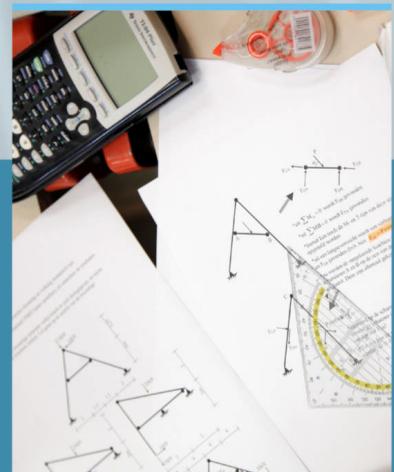


KU LEUVEN

MASSIVE OPEN ONLINE COURSE

BASISWISKUNDE VOOR (STARTENDE) STUDENTEN

www.iiw.kuleuven.be/mooc-wiskunde



Inhoudsopgave

Module 1. Elementaire rekenvaardigheden A.	6
1 Wiskundige notaties	6
2 Bewerkingen	6
2.1 Volgorde van bewerkingen	6
2.2 Volgorde van bewerkingen - voorbeeld 1	6
2.3 Volgorde van bewerkingen - voorbeeld 2	6
2.4 Rekenen met machten of exponenten	6
2.5 Werken met haakjes	6
2.6 Begrippen tegengestelde en omgekeerde van een getal	7
2.7 Rekenen met wortels	7
2.8 Rekenen met breuken	7
2.9 Rekenen met logaritmen	8
2.10 Algebra: het rekenen met letters	8
2.11 Evenredigheden en de regel van drie	14
2.12 Rekenen met percentages en promillages	16
3 Ontbinden in factoren	17
Module 2. Elementaire rekenvaardigheden B	18
1 Functies	18
1.1 Reële functies	18
1.2 Voorbeelden	21
1.3 Verloop van functies	23
1.4 Eerste- en tweedegraadsfuncties	28
1.5 Tweedegraadsvergelijking - voorbeeld 1	33
1.6 Tweedegraadsvergelijking - voorbeeld 2	33
1.7 Veeltermfuncties	34
1.8 Rationale functies	39
1.9 Irrationale functies	43
1.10 Exponentiële functies	49
1.11 Logaritmische functies	54
1.12 Goniometrische functies	60

1.13	Cyclometrische functies	63
1.14	Bijzondere functies	66
1.15	Verschuiven en herschalen	67
1.16	Coördinatenstelsels	69
2	Limieten	73
2.1	Het begrip limiet	73
2.2	Intuïtieve uitleg limieten	75
2.3	Limieten en continuïteit	75
2.4	Voorbeelden	77
2.5	Limieten - voorbeeld	80
2.6	Limieten van functies (en asymptoten)	80
2.7	Epsilon delta definitie voor limieten	83
2.8	Linkerlimiet en rechterlimiet	84
2.9	Rekenregels	84
2.10	Berekenen van limieten	85
2.11	Schijnbare onbepaaldheden	88
Module 3. Goniometrie & complexe getallen.		94
1	Goniometrie	94
2	Complexe getallen	94
	Inleiding	94
2.1	De imaginaire eenheid	94
2.2	Het complex getal	95
2.3	Rekenen met complexe getallen	96
2.4	Rekenen met complexe getallen - voorbeeld	99
2.5	Goniometrische vorm van een complex getal	99
2.6	De exponentiële vorm van een complex getal	102
2.7	Bewerkingen in exponentiële vorm: som, product en quotiënt	104
2.8	Bewerkingen in exponentiële vorm: machtsverheffing en worteltrekking .	108
2.9	Toepassing: fasoren	110
2.10	Test complexe getallen	112

Module 4. Oppervlakteberekeningen, inhoudsberekeningen en analytische meetkunde. 113

1	Oppervlakte- en inhoudsberekeningen	113
1.1	Omtrek, oppervlakte en volume	113
1.2	Vlakke figuren	114
1.3	Ruimtefiguren	114
1.4	Omwentelingslichamen	120
1.5	Test oppervlakte en inhoudsberekeningen	122
2	Analytische meetkunde	122
2.1	Abscis van een punt op een geijkte rechte	122
2.2	Reëel getal - voorbeeld	125
2.3	Euclidische coördinaten in het vlak	125
2.4	Afstand tussen twee punten in het vlak	128
2.5	Afstand tussen twee punten - voorbeeld	132
2.6	Vergelijking van een rechte	132
2.7	Vergelijking rechte - voorbeeld	134
2.8	Vergelijking rechte met richting en door gegeven punt - extra voorbeelden	134
2.9	Vergelijking rechte met richting en door gegeven punt - extra voorbeelden	135
2.10	Onderlinge ligging van twee rechten	137
2.11	Onderlinge ligging van twee rechten - voorbeeld 1	141
2.12	Onderlinge ligging van twee rechten - voorbeeld 2	141
2.13	Onderlinge ligging van twee rechten - voorbeeld 3	141
2.14	Afstand van een punt tot een rechte	141
2.15	Vergelijking van een cirkel in het vlak	144
2.16	Vergelijking van een cirkel in het vlak - voorbeeld	148
2.17	Test analytische meetkunde	148

Module 5. Vergelijkingen, Ongelijkheden, Stelsels en Matrices 149

1	Vergelijkingen, ongelijkheden en stelsels	149
1.1	Definities	151
1.2	Eerstegraadsvergelijkingen	152
1.3	Oplossen van tweedegraadsvergelijkingen	155
1.4	Hogeregraadsvergelijkingen	161
1.5	Enkele nuttige weetjes over veeltermvergelijkingen in het algemeen	161
1.6	Stelsels van vergelijkingen	164

1.7	Ongelijkheden	168
2	Matrices	171
2.1	Definities	175
2.2	Bewerkingen met matrices	177
2.3	Determinant	180
2.4	Inverse van een matrix	185
2.5	De rang van een matrix	187
2.6	Elementaire omvormingen van een matrix	190
2.7	Praktische berekening van de inverse van een matrix	192
2.8	Methode van Gauss voor het oplossen van een stelsel van vergelijkingen .	195
2.9	De regel van Cramer	200
Module 6. Afgeleiden en integralen		203
1	Afgeleiden	203
1.1	Inleidend voorbeeld	203
1.2	Algemeenheden	203
1.3	Afgeleide raaklijn	205
1.4	Afgeleiden van veeltermfuncties	205
1.5	Afgeleiden van veeltermfuncties - voorbeeld	206
1.6	Basisafgeleiden en rekenregels	207
1.7	Basisafgeleiden en rekenregels - voorbeeld	207
1.8	Enkele oefeningen	207
1.9	Afgeleide en verloop van een functie	210
1.10	Test afgeleiden	212
2	Integralen	212
2.1	Inleidend voorbeeld	212
2.2	Primitieve functies en onbepaalde integralen	213
2.3	Stelling van Newton Leibniz	214
2.4	Bijzondere onbepaalde integralen	214
2.5	Eenvoudige rekenregels	215
2.6	Eenvoudige rekenregels - voorbeeld	217
2.7	De bepaalde integraal	217
2.8	De bepaalde integraal - voorbeeld	218
2.9	Berekenen van bepaalde integralen	218
2.10	Oppervlakte berekenen met bepaalde integralen - voorbeeld	220



2.11	Oppervlakte berekenen met bepaalde integralen	220
2.12	Test integralen	223
3	Substitutie en partiële integratie	223
3.1	Onbepaalde integraal en de kettingregel voor het afleiden	223
3.2	Differentialen en de substitutiemethode	223
3.3	Differentialen en de substitutiemethode - voorbeeld	225
3.4	Voorbeelden van de substitutiemethode	225
3.5	Substitutie bij bepaalde integralen	226
3.6	Substitutie bij bepaalde integralen - voorbeeld	226
3.7	Oefeningen op de substitutiemethode	226
3.8	Test integraalrekening - substitutiemethode	228
3.9	Onbepaalde integralen en de productregel voor het afleiden	228
3.10	Methode van partiële integratie	228
3.11	Methode van partiële integratie - voorbeeld 1	229
3.12	Methode van partiële integratie - voorbeeld 2	229
3.13	Voorbeelden	229
3.14	Oefeningen	232
3.15	Partiële integratie bij bepaalde integralen	233
3.16	Test integraalrekening - partiële integratie	234
Oplossingen van de oefeningen zonder *		235
Oplossingen van alle oefeningen		236

Module 1

Elementaire rekenvaardigheden A

0 Intro

1 Wiskundige notaties

TODO

2 Bewerkingen

2.1 Volgorde van bewerkingen

TODO

2.2 Volgorde van bewerkingen - voorbeeld 1

Zie filmpje MOOC.

2.3 Volgorde van bewerkingen - voorbeeld 2

Zie filmpje MOOC.

2.4 Rekenen met machten of exponenten

TODO

2.5 Werken met haakjes

TODO

2.6 Begrippen tegengestelde en omgekeerde van een getal

Tegengestelde

Het *tegengestelde* van een getal n is het getal dat opgeteld bij n , nul oplevert. Het tegengestelde van n wordt genoteerd met $-n$. Het tegengestelde van een getal heeft dus dezelfde absolute waarde als het gegeven getal maar met een tegengesteld teken. De som van een getal met zijn tegengestelde is dus steeds 0: $n + (-n) = 0$.

Zo is het tegengestelde van 12 gelijk aan -12 omdat $12 + (-12) = 0$, en het tegengestelde van $-\sqrt{3}$ is $\sqrt{3}$ omdat $-\sqrt{3} + \sqrt{3} = 0$.

Het tegengestelde van nul is nul. Dit is het enige getal waarvan het tegengestelde gelijk is aan zichzelf.

We zeggen dat 0 het *neutraal element* is met betrekking tot optellen.

(In de abstracte algebra is het tegengestelde het inverse element voor een bewerking die met een plusteken genoteerd wordt).

Omgekeerde

Het *omgekeerde* of de *reciproque* (vaker: de reciproke) van een getal of grootheid is 1 gedeeld door dat getal of die grootheid. Het omgekeerde van een breuk ontstaat door teller en noemer te verwisselen. Het omgekeerde van 7 is $1/7$ en het omgekeerde van $2/3$ is $3/2$. Passen we dit toe op enkele grootheden: de hertz is het omgekeerde van de seconde: $1 \text{ Hz} = 1/\text{s}$ en de siemens is het omgekeerde van de ohm: $1 \text{ S} = 1/\Omega$.

Het product van een getal met zijn omgekeerde levert 1 op: $n \cdot \frac{1}{n} = 1$.

We zeggen dat 1 het *neutraal element* is voor de vermenigvuldiging. We zien ook dat nul geen omgekeerde heeft.

(In de abstracte algebra is het omgekeerde het inverse element voor een bewerking die met een vermenigvuldigsteken genoteerd wordt).

Een interessante toepassing van het omgekeerde vinden we bij de deling waarbij de deler een breuk is. De deling kan dan ook uitgevoerd worden door het deeltal te vermenigvuldigen met het omgekeerde van de deler.

Populair gezegd: delen door een breuk is vermenigvuldigen met het omgekeerde.

Voorbeeld: $5 : 1/3 = 5 \times 3 = 15$

2.7 Rekenen met wortels

TODO

2.8 Rekenen met breuken

TODO

2.9 Rekenen met logaritmen

TODO

2.10 Algebra: het rekenen met letters

Gebruik van letters in de wiskunde

De algebra is de kunst van het rekenen met letters. Die letters stellen meestal getallen voor, en met getallen weet je hoe je kan rekenen: optellen, aftrekken, vermenigvuldigen en delen. Bij algebra voeren we dat soort operaties ook uit, alleen gebruiken we daarbij niet alleen getallen, maar ook *variabelen*. Dat zijn als het ware 'dingen' waarvan we de waarde (nog) niet kennen of waarbij zo'n 'ding' meerdere waarden kan aannemen. Voor de variabelen gebruiken we letters.

In de algebra worden vervolgens allerlei verbanden en structuren onderzocht. Welke regels en eigenschappen gelden er, wat mag wel en wat mag niet? Verzamelingen spelen hierbij een grote rol, maar ook afbeeldingen. Door gebruik te maken van variabelen, vergelijkingen, en dergelijke meer is het mogelijk 'algemene' uitspraken te doen over verzamelingen en operaties. Bekende eigenschappen van rekenen met getallen zijn de commutatieve eigenschap en de distributieve eigenschap.

Voorbeeld: In het algemeen geldt voor het optellen en vermenigvuldigen van a en b (natuurlijke getallen) dat:

$$a + b = b + a \text{ en } a \times b = b \times a$$

Dat lijkt vanzelfsprekend, maar dat is het niet. Bij de operatie delen geldt het bijvoorbeeld niet! ($12 : 4$ is niet hetzelfde als $4 : 12$)

Een andere bekende eigenschap is de distributiviteit:

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

Dat gebruiken we heel vaak, maar mag dat zomaar, wanneer wel, wanneer niet?

Geldt dit bijvoorbeeld?

$$a + (b \times c) = (a + b) \times (a + c) ???$$

Met variabelen kunnen we ook *formules* opstellen. Stel dat we de straal van een cirkel voorstellen door de letter r . Dan is de omtrek $= 2\pi r$ en de oppervlakte $= \pi r^2$. Nu kunnen we voor eender welke cirkel zijn omtrek en oppervlakte berekenen door de waarde van r te vervangen (we zeggen te *substitueren*) door een getal.

Een *uitdrukking* is een geheel van termen bestaande uit getallen, variabelen, bewerkingstekens (zoals $+$, $-$, \times , $:$) en andere wiskundige tekens (zoals haakjes): $2\pi r$, $3 - 8$, $2x + 5$, ...

Vervolgens kunnen we twee uitdrukkingen aan elkaar gelijk stellen. We spreken dan van een *vergelijking*. Vergelijkingen kunnen vaak worden afgeleid uit een stukje tekst (de klassieke

vraagstukjes). Als een vergelijking een variabele bevat, dan kunnen we trachten de waarde (of alle waarden) van de variabele te vinden waardoor er een ware bewering ontstaat als we de variabele vervangen door de gevonden waarde(n). Dit wordt *oplossen van de vergelijking* genoemd. De waarde van de variabele heet in dit geval *de wortel* of *de oplossing* van de vergelijking.

Een formule kan (en mag) meerdere variabelen en onbekenden bevatten.

Voorbeeld 1:

De oppervlakte van een rechthoek is $b \cdot h$ waarbij b de basis is, en h de hoogte.

Als je nu gegeven krijgt dat b gelijk is aan 4 en h gelijk is aan 2 (we gebruiken even geen eenheden ter vereenvoudiging), dan kan je de oppervlakte berekenen door de letters te substitueren, door ze te vervangen door de echte waarden of echte getallen:

$$\text{oppervlakte} = b \cdot h = (4) \cdot (2) = 8$$

Hoewel het hier niet echt nodig was, hebben we toch de gesubstitueerde getallen tussen haken gezet. Je doet dit om aan te duiden dat je de letter in zijn geheel vervangt door het getal. Bij moeilijke formules maakt dit wel degelijk veel uit! Stel, je wil de oppervlakte van een andere rechthoek berekenen, en je hebt gegeven dat de hoogte 2 meer moet zijn dan de basis, of met andere woorden, $h = b + 2$. Over de basis weet je nog niets. Je kan dus enkel h vervangen:

$$\text{oppervlakte} = b \cdot h = b \cdot (b + 2)$$

Je ziet dus dat de letter h volledig vervangen is door $b + 2$, gesymboliseerd door de haakjes.

Voorbeeld 2:

Ik heb een pot verf waarmee een oppervlakte van $5m^2$ kan geschilderd worden. Hoeveel ronde tafeltjes kan ik hiermee een likje verf geven? De diameter van de tafeltjes is 1 m.

Oplossing:

We zoeken het aantal tafeltjes die volledig geschilderd kunnen worden. Stel deze onbekende variabele voor door bijvoorbeeld x (gevraagd).

We hebben voldoende verf om $5 m^2$ te schilderen (gegeven).

De diameter d van een tafeltje is 1 meter: $d = 1 m$ (gegeven).

De straal r van een cirkel is de helft van de diameter: $2r = d$

zodat de oppervlakte s van 1 tafeltje gelijk is aan: $s = \pi r^2 = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi(1)^2}{4} = 0,79 m^2$

We stellen de vergelijking op: $5 = x \cdot s$

en lossen deze tenslotte op naar de onbekende variabele: $x = \frac{5}{s} = \frac{5}{0,79} = 6,37$

Besluit: we kunnen 6 tafeltjes schilderen (en dan blijft er nog een klein beetje verf over).

Manier van rekenen

- Notaties

- In het rekenen met letters wordt het puntje van de vermenigvuldiging vaak niet geschreven. In plaats van $a \cdot b \cdot c$ schrijf je abc . Of, in plaats van $2 \cdot b$ schrijf je $2b$. Het puntje schrijven is niet fout, maar hoeft niet.
- Letters schrijf je achteraan in een uitdrukking, dus $b \cdot 2 \cdot c$ schrijf je best als $2bc$. (Dit mag, want in een product mag je factoren van plaats verwisselen.)
- Vaak worden de letters die voorkomen ook in alfabetische volgorde geschreven. Bijvoorbeeld yxz schrijf je beter als xyz .

Deze notaties maken het meestal gemakkelijker om verder te rekenen, en als je aan deze manier van schrijven houdt, ziet alles er meer netjes uit. Het is niet absoluut verplicht om te doen, maar wel aan te raden.

- Eentermen en veeltermen

Een eenterm is een uitdrukking die uit 1 term bestaat, een veelterm bestaat uit meerdere termen, logisch toch? I.p.v. een veelterm spreken we ook over een polynoom.

