



WISKUNDE.OPMAAT.ORG

COMPLEXE GETALLEN A

Inhoudsopgave

0.1	Wiskunde Op Maat	0.3
1	Complexe getallen	1.1
1.1	Intro: nieuwe getallen voor vergelijkingen	1.2
1.2	Complexe getallen (algebraïsch)	1.4
1.3	Optellen en vermenigvuldigen	1.6
1.4	Het complexe vlak	1.7
1.5	De norm van een complex getal	1.9
1.6	De complex toegevoegde van een complex getal	1.10
1.7	De deling van complexe getallen	1.12
1.8	Tweedegraadsvergelijkingen in de complexe getallen	1.13
2	Goniometrische voorstelling	2.1
2.1	De polaire schrijfwijze van complexe getallen	2.2
2.2	De vermenigvuldiging in polaire vorm	2.5
2.3	Machten van complexe getallen: formule van De Moivre	2.6
2.4	Wortels van complexe getallen	2.7

0.1 Wiskunde Op Maat

0.1 Wiskunde Op Maat

Dit handboek over complexe getallen is het eerste deel van een reeks die hopelijk ooit de volledige leerstof van minstens de derde graad van het Vlaamse secundair onderwijs zal omvatten.

De belangrijkste kenmerken zijn

- (a) **kwaliteitsvol leermateriaal**, met duidelijke en exacte formuleringen, verhelderende en motiverende voorbeelden en met zowel voldoende eenvoudige inoefen-oefeningen als uitdagende toepassingen.
- (b) een **minimale impact op de lessen**: er wordt materiaal aangeboden dat kan dienen als referentie, studiemateriaal, oefeningen of werkbladen, maar de leerkracht kiest hoe hij wat al dan niet gebruikt. In het bijzonder is er een klassiek handboek, dat zowel in PDF als uitgeprint kan worden aangeboden, eventueel in kleine onderdelen naarmate de lessen vorderen. Bovendien is er een website met hetzelfde materiaal, eventueel uitgebreid met extra voorbeelden, oefeningen of kennisclips.
- (c) geschreven in **L^AT_EX**, de lingua franca waarin wiskundige teksten worden geschreven. Het systeem is vrij beschikbaar, is erg krachtig, en wordt over heel de wereld door ontelbare wiskundigen en leerkrachten wiskunde gebruikt. Er is een enorme online community die de technologie verder ontwikkelt en al het materiaal vrij ter beschikking stelt.
- (d) van dezelfde **L^AT_EX**-broncode worden zowel hoogwaardige PDF-bestanden gemaakt als **interactieve webpagina's**. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van Ximera, oorspronkelijk ontwikkeld aan Ohio State University en sinds 2019 aan de KU Leuven verder uitgebreid.
- (e) de **broncode** van het hele handboek, inclusief de oefeningen, is vrij beschikbaar. Dit laat elke geïnteresseerde leerkracht met voldoende **L^AT_EX** kennis toe om het handboek volledig naar eigen smaak en voorkeuren aan te passen, in te perken of uit te breiden.
- (f) het volledige leerplan zal enkel kunnen gerealiseerd worden als er een actieve community ontstaat van gemotiveerde leerkrachten die materiaal ontwikkelen en ter beschikking willen stellen van hun collega's. Zoals gebruikelijk in succesvolle open source projecten, zorgt de structuur van deze community voor een automatische kwaliteitscontrole. Er zal geen wildgroei ontstaan van ongerelateerde oefeningen en werkbladen met diverse notaties en onduidelijke verwachte voorkennis.
- (g) de broncode is erg **modulair opgebouwd**, zodat van hetzelfde handboek automatisch verschillende versies worden gegenereerd, zogenaamde 'flavours', met meer of minder basisoefeningen, al dan niet historische noten of uitdagende denkvragen, meer of minder bewijzen en meer of minder uitgebreide toepassingen. Om hiervan gebruik te maken is geen enkele technische kennis vereist. Hierdoor ontstaat een **handboek op maat van de leerkracht**, die precies kan aangeven welke bewijzen, voorbeelden en oefeningen moeten worden opgenomen.
- (h) zowel de PDF als de website kunnen hyperlinks bevatten naar meer voorbeelden, meer oefeningen, een alternatieve uitleg, een extra kennisclip of geogebra applet. Hierdoor ontstaat een **handboek op maat van elke leerling**, die voor de moeilijke onderdelen steeds extra materiaal vindt.
- (i) het gebruik van **L^AT_EX** garandeert een grote duurzaamheid, minstens wat het genereren van kwaliteitsvolle PDF's betreft: het is hoogst waarschijnlijk dan binnen 10, 20 en 30 jaar dezelfde broncode nog steeds dezelfde PDF zal genereren (net zoals vandaag de meeste **L^AT_EX** bestanden van de jaren 1980 nog perfect bruikbaar zijn, hoewel ze natuurlijk geen gebruik maken van de ontelbare nieuwigheden die sinds die tijd zijn toegevoegd). De webtechnologie zal natuurlijk sneller evolueren, maar het is erg aannemelijk dat in toekomst van de huidige **L^AT_EX**-code automatisch of semi-automatisch nieuwe interactieve applicaties zullen kunnen gemaakt worden.

Enkele didactisch-technische kenmerken zijn

- (a) een **duidelijke structuur** met kleurcodes, die eventueel per leerkracht/school kunnen worden aangepast. Zo zijn definities en eigenschappen steeds bondig en correct geformuleerd in groene kaders, en

0.1 Wiskunde Op Maat

hebben voorbeelden en oefeningen een blauwe achtergrond. Inleidingen, motiveringen, achtergrondinformatie, uitweidingen kunnen naar wens worden beperkt, weggelaten of uitklapbaar gemaakt. Hierdoor wordt voor leerlingen automatisch duidelijk wat er precies moet gekend zijn.

- (b) bij theorie worden soms (optioneel) zogenaamde '**vlugge vragen**' voorzien die leerlingen toelaten om na te gaan of ze definities en eigenschappen correct hebben begrepen. Deze vragen kunnen bij een eerste kennismaking wat tijd en moeite vragen, maar moeten naarmate men vertrouwd raakt met de leerstof 'evident' worden voor iedereen. Daarnaast zijn er ook '**denkvragen**' die soms erg algemeen zijn, en dikwijls geen eenduidige antwoorden hebben, maar verwondering of creativiteit kunnen uitlokken.
- (c) er wordt gestreefd naar **wiskundige exactheid zonder nodeloos formalisme**. Definities zijn duidelijk en correct. Notaties die worden ingevoerd worden ook verder gebruikt en herhaald, zodat leerlingen er mee vertrouwd raken. Zinnige verbanden tussen onderdelen worden (uit-)gelegd.
- (d) bij elk topic hoort een '**steekkaart**' met alle belangrijke concepten en eigenschappen (die kan worden gebruikt bij het studeren en bij het maken van oefeningen) en soms ook een 'steekkaart' met veronderstelde voorkennis die kan of moet worden herhaald of geactiveerd.



WISKUNDE.OPMAAT.ORG

HOOFDSTUK 1

COMPLEXE GETALLEN

1.1 Intro: nieuwe getallen voor vergelijkingen

1.1 Intro: nieuwe getallen voor vergelijkingen

Doorheen de geschiedenis van de wiskunde hebben nieuwe getallen een belangrijke rol gespeeld. Uit het tellen komen de meest eenvoudige getallen voort: 1 appel, 2 appels, 3 appels, ... Dit zijn de natuurlijke getallen, die genoteerd worden met de letter $\mathbb{N} = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, \dots\}$.

Met deze getallen kan je op verschillende manieren 'nieuwe getallen' invoeren. Door negatieve getallen toe te voegen wordt de verzameling getallen groter. Dit zijn de gehele getallen, die genoteerd worden met de letter $\mathbb{Z} = \{\dots, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, \dots\}$.

Wiskundigen hebben allerlei redenen om nieuwe getallen in te voeren, waaronder het oplossen van vergelijkingen. De vergelijking $x + 2 = 1$ heeft bijvoorbeeld geen oplossing in de natuurlijke getallen. Zonder het gehele getal $x = -1$ is deze vergelijking niet oplosbaar.

