa in kaj ab. Sedaj vemo da imamo dve možnosti:

1) $ab = b \Rightarrow a = e \rightarrow\leftarrow$ ni možno, ker bi potem a bil enota, vemo pa da mora biti različen od enote.

2) $ab = e$

Torej se odločimo da bo veljalo $ab = e$. Za aa nam torej ostane samo ena možnost, to je: $aa = b$. Tabelo lahko še nekoliko dopolnimo:

	e	a	b
e	e	a	b
a	a	b	e
b	b		

Za izpolniti nam ostane samo še ba in bb. Zapisali smo že, da se mora v vsaki vrstici vsak element nahajat natanko enkrat. Torej lahko samo dopolnimo tabelo do konca in dobimo:

	e	a	b
e	e	a	b
a	a	b	e
b	b	e	a

Definirajmo potence. To bomo naredili podobno kot pri analizi. Za pozitivne cele eksponente torej velja:

$$\begin{aligned} aa &= a^2 \\ aaa &= a^3 \\ \underbrace{aa\ldots a}_{n} &= a^n \end{aligned}$$

Za negativne cele eksponente velja podobno:

$$\begin{aligned} a^{-1}a^{-1} &= a^{-2} \\ a^{-1}a^{-1}a^{-1} &= a^{-3} \\ \underbrace{a^{-1}a^{-1}\ldots a^{-1}}_{n} &= a^{-n} \end{aligned}$$

Definirati moramo še a^0. To naredimo na sledeč način:

$$a^0 \equiv e$$

Sedaj lagko zapišemo G kot $G = \{e, a, a^2\}$. Vemo tudi, da $a^3 = e$.

Primer take je grupe je podmnožica kompleksnih števil kjer je opracija množenje:

$$G \subseteq \mathbb{C}$$
$$G = \{1, a, a^2\}$$
$$a = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}$$

Za katerikoli n obstaja grupa. Zgornji grupi G pravimo tudi *ciklična grupa.*

Definicija transpozicije:

Naj bosta $j, k \in \{1, \dots, n\}, j \neq k$

$$\begin{aligned} \tau &\in S_n \\ \tau(j) &= k \\ \tau(k) &= j \\ \tau(i) &= i \forall i \in \{1, \dots, n\} \setminus \{j, k\} \end{aligned}$$

τ je *transpozicija.*

Vsaka permutacija je kompozitum samih transpozicij.

Primer:

$$\pi = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 5 & 1 & 2 & 4 \end{pmatrix}$$

Lahko si naredimo diagram, kjer v vsakem koraku premaknemo en element na pravo mesto. Začnemo z 1, nato 2 in tako naprej. Nato samo komponiramo transpozicije, ki smo jih uporabili. Skica takega postopka je v zvezku. Če je ni, potem lahko poizkusiš izumiti toplo vodo, lahko pa vprašaš kakšnega študenta, ki je bolj priden od tebe in ima to skico v zvezku. Torej lahko permutacijo π zapišemo kot kompozitum transpozicij na nasledenj način:

$$\pi = (4, 5)(2, 4)(1, 3)$$

Startegija velja v vsaki simetrični grupi S_n. Zelo lahko je opzaiti, da lahko vsako permutacijo zapišemo kot kompozitum največ $n - 1$ transpozicij.

Definirajmo inverzijo. Naj bo

$$\pi = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & \dots & n \\ i_1 & i_2 & i_3 & \dots & i_n \end{pmatrix} \in S_n$$
$$1 \leq j < k \leq n$$

Definicija: Par (j,k) tvori *inverzijo* v permutaciji π, kadar v vrstici $i_1, i_2, \ldots, i_n$ k nastopa pred j (z leve proti desni). Drugače povedano: indeks mesta elementa i_k je manjši od indeksa elementa i_j.

$$\text{inv}\pi = \text{ število inverzij v } \pi$$

Primer:

$$\pi = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 5 & 1 & 2 & 4 \end{pmatrix}$$

Inverzije v π so:
$$\begin{gathered} (1,3),(1,5) \\ (2,3),(2,5) \\ (4,5) \end{gathered}$$

$$\text{inv}\pi = 5$$

Definirajmo naslednjo funkcijo:

$$s(\pi) = (-1)^{\text{inv}\pi} = \begin{cases} 1 & \pi \text{ ima sodo inverzij} \\ -1 & \pi \text{ ima liho inverzij} \end{cases}$$

Pravimo da:

π je soda $\iff s(\pi) = 1$
π je liha $\iff s(\pi) = -1$

Trditev: Naj bo $\tau \in S_n$ transpozicija. Potem $\forall \rho \in S_n$ velja:

$$s(\tau\rho) = -s(\rho)$$

Dokaz:

$$\rho = \begin{pmatrix} 1 & \ldots & n \\ i_1 & \ldots & i_n \end{pmatrix}$$

1) $\tau = (i_k, i_{k+1})$

$$\begin{gathered} \text{inv}(\tau\rho) = \text{inv}(\rho) \pm 1 \\ \Rightarrow s(\tau\rho) = -s(\rho) \end{gathered}$$

2) $\tau(i_k, i_{k+p}), p > 1$

τ dosežemo s produktom transpozicij podobni tisti v primeru (1). To pomeni, da najprej element i_k premikamo v desno proti i_{k+p}, vsakič za eno mesto, nato pa še element i_{k+p} premikamo nazaj na prvotno mesto elementa i_k. Če znamo vsaj malo algoritmov, se lahko spomnimo na bubble sort. Za ostale, ki ne znajo algoritmov pa obstaja skica, ki se žal ponovno nahaja samo v zvezku in domišljiji bralca.

Torej potrebujemo p transpozicij, da premakno element i_k na mesto elementa i_{k+p}. V tem trenutnku, je i_{k+p}, že premaknjen eno mesto proti ciljni poziciji, zato potrebujemo samo še $p-1$ transpozicij, da ga damo na mesto elementa i_k. Torej je skupno število potrebnih transpozicij:

$$p + p - 1 = 2p - 1$$

Vemo, da se na vsakem koraku predznak premutacije zamenja, zato velja:

$$s(\tau\rho) = (-1)^{2p-1}s(\rho) = -s(\rho)$$

saj je $2p-1$ liho število. □

Izrek: Naj bo $\pi \in S_n$ in naj velja:

$$\pi = \tau_1\tau_2 \ldots \tau_k$$

kjer so τ_i transpozicije.

Potem je π soda (oziroma liha) natanko takrat, kadar je število k sodo (oziroma liho).