- a en $4abcx$ zijn eentermen
- $x^2 + 3x + 1$ en $b - x$ zijn veeltermen

- Som en verschil

Je kan de som of het verschil van eentermen maken, maar enkel als de letters of lettercombinatie in de eenterm gelijk is. Lijkt een cryptische regel, maar dat is het niet.

Bijvoorbeeld:

- $a + 3a = 4a$ Dit gaat perfect, want de letters zijn gelijk.
- $a + 2b = ?$ Dit gaat niet, a en b zijn verschillende letters.
- $2ab + bc = ?$ Dit gaat niet want ab en bc zijn verschillende lettercombinaties.
- $3ab - ab = 2ab$ Dit gaat perfect, want de lettercombinaties zijn gelijk.
- $ab + ba = ab + ab = 2ab$ Ook dit gaat, al is het met een omweg. Door te sorteren zie je dat de lettercombinaties gelijk zijn.
 - $a + a^2 = ?$ Dit gaat niet, want de lettercombinaties zijn niet gelijk, eentje is een a en de andere is a^2 .

Let dus goed op bij het optellen van letters of combinaties, en sorteert de letters om gelijkaardige combinaties te zien.

Het optellen van veeltermen is een uitbreiding van deze regel. Gelijksoortige eentermen (dus met dezelfde lettercombinaties) tel je op:

- $(3x + y) + (4x + z) = 7x + y + z$ Enkel de eentermen van de x kan je optellen, de rest moet je laten staan.
- $(3x + y) - (a + b) = 3x + y - a - b$ Jammer, hier kan je niets optellen.

- Producten

Producten van verschillende letters vorm je door de letters achter elkaar te schrijven. De bijhorende getallen vermenigvuldig je ook, en plaats je voorop.

Voor eentermen is dit:

- $a \cdot b \cdot x = abx$
- $x \cdot 2a \cdot 2b = 4abx$

Als de letters gelijk zijn, kan je machten vormen. Je gebruikt hier eigenlijk de rekenregel: "machten met hetzelfde grondtal vermenigvuldigen is de exponenten optellen".

$$\begin{aligned} - a \cdot a &= a^2 \\ - x^2 \cdot x^3 &= x^{2+3} = x^5 \\ - ab \cdot ab &= (ab)^2 = a^2 \cdot b^2 = a^2b^2 \end{aligned}$$

Veeltermen vermenigvuldigen is lastiger, maar maakt gebruik van rekenregels die je al kent. De belangrijkste is de distributiviteit. Op die manier herleid je het probleem naar het product van eentermen:

$$x \cdot (a + b) = x \cdot a + x \cdot b = ax + bx$$

Iets complexer: nog enkele voorbeelden:

$$\begin{aligned} (a + 2x) \cdot (3x) &= a \cdot (3x) + (2x) \cdot (3x) \\ &= 3ax + 6x^2 \end{aligned}$$

distributiviteit
uitrekenen en ordenen

$$\begin{aligned} (a + b) \cdot (a + b) &= a \cdot a + b \cdot a + a \cdot b + b \cdot b \\ &= a^2 + ba + ab + b^2 \\ &= a^2 + 2ab + b^2 \end{aligned}$$

distributiviteit
uitrekenen
ordenen en optellen

$$(a + b) \cdot (x + y) = a \cdot x + a \cdot y + b \cdot x + b \cdot y = ax + ay + bx + by$$

In module **** gaan we kijken naar de omgekeerde bewerkingen: ontbinden in factoren (afzonderen van eentermen en veeltermen), en merkwaardige producten.

- Quotiënten

Quotiënten, en dus daarmee samenhangend breuken, bereken je vaak door vereenvoudigen. Je doet een vereenvoudiging net op dezelfde manier als bij het vereenvoudigen van een breuk met gewone getallen:

$$\begin{aligned} \frac{6}{15} &= \frac{2 \cdot 3}{3 \cdot 5} = \frac{2}{5} \\ \frac{ab}{bc} &= \frac{a}{c} \end{aligned}$$

Als er in de teller een letter staat die ook in de noemer staat, kan je de breuk vereenvoudigen. Maar de volgende breuk kan je NIET vereenvoudigen:

$$\frac{ab}{bc + 1}$$

In de noemer staat immers niet bij elke term een b , dus is vereenvoudiging hier niet mogelijk. Wat je echter wel kan (en mag doen) is zowel in teller als noemer de letter b buiten de haakjes brengen; daarna kan je b schrappen, maar of je daarmee de breuk vereenvoudigd hebt, laten we in het midden. De variabele b mag nu immers niet meer nul worden.

$$\frac{ab}{bc + 1} = \frac{ab}{b(c + \frac{1}{b})} = \frac{a}{c + \frac{1}{b}}$$

Het gebruik van rekenregels heb je echt nodig bij machten:

$$\frac{a^3}{a^2} = a^{3-2} = a^1 = a$$

Nog een voorbeeld:

$$\begin{aligned}\frac{p\sqrt{p}}{p^2} &= \frac{p \cdot p^{\frac{1}{2}}}{p^2} && \text{vierkantswortel omzetten in macht} \\ &= \frac{p^{1+\frac{1}{2}}}{p^2} && \text{product van machten met gelijk grondtal is exponenten optellen} \\ &= \frac{p^{\frac{3}{2}}}{p^2} \\ &= p^{\frac{3}{2}-2} && \text{quotiënt van machten met gelijk grondtal is exponenten aftrekken} \\ &= p^{-\frac{1}{2}} && \text{Verder dan dit kan je de opgave niet vereenvoudigen.}\end{aligned}$$

Als je iets meer ervaring hebt: $\frac{p\sqrt{p}}{p^2} = p^{1+\frac{1}{2}-2} = p^{-\frac{1}{2}}$.

Voorbeelden

Rekenen met letters kan dan wel op dezelfde manier gaan zoals rekenen met getallen, toch is er vaak een moeilijkheid bij vereenvoudigingen en dergelijke. Vandaar dat we enkele voorbeelden bekijken.

- Breuken optellen en aftrekken

Net zoals bij de gewone breuken, is de sleutel hier het op dezelfde noemer brengen van de breuken:

$$\frac{4}{a} + \frac{7}{a} = \frac{11}{a}$$

Volgend voorbeeld is iets lastiger:

$$\frac{a}{b} + \frac{c}{d}$$

Je zoekt hier een gelijke noemer. Omdat de noemers niets met elkaar te maken hebben, neem je gewoon het product van de noemers als gemeenschappelijke noemer, namelijk $b \cdot d$. Dat zou je ook doen als je de som $\frac{1}{7} + \frac{2}{3}$ zou moeten oplossen, dan zou je ook als gemeenschappelijke noemer $3 \cdot 7 = 21$ kiezen.

$$\frac{a}{b} + \frac{c}{d} = \frac{ad}{bd} + \frac{cb}{bd} = \frac{ad + bc}{bd}$$

Een iets moeilijker voorbeeld:

$$\begin{aligned} \frac{y}{x} + \frac{y}{x+1} &= \frac{y.(x+1)}{x.(x+1)} + \frac{y.x}{(x+1).x} \\ &= \frac{xy+y}{x.(x+1)} + \frac{xy}{(x+1).x} \\ &= \frac{xy+y+xy}{x.(x+1)} \\ &= \frac{2xy+y}{x(x+1)} \\ &= \frac{2xy+y}{x^2+x} \end{aligned}$$

We werken hier ook de noemer uit.

Nog een laatste voorbeeld:

$$\frac{x+3+a}{a+1} - \frac{2x+5-b}{2a+2}$$

In dit voorbeeld is de gemeenschappelijke noemer gelijk aan $2a+2$, en niet meteen het product van de twee noemers! Immers, de twee noemers hebben een gemeenschappelijk factor, namelijk $a+1$. Daar moet je gebruik van maken. Concreet betekent dit dat we de eerste breuk in teller en noemer moeten vermenigvuldigen met 2, en de tweede noemer kunnen we gewoon laten staan:

$$\begin{aligned} \frac{x+3+a}{a+1} - \frac{2x+5-b}{2a+2} &= \frac{(x+3+a).2}{(a+1).2} - \frac{2x+5-b}{2a+2} \\ &= \frac{2x+6+2a}{2a+2} - \frac{2x+5-b}{2a+2} \\ &= \frac{2x+6+2a-(2x+5-b)}{2a+2} \\ &= \frac{2x+6+2a-2x-5+b}{2a+2} \\ &= \frac{1+2a+b}{2a+2} \end{aligned}$$

op gelijke noemer zetten

uitrekenen

verschil van tellers, vergeet geen haken!

min teken verdelen over termen

gelijkaardige termen optellen

- Breuken vermenigvuldigen en delen

Breuken vermenigvuldigen en delen is eenvoudiger dan optellen en aftrekken; opnieuw gebruik je dezelfde rekenregels als voordien.

Vermenigvuldigen van breuken is tellers met tellers en noemers met noemers vermenigvuldigen:

$$\frac{a}{b} \cdot \frac{2}{x} = \frac{a \cdot 2}{b \cdot x} = \frac{2a}{bx}$$

Een getal delen door een breuk is vermenigvuldigen met het omgekeerde van die breuk:

$$\frac{a}{b} : \frac{2}{x} = \frac{a}{b} \cdot \frac{x}{2} = \frac{ax}{b \cdot 2} = \frac{ax}{2b}$$

Ietsje moeilijker:

$$\begin{aligned} \frac{a+b}{c+d} \cdot \frac{x+1}{y+1} &= \frac{(a+b)}{(c+d)} \cdot \frac{(x+1)}{(y+1)} && \text{breuken vermenigvuldigen} \\ &= \frac{ax + a + bx + b}{cy + c + dy + d} && \text{uitrekenen} \end{aligned}$$

Vergeet ook niet (indien mogelijk) om nadien te vereenvoudigen:

$$\begin{aligned} \frac{2a+4x}{4b} : \frac{b}{2y} &= \frac{2a+4x}{4b} \cdot \frac{2y}{b} && \text{vermenigvuldigen met omgekeerde} \\ &= \frac{(2a+4x) \cdot (2y)}{(4b) \cdot (b)} && \text{breuken vermenigvuldigen} \\ &= \frac{4ay + 8xy}{4b^2} && \text{uitrekenen} \\ &= \frac{ay + 2xy}{b^2} && \text{vereenvoudigen} \end{aligned}$$

- Machten en wortels

$$\begin{aligned} (2a)^4 &= 2^4 \cdot a^4 &= 16a^4 \\ \sqrt{16a} &= \sqrt{16} \cdot \sqrt{a} &= 4\sqrt{a} \\ \left(\frac{a+2}{3}\right)^2 &= \frac{(a+2)^2}{3^2} &= \frac{a^2+4a+4}{9} \\ \left(\frac{b}{1-a}\right)^{-2} &= \left(\frac{1-a}{b}\right)^2 &= \frac{(1-a)^2}{b^2} = \frac{1-2a+a^2}{b^2} \end{aligned}$$

2.11 Evenredigheden en de regel van drie

De regel van drie

In een aantal vraagstukken worden er twee grootheden met elkaar vergeleken. Deze twee grootheden houden dikwijls verband met elkaar. Dit wil zeggen als de ene grootheid groter wordt, vermeerdert ook de andere. En als de ene grootheid kleiner wordt, vermindert de andere grootheid eveneens. We zeggen dat de twee grootheden zich *evenredig* verhouden tot elkaar (symbooltje \sim).

Voorbeeld 1:

Een doos ballonnen bevat 75 ballonnen en kost 10€. Hoeveel kosten dan 90 ballonnen?

Er is een verband, want als de ene grootheid (= het aantal ballonnen) vermeerdert, vermeerdert hier ook de andere grootheid (= de prijs van de ballonnen). Hoe meer ballonnen je wil, hoe meer

je zal moeten betalen. Zulke vraagstukken kan je oplossen met de zogenaamde *regel van drie*. Bij dit soort opgaven ken je altijd 3 getallen en moet je het vierde getal berekenen, vandaar...

$$\begin{array}{rcl} 75 \text{ ballonnen} & \sim & 10 \text{ €} \\ 1 \text{ ballon} & \sim & \frac{10 \text{ €}}{75 \text{ ballonnen}} \\ 90 \text{ ballonnen} & \sim & \frac{10 \text{ €}}{75 \text{ ballonnen}} \cdot 90 \text{ ballonnen} = 12 \text{ €} \end{array}$$

Antwoord : Voor 90 ballonnen betaal je dan 12€.

Infeite ga je eerst op zoek naar de “eenheidsprijs” voor één ballon: 10€ voor 75 ballonnen komt overeen met $10/75 = 0,133 \frac{\text{EUR}}{\text{ballon}}$. We kunnen ons ook afvragen hoeveel ballonnen je kan kopen voor één euro: $75/10 = 7,5 \frac{\text{ballonnen}}{\text{EUR}}$ (praktisch zou dit betekenen dat je met één euro 7 ballonnen kan kopen; je betaalt daarvoor $7,0,133 = 0,93 \text{ €}$ en je houdt nog 6 eurocent over).

We zeggen dat een verhouding *omgekeerd evenredig* is wanneer een vermeerdering langs de ene kant, een even grote vermindering aan de andere kant veroorzaakt.

Voorbeeld 2:

Stel, ik heb voldoende veevoeder om 35 varkens gedurende 22 dagen te voeren. Hoeveel dagen kom ik toe met dezelfde hoeveelheid veevoeder als ik plots 70 varkens zou hebben?

Er is een verband, want als de ene grootheid (= het aantal varkens) vermeerdert, vermindert hier de andere grootheid (= het aantal dagen voederen). Zulke vraagstukken kan je eveneens oplossen met de regel van drie.

$$\begin{array}{rcl} \text{veevoeder voor 35 varkens} & \sim & 22 \text{ dagen} \\ \text{veevoeder voor 1 varken} & \sim & 22 \text{ dagen. veevoeder voor 35 varkens} \\ \text{veevoeder voor 70 varkens} & \sim & \frac{22 \text{ dagen. veevoeder voor 35 varkens}}{\text{veevoeder voor 70 varkens}} = 11 \text{ dagen} \end{array}$$

Antwoord : Met dezelfde hoeveelheid veevoeder kan je 70 varkens 11 dagen lang voederen.

Dit is dus niet hetzelfde als: Stel, ik heb veevoeder om 35 varkens gedurende 22 dagen te voeren. Hoeveel veevoeder heb ik nodig om 70 varkens te voederen gedurende diezelfde 22 dagen?

Antwoord: de exacte hoeveelheid veevoeder in kg (dat een varken per dag nodig heeft) kennen we niet, dus kunnen we ook niet in “zoveel kg” antwoorden, maar als het aantal varkens verdubbelt, dan zal de hoeveelheid veevoeder ook moeten verdubbelen. De verhouding “hoeveelheid veevoeder per varken” verandert niet; we zeggen dat de verhouding constant blijft. In symbolen:

$$\frac{\text{hoeveelheid veevoeder } x}{35 \text{ varkens}} = \frac{\text{hoeveelheid veevoeder } y}{70 \text{ varkens}} = \text{constant}$$

Schrijven we dit iets anders:

$$\frac{70 \text{ varkens}}{35 \text{ varkens}} = \frac{\text{hoeveelheid veevoeder } y}{\text{hoeveelheid veevoeder } x} = \text{constant} = 2$$

Besluit: de hoeveelheid veevoeder voor 70 varkens = 2 . hoeveelheid veevoeder voor 35 varkens.

Dit vraagstukje laat zien wat we bedoelen met “kruiselings vermenigvuldigen”.

Kruiselings vermenigvuldigen

Kruiselings vermenigvuldigen is de benaming voor een rekenkundige handeling om een vergelijking tussen twee verhoudingen (evenredigheid) te vereenvoudigen. Daarbij wordt de noemer van het linkerlid vermenigvuldigd met de teller van het rechterlid, en de teller van het linkerlid vermenigvuldigd met de noemer van het rechterlid. Beide vermenigvuldigingen stelt men dan aan elkaar gelijk. De vergelijking wordt door kruiselings vermenigvuldigen vereenvoudigd tot $20y = 40$, waaruit weer volgt dat $y = 2$.

In formulevorm:

$$\frac{a}{b} = \frac{c}{d} \Rightarrow ad = bc$$

Indien $bc \neq 0$ geldt ook het omgekeerde:

$$ad = bc \Rightarrow \frac{a}{b} = \frac{c}{d} \quad (1)$$

De achtergrond van dit "trucje" is dat beide zijden van de vergelijking met hetzelfde reële getal vermenigvuldigd kunnen worden, zonder dat de vergelijking verandert. In bovenstaande formulering kunnen beide zijden met het getal " bd " vermenigvuldigd worden, waarna volgt $ad = bc$.

2.12 Rekenen met percentages en promillages

x percent of $x\%$ van een getal y betekent: $\left(\frac{x}{100}\right) \cdot y$

x promille of $x \text{‰}$ van een getal y betekent: $\left(\frac{x}{1000}\right) \cdot y$

Een percentage of promillage heeft dus altijd betrekking op een getal. 10% op zich heeft m.a.w. eigenlijk geen betekenis.

Voorbeelden:

Hoeveel is 25% van 50 ? Dit is: $\left(\frac{25}{100}\right) \cdot 50 = 0,25 \cdot 50 = 12,5$

Stel, de basisprijs van een product is 82e . Er komt echter nog 21% BTW bij. Aan welke prijs wordt dit product te koop aangeboden?

Antwoord: $82 + 21\%$ van $82 = 82 + 17,22 = 99,22\text{e}$.

Dit soort berekeningen kan je vlotter maken via: $1,21 \cdot 82 = 99,22\text{e}$. Dus als een hoeveelheid met 21% toeneemt hoort daar de factor $1,21$ bij.

Hoeveel moeten we betalen als we 30% korting krijgen op een product dat 200€ kost? We moeten dan van de prijs 30% aftrekken: $200 - 30\%$ van $200 = 200 - 60 = 140\text{e}$. Ook dit gaat eenvoudiger via $0,70 \cdot 200 = 140\text{e}$. Met een afname van 30% komt de factor $0,70$ overeen.