Om even over na te denken ...

De Oude Grieken hebben negatieve getallen nooit aanvaard. Voor hen is een getal altijd een hoeveelheid of een lengte, en dus positief. **Ben jij akkoord met de Oude Grieken?**

Bestaan negatieve getallen wel 'écht'?

Je hebt 1 appel, 2 appels, 3 appels, ... Maar wat is precies '-1 appel'?

Aan welke vereisten moet iets voldoen voordat jij het 'een getal' zou willen noemen?

Breuken leiden tot een volgende uitbreiding van de getallen. Die nieuwe getallen worden de rationale getallen genoemd, en genoteerd met de letter $\mathbb{Q} = \left\{ \frac{z}{n} \mid z \in \mathbb{Z}, n \in \mathbb{N}_0 \right\}$. Voorbeelden zijn $\frac{2}{3}$, $-\frac{4}{3}$, $\frac{1}{1}$ en $\frac{0}{3}$. Ook rationale getallen zijn nuttig om vergelijkingen op te lossen, want de vergelijking $3x + 4 = 0$ heeft geen oplossing in de gehele getallen \mathbb{Z} . Zonder de breuk $x = -\frac{4}{3}$ is deze vergelijking niet oplosbaar.

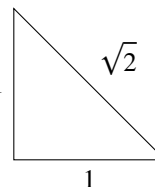
Je merkt al snel dat je nog niet 'genoeg' getallen hebt. De stelling van Pythagoras leert ons dat de schuine zijde van de gegeven driehoek lengte $\sqrt{2}$ heeft.

Met een kort bewijs kan men aantonen dat $\sqrt{2}$ niet in de verzameling rationale getallen zit, dus dat

$$\sqrt{2} = 1.4142135623730950488016887242096980785696718753769480731766797 \dots$$

niet te schrijven is als een breuk!. Deze getallen worden *irrationaal* genoemd en hebben altijd oneindig veel cijfers na de komma. Andere voorbeelden zijn

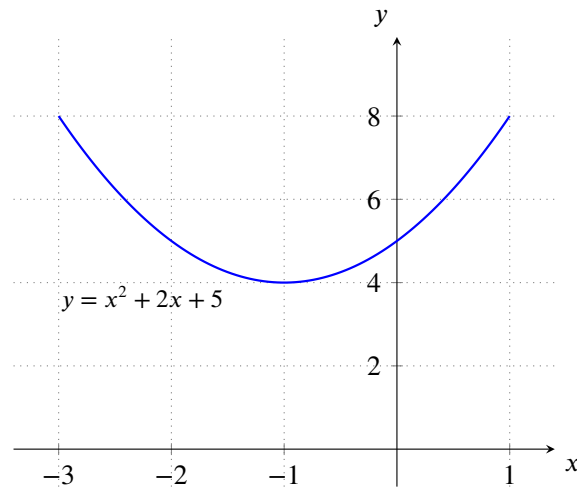
$$\pi = 3.141592653589793238462643383279502884197169399375 \dots, \frac{\sqrt{2}}{2} \text{ en } \pi^2$$



Ook irrationale getallen zijn nuttig om vergelijkingen op te lossen. De vergelijking $x^2 + 2 = 4$ heeft immers geen oplossing in de rationale getallen \mathbb{Q} . Zonder het irrationale getal $x = \sqrt{2}$ kan je deze vergelijking niet oplossen. Als de irrationale getallen worden toegevoegd aan de rationale getallen \mathbb{Q} , bekom je de reële getallen \mathbb{R} . De reële getallen vormen een rechte waarbij met elk punt een reëel getal overeenkomt.

In het vierde jaar heb je geleerd hoe je de tweedegraadsvergelijking $ax^2 + bx + c = 0$ kan oplossen. Hierbij maakte je een onderscheid naargelang het teken van de discriminant $D = b^2 - 4ac$. De vergelijking $x^2 + 2x + 5 = 0$ heeft als discriminant $D = b^2 - 4ac = 4 - 20 = -16$. De discriminant is negatief en deze vergelijking heeft dus geen oplossingen. De grafiek van deze functie heeft geen snijpunten met de x-as.

1.1 Intro: nieuwe getallen voor vergelijkingen



Je hebt geleerd dat de algemene oplossingen voor een tweedegraadsvergelijking gegeven wordt door

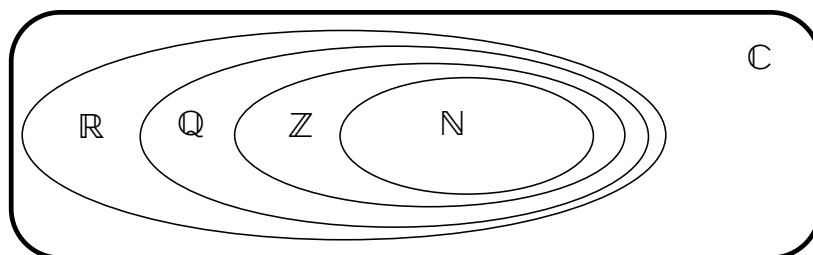
$$x_1 = \frac{-b + \sqrt{D}}{2a} \quad \text{en} \quad x_2 = \frac{-b - \sqrt{D}}{2a}$$

Misschien is de formule toch zinvol? Rekenen met de negatieve discriminant geeft:

$$x_{1,2} = \frac{-2 + \sqrt{-16}}{2} = \frac{-2 + 4\sqrt{-1}}{2} = -1 + 2\sqrt{-1}$$

In deze 'mogelijke oplossing' staat $\sqrt{-1}$. Omdat er geen reëel getal is met als vierkantswortel -1 , heeft deze vergelijking geen oplossing in de reële getallen \mathbb{R} . Wanneer er voor een vergelijking geen oplossing was, werden hierboven steeds nieuwe getallen toegevoegd. In dit hoofdstuk worden de reële getallen \mathbb{R} verder uitgebreid tot de complexe getallen \mathbb{C} door een nieuw getal i toe te voegen met als eigenschap dat $i^2 = -1$. De tweedegraadsvergelijking $x^2 + 2x + 5 = 0$ heeft dan wel oplossingen in de complexe getallen: $-1 + 2i$ en $-1 - 2i$.

Vandaag worden deze nieuwe 'complexe' getallen gebruikt bij het programmeren van computergames, bij het berekenen van elektronische schakelingen en in de kwantummechanica.



1.2 Complexe getallen (algebraïsch)

1.2 Complexe getallen (algebraïsch)

Met een nieuwe symbool i worden er nieuwe getallen ingevoerd. Er ontstaan combinaties als $2i$ en $i + 1$, die we **complexe getallen** noemen, niet omdat ze ingewikkeld zijn, maar omdat ze zijn *samengesteld* uit reële getallen en het nieuwe symbool i .

Definitie 1.2.1 (Complex getal).

Een **complex getal** is een uitdrukking van de vorm $a + bi$, met $a, b \in \mathbb{R}$.

Het symbool i waarvoor $i^2 = -1$ noemen we de **imaginaire eenheid**.

De **verzameling complexe getallen** noteren we met $\mathbb{C} = \{a + bi \mid a, b \in \mathbb{R}; i^2 = -1\}$.

Voor een complex getal $z = a + bi$ noemen we:

$$a = \operatorname{Re}(a + bi) = \operatorname{Re}(z) \text{ het reëel deel}$$

$$b = \operatorname{Im}(a + bi) = \operatorname{Im}(z) \text{ het imaginair deel.}$$

Als $\operatorname{Im}(z) = b = 0$, dan is $z = a$ een **(zuiver) reëel getal**

Als $\operatorname{Re}(z) = a = 0$, dan is $z = bi$ een **(zuiver) imaginair getal**.

Twee complexe getallen zijn **gelijk** indien ze dezelfde reële en imaginaire delen hebben:

$$\begin{aligned} z = w &\iff \operatorname{Re}(z) = \operatorname{Re}(w) \text{ en } \operatorname{Im}(z) = \operatorname{Im}(w) \\ a + bi = c + di &\iff a = c \text{ en } b = d \end{aligned}$$

Complexe getallen worden dikwijls met de letters z of w genoteerd, net zoals we voor een natuurlijk getal n gebruiken of voor functies f, g en h .