Dokaz: $s(e) = 1$ kjer je $e = id_{\{1,\ldots,n\}}$ enota grupa S_n. Z uporabo prejšnje trditve lahko naredimo naslednje:

$$s(\pi) = s(\underbrace{\tau_1}_{\tau}\underbrace{\tau_2 \ldots \tau_k e}_{\rho}) = (-1)s(\tau_2 \ldots \tau_k e) = (-1)^2 s(\tau_3 \ldots \tau_k e) = \cdots (-1)^k s(e) = (-1)^k$$

Naj bo $A_n = \{\pi \in S_n : \pi \text{ soda}\}$, $e \in A_n$

(1) $\rho, \sigma \in A_n \Rightarrow \rho\sigma \in A_n$

ρ, σ zapišemo kot produkt samih transpozicij. Nato uporabimo prejšnji izrek.

Opomba: to velja samo za sode premutacje. Produkt 2 lihih permutacij je soda permutacija.

(2) $\rho \in A_n \Rightarrow \rho^{-1} \in A_n$

$$\rho = \tau_1 \tau_2 \dots \tau_{k-1} \tau_k$$
$$\rho^{-1} = \tau_k \tau_{k-1} \dots \tau_2 \tau_1$$

kjer τ_i transpozicija in k je sodo.

$$\rho\rho^{-1} = \tau_k \tau_{k-1} \dots \tau_2 \tau_1 \tau_1 \tau_2 \dots \tau_{k-1} \tau_k$$

Ker je S_n grupa velja asociatovnost, torej lahko začnemo v sredini: $\tau_1 \tau_1 = e$, nato $\tau_2 \tau_2 = e$ in tako naprej.

$A_n \subseteq S_n, e \in A_n$. Torej je A_n zaprta za množenje in zaprta za invertiranje. Zato je A_n grupa. Pravimo ji *alternirajoča grupa.*

Naj bo τ transpozicija, $\rho \in A_n \Rightarrow \tau\rho$ je liha

Naj bosta $\rho_1 \rho_2 \in A_n, \rho_1 \neq \rho_2$. Sledi $\tau\rho_1 \neq \tau\rho_2$.

$n > 1$ število lihih permutacij je enako številu sodih permutacij. Torej ima A_n $\dfrac{n!}{2}$ elementov.

Definirajmo podgrupo:

Naj bo $(G, \cdot)$ grupa in $H \subseteq G, H \neq \varnothing$. H naj izpolnjuje pogoja:

(1) $a, b \in H \Rightarrow ab \in H$

Temu pravimo *zaprtost za množenje*

(2) $a \in H \Rightarrow a^{-1} \in H$

Temu pravimo *zaprtost za invertiranje*

Potem je H za operacijo iz G grupa.

$$a \in H \overset{(2)}{\Rightarrow} a^{-1} \in H$$
$$a, a^{-1} \in H \overset{(1)}{\Rightarrow} e = aa^{-1} \in H$$

e enota grupa G leži v H in je enota v H. Pravimo, da je H *podgrupa* grupe G.

Primeri:

(1) A_n je podgrupa S_n

(2) G grupa, G je podgrupa v G.
$\{e\}$ je *trivialna podgrupa* G

(3) $(G, \cdot)$ je grupa

$$\begin{aligned} & a \in G \\ & H = \{a^m; m \in \mathbb{Z}\} \\ & H = \{\ldots, a^{-2}, a^{-1}, e, a, a^2, a^3, \ldots\} \end{aligned}$$

H je najmanjša podgrupa grupe G, ki vsebuje a.

$$H \equiv \langle a \rangle$$

Recimo, da velja $a^{m_1} = a^{m_2}$ za celi števili $m_1 < m_2$.

$$a^m a^{-m_1} = a^{m_2} a^{-m_1} = a^{m_2 - m_1}$$
$$k = m_2 - m \in \mathbb{N}, k \geq 1$$
$$\exists k \in \mathbb{N} : a^k = e$$

Naj bo $k \in \mathbb{N}$ najmanjše naravno število, ki izpolnjuje pogoj $a^k = e$. Ponavljal se bo vzorec:

$$e, a, a^2, \ldots, a^{k-1}$$

in veja:

$$\begin{aligned} a^{k+1} &= a^k a = a \\ a^{k+2} &= a^k a^2 = a^2 \end{aligned}$$

$$H = \{e, a, a^2, \ldots, a^{k-1}\}$$

H ima k elementov. Pravimo, da je H *ciklična grupa reda* k.

3.4 Abelove grupe

Pravimo jim tudi *komutativne grupe*.

$(G, +)$ je grupa in je komutativna:

$$\forall a, b \in G : a + b = b + a$$

Primeri: $(\mathbb{Z},+),(\mathbb{R},+),(\mathbb{C},+)$

Naj bo $(G,\cdot)$ grupa (ne nujno komutativna).

$$a \in G, \langle a\rangle = \{a^m : m \in \mathbb{Z}\}$$

$\langle a\rangle$ je abelova grupa:

$$a^i a^j = a^{i+j} = a^j a^i$$

Oznake v abelovi grupi:

- 0 -enota Abelove grupe
- $-a$ *nasprotni element* od a
- $\underbrace{a+a+\ldots+a}_{n, n\in\mathbb{N}} \equiv na, n \in \mathbb{N}$
- $(-n)a \equiv -(na) = \underbrace{(-a)+(-a)+\ldots+(-a)}_{n}, n \in \mathbb{N}$
- $0a \equiv 0$

  Opomba: na levi strani je 0 število 0, na desni pa je enota grupe
- $a, b \in GG$

$$a - b \equiv a + (-b)$$

Naj bo $(G,+)$ Abelova grupa in $H \subseteq G, H \neq \varnothing$, H podgrupa

(1) $a, b \in H \Rightarrow a + b \in H$

(2) $a \in H \Rightarrow -a \in H$

(1) & (2) $\iff (a, b \in H \Rightarrow a - b \in H)$

Primer: $(G,+) = (\mathbb{Z},+)$, $+$ je običajno seštevanje.

$$n \in \mathbb{N}$$
$$H = \{kn : k \in \mathbb{Z}\} = \{m \in \mathbb{Z} : n|m\}$$

H je podgrupa grupe $(\mathbb{Z},+)$ in je množica večkratnikov n. Pišemo:

$$H \equiv n\mathbb{Z}$$

Naj bo $(G, +)$ Abelova grupa, $H \subseteq G$, H podgrupa.