We hebben geluk: bovenop de 30% korting krijgen we nog een extra 5% studentenkorting. Nu betalen we $0,70 \cdot 0,95 \cdot 200 = 133\text{e}$.

Procenten van procenten tel je dus niet op, maar je vermenigvuldigt ze met elkaar. De klant heeft dus geen 35% korting gekregen, maar slechts $1 - 0,7 * 0,95 = 33,5\%$.

Ook een gecombineerde toename en afname worden via een vermenigvuldiging samengevoegd.

Met hoeveel procent neemt het aantal toe als het eerst 20% vermeerdert en daarna met 45% verminderd?

Antwoord: bij een toename van 20% hoort de factor 1,2 en bij een afname van 45% hoort de factor 0,55. Aangezien $1,2 * 0,55 = 0,66$ zal het aantal afnemen met 34% .

Tijdens een garageverkoop doet een verkoper ons een aantrekkelijk voorstel. I.p.v. 15% korting op alle spullen, krijgen wij een korting van 125 € op het nog nieuwe televisietoestel dat 1000 € kost. We happen niet meteen toe, maar rekenen uit met hoeveel procent 125 van 1000 overeenkomt:

als $x\%$ van $y = z$

$$\text{maar } \left(\frac{x}{100} \right) \cdot y = z$$

$$\text{dan is } \frac{x}{100} \text{ (of } x\%) = \frac{z}{y}$$

$$\text{In ons geval is: } x = \frac{125}{1000} = 0,125 \text{ of } 12,5\%.$$

We kiezen dus beter voor de 15% korting!

3 Ontbinden in factoren

TODO

Module 2

Elementaire rekenvaardigheden B

0 Intro

1 Functies

1.1 Reële functies

Definitie, notatie, functievoorschrift

Definitie Een functie is een verband: een functie f associeert bij elk gegeven getal x hoogstens één ander getal (de functiewaarde $f(x)$). De functie f kan een functievoorschrift hebben om volgens een bepaalde vaste regel van zo'n x de bijhorende functiewaarde $f(x)$ te berekenen.

Er zijn functies met een speciale naam, zoals de sinus-functie: \sin en functies met speciale symbolen, zoals de wortel-functie: $\sqrt{\cdot}$. Het functievoorschrift van deze functies is $f(x) = \sin(x)$ en resp. $f(x) = \sqrt{x}$.

Grafische voorstelling

Definitie Een functie f kan altijd grafisch worden weergeven. De vergelijking $f = f(x)$ geeft het verband tussen de x -waarden op de *horizontale* as en de functiewaarden $f(x)$ op de *verticale* as.

De letter y wordt de *afhankelijke variabele*, de *beeldwaarde* (of kortweg het *beeld*), de *output* of ook nog de *functiewaarde* genoemd. De letter x is hier de *onafhankelijke variabele*, de *input* of ook wel het *argument* genoemd.

Voorbeeld: het verband tussen de temperatuur in graden Celsius (x) en graden Fahrenheit (y) wordt gegeven door volgende functie: $y = 1,8x + 32$

Domein en beeld

Definitie Het *domein* (of *definitiegebied*) van een functie f is de verzameling van alle getallen $\in \mathbb{R}$ (x -waarden) die en beeld (y -waarde) hebben. Het domein is dus de verzameling van alle getallen $\in \mathbb{R}$ die acceptabel zijn als input. Notatie: $\text{dom } f$ of $\text{def } f$.

Voorbeelden

- Voorbeeld 1: voor de functie $y = \sqrt{x}$ mag x geen negatief getal zijn, dus $\text{dom } f = \mathbb{R}^+ = [0, +\infty[$
- Voorbeeld 2: de functie $y = \frac{1}{x-1}$ heeft geen beeld voor $x = 1$, dus $\text{dom } f = \mathbb{R} \setminus \{1\}$

Tips bij het bepalen van het domein:

- Een even machtswortel kan je enkel nemen van positieve getallen $\in \mathbb{R}$.
- Een oneven machtswortel kan je van elk getal $\in \mathbb{R}$ nemen.
- Delen door nul mag niet!

Definitie

Het *beeld* (of *bereik*) van een functie f is de verzameling van alle getallen $\in \mathbb{R}$ welke het beeld (de functiewaarde y) van de functie kunnen zijn. Het beeld is dus de verzameling van alle getallen $\in \mathbb{R}$ die kunnen optreden als output. Notatie: $\text{bld } f$.

Merk op dat bij een functie voor elke beeldwaarde hoogstens 1 x -waarde mag bestaan.

Bij een vergelijking waarbij er meerdere beelden bestaan voor een x -waarde, spreken we van een relatie.

Onthoud ook:

- Het domein lees je af op de horizontale x -as (in onderstaande voorbeelden aangeduid met een groene lijn).
- Het beeld lees je af op de verticale y -as (in onderstaande voorbeelden aangeduid met een blauwe lijn).

Voorbeeld: bij de functie $f(x) = 1 - x^2$ kan je voor geen enkele waarde van x een beeldwaarde bekomen die groter is dan 1 (omdat $1 - x^2 \leq 1$), dus $\text{bld } f =]-\infty, 1]$

De vergelijking $y^2 = x$ kunnen we niet zien als een functie in x , omdat zowel $y = 1$ als $y = -1$ zouden horen bij $x = 1$. Dit is dus een voorbeeld van een relatie (maar geen functie)!

Nulpunten

Definitie Een *nulwaarde* van de functie f is een getal a waarvoor geldt dat $f(a) = 0$. Het punt $(a, 0)$ noemen we een nulpunt.

Het berekenen van de nulwaarden van een functie f vereist het oplossen van de vergelijking $f(x) = 0$. Grafisch gezien zijn de nulpunten $(a, 0)$ de snijpunten van de grafiek van de functie f met de horizontale as (de X -as).

Voorbeeld

Voor de tweedegraadsfunctie met voorschrift $f(x) = ax^2 + bx + c$ komt dit neer op $ax^2 + bx + c = 0$ oplossen en kunnen we dus de methode van de discriminant toepassen om de nulwaarden te vinden.

Snijpunten met de assen

De snijpunten van de functie f met de x -as vinden we door het oplossen van het stelsel

$$\begin{cases} y = f(x) \\ y = 0 \end{cases}$$

of dus de vergelijking $f(x) = 0$. Het snijpunt van de functie $y = f(x)$ met de y -as vinden we

$$\text{door het oplossen van het stelsel } \begin{cases} y = f(x) \\ x = 0 \end{cases} \quad \text{of dus het berekenen van } f(0).$$

Even en oneven functies

Definitie

Een functie $f(x)$ noemt men *even* als $f(-x) = f(x)$.

Een even functie heeft de y -as als as van symmetrie.

Een functie $f(x)$ noemt men *oneven* als $f(-x) = -f(x)$.

Een oneven functie heeft de oorsprong als middelpunt van symmetrie.

Als voor een functie $f(-x)$ niet gelijk is aan $f(x)$ of $-f(x)$ dan is de functie noch even, noch oneven. Dit hoeft niet te betekenen dat deze functie niet ergens anders symmetrisch zou kunnen zijn.

Voorbeeld

De functie f met voorschrift $f(x) = x^2$ is een eenvoudig voorbeeld van een even functie. Voor elke $x \in \mathbb{R}$ geldt immers dat

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

De functie g met voorschrift $g(x) = x^3$ is dan weer een eenvoudig voorbeeld van een oneven functie. Voor elke $x \in \mathbb{R}$ geldt immers dat

$$f(-x) = (-x)^3 = -x^3 = g(x)$$

Een functie h met voorschrift $h(x) = x + 1$ is noch een even functie, noch een oneven functie. Er zijn namelijk x -waarden waarvoor geen van de verbanden gelden:

$$\begin{aligned} h(1) &= 2 & \text{maar} & & h(-1) &= 0 \\ h(2) &= 3 & \text{maar} & & h(-2) &= -1 \end{aligned}$$

Snijpunten van twee functies

Als je voor twee verschillende functies f en g de eventuele snijpunten van hun grafiek zoekt, dan moet je de vergelijking $f(x) = g(x)$ oplossen. Zo vind je de x -coördinaten van de snijpunten.

Invullen van deze gevonden x -coördinaten in één van de twee functievoorschriften geeft dan de bijhorende y -coördinaten.

Voorbeeld

Om te bepalen waar de snijpunten van de grafieken van $f(x) = x^2$ en $g(x) = 3x - 2$ liggen, onderzoeken we bijgevolg

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

wat snel opgelost kan worden met de methode van de discriminant:

$$D = b^2 - 4ac = 9 - 8 = 1$$

zodat

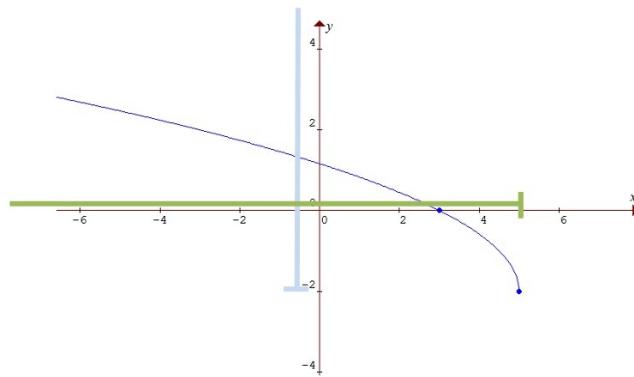
$$x_1 = \frac{3+1}{2} \text{ en } x_2 = \frac{3-1}{2} = 1.$$

De snijpunten van de grafieken van f en g hebben dus als x -waarden 1 en 2. Ook de beeldwaarden van deze snijpunten kunnen we nu snel berekenen: $f(1) = 1$ en $f(2) = 4$.

1.2 Voorbeelden

Voorbeelden

Voorbeeld 1: bespreek de functie f met voorschrift $f(x) = \sqrt{10 - 2x} - 2$.



Domein: de uitdrukking onder de vierkantswortel mag niet negatief worden:

$$\begin{aligned} 10 - 2x &\geq 0 \\ \iff 10 &\geq 2x \\ \iff 5 &\geq x \\ \iff x &\leq 5 \end{aligned}$$

Besluit: voor x zijn alle waarden van $-\infty$ tot en met 5 toegelaten. We schrijven: $\text{dom } y =]-\infty, 5]$

Beeld: de kleinste functiewaarde wordt bekomen als de wortel 0 is. Vierkantwortels geven altijd een positief resultaat (of nul). De uitdrukking onder de wortel wordt 0 als $x = 5$. We zien dat $f(5) = -2$. Er is geen bovengrens, dus het bereik loopt tot $+\infty$.

Besluit: $\text{bld } f = [-2, +\infty[$

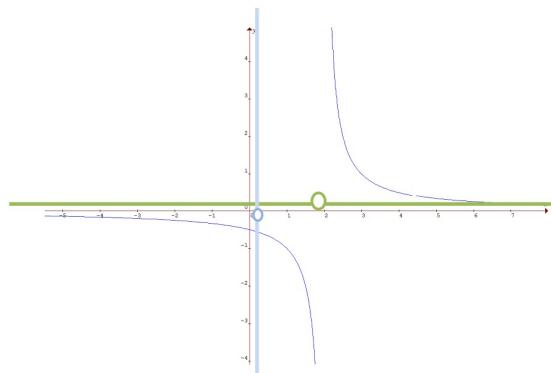
Nulpunten: voor welke waarden van x wordt $f(x) = 0$?

$$\begin{aligned} \sqrt{10 - 2x} - 2 &= 0 \\ \Leftrightarrow \sqrt{10 - 2x} &= 2 \\ \Leftrightarrow (\sqrt{10 - 2x})^2 &= 2^2 \\ \Leftrightarrow 10 - 2x &= 4 \\ \Leftrightarrow 6 &= 2x \\ \Leftrightarrow x &= 3 \end{aligned}$$

Besluit: er is slechts 1 nulwaarde, en dit is $x = 3$.

Symmetrie: we gaan na of het beeld van $-x$ hetzelfde of het tegengestelde resultaat geeft als de gegeven functie. $f(-x) = \sqrt{10 - 2(-x)} - 2 = \sqrt{10 + 2x} - 2$. Dit is noch gelijk aan $f(x)$ noch gelijk aan $-f(x)$. Deze functie is dus noch even, noch oneven.

Voorbeeld 2: bespreek de functie met voorschrift $f(x) = \frac{1}{x-2}$.



Domein: de noemer mag niet nul worden (omdat een getal delen door 0 geen getal $\in \mathbb{R}$ is):

$$\begin{aligned} x - 2 &\neq 0 \\ \Leftrightarrow x &\neq 2 \end{aligned}$$

Besluit: $\text{dom } y = \mathbb{R} \setminus \{2\}$

Beeld: er is geen bovengrens en geen ondergrens, maar de breuk zal echter nooit 0 worden.

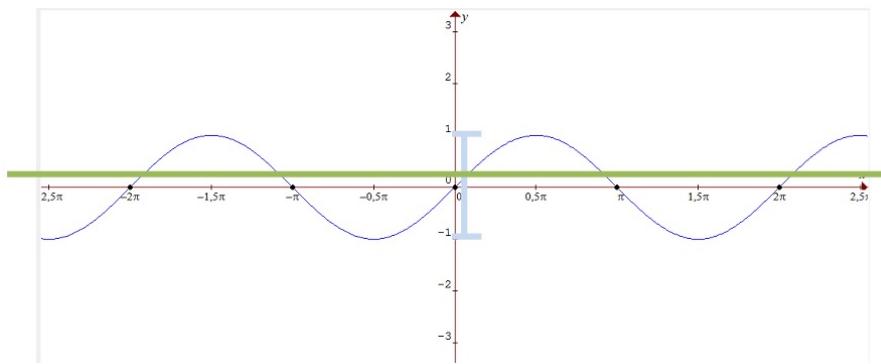
Besluit: $\text{bld } f = \mathbb{R}_0$

Nulpunten: aangezien een breuk enkel nul kan worden als de teller nul is, zal dit bij deze functie nooit gebeuren. Er is dus geen snijpunt met de x -as.

Besluit: deze functie heeft geen nulpunten.

Symmetrie: we gaan na of het beeld van $-x$ hetzelfde of het tegengestelde resultaat geeft als de gegeven functie. $f(-x) = \frac{1}{(-x)-2} = -\frac{1}{x+2}$. Dit is noch gelijk aan $f(x)$ noch gelijk aan $-f(x)$. Deze functie is dus noch even, noch oneven.

Voorbeeld 3: bespreek de sinusfunctie $f(x) = \sin(x)$



Domein: we mogen op de plaats van x gelijk welke hoek invullen, de sinus zal steeds bestaan.

Besluit: $\text{dom } y = \mathbb{R}$

Beeld: we lezen op de y -as het beeld af. De functiewaarden voor de sinus kunnen nooit groter zijn dan 1 of kleiner dan -1

Besluit: $\text{bld } f = [-1, 1]$

Nulpunten: de x -as wordt gesneden als $\sin(x) = 0$. Dit gebeurt zowel voor x -waarden gelijk aan $\{0, \pi, 2\pi, 3\pi, \dots\}$ als ook voor $\{\dots, -3\pi, -2\pi, -\pi, 0\}$

Besluit: de snijpunten met de x -as zijn de punten $\{\dots, (-2\pi, 0), (-\pi, 0), (0, 0), (\pi, 0), (2\pi, 0), \dots\}$ of iets korter genoteerd als: $\{(k\pi, 0) \text{ met } k \in \mathbb{Z}\}$

Symmetrie: via de goniometrische formules vinden we snel dat $f(-x) = \sin(-x) = -\sin(x) = -f(x)$, dus kunnen we zeggen dat deze functie oneven is (symmetrisch t.o.v. de oorsprong).

1.3 Verloop van functies

Absolute en relatieve extrema

Definitie

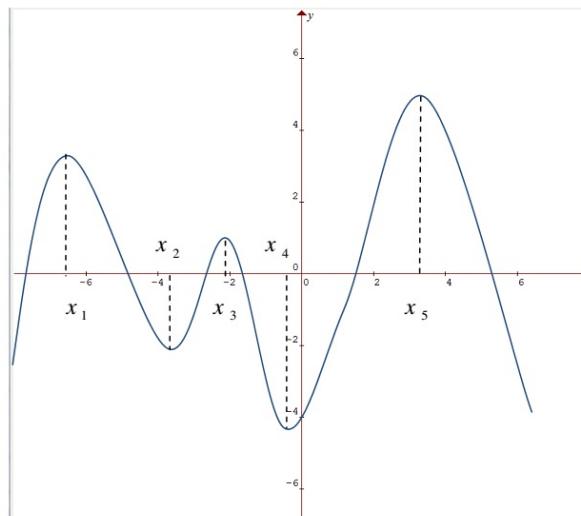
Een functie f heeft een **absoluut maximum** $f(x_0)$ in het punt $x_0 \in \text{dom } f$, als voor alle $x \in \text{dom } f$ geldt dat $f(x_0) \geq f(x)$

Een functie f heeft een **absoluut minimum** $f(x_0)$ in het punt $x_0 \in \text{dom } f$, als voor alle $x \in \text{dom } f$ geldt dat $f(x_0) \leq f(x)$

Een functie f heeft een **relatief of lokaal maximum** in het punt x_0 , indien er een open interval I bestaat rond het punt x_0 zodat voor alle x in het interval I geldt dat $f(x_0) \geq f(x)$

Een functie f heeft een **relatief of lokaal minimum** in het punt x_0 , indien er een open interval I bestaat rond het punt x_0 zodat voor alle x in het interval I geldt dat $f(x_0) \leq f(x)$

Voorbeeld



Figuur .1: Voorbeeld absolute en relatieve extrema.