Opmerking 1.2.1 (Gelijkheid van complexe getallen).

Het kan overbodig lijken om te vermelden wanneer twee complexe getallen $z = a + bi$ en $w = c + di$ aan elkaar gelijk zijn. Merk op dat een gelijkaardige regel voor breuken *niet* geldt: als $\frac{a}{b} = \frac{c}{d}$ gelijk zijn hoeft niet te gelden dat $a = c$ en $b = d$. De breuken $\frac{1}{2}$ en $\frac{3}{6}$ zijn immers gelijk, maar hun tellers en noemers toch zijn verschillend.

Voorbeeld 1.2.1. Volgende uitdrukkingen zijn allemaal complexe getallen:

z	$\operatorname{Re}(z)$	$\operatorname{Im}(z)$	z	$\operatorname{Re}(z)$	$\operatorname{Im}(z)$
$2 + 3i$	2	3	$1 + \pi$	$1 + \pi$	0
$5 - 6i$	5	-6	42	42	0
$1 + i\sqrt{2}$	1	$\sqrt{2}$	$42i$	0	42
$\frac{1 - i\sqrt{5}}{2}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{\sqrt{5}}{2}$	$5i + 7$	7	5
			$2 + 5i + \pi$	$2 + \pi$	5

De getallen 42 en $1 + \pi$ zijn zuiver reële getallen, $42i$ is een zuiver imaginair getal.

Oefening 1.2.1. Geef telkens het reëel en het imaginair deel van de volgende complexe getallen.

- $8 + 3i$ heeft reëel deel en imaginair deel
- $\sqrt{2} - \sqrt{2}i$ heeft reëel deel en imaginair deel
- $7i$ heeft reëel deel en imaginair deel
- 5 heeft reëel deel en imaginair deel

1.2 Complexe getallen (algebraïsch)

5. $\frac{1+2i}{3}$ heeft reëel deel en imaginair deel
6. i heeft reëel deel en imaginair deel
7. $\frac{9+3i}{3}$ heeft reëel deel en imaginair deel
8. $\pi + i + e$ heeft reëel deel en imaginair deel
9. 0 heeft reëel deel en imaginair deel
10. $\frac{\sqrt{5} + \sqrt{5}i}{\sqrt{5}}$ heeft reëel deel en imaginair deel

Oefening 1.2.2. Schrijf zo eenvoudig mogelijk, door gebruik te maken van de gelijkheid $i^2 = -1$.

1. $i^2 = \dots\dots$
2. $i^5 = \dots\dots$
3. $-i^3 = \dots\dots$
4. $i^4 = \dots\dots$
5. $-i^4 = \dots\dots$
6. $i^{10} = \dots\dots$
7. $i^{11} = \dots\dots$
8. $i^{12} = \dots\dots$
9. $-i^2 = \dots\dots$
10. $i^{2028} = \dots\dots$

1.3 Optellen en vermenigvuldigen

1.3 Optellen en vermenigvuldigen

Optelling en vermenigvuldiging van complexe getallen volgen uit de gebruikelijke rekenregels. Door gebruik te maken van de rekenregel $i^2 = -1$ kan een complex getal telkens geschreven worden in de standaardvorm $a + bi$.

Definitie 1.3.1 (Som en product). Voor reële getallen a, b, c, d geldt door uitwerken en $i^2 = -1$ dat

$$(a + bi) + (c + di) = (a + c) + (b + d)i$$

$$(1 + 2i) + (3 + 4i) = (1 + 3) + (2 + 4)i = 4 + 6i$$

$$(a + bi) \cdot (c + di) = ac + adi + bci + bdi^2 \\ = (ac - bd) + (ad + bc)i$$

$$(1 + 2i) \cdot (3 + 4i) = 1 \cdot 3 + 1 \cdot 4i + 2 \cdot 3i + 2 \cdot 4i^2 \\ = (3 - 8) + (4 + 6)i \\ = -5 + 10i$$

Voorbeeld 1.3.1.

1. $(2 - 4i) + (3 + 5i) = 5 + i$

$$(2 - 4i) + (3 + 5i) = 2 - 4i + 3 + 5i = 2 + 3 - 4i + 5i = 5 - i$$

2. $(3 + i) - (1 - 2i) = 2 + 3i$

$$(3 + i) - (1 - 2i) = 3 + i - 1 + 2i = 3 - 1 + i + 2i = 2 + 3i$$

3. $(3 + i) \cdot (1 - 2i) = 5 - 5i$

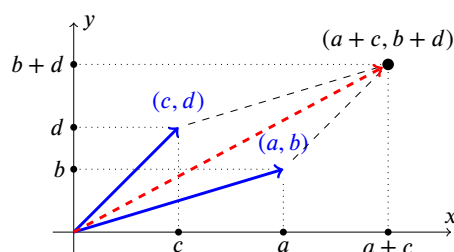
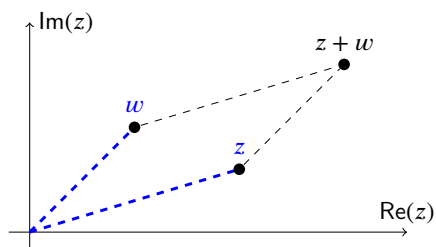
$$(3+i) \cdot (1-2i) = 3 \cdot 1 + 3 \cdot (-2i) + i \cdot 1 + i \cdot (-2i) = 3 - 6i + i - 2i^2 \\ = 3 - 5i - 2 \cdot (-1) = 3 - 5i + 2 = 5 - 5i$$

4. $(1 - i) + (2 + i) = 3$

5. $(-3 + 2i) + (3 + 5i) = 7i$

6. $(-3 + 2i)i = -2 - 3i$

De som van complexe getallen komt overeen met de som vectoren via de parallellogramregel:



Net zoals bij de reële getallen spreken we ook van het **tegengestelde** $-z = -(a + bi) = -a - bi$.

De vermenigvuldiging heeft een wat ingewikkeldere meetkundige interpretatie die elders wordt uitgelegd.

Oefening 1.3.1.

1. $(1 + 2i) \cdot (1 - 2i) = 5$

Uitwerking:

Haakjes uitwerken, of eenvoudiger via $(a - b)(a + b) = a^2 - b^2$ wat ook geldt voor complexe getallen:

$$(1 + 2i) \cdot (1 - 2i) = 1^2 - (2i)^2 = 1 + 4 = 5$$

2. $(1 + 2i) \cdot \frac{1 - 2i}{2} = \frac{5}{2}$

3. $(1 + 2i) \cdot i = -2 + i$

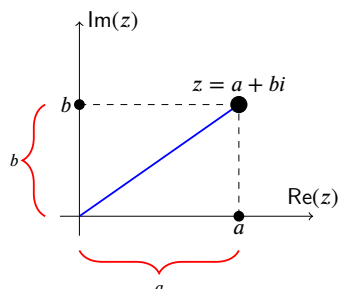
4. $i^4 = 1$

Uitwerking: $i^4 = i^2 \cdot i^2 = (-1) \cdot (-1) = 1$ of $i^4 = (i^2)^2 = (-1)^2 = 1$

1.4 Het complexe vlak

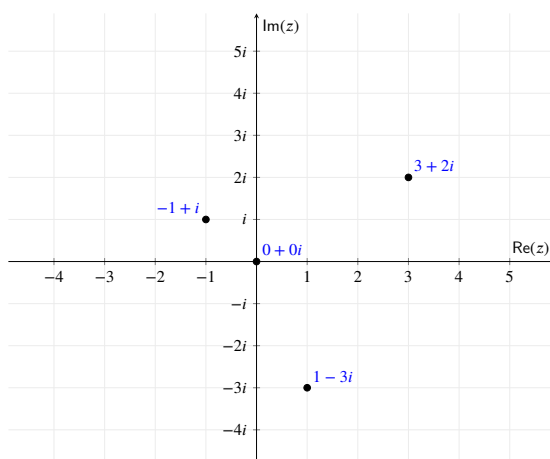
1.4 Het complexe vlak

Een complex getal $z = a + bi \in \mathbb{C}$ kan worden beschouwd als een punt in het reële vlak, namelijk als het punt met cartesiaanse coördinaten (a, b) , waarbij a, b reële getallen zijn. De schrijfwijze $a + bi$ van een complex getal noemt men de **cartesiaanse vorm**. We spreken in deze context ook van **het complexe vlak** of **het vlak van Gauss**.