$$a, b \in G : a \sim b \overset{\text{def.}}{\iff} a - b \in H$$

$\sim$ je ekvivalenčna relacija

(1) *refleksivnost:* $\forall a \in G : a \sim a$

$$a \sim a \iff \underbrace{a - a}_{\text{enota } H} \in H$$

(2) *simetričnost* $a \sim b \Rightarrow b \sim a$

$$a \sim b \Rightarrow a - b \in H \Rightarrow b - a = -(a - b) \in H$$

Dokazati je potrebno korak $b - a = -(a - b)$:

$$(b - a) + (a - b) = b + (-a) + a + (-b) = 0$$

(3) *tranzitivnost* $a \sim b \wedge b \sim c \Rightarrow a \sim c$

$$\begin{aligned} a - b \in H \\ b - c \in H \end{aligned}$$

Po definiciji $a, b \in H : a + b \in H$, torej v našem primeru:

$$(a - b) + (b - c) = b - c \in H \Rightarrow a \sim c$$

$\square$

Seštevanje in ekvivalenčna relacija $\sim$ sta usklajeni: $x \sim a, y \sim b \Rightarrow x + y \sim a + b$

$$\begin{aligned} x - a \in H \\ y - b \in H \end{aligned}$$

Po definiciji relacije potrebuje veljati: $(x + y) - (a + b) \in H$

$$(x + y) - (a + b) = \underbrace{x - a}_{\in H} + \underbrace{y - b}_{\in H} \in H$$

$\square$

Zato lahko operacijo + prenesemo na kvocientno množico:

$$G/_{\sim} = \{[a] : a \in G\}$$
$$\forall a, b \in G : [a] + [b] = [a + b]$$

$(G/_{\sim}, +)$ je Abelova grupa

Opomba: + je operacija med ekvivalenčnimi razredi in je različna od operacije med elementi

Oznaka: $G/_H$ (namesto $G/_{\sim}$, ker $\sim$ definiramo s pomočjo H)

Komutativnost in asociativnost se hitro preveri. Za enoto vzamemo $[0]$. Nasprotni element definiramo kot $-[a] = [-a]$

Naj bo bo $(G, +)$ Abelova grupa in H njena podgrupa. Velja:

$$G/_H = \{[q] : q \in G\}$$
$$[q] = \{x \in G : x - q \in H\} = \{q + h : h \in H\}$$

Uvedemo novi oznaki:

$$[q] \equiv q + H$$
$$[0] = H$$

Primer: $G = \mathbb{Z}$ z običajnim seštevanjem. Naj bo $n \in \mathbb{N}; H = n\mathbb{Z}$ podgrupa $\mathbb{Z}$. Ekvivalenčni razred torej zaznamujemo kot:

$$[m] = m + n\mathbb{Z}$$

Če si narišemo skico za npr. $n = 4$ opazimo, da je $[0] = [4]$ Torej je kvocientna grupa:

$$\mathbb{Z}/_{4\mathbb{Z}} = \{[0], [1], [2], [3]\}$$

V splošnem zapišemo:

$$\mathbb{Z}/_{n\mathbb{Z}} = \{[0], [1], \ldots, [n - 1]\}$$

To da je m v nekem ekvivalenčnem razredu, lahko povemo kot:

$$m \in [j], j \in 0, 1, \ldots, n \iff m \text{ pri deljenju z } n \text{ da ostanek } j$$

Običajno skrajšamo zapis in pišemo:

$$[j] \equiv j$$
$$\mathbb{Z}/_{n\mathbb{Z}} \equiv \mathbb{Z}_n$$

Pravimo, da je $\mathbb{Z}_n$ grupa ostankov pri deljenju z n. To lahko narišemo v tabelo. Poglejmo si, kako bi izgledala tabela za grupo

$$\mathbb{Z}_4 = \{0, 1, 2, 3\}$$

Tabela 1: Tabela za $\mathbb{Z}_4$

+	1	2	3
1	2	3	0
2	3	0	1
3	0	1	2

3.5 Homomorfizmi

DEFINICIJA: Naj bosta $(G_1, \circ), (G_2, \circ)$ grupoida. Preslikava $f : G_1 \to G_2$ je *homomorfizem*, kadar velja:

$$\forall x, y \in G_1 : f(x \circ y) = f(x) \circ f(y)$$

Z besedami: "Slika kompozituma je kompozitum slik".

Če je $G_2 = G_1$ in $f : G_1 \to G_2$ homomorfizem, potem je f *endomorfizem*.

DEFINICIJA: Preslikava $f : G_1 \to G_2$ je *izomorfizem*, kadar je f bijektivna in sta f ter f^{-1} homomorfizma.

TRDITEV: Bijektven homomorfizem je izomorfizem.

DOKAZ: Naj bo $f : G_1 \to G_2$ bijektiven homomorfizem, kjer sta G_1 in G_2 grupoida. Trdimo, da je $f^{-1} : G_2 \to G_1$ homomorfizem. Naj bosta $u, v \in G_2$. Ker je f surjektivna velja: $u = f(x)$ in $v = f(y)$. Torej lahko zapišemo:

$$f^{-1}(u \circ v) = f^{-1}(f(x) \circ f(y)) = f^{-1}(f(x \circ y)) = x \circ y = f^{-1}(u) \circ f^{-1}(v)$$

Zadnji enačaj velja, ker je f injektivna. $\square$

PRIMERI:

(1) $f : \mathbb{Z} \to G$, $(G, \circ)$ grupa, $a \in G$. Predpis f definiramo kot $f(m) = a^m$.

f je homomorfizem med grupama $(\mathbb{Z}, +)$ in $(G, \circ)$

$$f(m_1 + m_2) = a^{m_1+m_2} = a^{m_1}a^{m_2} = f(m_1)f(m_2)$$

G nadomestimo s podgrupo $\langle a \rangle = \{a^m, m \in \mathbb{Z}\}$ in ohranimo isti predpis:

$$f : \mathbb{Z} \to \langle a \rangle$$

f je surjektiven homomorfizem.

Opazimo, da je f izomorfizem natanko takrat, ko $\langle a \rangle$ ni končna:

$$a^{m_1} = a^{m_2} \Rightarrow m_1 = m_2$$

(2) $f : \mathbb{Z}_n \to C_n$ kjer:

$$C_n = \{z \in \mathbb{C} : z^n = 1\}$$

imamo $(C_n, \circ), (\mathbb{Z}_n, +)$. Predpis od f definiramo kot:

$$f(j) = z_0^j, z_0 = \cos\frac{2\pi}{n} + i\sin\frac{2\pi}{n}$$

f je homomorfizem

$$f(j + k) = z_0^{j+k} = z_0^j z_0^k = f(j)f(k)$$

f je surjekcija in injekcija $\Rightarrow$ f je izomorfizem.

