

Hiperbolički brojevi

Crnjak, Maria

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:080115>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-21**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO–MATEMATIČKI FAKULTET
MATEMATIČKI ODSJEK

Maria Crnjak

HIPERBOLIČKI BROJEVI

Diplomski rad

Voditelj rada:
Izv. prof. dr. sc. Zvonko Iljazović

Zagreb, srpanj, 2020.

Ovaj diplomski rad obranjen je dana _____ pred ispitnim povjerenstvom u sastavu:

1. _____, predsjednik
2. _____, član
3. _____, član

Povjerenstvo je rad ocijenilo ocjenom _____.

Potpisi članova povjerenstva:

1. _____
2. _____
3. _____

Zahvalu upućujem svima koji su direktno ili indirektno bili uključeni u proces dostizanja ovog cilja - naizgled iz nekog drugog svijeta. Međutim, očigledno postoji izomorfizam među svjetovima, jer inače danas ovog rada ne bi bilo!

Sadržaj

Sadržaj	iv
Uvod	1
1 Potpuno uređena polja	2
1.1 Grupe i prsteni	2
1.2 Uređeni prsteni i polja	5
2 Skupovi \mathbb{N}, \mathbb{Z}, \mathbb{Q}	7
2.1 Skup prirodnih brojeva	7
2.2 Skup cijelih brojeva	12
2.3 Skup racionalnih brojeva	14
3 Potprsteni i potpolja	17
3.1 Definicija i svojstva potprstena i potpolja	17
3.2 Prsten u prstenu. Polje u prstenu.	19
4 Polje kompleksnih brojeva \mathbb{C}	23
4.1 Definicija i svojstva kompleksnih brojeva	23
4.2 Realni brojevi u \mathbb{C}	26
4.3 Morfizam uređenih skupova	27
5 Tijelo kvaterniona \mathbb{H}	30
5.1 Definicija i svojstva kvaterniona	30
5.2 Morfizam prstenova	36
5.3 Kompleksni brojevi u \mathbb{H}	39
6 Prsten hiperboličkih brojeva \mathbb{D}	41
6.1 Definicija i svojstva hiperboličkih brojeva	41
6.2 Realni brojevi u \mathbb{H}	43

SADRŽAJ

v

Bibliografija

45

Uvod

U ovom radu će se proučavati strukture skupova prirodnih, cijelih i racionalnih brojeva, te određene algebarske strukture koje proširuju polje realnih brojeva. Između ostalog, proučavat će se kvaternioni i hiperbolički brojevi.

U prvom poglavlju proučavamo grupe i prstene, a definirat će se i potpuno uređeno polje. U drugom poglavlju definiramo prirodne, cijele i racionalne brojeve unutar fiksiranog polja realnih brojeva.

U trećem poglavlju proučavamo potprstene i potpolja.

U četvrtom poglavlju definiramo polje kompleksnih brojeva \mathbb{C} , zatim proučavamo određeno potpolje od \mathbb{C} izomorfno s \mathbb{R} te na kraju definiramo morfizam uređenih skupova.

U petom poglavlju definiramo i proučavamo svojstva tijela kvaterniona \mathbb{H} , proučavamo morfizme i izomorfizme prstenova, te razmatramo određeno polje u \mathbb{H} koje je izomorfno sa \mathbb{C} .

U šestom, konačnom, poglavlju definiramo prsten hiperboličkih brojeva \mathbb{D} , te proučavamo određeno polje u \mathbb{D} koje je izomorfno sa \mathbb{R} .

Poglavlje 1

Potpuno uređena polja

1.1 Grupe i prsteni

Definicija 1. Neka je S skup. Za bilo koju funkciju sa $S \times S$ u S kažemo da je **binarna operacija** na S .

Ako je $f : S \times S \rightarrow S$ tj. f je binarna operacija na S , onda ćemo za $x, y \in S$, umjesto $f(x, y)$ pisati xfy .

Binarne operacije na skupu S obično označavamo sa \cdot , $+$, $*$, i sl., pa ćemo za $x, y \in S$ vrijednost binarne operacije na uređenom paru (x, y) označavati sa $x \cdot y$, $x + y$, $x * y$, ...

Definicija 2. Neka je \cdot binarna operacija na skupu S . Kažemo da je \cdot **komutativna** binarna operacija, ako za $\forall x, y \in S$ vrijedi $x \cdot y = y \cdot x$.

Definicija 3. Neka je \cdot binarna operacija na skupu S . Kažemo da je \cdot **asocijativna** binarna operacija ako za $\forall x, y, z \in S$ vrijedi $x \cdot (y \cdot z) = (x \cdot y) \cdot z$.

Definicija 4. Za uređeni par (S, \cdot) , gdje je \cdot asocijativna binarna operacija na skupu S , kažemo da je **polugrupa**.

Definicija 5. Neka je \cdot binarna operacija na skupu S , te neka je $e \in S$. Kažemo da je e **neutralni element** za binarnu operaciju \cdot , ako za $\forall x \in S$ vrijedi $x \cdot e = x$ i $e \cdot x = x$.

Napomena 6. Neutralni element za binarnu operaciju, ako postoji, mora biti jedinstven.

Naime, pretpostavimo da je \cdot binarna operacija na skupu S te da su e_1 i e_2 neutralni elementi za binarnu operaciju \cdot . Znamo da je po definiciji neutralnog elementa, $e_1 \cdot x = x$, za $\forall x \in S$. Posebno vrijedi $e_1 \cdot e_2 = e_2$.

S druge strane, iz činjenice da je e_2 neutralni element za binarnu operaciju \cdot slijedi da je $x \cdot e_2 = x$, za $\forall x \in S$, pa je posebno $e_1 \cdot e_2 = e_1$.

Dakle, $e_1 \cdot e_2 = e_2$ i $e_1 \cdot e_2 = e_1$, pa je očito $e_1 = e_2$.

Definicija 7. Neka je (S, \cdot) polugrupa. Pretpostavimo da binarna operacija \cdot ima neutralni element. Tada za (S, \cdot) kažemo da je **monoid**.

Napomena 8. Ako je (S, \cdot) monoid, onda ćemo za neutralni element za binarnu operaciju \cdot reći da je neutralni element u monoidu (S, \cdot) i obično ćemo ga označavati sa e .

Definicija 9. Neka je (S, \cdot) monoid te neka je $x \in S$. Za $y \in S$ kažemo da je **inverzni element od x** u monoidu (S, \cdot) ako je $x \cdot y = e$ i $y \cdot x = e$.

Napomena 10. Inverzni element nekog elementa u monoidu, ako postoji, mora biti jedinstven.

Naime, pretpostavimo da je (S, \cdot) monoid, $x \in S$ te da su y_1 i y_2 inverzni elementi od x . Koristeći $x \cdot y_2 = e$ i $y_1 \cdot x = e$ dobivamo:

$$y_1 = y_1 \cdot e = y_1 \cdot (x \cdot y_2) = (y_1 \cdot x) \cdot y_2 = e \cdot y_2 = y_2$$

Dakle, $y_1 = y_2$.

Napomena 11. Ako je (S, \cdot) monoid i $x \in S$ element koji ima inverzni element, onda ćemo inverzni element od x obično označavati sa x^{-1} .

Definicija 12. Neka je (S, \cdot) monoid. Pretpostavimo da svaki element od S ima inverzni element u monoidu (S, \cdot) . Tada za (S, \cdot) kažemo da je **grupa**.

Definicija 13. Za grupu (S, \cdot) kažemo da je **komutativna** ili **Abelova** ako je binarna operacija \cdot komutativna.

Lema 14. Neka je S skup te neka su $+$ i \cdot binarne operacije na S . Za uređenu trojku $(S, +, \cdot)$ kažemo da je **prsten** ako vrijedi sljedeće:

1. $(S, +)$ je Abelova grupa.

2. (S, \cdot) je polugrupa.

3. za $\forall x, y, z \in S$ vrijedi:

$$x \cdot (y + z) = (x \cdot y) + (x \cdot z) \tag{1.1}$$

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

U tom slučaju za binarnu operaciju $+$ kažemo da je zbrajanje u prstenu $(S, +, \cdot)$, a za binarnu operaciju \cdot da je množenje u prstenu $(S, +, \cdot)$.

Napomena 15. Ako je $(S, +, \cdot)$ prsten, onda ćemo kao i inače podrazumijevati prilikom korištenja oznaka $+$ i \cdot da množenje ima veći prioritet od zbrajanja. Tako ćemo na primjer umjesto (1.1) pisati naprosto $x \cdot (y + z) = x \cdot y + x \cdot z$.

Napomena 16. Ako je $(S, +, \cdot)$ prsten, onda ćemo neutralni element za operaciju $+$ zvati **nula u prstenu** $(S, +, \cdot)$ i obično označavati sa 0 .

Nadalje, za $x \in S$ ćemo sa $-x$ označavati inverzni element od x u $(S, +)$. Dakle, $x + (-x) = 0$ i $(-x) + x = 0$.

Lema 17. Neka je (G, \cdot) grupa.

1. Neka su $a, b, c \in G$ tako da je $a \cdot b = a \cdot c$. Tada je $b = c$.
2. Neka su $a, b \in G$ tako da je $a \cdot b = a$. Tada je $b = e$.

Dokaz.

1. Iz $a \cdot b = a \cdot c$ slijedi $a^{-1} \cdot (a \cdot b) = a^{-1} \cdot (a \cdot c)$, pa je $(a^{-1} \cdot a) \cdot b = (a^{-1} \cdot a) \cdot c$, tj. $e \cdot b = e \cdot c$.
Dakle, $b = c$.
2. Iz $a \cdot b = a$ slijedi $a \cdot b = a \cdot e$, pa iz tvrdnje 1. slijedi $b = e$.

□

Propozicija 18. Neka je $(S, +, \cdot)$ prsten te neka je $x \in S$. Tada je $x \cdot 0 = 0$ i $0 \cdot x = 0$.

Dokaz. Vrijedi:

$$x \cdot 0 = x \cdot (0 + 0) = x \cdot 0 + x \cdot 0. \quad (1.2)$$

Definirajmo $a = x \cdot 0$. Iz (1.2) slijedi $a = a + a$, pa prema lemi 17. 2. vrijedi $a = 0$, odnosno $x \cdot 0 = 0$.

Analogno se dokaže da je $0 \cdot x = 0$. □

Definicija 19. Za prsten $(S, +, \cdot)$ kažemo da je komutativan ako je binarna operacija \cdot komutativna.

Definicija 20. Neka je $(S, +, \cdot)$ prsten. Kažemo da je $(S, +, \cdot)$ **prsten s jedinicom** ako binarna operacija \cdot ima neutralni element. U tom slučaju, taj neutralni element obično označavamo sa 1 i zovemo **jedinica u prstenu** $(S, +, \cdot)$.

Definicija 21. Za prsten $(S, +, \cdot)$ kažemo da je **integralna domena** ako za $\forall x, y \in S$ takve da su $x, y \neq 0$ vrijedi $x \cdot y = 0$.

Napomena 22. Neka je $(S, +, \cdot)$ prsten. Pretpostavimo da je (S, \cdot) grupa. Tada za $\forall x \in S \exists y \in S$ tako da vrijedi $x \cdot y = 1$ i $y \cdot x = 1$.

Posebno, za $x = 0 \exists y \in S$ tako da vrijedi $0 \cdot y = 1$ i $y \cdot 0 = 1$.

Iz propozicije 18. slijedi da je $0 \cdot y = 0$. Stoga je $0 = 1$. Neka je $x \in S$ neki element iz S . Imamo $x = x \cdot 1 = x \cdot 0 = 0$. Dakle, $x = 0, \forall x \in S$, tj. $S = \{0\}$.

Zaključak: Ako je $(S, +, \cdot)$ prsten takav da je (S, \cdot) grupa, onda je $S = \{0\}$, tj. prsten $(S, +, \cdot)$ je trivijalan.

Napomena 23. Za prsten $(S, +, \cdot)$ kažemo da je trivijalan ako je S jednočlan skup. Inače kažemo da je prsten netrivijalan.

Napomena 24. Neka je $(S, +, \cdot)$ prsten s jedinicom. Tada je $(S, +, \cdot)$ trivijalan prsten ako i samo ako je $0 = 1$.

Naime, ako je $(S, +, \cdot)$ trivijalan prsten, onda je očito $0 = 1$. Obratno, ako je $0 = 1$, onda kao u napomeni 16. vidimo da je $(S, +, \cdot)$ trivijalan prsten.

Definicija 25. Neka je $(S, +, \cdot)$ netrivijalan prsten s jedinicom. Pretpostavimo da za $\forall x \in S$ td. je $x \neq 0$ vrijedi da x ima inverzni element u monoidu (S, \cdot) , odnosno $\exists y \in S$ td. $x \cdot y = 1$ i $y \cdot x = 1$. Tada za $(S, +, \cdot)$ kažemo da je **tijelo**.

Propozicija 26. Neka je $(S, +, \cdot)$ tijelo. Tada je $(S, +, \cdot)$ integralna domena.

Dokaz. Neka su $x, y \in S$ takvi da $x \neq 0$ i $y \neq 0$. Pretpostavimo da je $x \cdot y = 0$.

Obzirom da je $(S, +, \cdot)$ tijelo, x ima inverzni element u (S, \cdot) [oznake x^{-1}]. Slijedi $x^{-1} \cdot (x \cdot y) = x^{-1} \cdot 0$. Nadalje, vrijedi $(x^{-1} \cdot x) \cdot y = 0$, tj. $1 \cdot y = 0$, pa je $y = 0$. To je u kontradikciji s početnom pretpostavkom da je $y \neq 0$.

Zaključak: $x \cdot y \neq 0$.

Slijedi da je $(S, +, \cdot)$ integralna domena. □

Definicija 27. Neka je $(S, +, \cdot)$ tijelo. Pretpostavimo da je binarna operacija \cdot komutativna. Tada za $(S, +, \cdot)$ kažemo da je **polje**.

1.2 Uređeni prsteni i polja

Definicija 28. Neka je S skup te neka je $\rho \subseteq S \times S$. Tada za ρ kažemo da je **binarna relacija** na S . Ako je ρ binarna relacija na skupu S te ako su $x, y \in S$ td. je $(x, y) \in \rho$, onda pišemo xpy .

Definicija 29. Neka je \leq binarna relacija na S .

1. Kažemo da je \leq **refleksivna relacija** na S ako je $x \leq x, \forall x \in S$.
2. Kažemo da je \leq **antisimetrična relacija** na S ako za $\forall x, y \in S$ td. je $x \leq y$ i $y \leq x$, vrijedi $x = y$.

3. Kažemo da je \leq **tranzitivna relacija** na S ako za $\forall x, y, z \in S$ td. je $x \leq y$ i $y \leq z$, vrijedi $x \leq z$.

Za binarnu relaciju na skupu S koja je refleksivna, antisimetrična i tranzitivna kažemo da je **parcijalni uređaj** na skupu S .

Definicija 30. Neka je \leq parcijalni uređaj na skupu S . Pretpostavimo da za $\forall x, y \in S$ vrijedi $x \leq y$ ili $y \leq x$. Tada za \leq kažemo da je **uređaj** na S .

Napomena 31. Parcijalni uređaj ne mora biti uređaj.

Naime, neka je S skup svih podskupova od \mathbb{R} . Na S definiramo binarnu relaciju \leq sa $A \leq B$ ako je $A \subseteq B$. Budući da za $\forall A \in S$ vrijedi $A \subseteq A$, tj. $A \leq A$, imamo da je \leq refleksivna relacija na S .

Nadalje, ako su $A, B \in S$ td. $A \leq B$ i $B \leq A$, onda je $A \subseteq B$ i $B \subseteq A$, pa je $A = B$. Dakle, relacija \leq je antisimetrična na S .

Lako vidimo da je \leq tranzitivna relacija na S .

Dakle, \leq je parcijalni uređaj na S . No, \leq nije uređaj na S jer za $A = \{1, 2\}$ i $B = \{3, 4\}$ imamo $A, B \in S$, ali ne vrijedi ni $A \leq B$ ni $B \leq A$.

Definicija 32. Neka je $(S, +, \cdot)$ prsten te neka je \leq uređaj na S td. za $\forall x, y, z \in S$ vrijedi sljedeće:

1. Ako je $x \leq y$, onda je $x + z \leq y + z$.
2. Ako je $0 \leq x$ i $0 \leq y$, onda je $0 \leq x \cdot y$.

Tada za uređenu četvorku $(S, +, \cdot, \leq)$ kažemo da je **uređeni prsten**.

Definicija 33. Za uređeni prsten $(S, +, \cdot, \leq)$ kažemo da je **uređeno polje**, ako je $(S, +, \cdot)$ polje.

Definicija 34. Neka je \leq uređaj na skupu S . Tada za uređeni par (S, \leq) kažemo da je **uređen skup**.

Definicija 35. Neka je (S, \leq) uređen skup. Pretpostavimo da za sve neprazne podskupove $A, B \in S$ td. je $x \leq y$ za $\forall x \in A$ i $\forall y \in B$ postoji $z \in S$ td. je $x \leq z$ za $\forall x \in A$ i $z \leq y$ za $\forall y \in B$.

Tada za (S, \leq) kažemo da je **potpuno uređen skup**.

Definicija 36. Neka je $(S, +, \cdot, \leq)$ uređeno polje takvo da je (S, \leq) potpuno uređen skup. Tada za $(S, +, \cdot, \leq)$ kažemo da je **potpuno uređeno polje** ili **polje realnih brojeva**.

Poglavlje 2

Skupovi \mathbb{N} , \mathbb{Z} , \mathbb{Q}

Od sad pa nadalje, neka je $(\mathbb{R}, +, \cdot, \leq)$ jedno fiksirano polje realnih brojeva.

2.1 Skup prirodnih brojeva

Definicija 37. Neka je $S \subseteq \mathbb{R}$. Kažemo da je S *induktivan skup* ako vrijedi sljedeće:

1. $1 \in S$.
2. Ako je $x \in S$, onda je $x + 1 \in S$.

Očito je \mathbb{R} induktivan skup.

S druge strane, skup $S = \{1\}$ nije induktivan. Naime, tada bi vrijedilo $1 + 1 \in S$, tj. $1 + 1 = 1$, iz čega prema lemi 17.2. slijedi da je $1 = 0$. No, $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ je netrivialan prsten (jer je polje, pa je i tijelo), pa prema napomeni 24. vrijedi $1 \neq 0$.

Dakle, S nije induktivan skup.