De **zuiver reële** getallen bevinden zich op de (horizontale) x -as, die we dan ook de **reële as** noemen. De **zuiver imaginaire** getallen bevinden zich op de (verticale) y -as, die we de **imaginaire as** noemen.

Complexe getallen als punten in het complexe vlak zullen ook een meetkundige interpretatie geven aan de bewerkingen (optellen, vermenigvuldigen, ...) die je met getallen kan uitvoeren.



Oefening 1.4.1. Geef devolgende complexe getallen weer als punten in het bovenstaande complexe vlak.

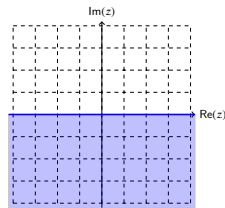
- | | |
|---------------|---------------|
| (a) $3 + 3i$ | (d) $4 + 0i$ |
| (b) $-4 - 4i$ | (e) $-3 - 4i$ |
| (c) $-2i$ | (f) $2 + 5i$ |

Oefening 1.4.2. Schets in het complexe vlak de gebieden omschreven door volgende vergelijkingen:

1. $\text{Im}(z) \leq 0$

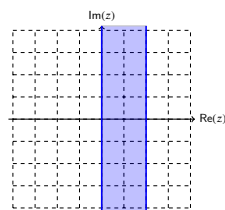
Uitwerking: Als $z = a + bi$, dan betekent $\text{Im}(z) \leq 0$ dat $b \leq 0$ en dat geeft het halfvlak onder de x -as:

1.4 Het complexe vlak



2. $0 \leq \text{Re}(z) \leq 2$

Uitwerking: Deze ongelijkheden bepalen een *verticale* strook, aangezien het reële deel van het complex getal in een interval moet liggen. De randen van de strook behoren tot het geschetste domein.



1.5 De norm van een complex getal

1.5 De norm van een complex getal

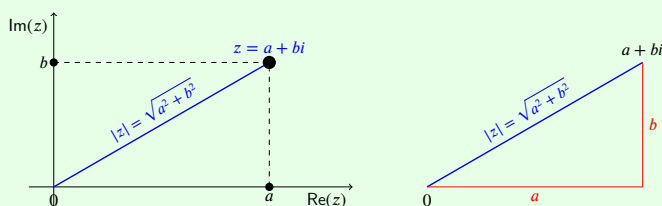
De *absolute waarde* $|a|$ van een reëel getal $a \in \mathbb{R}$ geeft de afstand weer van dit punt tot de oorsprong op de reële rechte. Voor complexe getallen neemt men de afstand tot de oorsprong van het complexe vlak.

Definitie 1.5.1 (Modulus van een complex getal).

De **modulus** (of **norm**) van een complex getal $z = a + bi$, genoteerd $|z|$, is het *positief reëel* getal

$$|z| \stackrel{\text{def}}{=} |a + bi| \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$|3 + 4i| = \sqrt{3^2 + 4^2} = \sqrt{9 + 16} = \sqrt{25} = 5.$$



De modulus $|z|$ is meetkundig **de afstand van z tot de oorsprong** (wegens Pythagoras).

Voorbeeld 1.5.1.

- | | | | |
|---------------|---------------|---------------------|-------------------------|
| 1. $ i = 1$ | 3. $ -2 = 2$ | 5. $ 1 - 1 = 0$ | 7. $ 3 - 4i = 5$ |
| 2. $ -i = 1$ | 4. $ 2i = 2$ | 6. $ 1 + -1 = 2$ | 8. $ 1 + i = \sqrt{2}$ |

De modulus heeft volgende basiseigenschappen:

Eigenschap 1.5.1 (Eigenschappen modulus). Voor complexe getallen $z, z_1, z_2 \in \mathbb{C}$ geldt

- (a) $|z|$ is de afstand van z tot de oorsprong.
- (b) $|z_1 - z_2|$ is de afstand tussen z_1 en z_2 .
- (c) $|z| = |-z|$.
- (d) $|z| = 0 \iff z = 0$.
- (e) $|z_1 \cdot z_2| = |z_1| \cdot |z_2|$.

Bewijs Oefening. ■

LET OP: in het algemeen geldt niet ~~$|z_1 + z_2| = |z_1| + |z_2|$~~ (want bv. $0 = |1 + (-1)| \neq |1| + |-1| = 2$)

1.6 De complex toegevoegde van een complex getal

1.6 De complex toegevoegde van een complex getal

Complexe getallen kan je spiegelen rond de x -as, en dat zal blijken een bijzonder nuttige operatie te zijn, die geen equivalent heeft voor een reëel getal. Terwijl men bij spiegelen door de oorsprong spreekt over het *tegengestelde* $-z$, noemt men de over de x -as gespiegelde het **complex toegevoegde** \bar{z} .

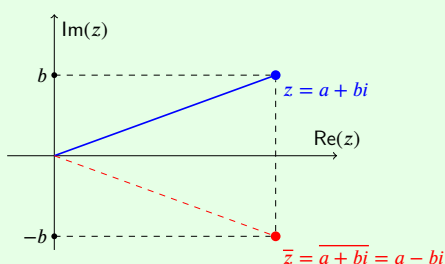
Definitie 1.6.1 (Complex toegevoegde van een complex getal).

De **complex toegevoegde** van een complex getal $z = a + bi$, genoteerd \bar{z} , is het *complexe* getal

$$\bar{z} \stackrel{\text{def}}{=} \overline{a + bi} \stackrel{\text{def}}{=} a - bi$$

$$\overline{3 + 4i} = 3 - 4i.$$

We noemen z en \bar{z} **complex toegevoegd** (aan elkaar), en beide zijn elkaars spiegeling over de x -as.



Voorbeeld 1.6.1.

$$1. \overline{3 - 4i} = 3 + 4i$$

$$3. \overline{-3 - 4i} = -3 + 4i$$

$$5. \bar{i} = -i$$

$$2. \overline{3 + 4i} = 3 - 4i$$

$$4. \overline{-3} = -3$$

$$6. \overline{-i} = i$$

Volgende eigenschap, waarvan het bewijs een oefening is, geeft aan dat complex toevoegen compatibel is met optelling en vermenigvuldiging.

Eigenschap 1.6.1 (Eigenschappen van complex toevoegen). Voor complexe getallen z en w geldt

$$\overline{z + w} = \bar{z} + \bar{w}$$

$$\overline{(2 + 3i) + (4 + 5i)} = 6 - 8i = \overline{2 + 3i} + \overline{4 + 5i}$$

$$\overline{z \cdot w} = \bar{z} \cdot \bar{w}$$

$$\overline{(2 + 3i) \cdot (4 + 5i)} = -7 - 22i = \overline{2 + 3i} \cdot \overline{4 + 5i}$$

Oefening 1.6.1. Bereken voor een complex getal $z = a + bi \in \mathbb{C}$ volgende uitdrukkingen:

$$1. z + \bar{z} = 2a$$

$$2. z - \bar{z} = 2bi$$

$$3. z \cdot \bar{z} = a^2 + b^2$$

Uitwerking:

$$z + \bar{z} = (a + bi) + (a - bi) = 2a$$

Uitwerking:

$$z - \bar{z} = (a + bi) - (a - bi) = 2bi$$

Uitwerking:

$$z \cdot \bar{z} = (a + bi)(a - bi) = a^2 - i^2 b^2 = a^2 + b^2$$

Hiermee zijn volgende eigenschappen aangetoond:

Eigenschap 1.6.2 (Eigenschappen van complex toevoegen). Voor een complex getal $z = a + bi$ geldt

$$\overline{\bar{z}} = \overline{(\bar{z})} = z$$

$$\overline{\overline{(2 + 3i)}} = \overline{2 - 3i} = 2 + 3i$$

$$z + \bar{z} = 2\text{Re}(z)$$

$$2 + 3i + \overline{2 + 3i} = 2 + 3i + 2 - 3i = 4 = 2\text{Re}(2 + 3i)$$

$$z - \bar{z} = 2\text{Im}(z)$$

$$2 + 3i - \overline{2 + 3i} = 2 + 3i - 2 + 3i = 6i = 2i\text{Im}(2 + 3i)$$

1.6 De complex toegevoegde van een complex getal

$$z\bar{z} = |z|^2$$

$$(2 + 3i)(2 - 3i) = 4 - 9i^2 = 4 + 9 = 13 = |2 + 3i|^2$$

Zowel de som als het product van een getal z en zijn complex toegevoegde \bar{z} zijn steeds *reëel*, en dat zal een manier opleveren om het inverse z^{-1} te berekenen, en dus het quotiënt van twee complexe getallen.