(3) $(\mathbb{R}, +), (\mathbb{R}^+, \circ)$, kjer:

$$\mathbb{R}^+ = \{x \in \mathbb{R} : x > 0\}$$

$$\begin{gathered} f : (\mathbb{R}, +) \to (\mathbb{R}^+, \circ) \\ \mathbb{R} \to \mathbb{R}^+ \end{gathered}$$

Predpis definiramo kot:

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

f je homomorfizem

$$f(x + y) = 2^{x+y} = 2^x 2^y = f(x)f(y)$$

f je bijekcija z inverzom:

$$f^{-1}(x) = \log_2 x$$

Torej je f izomorfizem.

TRDITEV: Kompozitum (dveh) homomorfizmov je homomorfizem. Kompozitum izomorfizmov je izomorfizem.

DOKAZ:

$$
\begin{aligned}
&(f \circ g)(x \circ y) = \\
&\qquad = f(g(x \circ y)) = f(g(x) \circ g(y) = f(g(x)) \circ f(g(y)) = \\
&\qquad\qquad = (f \circ g)(x) \circ (f \circ g)(y)
\end{aligned}
$$

Naj bosta G_1, G_2 grupi z multiplikativnim zapisom in $f : G_1 \to G_2$ homomorfizem. Potem velja:

(1) f enoto grupe G_1 preslika v enoto grupe G_2

(2) $\mathrm{im} f = \{f(x) : x \in G_1\}$ (zaloga vrednosti) je podgrupa v G_2[3]

(3) $\ker f = \{x \in G_1 : f(x) = e_2\}$ (e_2 je enota grupe G_2) je podgrupa v G_1[4]

DOKAZ: e_1 enota G_1, e_2 enota G_2

(1) $f(e_1) = f(e_2)$

$$f(e_1) = f(e_1 e_1) = f(e_1) f(e_1)$$

Označimo

$$f(e_1) = x \in G_2$$

Dobili smo:

$$
\begin{aligned}
x &= xx \\
xx^{-1} &= (xx)x^{-1} = x(xx^{-1})
\end{aligned}
$$

Torej:

$$e_2 = x$$

Sklep: $f(e_1) = e_2$ □

(2) $\mathrm{im} f$ je podgrupa G_2

Naj bosta $u, v \in \mathrm{im} f$. Velja:

$$\exists x, y \in G_1 : u = f(x), v = f(y)$$

[3] $\mathrm{im} f$ je slika (image) of f

[4] $\ker f$ je jedro (kernel) od f

Velja:

$$uv = f(x)f(y) = f(xy)$$

Torej $uv \in \mathrm{im} f$.

Podgrupa potrebuje tudi zaprtost za invertiranje:

$\underline{u \in \mathrm{im} f \Rightarrow u^{-1} \in \mathrm{im} f}$

$$u = f(x) \Rightarrow f(x^{-1}) = u^{-1}$$

To je potrebno še dokazati in naj bi bilo doma za vajo. Iz tega sledi:

$$u^{-1} \in \mathrm{im} f$$

3.6 Kolobar

Definicija: Kolobar je množica K skupaj z operacijama $+$ in $\cdot$ na K. ($+$ je seštevanje, $\cdot$ je množenje), kadar je $(K, +)$ Abelova grupa, $(K, \cdot)$ je podgrupa. Operaciji povezujeta distributivnostna zakona:

$$a(b + c) = ab + ac$$
$$(b + c)a = ba + ca$$

Primeri:

(1) Številski kolobarji ($+, \cdot$ običajni operaciji)

$$(\mathbb{Z}, +, \cdot), (\mathbb{Q}, +, \cdot), (\mathbb{R}, +, \cdot), (\mathbb{C}, +, \cdot)$$

(2) $\mathbb{Z}_n, n \in \mathbb{N}$ Kolobar ostankov pri deljenju z n

$$\mathbb{Z}_n = \{0, 1, 2, \ldots, n - 1\}$$

Množenje definiramo podobno kot seštevanje:

$i, j \in \mathbb{Z}_n; ij = k$ - ostanek pri deljenju običajnega produkta ij z n

Primer množenja v $\mathbb{Z}_6$:

$$3 \cdot 5 = 3$$
$$3 \cdot 4 = 0$$

(3) $K = \mathbb{R}^2$

$\oplus$ $(x, y) + (u, v) = (x + u, y + v)$
$\odot$ $(x, y) \cdot (u, v) = (xu, xv)$

$(\mathbb{R}^2, +, \cdot)$ je kolobar.

(4) $K = \mathbb{R}^3$

$\oplus$ $(x, y, z) + (u, v, w) = (x + u, y + v, z + w)$
$\odot$ $(x, y, z) \cdot (u, v, w) = (xu, xv + yw, zw)$

$(\mathbb{R}^3, +, \cdot)$ je kolobar.

(5) $M \neq \varnothing, K = \{f : M \to R\} = \mathbb{R}^M$

$\oplus$ $(f + g)(x) = f(x) + g(x) \forall x \in M(f, g \in K)$
$\odot$ $(f \cdot g)(x) = f(x) \cdot g(x) \forall x \in M(f, g \in K)$

Opomba: Pravimo, da operaciji definiramo po točkah.

K je *kolobar z enoto* (ali enico) e, kadar je e enota za množenje.

$$\forall a \in K : ea = ae = a$$

K je *komutativen kolobar*, kadar je množenje komutativno.

$$\forall a, b \in K : ab = ba$$

Primeri: (nanašajo se na primere za kolobarje)

	ima enoto	**komutativen**
1	✓	✓
2	✓	✓
3	✗	✗
4	✗	✓
5	✓	✓

Definicija: Naj bo $(K, +, \cdot)$ kolobar in $a, b \in K \setminus \{0\}$. Če velja $ab = 0$, sta a in b *delitelja niča*. Pravimo, da je a *levi* delitelj niča in b *desni delitelj* niča.

DEFINICIJA: Kolobar z enoto (enko) 1 je *obseg*, kadar je $1 \neq 0$ in vsak $a \in K \setminus \{0\}$ obrnljiv (v polgrupi $(K, \cdot)$). S simbolnim zapisom je to:

$$\forall a \in K \setminus \{0\} \exists b \in K : ab = ba = 1$$

Posledica je, da je $(K \setminus \{0\}, +, \cdot)$ grupa.

PRIMERI:

(1) $\mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}$ za običajna $+$ in $\cdot$.

(2) $\mathbb{Z}_n$ je obseg, kadar je n praštevilo.