Definicija 38. Definirajmo $\mathbb{N} = \{x \in \mathbb{R} \mid x \in S, \text{ za svaki induktivni skup } S\}$.

Uočimo da je $1 \in \mathbb{N}$. Nadalje, pretpostavimo da je $x \in \mathbb{N}$. Tada je $x \in \mathbb{R}$ i $x \in S$ za svaki induktivni skup S . Iz definicije induktivnog skupa slijedi da je $x + 1 \in S$, za svaki induktivni skup S . Očito je $x + 1 \in \mathbb{R}$, pa iz toga slijedi da je $x + 1 \in \mathbb{N}$.

Zaključujemo da je \mathbb{N} induktivni skup.

Uočimo da iz definicije od \mathbb{N} slijedi da je $\mathbb{N} \subseteq S$, za svaki induktivni skup S .

Propozicija 39. Neka je $S \subseteq \mathbb{N}$ tako da vrijedi:

1. $1 \in S$.
2. Ako je $x \in S$, onda je $x + 1 \in S$.

Tada je $S = \mathbb{N}$.

Dokaz. Očito je S induktivan skup, pa je $\mathbb{N} \subseteq S$. S druge strane, prema pretpostavci propozicije, vrijedi $S \subseteq \mathbb{N}$, pa je $S = \mathbb{N}$. \square

Propozicija 40. Za sve $x, y \in \mathbb{N}$ vrijedi $x + y \in \mathbb{N}$.

Dokaz. Neka je $x_0 \in \mathbb{N}$. Dokažimo da je $x_0 + y \in \mathbb{N}$, za svaki $y \in \mathbb{N}$.

Neka je $S = \{y \in \mathbb{N} \mid x_0 + y \in \mathbb{N}\}$. Očito je $S \subseteq \mathbb{N}$. Imamo $1 \in \mathbb{N}$ i $x_0 + 1 \in \mathbb{N}$, jer je \mathbb{N} induktivan skup. Slijedi, $1 \in S$.

Pretpostavimo da je $y \in S$, tada je $y \in \mathbb{N}$ i $x_0 + y \in \mathbb{N}$. Iz činjenice da je \mathbb{N} induktivan skup slijedi da je $y + 1 \in \mathbb{N}$ i $(x_0 + y) + 1 \in \mathbb{N}$, odnosno $x_0 + (y + 1) \in \mathbb{N}$. Zaključujemo kako je $y + 1 \in S$.

Dakle, ako je $y \in S$, onda je $y + 1 \in S$.

Iz propozicije 39. slijedi da je $S = \mathbb{N}$. Dakle, za svaki $y \in \mathbb{N}$ vrijedi $x_0 + y \in \mathbb{N}$, pa je stoga tvrdnja ove propozicije dokazana. \square

Propozicija 41. Za sve $x, y \in \mathbb{N}$ vrijedi $x \cdot y \in \mathbb{N}$.

Dokaz. Neka je $x_0 \in \mathbb{N}$. Dokažimo da je $x_0 \cdot y \in \mathbb{N}$, za svaki $y \in \mathbb{N}$.

Neka je $S = \{y \in \mathbb{N} \mid x_0 \cdot y \in \mathbb{N}\}$. Očito je $S \subseteq \mathbb{N}$. Vrijedi $1 \in \mathbb{N}$ i $x_0 \cdot 1 \in \mathbb{N}$, pa je $1 \in S$.

Pretpostavimo da je $y \in S$. Tada vrijedi da je $y \in \mathbb{N}$ i $x_0 \cdot y \in \mathbb{N}$. Imamo $y + 1 \in \mathbb{N}$ i $x_0 \cdot (y + 1) = x_0 \cdot y + x_0$, pa iz propozicije 40. slijedi da je $x_0 \cdot (y + 1) \in \mathbb{N}$. Stoga je $y + 1 \in S$.

Iz propozicije 39. slijedi da je $S = \mathbb{N}$, čime je tvrdnja ove propozicije dokazana. \square

Propozicija 42. Za svaki $x \in \mathbb{N}$ vrijedi $1 \leq x$.

Kako bi dokazali ovu propoziciju, potrebne su nam još neke činjenice koje ćemo dokazati u nastavku, nakon čega ćemo provesti dokaz ove tvrdnje.

Napomena 43. Neka je $(P, +, \cdot)$ prsten. Tada za $\forall a \in P$ vrijedi $-(-a) = a$.

To slijedi iz $(-a) + a = 0$ dodavanjem $-a$ lijevoj i desnoj strani.

Propozicija 44. Neka je $(P, +, \cdot)$ prsten te neka su $x, y \in P$. Tada vrijedi:

1. $(-x) \cdot y = -(x \cdot y)$
2. $x \cdot (-y) = -(x \cdot y)$
3. $(-x) \cdot (-y) = x \cdot y$

Dokaz.

1. Vrijedi $(-x) \cdot y + x \cdot y = (-x + x) \cdot y = 0 \cdot y = 0$, što slijedi iz propozicije 18. Dakle, $(-x) \cdot y + x \cdot y = 0$, pa je tvrdnja 1. dokazana.
2. Tvrdnju 2. dokazujemo posve analogno.
3. Iz prethodno dokazanih tvrdnji 1. i 2. te napomene 43. slijedi:

$$(-x) \cdot (-y) = -(x \cdot (-y)) = -(-(x \cdot y)) = x \cdot y$$

□

Definicija 45. Neka je $(P, +, \cdot)$ prsten. Za $x, y \in P$ definiramo $x - y = x + (-y)$. Očito je $x - x = 0$ za $\forall x \in P$.

Propozicija 46. Neka je $(P, +, \cdot)$ prsten te neka su $x, y, z, \in P$. Tada vrijedi:

1. $x \cdot (y - z) = x \cdot y - x \cdot z$
2. $(x - y) \cdot z = x \cdot z - y \cdot z$

Dokaz. Koristeći propoziciju 44. dobivamo:

1. $x \cdot (y - z) = x \cdot (y + (-z)) = x \cdot y + (-(x \cdot z)) = x \cdot y - x \cdot z$.
2. Tvrdnju dokazujemo analogno.

□

Napomena 47. Neka je \leq uređaj na skupu S , te neka su $x, y \in S$. Pišemo:

1. $x \not\leq y$, ako ne vrijedi $x \leq y$.
2. $x < y$, ako vrijedi $x \leq y$ i $x \neq y$.
3. $x \not< y$, ako ne vrijedi $x < y$.

Propozicija 48. Neka je $(P, +, \cdot, \leq)$ uređeni prsten, pri čemu je $(P, +, \cdot)$ prsten s jedinicom. Tada je $0 \leq 1$.

Dokaz. Budući da je \leq uređaj na P , vrijedi $0 \leq 1$ ili $1 \leq 0$.

Pretpostavimo da $0 \not\leq 1$.

Tada je $1 \leq 0$, pa iz definicije uređenog prstena slijedi $(-1) + 1 \leq -1$, tj. $0 \leq -1$. Sada iz definicije uređenog prstena slijedi $0 \leq (-1) \cdot (-1)$.

Iz propozicije 44. 3. slijedi $(-1) \cdot (-1) = 1 \cdot 1 = 1$, dakle $0 \leq 1$, što je u kontradikciji s pretpostavkom da $0 \not\leq 1$. Prema tome, $0 \leq 1$. □

Korolar 49. *Neka je $(P, +, \cdot, \leq)$ uređeno polje. Tada je $0 < 1$.*

Dokaz. Prema definiciji polja vrijedi $0 \neq 1$, a prema propoziciji 48. vrijedi da je $0 \leq 1$. Stoga je $0 < 1$. \square

Sada se možemo vratiti na dokazivanje propozicije 42.:

Dokaz. Definirajmo $S = \{x \in \mathbb{N} \mid 1 \leq x\}$. Dovoljno je dokazati da je $S = \mathbb{N}$.

Vrijedi $1 \leq 1$ jer je binarna operacija \leq refleksivna. Prema tome, $1 \in S$.

Pretpostavimo da je $x \in S$. Tada je $1 \leq x$. Prema propoziciji 48. vrijedi da je $0 \leq 1$, pa slijedi $x \leq x + 1$. Nadalje, iz tranzitivnosti binarne operacije \leq slijedi da je $1 \leq x + 1$. Dakle, $x + 1 \in S$.

Iz gore navedenoga slijedi kako za $\forall x \in S$ vrijedi $x + 1 \in S$. Tada iz propozicije 39. slijedi $S = \mathbb{N}$. \square

Napomena 50. *Neka je \leq uređaj na skupu S . Za $\forall x \in S$ očito vrijedi $x \not< x$.*

Nadalje, ako su $x, y \in S$, onda ne može vrijediti i $x \leq y$ i $y < x$. Naime, u suprotnom bi antisimetričnost binarne operacije \leq povlačila da je $x = y$, što je nemoguće zbog $y < x$.

Analogno, ne može vrijediti i $x < y$ i $y \leq x$.

Napomena 51. *Neka je \leq uređaj na skupu S te neka su $x, y \in S$. Tada je $x < y$ ili $x = y$ ili $y < x$.*

Naime, ako je $x = y$, tvrdnja je očita. U slučaju kada je $x \neq y$, zbog $x \leq y$ ili $y \leq x$ (što vrijedi po definiciji uređaja) imamo $x < y$ ili $y < x$.

Napomena 52. *Neka je \leq uređaj na skupu S . Neka su $x, y \in S$ takvi da $x \not< y$. Tada je $y \leq x$.*

Naime, tvrdnja slijedi iz prethodno navedene napomene 51. Obratno, kada bi vrijedilo $x \not< y$, to bi povlačilo da je $y < x$, što također slijedi iz napomene 51.

Propozicija 53. *Neka je \leq uređaj na skupu S te neka su $x, y, z \in S$.*

1. *Pretpostavimo da je $x \leq y$ i $y < z$. Tada je $x < z$.*
2. *Pretpostavimo da je $x < y$ i $y \leq z$. Tada je $x < z$.*

Dokaz.

1. Iz tranzitivnosti relacije \leq slijedi $x \leq z$. Pretpostavimo da je $x = z$. Tada iz pretpostavke tvrdnje 1. slijedi $x \leq y$ i $y < x$, što je nemoguće prema napomeni 50. Prema tome, $x \neq z$, pa je $x < z$.

2. Tvrdnju 2. dokazujemo analogno. □

Propozicija 54. *Neka je $(P, +, \cdot, \leq)$ uređeni prsten te neka su $x, y, z \in P$. Pretpostavimo da je $x < y$. Tada je $x + z < y + z$.*

Dokaz. Iz $x < y$ slijedi $x \leq y$, pa prema definiciji uređenog prstena vrijedi $x + z \leq y + z$. Još je potrebno pokazati da je $x + z \neq y + z$.

Pretpostavimo suprotno, tj. da je $x + z = y + z$. Slijedi $(x + z) + (-z) = (y + z) + (-z)$, pa dobivamo $x = y$, što je u kontradikciji s pretpostavkom da je $x < y$. Prema tome, $x + z \neq y + z$.

Zaključujemo, $x + z < y + z$. □

Korolar 55. *Za svaki $x \in \mathbb{N}$ vrijedi $x \neq 0$.*

Dokaz. Neka je $x \in \mathbb{N}$. Prema propoziciji 42. vrijedi $1 \leq x$. Iz korolara 49. slijedi da je $0 < 1$, a iz propozicije 53. 2. slijedi da je $0 < x$. Tada posebno vrijedi da je $x \neq 0$. □

Lema 56. *Vrijedi:*

$$\mathbb{N} = \{1\} \cup \{1 + k \mid k \in \mathbb{N}\}$$

Dokaz. Označimo $S = \{1\} \cup \{1 + k \mid k \in \mathbb{N}\}$. Očito je $S \subseteq \mathbb{N}$. Nadalje, očito je $1 \in S$.

Pretpostavimo da je $x \in S$. Tada je $x \in \mathbb{N}$, pa je očito $x + 1 \in S$. Shodno tome, iz propozicije 39. slijedi da je $S = \mathbb{N}$. □

Propozicija 57. *Ako su $x, y \in \mathbb{N}$ tako da je $x < y$, onda je $x + 1 \leq y$.*

Dokaz. Definirajmo S kao skup svih $x \in \mathbb{N}$ koji imaju sljedeće svojstvo - ako je $y \in \mathbb{N}$ tako da je $x < y$, onda je $x + 1 \leq y$.

Dokažimo da je $S = \mathbb{N}$. Očito je $S \subseteq \mathbb{N}$. Dokažimo da je $1 \in S$. Pretpostavimo da je $y \in \mathbb{N}$ tako da je $1 < y$. Slijedi $1 \neq y$, pa iz leme 56. zaključujemo da postoji $k \in \mathbb{N}$ tako da je $y = 1 + k$. Prema propoziciji 42. vrijedi $1 \leq k$, što povlači da je $1 + 1 \leq k + 1$, odnosno $1 + 1 \leq y$. Time smo dokazali da je $1 \in S$.

Pretpostavimo da je $x \in S$. Želimo dokazati da je $x + 1 \in S$. Pretpostavimo da je $y \in \mathbb{N}$ tako da je $x + 1 < y$. Zbog $x + 1 \in \mathbb{N}$ imamo da je $1 \leq x + 1$, pa slijedi $1 < y$. Iz leme 56. slijedi da postoji $k \in \mathbb{N}$ tako da je $y = k + 1$. Sada zbog $x + 1 < y$ imamo $x + 1 < k + 1$, pa iz propozicije 54. slijedi da je $(x + 1) + (-1) < (k + 1) + (-1)$, tj. $x < k$. Zbog toga što je $x \in S$ imamo da $x + 1 \leq k$. Slijedi $(x + 1) + 1 \leq k + 1$, tj. $(x + 1) + 1 \leq y$. Stoga je $x + 1 \in S$.

Iz propozicije 39. slijedi $S = \mathbb{N}$. Time je tvrdnja propozicije dokazana. □

Lema 58. *Neka je $n \in \mathbb{N}$. Tada je $\mathbb{N} = \{x \in \mathbb{N} \mid x \leq n\} \cup \{n + k \mid k \in \mathbb{N}\}$.*

Dokaz. Neka je $S = \{x \in \mathbb{N} \mid x \leq n\} \cup \{n + k \mid k \in \mathbb{N}\}$. Očito je $S \subseteq \mathbb{N}$. Imamo $1 \in \mathbb{N}$ i $1 \leq n$, pa je $1 \in S$. Pretpostavimo da je $x \in S$. Tada je $x \leq n$ ili $x \in \{n + k \mid k \in \mathbb{N}\}$.

1. $x \leq n$

Ako je $x = n$, onda je $x + 1 = n + 1$, pa je očito $x + 1 \in S$.

Pretpostavimo da je $x \neq n$. Tada imamo $x < n$, pa prema propoziciji 57. vrijedi $x + 1 \leq n$. Stoga je $x + 1 \in S$.

2. $x \in \{n + k \mid k \in \mathbb{N}\}$

Tada postoji $k \in \mathbb{N}$ takav da je $x = n + k$. Vrijedi $x + 1 = (n + k) + 1 = n + (k + 1)$. Stoga je $x + 1 \in S$.

U oba slučaja smo dobili da je $x + 1 \in S$. Iz propozicije 39. slijedi da je $S = \mathbb{N}$. \square

Korolar 59. Neka su $m, n \in \mathbb{N}$ takvi da je $n < m$. Tada je $m - n \in \mathbb{N}$.

Dokaz. Prema lemi 58. vrijedi $\mathbb{N} = \{x \in \mathbb{N} \mid x \leq n\} \cup \{n + k \mid k \in \mathbb{N}\}$. Stoga slijedi da je $m \in \{x \in \mathbb{N} \mid x \leq n\}$ ili $m \in \{n + k \mid k \in \mathbb{N}\}$. Međutim, zbog pretpostavke korolara i napomene 50. ne vrijedi $m \leq n$.

Prema tome, $m \in \{n + k \mid k \in \mathbb{N}\}$. Dakle, postoji $k \in \mathbb{N}$ takav da je $m = n + k$. Slijedi $m + (-n) = k$, tj. $m - n = k$, pa je očito $m - n \in \mathbb{N}$. \square

Propozicija 60. Neka je (G, \cdot) monoid te neka su x i y invertibilni elementi u (G, \cdot) . Tada je $x \cdot y$ invertibilan element i vrijedi $(x \cdot y)^{-1} = y^{-1} \cdot x^{-1}$.

Dokaz. Vrijedi:

$$(x \cdot y) \cdot (y^{-1} \cdot x^{-1}) = ((x \cdot y) \cdot y^{-1}) \cdot x^{-1} = (x \cdot (y \cdot y^{-1})) \cdot x^{-1} = (x \cdot e) \cdot x^{-1} = x \cdot x^{-1} = e.$$

Dakle, $(x \cdot y) \cdot (y^{-1} \cdot x^{-1}) = e$. Analogno dobivamo da je $(y^{-1} \cdot x^{-1}) \cdot (x \cdot y) = e$, pa slijedi da je $x \cdot y$ invertibilan i vrijedi $y^{-1} \cdot x^{-1} = (x \cdot y)^{-1}$. \square

Korolar 61. Neka je $(P, +, \cdot)$ prsten. Tada za $\forall x, y \in P$ vrijedi $-(x + y) = (-x) + (-y)$.

2.2 Skup cijelih brojeva

Definicija 62. Definirajmo $\mathbb{Z} = \mathbb{N} \cup \{0\} \cup \{-n \mid n \in \mathbb{N}\}$.

Propozicija 63. Neka su $x, y \in \mathbb{Z}$. Tada je $x + y \in \mathbb{Z}$.

Dokaz. Tvrdnja je jasna ako je $x = 0$ ili $y = 0$. Pretpostavimo da je $x \neq 0$ i $y \neq 0$. Tada imamo 4 mogućnosti:

1. $x, y \in \mathbb{N}$

Tada je $x + y \in \mathbb{N}$, pa je $x + y \in \mathbb{Z}$.

2. $x, y \in \{-n \mid n \in \mathbb{N}\}$

Tada $\exists m, n \in \mathbb{N}$ takvi da je $x = -m$ i $y = -n$. Koristeći korolar 61. dobivamo $x + y = (-m) + (-n) = -(m + n)$. Dakle, $x + y = -(m + n)$, pa zbog $m + n \in \mathbb{N}$ imamo $x + y \in \mathbb{Z}$.

