

Insinöörimatematiikka: Diskreetti matematiikka

Mika Hirvensalo
`mikhirve@utu.fi`

Matematiikan ja tilastotieteen laitos
Turun yliopisto

2023

Esimerkki

Funktioita $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$:

Esimerkki

Funktioita $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$:

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

Esimerkki

Funktioita $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$:

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

Esimerkki

Funktioita $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$:

- $f(x) = x^2 + 3x + 2$
- $f(x) = |x|$
- $f(x) = \begin{cases} 1 & \text{jos } x \in \mathbb{Q}, \\ 0 & \text{jos } x \notin \mathbb{Q}, \end{cases}$

Esimerkki

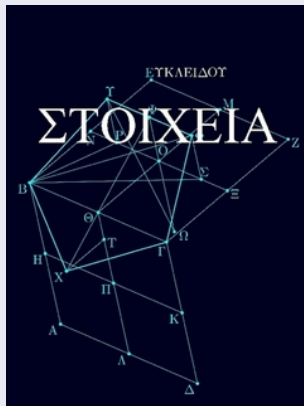
Funktioita $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$:

- $f(x) = x^2 + 3x + 2$
- $f(x) = |x|$
- $f(x) = \begin{cases} 1 & \text{jos } x \in \mathbb{Q}, \\ 0 & \text{jos } x \notin \mathbb{Q}, \end{cases}$

Funktio

Miten ”funktio” määritellään?

Eukleides: ΣΤΟΙΧΕΙΑ

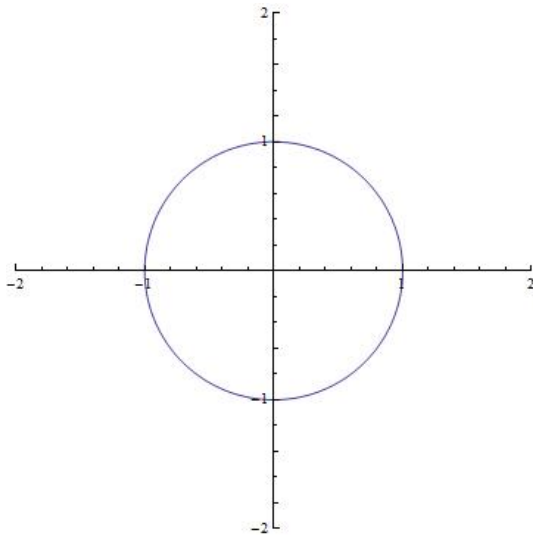


Algebra ja Geometria



René Descartes (latin. *Renatus Cartesius*, 1596–1650)

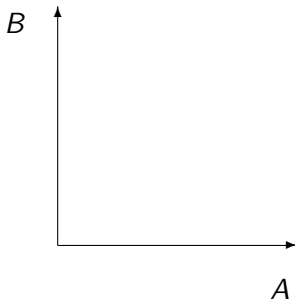
Karteesinen koordinaatisto



$$x^2 + y^2 = 1$$

Yleistys

xy -tason sijaan AB -taso, missä A ja B ovat mitä tahansa joukkoja



Järjestetyt parit

$$(a_1, b_1) = (a_2, b_2) \iff (a_1 = a_2) \wedge (b_1 = b_2)$$

Järjestetyt parit

$$(a_1, b_1) = (a_2, b_2) \iff (a_1 = a_2) \wedge (b_1 = b_2)$$

Järjestetyt kolmikot (a_1, a_2, a_3) , nelikot (a_1, a_2, a_3, a_4) jne. samoin.

Järjestetyt parit

$$(a_1, b_1) = (a_2, b_2) \iff (a_1 = a_2) \wedge (b_1 = b_2)$$

Järjestetyt kolmikot (a_1, a_2, a_3) , nelikot (a_1, a_2, a_3, a_4) jne. samoin.

Karteeminen tulo

$$A \times B = \{(a, b) \mid a \in A, b \in B\}$$

Järjestetyt parit

$$(a_1, b_1) = (a_2, b_2) \iff (a_1 = a_2) \wedge (b_1 = b_2)$$

Järjestetyt kolmikot (a_1, a_2, a_3) , nelikot (a_1, a_2, a_3, a_4) jne. samoin.

Karteeminen tulo

$$A \times B = \{(a, b) \mid a \in A, b \in B\}$$

$$A \times B \times C = \{(a, b, c) \mid a \in A, b \in B, c \in C\} \text{ jne.}$$

Järjestetyt parit

$$(a_1, b_1) = (a_2, b_2) \iff (a_1 = a_2) \wedge (b_1 = b_2)$$

Järjestetyt kolmikot (a_1, a_2, a_3) , nelikot (a_1, a_2, a_3, a_4) jne. samoin.

Karteeminen tulo

$$A \times B = \{(a, b) \mid a \in A, b \in B\}$$

$$A \times B \times C = \{(a, b, c) \mid a \in A, b \in B, c \in C\} \text{ jne.}$$

Alkioista a , b , jne. voidaan käyttää nimitystä A -koordinaatti, B -koordinaatti, jne.