1.7 De deling van complexe getallen

1.7 De deling van complexe getallen

Uit de formule $z\bar{z} = |z|^2$ en de bewerking

$$z\bar{z} = |z|^2 \iff \frac{z\bar{z}}{|z|^2} = 1 \iff z \cdot \frac{\bar{z}}{|z|^2} = 1$$

volgt dat $\frac{\bar{z}}{|z|^2}$ de inverse is van z , want hun product is 1.

Eigenschap 1.7.1. Voor een complex getal z geldt

$$z^{-1} = \frac{1}{z} = \frac{\bar{z}}{|z|^2}$$

$$(3 + 4i)^{-1} = \frac{1}{3 + 4i} = \frac{3 - 4i}{25} = \frac{3}{25} - \frac{4}{25}i$$

Hieruit volgt ook onmiddellijk een manier om het quotiënt van twee complexe getallen te berekenen:

Eigenschap 1.7.2. Voor een complexe getal z en w geldt

$$\frac{w}{z} = \frac{w \cdot \bar{z}}{|z|^2}$$

$$\frac{1 + 2i}{3 + 4i} = \frac{(1 + 2i)(3 - 4i)}{25} = \frac{11}{25} + \frac{2}{25}i$$

Voorbeeld 1.7.1. Bereken $\frac{3 + 2i}{1 - 5i} = -\frac{7}{26} + \frac{7}{26}i$.

Uitwerking: De deling van deze twee complexe getallen is opnieuw een complex getal. De deling uitvoeren wil zeggen $\frac{3 + 2i}{1 - 5i}$ schrijven in de vorm $a + bi$. Als we teller en noemer vermenigvuldigen met het complex toegevoegde van de noemer verdwijnt de i in de noemer en krijgen we een complex getal van de vorm $a + bi$:

$$\frac{3 + 2i}{1 - 5i} = \frac{(3 + 2i)(1 + 5i)}{(1 - 5i)(1 + 5i)} = \frac{3 + 15i + 2i + 10i^2}{1 + 5i - 5i - 25i^2} = \frac{-7 + 17i}{26} = -\frac{7}{26} + \frac{17}{26}i$$

Merk op dat dit volledig analoog is met het verdrijven van wortelvormen als $2 + 3\sqrt{2}$ uit de noemer door teller en noemer te vermenigvuldigen met de zogenaamde *toegevoegde tweeterm* $2 - 3\sqrt{2}$.

Oefening 1.7.1. Schrijf volgende uitdrukkingen als een complex getal van de vorm $a + bi$:

1. $\frac{1}{1 + 2i} = \frac{1}{5} - \frac{2}{5}i$

Uitwerking: Vermenigvuldig teller en noemer met $\overline{1 + 2i} = 1 - 2i$, zodat de noemer $(1 - 2i)(1 + 2i) = 5 \in \mathbb{R}$:

$$\frac{1}{1 + 2i} = \frac{1}{1 + 2i} \cdot \frac{1 - 2i}{1 - 2i} = \frac{1 - 2i}{5} = \frac{1}{5} - \frac{2}{5}i$$

2. $\frac{1 + 2i}{3 + 4i} = \frac{11}{25} + \frac{2}{25}i$

Uitwerking: Vermenigvuldig teller en noemer met $\overline{3 + 4i} = 3 - 4i$, zodat de noemer $(3 + 4i)(3 - 4i) = 25 \in \mathbb{R}$:

$$\frac{1 + 2i}{3 + 4i} = \frac{1 + 2i}{3 + 4i} \cdot \frac{3 - 4i}{3 - 4i} = \frac{11 + 2i}{25} = \frac{11}{25} + \frac{2}{25}i$$

3. $\frac{3 + 4i}{1 + 2i} = \frac{11}{5} - \frac{2}{5}i$

Uitwerking: Vermenigvuldig teller en noemer met $\overline{1 + 2i} = 1 - 2i$, zodat de noemer $(1 + 2i)(1 - 2i) = 5 \in \mathbb{R}$:

$$\frac{3 + 4i}{1 + 2i} = \frac{3 + 4i}{1 + 2i} \cdot \frac{1 - 2i}{1 - 2i} = \frac{11 - 2i}{5} = \frac{11}{5} - \frac{2}{5}i$$

1.8 Tweedegraadsvergelijkingen in de complexe getallen

1.8 Tweedegraadsvergelijkingen in de complexe getallen

Wiskundigen zijn dikwijls erg enthousiast over complexe getallen omdat ze de wiskunde vereenvoudigen. Dit lijkt voor sommigen misschien moeilijk te geloven, maar we zullen het proberen aan te tonen door het oplossen van tweedegraadsvergelijkingen opnieuw te bestuderen nu we stilaan vertrouwd raken met de complexe getallen.

In de tweede graad werd reeds gezien hoe je tweedegraadsvergelijkingen oplost:

Opmerking 1.8.1 (Vierkantsvergelijkingen $ax^2 + bx + c = 0$ oplossen in \mathbb{R} .).

Eigenschap 1.8.1.

Een (reële) tweedegraadsvergelijking van de vorm $ax^2 + bx + c$, met $a, b, c \in \mathbb{R}$ en $a \neq 0$ heeft als **discriminant** het (reële) getal $D = b^2 - 4ac$, en heeft als oplossingen

als $D < 0$: geen reële oplossingen

als $D = 0$: precies een reële oplossing, namelijk $x_1 = -\frac{b}{2a}$

als $D > 0$: precies twee reële oplossingen, namelijk $x_1 = \frac{-b + \sqrt{D}}{2a}$ en $x_2 = \frac{-b - \sqrt{D}}{2a}$

Bovendien zijn de volgende uitspraken equivalent:

- (a) x_1 en x_2 zijn oplossingen van de vergelijking $ax^2 + bx + c = 0$
- (b) x_1 en x_2 zijn nulpunten van de functie $f(x) = ax^2 + bx + c$
- (c) x_1 en x_2 zijn snijpunten van de kromme $y = ax^2 + bx + c$ met de x -as
- (d) $ax^2 + bx + c = a(x - x_1)(x - x_2)$ (ontbinden in factoren)
- (e) $x_1 + x_2 = -\frac{b}{a}$ en $x_1 \cdot x_2 = \frac{c}{a}$ (som en product van de wortels)

Een negatieve discriminant stelde in de tweede graad een probleem, want uit negatieve getallen kan je in de reële getallen geen vierkantswortels trekken. Bij complexe getallen verdwijnt dat probleem:

Eigenschap 1.8.2.

Een (reële) tweedegraadsvergelijking van de vorm $ax^2 + bx + c$, met $a, b, c \in \mathbb{R}$ en $a \neq 0$ heeft altijd twee complex toegevoegde oplossingen, namelijk

$$x_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad \text{en} \quad x_2 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

die echter samenvallen als $b^2 - 4ac = 0$, en dan gelijk worden aan $x_1 = x_2 = -\frac{b}{2a}$.

Het begrip discriminant wordt dus in zekere zin overbodig (of minstens veel minder belangrijk).

Voorbeeld 1.8.1.