Naj bo $\mathcal{O}$ obseg in $a, b, c \in \mathcal{O}$. Linearne enačbe lahko rešujemo na naslednji način:

$$ax + b = c$$

predpostavimo $a \neq 0 \Rightarrow \exists a^{-1}$

$$\begin{aligned} ax &= c - b \\ a^{-1}ax &= a^{-1}(c - b) \\ x &= a^{-1}(c - b) \end{aligned}$$

Ker komutativnost ni obvezna, moramo biti pozorni iz katere smeri pomnožimo enačbo z a^{-1}.

DEFINICIJA: Naj bost K_1 in K_2 kolobarja. Preslikava $f : K_1 \to K_2$ je homomorfizem kolobarjev, kadar za vse $a, b \in K_1$ velja:

$$\begin{aligned} f(a + b) &= f(a) + f(b) \\ f(ab) &= f(a)f(b) \end{aligned}$$

Če je $f : K_1 \to K_2$ bijektiven homomorfizem kolobarjev, je $f^{-1} : K_2 \to K_1$ homomorfizem kolobarjev. V tem primeru je f izomorfizem med kolobarjema K_1 in K_2.

4 Vektorski prostori

DEFINICIJA: *Vektorski prostor* na obsegom $\mathcal{O}$je Abelova grupa $(V, +)$ skupaj z *zunanjo operacijo*

$$\begin{aligned} \mathcal{O} \times V &\to V \\ (\alpha, v) &\mapsto \alpha v \end{aligned}$$

ki ustreza naslednjim pogojem:

1. $(\alpha + \beta)v = \alpha v + \beta v \qquad \forall \alpha, \beta \in \mathcal{O}, \forall v \in V$
2. $\alpha(u + v) = \alpha u + \alpha v \qquad \forall \alpha \in \mathcal{O}, \forall u, v \in V$
3. $\alpha(\beta v) = (\alpha\beta)v \qquad \forall \alpha, \beta \in \mathcal{O}, \forall v \in V$
4. $1v = v \qquad \forall v \in V$

Elemente iz $\mathcal{O}$imenujemo *skalarji*, elemente iz V imenujemo *vektorji*, zunanjo operacijo pa imenujemo *množenje z skalarji.*

Primer:

(1) $V = \mathbb{R}^3, \mathcal{O} = \mathbb{R}$ običajen trirazsežen vektorski prostor

(2) $V = \mathcal{O}^n$, $\mathcal{O}$ - obseg

Naj bosta x in y naslednja vektorja:

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathcal{O}^n (x_i \in \mathcal{O} \forall i)$$
$$y = (y_1, y_2, \dots, y_n) \in \mathcal{O}^n (y_i \in \mathcal{O} \forall i)$$

Operaciji definiramo sledeče:

$$x + y = (x_1 + y_1, x_2 + y_2, \dots, x_n + y_n) \in \mathcal{O}^n$$
$$\alpha x = (\alpha x_1, \alpha x_2, \dots, \alpha x_n) \in \mathcal{O}^n$$

Za ti dve operacijie je $\mathcal{O}^n$ vektorski prostor na obsegom $\mathcal{O}$. Ničelni element je

$$0 = (0, 0, \dots, 0) \in \mathcal{O}^n$$

Nasprotni element je:

$$-(x_1, x_2, \dots x_n) = (-x_1, -x_2, \dots, -x_n) \in \mathcal{O}^n$$

(3) $M \neq \varnothing \qquad \mathcal{F}(M, \mathbb{R}) \equiv \mathbb{R}^M = \{f : M \to \mathbb{R}\}$

Operaciji definiramo po točkah:

$$(\alpha f)(t) = \alpha f(t) \qquad \forall t \in M (\alpha \in \mathbb{R})$$
$$(f + g)(t) = f(t) + g(t) \qquad \forall t \in M$$

$V = \mathbb{R}^M, \mathcal{O} = \mathbb{R}$

V je vekotrski prostor nad $\mathbb{R}$.

4.1 Nekaj osnovnih lastnosti vektorskih prostorov

Naj bo V vektorski prostor nad $\mathcal{O}$. Velja:

(1) $0v = 0 \qquad \forall v \in V$

(2) $\alpha 0 = 0 \qquad \forall \alpha \in \mathcal{O}$

(3) $\alpha v = 0 \Rightarrow (\alpha = 0 \vee v = 0)$

(4) $(-1)v = -v \qquad \forall v \in V$

Dokaz:

(1)

$$0v = x \in V \Rightarrow$$
$$x + x = 0v + 0v = (0+0)v = 0v = x$$
$$\Rightarrow x + x = x \Rightarrow x = 0$$
$$\Rightarrow 0v = 0$$

(2) Podoben dokaz kot za (1).

(3) $\alpha v = 0$. Če $\alpha = 0$ optem velja (2). Drugače:

$$\alpha \neq 0 \Rightarrow \exists \alpha^{-1} \in \mathcal{O} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \alpha^{-1}(\alpha v) = \alpha^{-1} 0 = 0$$
$$\underbrace{(\alpha^{-1}\alpha)}_{1} v = 1v = v$$
$$\Rightarrow v = 0$$

(4)

$$(-1)v + v = (-1)v + 1v = (-1+1)v = 0v = 0$$

4.2 Vektorski podprostor

Definicija: Naj bo V vektorski prostor nad $\mathcal{O}$ in $U \subseteq V, U \neq \varnothing$. U je vektorski poprostor vektorskega prostora V, kadar velja:

(1) $x, y \in U \Rightarrow x + y \in U$

(2) $x \in U \Rightarrow \alpha x \in U$ $\qquad\forall \alpha \in \mathcal{O}$

Obe zahtevi lahko združimo v eno:

$$(1) \wedge (2) \iff (x, y \in U \Rightarrow \forall \alpha, \beta \in U : \alpha x + \beta y \in U)$$

$(U, +)$ je podgrupa grupe $(V, +)$.