Esimerkki

$A = \{1, 2\}$ ja $B = \{1, 2, 3\}$.

$$A \times B = \{(1, 1), (1, 2), (1, 3), (2, 1), (2, 2), (2, 3)\}$$

Esimerkki

$A = \{1, 2\}$ ja $B = \{1, 2, 3\}$.

$$A \times B = \{(1, 1), (1, 2), (1, 3), (2, 1), (2, 2), (2, 3)\}$$

$$B \times A = \{(1, 1), (1, 2), (2, 1), (2, 2), (3, 1), (3, 2)\}.$$

Esimerkki

$A = \{1, 2\}$ ja $B = \{1, 2, 3\}$.

$$A \times B = \{(1, 1), (1, 2), (1, 3), (2, 1), (2, 2), (2, 3)\}$$

$$B \times A = \{(1, 1), (1, 2), (2, 1), (2, 2), (3, 1), (3, 2)\}.$$

Esimerkki

$$\mathbb{R} \times \mathbb{R} = \{(x, y) \mid x, y \in \mathbb{R}\},$$

Esimerkki

$A = \{1, 2\}$ ja $B = \{1, 2, 3\}$.

$$A \times B = \{(1, 1), (1, 2), (1, 3), (2, 1), (2, 2), (2, 3)\}$$

$$B \times A = \{(1, 1), (1, 2), (2, 1), (2, 2), (3, 1), (3, 2)\}.$$

Esimerkki

$$\mathbb{R} \times \mathbb{R} = \{(x, y) \mid x, y \in \mathbb{R}\},$$

$$\mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R} = \{(x, y, z) \mid x, y, z \in \mathbb{R}\},$$

jne.

Esimerkki

$A = \{1, 2\}$ ja $B = \{1, 2, 3\}$.

$$A \times B = \{(1, 1), (1, 2), (1, 3), (2, 1), (2, 2), (2, 3)\}$$

$$B \times A = \{(1, 1), (1, 2), (2, 1), (2, 2), (3, 1), (3, 2)\}.$$

Esimerkki

$$\mathbb{R} \times \mathbb{R} = \{(x, y) \mid x, y \in \mathbb{R}\},$$

$$\mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R} = \{(x, y, z) \mid x, y, z \in \mathbb{R}\},$$

jne. Merkitään $\mathbb{R} \times \mathbb{R} = \mathbb{R}^2$, $\mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R} = \mathbb{R}^3$, jne.

$A \times B$

$$A \times B = \{(a, b) \mid a \in A, b \in B\}$$

$A \times B$

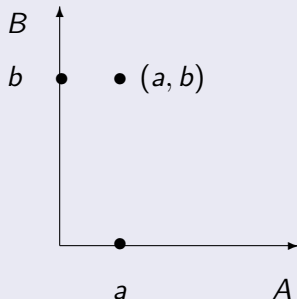
$$A \times B = \{(a, b) \mid a \in A, b \in B\}$$

Alkioista a ja b voidaan käyttää nimitystä A -koordinaatti ja B -koordinaatti.

$A \times B$

$$A \times B = \{(a, b) \mid a \in A, b \in B\}$$

Alkioista a ja b voidaan käyttää nimitystä A -koordinaatti ja B -koordinaatti.



"Määritelmä"

Relaatio joukosta A joukkoon B on (mustavalko)kuva AB -tasossa

"Määritelmä"

Relaatio joukosta A joukkoon B on (mustavalko)kuva AB -tasossa

Relaatio

- Vain mustat kuvapisteeet luetellaan.

"Määritelmä"

Relaatio joukosta A joukkoon B on (mustavalko)kuva AB -tasossa

Relaatio

- Vain mustat kuvapisteeet luetellaan.
- Pisteet ovat järjestettyjä pareja $(a, b) \in A \times B$

"Määritelmä"

Relaatio joukosta A joukkoon B on (mustavalko)kuva AB -tasossa

Relaatio

- Vain mustat kuvapistet luetellaan.
- Pisteet ovat järjestettyjä pareja $(a, b) \in A \times B$
- Kuva on joukko mustia pisteitä, siis järjestettyjä pareja (a, b) , siis $A \times B$:n osajoukko

"Määritelmä"

Relaatio joukosta A joukkoon B on (mustavalko)kuva AB -tasossa

Relaatio

- Vain mustat kuvapistet luetellaan.
- Pisteet ovat järjestettyjä pareja $(a, b) \in A \times B$
- Kuva on joukko mustia pisteitä, siis järjestettyjä pareja (a, b) , siis $A \times B$:n osajoukko

Määritelmä

Relaatio joukosta A joukkoon B on karteesisen tulon $A \times B$ osajoukko.

Merkintöjä

$R \subseteq A \times B$ merkitään myös $R : A \rightarrow B$.

Merkintöjä

$R \subseteq A \times B$ merkitään myös $R : A \rightarrow B$. Sanotaan, että R on relaatio joukosta A joukkoon B .