- De wortels van de vergelijking $x^2 + 4 = 0$ zijn $x_1 = 2i$ en $x_2 = -2i$.
- De wortels van de vergelijking $x^2 + x + 1 = 0$ zijn $x_{1,2} = \frac{-1 \pm i\sqrt{3}}{2}$

Oefening 1.8.1. Bereken de wortels van volgende vergelijkingen.

- $x^2 + 2x + 3 = 0$

1.8 Tweedegraadsvergelijkingen in de complexe getallen

2. $2x^2 + 3x + 4 = 0$

Oefening 1.8.2. Ontbind volgende veeltermen in lineaire factoren.

1. $x^2 + 2x + 3$

2. $2x^2 + 3x + 4$



WISKUNDE.OPMAAT.ORG

HOOFDSTUK 2

GONIOMETRISCHE VOORSTELLING

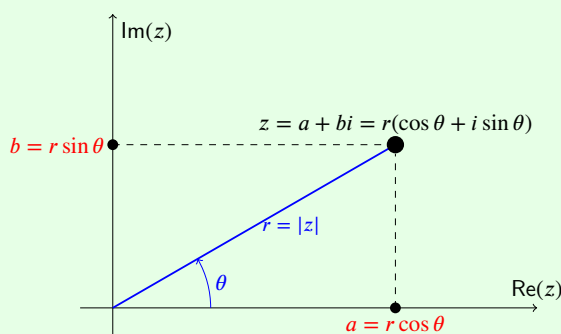
2.1 De polaire schrijfwijze van complexe getallen

2.1 De polaire schrijfwijze van complexe getallen

In het vorig hoofdstuk werd een punt in het complexe vlak beschreven met behulp van carthesische coördinaten. In dit hoofdstuk wordt een alternatieve manier behandeld om punten in het complexe vlak te beschrijven. Hiermee zullen verschillende operaties van complexe getallen, waaronder de vermenigvuldiging, veel eenvoudiger en inzichtelijker worden.

De carthesische schrijfwijze associeert met een elk complex getal $z = a + bi$ het koppel (a, b) . Het reële deel a komt overeen met de projectie op de reële as, het imaginair deel b komt overeen met de projectie op de imaginaire as. De polaire vorm associeert met elk complex getal in het vlak een koppel poolcoördinaten (r, θ) . Hierbij is $r = |z|$ de norm (afstand tot de oorsprong) en θ de hoek die de overeenkomstige vector maakt met de positieve reële as. Op die manier wordt elk complex getal beschreven met een uniek koppel poolcoördinaten.

Definitie 2.1.1. De *poolcoördinaten* van een complex getal zijn het koppel (r, θ) , hierbij is $r = |z|$ de **modulus** en θ het **argument**. De hoek θ wordt gemeten in radialen, in tegenwijzerzin, en is slechts op een veelvoud van 2π na bepaald.



Op die manier krijgt elk complexe getal een polaire schrijfwijze $z = r(\cos \theta + i \sin \theta)$

Men kan een complexe getal in carthesische schrijfwijze $z = a + bi$ omvormen naar polaire vorm $z = r(\cos \theta + i \sin \theta)$ en vice versa. Het zal blijken dat sommige berekeningen veel eenvoudiger zijn in één van beide schrijfwijzes. De stelling van pythagoras en de goniometrische getallen leggen het verband tussen de carthesische en polaire schrijfwijze.

Eigenschap 2.1.1 (Transformatieformules cartesische en goniometrische schrijfwijze).

Een complex getal z met goniometrische schrijfwijze $r(\cos \theta + i \sin \theta)$ heeft als cartesische schrijfwijze $a + bi$ met:

$$a = r \cos \theta$$

$$b = r \sin \theta$$

Een complex getal z met cartesische schrijfwijze $a + bi$ heeft als goniometrische schrijfwijze $r(\cos \theta + i \sin \theta)$ met:

$$r = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\cos \theta = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

$$\sin \theta = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

2.1 De polaire schrijfwijze van complexe getallen

Opmerking 2.1.1.

- Omdat θ niet uniek bepaald is, heeft elk complex getal $z = r(\cos \theta + i \sin \theta)$ *oneindig veel goniometrische schrijfwijzes* $z = r(\cos(\theta + k2\pi) + i \sin(\theta + k2\pi))$, met $k \in \mathbb{Z}$. Vaak wordt er echter voor gekozen om θ tussen 0 en 2π te geven: we kunnen ons sneller voorstellen waar de hoek $\frac{5\pi}{4}$ ligt dan de hoek $\frac{1093\pi}{4}$.
- Twee complexe getallen in goniometrische schrijfwijze zijn gelijk aan elkaar als ze dezelfde modulus hebben, en hun argument gelijk is op een veelvoud van 2π na.

Oefening 2.1.1.

Geef de goniometrische schrijfwijze van volgende complexe getallen waarvan het argument gemakkelijk grafisch gevonden kan worden:

1. $z = 1$

Uitwerking: Voor $z = 1$ is de modulus 1 en het argument 0, dus de goniometrische schrijfwijze is

$$z = \cos 0 + i \sin 0 \text{ of } z = \cos 2\pi + i \sin 2\pi.$$

2. $z = i$

Uitwerking: Voor $z = i$ is de modulus 1 en het argument $\frac{\pi}{2}$, dus de goniometrische schrijfwijze is

$$z = \cos \frac{\pi}{2} + i \sin \frac{\pi}{2}.$$

3. $z = 1 + i$

Uitwerking: Voor $z = 1 + i$ is de modulus $\sqrt{2}$ en het argument $\frac{\pi}{4}$, dus de goniometrische schrijfwijze is

$$z = \sqrt{2}(\cos \frac{\pi}{4} + i \sin \frac{\pi}{4}).$$

4. $z = \frac{\sqrt{2}}{2} + i \frac{\sqrt{2}}{2}$

Uitwerking: Voor $z = \frac{\sqrt{2}}{2} + i \frac{\sqrt{2}}{2}$ is de modulus 1 en het argument $\frac{\pi}{4}$, dus de goniometrische schrijfwijze is

$$z = \cos \frac{\pi}{4} + i \sin \frac{\pi}{4}.$$

Merk op: bij het opschrijven van de goniometrische schrijfwijze met concrete getallen moet je de sin en cos laten staan. Als je die toch zou uitrekenen, krijg je immers terug de cartesische schrijfwijze.

Opmerking 2.1.2.

Als $a \neq 0$ kunnen we de tweede vergelijking delen door de eerste (waardoor de vierkantswortel wegvalt) en krijgen we

$$\tan \theta = \frac{b}{a} \quad \text{als } a \neq 0$$

2.1 De polaire schrijfwijze van complexe getallen

Als $a > 0$ dan is θ een hoek in het 1ste of het 4de kwadrant en is dus per definitie van de boogtangens

$$\theta = \text{bgtan}\left(\frac{b}{a}\right) \quad \text{als } a > 0$$

Als $a < 0$ dan is θ een hoek in het 2de of het 3de kwadrant en dan geldt

$$\theta = \text{bgtan}\left(\frac{b}{a}\right) + \pi \quad \text{als } a < 0$$

Als $a = 0$, dan ligt $z = a + bi$ op de y -as en geldt

$$\theta = \frac{\pi}{2} \quad \text{als } a = 0, b > 0$$

$$\theta = -\frac{\pi}{2} \quad \text{als } a = 0, b < 0$$

Samengevat geeft dit voor θ :

$$\theta = \begin{cases} \text{bgtan}\frac{b}{a} & \text{als } a > 0 \\ \pi + \text{bgtan}\frac{b}{a} & \text{als } a < 0 \\ \frac{\pi}{2} & \text{als } a = 0, b > 0 \\ -\frac{\pi}{2} & \text{als } a = 0, b < 0 \end{cases}$$

2.2 De vermenigvuldiging in polaire vorm

2.2 De vermenigvuldiging in polaire vorm

Het optellen van complexe getallen is erg eenvoudig in de cartesische schrijfwijze, het correspondeert immers met het optellen van vectoren. Bij de vermenigvuldigen van complexe getallen is de polaire schrijfwijze erg eenvoudig, ook deze bewerking correspondeert met een meetkundige operatie in het complexe vlak. Zij $z_1 = r_1(\cos \theta_1 + i \sin \theta_1)$ en $z_2 = r_2(\cos \theta_2 + i \sin \theta_2)$ complexe getallen. Met behulp van de som- en verschilformules van goniometrische getallen levert een rechtstreekse berekening:

$$\begin{aligned} z_1 \cdot z_2 &= r_1(\cos \theta_1 + i \sin \theta_1) \cdot r_2(\cos \theta_2 + i \sin \theta_2) \\ &= r_1 r_2 (\cos \theta_1 \cos \theta_2 - \sin \theta_1 \sin \theta_2 + i(\sin \theta_1 \cos \theta_2 + \cos \theta_1 \sin \theta_2)) \\ &= r_1 r_2 (\cos(\theta_1 + \theta_2) + i \sin(\theta_1 + \theta_2)), \end{aligned}$$

De moduli r_i worden vermenigvuldigd, en de argumenten θ_i worden opgeteld.