Primeri:

(1) $V = \mathbb{R}^3$, U je ravnina skozi 0 v $\mathbb{R}^3$

(2)

$$\begin{aligned} V &= \mathbb{R}^3 \\ U &= \mathbb{R}[x] \end{aligned}$$

(3)

$$\begin{aligned} V &= \mathbb{R}[x] \\ U &= \mathbb{R}_m[x] = \{p(x) \in \mathbb{R}[x] : \operatorname{stp}(x) \leq m\} \end{aligned}$$

Če je V vektorski prostor nad $\mathcal{O}$ in $U \subseteq V$ podprostor, uporabljamo oznako:

$$U \leq V$$

Vsak podprostor vsebuje ničlo:

$$x \in U \Rightarrow 0x = 0 \in U$$

Nasprotni element je element podprostora:

$$x, y \in U \Rightarrow x - y = x + (-1) \in U$$

Ker velja $\alpha x \in U$ in $\beta y \in U$, lahko zapišemo:

$$\alpha x + \beta y \in U$$

Zapišemo lahko:

$$x_1, x_2, \ldots, x_k \in U \Rightarrow \underbrace{\alpha x_1 + \alpha x_2 + \ldots + \alpha x_k}_{\textit{linearna kombinacija vektorjev } x_1, \ldots, x_k} \in U$$

4.3 Linearna ogrinjača

DEFINICIJA: Naj bo $M \in V, M \neq \varnothing$. *Linearno ogrinjača množice* M je

$$\mathrm{Lin}M = \{\alpha_1 x_1 + \ldots + \alpha_k x_k : x_1, \ldots, x_k \in M, \alpha_1, \ldots \alpha_k \in \mathcal{O}, k \in \mathbb{N}\}$$

Velja:

$$M \subseteq U \leq V \Rightarrow \mathrm{Lin}M \subseteq U$$

$\mathrm{Lin}M$ je vektorski podprostor vektorskega prostora V ($\mathrm{Lin}M \leq V$)

- Zaprtost za seštevanje:

$$\alpha_1 x_1 + \ldots + \alpha_k x_k \in \mathrm{Lin}M$$
$$\beta_1 x_1 + \ldots + \beta_n y_n \in \mathrm{Lin}M$$

  Opazimo, da so po definiciji $\mathrm{Lin}M$ posamečni členi $\alpha_1 x_1, \ldots \alpha_k x_k \in \mathrm{Lin}M$ in $\beta_1 y_1, \ldots, \beta_n y_n \in \mathrm{Lin}M$, torej je tudi vsota vseh členov $\in \mathrm{Lin}M$.

- Zaprtost za množenje s skalarjem:

$$\beta(\alpha_1 x_1 + \ldots + \alpha_k x_k) = (\beta\alpha_1)x_1 + \ldots + (\beta\alpha_k)x_k \in \mathrm{Lin}M$$
$$x_1, \ldots, x_k \in M$$

$\square$

Iz tega sledi, da je $\mathrm{Lin}M$ najmanjši vektorski podprostor, ki vsebuje M. Simbolno za malo naprednejše:

$$M \subseteq U \leq V \Rightarrow \mathrm{Lin}M \subseteq U$$

Za prazno množico velja:

$$\mathrm{Lin}\varnothing = \{0\}$$

Poglejmo si, kako je s preseki in unijami. Za preseke velja:

$$V_i \leq V \forall i \in I \Rightarrow \bigcap_{i \in I} V_i \leq V$$

To je očitno. Zaprtost za seštevanje velja, ker če sta neka dva vektorja x, y v $\bigcap_{i \in I} V_i$, potem se nahajata v vseh V_i. Ker so V_i vektorski podprostori, v njih tudi velja zaprtost za seštevanje. Zato je vsota $x + y$ tudi v vseh V_i, torej je tudi v $\bigcap_{i \in I} V_i$. Podobno lahko naredimo za zaprtost za množenje s skalarjem.

Malo več je za videti pri uniji. $V_1, V_2 \leq V \Rightarrow \text{Lin}(V_1 \cup V_2)$ je najmanjši vektorski podprostor, ki vsebuje V_1 in V_2. Primer na katerem se lahko predstavljamo, sta dve premici. Unija dveh premic, ki se sekata ni vektorski podrpostor, zato okoli naredimo linearno ogrinjačo. Poglejmo si eno zanimivost:

$$x \in \text{Lin}(V_1 \cup V_2)$$
$$x = \underbrace{\alpha_1 x_1 + \ldots \alpha_k x_k}_{\in V_1} + \underbrace{\beta_1 y_1 + \ldots + \beta_n y_n}_{\in V_2} = u + v$$

Torej velja:

$$x \in \text{Lin}(V_1 \cup V_2) \iff x = u + v, u \in V_1, v \in V_2$$

Zapišemo:

$$V_1 + V_2 = \{u + v : u \in V_1, v \in V_2\}$$

Torej velja:

$$\text{Lin}(V_1 \cup V_2) = V_1 + V_2$$

Analogno naredimo za več sumandov:

$$\text{Lin}(V_1 \cup V_2 \cup \ldots \cup V_k) = V_1 + V_2 + \ldots + V_k$$
$$V_i \leq V \forall i$$
$$V_1 + \ldots + V_k = \{x_1 + \ldots + x_k : x_i \in V_i \forall i\}$$

Definicija: $V_1 + \ldots + V_k$ je *prema* ali *direktna*, kadar za vsak $x \in V_1 + \ldots + V_k$ obstajajo in so z x enoično določeni taki vektorji $x_i \in V_i (i = 1, \ldots, k)$, da je $x = x_1 + \ldots + x_k$. Označimo:

$$V_1 \oplus \ldots \oplus V_k$$

Trditev: Vsota $V_1 + V_2$ vektorskih podprostorov V_1 in V_2 je direktna natanko takrat, kadar je $V_1 \cup V_2 = \{0\}$.

Dokaz:

($\Rightarrow$) Naj bo vsota $V_1 + V_2$ direktna ($V_1 \oplus V_2$). Vzemimo $x \in V_1 \cup V_2$.

$$x = \underbrace{x}_{\in V_1} + \underbrace{0}_{\in V_2} = \underbrace{0}_{\in V_1} + \underbrace{x}_{\in V_2} \Rightarrow x = 0$$

$\Rightarrow V_1 \cup V_2 = \{0\}$

($\Leftarrow$) Naj bo $V_1 \cup V_2 = \{0\}$.

$$\begin{aligned}
x &\in V_1 + V_2 \\
x &= x_1 + x_2, x_1 \in V_1, x_2 \in V_2 \\
x &= x_1' + x_2', x_1' \in V_1, x_2' \in V_2 \\
x_1 + x_2 &= x_1' + x_2' \\
\underbrace{x_1 - x_1'}_{\in V_1} &= \underbrace{x_2 - x_2'}_{\in V_2} = z
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\Rightarrow z \in V_1 \cap V_2 = \{0\} \\
&\Rightarrow x = 0 \Rightarrow \\
&\Rightarrow x_1' = x_1 \wedge x_2' = x_2
\end{aligned}$$

$$V_1 \oplus V_2$$

$\square$

4.4 Kvocientni vektorski prostor

Naj bo U vektorski prostor nad $\mathcal{O}$, $U \leq V$. Definiramo:

$$v_1 \sim v_2 \iff v_1 - v_2 \in U$$

kjer je $\sim$ ekvivalenčna relacija. U je Abelova podgrupa Abelove grupe V. $V/_U$ je torej Abelova grupa in velja:

$$\begin{gathered}
[x] + [y] = [x + y] \forall x, y \in V \\
[z] = z + U \forall z \in V
\end{gathered}$$