Merkintöjä

$R \subseteq A \times B$ merkitään myös $R : A \rightarrow B$. Sanotaan, että R on relaatio joukosta A joukkoon B . Joukkoa A kutsutaan *lähtöjoukoksi* ja B :tä *maalijoukoksi*.

Merkintöjä

$R \subseteq A \times B$ merkitään myös $R : A \rightarrow B$. Sanotaan, että R on relaatio joukosta A joukkoon B . Joukkoa A kutsutaan *lähtöjoukoksi* ja B :tä *maalijoukoksi*. Jos $B = A$, sanotaan, että R on joukon A *binäärinen relaatio*.

Merkintöjä

$R \subseteq A \times B$ merkitään myös $R : A \rightarrow B$. Sanotaan, että R on relaatio joukosta A joukkoon B . Joukkoa A kutsutaan *lähtöjoukoksi* ja B :tä *maalijoukoksi*. Jos $B = A$, sanotaan, että R on joukon A *binäärinen relaatio*.

Merkintöjä

Jos R on relaatio joukosta A joukkoon B ja $(a, b) \in R$, sanotaan, että b on a :n *kuva* ja että a on b :n *alkukuva* ja että a *kuvautuu* b :ksi relaatiossa R .

Merkintöjä

$R \subseteq A \times B$ merkitään myös $R : A \rightarrow B$. Sanotaan, että R on relaatio joukosta A joukkoon B . Joukkoa A kutsutaan *lähtöjoukoksi* ja B :tä *maalijoukoksi*. Jos $B = A$, sanotaan, että R on joukon A *binäärinen relaatio*.

Merkintöjä

Jos R on relaatio joukosta A joukkoon B ja $(a, b) \in R$, sanotaan, että b on a :n *kuva* ja että a on b :n *alkukuva* ja että a *kuvautuu* b :ksi relaatioissa R . Tällöin käytetään seuraavia merkintöjä:

Merkintöjä

$R \subseteq A \times B$ merkitään myös $R : A \rightarrow B$. Sanotaan, että R on relaatio joukosta A joukkoon B . Joukkoa A kutsutaan *lähtöjoukoksi* ja B :tä *maalijoukoksi*. Jos $B = A$, sanotaan, että R on joukon A *binäärinen relaatio*.

Merkintöjä

Jos R on relaatio joukosta A joukkoon B ja $(a, b) \in R$, sanotaan, että b on a :n *kuva* ja että a on b :n *alkukuva* ja että a *kuvautuu* b :ksi relaatiossa R . Tällöin käytetään seuraavia merkintöjä:

- $(a, b) \in R$ (Perustuu määritelmään)
- $R(a, b)$ (Predikaattilogiikan merkintä)
- aRb (ns. Infix-merkintä)
- $a \xrightarrow{R} b$ (Esim. nuolikaavioissa)

Merkintöjä

Joukko $\{a \in A \mid (\exists b \in B)(a, b) \in R\}$ on relaation R määrittelyjoukko

Merkintöjä

Joukko $\{a \in A \mid (\exists b \in B)(a, b) \in R\}$ on relaation R *määrittelyjoukko*

Merkintöjä

Joukko $\{b \in B \mid (\exists a \in A)(a, b) \in R\}$ on relaation R *kuvajoukko* tai *arvojoukko*

Esimerkkejä

- Merkinnät $2 < 3$, $< (2, 3)$ ja $(2, 3) \in <$

Esimerkkejä

- Merkinnät $2 < 3$, $< (2, 3)$ ja $(2, 3) \in <$
- Diagonaali- eli identiteetti- eli yhtäsuuruusrelaatio $D = \{(a, a) \mid a \in A\}$.

Esimerkkejä

- Merkinnät $2 < 3$, $< (2, 3)$ ja $(2, 3) \in <$
- Diagonaali- eli identiteetti- eli yhtäsuuruusrelaatio
 $D = \{(a, a) \mid a \in A\}$.
- Esimerkki 5 (AB-taso, joukko- ja nuolikaavioesitys)

Yhdiste eli relaatiotulo

Olkoot $R : A \rightarrow B$ ja $S : B \rightarrow C$ relaatioita. Niiden *yhdiste* on relaatio $A \rightarrow C$

$$S \circ R = \{(a, c) \mid (\exists b \in B) (a \xrightarrow{R} b \wedge b \xrightarrow{S} c)\}.$$

Yhdiste eli relaatiotulo

Olkoot $R : A \rightarrow B$ ja $S : B \rightarrow C$ relaatioita. Niiden *yhdiste* on relaatio $A \rightarrow C$

$$S \circ R = \{(a, c) \mid (\exists b \in B) (a \xrightarrow{R} b \wedge b \xrightarrow{S} c)\}.$$

Käänteisrelaatio

Jos $R : A \rightarrow B$, määritellään $R^{-1} : B \rightarrow A$ seuraavasti:

$$R^{-1} = \{(b, a) \mid (a, b) \in R\}.$$

Yhdiste eli relaatiotulo

Olkoot $R : A \rightarrow B$ ja $S : B \rightarrow C$ relaatioita. Niiden *yhdiste* on relaatio $A \rightarrow C$

$$S \circ R = \{(a, c) \mid (\exists b \in B) (a \xrightarrow{R} b \wedge b \xrightarrow{S} c)\}.$$