3. $x \in \mathbb{N}, y \in \{-n \mid n \in \mathbb{N}\}$

Slijedi da postoji $n \in \mathbb{N}$ takav da je $y = -n$. Imamo $x + y = x + (-n) = x - n$. Imamo tri slučaja:

a) $n < x$

Prema korolaru 59. vrijedi $x - n \in \mathbb{N}$, pa je stoga $x + y \in \mathbb{Z}$.

b) $x = n$

Tada je $x - n = 0$, pa je $x + y \in \mathbb{Z}$.

c) $x < n$

Iz napomene 43. i korolara 61. slijedi:

$$x - n = -(-(x + (-n))) = -((-x) + (-(-n))) = -((-x) + n) = -(n - x).$$

Dakle, $x + y = -(n - x)$. Ako je $x < n$, onda je prema korolaru 59. $n - x \in \mathbb{N}$, pa je $x + y \in \mathbb{Z}$.

4. $x \in \{-n \mid n \in \mathbb{N}\}, y \in \mathbb{N}$

Analogno kao u slučaju 3. dobivamo da je $x + y \in \mathbb{Z}$.

Time je tvrdnja propozicije dokazana. □

Propozicija 64. *Neka su $x, y \in \mathbb{Z}$. Tada je $x \cdot y \in \mathbb{Z}$.*

Dokaz. Ako je $x = 0$ ili $y = 0$, onda je $x \cdot y = 0$, pa je očito $x \cdot y \in \mathbb{Z}$. Pretpostavimo da je $x \neq 0$ i $y \neq 0$. Imamo 4 mogućnosti:

1. $x, y \in \mathbb{N}$

Tada je $x \cdot y \in \mathbb{N}$, pa je $x \cdot y \in \mathbb{Z}$.

2. $x \in \{-n \mid n \in \mathbb{N}\}, y \in \mathbb{N}$

Tada je $x = -n$ za neki $n \in \mathbb{N}$. Iz propozicije 44. slijedi $x \cdot y = (-n) \cdot y = -(n \cdot y)$. Vrijedi $n \cdot y \in \mathbb{N}$, pa je $x \cdot y \in \mathbb{Z}$.

$$3. x \in \mathbb{N}, y \in \{-n \mid n \in \mathbb{N}\}$$

Analogno kao u prethodnom slučaju dobijemo da je $x \cdot y \in \mathbb{Z}$.

$$4. x, y \in \{-n \mid n \in \mathbb{N}\}$$

Tada je $x = -n$, $y = -m$ za neke $n, m \in \mathbb{N}$. Iz propozicije 44. slijedi $x \cdot y = (-n) \cdot (-m) = n \cdot m \in \mathbb{N}$, pa je $x \cdot y \in \mathbb{Z}$.

Time je tvrdnja propozicije dokazana. □

Propozicija 65. Neka je $x \in \mathbb{Z}$. Tada je $-x \in \mathbb{Z}$.

Dokaz.

$$1. \text{ Ako je } x \in \mathbb{N}, \text{ onda je o} \text{čito } -x \in \mathbb{Z}.$$

$$2. \text{ Ako je } x = 0, \text{ onda je } -x = 0, \text{ pa je } -x \in \mathbb{Z}.$$

$$3. \text{ Ako je } x \in \{-n \mid n \in \mathbb{N}\}, \text{ onda je } x = -n, \text{ za neki } n \in \mathbb{N}. \text{ Iz napomene 43. slijedi } -x = -(-n) = n \in \mathbb{N}. \text{ Stoga je } -x \in \mathbb{Z}.$$

□

2.3 Skup racionalnih brojeva

Definicija 66. Za $x, y \in \mathbb{R}$, $y \neq 0$ definiramo $\frac{x}{y} = x \cdot y^{-1}$.

Propozicija 67. Neka su $x, y, z, k, u, v \in \mathbb{R}$, pri čemu su $y \neq 0$, $k \neq 0$ i $v \neq 0$. Tada vrijedi:

$$1. \frac{x}{1} = x$$

$$2. \frac{x}{y} = \frac{kx}{ky}$$

$$3. \frac{x}{y} + \frac{z}{y} = \frac{x+z}{y}$$

$$4. \frac{x}{y} + \frac{u}{v} = \frac{xv+uy}{yv}$$

$$5. \frac{x}{y} \cdot \frac{u}{v} = \frac{xu}{yv}$$

Dokaz.

$$1. \text{ O} \text{čito je } 1^{-1} = 1, \text{ pa je } \frac{x}{1} = x \cdot 1^{-1} = x \cdot 1 = x.$$

2. Uz pomoć propozicije 60. dobivamo:

$$\begin{aligned}\frac{kx}{ky} &= (kx) \cdot (ky)^{-1} = (kx) \cdot (k^{-1} \cdot y^{-1}) = k(x \cdot (k^{-1} \cdot y^{-1})) = k((x \cdot k^{-1}) \cdot y^{-1}) = \\ &= k((k^{-1} \cdot x) \cdot y^{-1}) = k(k^{-1} \cdot (x \cdot y^{-1})) = (k \cdot k^{-1}) \cdot (x \cdot y^{-1}) = \\ &= 1 \cdot (x \cdot y^{-1}) = x \cdot y^{-1} = \frac{x}{y}\end{aligned}$$

3. Vrijedi:

$$\frac{x}{y} + \frac{z}{y} = x \cdot y^{-1} + z \cdot y^{-1} = (x + z) \cdot y^{-1} = \frac{x + z}{y}$$

4. Koristeći prethodno dokazane tvrdnje 2. i 3. dobivamo:

$$\frac{x}{y} + \frac{u}{v} = \frac{x \cdot v}{y \cdot v} + \frac{u \cdot y}{v \cdot y} = \frac{xv + uy}{yv}$$

5. Koristeći propoziciju 60. dobivamo:

$$\frac{x}{y} \cdot \frac{u}{v} = (x \cdot y^{-1}) \cdot (u \cdot v^{-1}) = (x \cdot u) \cdot (y^{-1} \cdot v^{-1}) = (x \cdot u) \cdot (y \cdot v)^{-1} = \frac{x \cdot u}{y \cdot v}$$

□

Definicija 68. Definirajmo $\mathbb{Q} = \left\{ \frac{m}{n} \mid m \in \mathbb{Z}, n \in \mathbb{N} \right\}$.

Za svaki $m \in \mathbb{Z}$ vrijedi $m = \frac{m}{1}$, pa je $m \in \mathbb{Q}$. Dakle, $\mathbb{Z} \subseteq \mathbb{Q}$.

Propozicija 69. Neka su $r_1, r_2 \in \mathbb{Q}$. Tada je $r_1 + r_2 \in \mathbb{Q}$ i $r_1 \cdot r_2 \in \mathbb{Q}$.

Dokaz. Imamo $r_1 = \frac{x}{y}$, gdje su $x \in \mathbb{Z}$, $y \in \mathbb{N}$ i $r_2 = \frac{u}{v}$, gdje su $u \in \mathbb{Z}$, $v \in \mathbb{N}$. Prema propoziciji 67. vrijedi

$$r_1 + r_2 = \frac{xv + uy}{yv} \quad \text{i} \quad r_1 \cdot r_2 = \frac{xu}{yv}$$

pa iz propozicija 40., 41., 63. i 64. slijedi $r_1 + r_2 \in \mathbb{Q}$ i $r_1 \cdot r_2 \in \mathbb{Q}$. □

Napomena 70. Neka je $(P, +, \cdot)$ polje te neka je $x \in P$, $x \neq 0$. Tada je $(-x)^{-1} = -x^{-1}$.

Naime, imamo $(-x) \cdot (-x^{-1}) = x \cdot x^{-1} = 1$, pri čemu smo koristili propoziciju 44. Dakle, $(-x) \cdot (-x^{-1}) = 1$, pa je očito $(-x)^{-1} = -x^{-1}$.

Propozicija 71. Neka su $x, y \in \mathbb{R}$, $y \neq 0$.

1. Vrijedi: $-\frac{x}{y} = \frac{-x}{y}$

2. Vrijedi: $-\frac{x}{y} = \frac{x}{-y}$

3. Pretpostavimo da je $x \neq 0$. Tada je $\frac{x}{y} \neq 0$ te je $\left(\frac{x}{y}\right)^{-1} = \frac{y}{x}$.

Dokaz.

1. Koristeći propoziciju 44. dobivamo:

$$-\frac{x}{y} = -(x \cdot y^{-1}) = (-x) \cdot y^{-1} = \frac{-x}{y}$$

2. Koristeći propoziciju 44. i napomenu 70. dobivamo:

$$-\frac{x}{y} = -(x \cdot y^{-1}) = x \cdot (-y^{-1}) = x \cdot (-y)^{-1} = \frac{x}{-y}$$

3. Imamo $\frac{x}{y} = x \cdot y^{-1}$, pa iz činjenice da je $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ integralna domena slijedi da je $\frac{x}{y} \neq 0$. Prema propoziciji 60. vrijedi:

$$\left(\frac{x}{y}\right)^{-1} = (x \cdot y^{-1})^{-1} = (y^{-1})^{-1} \cdot x^{-1}$$

Iz definicije inverznog elementa u monoidu je očito da je $(y^{-1})^{-1} = y$. Stoga je:

$$\left(\frac{x}{y}\right)^{-1} = y \cdot x^{-1} = \frac{y}{x}$$

□

Propozicija 72. Neka je $r \in \mathbb{Q}$. Tada je $-r \in \mathbb{Q}$. Nadalje, ako je $r \neq 0$, onda je $r^{-1} \in \mathbb{Q}$.

Dokaz. Iz propozicije 71. 1. lako zaključujemo da je $-r \in \mathbb{Q}$.

Imamo $r = \frac{m}{n}$, gdje su $m \in \mathbb{Z}$ i $n \in \mathbb{N}$. Pretpostavimo da je $r \neq 0$. Tada je $m \neq 0$.

Iz propozicije 71. 3., napomene 43. i propozicije 71. 1. i 2. točno ovim redoslijedom slijedi:

$$r^{-1} = \frac{n}{m} = -\left(-\frac{n}{m}\right) = -\frac{n}{-m} = \frac{-n}{-m}$$

Dakle, $r^{-1} = \frac{n}{m}$ i $r^{-1} = \frac{-n}{-m}$. Iz $m \in \mathbb{Z}$ i $m \neq 0$ slijedi da je $m \in \mathbb{N}$ ili $m \in \{-k \mid k \in \mathbb{N}\}$.

Ako je $m \in \mathbb{N}$, onda iz $r = \frac{n}{m}$ slijedi da je $r^{-1} \in \mathbb{Q}$.

Ako je $m \in \{-k \mid k \in \mathbb{N}\}$, onda je $m = -k$, $k \in \mathbb{N}$, pa je prema napomeni 43., $-m = k$, odnosno, $-m \in \mathbb{N}$. Tada iz $r^{-1} = \frac{-n}{-m}$ slijedi da je $r^{-1} \in \mathbb{Q}$.

Time je tvrdnja propozicije dokazana. □

Poglavlje 3

Potprsteni i potpolja

3.1 Definicija i svojstva potprstena i potpolja

Definicija 73. Neka su $(A, +_A, \cdot_A)$ i $(B, +_B, \cdot_B)$ prsteni. Kažemo da je $(A, +_A, \cdot_A)$ **potprsten** od $(B, +_B, \cdot_B)$ ako je $A \subseteq B$ te ako za $\forall x, y \in A$ vrijedi:

$$x +_A y = x +_B y \quad i \quad x \cdot_A y = x \cdot_B y$$

Propozicija 74. Neka je $(A, +_A, \cdot_A)$ potprsten od $(B, +_B, \cdot_B)$. Neka je 0_A nula u prstenu $(A, +_A, \cdot_A)$ te neka je 0_B nula u prstenu $(B, +_B, \cdot_B)$. Tada je $0_A = 0_B$.

Dokaz. Odaberimo $x \in A$.

Imamo $0_A +_A x = x$, tj. $0_A +_B x = x$. Budući da je $(B, +_B, \cdot_B)$ prsten, postoji $y \in B$ takav da je $x +_B y = 0_B$.

Iz $0_A +_B x = x$ slijedi $(0_A +_B x) +_B y = x +_B y$, pa je $0_A +_B (x +_B y) = 0_B$, tj. $0_A +_B 0_B = 0_B$.

Obzirom da je 0_B nula u prstenu $(B, +_B, \cdot_B)$, slijedi da je $0_A +_B 0_B = 0_A$, pa je $0_A = 0_B$. □

Napomena 75. Neka je $(A, +_A, \cdot_A)$ potprsten od $(B, +_B, \cdot_B)$. Neka je $x \in A$. Tada je inverzni element od x u $(A, +_A)$ jednak inverznom elementu u $(B, +_B)$.

Naime, neka je 0 nula u prstenu $(A, +_A, \cdot_A)$. Prema prethodnoj propoziciji vrijedi da je 0 nula u prstenu $(B, +_B, \cdot_B)$. Neka je y inverzni element od x u $(A, +_A)$. Tada je $x +_A y = 0$ i $y +_A x = 0$, tj. $x +_B y = 0$ i $y +_B x = 0$. Iz ovoga zaključujemo da je y inverzni element od x u $(B, +_B)$.

Propozicija 76. Neka je $(B, +, \cdot)$ prsten, te neka je $A \subseteq B$, $A \neq \emptyset$. Tada postoje binarne operacije $+_A$ i \cdot_A na A tako da je $(A, +_A, \cdot_A)$ potprsten od $(B, +, \cdot)$ ako i samo ako za $\forall x, y \in A$ vrijedi $x - y \in A$ i $x \cdot y \in A$.

Dokaz. Pretpostavimo da postoje binarne operacije $+_A$ i \cdot_A na A takve da je $(A, +_A, \cdot_A)$ potprsten od $(B, +, \cdot)$.

Neka su $x, y \in A$. Imamo $x \cdot y = x \cdot_A y \in A$, dakle $x \cdot y \in A$.

Prema napomeni 75., inverzni element od y u $(A, +_A)$ jednak je inverznom elementu od y u $(B, +)$, tj. jednak je $-y$. Prema tome, $-y \in A$. Vrijedi:

$$x - y = x + (-y) = x +_A (-y) \in A$$

Dakle, $x - y \in A$.

Obratno, pretpostavimo da za $\forall x, y \in A$ vrijedi $x - y \in A$ i $x \cdot y \in A$. Odaberimo neki $x_0 \in A$. Tada je prema pretpostavci $x_0 - x_0 \in A$, tj. $0 \in A$.

Neka je $y \in A$. Imamo $0, y \in A$, pa prema pretpostavci vrijedi $0 - y \in A$, tj. $-y \in A$. Dakle, za $\forall y \in A$ vrijedi $-y \in A$.

Neka su $x, y \in A$. Slijedi $x - y \in A$, pa prema pretpostavci vrijedi $x - (-y) \in A$, tj. $x + (-(-y)) \in A$. Dakle, $x + y \in A$, za $\forall x, y \in A$.

Definirajmo binarne operacije $+_A$ i \cdot_A na A sa $x +_A y = x + y$ i $x \cdot_A y = x \cdot y$. Tvrdimo da je $(A, +_A, \cdot_A)$ potprsten od $(B, +, \cdot)$. Dovoljno je dokazati da je $(A, +_A, \cdot_A)$ prsten.

Neka su $x, y, z \in A$. Vrijedi:

$$(x +_A y) +_A z = (x + y) + z = x + (y + z) = x +_A (y +_A z)$$

Prema tome, operacija $+_A$ je asocijativna na A . Analogno dobivamo da je operacija \cdot_A asocijativna na A te da je $+_A$ komutativna operacija na A .

Vidjeli smo da je $0 \in A$. Za svaki $x \in A$ vrijedi $x +_A 0 = x + 0 = x$ i $0 +_A x = 0 + x = x$. Prema tome, 0 je neutralni element za operaciju $+_A$.

Također smo vidjeli da za svaki $x \in A$ vrijedi da je $-x \in A$. Za svaki $x \in A$ vrijedi $x +_A (-x) = x + (-x) = 0$ i $(-x) +_A x = 0$.

Zaključak: $(A, +_A)$ je Abelova grupa. Nadalje, (A, \cdot_A) je polugrupa. Neka su $x, y, z \in A$. Iz $x \cdot (y + z) = x \cdot y + x \cdot z$ neposredno slijedi $x \cdot_A (y +_A z) = x \cdot_A y +_A x \cdot_A z$. Analogno zaključujemo da je $(x +_A y) \cdot_A z = x \cdot_A z +_A y \cdot_A z$.

Prema tome, $(A, +_A, \cdot_A)$ je prsten. □

Definicija 77. Neka su $(A, +_A, \cdot_A)$ i $(B, +_B, \cdot_B)$ polja. Kažemo da je $(A, +_A, \cdot_A)$ **potpolje** od $(B, +_B, \cdot_B)$ ako je $(A, +_A, \cdot_A)$ potprsten od $(B, +_B, \cdot_B)$.

Propozicija 78. Neka je $(A, +_A, \cdot_A)$ potpolje od $(B, +_B, \cdot_B)$. Neka je 1_A jedinica u prstenu $(A, +_A, \cdot_A)$, te neka je 1_B jedinica u prstenu $(B, +_B, \cdot_B)$. Tada je $1_A = 1_B$.

Dokaz. Prema propoziciji 74., nule u ova dva prstena se podudaraju. Odaberimo $x \in A$ tako da je $x \neq 0$. Neka je $y \in B$ inverzni element od x u (B, \cdot_B) .

Imamo $1_A \cdot_A x = x$, tj. $1_A \cdot_B x = x$, pa slijedi $(1_A \cdot_B x) \cdot_B y = x \cdot_B y$, tj. $1_A \cdot_B (x \cdot_B y) = 1_B$, odnosno $1_A \cdot_B 1_B = 1_B$.

Stoga je $1_A = 1_B$. □

Napomena 79. Neka je $(A, +_A, \cdot_A)$ potpolje od $(B, +_B, \cdot_B)$. Neka je $x \in A, x \neq 0_A$, te neka je $y \in A$ inverzni element od x u (A, \cdot_A) . Tada je y inverzni element od x u (B, \cdot_B) .

Naime, vrijedi $x \cdot_A y = 1_A$ i $y \cdot_A x = 1_A$, pa iz prethodne propozicije slijedi $x \cdot_B y = 1_B$ i $y \cdot_B x = 1_B$.