Voor de functie in gegeven in Figuur .1 zijn x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 relatieve of lokale extrema. Hiervan zijn x_4 en x_5 absolute extrema.

x_1, x_3, x_5 zijn relatieve of lokale maxima. Hiervan is x_5 een absoluut maximum.

x_2, x_4 zijn relatieve of lokale minima. Hiervan is x_4 een absoluut minimum.

Stijgen, dalen en extrema

De eerste afgeleide speelt een belangrijke rol bij het onderzoek naar het verloop van een functie. Men zal dus het tekenverloop van deze afgeleide onderzoeken.

Definitie

Als de eerste afgeleide $f'(x) > 0$ is in een interval, dan zal deze functie in dat interval **stijgen**.

Als de eerste afgeleide $f'(x) < 0$ is in een interval, dan zal deze functie in dat interval **dalen**.

De functie zal een relatief of lokaal extremum (maximum of minimum) bereiken waar de kromme overgaat van een stijgende functie naar een dalende functie of omgekeerd.

Een functie $f(x)$ heeft in het punt (x_0, y_0) een extremum als in dat punt aan de volgende voorwaarden voldaan is:

- als $f'(x_0) = 0$ en $f''(x_0) > 0$ zal het extremum een minimum zijn, en
- als $f'(x_0) = 0$ en $f''(x_0) < 0$ zal het extremum een maximum zijn.

Opmerkingen

x		0	-	2	
$f'(x) = 3x(x - 2)$	+	0	-	0	+
$f(x)$		0		-4	

\nearrow max \searrow min \nearrow

Tabel .1: Voorbeeld stijgen, dalen en extrema.

- Opmerking 1: in een extremum bezit de functie een horizontale raaklijn (aangezien $f'(x_0) = 0$ is).
- Opmerking 2: indien $f'(x_0) = 0$ en ook $f''(x_0) = 0$ werkt deze methode niet om na te gaan of er in x_0 een extremum is. In dat geval gaan we naar de derde afgeleide kijken. Als $f'''(x_0) \neq 0$ dan is het punt x_0 een buigpunt. Indien ook de derde afgeleide nul is moeten we naar de eerstvolgende afgeleide gaan kijken die niet nul is. Stel dat deze van de n^{de} orde is, dus $f^{(n)}(x_0) \neq 0$. Als dan n even is, is er in x_0 een lokaal minimum als $f^{(n)}(x_0) > 0$, en een lokaal maximum als $f^{(n)}(x_0) < 0$. Is de n^{de} oneven dan is x_0 terug een buigpunt. Tip: als je dit moeilijk kan onthouden, denk dan aan de eenvoudige functies $f(x) = x^2$ en $f(x) = x^3$. De functie x^2 heeft een minimum in nul, terwijl x^3 in de oorsprong een buigpunt heeft.

Voorbeeld

Onderzoek het stijgen en dalen van volgende functie f met voorschrijf: $f(x) = x^3 - 3x^2$, zie figuur .2.

De eerste afgeleide $f'(x) = 3x^2 - 6x$ is nul als $3x^2 - 6x = 3x(x - 2) = 0$, dus als $x = 0$ of als $x = 2$.

Om de y -coördinaat van deze extrema punten te vinden vullen we $x = 0$ en $x = 2$ in in de functie $f(x)$. Dit geeft: $f(0) = 0$ en $f(2) = -4$.

De functie f zal in de punten $(0, 0)$ en $(2, -4)$ een extremum bezitten. In het punt $(0, 0)$ is dit een maximum en in het punt $(2, -4)$ een minimum. De raaklijn is in die punten ook telkens horizontaal.

Aangezien de eerste afgeleide een tweedegraadsfunctie is, zullen we het tekenverloop van de tweedegraadsfunctie toepassen, zie Tabel .1.

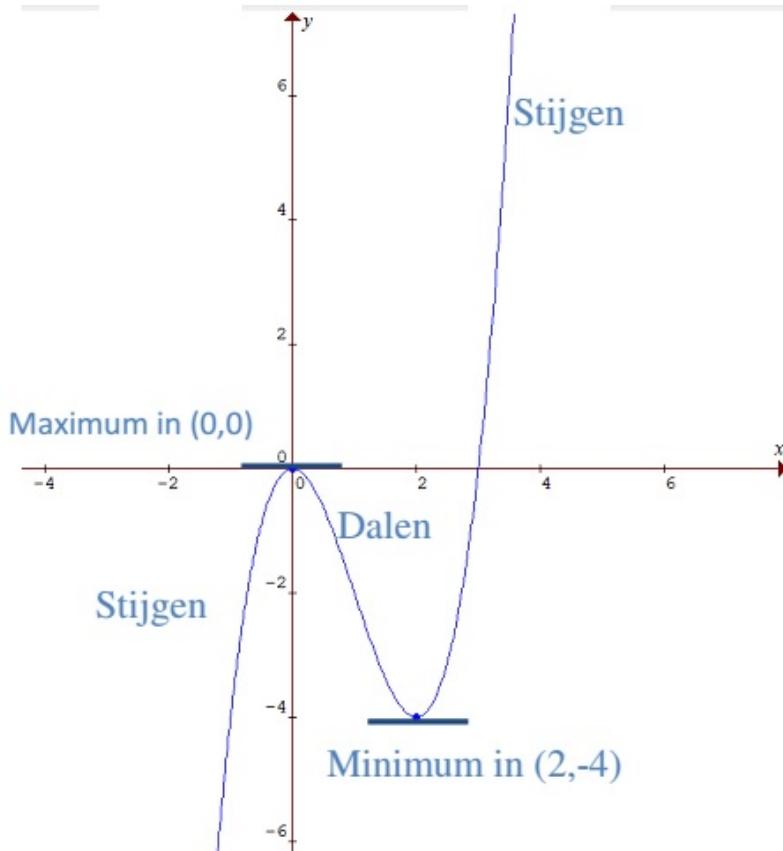
Convex, concaaf en buigpunten

Ook de tweede afgeleide speelt een belangrijke rol bij het onderzoek naar het verloop van een functie. Men zal dus ook het tekenverloop van de tweede afgeleide onderzoeken.

Definitie

Als de tweede afgeleide $f''(x) > 0$ is in een interval, dan zal de functie in dat interval **hol of concaaf** zijn (symbool: \cup).

Als de tweede afgeleide $f''(x) < 0$ is in een interval, dan zal de functie in dat interval **bol of convex** zijn (symbool: \cap).



Figuur .2: Voorbeeld stijgen en dalen.

Punten waar de kromme overgaat van convex naar concaaf of omgekeerd, noemt men **buigpunten**. In een buigpunt verandert dus de tweede afgeleide van teken. Een functie $f(x)$ heeft in het punt (x_0, y_0) een buigpunt als in dat punt aan de volgende voorwaarden voldaan zijn: $f''(x_0) = 0$ en $f'''(x_0) \neq 0$

Opmerkingen

- Opmerking 1: in een buigpunt snijdt de raaklijn de kromme, deze raaklijn noemt men de buigraaklijn.
- Opmerking 2: aangezien de kromming in een buigpunt verandert, is een buigpunt nooit een extremum.

Voorbeelden

Voorbeeld 1: Onderzoek het hol en bol zijn van de functie f met voorschrift $f(x) = x^3 - 3x^2$, zie figuur .3.

De eerste afgeleide is $f'(x) = 3x^2 - 6x$

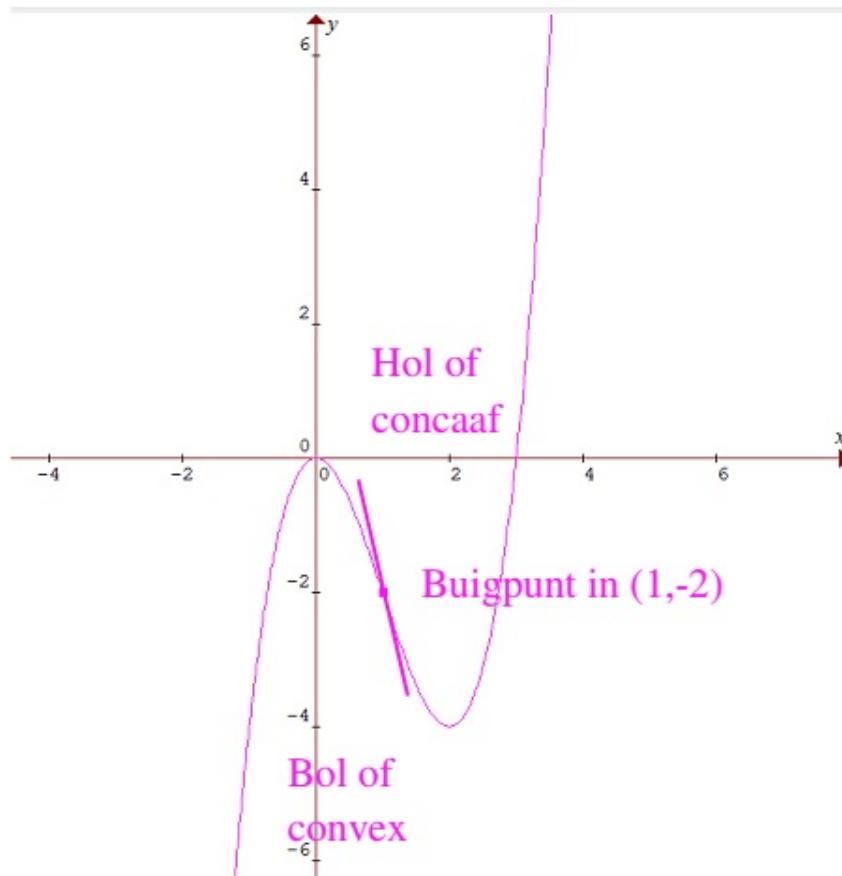
De tweede afgeleide is $f''(x) = 6x - 6$ en is nul als $6x - 6 = 6(x - 1) = 0$, en dus als $x = 1$.

Om de y -coördinaat van dit buigpunt te vinden vullen we $x = 1$ in in de functie $f(x)$. Dit geeft: $f(1) = -2$.

x		1	
$f''(x) = 6(x - 1)$	-	0	+
$f(x)$	∩	-2	∪
		buigpunt	

Tabel .2: Voorbeeld convex, concaaf en buigpunten

Aangezien de tweede afgeleide een eerstegraadsfunctie is, zullen we het tekenverloop van de eerstegraadsfunctie toepassen, zie Tabel .2.



Figuur .3: Voorbeeld convex, concaaf en buigpunten.

Voorbeeld 2: wat kan je zeggen over de functie f met voorschrift $f(x) = x^3$ in het punt waar $x = 0$ is?

De eerste afgeleide is $f'(x) = 3x^2$ en is nul als $x = 0$. Dus $x = 0$ kan een extremum zijn.

De tweede afgeleide is $f''(x) = 6x$ en is nul als $x = 0$. We kunnen niets zeggen; we moeten naar de eerstvolgende afgeleide gaan kijken die niet nul is.

De derde afgeleide is $f'''(x) = 6$. De derde orde afgeleide ($n=3$ is oneven) is niet nul, dus het punt $x = 0$ is een buigpunt (en geen extremum).

Voorbeeld 3: zoek de buigpunten van de functie f met voorschrift $f(x) = \cos(x)$.

De eerste afgeleide is $f'(x) = -\sin(x)$. De nulpunten van $\sin x$ zijn $\{x = n\pi \text{ met } n \in \mathbb{Z}\}$. In deze punten kan $f(x) = \cos(x)$ een extremum bereiken.

De tweede afgeleide is $f''(x) = -\cos(x)$. De nulpunten van $\cos(x)$ zijn $\{x = \frac{\pi}{2} + n\pi \text{ met } n \in \mathbb{Z}\}$. In deze punten verandert de cosinus en dus ook de tweede afgeleide van teken, dus dit zijn buigpunten. M.a.w. de nulpunten van de functie $f(x) = \cos(x)$ zijn tevens de buigpunten (dit geldt ook voor de sinus).

1.4 Eerste- en tweedegraadsfuncties

Constante functies

Definitie

Functievoorschrift: $f(x) = a$ met $a \in \mathbb{R}$

Grafische voorstelling van de constante functie met vergelijking $f(x) = a$ is een horizontale rechte, waarbij de y -as wordt gesneden in het punt $(0, a)$.

Tekenverloop: Zie Tabel .3.

$$\begin{array}{c|c} x & \\ \hline f(x) & \parallel \text{teken van } a \end{array}$$

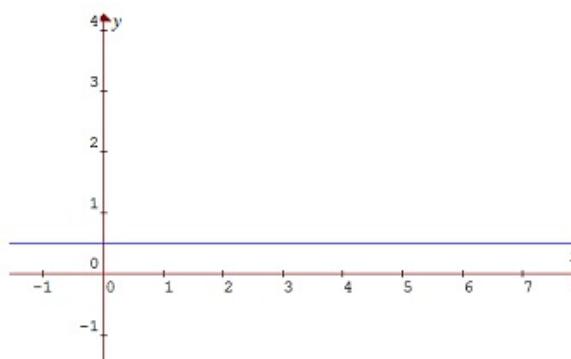
Tabel .3: Tekenverloop van een constante functie.

Voorbeeld

Gegeven de functie: $f(x) = \frac{1}{2}$, zie Figuur .4.

Grafische voorstelling:

- het domein van de constante functie is altijd: $\text{dom } f = \mathbb{R}$
- het beeld van deze constante functie is: $\text{bld } f = \frac{1}{2}$



Figuur .4: Voorbeeld constante functie.

Tekenverloop Zie Tabel .4.

$$\frac{x}{f(x)} \parallel +$$

Tabel .4: Voorbeeld tekenverloop constante functie.

Eerstegraadsfuncties of lineaire functies

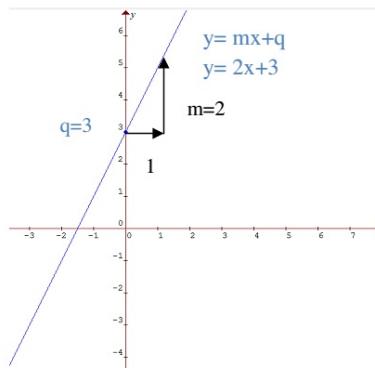
Definitie

Functievoorschrift: $f(x) = ax + b$ met $a \in \mathbb{R}_0$ en $b \in \mathbb{R}$.

Voorbeelden

$f(x) = 10x + 1$, $f(x) = 8 - 5x$, $f(x) = 3x$

Grafische voorstelling van de lineaire functie is een rechte. Zie Figuur .5.



Figuur .5: Voorbeeld van een eerstegraadsfunctie.

- Het domein van elke lineaire functie is: $\text{dom } f = \mathbb{R}$.
- Het beeld van deze lineaire functie is: $\text{bl } f = \mathbb{R}$.

De rechte wordt bepaald door de **richtingscoëfficiënt** (de **rico**) ‘ a ’ en de intercept ‘ b ’. De rico bepaalt de helling van de rechte. Als x met 1 eenheid toeneemt, dan neemt y met a eenheden toe. Hoe groter de absolute waarde van de rico a , hoe steiler de rechte.

- een positieve rico, hoort bij een stijgende rechte
- een negatieve rico hoort bij een dalende rechte

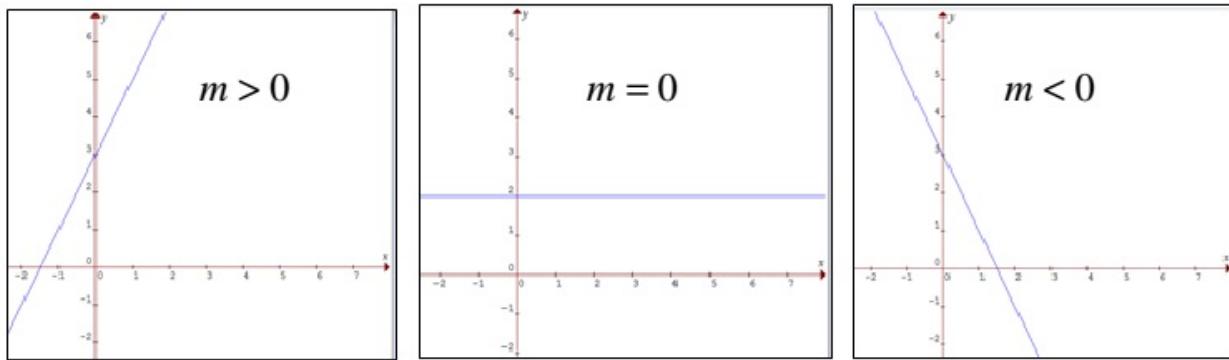
Zie Figuur .6.

Een rechte evenwijdig met de x -as heeft een rico gelijk aan 0. Dit is in feite de constante functie $f(x) = b$.

Een rechte evenwijdig met de y -as heeft geen rico (in dit geval zou $m = \infty$ moeten zijn).

Nulpunten: het snijpunt met de x -as is het punt $(-\frac{b}{a}, 0)$.

Tekenverloop: Zie Tabel .5 en .6.



Figuur .6: Het teken van de rico bepaalt of de rechte stijgt, constant is of daalt.

$$\frac{x}{f(x)} \parallel - \left| \begin{array}{c} -\frac{b}{a} \\ 0 \\ + \end{array} \right|$$

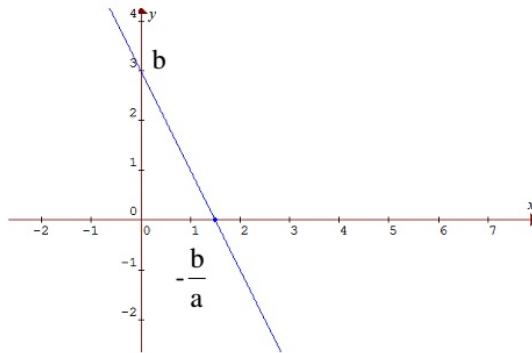
Tabel .5: Tekenverloop voor $a > 0$.