Käänteisrelaatio

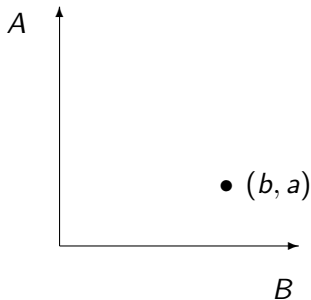
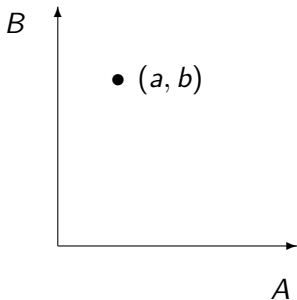
Jos $R : A \rightarrow B$, määritellään $R^{-1} : B \rightarrow A$ seuraavasti:
 $R^{-1} = \{(b, a) \mid (a, b) \in R\}.$

Esimerkki

$$R \circ R^{-1}, \quad R^{-1} \circ R$$

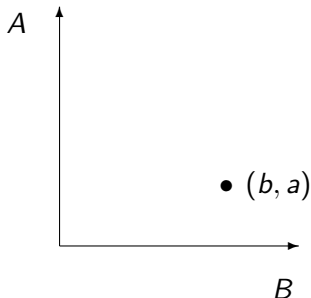
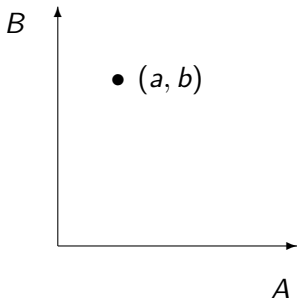
$$(a, b) \in R \Leftrightarrow (b, a) \in R^{-1}$$

$$(a, b) \in R \Leftrightarrow (b, a) \in R^{-1}$$



Käänteisrelaation kuvaaja

$$(a, b) \in R \Leftrightarrow (b, a) \in R^{-1}$$



Jos $A = B$, saadaan R^{-1} :n kuvaaja peilikuvana suoran $a = b$ suhteen

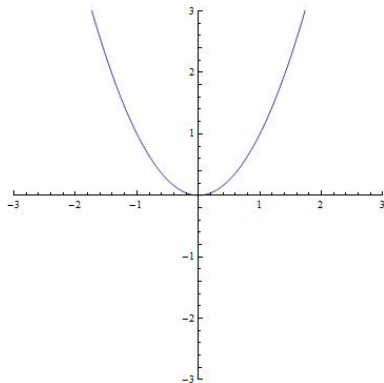
$$R = \{(x, x^2) \mid x \in \mathbb{R}\},$$

$$R = \{(x, x^2) \mid x \in \mathbb{R}\}, \quad R^{-1} = \{(x^2, x) \mid x \in \mathbb{R}\}$$

Käänteisrelaation kuvaaja

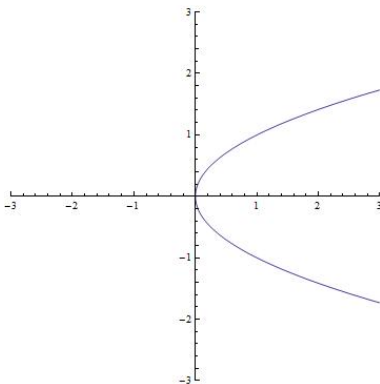
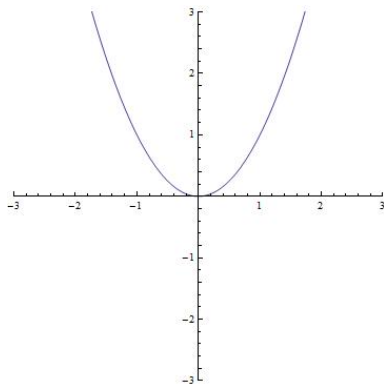
$$R = \{(x, x^2) \mid x \in \mathbb{R}\},$$

$$R^{-1} = \{(x^2, x) \mid x \in \mathbb{R}\}$$



Käänteisrelaation kuvaaja

$$R = \{(x, x^2) \mid x \in \mathbb{R}\}, \quad R^{-1} = \{(x^2, x) \mid x \in \mathbb{R}\}$$



Binäärisistä relaatioista

Ekvivalenssi

Joukon A binäärinen relaatio R on *ekvivalenssirelaatio*, mikäli R toteuttaa seuraavat ehdot:

- 1 $(\forall a) aRa$ (refleksiivisyys),
- 2 $(\forall a)(\forall b) aRb \Rightarrow bRa$ (symmetria) ja
- 3 $(\forall a)(\forall b)(\forall c) aRb, bRc \Rightarrow aRc$ (transitiivisuus).