Eigenschap 2.2.1 (Vermenigvuldiging van twee complexe getallen in goniometrische schrijfwijze).

De *modulus* van het product van twee complexe getallen is het *product van de moduli* van die getallen.

Het *argument* van het product van twee complexe getallen is de *som van de argumenten* van die getallen.

Voor $z_1 = r_1(\cos \theta_1 + i \sin \theta_1)$ en $z_2 = r_2(\cos \theta_2 + i \sin \theta_2)$ wordt het product gegeven door

$$z_1 \cdot z_2 = r_1 r_2 (\cos(\theta_1 + \theta_2) + i \sin(\theta_1 + \theta_2))$$

Oefening 2.2.1. Gegeven zijn de complexe getallen:

$$\begin{aligned} z_1 &= 2 \left(\cos \frac{5\pi}{12} + i \sin \frac{5\pi}{12} \right), \\ z_2 &= 3 \left(\cos \frac{5\pi}{6} + i \sin \frac{5\pi}{6} \right), \end{aligned}$$

Bereken algebraïsch de volgende complexe getallen en geef het resultaat in cartesische en polaire vorm.

1. $z_1 \cdot z_2$
2. $(z_1)^2$
3. $\frac{z_2}{z_1}$

2.3 Machten van complexe getallen: formule van De Moivre

2.3 Machten van complexe getallen: formule van De Moivre

De n -de macht van een complexe getal z^n is het n -voudig product $z \cdot z \cdot z \cdot \dots \cdot z$. (n -keer invoegen). Met de vermenigvuldiging van complexe getallen kan dit n -voudig product uitgerekend worden. Ook hier zijn de berekeningen met de goniometrische schrijfwijze veel eenvoudiger.

Het meest eenvoudige geval $n = 2$ is het kwadraat z^2 van een complex getal. Dit is de vermenigvuldiging van het complex getal met zichzelf. Voor een complex getal z met als goniometrische schrijfwijze $r(\cos \theta + i \sin \theta)$ wordt dit:

$$z^2 = z \cdot z = r(\cos \theta + i \sin \theta) \cdot r(\cos \theta + i \sin \theta) = r^2(\cos(\theta + \theta) + i \sin(\theta + \theta)) = r^2(\cos 2\theta + i \sin 2\theta).$$

Het herhalen van deze methode levert dan hogere machten van een complex getal. $z^3 = z^2 \cdot z$. Het algemene resultaat staat bekend als de formule van DeMoivre:

Eigenschap 2.3.1 (Formule van De Moivre).

Voor een complex getal $z = r(\cos \theta + i \sin \theta)$ en elk natuurlijk getal n geldt

$$z^n = r^n(\cos n\theta + i \sin n\theta)$$

Voorbeeld 2.3.1. We kunnen $(1 + i)^8$ op 2 manieren berekenen:

(a) $(1+i)(1+i) = 1+2i-1 = 2i$, dus $(1+i)(1+i)(1+i)(1+i) = (2i)^2 = -4$, dus $(1+i)^8 = (-4)^2 = 16$

(b) $1 + i = \sqrt{2}(\cos \frac{\pi}{4} + i \sin \frac{\pi}{4})$, dus $(1 + i)^8 = (\sqrt{2})^8(\cos \frac{8\pi}{4} + i \sin \frac{8\pi}{4}) = 2^4(\cos 2\pi + i \sin 2\pi) = 16(1 + i \cdot 0) = 16$

Oefening 2.3.1. Bereken met de formule van De Moivre

1. $(\sqrt{3} + i)^3 = 8i$

2. $(-1 - i)^{20} = -1024$

3. $(1 + i)^{21} = -1024 - 1024i$

4. $(-\sqrt{3} + i)^5 = 16\sqrt{3} + 16i$

Oefening 2.3.2. Gegeven is het complex getal $z = \cos(\frac{3\pi}{4} + i \sin(\frac{3\pi}{4}))$.

1. Bereken $z^0, z^1, z^2, z^3, \dots, z^8$ en schrijf telkens het resultaat in cartesische vorm.

2. Stel de opeenvolgende machten van z voor in het complexe vlak. Wat valt je op?

2.4 Wortels van complexe getallen

2.4 Wortels van complexe getallen

Het begrip n -de machtswortel van de reële getallen kan op het eerste zicht ook eenvoudig worden gebruikt bij complexe getallen. Er treden echter enkele nieuwe fenomenen op.

Definitie 2.4.1.

Voor elk natuurlijk getal $n \in \mathbb{N}_0$ en complex getal $w \in \mathbb{C}$ is een complex getal $z \in \mathbb{C}$ een **n -de machtswortel van w** als de n -de macht van z gelijk is aan w :

$$z \text{ is een } n\text{-de machtswortel van } w \iff z^n = w$$

$$2^4 = (-2)^4 = 16, \quad (-2i)^3 = 8i$$

Voorbeeld 2.4.1. Welke van volgende uitspraken zijn waar?

1. Juist ✓ 3 is een derdermactswortel van 27
2. Fout ✓ -3 is een derdermactswortel van 27
3. Juist ✓ i is een vierkantswortel van -1
4. Fout ✓ $2 + 3i$ is een vierkantswortel van $4 + 9i$
5. Juist ✓ $2 + 3i$ is een vierkantswortel van $-5 + 12i$

Opmerking 2.4.1.

- Net zoals bij de reële getallen is het begrip n -de machtswortel van a dus eigenlijk gewoon een naam voor een oplossing van de vergelijking $x^n = a$.
- Bij de reële getallen was er een belangrijk onderscheid tussen n even en n oneven omdat negatieve getallen geen even machtswortels hebben, en positieve getallen twee even machtswortels hebben:

$$\begin{array}{ll} x^2 = 4 & \text{heeft twee reële oplossingen: } x = 2 \text{ en } x = -2 \\ x^2 = -4 & \text{heeft geen reële oplossingen: } x^2 \neq -4, \forall x \in \mathbb{R} \\ x^3 = 8 & \text{heeft een unieke reële oplossing: } x = 2 \\ x^3 = -8 & \text{heeft een unieke reële oplossing: } x = -2 \end{array}$$

Er zijn altijd ten hoogste twee reële n -de machtswortels, en als $a \in \mathbb{R}$ twee n -de machtswortel had noemden we de unieke positieve **de** n -de machtswortel, en noteerden die met $\sqrt[n]{a}$ of $a^{1/n}$. Voor n even was dan ook $-\sqrt[n]{a}$ een n -de machtswortel.

- Bij complexe getallen is de zaak enerzijds eenvoudiger: we zullen zien dat er *altijd* precies n n -de machtswortels zijn. Anderzijds is het niet meer mogelijk om over **de** n -de machtswortel te spreken. We zullen dan ook de notatie $\sqrt[n]{z}$ of $z^{1/n}$ niet gebruiken.

Vergelijkingen van de vorm $z^n = a + bi$ met $z \in \mathbb{C}, n \in \mathbb{Z}$ zijn met de formule van De Moivre op te lossen.

Voorbeeld 2.4.2. Bereken alle vierkantswortels van $1 - i$.

Uitwerking: We schrijven eerst beide leden van de opgave in de goniometrische schrijfwijze.