V $V/_U$ uvedemo množenje s skalarji:

$$\alpha[x] := [\alpha x], \alpha \in \mathcal{O}, x \in V$$

Definicija je dobra če velja:

$$\begin{gathered}
y \sim x \Rightarrow \alpha x \sim \alpha y \\
y - x \in U \Rightarrow \underbrace{\alpha y - \alpha x}_{\alpha(y-x)=z} \in U
\end{gathered}$$

Ker je U podprostor zaprt za množenje s skalarjem, vemo:

$$z \in U \Rightarrow \alpha z \in U \forall \alpha \in \mathcal{O}$$

$\square$

Sledi, da je $V/_U$ vektorski prostor nad $\mathcal{O}$. Elementi so $x + U, x \in V$.

PRIMER: U premica skozi 0 v $V = \mathbb{R}^3$. Elementi $V/_U : x + U, x \in \mathbb{R}^3$ so premice vzporedne premici U.

4.5 Linearne preslikave

So neke vrste homomorfizmi vektorskih prostorov.

DEFINICIJA: Naj bosta V in U vektorska prostora nad istim $\mathcal{O}$. Preslikava $\mathcal{A} : V \to U$ je *linearna* (= homomorfizem vektorskih prostorov), kadar velja:

(1) $\mathcal{A}(x + y) = \mathcal{A}x + \mathcal{A}y \qquad \forall x, y \in V$

(2) $\mathcal{A}(\alpha x) = \alpha \mathcal{A}x \qquad \forall \alpha \in \mathcal{O}, \forall x \in V$

Pogoju (1) pravimo, da je $\mathcal{A}$ *aditivna*, pogoju (2) pa pravimo, da je $\mathcal{A}$ *homogena.*

Nekaj lastnosti:

- $\mathcal{A}0 = 0$ (pride iz Abelove grupe)
- $\mathcal{A}(-x) = -\mathcal{A}x$ (pride iz Abelove grupe) $\qquad \forall x \in V$
- $\mathcal{A}(x - y) = \mathcal{A}x - \mathcal{A}y \qquad \forall x, y \in V$

(3) $\mathcal{A}(\alpha x + \beta y) = \mathcal{A}(\alpha x) + \mathcal{A}(\beta y) = \alpha \mathcal{A}x + \beta \mathcal{A}y \qquad \forall x, y \in V, \forall \alpha, \beta \in \mathcal{O}$

$$\mathcal{A}(\alpha x + \beta y) = \alpha \mathcal{A}x + \beta \mathcal{A}y$$

Ta lastnost sledi iz pogojev (1) in (2). Iz te lastnosti lahko dobimo nazaj pogoj (1) in (2).

$$((1) \wedge (2)) \iff (3)$$

SPLOŠNO:

$$\mathcal{A}(\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \cdots + \alpha_n x_n) = \alpha_1 \mathcal{A}x_1 + \alpha_2 \mathcal{A}x_2 + \cdots + \alpha_n \mathcal{A}x_n$$

DEFINICIJA: $\mathcal{A}V \to U$ je *izomorfizem* vektorskega prostora, kadar je $\mathcal{A}$ bijektivna in sta $\mathcal{A}$ in $\mathcal{A}^{-1}$ linearni preslikavi. **Velja:** bijektivna linearna preslikava je izomorfizem vektorskega prostora.

Naj bo $\mathcal{A} : V \to U$ linearna bijekcija. $\underline{\mathcal{A}^{-1} : U \to V \text{ je linearna}}$

Aditivnost sledi iz dejstva, da je A izomorfizem Abelovih grup $(V, +)$, $(U, +)$.

$$\mathcal{A}^{-1}(\alpha u) = \mathcal{A}^{-1}(\alpha \mathcal{A}v) = \mathcal{A}^{-1}(\mathcal{A}(\alpha v)) = \alpha v = \alpha \mathcal{A}^{-1}u$$

kjer upoštevamo, da $\exists v \in V : u = \mathcal{A}v(v = \mathcal{A}^{-1}u)$

$\Rightarrow \mathcal{A}^{-1}$ je homogena $\square$

PRIMERI:

(1) $V = U = \mathbb{R}^3$

- $\mathcal{A} : \mathbb{R}^3 \to \mathbb{R}^3$ pravokotna projekcija na ravnino skozi 0.
- $\mathcal{A} : \mathbb{R}^3 \to \mathbb{R}^3$ zasuk za določen kot okrog dane osi skozi 0.

(2) $\mathcal{A} : \mathbb{R}[x] \to \mathbb{R}[x]$, $\mathcal{A}$ odvajanje.

(3) $\mathcal{A} : \mathbb{R}[x] \to \mathbb{R}$, $\mathcal{A}$ je določeno integriranje.

4.5.1 Slika in jedro linearnih preslikav

DEFINICIJA: Naj bo $\mathcal{A} : V \to U$ linearna preslikava. Definiramo:

- $\mathrm{im}\mathcal{A} = \{\mathcal{A}x : x \in V\}$ slika preslikave $\mathcal{A}$
- $\ker \mathcal{A} = \{x \in V : \mathcal{A}x = 0\}$ jedro preslikave $\mathcal{A}$

VELJA: $\mathrm{im}\mathcal{A} \leq U$ in $\ker \mathcal{A} \leq V$

DOKAZ: za $\mathrm{im}\mathcal{A}$: $\underline{u_1, u_2 \in \mathrm{im}\mathcal{A} \Rightarrow \alpha_1 u_1 + \alpha_2 u_2 \in \mathrm{im}\mathcal{A}}$

$$\exists x_1, x_2 \in V : u_1 = \mathcal{A}x_1, u_2 = \mathcal{A}x_2$$
$$\alpha_1 u_1 + \alpha_2 u_2 = \alpha_1 \mathcal{A}x_1 + \alpha_2 \mathcal{A}x_2 = \mathcal{A}(\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2) \in \mathrm{im}\mathcal{A}$$

DEFINICIJA: Naj bo $\mathcal{A} : V \to U$. Velja:

(1) $\mathcal{A}$ je surjektivna $\iff$ im$\mathcal{A} = U$

(2) $\mathcal{A}$ je injektivna $\iff$ $\ker \mathcal{A} = \{0\}$

DOKAZ za (2):

($\Rightarrow$) $\mathcal{A}$ je injektivna. Vemo $\mathcal{A}0 = 0$. Zanima nas, za katere x velja $\mathcal{A}x = 0$. Ker je injektivna je $x = 0 \Rightarrow \ker A = \{0\}$.