Ekvivalenssi

Joukon A binäärinen relaatio R on *ekvivalenssirelaatio*, mikäli R toteuttaa seuraavat ehdot:

- 1 $(\forall a) aRa$ (refleksiivisyys),
- 2 $(\forall a)(\forall b) aRb \Rightarrow bRa$ (symmetria) ja
- 3 $(\forall a)(\forall b)(\forall c) aRb, bRc \Rightarrow aRc$ (transitiivisuus).

Lause

Joukon A ekvivalenssirelaatio jakaa A :n osajoukkoihin

$$A = \bigcup_{i \in I} [a_i]$$

joille $[a] = \{x \mid xRa\}$ ja $[a_i] \cap [a_j] = \emptyset$ aina kun $\neg(a_iRa_j)$.

Osittainen järjestys

Joukon A binäärinen relaatio R on *osittainen järjestys*, mikäli R toteuttaa seuraavat ehdot:

- 1 $(\forall a) aRa$ (refleksiivisyys),
- 2 $(\forall a)(\forall b) aRb, bRa \Rightarrow a = b$ (antisymmetria) ja
- 3 $(\forall a)(\forall b)(\forall c) aRb, bRc \Rightarrow aRc$ (transitiivisuus).

Osittainen järjestys

Joukon A binäärinen relaatio R on *osittainen järjestys*, mikäli R toteuttaa seuraavat ehdot:

- 1 $(\forall a) aRa$ (refleksiivisyys),
- 2 $(\forall a)(\forall b) aRb, bRa \Rightarrow a = b$ (antisymmetria) ja
- 3 $(\forall a)(\forall b)(\forall c) aRb, bRc \Rightarrow aRc$ (transitiivisuus).

Jaollisuus

A on joko $\mathbb{N}$ tai $\mathbb{Z}$.

$$a \mid b \Leftrightarrow (\exists c \in A)(b = a \cdot c)$$

Jaollisuus

A on joko $\mathbb{N}$ tai $\mathbb{Z}$.

$$a \mid b \Leftrightarrow (\exists c \in A)(b = a \cdot c)$$

Jaollisuusrelaatio $\mid$ on osittainen järjestys joukossa $\mathbb{N}$ mutta ei joukossa $\mathbb{Z}$.

Jaollisuus

A on joko $\mathbb{N}$ tai $\mathbb{Z}$.

$$a \mid b \Leftrightarrow (\exists c \in A)(b = a \cdot c)$$

Jaollisuusrelaatio $\mid$ on osittainen järjestys joukossa $\mathbb{N}$ mutta ei joukossa $\mathbb{Z}$.

Lukuteoreettinen kongruenssi

Valitaan $n \in \mathbb{N} \setminus \{1\}$ ja määritellään

$$a \equiv_n b \Leftrightarrow n \mid (b - a)$$

$\equiv_n$ on joukon $\mathbb{Z}$ ekvivalenssirelaatio.

Ekvivalenssiluokat

Ehto $n \mid (b - a)$ tarkoittaa, että $b - a = n \cdot k$,

Ekvivalenssiluokat

Ehto $n \mid (b - a)$ tarkoittaa, että $b - a = n \cdot k$, joten

$$\begin{aligned}[a] &= \{b \in \mathbb{Z} \mid b \equiv_n a\} = \{a + nk \mid k \in \mathbb{Z}\} \\ &= \{\dots a - 2n, a - n, a, a + n, a + 2n, \dots\}.\end{aligned}$$

Ekvivalenssiluokat

Ehto $n \mid (b - a)$ tarkoittaa, että $b - a = n \cdot k$, joten

$$\begin{aligned}[a] &= \{b \in \mathbb{Z} \mid b \equiv_n a\} = \{a + nk \mid k \in \mathbb{Z}\} \\ &= \{\dots a - 2n, a - n, a, a + n, a + 2n, \dots\}.\end{aligned}$$