Voorbeeld

Gegeven de functie: $f(x) = -2x + 3$, zie Figuur .7.

Grafische voorstelling:

- het domein van elke lineaire functie is: $\text{dom } f = \mathbb{R}$
- het beeld van deze lineaire functie is: $\text{bld } f = \mathbb{R}$



Figuur .7: Voorbeeld grafische voorstelling van de eerstegraadfunctie.

Nulpunten:

We lossen de vergelijking $y = f(x) = -2x + 3 = 0$ op en vinden: $x = \frac{3}{2}$. Het snijpunt met de x -as is het punt $(\frac{3}{2}, 0)$.

Tekenverloop: zie Tabel .7.

$$\begin{array}{c|cc} x & \parallel & \left| -\frac{b}{a} \right| \\ \hline f(x) & + & 0 \end{array} -$$

Tabel .6: Tekenverloop voor $a < 0$.

$$\begin{array}{c|cc} x & \parallel & \left| \frac{3}{2} \right| \\ \hline f(x) & + & 0 \end{array} -$$

Tabel .7: Voorbeeld eerstegraadsfunctie: tekenverloop

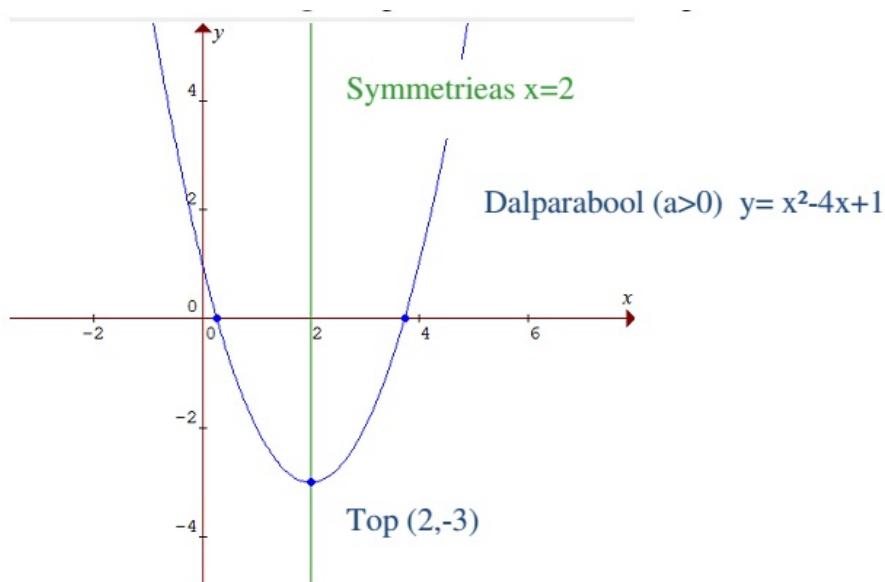
Tweedegraadsfuncties of kwadratische functies

Definitie

Functievoorschrift: $f(x) = ax^2 + bx + c$ met $a \in \mathbb{R}_0$ en $b, c \in \mathbb{R}$

Voorbeelden $f(x) = 3x^2 + 10x + 1$, $f(x) = -2x^2 + 5$, $f(x) = x^2$

Grafische voorstelling van de kwadratische functie is een parabool. Zie Figuur .8



Figuur .8: Grafische voorstelling van een tweedegraadsfunctie.

- als $a > 0$ is de top van de **dalparabool** het minimum
- als $a < 0$ is de top van de **bergparabool** het maximum

Hoe groter de absolute waarde van a , hoe smaller de opening van de parabool is.

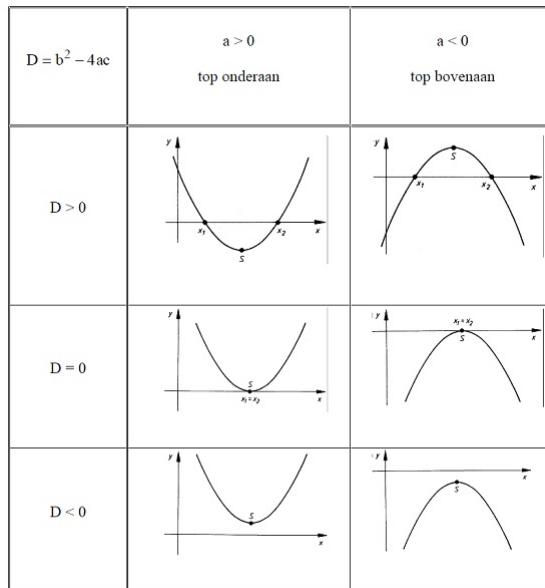
De verticale lijn door de top is de **symmetrieas**. De vergelijking van de symmetrieas is: $x = -\frac{b}{2a}$

Het laagste punt van een dalparabool of het hoogste punt van een bergparabool heet de **top** van de parabool. De top is het snijpunt van de parabool met de verticale symmetrieas. De

coördinaten van de top zijn dus $(-\frac{b}{2a}, y)$. De y -waarde vinden we door de gevonden x -waarde in het functievoorschrift $f(x)$ in te vullen, dus $y = f(-\frac{b}{2a})$.

Nulpunten: stellen we $y = f(x) = ax^2 + bx + c = 0$ (in dat geval spreken we van de **vierkantsvergelijking**), dan vinden we de snijpunten met de x -as. Hiervoor moeten we dus de (vierkants)vergelijking $ax^2 + bx + c = 0$ oplossen. Daarvoor bepaal je best eerst de **discriminant** $D = b^2 - 4ac$ (van de abc formule). Met de discriminant bepaal je het aantal snijpunten van de kwadratische functie met de x -as, zie ook Figuur .9.

- als $D > 0$, dan heeft de vergelijking twee oplossing: $x_1 = \frac{-b+\sqrt{D}}{2a}$ en $x_2 = \frac{-b-\sqrt{D}}{2a}$. De parabool snijdt de x -as op twee plaatsen.
- als $D = 0$, dan heeft de vergelijking één oplossing: $x_1 = x_2 = -\frac{b}{2a}$. De parabool raakt met zijn top de x -as in één punt.
- als $D < 0$, dan heeft de vergelijking geen reële oplossingen. De parabool ligt ofwel boven ofwel onder de x -as.



Figuur .9: Grafische voorstelling van tweedegraadsfuncties voor verschillende waarden van a en D .

Tekenverloop:

- Als $D > 0$

$$\begin{array}{c|c|c|c|c} x & \parallel & x_1 & & x_2 \\ \hline f(x) & \parallel & 0 & \text{tegengesteld teken van } a & 0 \end{array} \quad \begin{array}{c|c|c} & & \text{teken van } a \\ \hline & & \end{array}$$

- Als $D = 0$

$$\begin{array}{c|c|c} x & \parallel & x_1 = x_2 \\ \hline f(x) & \parallel & 0 \end{array} \quad \begin{array}{c|c} & \text{teken van } a \\ \hline & \end{array}$$

- Als $D < 0$

$$\begin{array}{c|c} x & \\ \hline f(x) & \parallel \end{array} \text{ teken van } a$$

Voorbeeld

Gegeven de functie f met voorschrift: $f(x) = -x^2 - 5x + 6$

Grafische voorstelling:

- het domein van elke kwadratische functie is: $\text{dom } f = \mathbb{R}$
- $a = -1 < 0$ dus het is een bergparabool
- de symmetrieas ligt bij $x = -\frac{b}{2a} = -\frac{-5}{2 \cdot (-1)} = -\frac{5}{2} = -2,5$
- de top heeft de coördinaten $(x, y) = (-\frac{b}{2a}, f(-\frac{b}{2a})) = (-2,5; 12, 25)$
- de top van deze bergparabool ligt op $y = 12, 25$. Dit is dus de grootste waarde die y kan bereiken. Het beeld van deze kwadratische functie is daarom: $\text{bld } f =]-\infty; 12, 25]$

Nulpunten:

We lossen de vergelijking $y = f(x) = -x^2 - 5x + 6 = 0$ op d.m.v. de abc formule. We berekenen daarvoor eerst de discriminant D :

$$D = b^2 - 4ac = (-5)^2 - 4 \cdot (-1) \cdot 6 = 25 + 24 = 49$$

Omdat $D > 0$ zijn er 2 reële oplossingen, dus 2 snijpunten met de x -as. Deze zijn:

- $x_1 = \frac{-b+\sqrt{D}}{2a} = \frac{-(-5)+\sqrt{49}}{2 \cdot (-1)} = -6$
- $x_2 = \frac{-b-\sqrt{D}}{2a} = \frac{-(-5)-\sqrt{49}}{2 \cdot (-1)} = 1$

De parabool snijdt de horizontale as in de koppels $(-6,0)$ en $(1,0)$ en de top ligt boven de x -as (want het is een bergparabool), zie ook Figuur .10.

Tekenverloop: Zie Tabel .8

x	\parallel	-	$ $	-6	$ $	+	$ $	1	$ $	-
$f(x)$	\parallel	-	$ $	0	$ $	+	$ $	0	$ $	-

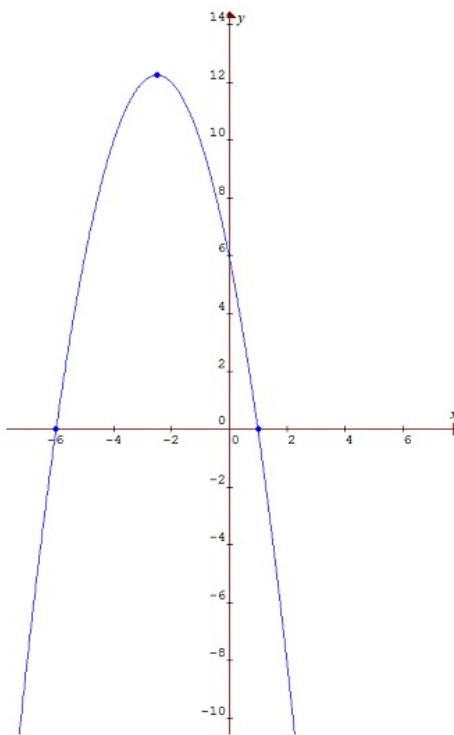
Tabel .8: Voorbeeld tweedegraadsfuncties: tekenverloop

1.5 Tweedegraadsvergelijking - voorbeeld 1

Zie filmpje MOOC.

1.6 Tweedegraadsvergelijking - voorbeeld 2

Zie filmpje MOOC.



Figuur .10: Voorbeeld tweedegraadsfuncties: grafische voorstelling

1.7 Veeltermfuncties

Veeltermfuncties of polynoomfuncties

Definitie

Een veelterm- of polynoomfunctie heeft als functievoorschrift een veelterm in 1 onbekende, dus $f(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_2 x^2 + a_1 x + a_0$ met $a_n \in \mathbb{R}_0$ en $a_{n-1}, \dots, a_0 \in \mathbb{R}$. De constanten a_i noemen we de **coëfficiënten**.

De (meestal eerste) term met de hoogste macht bepaalt de **graad** van de veeltermfunctie.

Voorbeelden

$$f(x) = 2x^4 - 5x^3 + 10x, f(x) = x^3$$

Grafische voorstelling

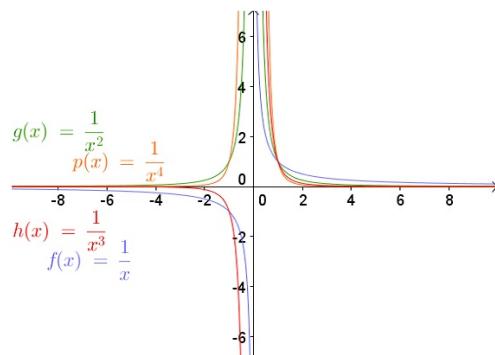
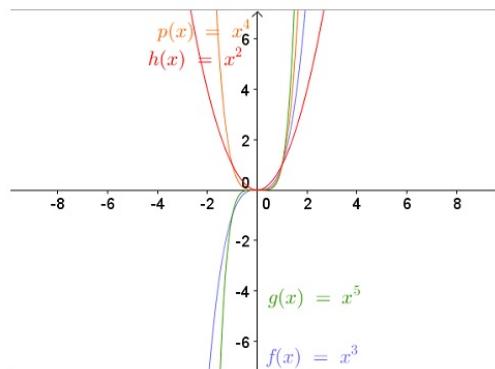
Het domein van een veeltermfunctie is: $\text{dom } f = \mathbb{R}$

De grafieken van de elementaire machtsfuncties $y = x^n$ met positieve exponent zijn hieronder weergegeven:

De grafieken van de elementaire machtsfuncties $y = x^{-n} = \frac{1}{x^n}$ met negatieve exponent zijn hieronder weergegeven:

Nulwaarden

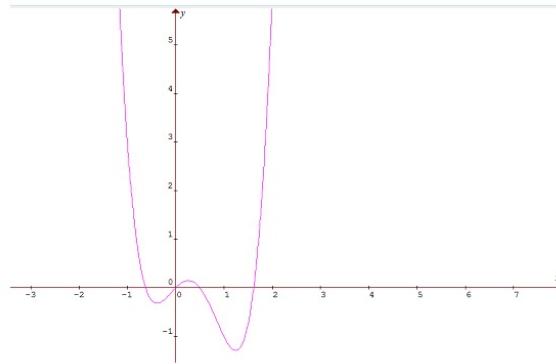
Een n^{de} graadsveeltermfunctie met oneven n heeft minimum 1 en maximum n snijpunten met de x -as.



Een n^{de} graadsveeltermfunctie met even n heeft minimum 0 en maximum n snijpunten met de x -as. De grafiek kan namelijk helemaal boven of onder de x -as liggen, en dus geen snijpunten hebben met de x -as.

Voorbeeld

De functie f met voorschrift $f(x) = 2x^4 - 3x^3 - x^2 + x$ uit Figuur .11 is een 4^{de} graadsvergelijking en heeft in dit geval 4 snijpunten met de x -as:



Figuur .11: Voorbeeld veeltermfunctie.

Nulwaarden vinden

De nulwaarden voor een veeltermfunctie vinden we door het functievoorschrift te ontbinden in een product van factoren met ten hoogste een tweede graad, m.a.w. we ontbinden de veeltermfunctie $f(x)$ in lineaire factoren $x + a$ en in kwadratische factoren $ax^2 + bx + c$. De nulpunten van de functie $f(x)$ zijn dan de nulpunten van de verschillende factoren.

Tekenverloop

Eens een veelterm ontbonden is in factoren, is het eenvoudig om het tekenverloop er van te bepalen. Het tekenverloop van een constante, een lineaire en een kwadratische functie is immers gekend. Het teken van een veeltermfunctie is het product van de tekens van de factoren.

Voorbeeld (een tweedegraadsfunctie verleiden door substitutie)

Deze methode is toepasbaar bij bikwadratische vergelijkingen. Dit zijn vergelijkingen van de vorm $ax^4 + bx^2 + c = 0$. Dit type van vergelijkingen kan herleid worden tot een kwadratische vergelijking met behulp van de substitutiemethode. Stel hierbij $x^2 = t$.

We bekijken de veelterm $f(x) = 4x^4 - 5x^2 + 1$

Nulwaarden

We bepalen de nulwaarden door de veelterm te ontbinden in factoren, gebruik makend van de substitutiemethode:

$$4x^4 - 5x^2 + 1 = 0 \xrightarrow{x^2 = t} 4t^2 - 5t + 1 = 0$$

We bekomen een kwadratische vergelijking. Hiervan zijn de nulpunten:

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{-b + \sqrt{D}}{2a} = \frac{-(-5) + \sqrt{9}}{2.4} = 1 \\ t_2 &= \frac{-b - \sqrt{D}}{2a} = \frac{-(-5) - \sqrt{9}}{2.4} = \frac{1}{4} \end{aligned}$$

De 2 oplossingen voor t zijn $t_1 = 1$ en $t_2 = \frac{1}{4}$ zodat de vergelijking kan geschreven worden als: $4t^2 - 5t + 1 = (t - 1)(t - \frac{1}{4})$.

Aangezien $x^2 = t$ zijn de 4 oplossingen voor x : $x_{1en2} = \pm\sqrt{t_1}$ en $x_{3en4} = \pm\sqrt{t_2}$

Dit geeft $x_1 = 1$, $x_2 = -1$, $x_3 = \frac{1}{2}$ en $x_4 = -\frac{1}{2}$.

De gegeven vergelijking kan dus ook geschreven worden als:

$$f(x) = 4x^4 - 5x^2 + 1 = (x - 1)(x + 1)(x - \frac{1}{2})(x + \frac{1}{2})$$

Tekenverloop

Maak één overzichtelijke tabel met bovenaan alle nulpunten in stijgende volgorde. Per rij onderzoek je het teken van elke factor van $f(x)$. Het teken van $f(x)$ is dan het product van deze tekens.

x	-1	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
$(x - 1)$	-	-	-	0
$(x - \frac{1}{2})$	-	-	0	+
$(x + \frac{1}{2})$	-	0	+	+
$(x + 1)$	0	+	+	+
$f(x)$	+	0	-	+

Voorbeeld 2 (ontbinden in factoren)

We bekijken de veelterm $f(x) = 3x^3 - 4x^2 - 6x + 8$

Nulpunten

We bepalen de nulpunten door de veelterm te ontbinden in factoren. Soms kunnen we gebruik maken van merkwaardige producten of, zoals in dit geval, door het groeperen van gemeenschappelijke termen:

$$\begin{aligned}
 3x^3 - 4x^2 - 6x + 8 &= (3x^3 - 4x^2) - (6x - 8) \\
 &= x^2(3x - 4) - 2(3x - 4) \\
 &= (x^2 - 2)(3x - 4) \\
 &= (x - \sqrt{2})(x + \sqrt{2})(3x - 4)
 \end{aligned}$$

De gegeven vergelijking $3x^3 - 4x^2 - 6x + 8 = 0$ heeft dus 3 nulpunten:

$$x_1 = \sqrt{2}, x_2 = -\sqrt{2} \text{ en } x_3 = \frac{4}{3}$$

Tekenverloop

Maak één overzichtelijke tabel met bovenaan alle nulpunten in stijgende volgorde. Per rij onderzoek je het teken van elke factor van $f(x)$. Het teken van $f(x)$ is dan het product van deze tekens.

x	$-\sqrt{2}$	$\frac{4}{3}$	$\sqrt{2}$	
$(x - \sqrt{2})$	-	-	-	0 +
$(x + \sqrt{2})$	-	0	+	+
$(3x - 4)$	-	-	0	+
$f(x)$	-	0	+	-

Voorbeeld 3 (regel van Horner)

We bekijken de veelterm $f(x) = x^4 - 4x^3 + 5x^2 - 4x + 4$

Nulpunten

We bepalen de nulpunten door de veelterm te ontbinden in factoren gebruik makend van de regel van Horner.