3.2 Prsten u prstenu. Polje u prstenu.

Definicija 80. Neka je $(B, +, \cdot)$ prsten, te neka je $A \subseteq B$. Kažemo da je A **prsten u** $(B, +, \cdot)$ ako postoje binarne operacije $+_A$ i \cdot_A na A tako da je $(A, +_A, \cdot_A)$ potprsten od $(B, +, \cdot)$.

Definicija 81. Neka je $(B, +, \cdot)$ prsten, te neka je $A \subseteq B$. Kažemo da je A **polje u** $(B, +, \cdot)$ ako postoje binarne operacije $+_A$ i \cdot_A na A tako da je $(A, +_A, \cdot_A)$ potpolje od $(B, +, \cdot)$.

Propozicija 82. Neka je $(B, +, \cdot)$ polje, te neka je $A \subseteq B$ td. A ima barem 2 elementa. Tada je A polje u $(B, +, \cdot)$ ako i samo ako vrijedi:

$$\begin{aligned} x - y \in A \text{ i } x \cdot y \in A \text{ za } \forall x, y \in A \\ \text{te } x^{-1} \in A \text{ za } \forall x \in A \text{ td. je } x \neq 0 \end{aligned} \quad (*)$$

Dokaz. Pretpostavimo da vrijedi (*).

Iz propozicije 76. slijedi da postoje binarne operacije $+_A$ i \cdot_A iz A tako da je $(A, +_A, \cdot_A)$ potprsten od $(B, +, \cdot)$. Dokažimo da je $(A, +_A, \cdot_A)$ polje.

Budući da A ima barem 2 elementa, postoji $x \in A$ tako da je $x \neq 0$. Prema (*) vrijedi $x^{-1} \in A$, pa iz (*) zaključujemo da je $x \cdot x^{-1} \in A$, tj. $1 \in A$. Neka je $x \in A$. Imamo $x \cdot_A 1 = x \cdot 1 = x$, te analogno $1 \cdot_A x = x$. Prema tome, 1 je jedinica u prstenu $(A, +_A, \cdot_A)$.

Neka su $x, y \in A$. Imamo $x \cdot_A y = x \cdot y = y \cdot x = y \cdot_A x$. Prema tome, operacija \cdot_A je komutativna pa slijedi da je $(A, +_A, \cdot_A)$ komutativan prsten.

Uočimo da prema propoziciji 74. vrijedi $0_A = 0$. Neka je $x \in A, x \neq 0_A$. Tada je $x \neq 0$, pa je prema (*) $x^{-1} \in A$. Imamo $x \cdot_A x^{-1} = x \cdot x^{-1} = 1$, te analogno $x^{-1} \cdot x = 1$. Zaključujemo da je $(A, +_A, \cdot_A)$ polje.

Prema tome, $(A, +_A, \cdot_A)$ je potpolje od $(B, +, \cdot)$. Time smo dokazali da je A polje u $(B, +, \cdot)$.

Obratno, pretpostavimo da je A polje u $(B, +, \cdot)$.

Tada postoje binarne operacije $+_A$ i \cdot_A na A tako da je $(A, +_A, \cdot_A)$ potpolje od $(B, +, \cdot)$. Posebno, imamo da je $(A, +_A, \cdot_A)$ potprsten od $(B, +, \cdot)$, pa iz propozicije 76. slijedi da za svaki $x, y \in A$ vrijedi $x - y \in A$ i $x \cdot y \in A$.

Pretpostavimo da je $x \in A$, td. $x \neq 0$. Znamo da je $0_A = 0$ iz propozicije 74., pa je $x \neq 0_A$, što zajedno s činjenicom da je $(A, +_A, \cdot_A)$ polje povlači da postoji $y \in A$ takav da je

$x \cdot_A y = 1_A$ i $y \cdot_A x = 1_A$. Iz propozicije 78. slijedi da je $1_A = 1$, pa je $x \cdot y = 1$ i $y \cdot x = 1$, što znači da je $y = x^{-1}$. Prema tome, $x^{-1} \in A$.

Zaključujemo kako vrijedi (*). □

Primjer 83.

- Imamo $1 \in \mathbb{N}$, no $1 - 1 = 0$, a $0 \notin \mathbb{N}$ prema korolaru 55. Stoga iz propozicije 76. slijedi da \mathbb{N} **nije** prsten u $(\mathbb{R}, +, \cdot)$.
- Neka su $x, y, z \in \mathbb{Z}$. Iz propozicija 63., 64. i 65. slijedi da je $x - y \in \mathbb{Z}$ i $x \cdot y \in \mathbb{Z}$. Stoga iz propozicije 76. slijedi da je \mathbb{Z} prsten u $(\mathbb{R}, +, \cdot)$.
- Neka su $x, y \in \mathbb{Q}$. Iz propozicija 69. i 72. slijedi da je $x - y \in \mathbb{Q}$ i $x \cdot y \in \mathbb{Q}$. Pretpostavimo da je $x \neq 0$. Prema propoziciji 74. vrijedi $x^{-1} \in \mathbb{Q}$. Iz propozicije 82. slijedi da je \mathbb{Q} polje u $(\mathbb{R}, +, \cdot)$.

Propozicija 84. Neka je $(P, +, \cdot, \leq)$ uređeni prsten. Neka su a, b, c, d elementi od P .

1. Pretpostavimo da je $a \leq b$ i $c \leq d$. Tada je $a + c \leq b + d$.
2. Pretpostavimo da je $a < b$. Tada je $a + c < b + c$.
3. Pretpostavimo da je $a < b$ i $c \leq d$. Tada je $a + c < b + d$.
4. Pretpostavimo da je $a < b$ i $c < d$. Tada je $a + c < b + d$.

Dokaz.

1. Iz $a \leq b$ i definicije uređenog prstena slijedi $a + c \leq b + c$. Nadalje, iz $c \leq d$ i definicije uređenog prstena slijedi $b + c \leq b + d$. Iz činjenice da je relacija \leq tranzitivna slijedi da je $a + c \leq b + d$.
2. Iz $a < b$ slijedi $a \leq b$, pa je $a + c \leq b + c$. Pretpostavimo da je $a + c = b + c$. Tada je $(a + c) + (-c) = (b + c) + (-c)$, pa slijedi da je $a = b$ što je u kontradikciji s $a < b$. Dakle, $a + c \neq b + c$, pa je $a + c < b + c$.
3. Iz $a < b$ i tvrdnje 2. slijedi $a + c < b + c$. Iz $c \leq d$ slijedi $b + c \leq b + d$. Iz propozicije 53. slijedi $a + c < b + d$.
4. Slijedi direktno iz tvrdnje 3. □

Propozicija 85. Neka je $(P, +, \cdot, \leq)$ uređeno polje, te neka je $x \in P$.

1. Pretpostavimo da je $0 < x$. Tada je $0 < x^{-1}$.

2. Pretpostavimo da je $x < 0$. Tada je $x^{-1} < 0$.

Dokaz.

1. Vrijedi $x^{-1} \leq 0$ ili $0 \leq x^{-1}$. Pretpostavimo da je $x^{-1} \leq 0$. Tada je $0 \leq -x^{-1}$. Iz toga i činjenice da je $0 \leq x$, što slijedi iz $0 < x$, te definicije uređenog prstena slijedi da je $0 \leq (-x^{-1}) \cdot x$.

Iz propozicije 44.1. slijedi da je $0 \leq -(x^{-1} \cdot x)$, tj. $0 \leq -1$, pa slijedi $1 \leq 0$. Međutim, ovo je u kontradikciji s činjenicom da je $0 < 1$ (prema korolaru 49.). Prema tome, $0 \leq x^{-1}$.

Kada bi vrijedilo $x^{-1} = 0$, onda bismo imali $1 = x \cdot x^{-1} = x \cdot 0 = 0$, što je nemoguće. Prema tome, $x^{-1} \neq 0$, pa vrijedi $0 < x^{-1}$.

2. Iz $x < 0$ slijedi $0 < -x$ (prema propoziciji 84.3.). Tada je prema tvrdnji 1. $0 < (-x)^{-1}$, tj. $0 < -(x^{-1})$ (prema napomeni 70.), pa slijedi $x^{-1} < 0$.

□

Napomena 86. Neka je $(P, +, \cdot, \leq)$ uređeno polje. Neka su $x, y \in P$ td. je $0 < x$ i $0 < y$. Tada je $0 < x \cdot y$.

Naime, imamo $0 \leq x$ i $0 \leq y$, pa iz definicije uređenog prstena slijedi da je $0 \leq x \cdot y$. Imamo $0 \neq x$ i $0 \neq y$, pa iz činjenice da je $(P, +, \cdot)$ integralna domena (prema propoziciji 26.) slijedi da je $0 \neq x \cdot y$. Stoga je $0 < x \cdot y$.

Propozicija 87. Neka je $(P, +, \cdot, \leq)$ uređeno polje. Neka su $a, b, c \in P$ td. je $a < b$ i $0 < c$. Tada je $ac < bc$.

Dokaz. Iz $a < b$ slijedi $0 < b + (-a)$, tj. $0 < b - a$. Iz napomene 86. slijedi da je $0 < (b - a)c$. Iz propozicije 46. zaključujemo da je $0 < bc - ac$, pa je $ac < bc$. □

Primjer 88. \mathbb{Z} nije polje u $(\mathbb{R}, +, \cdot)$.

Definirajmo $2 := 1 + 1$. Očito je $2 \in \mathbb{N}$. Iz $0 < 1$ slijedi $1 < 1 + 1$, tj. $1 < 2$. Posebno vrijedi $0 < 2$, pa iz propozicije 85. slijedi da je $0 < 2^{-1}$. Ovo, uz činjenicu da je $1 < 2$ i propoziciju 87. povlači da je $2^{-1} < 1$. Za $\forall n \in \mathbb{N}$ vrijedi $1 \leq n$, pa slijedi $2^{-1} \notin \mathbb{N}$. Nadalje iz $0 < 2^{-1}$ slijedi $2^{-1} \neq 0$.

Neka je $n \in \mathbb{N}$. Tada je $0 < n$ pa je $-n < 0$, što povlači da $-n \neq 2^{-1}$. Iz definicije od \mathbb{Z} slijedi da $2^{-1} \notin \mathbb{Z}$. Iz $2 \in \mathbb{Z}$ i propozicije 82. slijedi da \mathbb{Z} nije polje u \mathbb{R} .

Definicija 89. Neka je $(P, +, \cdot)$ prsten, te neka je $x \in P$. Definiramo $x^2 = x \cdot x$.

Uočimo da je $(-x)^2 = (-x) \cdot (-x) = x \cdot x = x^2$, pri čemu smo koristili propoziciju 44. 3. Dakle, $(-x)^2 = x^2$.

Propozicija 90. *Neka je $(P, +, \cdot, \leq)$ uređeni prsten. Neka je $x \in P$. Tada je $0 \leq x^2$.*

Dokaz. Vrijedi $0 \leq x$ ili $x \leq 0$.

1. $0 \leq x$

Iz definicije uređenog prstena slijedi da je $0 \leq x \cdot x$, tj. $0 \leq x^2$.

2. $x \leq 0$

Tada je $0 \leq -x$, pa iz 1. slučaja imamo $0 \leq (-x)^2$, tj. $0 \leq x^2$.

U oba slučaja smo dobili $0 \leq x^2$. Dakle, propozicija je dokazana.

□

Propozicija 91. *Neka je $(P, +, \cdot, \leq)$ uređen prsten takav da je $(P, +, \cdot)$ netrivialan prsten s jedinicom. Tada ne postoji $x \in P$ takav da je $x^2 = -1$.*

Dokaz. Pretpostavimo da postoji $x \in P$ takav da je $x^2 = -1$.

Iz prethodne propozicije slijedi da je $0 \leq x^2$, dakle $0 \leq -1$. Stoga je $1 \leq 0$. S druge strane, prema propoziciji 48. vrijedi $0 \leq 1$. Zaključujemo da je $0 = 1$. Iz napomene 24. slijedi da je $(P, +, \cdot)$ trivialan prsten, što je u kontradikciji s pretpostavkom propozicije. Dakle, ne postoji $x \in P$ takav da je $x^2 = -1$. □

Korolar 92. *Ne postoji $x \in \mathbb{R}$ takav da je $x^2 = -1$.*

Dokaz. Imamo da je $(\mathbb{R}, +, \cdot, \leq)$ uređeno polje. Dakle $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ je netrivialan prsten s jedinicom, pa tvrdnja slijedi iz prethodne propozicije. □

Poglavlje 4

Polje kompleksnih brojeva \mathbb{C}

4.1 Definicija i svojstva kompleksnih brojeva

Definicija 93. Definirajmo $\mathbb{C} = \mathbb{R} \times \mathbb{R}$. Na skupu \mathbb{C} definirajmo binarne operacije $+$ i \cdot na način:

$$(a, b) + (c, d) = (a + c, b + d)$$

$$(a, b) \cdot (c, d) = (ac - bd, ad + bc)$$

Definirajmo $0_{\mathbb{C}} = (0, 0)$ i $1_{\mathbb{C}} = (1, 0)$.

Propozicija 94. Vrijedi: $(\mathbb{C}, +, \cdot)$ je polje. Nula u polju \mathbb{C} je $0_{\mathbb{C}}$, a jedinica je $1_{\mathbb{C}}$.

Dokaz. Neka su $z_1, z_2, z_3 \in \mathbb{C}$. Tada je $z_1 = (a_1, b_1)$, $z_2 = (a_2, b_2)$, $z_3 = (a_3, b_3)$ za neke $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3 \in \mathbb{R}$.

Imamo:

$$\begin{aligned}(z_1 + z_2) + z_3 &= (a_1 + a_2, b_1 + b_2) + (a_3, b_3) \\ &= ((a_1 + a_2) + a_3, (b_1 + b_2) + b_3) \\ &= (a_1 + (a_2 + a_3), b_1 + (b_2 + b_3)) \\ &= (a_1, b_1) + (a_2 + a_3, b_2 + b_3) \\ &= z_1 + (z_2 + z_3)\end{aligned}$$

Dakle, $(\mathbb{C}, +)$ je polugrupa.

Neka su $z_1, z_2 \in \mathbb{C}$, $z_1 = (a_1, b_1)$, $z_2 = (a_2, b_2)$.

Imamo:

$$\begin{aligned}(z_1 + z_2) &= (a_1 + a_2, b_1 + b_2) \\ &= (a_2 + a_1, b_2 + b_1) \\ &= z_2 + z_1\end{aligned}$$

Prema tome, operacija $+$ je komutativna.

Neka je $z \in \mathbb{C}$, $z = (a, b)$.

Imamo:

$$\begin{aligned} z + 0_{\mathbb{C}} &= (a + b) + (0, 0) \\ &= (a, b) \\ &= z \end{aligned}$$

Zbog komutativnosti operacije $+$ također vrijedi $0_{\mathbb{C}} + z = z$. Prema tome, $0_{\mathbb{C}}$ je neutralni element za operaciju $+$. Dakle, $(\mathbb{C}, +)$ je monoid.

Neka je $z \in \mathbb{C}$, $z = (a, b)$. Definirajmo $z' = (-a, -b)$. Tada je $z + z' = 0_{\mathbb{C}}$.

Zaključujemo da je $(\mathbb{C}, +)$ Abelova grupa.

Neka su $z_1, z_2, z_3 \in \mathbb{C}$, $z_1 = (a_1, b_1)$, $z_2 = (a_2, b_2)$, $z_3 = (a_3, b_3)$. Tada je:

$$\begin{aligned} (z_1 \cdot z_2) \cdot z_3 &= (a_1a_2 - b_1b_2, a_1b_2 + a_2b_1) \cdot (a_3, b_3) \\ &= ((a_1a_2 - b_1b_2)a_3 - (a_1b_2 + a_2b_1)b_3, (a_1a_2 - b_1b_2)b_3 + (a_1b_2 + a_2b_1)a_3) \end{aligned}$$

S druge strane:

$$\begin{aligned} z_1 \cdot (z_2 \cdot z_3) &= (a_1, b_1) \cdot (a_2a_3 - b_2b_3, a_2b_3 + a_3b_2) \\ &= (a_1(a_2a_3 - b_2b_3) - b_1(a_2b_3 + a_3b_2), a_1(a_2b_3 + a_3b_2) + b_1(a_2a_3 - b_2b_3)) \end{aligned}$$

Koristeći asocijativnost zbrajanja i množenja na \mathbb{R} , distributivnost množenja u odnosu na zbrajanje na \mathbb{R} te propoziciju 46., zaključujemo da je $(z_1 \cdot z_2) \cdot z_3 = z_1 \cdot (z_2 \cdot z_3)$. Prema tome, (\mathbb{C}, \cdot) je polugrupa.

Neka su $z_1, z_2 \in \mathbb{C}$. Imamo $z_1 = (a, b)$ i $z_2 = (c, d)$, gdje su $a, b, c, d \in \mathbb{R}$. Vrijedi:

$$z_1 \cdot z_2 = (a \cdot c - b \cdot d, a \cdot d + b \cdot c)$$

$$z_2 \cdot z_1 = (c \cdot a - d \cdot b, c \cdot b + d \cdot a)$$

Koristeći komutativnost operacija $+$ i \cdot na \mathbb{R} zaključujemo da je $z_1 \cdot z_2 = z_2 \cdot z_1$. Stoga je operacija \cdot na \mathbb{C} komutativna.

Neka je $z \in \mathbb{C}$, $z = (a, b)$, gdje je $a, b \in \mathbb{R}$. Imamo:

$$\begin{aligned} 1_{\mathbb{C}} \cdot z &= (1, 0) \cdot (a, b) \\ &= (1 \cdot a - 0 \cdot b, 1 \cdot b - 0 \cdot a) \\ &= (a, b) \\ &= z \end{aligned}$$

Dakle, $1_{\mathbb{C}} \cdot z = z$, a zbog komutativnosti vrijedi $z \cdot 1_{\mathbb{C}} = z$. Dakle, (\mathbb{C}, \cdot) je monoid, a $1_{\mathbb{C}}$ je neutralni element u tom monoidu.