Toinen merkintä

Erityisesti lukuteoreettisen kongruenssin yhteydessä käytetään merkintää

$$[a] = \bar{a}.$$

Esimerkki

Kun $n = 6$, on

$$\bar{0} = \{\dots, -12, -6, 0, 6, 12, \dots\},$$

Esimerkki

Kun $n = 6$, on

$$\bar{0} = \{\dots, -12, -6, 0, 6, 12, \dots\},$$

$$\bar{1} = \{\dots, -11, -5, 1, 7, 13, \dots\},$$

Esimerkki

Kun $n = 6$, on

$$\bar{0} = \{\dots, -12, -6, 0, 6, 12, \dots\},$$

$$\bar{1} = \{\dots, -11, -5, 1, 7, 13, \dots\},$$

$$\bar{2} = \{\dots, -10, -4, 2, 8, 14, \dots\},$$

Esimerkki

Kun $n = 6$, on

$$\bar{0} = \{\dots, -12, -6, 0, 6, 12, \dots\},$$

$$\bar{1} = \{\dots, -11, -5, 1, 7, 13, \dots\},$$

$$\bar{2} = \{\dots, -10, -4, 2, 8, 14, \dots\},$$

$$\bar{3} = \{\dots, -9, -3, 3, 9, 15, \dots\},$$

Esimerkki

Kun $n = 6$, on

$$\bar{0} = \{\dots, -12, -6, 0, 6, 12, \dots\},$$

$$\bar{1} = \{\dots, -11, -5, 1, 7, 13, \dots\},$$

$$\bar{2} = \{\dots, -10, -4, 2, 8, 14, \dots\},$$

$$\bar{3} = \{\dots, -9, -3, 3, 9, 15, \dots\},$$

$$\bar{4} = \{\dots, -8, -2, 4, 10, 16, \dots\},$$

Esimerkki

Kun $n = 6$, on

$$\bar{0} = \{\dots, -12, -6, 0, 6, 12, \dots\},$$

$$\bar{1} = \{\dots, -11, -5, 1, 7, 13, \dots\},$$

$$\bar{2} = \{\dots, -10, -4, 2, 8, 14, \dots\},$$

$$\bar{3} = \{\dots, -9, -3, 3, 9, 15, \dots\},$$

$$\bar{4} = \{\dots, -8, -2, 4, 10, 16, \dots\},$$

$$\bar{5} = \{\dots, -7, -1, 5, 11, 17, \dots\},$$

Esimerkki

Kun $n = 6$, on

$$\overline{0} = \{\dots, -12, -6, 0, 6, 12, \dots\},$$

$$\overline{1} = \{\dots, -11, -5, 1, 7, 13, \dots\},$$

$$\overline{2} = \{\dots, -10, -4, 2, 8, 14, \dots\},$$

$$\overline{3} = \{\dots, -9, -3, 3, 9, 15, \dots\},$$

$$\overline{4} = \{\dots, -8, -2, 4, 10, 16, \dots\},$$

$$\overline{5} = \{\dots, -7, -1, 5, 11, 17, \dots\},$$

$$\overline{6} = \{\dots, -6, 0, 6, 12, 18, \dots\}$$

Esimerkki

Kun $n = 6$, on

$$\bar{0} = \{\dots, -12, -6, 0, 6, 12, \dots\},$$

$$\bar{1} = \{\dots, -11, -5, 1, 7, 13, \dots\},$$

$$\bar{2} = \{\dots, -10, -4, 2, 8, 14, \dots\},$$

$$\bar{3} = \{\dots, -9, -3, 3, 9, 15, \dots\},$$

$$\bar{4} = \{\dots, -8, -2, 4, 10, 16, \dots\},$$

$$\bar{5} = \{\dots, -7, -1, 5, 11, 17, \dots\},$$

$$\bar{6} = \{\dots, -6, 0, 6, 12, 18, \dots\} = \bar{0}$$

Esimerkki

Kun $n = 6$, on

$$\bar{0} = \{\dots, -12, -6, 0, 6, 12, \dots\},$$

$$\bar{1} = \{\dots, -11, -5, 1, 7, 13, \dots\},$$

$$\bar{2} = \{\dots, -10, -4, 2, 8, 14, \dots\},$$

$$\bar{3} = \{\dots, -9, -3, 3, 9, 15, \dots\},$$

$$\bar{4} = \{\dots, -8, -2, 4, 10, 16, \dots\},$$

$$\bar{5} = \{\dots, -7, -1, 5, 11, 17, \dots\},$$

$$\bar{6} = \{\dots, -6, 0, 6, 12, 18, \dots\} = \bar{0}$$

Huomautus

$\mathbb{Z} = \bar{0} \cup \bar{1} \cup \dots \cup \bar{5}$ ja $\bar{i} \cap \bar{j} = \emptyset$, jos $i \not\equiv_6 j$.

Ekvivalenssiluokkien yhteen- ja kertolasku

- $\bar{a} + \bar{b} = \overline{a + b}$

Ekvivalenssiluokkien yhteen- ja kertolasku

- $\overline{a} + \overline{b} = \overline{a + b}$
- $\overline{a} \cdot \overline{b} = \overline{a \cdot b}$

Ekvivalenssiluokkien yhteen- ja kertolasku

- $\overline{a} + \overline{b} = \overline{a + b}$
- $\overline{a} \cdot \overline{b} = \overline{a \cdot b}$

Riippumattomuus edustajasta

Esimerkiksi $\overline{3} = \overline{9}$ ja $\overline{5} = \overline{-7}$.

- $\overline{3} + \overline{5} = \overline{3 + 5} = \overline{8} = \overline{2}$

Ekvivalenssiluokkien yhteen- ja kertolasku

- $\overline{a} + \overline{b} = \overline{a + b}$
- $\overline{a} \cdot \overline{b} = \overline{a \cdot b}$

Riippumattomuus edustajasta

Esimerkiksi $\overline{3} = \overline{9}$ ja $\overline{5} = \overline{-7}$.

- $\overline{3} + \overline{5} = \overline{3 + 5} = \overline{8} = \overline{2}$ ja
- $\overline{9} + \overline{-7} = \overline{9 + (-7)} = \overline{2}$.