($\Leftarrow$) $\ker \mathcal{A} = \{0\}$ Naj bosta $\mathcal{A}x = \mathcal{A}y$, $x, y \in V$.

$$\begin{aligned} &\Rightarrow \underbrace{\mathcal{A}x - \mathcal{A}y}_{\mathcal{A}(x-y)=0} = 0 \\ &\Rightarrow x - y \in \ker \mathcal{A} = \{0\} \\ &\Rightarrow x - y = 0 \Rightarrow x = y \end{aligned}$$

$\square$

IZREK: Naj bo $\mathcal{A} : V \to U$ linearna preslikava. Potem obstaja izomorfizem med vektorskima prostoroma $V/_{\ker \mathcal{A}}$ in im$\mathcal{A}$. Izomorfizem deluje s predpisom:

$$\hat{\mathcal{A}} : [x] \mapsto \mathcal{A}x$$

DOKAZ:

- <u>Predpis je dober</u> t.j: $[x] = [y] \Rightarrow \mathcal{A}x = \mathcal{A}y$.

$$x \sim y \Rightarrow x - y \in \ker \mathcal{A} \Rightarrow \underbrace{\mathcal{A}(x-y)}_{\mathcal{A}x - \mathcal{A}y = 0} = 0 \Rightarrow \mathcal{A}x = \mathcal{A}y$$

- <u>$\hat{\mathcal{A}}$ je linearna</u>

$$\begin{aligned} &\hat{\mathcal{A}}(\underbrace{\alpha[x]}_{[\alpha x]} + \underbrace{\beta[y]}_{[\beta y]}) = \\ &\qquad = \hat{\mathcal{A}}(\alpha x + \beta y) = \mathcal{A}(\alpha x + \beta y) = \alpha \mathcal{A}x + \beta \mathcal{A}y = \\ &\qquad\qquad = \alpha \hat{\mathcal{A}}([x]) + \beta \hat{\mathcal{A}}([y]) \end{aligned}$$

- <u>$\hat{\mathcal{A}}$ je surjektivna</u> – sledi neposredno iz definicije $\hat{\mathcal{A}}$

- $\hat{\mathcal{A}}$ je injektvina

$$\begin{aligned} \underbrace{\hat{\mathcal{A}}([x])}_{\mathcal{A}x} &= \underbrace{\hat{\mathcal{A}}([y])}_{\mathcal{A}y} \\ \Rightarrow \mathcal{A}(x-y) &= \mathcal{A}x - \mathcal{A}y = 0 \\ \Rightarrow x - y &\in \ker \mathcal{A} \Rightarrow \\ \Rightarrow x \sim y &\Rightarrow [x] = [y] \end{aligned}$$

$\Rightarrow \hat{\mathcal{A}}$ je linearne in bijektivna $\Rightarrow \hat{\mathcal{A}} : V/_{\ker \mathcal{A}} \to \mathrm{im}\mathcal{A}$ je izomorfizem vektorskih prostorov. $\square$

Posledici: Naj bo $\mathcal{A} : V \to U$ linearna preslikava

(1) Če je $\mathcal{A}$ surjektivna, je vektorski prostor $V/_{\ker \mathcal{A}}$ izomorfen U.

(2) Če je $\mathcal{A}$ injektivna, je vektorski prostor V izomorfen vektorskemu prostoru $\mathrm{im}\mathcal{A}$

$$\mathcal{A} \text{ injektivna} \Rightarrow \ker \mathcal{A} = \{0\} \Rightarrow V/_{\{0\}} = V$$

4.6 Vektorski prostor linearnih preslikav

V, U naj bosta vektorska prostora nad komutativnim obsegom $\mathcal{O}$.

$$\mathcal{L}(V, U) = \{\mathcal{A} : V \to U;\ \mathcal{A} \text{ je linearna}\}$$

Ničelna preslikava 0 je element te množice $0 \in \mathcal{L}(V, U)$.

V $\mathcal{L}(V, U)$ uvedemo operavijo + (seštevanje) po točkah:

$$\begin{gathered} \mathcal{A}, \mathcal{B} \in \mathcal{L}(V, U) \\ (\mathcal{A} + \mathcal{B})(x) = \mathcal{A}x + \mathcal{B}x, \forall x \in V \end{gathered}$$

Velja $\mathcal{A} + \mathcal{B} \in \mathcal{L}(V, U)$. Preverimo homogenost (aditivnost za DN):

$$(\mathcal{A} + \mathcal{B})(\alpha x) = \alpha \mathcal{A}x + \alpha \mathcal{B}x = \alpha(\mathcal{A}x + \mathcal{B}x) = \alpha((\mathcal{A} + \mathcal{B})x)$$

Velja:

- $(\mathcal{L}(V, U), +)$ je Abelova grupa

- 0 (ničelna preslikava) je ničelni element
- $\mathcal{A} \in \mathcal{L}(V, U); -\mathcal{A} = -\mathcal{A}x \forall x \in V$

$$(-A)x = -\mathcal{A}x, \forall x \in V$$
$$(\mathcal{A} + (-A))x = \mathcal{A}x + (-\mathcal{A})x = \mathcal{A}x + (-\mathcal{A})x = 0(\in U), \forall x \in V$$
$$\Rightarrow \mathcal{A} + (-\mathcal{A}) = 0$$

Množenje s skalarji definiramo po točkah:

$$(\alpha A)x = \alpha(Ax), \forall x \in V, \alpha \in \mathcal{O}$$
$$\mathcal{A} \in \mathcal{L}(V, U) \Rightarrow \alpha A \in \mathcal{L}(V, U)$$

$\mathcal{L}(V, U)$ postane z obema operacijama vektorski prostor nad $\mathcal{O}$. **Poseben primer** $U = V$

$\mathcal{L}(V, V) \equiv \mathcal{L}(V)$ – množica vseh endomorfizmov vektorskega prostora V. V množico $\mathcal{L}(V)$ uvedemo že množenje (= komponiranje preslikav).

$$\mathcal{A}, \mathcal{B} \in \mathcal{L}(V)$$
$$(\mathcal{A}\mathcal{B})x = A(Bx), \forall x \in V$$

Množenje je operacija na $\mathcal{L}(V) : A, \mathcal{B} \in \mathcal{L}(V) \Rightarrow \mathcal{A}\mathcal{B} \in \mathcal{L}(V)$.