Neka su $z_1, z_2, z_3 \in \mathbb{C}$, $z_1 = (a_1, b_1)$, $z_2 = (a_2, b_2)$, $z_3 = (a_3, b_3)$. Vrijedi:

$$\begin{aligned} z_1 \cdot (z_2 + z_3) &= (a_1, b_1) \cdot (a_2 + a_3, b_2 + b_3) \\ &= (a_1(a_2 + a_3) - b_1(b_2 + b_3), a_1(b_2 + b_3) + b_1(a_2 + a_3)) \\ &= (a_1a_2 + a_1a_3 - b_1b_2 - b_1b_3, a_1b_2 + a_1b_3 + b_1a_2 + b_1a_3) \end{aligned}$$

S druge strane:

$$\begin{aligned} z_1 \cdot z_2 + z_1 \cdot z_3 &= (a_1, b_1) \cdot (a_2, b_2) + (a_1, b_1) \cdot (a_3, b_3) \\ &= (a_1a_2 - b_1b_2, a_1b_2 + b_1a_2) + (a_1a_3 - b_1b_3, a_1b_3 + b_1a_3) \\ &= (a_1a_2 - b_1b_2 + a_1a_3 - b_1b_3, a_1b_2 + b_1a_2 + a_1b_3 + b_1a_3) \end{aligned}$$

Iz činjenice da je $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ prsten, zaključujemo da je $z_1 \cdot (z_2 + z_3) = z_1 \cdot z_2 + z_1 \cdot z_3$.

Koristeći dokazano i komutativnost operacije \cdot na \mathbb{C} dobivamo $(z_1 + z_2) \cdot z_3 = z_3 \cdot (z_1 + z_2) = z_3 \cdot z_1 + z_3 \cdot z_2 = z_1 \cdot z_3 + z_2 \cdot z_3$, dakle $(z_1 + z_2) \cdot z_3 = z_1 \cdot z_3 + z_2 \cdot z_3$.

Zaključujemo da je $(\mathbb{C}, +, \cdot)$ komutativan prsten s jedinicom. Nula u prstenu je $0_{\mathbb{C}}$, a jedinica je $1_{\mathbb{C}}$.

Neka je $z \in \mathbb{C}$ takav da je $z \neq 0_{\mathbb{C}}$. Imamo $z = (a, b)$, $a, b \in \mathbb{R}$. Zbog $z \neq 0_{\mathbb{C}}$ vrijedi $a^2 + b^2 > 0$. Definirajmo:

$$u = \left(\frac{a}{a^2 + b^2}, \frac{-b}{a^2 + b^2} \right)$$

Imamo:

$$\begin{aligned} z \cdot u &= (a, b) \cdot \left(\frac{a}{a^2 + b^2}, \frac{-b}{a^2 + b^2} \right) \\ &= \left(\frac{a^2}{a^2 + b^2} - \frac{b \cdot (-b)}{a^2 + b^2}, \frac{-ab}{a^2 + b^2} + \frac{ba}{a^2 + b^2} \right) \\ &= (1, 0) \\ &= 1_{\mathbb{C}} \end{aligned}$$

Dakle, $z \cdot u = 1_{\mathbb{C}}$, te zbog komutativnosti vrijedi i $u \cdot z = 1_{\mathbb{C}}$. Znači, svaki element od \mathbb{C} različit od $0_{\mathbb{C}}$ ima inverzni element u (\mathbb{C}, \cdot) .

Zaključak: $(\mathbb{C}, +, \cdot)$ je polje. □

Napomena 95. Neka su $a, b \in \mathbb{R}$. Tada u prstenu $(\mathbb{C}, +, \cdot)$ vrijedi $-(a, b) = (-a, -b)$. Naime, to slijedi iz dokaza prethodne propozicije. Iz istog dokaza slijedi i da za $(a, b) \neq (0, 0)$ vrijedi $(a, b)^{-1} = \left(\frac{a}{a^2 + b^2}, \frac{-b}{a^2 + b^2} \right)$.

Primjer 96. Neka je $z = (0, 1)$. Koristeći napomenu 95. dobivamo da je $z^2 = z \cdot z = (0, 1) \cdot (0, 1) = (-1, 0) = -1_{\mathbb{C}}$. Dakle, $z^2 = -1_{\mathbb{C}}$.

Propozicija 97. Ne postoji uređaj \leq na \mathbb{C} tako da je $(\mathbb{C}, +, \cdot, \leq)$ uređeno polje.

Dokaz. Naime, to slijedi iz primjera 96. i propozicije 91. □

4.2 Realni brojevi u \mathbb{C}

Definicija 98. Definirajmo $\mathbb{R}' = \{(x, 0) \mid x \in \mathbb{R}\}$.

Propozicija 99. \mathbb{R}' je polje u $(\mathbb{C}, +, \cdot)$.

Dokaz. Neka su $z_1, z_2 \in \mathbb{R}'$. Tada postoje $x, y \in \mathbb{R}$ tako da je $z_1 = (x, 0)$ i $z_2 = (y, 0)$. Vrijedi $z_1 - z_2 = z_1 + (-z_2) = (x, 0) + (-y, 0) = (x - y, 0)$, pa je očito $z_1 - z_2 \in \mathbb{R}'$.

Nadalje imamo $z_1 \cdot z_2 = (x, 0) \cdot (y, 0) = (x \cdot y, 0)$, pa je $z_1 \cdot z_2 \in \mathbb{R}'$.

Neka je $z \in \mathbb{R}'$ takav da je $z \neq 0_{\mathbb{C}}$. Imamo $z = (x, 0)$, gdje je $x \in \mathbb{R}$ i $x \neq 0$. Koristeći napomenu 95., dobivamo:

$$z^{-1} = (x, 0)^{-1} = \left(\frac{x}{x^2 + 0^2}, \frac{-0}{x^2 + 0^2} \right) = \left(\frac{x}{x^2}, 0 \right) = (x^{-1}, 0)$$

jer je prema propoziciji 67.:

$$\frac{x}{x^2} = \frac{1 \cdot x}{x \cdot x} = \frac{1}{x} = x^{-1}$$

U svakom slučaju, vrijedi $z^{-1} \in \mathbb{R}'$. Iz propozicije 82. slijedi da je \mathbb{R}' polje u $(\mathbb{C}, +, \cdot)$. □

Definicija 100. Prema prethodnoj propoziciji, postoje binarne operacije $+'$ i \cdot' na \mathbb{R}' tako da je $(\mathbb{R}', +', \cdot')$ potpolje od $(\mathbb{C}, +, \cdot)$. Neka su $x, y \in \mathbb{R}$. Imamo:

$$(x, 0) +' (y, 0) = (x, 0) + (y, 0) = (x + y, 0)$$

$$(x, 0) \cdot' (y, 0) = (x, 0) \cdot (y, 0) = (x \cdot y, 0)$$

Dakle,

$$(x, 0) +' (y, 0) = (x + y, 0)$$

$$(x, 0) \cdot' (y, 0) = (x \cdot y, 0)$$

Definicija 101. Na \mathbb{R}' definiramo binarnu operaciju \leq' na sljedeći način:

$$(x, 0) \leq' (y, 0) \text{ ako je } x \leq y$$

Propozicija 102. Binarna operacija \leq' je uređaj na \mathbb{R}' .

Dokaz. Neka je $x \in \mathbb{R}$. Tada je $x \leq x$, pa je $(x, 0) \leq' (x, 0)$. Prema tome, \leq' je refleksivna relacija na \mathbb{R}' .

Neka su $x, y \in \mathbb{R}$ takvi da je $(x, 0) \leq' (y, 0)$ i $(y, 0) \leq' (x, 0)$. Tada je $x \leq y$ i $y \leq x$, pa je $x = y$. Stoga je $(x, 0) = (y, 0)$. Dakle, \leq' je antisimetrična relacija na \mathbb{R}' .

Na sličan način zaključujemo da je \leq' tranzitivna relacija na \mathbb{R}' te da je \leq' uređaj na \mathbb{R}' . \square

Propozicija 103. $(\mathbb{R}', +', \cdot', \leq')$ je uređeno polje.

Dokaz. Dovoljno je dokazati da je $(\mathbb{R}', +', \cdot', \leq')$ uređeni prsten. Neka su $a, b, c \in \mathbb{R}'$ td. $a \leq' b$. Tvrdimo da je $a +' c \leq' b +' c$.

Imamo $a = (x, 0)$, $b = (y, 0)$ i $c = (z, 0)$ gdje su $x, y, z \in \mathbb{R}$. Slijedi $x \leq y$, pa je $x + z \leq y + z$. Vrijedi:

$$a +' c = (x, 0) +' (z, 0) = (x + z, 0)$$

$$b +' c = (y, 0) +' (z, 0) = (y + z, 0)$$

Stoga je $a +' c \leq' b +' c$.

Uočimo da je $(0, 0)$ nula u prstenu $(\mathbb{R}', +', \cdot')$. Pretpostavimo da su $a, b \in \mathbb{R}'$ takvi da je $(0, 0) \leq' a$ i $(0, 0) \leq' b$. Imamo $a = (x, 0)$ i $b = (y, 0)$, gdje su $x, y \in \mathbb{R}$. Slijedi $0 \leq x$ i $0 \leq y$, pa je $0 \leq x \cdot y$. Vrijedi $a \cdot' b = (x, 0) \cdot' (y, 0) = (x \cdot y, 0)$. Stoga je $(0, 0) \leq' a \cdot' b$.

Zaključujemo da je $(\mathbb{R}', +', \cdot', \leq')$ uređeni prsten. \square

4.3 Morfizam uređenih skupova

Definicija 104. Neka su (S, \leq) i (T, \leq') uređeni skupovi, te neka je $f : S \rightarrow T$. Kažemo da je f **morfizam** uređenih skupova (S, \leq) i (T, \leq') ako za $\forall x, y \in S$ td. je $x \leq y$ vrijedi $f(x) \leq' f(y)$.

Napomena 105. Neka su (S, \leq) i (T, \leq') uređeni skupovi te neka je $f : S \rightarrow T$ morfizam ovih uređenih skupova. Pretpostavimo da su $x, y \in S$ td. je $f(x) <' f(y)$. Tada je $x < y$.

Naime, pretpostavimo suprotno. Tada je po napomeni 52. $y \leq x$, pa slijedi $f(y) \leq' f(x)$. Ovo je prema napomeni 50. u kontradikciji s $f(x) <' f(y)$.

Propozicija 106. Neka su (S, \leq) i (T, \leq') uređeni skupovi, te neka je $f : S \rightarrow T$ morfizam ovih uređenih skupova. Pretpostavimo da je f surjekcija, te da je (S, \leq) potpuno uređen skup. Tada je (T, \leq') potpuno uređen skup.

Dokaz. Pretpostavimo da su $A, B \subseteq T$ td. $A \neq \emptyset$ i $B \neq \emptyset$ te $a \leq' b, \forall a \in A$ i $\forall b \in B$. Želimo dokazati da postoji $c \in T$ td.

$$a \leq' c \leq' b, \forall a \in A, \forall b \in B \quad (\bullet)$$

To je jasno ako je $A \cap B \neq \emptyset$. Naime, u tom slučaju možemo odabrati neki $c \in A \cap B$. Budući da je $c \in A$, vrijedi $c \leq' b, \forall b \in B$, a budući da je $c \in B$, vrijedi $a \leq' c, \forall a \in A$. Dakle, vrijedi (\bullet) .

Pretpostavimo da je $A \cap B = \emptyset$. Tada za $\forall a \in A, \forall b \in B$ vrijedi $a <' b$ (jer je $a \neq b$ i $a \leq' b$). Tvrdimo da je $f^{-1}(A) \neq \emptyset$.

Naime, odaberimo neki $a \in A$ obzirom da je $A \neq \emptyset$. Budući da je f surjekcija, postoji $x \in S$ takav da je $f(x) = a$. Dakle, $f(x) \in A$, pa je $x \in f^{-1}(A)$. Prema tome, $f^{-1}(A) \neq \emptyset$.

Analogno vidimo da je $f^{-1}(B) \neq \emptyset$.

Neka su $x \in f^{-1}(A)$ i $y \in f^{-1}(B)$. Tada je $f(x) \in A$ i $f(y) \in B$, pa je $f(x) <' f(y)$. Prema napomeni 105. vrijedi $x < y$. Dakle, $f^{-1}(A)$ i $f^{-1}(B)$ su neprazni podskupovi od S takvi da je $x \leq y$ za $\forall x \in f^{-1}(A)$ i za $\forall y \in f^{-1}(B)$. Budući da je (S, \leq) potpuno uređen skup, postoji $z \in S$ tako da vrijedi:

$$x \leq z \leq y, \forall x \in f^{-1}(A), \forall y \in f^{-1}(B) \quad (\bullet\bullet)$$

Označimo $c = f(z)$. Tvrdimo da vrijedi (\bullet) . Uzmimo neki $a \in A$. Budući da je f surjekcija, postoji $x \in S$ takav da je $f(x) = a$. Očito je $x \in f^{-1}(A)$.

Iz $(\bullet\bullet)$ slijedi da je $x \leq z$. Budući da je f morfizam uređenih skupova (S, \leq) i (T, \leq') imamo $f(x) \leq' f(z)$, tj. $a \leq' c$. Uzmimo $b \in B$. Tada postoji $y \in S$ takav da je $f(y) = b$. Imamo $y \in f^{-1}(B)$, pa prema $(\bullet\bullet)$ vrijedi $z \leq y$. Slijedi $f(z) \leq' f(y)$, tj. $c \leq' b$. Dakle, vrijedi (\bullet) .

Zaključak: (T, \leq') je potpuno uređen skup. \square

Korolar 107. $(\mathbb{R}', +, \cdot, \leq')$ je potpuno uređeno polje.

Prema propoziciji 103. vrijedi da je $(\mathbb{R}', +, \cdot, \leq')$ uređeno polje. Stoga je dovoljno dokazati da je (\mathbb{R}', \leq') potpuno uređen skup.

Definirajmo funkciju $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}'$ sa $f(x) = (x, 0)$. Očito je f surjekcija. Nadalje, f je očito morfizam uređenih skupova (\mathbb{R}, \leq) i (\mathbb{R}', \leq') . Imamo da je (\mathbb{R}, \leq) potpuno uređen skup, pa iz prethodne propozicije slijedi da je (\mathbb{R}', \leq') potpuno uređen skup.

Napomena 108. Neka je $i = (0, 1)$. Imamo $i \in \mathbb{C}$ i $i^2 = -1_{\mathbb{C}}$ prema primjeru 96. Neka je $z \in \mathbb{C}$. Tvrdimo da postoje jedinstveni $a, b \in \mathbb{R}'$ td. $z = a + bi$.

Naime, imamo $z = (x, y)$, gdje su $x, y \in \mathbb{R}$. Definirajmo $a = (x, 0)$ i $b = (y, 0)$. Očito su $a, b \in \mathbb{R}'$. Nadalje vrijedi:

$$\begin{aligned} a + bi &= (x, 0) + (y, 0) \cdot (0, 1) \\ &= (x, 0) + (0, y) \\ &= (x, y) \\ &= z \end{aligned}$$

Dakle, $z = a + bi$.

Pretpostavimo da su $a', b' \in \mathbb{R}'$ takvi da je $z = a' + b'i$. Slijedi da postoje $x', y' \in \mathbb{R}$ takvi da je $a' = (x', 0)$ i $b' = (y', 0)$. Vrijedi:

$$\begin{aligned}(x, y) &= z \\ &= a' + b'i \\ &= (x', 0) + (y', 0) \cdot (0, 1) \\ &= (x', 0) + (0, y') \\ &= (x', y')\end{aligned}$$

Dakle, $(x, y) = (x', y')$, pa je $x = x'$ i $y = y'$. Prema tome, $a = a'$ i $b = b'$.

Poglavlje 5

Tijelo kvaterniona \mathbb{H}

5.1 Definicija i svojstva kvaterniona

Definicija 109. Definirajmo $\mathbb{H} = \mathbb{R}^4$. Na \mathbb{H} definirajmo binarne operacije $+$ i \cdot na sljedeći način:

$$\begin{aligned}(x_1, x_2, x_3, x_4) + (y_1, y_2, y_3, y_4) &= (x_1 + y_1, x_2 + y_2, x_3 + y_3, x_4 + y_4) \\(x_1, x_2, x_3, x_4) \cdot (y_1, y_2, y_3, y_4) &= (x_1y_1 - x_2y_2 - x_3y_3 - x_4y_4, x_2y_1 + x_1y_2 - x_4y_3 + x_3y_4, \\ & x_3y_1 + x_4y_2 + x_1y_3 - x_2y_4, x_4y_1 - x_3y_2 + x_2y_3 + x_1y_4)\end{aligned}$$

Propozicija 110. Neka je $0_{\mathbb{H}} = (0, 0, 0, 0)$. Neutralni element za operaciju $+$ je $0_{\mathbb{H}}$. Inverzni element od $(x_1, x_2, x_3, x_4) \in \mathbb{H}$ u monoidu $(\mathbb{H}, +)$ je $(-x_1, -x_2, -x_3, -x_4)$. $(\mathbb{H}, +)$ je Abelova grupa.

Dokaz. Neka su $a, b, c, d \in \mathbb{H}$. Imamo $a = (x_1, x_2, x_3, x_4)$, $b = (y_1, y_2, y_3, y_4)$ i $c = (z_1, z_2, z_3, z_4)$. Vrijedi:

$$\begin{aligned}(a + b) + c &= (x_1 + y_1, x_2 + y_2, x_3 + y_3, x_4 + y_4) + (z_1, z_2, z_3, z_4) \\ &= ((x_1 + y_1) + z_1, (x_2 + y_2) + z_2, (x_3 + y_3) + z_3, (x_4 + y_4) + z_4) \\ &= (x_1 + (y_1 + z_1), x_2 + (y_2 + z_2), x_3 + (y_3 + z_3), x_4 + (y_4 + z_4)) \\ &= a + (b + c)\end{aligned}$$

Dakle, $(a + b) + c = a + (b + c)$. Prema tome, operacija $+$ na \mathbb{H} je asocijativna.

Očito je $a + 0_{\mathbb{H}} = 0_{\mathbb{H}} + a$, za $\forall a \in \mathbb{H}$. Prema tome, $(\mathbb{H}, +)$ je monoid i $0_{\mathbb{H}}$ je neutralni element u tom monoidu.

Neka je $a \in \mathbb{H}$. Imamo $a = (x_1, x_2, x_3, x_4)$. Definirajmo $b = (-x_1, -x_2, -x_3, -x_4)$. Tada je očitno $a + b = 0_{\mathbb{H}} = b + a$. Prema tome, b je inverzni element od a u monoidu $(\mathbb{H}, +)$. Zaključak, $(\mathbb{H}, +)$ je grupa.

Kako je operacija $+$ na \mathbb{H} očitno komutativna, $(\mathbb{H}, +)$ je Abelova grupa. \square

Propozicija 111. (\mathbb{H}, \cdot) je polugrupa.