Ga na welke mogelijke delers van a_0 kunnen afgesplitst worden zonder rest. Hier zijn de delers van $a_0 = 4$: $\pm 1, \pm 2$ en ± 4

We proberen $x = +2$: $f(2) = (2)^4 - 4(2)^3 + 5(2)^2 - 4(2) + 4 = 0$

Dus de factor $(x - 2)$ kan afgesplitst worden. De coëfficiënten van de resterende veelterm vinden we via de regel van Horner:

$$\begin{array}{r|ccccc}
 & 1 & -4 & 5 & -4 & 4 \\
 2 & \downarrow & 2 & -4 & 2 & -4 \\
 \hline
 & 1 & -2 & 1 & -2 & 0
 \end{array}$$

We vinden $f(x) = x^4 - 4x^3 + 5x^2 - 4x + 4 = (x - 2)(x^3 - 2x^2 + x - 2)$

We kunnen proberen om nog een factor af te splitsten.

We proberen nog eens $x = +2$: $f(2) = (2)^3 - 2(2)^2 + (2) - 2 = 0$

Dus de factor $(x - 2)$ kan nog eens afgesplitst worden. De coëfficiënten van de resterende veelterm vinden we terug via de regel van Horner:

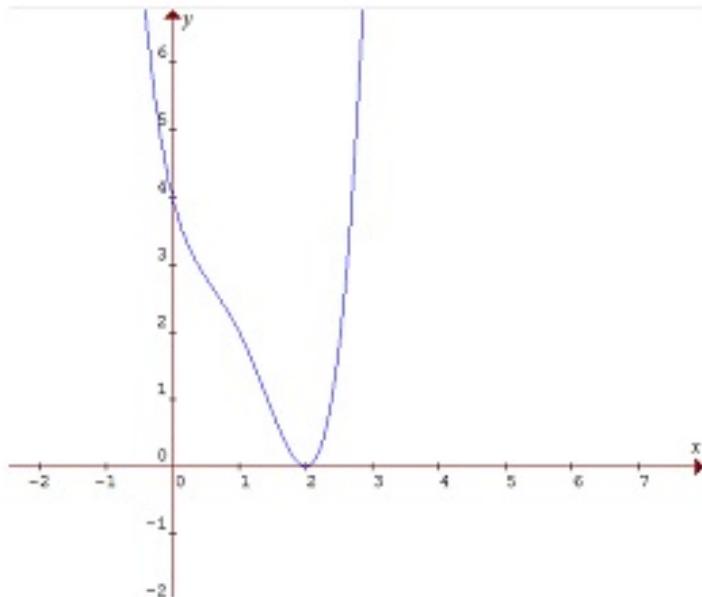
$$\begin{array}{r} \left| \begin{array}{rrrr} 1 & -2 & 1 & -2 \\ 2 & \downarrow & 2 & 0 & 2 \\ \hline 1 & 0 & 1 & | & 0 \end{array} \right. \end{array}$$

We vinden tenslotte: $f(x) = x^4 - 4x^3 + 5x^2 - 4x + 4 = (x - 2)^2(x^2 + 1)$

Merk op dat de discriminant D van $(x^2 + 1)$ negatief is zodat deze factor geen nulpunten heeft.

We vinden voor $x = 2$ een dubbel nulpunt; deze veelterm heeft dus 2 samenvallende snijpunten met de x -as.

Aangezien zowel de factor $(x - 2)^2$ als ook de factor $(x^2 + 1)$ steeds positief zijn, is er voor geen enkele waarde van x een negatief beeld (de functie bevindt zich overall boven de x -as, en in het punt $x = 2$ raakt deze veelterm de x -as), zie ook Figuur .12.



Figuur .12: Veeltermfuncties: voorbeeld 4.

Tekenverloop

Maak één overzichtelijke tabel met bovenaan alle nulpunten in stijgende volgorde. Per rij onderzoek je het teken van elke factor van $f(x)$. Het teken van $f(x)$ is dan het product van deze tekens.

x		2	
$(x - 2)^2$	+	0	+
$(x^2 + 1)$	+	+	+
$f(x)$	+	0	+

1.8 Rationale functies

Algemeen

Functievoorschrift

$f(x) = \frac{t(x)}{n(x)}$ met $t(x)$ en $n(x)$ veeltermfuncties en waarbij de graad van $n(x)$ minstens 1 is.

Voorbeelden van rationale functies: $f(x) = \frac{x^2}{1+x}$, $f(x) = \frac{1}{x^2-1}$, $f(x) = \frac{3x-9}{x-3}$

Voorbeelden van geen rationale functies: $f(x) = \frac{\sin x}{4x}$, $f(x) = \frac{2^x}{3x+5}$, $f(x) = \frac{\sqrt{x-1}}{x-3}$

Grafische voorstelling

Het domein van een rationale functie is $\mathbb{R} \setminus \{\text{nulpunten van de noemer}\}$.

Voorbeeld: het domein van $f(x) = \frac{2x+2}{x-8}$ is $\mathbb{R} \setminus \{8\}$

Nulpunten

De nulpunten van een rationale functie $f(x)$, zijn de nulpunten van de teller, die niet de nulpunten van de noemer zijn.

De nulpunten van de noemer, noemen we de polen van de rationale functie $f(x)$. Bij elke pool hoort een verticale asymptoot.

Punten die zowel nulpunt zijn van teller als noemer, geven aanleiding tot de vorm $\frac{0}{0}$. Aangezien deze punten de noemer nul maken, horen ze niet tot het domein, maar geven ook geen aanleiding tot een asymptoot.

Asymptoten

1) De rechte $x = a$ is een **verticale asymptoot** (VA) van de rationale functie $f(x)$ als en slechts als a een nulpunt is van de noemer en geen nulpunt van de teller.

$$\lim_{x \rightarrow a^-} f(x) = \pm\infty \quad \text{of} \quad \lim_{x \rightarrow a^+} f(x) = \pm\infty$$

$\Rightarrow x = a$ is een VA

Voorbeeld 1: $f(x) = \frac{2x+1}{x-1}$

Het nulpunt van de noemer, of de pool is $x = 1$. Dit punt is geen nulpunt van de teller. Dus, $x = 1$ is een verticale asymptoot. De functie $f(x)$ is niet gedefinieerd in het punt $x = 1$.

$$\lim_{x \rightarrow 1^-} \left(\frac{2x+1}{x-1} \right) = -\infty \quad \text{en} \quad \lim_{x \rightarrow 1^+} \left(\frac{2x+1}{x-1} \right) = +\infty$$

$\Rightarrow x = 1$ is een VA

2) Een rationale functie $f(x)$ heeft een **horizontale asymptoot** (HA) als en slechts als de graad van de teller \leq graad van de noemer.

$$\lim_{x \rightarrow \pm\infty} f(x) = b$$

$\Rightarrow y = b$ is een HA

Voorbeeld 2: $f(x) = \frac{2x + 7}{4x^2 + x + 2}$

De graad van de teller is 1, en de graad van de noemer is 2; dus deze functie heeft een horizontale asymptoot.

$$\lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{2x + 7}{4x^2 + x + 2} \stackrel{HGT}{=} \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{2x}{4x^2} = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{1}{2x} = 0$$

$\Rightarrow y = 0$ is een HA

3) Een rationale functie $f(x)$ heeft een **schuine asymptoot** (SA) als en slechts als de graad van de teller = graad van de noemer +1.

$$m = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{f(x)}{x} \quad \text{en} \quad q = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} [f(x) - mx]$$

$\Rightarrow y = mx + q$ is een SA

Voorbeeld 3: $f(x) = \frac{x^3 - 4}{2x^2}$

De graad van de noemer is 2, en de graad van de teller is (2+1=) 3, dus deze functie heeft een schuine asymptoot.

$$m = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{f(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{x^3 - 4}{2x^3} \stackrel{HGT}{=} \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{x^3}{2x^3} = \frac{1}{2}$$

$$q = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \left[\frac{x^3 - 4}{2x^2} - \frac{1}{2}x \right] = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \left[\frac{x^3 - 4 - x^3}{2x^2} \right] = 0$$

$$\Rightarrow y = \frac{1}{2}x \text{ is een SA}$$

Opmerking: Als een functie $f(x)$ voor $x \rightarrow +\infty$ een horizontale asymptoot heeft, kan ze voor $x \rightarrow +\infty$ geen schuine asymptoot meer hebben. Hetzelfde geldt voor $x \rightarrow -\infty$.

Tekenverloop

Om het tekenverloop van een rationale functie te bepalen, moet het tekenonderzoek van de teller en de noemer worden uitgevoerd. Het tekenverloop van een constante, een lineaire en een

kwadratische functie is gekend (zie Module 2 B - Eerstegraads-, tweedegraads- en veeltermfuncties). Het teken van de rationale functie is het product van het teken van de teller en het teken van de noemer.

Een voorbeeld

Bespreek de rationale functie $f(x) = \frac{3x^2}{x^2 - 2}$

Domein

$$\text{dom } f(x) = \mathbb{R} \setminus \{-\sqrt{2}, \sqrt{2}\}$$

want de noemer mag niet nul worden. Dit gebeurt als $x^2 - 2 = 0 \iff x = \pm\sqrt{2}$

Nulpunten

Stap 1: Bepaal de nulpunten van de teller, deze zijn de nulpunten van de functie $f(x)$.

$$\text{Dus } 3x^2 = 0 \iff x = 0$$

$x = 0$ is een nulpunt van de teller, maar niet van de noemer, dus dit punt is een nulpunt van de functie $f(x)$.

Stap 2: Bepaal de nulpunten van de noemer, deze zijn de polen van de functie $f(x)$. Bij elke pool hoort een verticale asymptoot.

$x = -\sqrt{2}$ en $x = +\sqrt{2}$ zijn de nulpunten van de noemer, de functie $f(x)$ heeft dus twee verticale asymptoten.

Asymptoten

Stap 3: Ga na of de functie een verticale asymptoot bezit.

De rechte $x = -\sqrt{2}$ is een verticale asymptoot (VA) van de functie $f(x)$ aangezien $-\sqrt{2}$ een nulpunt is van de noemer en geen nulpunt van de teller is.

Hoe verloopt de functie $f(x)$ in de buurt van deze asymptoot:

$$\text{LL : } \lim_{\substack{x \rightarrow -\sqrt{2} \\ <}} \left(\frac{3x^2}{x^2 - 2} \right) = +\infty \quad \text{en} \quad \text{RL : } \lim_{\substack{x \rightarrow -\sqrt{2} \\ >}} \left(\frac{3x^2}{x^2 - 2} \right) = -\infty$$

dus $\Rightarrow x = -\sqrt{2}$ is een VA

De rechte $x = +\sqrt{2}$ is een verticale asymptoot (VA) van de functie $f(x)$ aangezien $+\sqrt{2}$ een nulpunt is van de noemer en geen nulpunt van de teller is.

Hoe verloopt de functie $f(x)$ in de buurt van deze asymptoot:

$$\text{LL : } \lim_{\substack{x \rightarrow \sqrt{2} \\ <}} \left(\frac{3x^2}{x^2 - 2} \right) = -\infty \quad \text{en} \quad \text{RL : } \lim_{\substack{x \rightarrow \sqrt{2} \\ >}} \left(\frac{3x^2}{x^2 - 2} \right) = +\infty$$

dus $\Rightarrow x = +\sqrt{2}$ is een VA

Stap 4: Ga na of de functie een horizontale asymptoot bezit. De functie $f(x)$ heeft een horizontale asymptoot (HA) aangezien de graad van teller (2^{de} graad) = graad van de noemer (2^{de} graad).

$$\lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{3x^2}{x^2 - 2} \stackrel{HGT}{=} \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{3x^2}{x^2} = 3$$

dus $\Rightarrow y = 3$ is een HA

Stap 5: Ga na of de functie een schuine asymptoot heeft. De functie $f(x)$ heeft voor $x \rightarrow +\infty$ en $x \rightarrow -\infty$, al een horizontale asymptoot en kan bijgevolg geen schuine asymptoot meer hebben.

Tekenverloop

- Stap 6:
- Schrijf in /'e/'en tabel bovenaan alle nulpunten en alle polen in stijgende volgorde.
 - Onderzoek het teken voor elke factor van $f(x)$.
 - Het teken van $f(x)$ is dan het product van deze tekens.

x		$-\sqrt{2}$		0		$-\sqrt{2}$		$\rightarrow \mathbb{R}$
$3x^2$	+		+	0	+		+	
$x^2 - 2$	+	0	-	-	-	0	+	
$f(x) = \frac{3x^2}{x^2 - 2}$	+		-	0	-		+	

Grafiek

Onthoud

De grafiek en het tekenverloop van een rationale functie bepaal je als volgt:

$f(x) = \frac{t(x)}{n(x)}$ met $t(x)$ en $n(x)$ veeltermfuncties en waarbij de graad van $n(x)$ minstens 1 is.

Het domein van een rationale functie is $\mathbb{R} \setminus \{\text{nulpunten van de noemer}\}$.

Stap 1: Bepaal de nulpunten van de teller, dit zijn de nulpunten van de functie $f(x)$.

Stap 2: Bepaal de nulpunten van de noemer, dit zijn de polen van de functie $f(x)$.

Stap 3: De rechte $x = a$ is een **verticale asymptoot** (VA) van de rationale functie $f(x)$ als en slechts als a een nulpunt is van de noemer en maar geen nulpunt van de teller.

$$\lim_{x \rightarrow a^-} f(x) = \pm\infty \quad \text{of} \quad \lim_{x \rightarrow a^+} f(x) = \pm\infty \quad \Rightarrow x = a \text{ is een VA}$$

Stap 4: Een rationale functie $f(x)$ heeft een **horizontale asymptoot** (HA) als en slechts als de graad van de teller \leq graad van de noemer. Maar hou wel rekening met het domein.

$$\lim_{x \rightarrow \pm\infty} f(x) = b \quad \Rightarrow y = b \text{ is een HA}$$

Stap 5: Een rationale functie $f(x)$ heeft een **schuine asymptoot** (SA) als en slechts als de graad van de teller = graad van de noemer +1. Maar hou wel rekening met het domein.

$$m = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{f(x)}{x} \quad \text{en} \quad q = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} [f(x) - mx]$$

$\Rightarrow y = mx + q$ is een SA

Stap 6: Bepaal het tekenverloop

- Schrijf in /'e/'en tabel bovenaan alle nulpunten en alle polen in stijgende volgorde.
- Onderzoek het teken voor elke factor van $f(x)$.
- Het teken van $f(x)$ is dan het product van deze tekens.

1.9 Irrationale functies

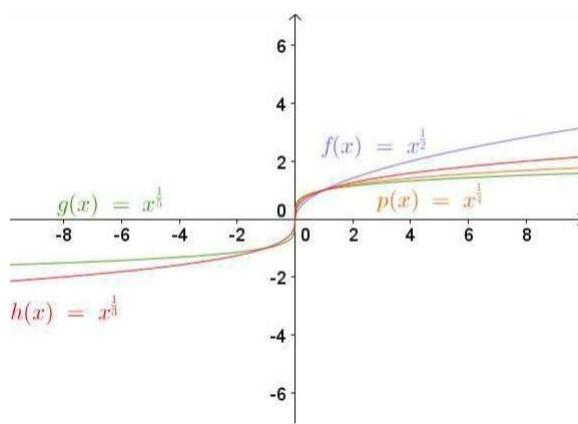
Algemeen

Voorbeelden van irrationale functies

$$f(x) = \sqrt{x^2 + 2x + 4}, f(x) = 2\sqrt[3]{x^5 - 3x^2 + 7} - x - 1, f(x) = \frac{x - 2}{\sqrt{10 - x^2}}$$

Grafische voorstelling

De grafiek van de elementaire wortelfuncties $y = \sqrt[n]{x}$ is hieronder weergegeven. Denk eraan dat (machts)wortels ook als macht kunnen geschreven worden: $y = \sqrt[n]{x} = x^{\frac{1}{n}}$.