Ekvivalenssiluokkien yhteen- ja kertolasku

- $\overline{a} + \overline{b} = \overline{a + b}$
- $\overline{a} \cdot \overline{b} = \overline{a \cdot b}$

Riippumattomuus edustajasta

Esimerkiksi $\overline{3} = \overline{9}$ ja $\overline{5} = \overline{-7}$.

- $\overline{3} + \overline{5} = \overline{3 + 5} = \overline{8} = \overline{2}$ ja
- $\overline{9} + \overline{-7} = \overline{9 + (-7)} = \overline{2}$. Samoin
- $\overline{3} \cdot \overline{5} = \overline{15} = \overline{3}$

Ekvivalenssiluokkien yhteen- ja kertolasku

- $\overline{a} + \overline{b} = \overline{a + b}$
- $\overline{a} \cdot \overline{b} = \overline{a \cdot b}$

Riippumattomuus edustajasta

Esimerkiksi $\overline{3} = \overline{9}$ ja $\overline{5} = \overline{-7}$.

- $\overline{3} + \overline{5} = \overline{3 + 5} = \overline{8} = \overline{2}$ ja
- $\overline{9} + \overline{-7} = \overline{9 + (-7)} = \overline{2}$. Samoin
- $\overline{3} \cdot \overline{5} = \overline{15} = \overline{3}$ ja
- $\overline{9} \cdot \overline{-7} = \overline{-63} = \overline{3}$

Äärellinen algebrallinen systeemi

- Alkiot $\{\bar{0}, \bar{1}, \dots, \bar{5}\}$

Äärellinen algebrallinen systeemi

- Alkiot $\{\bar{0}, \bar{1}, \dots, \bar{5}\}$
- Yhteen- ja kertolasku

Äärellinen algebrallinen systeemi

- Alkiot $\{\bar{0}, \bar{1}, \dots, \bar{5}\}$
- Yhteen- ja kertolasku
- Säännöt $a + b = b + c$, $ab = ba$, $a(b + c) = ab + ac$, jne. periytyvät suoraan kokonaislukujen ominaisuuksista

Äärellinen algebrallinen systeemi

- Alkiot $\{\bar{0}, \bar{1}, \dots, \bar{5}\}$
- Yhteen- ja kertolasku
- Säännöt $a + b = b + c$, $ab = ba$, $a(b + c) = ab + ac$, jne. periytyvät suoraan kokonaislukujen ominaisuuksista
- Algoritminen käsittely periytyy kokonaislukujen ominaisuuksista.

Määritelmä

Relaatio $f : A \rightarrow B$ on funktio, jos jokaista joukon A alkia a kohti on tarkalleen yksi joukon B alkio b siten että $(a, b) \in f$.

Määritelmä

Relaatio $f : A \rightarrow B$ on funktio, jos jokaista joukon A alkia a kohti on tarkalleen yksi joukon B alkio b siten että $(a, b) \in f$.

Huomautus

Jokainen pystysuora leikkaa funktion kuvaajan tasan kerran.

Määritelmä

Relaatio $f : A \rightarrow B$ on funktio, jos jokaista joukon A alkia a kohti on tarkalleen yksi joukon B alkio b siten että $(a, b) \in f$.

Huomautus

Jokainen pystysuora leikkaa funktion kuvaajan tasan kerran.

Määritelmä

Edellisen määritelmän tapauksessa merkitään $f(a) = b$ ja relaatioiden yleistä terminologiaa käyttäen sanotaan, että b on a :n kuva, a on b :n alkukuva, ja että a kuvautuu b :ksi.

Lause

Jos $f : A \rightarrow B$ ja $g : B \rightarrow C$ ovat funktiota, on relaatiotulo $g \circ f$ myös funktio

Lause

Jos $f : A \rightarrow B$ ja $g : B \rightarrow C$ ovat funktiota, on relaatiotulo $g \circ f$ myös funktio

Määritelmä

Olkoot $f : A \rightarrow B$ ja $g : B \rightarrow C$ funktioita. *Yhdistetty funktio* $g \circ f$ on relaatiotulo $g \circ f : A \rightarrow C$, jolle siis relaatiotulon määritelmän mukaan pätee $(g \circ f)(a) = g(f(a))$. Tällöin funktiota f kutsutaan *sisäfunktiksi* ja g :tä *ulkofunktiksi*

Lause

Jos $f : A \rightarrow B$ ja $g : B \rightarrow C$ ovat funktiota, on relaatiotulo $g \circ f$ myös funktio

Määritelmä

Olkoot $f : A \rightarrow B$ ja $g : B \rightarrow C$ funktioita. *Yhdistetty funktio* $g \circ f$ on relaatiotulo $g \circ f : A \rightarrow C$, jolle siis relaatiotulon määritelmän mukaan pätee $(g \circ f)(a) = g(f(a))$. Tällöin funktiota f kutsutaan *sisäfunktioksi* ja g :tä *ulkofunktioksi*

Esimerkki

Jos $h(x) = e^{-x^2}$, voidaan h kirjoittaa muodossa $h = g \circ f$, missä $g(x) = e^x$ on ulkofunktio ja $f(x) = -x^2$ on sisäfunktio.