Dokaz. Neka su $a, b, c, d \in \mathbb{H}$. Imamo $a = (x_1, x_2, x_3, x_4)$, $b = (y_1, y_2, y_3, y_4)$ i $c = (z_1, z_2, z_3, z_4)$. Vrijedi:

$$\begin{aligned} (a \cdot b) \cdot c &= (x_1y_1 - x_2y_2 - x_3y_3 - x_4y_4, x_2y_1 + x_1y_2 - x_4y_3 + x_3y_4, x_3y_1 + \\ &\quad x_4y_2 + x_1y_3 - x_2y_4, x_4y_1 - x_3y_2 + x_2y_3 + x_1y_4) \cdot (z_1, z_2, z_3, z_4) \\ &= (x_1y_1z_1 - x_2y_2z_1 - x_3y_3z_1 - x_4y_4z_1 - (x_2y_1z_2 + x_1y_2z_2 - x_4y_3z_2 + x_3y_4z_2) - \\ &\quad (x_3y_1z_3 + x_4y_2z_3 + x_1y_3z_3 - x_2y_4z_3) - (x_4y_1z_4 - x_3y_2z_4 + x_2y_3z_4 + x_1y_4z_4), \\ &\quad x_2y_1z_1 + x_1y_2z_1 - x_4y_3z_1 + x_3y_4z_1 + x_1y_1z_2 - x_2y_2z_2 - x_3y_3z_2 - x_4y_4z_2 - \\ &\quad (x_4y_1z_3 - x_3y_2z_3 + x_2y_3z_3 + x_1y_4z_3) + x_3y_1z_4 + x_4y_2z_4 + x_1y_3z_4 - x_2y_4z_4, \\ &\quad x_3y_1z_1 + x_4y_2z_1 + x_1y_3z_1 - x_2y_4z_1 + x_4y_1z_2 - x_3y_2z_2 + x_2y_3z_2 + x_1y_4z_2 + \\ &\quad x_1y_1z_3 - x_2y_2z_3 - x_3y_3z_3 - x_4y_4z_3 - (x_2y_1z_4 + x_1y_2z_4 - x_4y_3z_4 + x_3y_4z_4), \\ &\quad x_4y_1z_1 - x_3y_2z_1 + x_2y_3z_1 + x_1y_4z_1 - (x_3y_1z_2 + x_4y_2z_2 + x_1y_3z_2 - x_2y_4z_2) + \\ &\quad x_2y_1z_3 + x_1y_2z_3 - x_4y_3z_3 + x_3y_4z_3 + x_1y_1z_4 - x_2y_2z_4 - x_3y_3z_4 - x_4y_4z_4) \end{aligned}$$

S druge strane vrijedi:

$$\begin{aligned} (a \cdot b) \cdot c &= (x_1, x_2, x_3, x_4) \cdot (y_1z_1 - y_2z_2 - y_3z_3 - y_4z_4, y_2z_1 + y_1z_2 - y_4z_3 + \\ &\quad y_3z_4, y_3z_1 + y_4z_2 + y_1z_3 - y_2z_4, y_4z_1 - y_3z_2 + y_2z_3 + y_1z_4) \\ &= (x_1y_1z_1 - x_1y_2z_2 - x_1y_3z_3 - x_1y_4z_4 - (x_2y_2z_1 + x_2y_1z_2 - x_2y_4z_3 + x_2y_3z_4) - \\ &\quad (x_3y_3z_1 + x_3y_4z_2 + x_3y_1z_3 - x_3y_2z_4) - (x_4y_4z_1 - x_4y_3z_2 + x_4y_2z_3 + x_4y_1z_4), \\ &\quad x_2y_1z_1 - x_2y_2z_2 - x_2y_3z_3 - x_2y_4z_4 + x_1y_2z_1 + x_1y_1z_2 - x_1y_4z_3 + x_1y_3z_4 - \\ &\quad (x_4y_3z_1 + x_4y_4z_2 + x_4y_1z_3 - x_4y_2z_4) + x_3y_4z_1 - x_3y_3z_2 + x_3y_2z_3 + x_3y_1z_4, \\ &\quad x_3y_1z_1 - x_3y_2z_2 - x_3y_3z_3 - x_3y_4z_4 + x_4y_2z_1 + x_4y_1z_2 - x_4y_4z_3 + x_4y_3z_4 + \\ &\quad x_1y_3z_1 + x_1y_4z_2 + x_1y_1z_3 - x_1y_2z_4 - (x_2y_4z_1 - x_2y_3z_2 + x_2y_2z_3 + x_2y_1z_4), \\ &\quad x_4y_1z_1 - x_4y_2z_2 - x_4y_3z_3 - x_4y_4z_4 - (x_3y_2z_1 + x_3y_1z_2 - x_3y_4z_3 + x_3y_3z_4) + \\ &\quad x_2y_3z_1 + x_2y_4z_2 + x_2y_1z_3 - x_2y_2z_4 + x_1y_4z_1 - x_1y_3z_2 + x_1y_2z_3 + x_1y_1z_4) \end{aligned}$$

Lako zaključujemo da je $(a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c)$.

Prema tome, (\mathbb{H}, \cdot) je polugrupa. \square

Propozicija 112. Neka je $1_{\mathbb{H}} = (1, 0, 0, 0)$. Tada je $1_{\mathbb{H}}$ neutralni element za operaciju \cdot na \mathbb{H} .

Dokaz. Neka je $a \in \mathbb{H}$. Imamo $a = (x_1, x_2, x_3, x_4)$. Vrijedi:

$$\begin{aligned} a \cdot 1_{\mathbb{H}} &= (x_1, x_2, x_3, x_4) \cdot (1, 0, 0, 0) \\ &= (x_1, x_2, x_3, x_4) \\ &= a \end{aligned}$$

Dakle, $a \cdot 1_{\mathbb{H}} = a$.

Analogno, $1_{\mathbb{H}} \cdot a = a$. □

Propozicija 113. $(\mathbb{H}, +, \cdot)$ je prsten.

Dokaz. Neka su $x, y, z \in \mathbb{H}$. Imamo $x = (x_1, x_2, x_3, x_4)$, $y = (y_1, y_2, y_3, y_4)$ i $z = (z_1, z_2, z_3, z_4)$. Vrijedi:

$$\begin{aligned} x \cdot (y + z) &= (x_1, x_2, x_3, x_4) \cdot (y_1 + z_1, y_2 + z_2, y_3 + z_3, y_4 + z_4) \\ &= (x_1(y_1 + z_1) - x_2(y_2 + z_2) - x_3(y_3 + z_3) - x_4(y_4 + z_4), \\ &\quad x_2(y_1 + z_1) + x_1(y_2 + z_2) - x_4(y_3 + z_3) + x_3(y_4 + z_4), \\ &\quad x_3(y_1 + z_1) + x_4(y_2 + z_2) + x_1(y_3 + z_3) - x_2(y_4 + z_4), \\ &\quad x_4(y_1 + z_1) - x_3(y_2 + z_2) + x_2(y_3 + z_3) + x_1(y_4 + z_4)) \\ &= (x_1y_1 - x_2y_2 - x_3y_3 - x_4y_4 + x_1z_1 - x_2z_2 - x_3z_3 - x_4z_4, \\ &\quad x_2y_1 + x_1y_2 - x_4y_3 + x_3y_4 + x_2z_1 + x_1z_2 - x_4z_3 + x_3z_4, \\ &\quad x_3y_1 + x_4y_2 + x_1y_3 - x_2y_4 + x_3z_1 + x_4z_2 + x_1z_3 - x_2z_4, \\ &\quad x_4y_1 - x_3y_2 + x_2y_3 + x_1y_4 + x_4z_1 - x_3z_2 + x_2z_3 + x_1z_4) \\ &= (x_1y_1 - x_2y_2 - x_3y_3 - x_4y_4, x_2y_1 + x_1y_2 - x_4y_3 + x_3y_4, \\ &\quad x_3y_1 + x_4y_2 + x_1y_3 - x_2y_4, x_4y_1 - x_3y_2 + x_2y_3 + x_1y_4) + \\ &\quad (x_1z_1 - x_2z_2 - x_3z_3 - x_4z_4, x_2z_1 + x_1z_2 - x_4z_3 + x_3z_4, \\ &\quad x_3z_1 + x_4z_2 + x_1z_3 - x_2z_4, x_4z_1 - x_3z_2 + x_2z_3 + x_1z_4) \\ &= (x_1, x_2, x_3, x_4) \cdot (y_1, y_2, y_3, y_4) + (x_1, x_2, x_3, x_4) \cdot (z_1, z_2, z_3, z_4) \\ &= xy + xz \end{aligned}$$

Dakle, $x(y + z) = xy + xz$.

Nadalje:

$$\begin{aligned}
 (x + y) \cdot z &= (x_1 + y_1, x_2 + y_2, x_3 + y_3, x_4 + y_4) \cdot (z_1, z_2, z_3, z_4) \\
 &= ((x_1 + y_1)z_1 - (x_2 + y_2)z_2 - (x_3 + y_3)z_3 - (x_4 + y_4)z_4, \\
 &\quad (x_2 + y_2)z_1 + (x_1 + y_1)z_2 - (x_4 + y_4)z_3 + (x_3 + y_3)z_4, \\
 &\quad (x_3 + y_3)z_1 + (x_4 + y_4)z_2 + (x_1 + y_1)z_3 - (x_2 + y_2)z_4, \\
 &\quad (x_4 + y_4)z_1 - (x_3 + y_3)z_2 + (x_2 + y_2)z_3 + (x_1 + y_1)z_4) \\
 &= (x_1z_1 - x_2z_2 - x_3z_3 - x_4z_4 + y_1z_1 - y_2z_2 - y_3z_3 - y_4z_4, \\
 &\quad x_2z_1 + x_1z_2 - x_4z_3 + x_3z_4 + y_2z_1 + y_1z_2 - y_4z_3 + y_3z_4, \\
 &\quad x_3z_1 + x_4z_2 + x_1z_3 - x_2z_4 + y_3z_1 + y_4z_2 + y_1z_3 - y_2z_4, \\
 &\quad x_4z_1 - x_3z_2 + x_2z_3 + x_1z_4 + y_4z_1 - y_3z_2 + y_2z_3 + y_1z_4) \\
 &= (x_1z_1 - x_2z_2 - x_3z_3 - x_4z_4, x_2z_1 + x_1z_2 - x_4z_3 + x_3z_4, \\
 &\quad x_3z_1 + x_4z_2 + x_1z_3 - x_2z_4, x_4z_1 - x_3z_2 + x_2z_3 + x_1z_4) + \\
 &\quad (y_1z_1 - y_2z_2 - y_3z_3 - y_4z_4, y_2z_1 + y_1z_2 - y_4z_3 + y_3z_4, \\
 &\quad y_3z_1 + y_4z_2 + y_1z_3 - y_2z_4, y_4z_1 - y_3z_2 + y_2z_3 + y_1z_4) \\
 &= (x_1, x_2, x_3, x_4) \cdot (z_1, z_2, z_3, z_4) + (y_1, y_2, y_3, y_4) \cdot (z_1, z_2, z_3, z_4) \\
 &= xz + yz
 \end{aligned}$$

Prema tome, $(x + y)z = xz + yz$.

Iz propozicija 110. i 111. slijedi da je $(\mathbb{H}, +, \cdot)$ prsten. □

Propozicija 114. *Neka je $x \in \mathbb{H}$, $x \neq 0_{\mathbb{H}}$. Tada postoji $y \in \mathbb{H}$ takav da je $x \cdot y = 1_{\mathbb{H}}$.*

Dokaz. Imamo $x = (x_1, x_2, x_3, x_4)$, gdje su $x_1, x_2, x_3, x_4 \in \mathbb{R}$ i pri čemu je $x_i \neq 0$ za bar jedan $i \in \{1, 2, 3, 4\}$. Neka su $y_1, y_2, y_3, y_4 \in \mathbb{R}$, te neka je $y = (y_1, y_2, y_3, y_4)$. Tada je $x \cdot y = 1_{\mathbb{H}}$ ako i samo ako vrijede sljedeće 4 jednakosti:

$$\begin{aligned}
 x_1y_1 - x_2y_2 - x_3y_3 - x_4y_4 &= 1 \\
 x_2y_1 + x_1y_2 - x_4y_3 + x_3y_4 &= 0 \\
 x_3y_1 + x_4y_2 + x_1y_3 - x_2y_4 &= 0 \\
 x_4y_1 - x_3y_2 + x_2y_3 + x_1y_4 &= 0
 \end{aligned}$$

Odnosno, prethodne 4 jednakosti vrijede ako i samo ako:

$$\overbrace{\begin{bmatrix} x_1 & -x_2 & -x_3 & -x_4 \\ x_2 & x_1 & -x_4 & x_3 \\ x_3 & x_4 & x_1 & -x_2 \\ x_4 & -x_3 & x_2 & x_1 \end{bmatrix}}^{\star} \cdot \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

◇

$$\text{Neka je } A = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2 & -x_3 & -x_4 \\ x_2 & x_1 & -x_4 & x_3 \\ x_3 & x_4 & x_1 & -x_2 \\ x_4 & -x_3 & x_2 & x_1 \end{bmatrix}.$$

Imamo:

$$\begin{aligned} \det A &= x_1 \cdot \begin{vmatrix} x_1 & -x_4 & x_3 \\ x_4 & x_1 & -x_2 \\ -x_3 & x_2 & x_1 \end{vmatrix} + x_2 \cdot \begin{vmatrix} x_2 & -x_4 & x_3 \\ x_3 & x_1 & -x_2 \\ x_4 & x_2 & x_1 \end{vmatrix} - x_3 \cdot \begin{vmatrix} x_2 & x_1 & x_3 \\ x_3 & x_4 & -x_2 \\ x_4 & -x_3 & x_1 \end{vmatrix} + x_4 \cdot \begin{vmatrix} x_2 & x_1 & -x_4 \\ x_3 & x_4 & x_1 \\ x_4 & -x_3 & x_2 \end{vmatrix} \\ &= x_1 \left(x_1 \begin{vmatrix} x_1 & -x_2 \\ x_2 & x_1 \end{vmatrix} + x_4 \begin{vmatrix} x_4 & -x_2 \\ -x_3 & x_1 \end{vmatrix} + x_3 \begin{vmatrix} x_4 & x_1 \\ -x_3 & x_2 \end{vmatrix} \right) + \\ &\quad x_2 \left(x_2 \begin{vmatrix} x_1 & -x_2 \\ x_2 & x_1 \end{vmatrix} + x_4 \begin{vmatrix} x_3 & -x_2 \\ x_4 & x_1 \end{vmatrix} + x_3 \begin{vmatrix} x_3 & x_1 \\ x_4 & x_2 \end{vmatrix} \right) - \\ &\quad x_3 \left(x_2 \begin{vmatrix} x_4 & -x_2 \\ -x_3 & x_1 \end{vmatrix} - x_1 \begin{vmatrix} x_3 & -x_2 \\ x_4 & x_1 \end{vmatrix} + x_3 \begin{vmatrix} x_3 & x_4 \\ x_4 & -x_3 \end{vmatrix} \right) + \\ &\quad x_4 \left(x_2 \begin{vmatrix} x_4 & x_1 \\ -x_3 & x_2 \end{vmatrix} - x_1 \begin{vmatrix} x_3 & x_1 \\ x_4 & x_2 \end{vmatrix} - x_4 \begin{vmatrix} x_3 & x_4 \\ x_4 & -x_3 \end{vmatrix} \right) \\ &= x_1 \left[x_1 (x_1^2 + x_2^2) + x_4 (x_1 x_4 - x_2 x_3) + x_3 (x_2 x_4 + x_1 x_3) \right] + \\ &\quad x_2 \left[x_2 (x_1^2 + x_2^2) + x_4 (x_1 x_3 + x_2 x_4) + x_3 (x_2 x_3 - x_1 x_4) \right] - \\ &\quad x_3 \left[x_2 (x_1 x_4 - x_2 x_3) - x_1 (x_1 x_3 + x_2 x_4) + x_3 (-x_3^2 - x_4^2) \right] + \\ &\quad x_4 \left[x_2 (x_2 x_4 + x_1 x_3) - x_1 (x_2 x_3 - x_1 x_4) - x_4 (-x_3^2 - x_4^2) \right] \\ &= x_1 \left[x_1 (x_1^2 + x_2^2) + x_1 x_4^2 - \cancel{x_2 x_3 x_4} + \cancel{x_2 x_3 x_4} + x_1 x_3^2 \right] + \\ &\quad x_2 \left[x_2 (x_1^2 + x_2^2) + \cancel{x_1 x_3 x_4} + x_2 x_4^2 + x_2 x_3^2 - \cancel{x_1 x_3 x_4} \right] - \\ &\quad x_3 \left[\cancel{x_1 x_2 x_4} - x_2^2 x_3 - x_1^2 x_3 - \cancel{x_1 x_2 x_4} - x_3 (x_3^2 + x_4^2) \right] + \\ &\quad x_4 \left[x_2^2 x_4 + \cancel{x_1 x_2 x_3} - \cancel{x_1 x_2 x_3} + x_1^2 x_4 + x_4 (x_3^2 + x_4^2) \right] \\ &= x_1^2 (x_1^2 + x_2^2) + x_1^2 x_4^2 + x_1^2 x_3^2 + x_2^2 (x_1^2 + x_2^2) + x_2^2 x_4^2 + x_2^2 x_3^2 + \\ &\quad x_3^2 x_2^2 + x_1^2 x_3^2 + x_3^2 (x_3^2 + x_4^2) + x_2^2 x_4^2 + x_1^2 x_4^2 + x_4^2 (x_3^2 + x_4^2) \\ &= x_1^2 (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2) + x_2^2 (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2) + x_3^2 (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2) + \\ &\quad x_4^2 (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2) \\ &= (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2) \cdot (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2) \\ &= (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2)^2 \end{aligned}$$

Dakle, $\det A = (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2)^2$. Zaključujemo da je $\det A > 0$, pa stoga postoje jedinstveni $y_1, y_2, y_3, y_4 \in \mathbb{R}$ tako da vrijedi (\diamond) .

Stoga postoji jedinstveni $y \in \mathbb{H}$ takav da je $x \cdot y = 1_{\mathbb{H}}$. □

Teorem 115. $(\mathbb{H}, +, \cdot)$ je tijelo.

Dokaz. Znamo da je $(\mathbb{H}, +, \cdot)$ netrivialan prsten s jedinicom. Neka je $x \in \mathbb{H}$, $x \neq 0_{\mathbb{H}}$. Prema prethodnoj propoziciji, postoji $y \in \mathbb{H}$ takav da je $x \cdot y = 1_{\mathbb{H}}$.