2.4 Wortels van complexe getallen

De onbekende z schrijven we als $z = r(\cos \theta + i \sin \theta)$. Het linkerlid van de vergelijking wordt dan volgens de formule van De Moivre

$$z^2 = r^2(\cos 2\theta + i \sin 2\theta).$$

Voor het rechterlid $1 - i$ geldt

$$|1 - i| = \sqrt{2}, \quad \arg(1 - i) = -\frac{\pi}{4},$$

zodat

$$1 - i = \sqrt{2}(\cos(-\frac{\pi}{4}) + i \sin(-\frac{\pi}{4})).$$

De vergelijking $z^2 = 1 - i$ in de onbekende z wordt zo een vergelijking in de onbekenden r en θ :

$$r^2(\cos 2\theta + i \sin 2\theta) = \sqrt{2}(\cos(-\frac{\pi}{4}) + i \sin(-\frac{\pi}{4})).$$

Twee complexe getallen in goniometrische schrijfwijze zijn gelijk aan elkaar als ze dezelfde modulus hebben, en hun argument gelijk is op een veelvoud van 2π na. Hieruit volgt:

$$r^2 = \sqrt{2} \quad \text{met} \quad r \in \mathbb{R}^+ \quad \text{en} \quad 2\theta = -\frac{\pi}{4} + 2k\pi \quad \text{met} \quad k \in \mathbb{Z}$$

Dus $r = 2^{1/4}$ en $\theta = -\frac{\pi}{8} + k\pi$, $k \in \mathbb{Z}$. We hebben de onbekenden r en θ dus gevonden.

Voor $k = 0$ is $\theta = -\frac{\pi}{8}$ en voor $k = 1$ is $\theta = -\frac{\pi}{8} + \pi = \frac{7\pi}{8}$. Voor alle andere waarden van k krijgen we één van beide hoeken op een veelvoud van 2π na. Er zijn dus precies twee verschillende oplossingen

$$z_1 = 2^{1/4} \left(\cos\left(-\frac{\pi}{8}\right) + i \sin\left(-\frac{\pi}{8}\right) \right) \quad \text{en} \quad z_2 = 2^{1/4} \left(\cos\left(\frac{7\pi}{8}\right) + i \sin\left(\frac{7\pi}{8}\right) \right)$$

Voorbeeld 2.4.3. Vind alle vierdemachtswortels uit 1.

Uitwerking: We zoeken alle oplossingen van de vergelijking $z^4 = 1$.

We stellen $z = r(\cos \theta + i \sin \theta)$. Het linkerlid van de vergelijking wordt dan volgens de formule van De Moivre

$$r^4(\cos 4\theta + i \sin 4\theta).$$

Voor het rechterlid 1 geldt

$$|1| = 1, \quad \arg(1) = 0,$$

zodat

$$1 = 1(\cos 0 + i \sin 0).$$

De vergelijking $z^4 = 1$ in de onbekende z wordt zo een vergelijking in de onbekenden r en θ :

$$r^4(\cos 4\theta + i \sin 4\theta) = 1(\cos 0 + i \sin 0)$$

Gelijkheid van complexe getallen leert ons dat

$$r^4 = 1 \quad \text{met} \quad r \in \mathbb{R}^+ \quad \text{en} \quad 4\theta = 0 + 2k\pi \quad \text{met} \quad k \in \mathbb{Z}.$$

Dus $r = 1$, want $r^4 = 1$ heeft slechts 1 reële oplossing, en $\theta = k\pi/2$ met $k \in \mathbb{Z}$.

Dit levert vier verschillende wortels.

$$z_1 = 1(\cos 0 + i \sin 0) = 1,$$

$$z_2 = 1(\cos \pi/2 + i \sin \pi/2) = i,$$

$$z_3 = 1(\cos \pi + i \sin \pi) = -1,$$

$$z_4 = 1(\cos 3\pi/2 + i \sin 3\pi/2) = -i.$$

Dit voorbeeld kan je veel sneller oplossen door $z^4 - 1$ te ontbinden in factoren:

$$z^4 - 1 = (z^2 - 1)(z^2 + 1)$$

De nulpunten hiervan zijn inderdaad 1, -1, i, -i. Ontbinden in factoren lukt echter niet meer bij bijvoorbeeld $z^5 = 1$, hiervoor moet je bovenstaande methode gebruiken.

2.4 Wortels van complexe getallen

Oefening 2.4.1. Bereken alle derdemachtswortels van $8i$.

Uitwerking: We schrijven eerst beide leden van de opgave in de goniometrische schrijfwijze.

De onbekende z schrijven we als $z = r(\cos \theta + i \sin \theta)$. Het linkerlid van de vergelijking wordt dan volgens de formule van De Moivre

$$z^3 = r^3(\cos 3\theta + i \sin 3\theta).$$

Voor het rechterlid $8i$ geldt

$$|8i| = 8, \quad \arg(8i) = \frac{\pi}{2},$$

zodat

$$8i = 8(\cos(\frac{\pi}{2}) + i \sin(\frac{\pi}{2})).$$

De vergelijking $z^3 = 8i$ wordt:

$$r^3(\cos 3\theta + i \sin 3\theta) = 8(\cos(\frac{\pi}{2}) + i \sin(\frac{\pi}{2})).$$

Twee complexe getallen in goniometrische schrijfwijze zijn gelijk aan elkaar als ze dezelfde modulus hebben, en hun argument gelijk is op een veelvoud van 2π na. Hieruit volgt:

$$r^3 = 8 \quad \text{met} \quad r \in \mathbb{R}^+ \quad \text{en} \quad 3\theta = \frac{\pi}{2} + 2k\pi \quad \text{met} \quad k \in \mathbb{Z}$$

Dus $r = 2$, want $r^3 = 8$ heeft slechts 1 reële oplossing, en $\theta = \frac{\pi}{6} + k\frac{2\pi}{3}$, $k \in \mathbb{Z}$.

Voor $k = 0$ is $\theta = \frac{\pi}{6}$, voor $k = 1$ is $\theta = \frac{\pi}{6} + \frac{2\pi}{3} = \frac{5\pi}{6}$ en voor $k = 2$ is $\theta = \frac{\pi}{6} + \frac{4\pi}{3} = \frac{9\pi}{6} = \frac{3\pi}{2}$. Voor alle andere waarden van k krijgen we één van deze hoeken op een veelvoud van 2π na. Er zijn dus drie verschillende oplossingen

$$z_1 = 2(\cos(\frac{\pi}{6}) + i \sin(\frac{\pi}{6})) = 2(\frac{\sqrt{3}}{2} + i\frac{1}{2}) = \sqrt{3} + i,$$

$$z_2 = 2(\cos(\frac{5\pi}{6}) + i \sin(\frac{5\pi}{6})) = 2(-\frac{\sqrt{3}}{2} + i\frac{1}{2}) = -\sqrt{3} + i,$$

$$z_3 = 2(\cos(\frac{3\pi}{2}) + i \sin(\frac{3\pi}{2})) = 2(0 + i(-1)) = -2i.$$

Je kan de vergelijking $z^n = w$ oplossen voor een algemeen getal $w \in \mathbb{C}$, en dan krijg je formules die je daarna kan gebruiken. Het resultaat geeft volgende interessante eigenschap: de vergelijking $z^n = w$ heeft voor elke $w \in \mathbb{C}_0$ precies n oplossingen:

Eigenschap 2.4.1. Voor elke $n \in \mathbb{N}_0$ en $w = r(\cos \theta + i \sin \theta) \in \mathbb{C}_0$ heeft de vergelijking $z^n = w$ precies n verschillende complexe oplossingen

$$z_k = \sqrt[n]{r} \left(\cos \left(\frac{\theta + 2\pi k}{n} \right) + i \sin \left(\frac{\theta + 2\pi k}{n} \right) \right), \quad \text{met } k \in \{0, 1, 2, \dots, n-1\}$$

Bewijs TODO ? ■

Liefhebbers van de Euler notatie kunnen veel eenvoudiger schrijven

$$z_k = \sqrt[n]{r} e^{i \frac{\theta + 2\pi k}{n}} \quad \text{met } k \in \{0, 1, 2, \dots, n-1\}$$