Määritelmä

Funktio $f : A \rightarrow B$ on *injektio*, jos $a_1 \neq a_2 \Rightarrow f(a_1) \neq f(a_2)$.

$f : A \rightarrow B$ on *surjektio*, jos $f(A) = B$. $f : A \rightarrow B$ on *bijektio*, jos f on sekä injektio että surjektio.

Huomautus

- Jokainen vaakasuora leikkaa injektion kuvaajan korkeintaan kerran.

Huomautus

- Jokainen vaakasuora leikkaa injektion kuvaajan korkeintaan kerran.
- Jokainen vaakasuora leikkaa surjektion kuvaajan ainakin kerran.

Huomautus

- Jokainen vaakasuora leikkaa injektion kuvaajan korkeintaan kerran.
- Jokainen vaakasuora leikkaa surjektion kuvaajan ainakin kerran.
- Jokainen vaakasuora leikkaa bijektion kuvaajan tasan kerran.

Lause

Jos $f : A \rightarrow B$ on bijektiivinen funktio, on käänteisrelaatio $f^{-1} : B \rightarrow A$ myös funktio, ns. f :n *käänteisfunktio*. Kääntäen, jos funktion $f : A \rightarrow B$ käänteisrelaatio $f^{-1} : B \rightarrow A$ on funktio, on f bijektio.

Lause

Jos $f : A \rightarrow B$ on bijektiivinen funktio, on käänteisrelaatio $f^{-1} : B \rightarrow A$ myös funktio, ns. f :n *käänteisfunktio*. Kääntäen, jos funktion $f : A \rightarrow B$ käänteisrelaatio $f^{-1} : B \rightarrow A$ on funktio, on f bijektio.

Huomautus

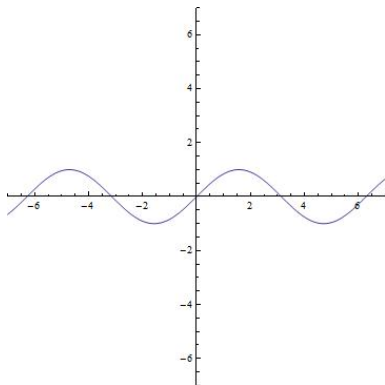
Funktion $f : A \rightarrow B$ käänteisrelaatio on funktio *vain* jos f on bijektio.

$$\sin = \{(x, \sin x) \mid x \in \mathbb{R}\},$$

$$\sin = \{(x, \sin x) \mid x \in \mathbb{R}\}, \quad \sin^{-1} = \{(\sin x, x) \mid x \in \mathbb{R}\}$$

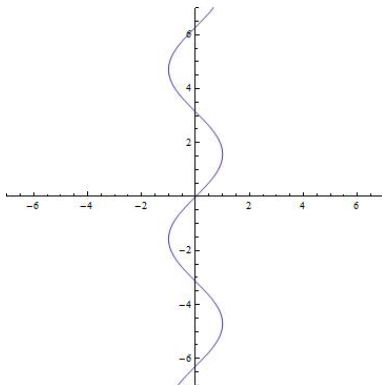
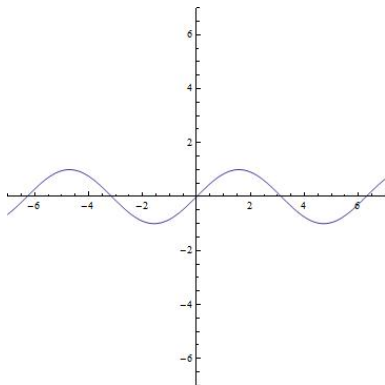
$$\sin = \{(x, \sin x) \mid x \in \mathbb{R}\},$$

$$\sin^{-1} = \{(\sin x, x) \mid x \in \mathbb{R}\}$$



$$\sin = \{(x, \sin x) \mid x \in \mathbb{R}\},$$

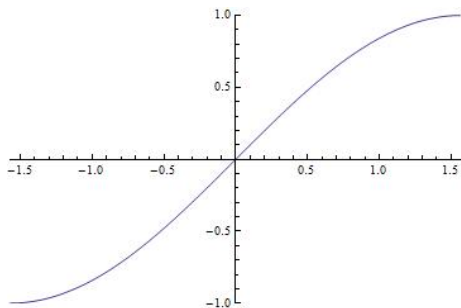
$$\sin^{-1} = \{(\sin x, x) \mid x \in \mathbb{R}\}$$



$$\sin = \{(x, \sin x) \mid x \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]\},$$

$$\sin = \{(x, \sin x) \mid x \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]\}, \sin^{-1} = \{(\sin x, x) \mid x \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]\}$$

$$\sin = \{(x, \sin x) \mid x \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]\}, \sin^{-1} = \{(\sin x, x) \mid x \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]\}$$



$$\sin = \{(x, \sin x) \mid x \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]\}, \sin^{-1} = \{(\sin x, x) \mid x \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]\}$$