Uočimo da je $y \neq 0_{\mathbb{H}}$, jer bi u suprotnom imali da je $y \cdot y = 0_{\mathbb{H}}$, što je nemoguće jer je $0_{\mathbb{H}} \neq 1_{\mathbb{H}}$. Stoga prema istoj propoziciji postoji $z \in \mathbb{H}$ takav da je $y \cdot z = 1_{\mathbb{H}}$. Iz $x \cdot y = 1_{\mathbb{H}}$ slijedi $(x \cdot y) \cdot z = 1_{\mathbb{H}} \cdot z$, tj. $x \cdot (y \cdot z) = z$, pa je $x \cdot 1_{\mathbb{H}} = z$, odnosno $x = z$. Stoga je $y \cdot x = 1_{\mathbb{H}}$. Prema tome, y je inverzni element od x u monoidu (\mathbb{H}, \cdot) .

Time je tvrdnja teorema dokazana. □

Napomena 116. $(\mathbb{H}, +, \cdot)$ je nekomutativno tijelo, tj. operacija \cdot nije komutativna.

Naime, uzmimo $x = (0, 1, 0, 0)$ i $y = (0, 0, 1, 0)$. Tada lako dobivamo da je $x \cdot y = (0, 0, 0, 1)$, a $y \cdot x = (0, 0, 0, -1)$.

Prema tome, $x \cdot y \neq y \cdot x$.

Napomena 117. Neka je $x \in \mathbb{H}$, $x \neq 0_{\mathbb{H}}$, $x = (x_1, x_2, x_3, x_4)$. Neka je y inverzni element od x u (\mathbb{H}, \cdot) . Imamo $y = (y_1, y_2, y_3, y_4)$.

Iz dokaza propozicije 114. slijedi da je $A \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix}}_{\diamond} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$, gdje je A matrica definirana sa

(★) u prethodnoj propoziciji.

Neka je $\lambda = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2$. Lako dobivamo da je $A \cdot A^{\tau} = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix} = \lambda \cdot I$, gdje

je I jedinična matrica, a A^{τ} transponirana matrica matrice A .

Stoga je $A \cdot \left(\frac{1}{\lambda}A^{\tau}\right) = I$, pa je $A^{-1} = \frac{1}{\lambda}A^{\tau}$. Iz (\diamond) slijedi da je $\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} = A^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$, tj.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda} A^T \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \text{ Slijedi } (y_1, y_2, y_3, y_4) = \left(\frac{x_1}{\lambda}, -\frac{x_2}{\lambda}, -\frac{x_3}{\lambda}, -\frac{x_4}{\lambda} \right). \text{ Dakle,}$$

$$x^{-1} = \underbrace{\left(\frac{x_1}{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2}, -\frac{x_2}{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2}, -\frac{x_3}{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2}, -\frac{x_4}{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2} \right)}_{\Delta}$$

Napomena 118. Neka je $(P, +, \cdot)$ prsten s jedinicom. Pretpostavimo da x ima inverzni element u monoidu (P, \cdot) . Tada $-x$ ima inverzni element u monoidu (P, \cdot) , te vrijedi $(-x)^{-1} = -x^{-1}$.

Naime, iz $x \cdot x^{-1} = 1$, $x^{-1} \cdot x = 1$ i propozicije 44. slijedi $(-x) \cdot (-x^{-1}) = 1$ i $(-x^{-1}) \cdot (-x) = 1$, dakle, tvrdnja vrijedi.

Definicija 119. Neka je $i = (0, 1, 0, 0)$, $j = (0, 0, 1, 0)$ i $k = (0, 0, 0, 1)$. Iz definicije operacije \cdot u \mathbb{H} slijedi $i^2 = -1_{\mathbb{H}}$, $j^2 = -1_{\mathbb{H}}$, $k^2 = -1_{\mathbb{H}}$. Iz (Δ) slijedi $i^{-1} = -i$, $j^{-1} = -j$, $k^{-1} = -k$.

Vrijedi $i \cdot j = (0, 0, 0, 1)$, dakle $i \cdot j = k$. Stoga je $(i \cdot j)^{-1} = k^{-1}$, pa je $j^{-1} \cdot i^{-1} = k^{-1}$. Slijedi $(-j) \cdot (-i) = -k$. Stoga je $j \cdot i = -k$.

Iz $i \cdot j = k$ slijedi $(i \cdot j) \cdot j = k \cdot j$, pa je $i \cdot (-1_{\mathbb{H}}) = k \cdot j$, tj. $k \cdot j = -i$.

Invertiranjem i korištenjem napomene 118., dobijemo $j \cdot k = i$. Iz $i \cdot j = k$ množenjem slijeva s i slijedi $-j = i \cdot k$. Invertiranjem dobijemo $j = k \cdot i$.

Definicija 120. Neka je $(P, +, \cdot)$ prsten, te $A \subseteq P$. Kažemo da je **A tijelo u** $(P, +, \cdot)$ ako postoje binarne operacije $+_A$ i \cdot_A na A tako da je $(A, +_A, \cdot_A)$ tijelo i $x +_A y = x + y$, te $x \cdot_A y = x \cdot y$, $\forall x, y \in A$.

Napomena 121. Neka je $(P, +, \cdot)$ prsten i $A \subseteq P$. Tada je A polje u $(P, +, \cdot)$ ako i samo ako je A polje u $(P, +, \cdot)$ i $(P, +, \cdot)$ je polje.

Tvrdnja slijedi iz prethodne definicije i definicije polja u prstenu (definicija 81.).

5.2 Morfizam prstenova

Definicija 122. Neka su $(A, +_A, \cdot_A)$ i $(B, +_B, \cdot_B)$ prsteni. Za funkciju $f : A \rightarrow B$ kažemo da je **morfizam** ovih prstena ako za $\forall x, y \in A$ vrijedi:

$$f(x +_A y) = f(x) +_B f(y)$$

$$f(x \cdot_A y) = f(x) \cdot_B f(y)$$

Ako je uz to f i bijekcija, onda za f kažemo da je **izomorfizam** prstena $(A, +_A, \cdot_A)$ i $(B, +_B, \cdot_B)$.

Propozicija 123. Neka su $(A, +_A, \cdot_A)$ i $(B, +_B, \cdot_B)$ prsteni, te neka je $f : A \rightarrow B$ morfizam ovih prstena. Neka je 0_A nula u $(A, +_A, \cdot_A)$, te 0_B nula u $(B, +_B, \cdot_B)$. Tada je $f(0_A) = 0_B$.

Dokaz. Označimo $y = f(0_A)$. Imamo $y = f(0_A) = f(0_A +_A 0_A) = f(0_A) +_B f(0_A) = y +_B y$. Dakle, $y = y +_B y$, tj. $y +_B 0_B = y +_B y$. Prema lemi 17. vrijedi $0_B = y$.

Time je tvrdnja propozicije dokazana. \square

Propozicija 124. Neka su $(A, +_A, \cdot_A)$ i $(B, +_B, \cdot_B)$ prsteni, te neka je $f : A \rightarrow B$ izomorfizam ovih prstena. Tada je $f^{-1} : B \rightarrow A$ izomorfizam prstena $(B, +_B, \cdot_B)$ i $(A, +_A, \cdot_A)$.

Dokaz. Neka su $b_1, b_2 \in B$. Želimo dokazati da je $f^{-1}(b_1 +_B b_2) = \underbrace{f^{-1}(b_1) +_A f^{-1}(b_2)}_{\square}$.

Označimo $a = f^{-1}(b_1 +_B b_2)$ i $a' = f^{-1}(b_1) +_A f^{-1}(b_2)$. Da bismo dokazali da vrijedi (\square) , tj. $a = a'$, dovoljno je dokazati da je $f(a) = f(a')$ jer je f injekcija.

Imamo $f(a) = b_1 +_B b_2$ i $f(a') = f(f^{-1}(b_1)) +_B f(f^{-1}(b_2))$. Dakle, $f(a) = f(a')$, pa vrijedi (\square) .

Posve analogno dobivamo da je $f^{-1}(b_1 \cdot_B b_2) = f^{-1}(b_1) \cdot_A f^{-1}(b_2)$.

Time je tvrdnja propozicije dokazana. \square

Propozicija 125. Neka su $(A, +_A, \cdot_A)$ i $(B, +_B, \cdot_B)$ prsteni, te neka je $f : A \rightarrow B$ izomorfizam ovih prstenova.

1. Pretpostavimo da je $(A, +_A, \cdot_A)$ komutativan prsten. Tada je $(B, +_B, \cdot_B)$ komutativan prsten.
2. Pretpostavimo da je 1_A jedinica u prstenu $(A, +_A, \cdot_A)$. Tada je $f(1_A)$ jedinica u prstenu $(B, +_B, \cdot_B)$.
3. Pretpostavimo da je $(A, +_A, \cdot_A)$ polje. Tada je $(B, +_B, \cdot_B)$ polje.

Dokaz.

1. Neka su $b_1, b_2 \in B$. Tada postoje $a_1, a_2 \in A$ tako da je $f(a_1) = b_1$ i $f(a_2) = b_2$. Budući da je $(A, +_A, \cdot_A)$ komutativan prsten, vrijedi $a_1 \cdot_A a_2 = a_2 \cdot_A a_1$. Stoga je $f(a_1 \cdot_A a_2) = f(a_2 \cdot_A a_1)$, tj. $f(a_1) \cdot_B f(a_2) = f(a_2) \cdot_B f(a_1)$. Dakle, $b_1 \cdot_B b_2 = b_2 \cdot_B b_1$. Prema tome, $(B, +_B, \cdot_B)$ je komutativan prsten.
2. Želimo dokazati da je $f(1_A)$ neutralni element za operaciju \cdot_B . Neka je $b \in B$. Tada postoji $a \in A$ takav da je $f(a) = b$. Imamo $b \cdot_B f(1_A) = f(a) \cdot_B f(1_A) = f(a \cdot_A 1_A) = f(a) = b$. Dakle, $b \cdot_B f(1_A) = b$.

Analogno dobivamo da je $f(1_A) \cdot_B b = b$. Time je tvrdnja 2. dokazana.

3. Prema tvrdnji 1. imamo da je $(B, +_B, \cdot_B)$ komutativan prsten. Nadalje, $(A, +_A, \cdot_A)$ je prsten s jedinicom, pa neka je 1_A jedinica u tom prstenu. Označimo $1_B = f(1_A)$. Prema tvrdnji 2., 1_B je jedinica u prstenu $(B, +_B, \cdot_B)$.

Neka je 0_A nula u prstenu $(A, +_A, \cdot_A)$, te neka je 0_B nula u prstenu $(B, +_B, \cdot_B)$. Prema propoziciji 123. vrijedi $f(0_A) = 0_B$.

Neka je $b \in B, b \neq 0_B$. Želimo dokazati da postoji $b' \in B$ takav da je $b \cdot_B b' = 1_B$ i $b' \cdot_B b = 1_B$ (zbog komutativnosti je dovoljno dokazati da vrijedi jedna od navedenih jednakosti, pa odaberimo prvu). Postoji $a \in A$ takav da je $f(a) = b$. Tada je $a \neq 0_A$, jer bi u suprotnom imali $f(a) = f(0_A) = 0_B$, što je nemoguće jer je $b \neq 0_B$.

Budući da je $(A, +_A, \cdot_A)$ polje, postoji $a' \in A$ takav da je $a \cdot_A a' = 1_A$. Slijedi $f(a \cdot_A a') = f(1_A)$, tj. $f(a) \cdot_B f(a') = 1_B$. Ako definiramo $b' := f(a')$, onda imamo $b \cdot_B b' = 1_B$.

Dakle, $(B, +_B, \cdot_B)$ je polje. □

Propozicija 126. Neka je $(A, +_A, \cdot_A)$ prsten, neka je B skup, te neka su $+_B$ i \cdot_B binarne operacije na B . Pretpostavimo da je $f : A \rightarrow B$ bijekcija tako da za $\forall x, y \in A$ vrijedi:

$$f(x +_A y) = f(x) +_B f(y) \quad (\Delta)$$

$$f(x \cdot_A y) = f(x) \cdot_B f(y) \quad (\nabla)$$

Tada je $(B, +_B, \cdot_B)$ prsten (te je f izomorfizam prstena $(A, +_A, \cdot_A)$ i $(B, +_B, \cdot_B)$).

Dokaz. Neka su $b_1, b_2, b_3 \in B$. Tada postoje $a_1, a_2, a_3 \in A$ takvi da je $f(a_1) = b_1, f(a_2) = b_2$ i $f(a_3) = b_3$. Vrijedi $(a_1 +_A a_2) +_A a_3 = a_1 +_A (a_2 +_A a_3)$, pa je $f((a_1 +_A a_2) +_A a_3) = f(a_1 +_A (a_2 +_A a_3))$.

Iz (Δ) slijedi $(b_1 +_B b_2) +_B b_3 = b_1 +_B (b_2 +_B b_3)$. Prema tome, $+_B$ je asocijativna binarna operacija.

Neka je 0_A nula u prstenu $(A, +_A, \cdot_A)$. Analogno dokazu propozicije 125. 2., dobije se da je $f(0_A)$ neutralni element za $+_B$. Analogno dokazu propozicije 125. 1. dobijemo da je $+_B$ komutativna operacija na B . Analogno dokazu propozicije 125. 3. dobijemo da za $\forall b \in B \exists b' \in B$ td. je $b +_B b' = f(0_A)$.

Stoga je $(B, +_B)$ Abelova grupa.

Dokaz da je \cdot_B asocijativna binarna operacija je posve analogan dokazu da je $+_B$ asocijativna binarna operacija. Neka su $b_1, b_2, b_3 \in B$. Tada postoje $a_1, a_2, a_3 \in A$ takvi da je $f(a_1) = b_1, f(a_2) = b_2$ i $f(a_3) = b_3$. Vrijedi $a_1 \cdot_A (a_2 +_A a_3) = a_1 \cdot_A a_2 +_A a_1 \cdot_A a_3$. Koristeći (Δ) i (∇) dobijemo $b_1 \cdot_B (b_2 +_B b_3) = b_1 \cdot_B b_2 +_B b_1 \cdot_B b_3$.

Analogno dobijemo $(b_1 +_B b_2) \cdot_B b_3 = b_1 \cdot_B b_3 +_B b_2 \cdot_B b_3$.

Dakle, $(B, +_B, \cdot_B)$ je prsten. □

5.3 Kompleksni brojevi u \mathbb{H}

Definicija 127. Definirajmo $\mathbb{C}' = \{(x, y, 0, 0) \mid x, y \in \mathbb{R}\}$.

Propozicija 128. \mathbb{C}' je polje u $(\mathbb{H}, +, \cdot)$.

Dokaz. Neka su $a, b \in \mathbb{C}'$. Tvrdimo da je $a + b \in \mathbb{C}'$ i $a \cdot b \in \mathbb{C}'$. Neka su $a_1, a_2, b_1, b_2 \in \mathbb{R}$ takvi da je $a = (a_1, a_2, 0, 0)$ i $b = (b_1, b_2, 0, 0)$.

Imamo $a + b = (a_1 + b_1, a_2 + b_2, 0, 0) \in \mathbb{C}'$, pa je $a + b \in \mathbb{C}'$. Nadalje,

$$\begin{aligned} a \cdot b &= (a_1 \cdot b_1 - a_2 \cdot b_2 - 0 \cdot 0 - 0 \cdot 0, a_2 \cdot b_1 + a_1 \cdot b_2 - 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0, \\ &\quad 0 \cdot b_1 + 0 \cdot b_2 + a_1 \cdot 0 - a_2 \cdot 0, 0 \cdot b_1 - 0 \cdot b_2 + a_2 \cdot 0 + a_1 \cdot 0) \\ &= (a_1 \cdot b_1 - a_2 \cdot b_2, a_2 \cdot b_1 - a_1 \cdot b_2, 0, 0) \in \mathbb{C}' \end{aligned}$$

pa je $a \cdot b \in \mathbb{C}'$.

Definirajmo binarne operacije $+_{\mathbb{C}'}$ i $\cdot_{\mathbb{C}'}$ na \mathbb{C}' za $\forall a, b \in \mathbb{C}'$ sa:

$$a +_{\mathbb{C}'} b = a + b$$

$$a \cdot_{\mathbb{C}'} b = a \cdot b$$

Tvrdimo da je $(\mathbb{C}', +_{\mathbb{C}'}, \cdot_{\mathbb{C}'})$ polje.

Definirajmo $f : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}'$ kao $f(x) = f((x_1, x_2)) = (x_1, x_2, 0, 0)$, za $x = (x_1, x_2) \in \mathbb{C}$.

Ako su $(x_1, x_2), (y_1, y_2) \in \mathbb{C}$ takvi da je $(x_1, x_2) \neq (y_1, y_2)$, onda je $x_1 \neq y_1$ ili $x_2 \neq y_2$, pa je očito $(x_1, x_2, 0, 0) \neq (y_1, y_2, 0, 0)$, tj. $f((x_1, x_2)) \neq f((y_1, y_2))$. Prema tome, f je injekcija.

Iz definicije od \mathbb{C}' slijedi da je f surjekcija. Prema tome, f je bijekcija.

Neka su $x, y \in \mathbb{C}$ td. je $x = (x_1, x_2)$ i $y = (y_1, y_2)$ pri čemu su $x_1, x_2, y_1, y_2 \in \mathbb{R}$. Dokažimo:

$$f(x + y) = f(x) +_{\mathbb{C}'} f(y) \quad (\ominus)$$

$$f(x \cdot y) = f(x) \cdot_{\mathbb{C}'} f(y) \quad (\oplus)$$

Imamo:

$$\begin{aligned} f(x + y) &= f((x_1, x_2) + (y_1, y_2)) \\ &= f(x_1 + y_1, x_2 + y_2) \\ &= (x_1 + y_1, x_2 + y_2, 0, 0) \\ &= (x_1, x_2, 0, 0) + (y_1, y_2, 0, 0) \\ &= (x_1, x_2, 0, 0) +_{\mathbb{C}'} (y_1, y_2, 0, 0) \\ &= f(x) +_{\mathbb{C}'} f(y) \end{aligned}$$

Dakle, vrijedi (\ominus) . Nadalje:

$$\begin{aligned} f(x \cdot y) &= f((x_1, x_2) \cdot (y_1, y_2)) \\ &= f(x_1y_1 - x_2y_2, x_1y_2 + x_2y_1) \\ &= (x_1y_1 - x_2y_2, x_1y_2 + x_2y_1, 0, 0) \end{aligned}$$

S druge strane:

$$\begin{aligned} f(x) \cdot_{\mathbb{C}'} f(y) &= (x_1, x_2, 0, 0) \cdot (y_1, y_2, 0, 0) \\ &= (x_1y_1 - x_2y_2 - 0 - 0, x_1y_2 + x_2y_1 - 0 + 0, 0 + 0 + 0 + 0, 0 - 0 + 0 + 0) \\ &= (x_1y_1 - x_2y_2, x_1y_2 + x_2y_1, 0, 0) \end{aligned}$$

Dakle, vrijedi (\oplus) .