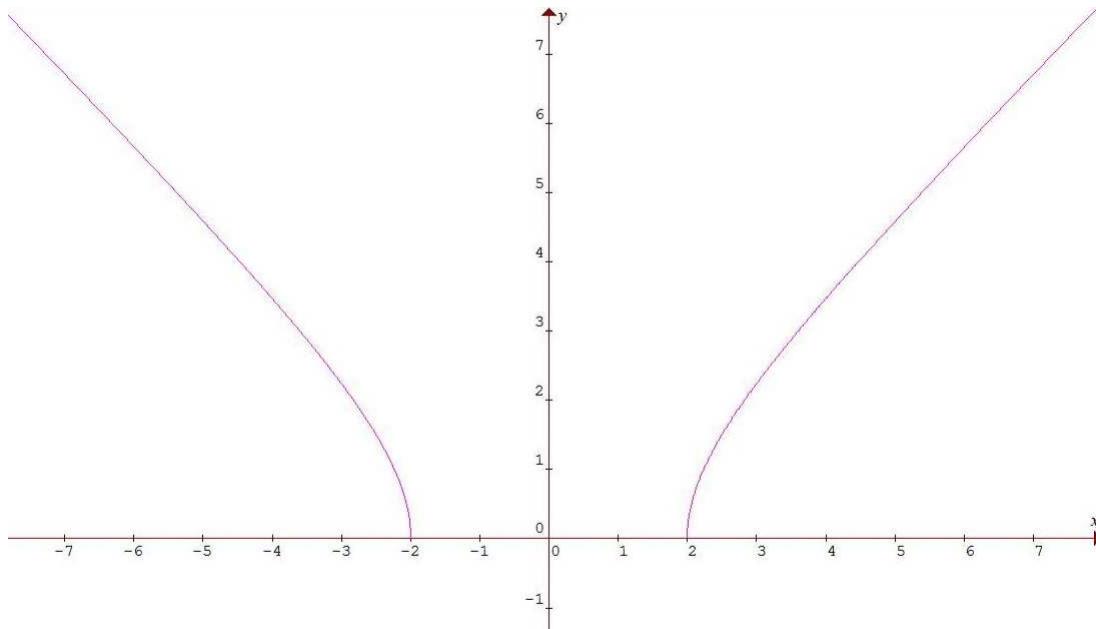
Om het domein (de toegelaten waarden voor x) te bepalen moeten we rekening houden met zowel de *bestaansvoorwaarden* als de *kwadrateringsvoorwaarde*.

Bestaansvoorwaarde(n): de uitdrukking onder een even machtswortel moet steeds positief zijn!! En niet vergeten, de eventuele noemer mag niet nul worden.

Kwadrateringsvoorwaarde: we spreken af dat een even machtswortel uit een uitdrukking steeds positief is.

Het domein van een irrationale functie valt samen met de intervallen, waar de vorm onder de vierkantwortel niet negatief is en waar de uitdrukking van een even machtsfunctie steeds een positief resultaat oplevert.

Voorbeeld 1: $f(x) = \sqrt{x^2 - 4}$



Om het domein van de functie $f(x)$ te bepalen moet er aan de bestaansvoorwaarde(n) voldaan zijn. In dit geval mag de functie onder het wortelteken niet negatief worden. We werken dit verder uit:

$$x^2 - 4 \geq 0$$

$$\begin{aligned} \text{De bestaansvoorwaarde: } & \iff x^2 \geq 4 \\ & \iff x \geq 2 \quad \text{en} \quad x \leq -2 \end{aligned}$$

De kwadrateringsvoorwaarde is reeds voldaan (want er staat infeite $f(x) = +\sqrt{x^2 - 4}$)

Welke waarden van x voldoen hier nu aan?

$\text{dom } f(x)$ is voor $x \in]-\infty, -2] \cup [2, +\infty[$

Voorbeeld 2: $f(x) = x + \sqrt{5x + 2} - 1$

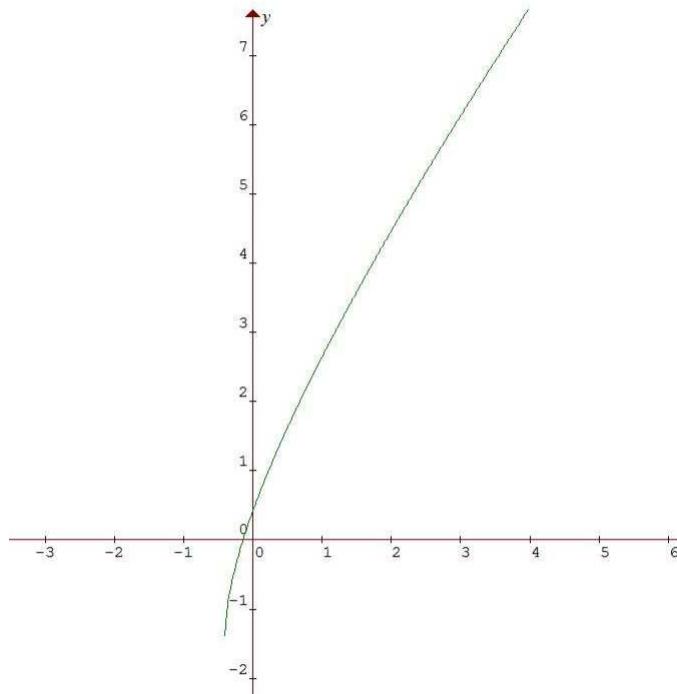
Om het domein van de functie $f(x)$ te bepalen moet er aan de bestaansvoorwaarde(n) voldaan zijn. In dit geval mag de functie onder het wortelteken niet negatief worden. We werken dit verder uit:

$$5x + 2 \geq 0$$

$$\begin{aligned} \text{De bestaansvoorwaarde: } & \iff x \geq -\frac{2}{5} \end{aligned}$$

$$\text{dus } \iff x \in [-\frac{2}{5}, +\infty[$$

Nu moeten we nog de kwadrateringsvoorwaarde controleren, m.a.w. volgens onze gemaakte afspraak is een even machtwortel uit een uitdrukking steeds positief is:



$$\begin{aligned}
 x + \sqrt{5x + 2} &= 1 \\
 \iff \sqrt{5x + 2} &= 1 - x \geq 0 \\
 \iff 1 - x &\geq 0 \\
 \text{dus } x &\leq 1 \\
 \text{of } x &\in]-\infty, 1]
 \end{aligned}$$

De mogelijke waarden voor x moeten aan beide voorwaarden voldoen. Dit betekent:

$\text{dom } f(x)$ is voor $x \in [-\frac{2}{5}, 1]$

Nulpunten

De vergelijking wordt $f(x) = 0$.

De wortelvormen kan je wegwerken door beide leden van de vergelijking te verheffen tot een gepaste macht. Bepaal vervolgens de nulpunten van de functie. Wanneer een breuk voorkomt in het functievoorschrift, bepaal dan ook de nulpunten van de noemer, deze zijn de polen.

Asymptoten

1) De rechte $x = a$ is een **verticale asymptoot** (VA) van de irrationale functie $f(x)$ als en slechts als a een nulpunt is van de noemer en geen nulpunt van de teller.

$$\lim_{\substack{x \rightarrow a \\ <}} f(x) = \pm\infty \quad \text{of} \quad \lim_{\substack{x \rightarrow a \\ >}} f(x) = \pm\infty$$

$$\Rightarrow x = a \text{ is een VA}$$

2) Een irrationale functie $f(x)$ heeft een **horizontale asymptoot** (HA) als en slechts als de graad van de teller \leq graad van de noemer.

$$\lim_{x \rightarrow \pm\infty} f(x) = b$$

$\Rightarrow y = b$ is een HA

3) Een irrationale functie $f(x)$ heeft een **schuine asymptoot (SA)** als en slechts als de graad van de teller = graad van de noemer +1.

$$m = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{f(x)}{x} \quad \text{en} \quad q = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} [f(x) - mx]$$

$\Rightarrow y = mx + q$ is een SA

Tekenverloop

Wanneer je de wortels hebt weggewerkt door de vergelijking te verheffen tot een gepaste macht, zal je een veeltermfunctie, een kwadratische of een lineaire functie bekomen. Pas het desbetreffend tekenonderzoek toe.

Een voorbeeld

Bespreek de irrationale functie $f(x) = \frac{\sqrt{4-x^2}}{x-1}$

Domein

$$\text{dom } f(x) = [-2, 1] \cup [1, 2]$$

$$4 - x^2 \geq 0$$

want de bestaansvoorwaarden zijn:

dus	\iff	$x^2 \leq 4$
of	\iff	$x \leq 2$ en $x \geq -2$
		$x \in [-2, 2]$

en: $x - 1 \neq 0$
dus $\iff x \neq 1$

De kwadrateringsvoorwaarde is hier niet van toepassing (vanwege de noemer kan $f(x)$ ook negatief worden).

Nulpunten

Stap 1: Bepaal de nulpunten van de teller, deze zijn de nulpunten van de functie $f(x)$.

$$\begin{aligned}
 f(x) &= 0 \\
 &\iff \frac{\sqrt{4-x^2}}{x-1} = 0 \\
 \text{Dus} \quad &\iff \sqrt{4-x^2} = 0 \\
 &\iff 4 - x^2 = 0 \\
 &\iff x^2 = 4 \\
 &\iff x = \pm 2
 \end{aligned}$$

x		-2		1		2		$\rightarrow \mathbb{R}$
$\sqrt{4 - x^2}$	/	0	+		+	0	/	
$x - 1$	/		-	0	+		/	
$f(x) = \frac{\sqrt{4 - x^2}}{x - 1}$	/	0	-		+	0	/	

Stap 2: Bepaal eventueel de nulpunten van de noemer, deze zijn de polen van de functie $f(x)$. Bij elke pool hoort een verticale asymptoot.

Het nulpunt van de noemer is $x = 1$ (dit is dan tevens de vergelijking van de verticale asymptoot).

Asymptoten

Stap 3: Ga na of de functie een verticale asymptoot bezit.

De rechte $x = 1$ is een verticale asymptoot (VA) van de functie $f(x)$ aangezien 1 een nulpunt is van de noemer en geen nulpunt van de teller is.

Hoe verloopt de functie $f(x)$ in de buurt van deze asymptoot:

$$\text{LL : } \lim_{\substack{x \rightarrow 1 \\ x < 1}} \left(\frac{\sqrt{4 - x^2}}{x - 1} \right) = -\infty \quad \text{en} \quad \text{RL : } \lim_{\substack{x \rightarrow 1 \\ x > 1}} \left(\frac{\sqrt{4 - x^2}}{x - 1} \right) = +\infty$$

dus $\Rightarrow x = 1$ is een VA

Stap 4: Ga na of de functie een horizontale asymptoot bezit.

De functie heeft geen horizontale asymptoot, want x die nadert naar $+\infty$ of $-\infty$ behoort niet tot het domein.

Stap 5: Ga na of de functie een schuine asymptoot heeft.

De functie heeft geen schuine asymptoot, want x die nadert naar $+\infty$ of $-\infty$ behoort niet tot het domein.

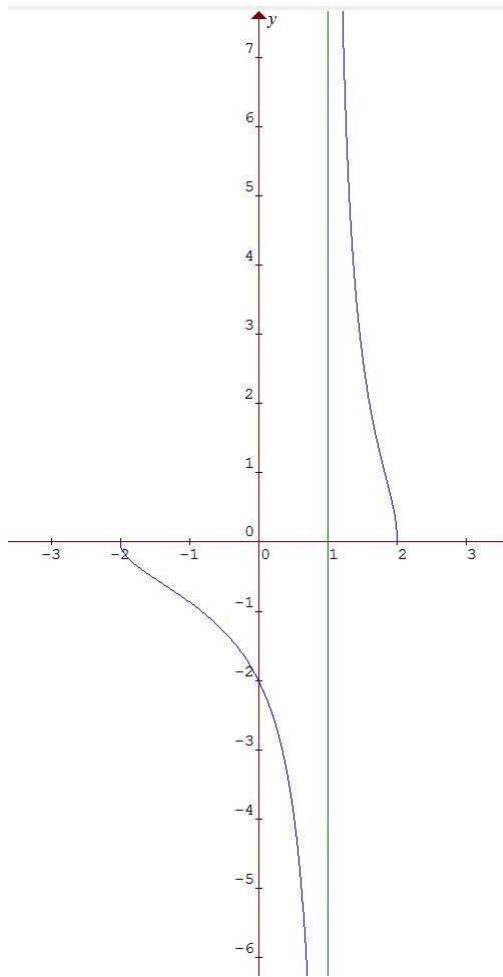
Tekenverloop

Stap 6:

- Schrijf in /'e/'en tabel bovenaan alle nulpunten en alle polen in stijgende volgorde.
- Onderzoek het teken voor elke factor van $f(x)$.
- Het teken van $f(x)$ is dan het product van deze tekens.

Grafiek

Onthoud



De grafiek en het tekenverloop van een irrationale functie bepaal je als volgt:

Het domein van een irrationale functie valt samen met de intervallen, waar de vorm onder de vierkantswortel niet negatief (BVW) is en waar de uitdrukking van een even machtsfunctie steeds een positief resultaat oplevert (KVW).

Stap 1: Bepaal de nulpunten van de teller, dit zijn de nulpunten van de functie $f(x)$.

Stap 2: Bepaal eventueel de nulpunten van de noemer, dit zijn de polen van de functie $f(x)$.

Stap 3: De rechte $x = a$ is een **verticale asymptoot** (VA) van de irrationale functie $f(x)$ als en slechts als a een nulpunt is van de noemer en maar geen nulpunt van de teller.

$$\lim_{\substack{x \rightarrow a \\ <}} f(x) = \pm\infty \quad \text{of} \quad \lim_{\substack{x \rightarrow a \\ >}} f(x) = \pm\infty \quad \Rightarrow \quad x = a \text{ is een VA}$$

Stap 4: Een irrationale functie $f(x)$ heeft een **horizontale asymptoot** (HA) als en slechts als de graad van de teller \leq graad van de noemer.

$$\lim_{x \rightarrow \pm\infty} f(x) = b \quad \Rightarrow \quad y = b \text{ is een HA}$$

Stap 5: Een irrationale functie $f(x)$ heeft een **schuine asymptoot** (SA) als en slechts als de graad van de teller = graad van de noemer +1.

$$m = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{f(x)}{x} \quad \text{en} \quad q = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} [f(x) - mx]$$

$$\Rightarrow y = mx + q \text{ is een SA}$$

Stap 6: Bepaal het tekenverloop

- Schrijf in /'e/'en tabel bovenaan alle nulpunten en alle polen in stijgende volgorde.
- Hou rekening met de bestaansvoorwaarde en de kwadrateringsvoorwaarde.
- Onderzoek het teken voor elke factor van $f(x)$.
- Het teken van $f(x)$ is dan het product van deze tekens.

1.10 Exponentiële functies

Definities

De exponentiële functie is van de vorm:

$$y = a^x \text{ met } a \in \mathbb{R}_0^+ \setminus \{1\} \text{ en } x \in \mathbb{R}$$

a noemen we het **grondtal**, en moet strikt positief en verschillend van 1 zijn.

x noemen we de **exponent**, en is een reëel getal.

Voorbeelden:

$$4^2 = 16$$

$$3^{-2} = \frac{1}{3^2} = \frac{1}{9}$$

$$5^{\frac{2}{3}} = \sqrt[3]{5^2}$$

$$5^{-\frac{3}{2}} = \frac{1}{5^{\frac{3}{2}}} = \frac{1}{\sqrt{5^3}} = \frac{1}{\sqrt{5^2 \cdot 5}} = \frac{1}{5\sqrt{5}}$$

$$\sqrt{25} = 5$$

$$\sqrt[4]{10000} = 10$$

$$\sqrt[5]{-32} = -2$$

$$\sqrt[3]{8} = 2$$

worteltrekken	vergelijking oplossen
$\sqrt{4} = 2$	$\begin{aligned}x^2 &= 4 \\ x &= \pm\sqrt{4} \\ x &= \pm 2\end{aligned}$
	$x_1 = -2 \text{ en } x_2 = +2$

Opmerking: de positieve tweedemachts- of vierkantswortel van 25 is 5, want $5 > 0$ en $5^2 = 25$, dit wordt genoteerd als $\sqrt{25} = 5$. En de negatieve tweedemachts- of vierkantswortel van 25 is -5, want $-5 < 0$ en $(-5)^2 = 25$, dit wordt genoteerd als $-\sqrt{25} = -5$. Ook je rekenmachine zal bij $\sqrt{25}$ als resultaat 5 geven. Verwar dit niet met het oplossen van de vergelijking $x^2 = 25$. In dit geval zijn de twee oplossingen van de vergelijking: $x = \pm\sqrt{25} = \pm 5$.

Bijzondere gevallen

- De exponentiële functie met grondtal e ($e = 2,718281828$) wordt genoteerd als $y = e^x$.
- $a^0 = 1$
- $a^1 = a$
- Als n even is spreekt men van een *evenmachtswortel* ($\sqrt{}$, $\sqrt[4]{}$, ...), is n oneven dan spreekt men van een *onevenmachtswortel* ($\sqrt[3]{}$, $\sqrt[5]{}$, ...).
- Positieve reële getallen hebben twee tegengestelde evenmachtswortels en juist /'e/'en positieve onevenmachtswortel.
- als n even is, dan heeft elk reëel getal a twee n^{de} machtwortels die tegengesteld zijn, genoteerd door $-\sqrt[n]{a}$ en $\sqrt[n]{a}$, of kortweg $\pm\sqrt[n]{a}$.
- als n oneven is, dan heeft elk reëel getal a juist /'e/'en n^{de} machtwortel, genoteerd door $\sqrt[n]{a}$.
- Als n even is, dan hebben de negatieve getallen geen n^{de} machtwortel; dus negatieve reële getallen hebben geen (reële) evenmachtswortel en juist /'e/'en onevenmachtswortel welke negatief is.