Iz činjenice da je f bijekcija, (\ominus) , (\oplus) te propozicije 126., slijedi da je $(\mathbb{C}', +_{\mathbb{C}'}, \cdot_{\mathbb{C}'})$ prsten, a f izomorfizam prstenova $(\mathbb{C}, +, \cdot)$ i $(\mathbb{C}', +_{\mathbb{C}'}, \cdot_{\mathbb{C}'})$.

Iz propozicije 125.3. slijedi da je $(\mathbb{C}', +_{\mathbb{C}'}, \cdot_{\mathbb{C}'})$ polje. Time je tvrdnja propozicije dokazana. \square

Poglavlje 6

Prsten hiperboličkih brojeva \mathbb{D}

6.1 Definicija i svojstva hiperboličkih brojeva

Definicija 129. Definirajmo $\mathbb{D} = \mathbb{R} \times \mathbb{R}$. Neka su $+_{\mathbb{D}}$ i $\cdot_{\mathbb{D}}$ binarne operacije na \mathbb{D} definirane sa:

$$\begin{aligned}(x_1, x_2) +_{\mathbb{D}} (y_1, y_2) &= (x_1 + y_1, x_2 + y_2) \\ (x_1, x_2) \cdot_{\mathbb{D}} (y_1, y_2) &= (x_1 y_1 + x_2 y_2, x_1 y_2 + x_2 y_1)\end{aligned}$$

Također, definirajmo $0_{\mathbb{D}} = (0, 0)$ i $1_{\mathbb{D}} = (1, 0)$.

Teorem 130. $(\mathbb{D}, +_{\mathbb{D}}, \cdot_{\mathbb{D}})$ je komutativan prsten s jedinicom. Nula u tom prstenu je $0_{\mathbb{D}}$, a jedinica je $1_{\mathbb{D}}$.

Dokaz. Očito je $\mathbb{D} = \mathbb{C}$, $0_{\mathbb{D}} = 0_{\mathbb{C}}$ i $+_{\mathbb{D}} = +$, gdje je $+$ binarna operacija iz definicije 93. Prema propoziciji 94., $(\mathbb{C}, +, \cdot)$ je polje i $0_{\mathbb{C}}$ je nula u tom polju. Dakle, $(\mathbb{C}, +)$ je Abelova grupa i $0_{\mathbb{C}}$ je neutralni element za operaciju $+$. Prema tome, $(\mathbb{D}, +_{\mathbb{D}})$ je Abelova grupa, a $0_{\mathbb{D}}$ je neutralni element za operaciju $+_{\mathbb{D}}$.

Neka su $x, y, z \in \mathbb{D}$. Postoje $x_1, x_2, y_1, y_2, z_1, z_2 \in \mathbb{R}$ t.d. je $x = (x_1, x_2)$, $y = (y_1, y_2)$ i $z = (z_1, z_2)$. Tvrđimo da je $(x \cdot_{\mathbb{D}} y) \cdot_{\mathbb{D}} z = x \cdot_{\mathbb{D}} (y \cdot_{\mathbb{D}} z)$.

Imamo:

$$\begin{aligned}(x \cdot_{\mathbb{D}} y) \cdot_{\mathbb{D}} z &= (x_1 y_1 + x_2 y_2, x_1 y_2 + x_2 y_1) \cdot_{\mathbb{D}} (z_1, z_2) \\ &= ((x_1 y_1 + x_2 y_2) z_1 + (x_1 y_2 + x_2 y_1) z_2, (x_1 y_1 + x_2 y_2) z_2 + (x_1 y_2 + x_2 y_1) z_1)\end{aligned}$$

S druge strane:

$$\begin{aligned}x \cdot_{\mathbb{D}} (y \cdot_{\mathbb{D}} z) &= (x_1, x_2) \cdot_{\mathbb{D}} (y_1 z_1 + y_2 z_2, y_1 z_2 + y_2 z_1) \\ &= (x_1(y_1 z_1 + y_2 z_2) + x_2(y_1 z_2 + y_2 z_1), x_1(y_1 z_2 + y_2 z_1) + x_2(y_1 z_1 + y_2 z_2))\end{aligned}$$

Koristeći asocijativnost zbrajanja i množenja na \mathbb{R} , te distributivnost množenja u odnosu na zbrajanje na \mathbb{R} , zaključujemo da je $(x \cdot_{\mathbb{D}} y) \cdot_{\mathbb{D}} z = x \cdot_{\mathbb{D}} (y \cdot_{\mathbb{D}} z)$.

Prema tome, $(\mathbb{D}, \cdot_{\mathbb{D}})$ je polugrupa.

Neka su $x, y \in \mathbb{D}$. Postoje $x_1, x_2, y_1, y_2 \in \mathbb{R}$ td. $x = (x_1, x_2)$ i $y = (y_1, y_2)$. Tvrdimo da je $x \cdot_{\mathbb{D}} y = y \cdot_{\mathbb{D}} x$. Vrijedi:

$$\begin{aligned} x \cdot_{\mathbb{D}} y &= (x_1, x_2) \cdot_{\mathbb{D}} (y_1, y_2) \\ &= (x_1 y_1 + x_2 y_2, x_1 y_2 + x_2 y_1) \end{aligned}$$

Također vrijedi:

$$\begin{aligned} y \cdot_{\mathbb{D}} x &= (y_1, y_2) \cdot_{\mathbb{D}} (x_1, x_2) \\ &= (y_1 x_1 + y_2 x_2, y_1 x_2 + y_2 x_1) \end{aligned}$$

Dakle, vrijedi $x \cdot_{\mathbb{D}} y = y \cdot_{\mathbb{D}} x$.

Neka su $x, y, z \in \mathbb{D}$. Imamo $x = (x_1, x_2)$, $y = (y_1, y_2)$ i $z = (z_1, z_2)$, gdje su $x_1, x_2, y_1, y_2, z_1, z_2 \in \mathbb{R}$. Dokažimo da je $x \cdot_{\mathbb{D}} (y +_{\mathbb{D}} z) = x \cdot_{\mathbb{D}} y +_{\mathbb{D}} x \cdot_{\mathbb{D}} z$. Vrijedi:

$$\begin{aligned} x \cdot_{\mathbb{D}} (y +_{\mathbb{D}} z) &= (x_1, x_2) \cdot_{\mathbb{D}} (y_1 + z_1, y_2 + z_2) \\ &= (x_1(y_1 + z_1) + x_2(y_2 + z_2), x_1(y_2 + z_2) + x_2(y_1 + z_1)) \\ &= (x_1 y_1 + x_1 z_1 + x_2 y_2 + x_2 z_2, x_1 y_2 + x_1 z_2 + x_2 y_1 + x_2 z_1) \end{aligned}$$

S druge strane:

$$\begin{aligned} x \cdot_{\mathbb{D}} y +_{\mathbb{D}} x \cdot_{\mathbb{D}} z &= (x_1, x_2) \cdot_{\mathbb{D}} (y_1, y_2) +_{\mathbb{D}} (x_1, x_2) \cdot_{\mathbb{D}} (z_1, z_2) \\ &= (x_1 y_1 + x_2 y_2, x_1 y_2 + x_2 y_1) +_{\mathbb{D}} (x_1 z_1 + x_2 z_2, x_1 z_2 + x_2 z_1) \\ &= (x_1 y_1 + x_2 y_2 + x_1 z_1 + x_2 z_2, x_1 y_2 + x_2 y_1 + x_1 z_2 + x_2 z_1) \end{aligned}$$

Dakle, vrijedi $x \cdot_{\mathbb{D}} (y +_{\mathbb{D}} z) = x \cdot_{\mathbb{D}} y +_{\mathbb{D}} x \cdot_{\mathbb{D}} z$.

Budući da je $\cdot_{\mathbb{D}}$ komutativna binarna operacija, vrijedi i $(y +_{\mathbb{D}} z) \cdot_{\mathbb{D}} x = y \cdot_{\mathbb{D}} x +_{\mathbb{D}} z \cdot_{\mathbb{D}} x$. Slijedi, $(\mathbb{D}, +_{\mathbb{D}}, \cdot_{\mathbb{D}})$ je komutativan prsten.

Neka je $x \in \mathbb{D}$. Imamo $x = (x_1, x_2)$, gdje su $x_1, x_2 \in \mathbb{R}$. Vrijedi:

$$x \cdot_{\mathbb{D}} 1_{\mathbb{D}} = (x_1, x_2) \cdot_{\mathbb{D}} (1, 0) = (x_1 \cdot 1 + x_2 \cdot 0, x_1 \cdot 0 + x_2 \cdot 1) = (x_1, x_2) = x$$

Dakle, $x \cdot_{\mathbb{D}} 1_{\mathbb{D}} = x$. Zbog komutativnosti operacije $\cdot_{\mathbb{D}}$, vrijedi i $1_{\mathbb{D}} \cdot_{\mathbb{D}} x = x$.

Zaključujemo da je $(\mathbb{D}, +_{\mathbb{D}}, \cdot_{\mathbb{D}})$ komutativan prsten s jedinicom, pri čemu je $1_{\mathbb{D}}$ jedinica u tom prstenu. Time je tvrdnja teorema dokazana. \square

Za $(\mathbb{D}, +_{\mathbb{D}}, \cdot_{\mathbb{D}})$ kažemo da je **prsten hiperboličkih brojeva**.

Lema 131. *Neka je $(P, +, \cdot)$ komutativan prsten, te neka su $x, y \in P$. Tada je $x^2 - y^2 = (x - y)(x + y)$.*

Dokaz. Imamo:

$$\begin{aligned} (x - y)(x + y) &= (x - y) \cdot x + (x - y) \cdot y \\ &\stackrel{\text{prop 46.}}{=} (x \cdot x - y \cdot x) + (x \cdot y - y \cdot y) \\ &= (x^2 + (-y \cdot x)) + (y \cdot x - y^2) \\ &= x^2 - y^2 \end{aligned}$$

Dakle, tvrdnja vrijedi. □

Propozicija 132. *Neka je $(P, +, \cdot)$ komutativan prsten s jedinicom. Pretpostavimo da postoji $x \in P$ takav da je $x \neq 1, x \neq -1$, te da je $x^2 = 1$. Tada $(P, +, \cdot)$ nije integralna domena.*

Dokaz. Iz $x^2 = 1$ slijedi $x^2 - 1 = 0$, tj. $x^2 - 1^2 = 0$. Iz leme 131. slijedi $(x - 1)(x + 1) = 0$.

Nadalje, iz $x \neq 1$ slijedi $x - 1 \neq 0$, a iz $x \neq -1$ slijedi $x + 1 \neq 0$. Stoga je jasno da $(P, +, \cdot)$ nije integralna domena. □

Definicija 133. *Definirajmo $j = (0, 1)$. Vrijedi:*

$$j^2 = j \cdot_{\mathbb{D}} j = (0, 1) \cdot_{\mathbb{D}} (0, 1) = (0 \cdot 0 + 1 \cdot 1, 0 \cdot 1 + 1 \cdot 0) = (1, 0) = 1_{\mathbb{D}}$$

Uočimo:

Ako je $x \in \mathbb{D}$, $x = (x_1, x_2)$, onda je $-x = (-x_1, -x_2)$ u prstenu $(\mathbb{D}, +_{\mathbb{D}}, \cdot_{\mathbb{D}})$. Stoga je $-1_{\mathbb{D}} = (-1, 0)$. Onda očito $j \neq 1_{\mathbb{D}}$ i $j \neq -1_{\mathbb{D}}$. Iz propozicije 132. slijedi da $(\mathbb{D}, +_{\mathbb{D}}, \cdot_{\mathbb{D}})$ nije integralna domena. Posebno, $(\mathbb{D}, +_{\mathbb{D}}, \cdot_{\mathbb{D}})$ nije polje.

Konkretno, neka je $u = (-1, 1)$ i $v = (1, 1)$. Očito je $u \neq 0_{\mathbb{D}}$ i $v \neq 0_{\mathbb{D}}$, a vrijedi:

$$u \cdot_{\mathbb{D}} v = (-1, 1) \cdot_{\mathbb{D}} (1, 1) = (-1 + 1, -1 + 1) = (0, 0) = 0_{\mathbb{D}}$$

6.2 Realni brojevi u \mathbb{H}

Podsjetimo se definicije skupa: $\mathbb{R}' = \{(x, 0) \mid x \in \mathbb{R}\}$.

Propozicija 134. \mathbb{R}' je polje u $(\mathbb{D}, +_{\mathbb{D}}, \cdot_{\mathbb{D}})$.

Dokaz. Neka su $x, y \in \mathbb{R}'$. Imamo $x = (x_1, 0)$ i $y = (y_1, 0)$, gdje su $x_1, y_1 \in \mathbb{R}$. Tvrdimo da je $x +_{\mathbb{D}} y \in \mathbb{R}'$ i $x \cdot_{\mathbb{D}} y \in \mathbb{R}'$.

Vrijedi:

$$x +_{\mathbb{D}} y = (x_1 + y_1, 0) \in \mathbb{R}'$$

i

$$x \cdot_{\mathbb{D}} y = (x_1, 0) \cdot_{\mathbb{D}} (y_1, 0) = (x_1 y_1 + 0, x_1 \cdot 0 + 0 \cdot y_1) = (x_1 y_1, 0) \in \mathbb{R}'$$

Definirajmo binarne operacije $+'$ i \cdot' na \mathbb{R}' sa:

$$x +' y = x +_{\mathbb{D}} y$$

$$x \cdot' y = x \cdot_{\mathbb{D}} y$$

Kako bi dokazali tvrdnju propozicije, dovoljno je dokazati da je $(\mathbb{R}', +', \cdot')$ polje.

Neka je $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}'$ td. $f(x) = (x, 0)$, za $\forall x \in \mathbb{R}$. Očito je f bijekcija. Neka su $x, y \in \mathbb{R}$. Imamo:

$$f(x + y) = (x + y, 0) = (x, 0) +' (y, 0) = f(x) +' f(y)$$

Dakle,

$$f(x + y) = f(x) +' f(y) \quad (:\cdot)$$

Nadalje,

$$f(x \cdot y) = (x \cdot y, 0) = (x, 0) \cdot' (y, 0) = f(x) \cdot' f(y)$$

Dakle,

$$f(x \cdot y) = f(x) \cdot' f(y) \quad (\cdot:)$$

Iz propozicije 126., $(:\cdot)$, $(\cdot:)$ i činjenice da je f bijekcija slijedi da je $(\mathbb{R}', +', \cdot')$ prsten, a f izomorfizam prstenova $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ i $(\mathbb{R}', +', \cdot')$. Sada iz propozicije 125. 3. slijedi da je $(\mathbb{R}', +', \cdot')$ polje, čime smo dokazali tvrdnju propozicije. \square

Napomena 135. Za svaki $z \in \mathbb{D}$ postoje jedinstveni $a, b \in \mathbb{R}'$ tako da je $z = a +_{\mathbb{D}} b \cdot_{\mathbb{D}} j$.

Do ove činjenice dolazimo analogno kao i u napomeni 108.

Bibliografija

- [1] F. Catoni, D. Boccaletti, R. Cannata, V. Catoni, P. Zampetti, *Hyperbolic Numbers, Geometry of Minkowski Space–Time*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [2] S. Mardešić, *Matematička analiza 1*, Školska knjiga, Zagreb, 1991.
- [3] G. Sobczyk, *The Hyperbolic Number Plane*, dostupno na https://www.researchgate.net/publication/228559618_The_Hyperbolic_Number_Plane

Sažetak

U prvom smo poglavlju proučili općenito grupe i prstene, te smo definirali što je to potpuno uređeno polje. U drugom smo se poglavlju osvrnuli na prirodne, cijele i racionalne brojeve, te ih definirali unutar fiksiranog polja realnih brojeva. Zatim smo u trećem poglavlju proučili potprstene i potpolja. U četvrtom poglavlju smo definirali polje kompleksnih brojeva \mathbb{C} , nakon čega smo proučavali određeno potpolje od \mathbb{C} izomorfno s \mathbb{R} . Pri kraju poglavlja smo definirali morfizam uređenih skupova. U petom poglavlju smo proučavali svojstva tijela kvaterniona \mathbb{H} , morfizme i izomorfizme prstenova. Također, razmotrili smo određeno polje u \mathbb{H} koje je izomorfno sa \mathbb{C} . Na kraju rada, u šestom poglavlju smo definirali prsten hiperboličkih brojeva \mathbb{D} i proučili određeno polje u \mathbb{D} koje je izomorfno sa \mathbb{R} .

Summary

In the first chapter, we studied groups and rings in general, and defined what a totally ordered field is. In the second chapter, we looked at natural, integer, and rational numbers, and defined them within a fixed field of real numbers. Then, in the third chapter, we studied subrings and subfields. In the fourth chapter, we defined a field of complex numbers \mathbb{C} , after which we studied a certain subfield of \mathbb{C} isomorphic to \mathbb{R} . At the end of the chapter, we defined morphism of ordered sets. In the fifth chapter, we studied the properties of a field of quaternions \mathbb{H} , morphisms, and ring isomorphisms. We also considered a particular field in \mathbb{H} that is isomorphic to \mathbb{C} . At the end of the paper, in sixth chapter, we defined a ring of hyperbolic numbers \mathbb{D} and studied a particular field in \mathbb{D} that is isomorphic to \mathbb{R} .

Životopis

Rodih se u Zagrebu 29. travnja 1993. godine, a ostatak života živim u Kutini. Nakon završene osnovne škole Stjepana Kefelje u Kutini, upisujem matematičku gimnaziju Tina Ujevića, također u Kutini. Godine 2012. upisujem preddiplomski studij nastavničke matematike na PMF-u u Zagrebu, a 2017. godine upisujem diplomski studij nastavničke matematike na PMF-u u Zagrebu.