Let op: worteltrekken is niet hetzelfde als het oplossen van een vergelijking:

Rekenregels

Opmerkingen:

- aangezien $1 = \frac{a}{a} = a^{1-1} = a^0$ zie je waarom we zeggen dat $a^0 = 1$.
- formules met wortels kan je (gemakkelijk) terugvinden als je de wortelvorm herschrijft d.m.v. machten:

machten	wortels
$a^m a^n = a^{m+n}$	$\sqrt[m]{a} \cdot \sqrt[n]{a} = \sqrt[m \cdot n]{a^{m+n}}$
$\frac{a^m}{a^n} = a^{m-n}$	$\sqrt[n]{a^m} = a^{\frac{m}{n}}$
$\left(\frac{1}{a}\right)^n = a^{-n}$	$\sqrt[n]{a} = a^{\frac{1}{n}}$
$(a^m)^n = a^{m \cdot n}$	$\sqrt[n]{\sqrt[m]{a}} = \sqrt[m \cdot n]{a}$
$(a \cdot b)^n = a^n \cdot b^n$	$\sqrt[n]{a \cdot b} = \sqrt[n]{a} \cdot \sqrt[n]{b}$
$\left(\frac{a}{b}\right)^n = \frac{a^n}{b^n}$	$\sqrt[n]{\frac{a}{b}} = \frac{\sqrt[n]{a}}{\sqrt[n]{b}}$

$$\sqrt[m]{a} \cdot \sqrt[n]{a} = a^{\frac{1}{m}} \cdot a^{\frac{1}{n}} = a^{\frac{1}{m} + \frac{1}{n}} = a^{\frac{m+n}{m \cdot n}} = \sqrt[m \cdot n]{a^{m+n}}$$

- laat je niet vangen: $\sqrt{a+b} \neq \sqrt{a} + \sqrt{b}$
- een veel gebruikte bewerking is het wortelvrij maken van de noemen, bv.: $\frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}}{2}$.

Opplossen van exponentiële vergelijkingen

- Algemeen

In sommige opgaves kom je exponentiële vergelijkingen tegen. Dit zijn vergelijkingen waar de onbekende voorkomt in de exponent. Om exponentiële vergelijkingen vlot te kunnen oplossen, maak je best gebruik van onderstaand stappenplan:

Stap 1: Noteer de vergelijking in haar standaardvorm: $a^{f(x)} = c$ of $a^{f(x)} = a^{g(x)}$ of $a^{f(x)} = b^{g(x)}$

Stap 2: Laat op beide leden van de vergelijking een geschikte logaritmische functie inwerken.

Stap 3: Stop de uitkomst in de opgave en controleer.

- Voorbeeld1: $a^{f(x)} = c$

Los op: $8^{x-1} - 4 = 0$

$$\begin{aligned}
 8^{x-1} - 4 &= 0 \\
 \iff 8^{x-1} &= 4 && \text{(stap 1)} \\
 \iff 2^{3x-3} &= 2^2 && \text{(zoek een verband tss 8, 4 en 2)} \\
 \iff \log 2^{3x-3} &= \log 2^2 && \text{(stap 2)} \\
 \iff 3x-3 &= 2 \\
 \iff x &= \frac{5}{3}
 \end{aligned}$$

In stap 3 controleer je dat $8^{\frac{5}{3}-1} - 4 = 0$? Dit is ok.

Opmerking: stap 2 kan je ook in gedachten doen, m.a.w. hoef je niet op te schrijven.

- Voorbeeld2: $a^{f(x)} = b^{g(x)}$

Los op: $50\sqrt{0,1^x} = 10^{x+1}\sqrt{2,5}$

$$50\sqrt{0,1^x} = 10^{x+1}\sqrt{2,5}$$

$$\iff 50 \cdot (0,1)^{\frac{x}{2}} = 10^{x+1}\sqrt{2,5} \quad (\text{stap 1})$$

$$\iff 50 \cdot 10^{-\frac{x}{2}} = 10^x \cdot 10 \cdot \sqrt{2,5} \quad (\text{zoek een verband tss } 0,1 \text{ en } 10)$$

$$\iff 10^{-\frac{x}{2}} \cdot 10^{-x} = \frac{10 \cdot \sqrt{2,5}}{50} \quad (\text{zet alle factoren met } x \text{ bij elkaar})$$

$$\iff 10^{-\frac{3}{2}x} = \sqrt{\frac{100 \cdot 2,5}{2500}} \quad (\text{stap 2})$$

$$\iff \log 10^{-\frac{3}{2}x} = \log 10^{-\frac{1}{2}}$$

$$\iff -\frac{3}{2}x = -\frac{1}{2}$$

$$\iff x = \frac{1}{3}$$

In stap 3 controleer je dat $50\sqrt{0,1^{\frac{1}{3}}} = 10^{\frac{1}{3}+1}\sqrt{2,5}$? Dit is ok.

Opmerking: stap 2 kan je ook in gedachten doen, m.a.w. hoef je niet op te schrijven.

- Voorbeeld3: substitutie

Los op: $2^{2x} - 3 \cdot 2^{(x+2)} + 36 = 0$

$$2^{2x} - 3 \cdot 2^{(x+2)} + 36 = 0$$

$$2^{2x} - 3 \cdot 2^x \cdot 2^2 + 36 = 0$$

$$2^{2x} - 12 \cdot 2^x + 36 = 0 \quad (\text{herken dat } 2^{2x} = (2^x)^2)$$

$$\text{stel } 2^x = t$$

$$t^2 - 12t + 36 = 0 \quad (\text{los de vierkantsvgl op})$$

$$t_{1\text{en}2} = \frac{-(-12) \pm \sqrt{(-12)^2 - 4 \cdot 1 \cdot 36}}{2 \cdot 1} = \frac{12 \pm 0}{2} = 6$$

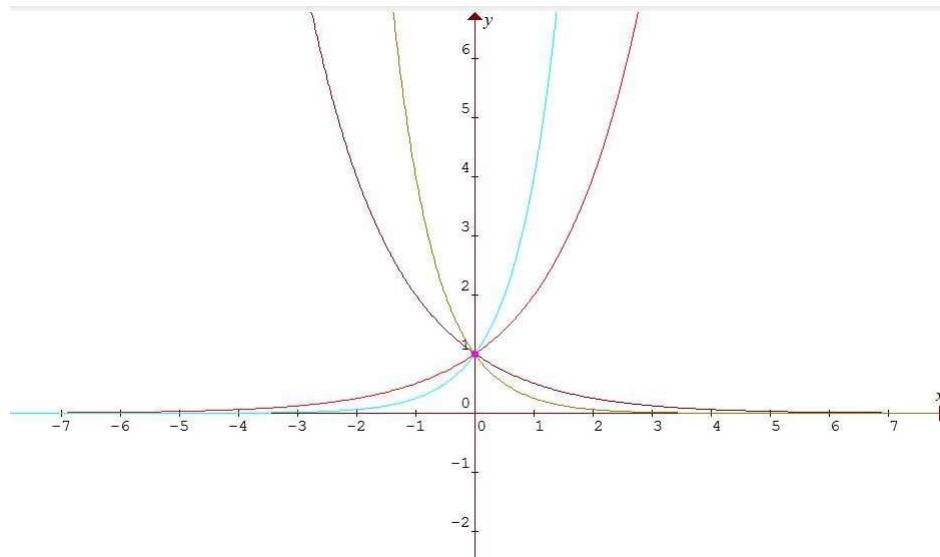
We zoeken niet $t_{1\text{en}2}$ maar wel de waarde van x . Dus:

$$2^x = t = 6 \text{ zodat } x = \log_2 6$$

Ook hier kan je terug controleren of de gevonden waarde van x voldoet aan de gegeven vergelijking.

Merk op dat in dit geval hier t_1 en t_2 gelijk zijn, waardoor er slechts /'e/'en x -waarde is. Indien $t_1 \neq t_2$ dan vind je ook een x_1 en x_2 .

Tenslotte, als je een t -waarde vindt die negatief is, dan... bestaat de bijhorende x -waarde niet. Je kan immers geen logaritme nemen van een negatief getal.



De exponentiële functie

- Algemeen

Grafische voorstelling

- Het domein van de exponentiële functie is \mathbb{R} .
- Het beeld van de exponentiële functie is \mathbb{R}_0^+ , dus alle strikt positieve getallen; de grafiek ligt boven de X-as.
- De punten $(0, 1)$ en $(1, a)$ behoren steeds tot de exponentiële functie $f(x) = a^x$.
- Als het grondtal $a > 1$ is het een stijgende functie.
- Als het grondtal $0 < a < 1$ is het een dalende functie.
- De grafieken $y = a^x$ en $y = \left(\frac{1}{a}\right)^x = a^{-x}$ zijn elkaars spiegelbeeld t.o.v. de Y-as.

Nulpunten

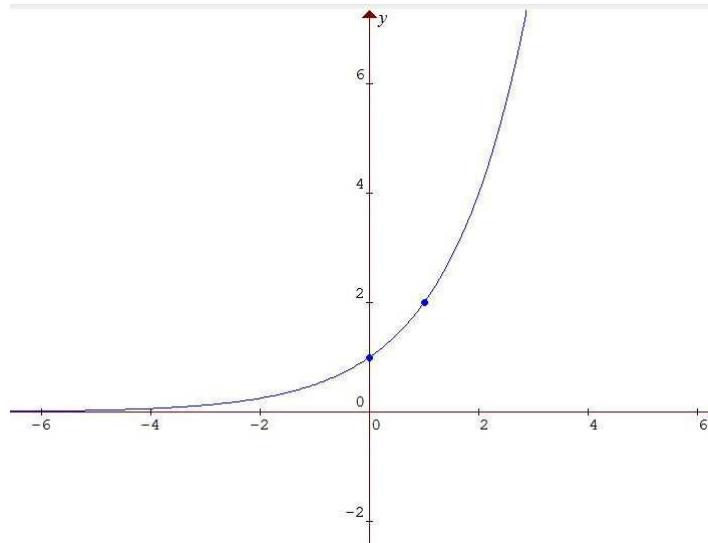
- Er zijn geen nulpunten. De exponentiële functie heeft geen snijpunten met de X-as.
De X-as is de horizontale asymptoot.
- Het punt $(0, 1)$ is het enige snijpunt met de Y-as.

Tekenverloop

- Alle functiewaarden $f(x)$ zijn strikt positief, de grafiek ligt overal boven de X-as.
- Voorbeeld: $y = 2^x$

Grafische voorstelling: (stap1) het grondtal is 2, en $2 > 0$, dus krijgen we een stijgende functie. Het punt $(1, a)$ is hier dus $(1, 2)$ en behoort tot de functie $y = 2^x$.

Nulpunten: (stap2) er zijn geen nulpunten. De X-as wordt nooit gesneden. De X-as is de horizontale asymptoot. De Y-as wordt gesneden in het punt $(0, 1)$.



Tekenverloop: (stap3)

x	$\longrightarrow \mathbb{R}$
2^x	

Grafiek: (stap4)

1.11 Logaritmische functies

Definities

De logaritmische functie wordt gedefinieerd als de inverse van de exponentiële functie.

De logaritmische functie is van de vorm:

$$y = \log_a(x) = {}^a\log(x) \iff a^y = x \quad \text{met} \\ a \in \mathbb{R}_0^+ \setminus \{1\} \text{ en } x \in \mathbb{R}_0^+$$

a noemen we het **grondtal**, en moet strikt positief en verschillend van 1 zijn.

x is een strikt positief reëel getal.

Om de waarde van y te vinden, stel je jezelf de vraag: "tot welke macht moet ik het grondtal a verheffen om x uit te komen?"

$\log_a(x)$ is de inverse functie van de functie a^x ; beide functies zijn elkaar spiegelbeeld t.o.v. de eerste bissectrice ($y = x$).

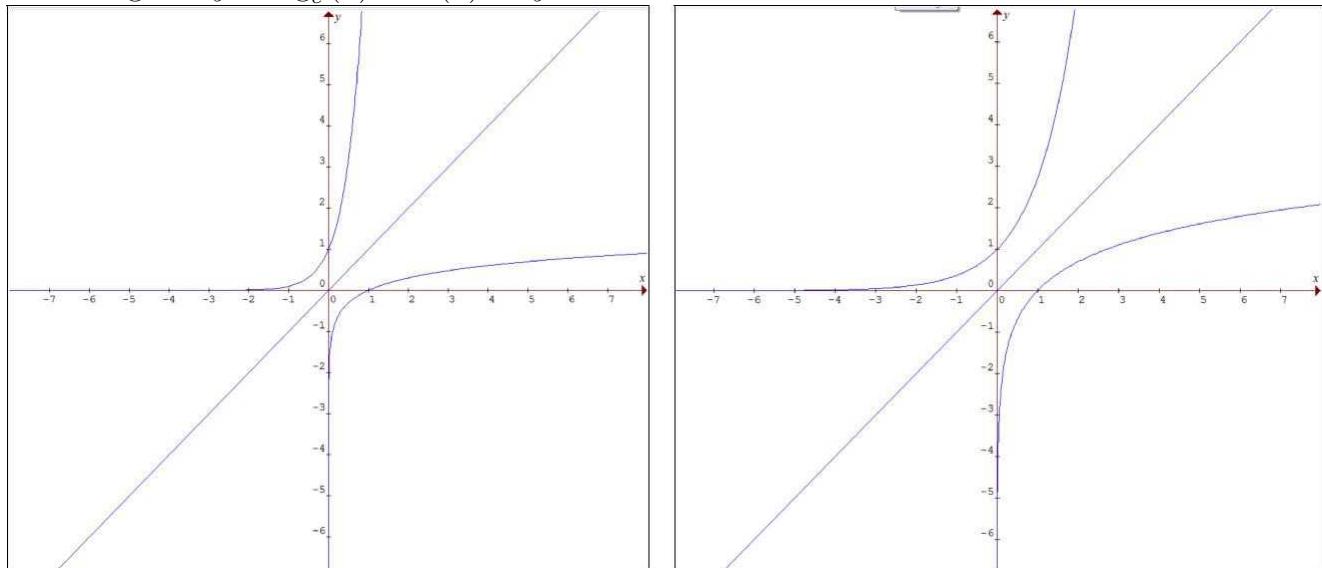
$\ln(x)$ is de inverse functie van de functie e^x ; beide functies zijn elkaar spiegelbeeld t.o.v. de eerste bissectrice ($y = x$).

Voorbeelden:

$$\log_{10}(100) = 2 \text{ (want } 10^2 = 100)$$

$$\log_2 8 = 3$$

linker figuur $y = \log_{10}(x) = \log(x)$ en $y = 10^x$
 rechter figuur: $y = \log_e(x) = \ln(x)$ en $y = e^x$



$$\log_4 16 = 2$$

$$\log_3 9 = 2$$

$$\log_3 \sqrt{3} = \log_3 3^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}$$

$$\log_5 \frac{1}{5} = \log_5 5^{-1} = -1$$

Bijzondere gevallen

- De **tiendelige of Briggse logaritme** is de logaritme met grondtal 10. In de notatie wordt vaak het grondtal 10 weggelaten: $y = \log_{10}(x) = \log(x)$
- De **natuurlijke of Neperiaanse logaritme** is de logaritme met grondtal e ($e=2,718281828$) en wordt genoteerd als $y = \log_e(x)$. Ook hier wordt het grondtal e weggelaten, en gebruikt men de specifieke notatie: $y = \ln(x)$
- $\log_a(a) = 1$ (want $a^1 = a$)
- $\log_a(1) = 0$ (want $a^0 = 1$)
- $\log_a(0)$ en $\log_a(-...)$ bestaan niet!

Rekenregels

logaritmen
$\log(x \cdot y) = \log x + \log y$
$\log\left(\frac{x}{y}\right) = \log x - \log y$
$\log(x^n) = n \log x$
$\log(\sqrt[n]{x}) = \frac{1}{n} \log x$
$\log_a(b) = \frac{1}{\log_b(a)}$

Opmerkingen:

- voor de eenvoud hebben we enkele keren het grondtal weggelaten.
- laat je niet verleiden, er bestaat geen eenvoudige formule voor $\log(x+y) = \dots$
- $\log(x^n) = \log(x \cdot x \cdot \dots \cdot x) = \log x + \log x + \dots + \log x = n \log x$ Toch niet zo moeilijk h/'e!?
- om een logaritme met grondtal a om te zetten naar een logaritme met grondtal c maken we gebruiken van de volgende eigenschap: $\log_a x = \frac{\log_c x}{\log_c a}$ Hiermee vind je trouwens ook gemakkelijk het laatste rekenregeltje. Stel, je moet uitrekenen hoeveel $\log_2 8$ is door over te gaan op een ander grondtal (bijvoorbeeld 10, wat immers op je rekentoestel staat). Dan is $\log_2 8 = \frac{\log_{10} 8}{\log_{10} 2} = \frac{\log 8}{\log 2} = \frac{0.9031}{0.3010} = 3.000$ (en dat hadden we natuurlijk ook al lang uit het hoofd uitgerekend via een andere eigenschap).
- soms is het nodig om de variabele x of een getal, op een andere manier te schrijven. Zowel de notatie $x = 10^{\log_{10}(x)}$ als $x = \log_{10} 10^x$ worden regelmatig gebruikt. Hetzelfde geldt voor $x = e^{\log_e(x)} = e^{\ln x}$ en $x = \log_e e^x = \ln e^x$. Het idee hierachter is dat de logaritmische en exponentiële functies elkaar inverse zijn, waardoor ze elkaar opheffen als ze na elkaar worden toegepast op x . Maar let wel op met bijvoorbeeld $\sqrt{x^2} \neq x$ maar wel $\sqrt{x^2} = |x|$ (zie ook Module 1 - Absolute waarde).

Opplossen van logaritmische vergelijkingen

- Algemeen

In sommige opgaves kom je logaritmische vergelijkingen tegen. Dit zijn vergelijkingen waar de onbekende voorkomt in een logaritmische functie. Om logaritmische vergelijkingen vlot te kunnen opplossen, maak je best gebruik van onderstaand stappenplan:

Stap 1: Noteer de vergelijking in haar standaardvorm: $\log_a(f(x)) = c$ of $\log_a(f(x)) = \log_a(g(x))$

Stap 2: Laat op beide leden van de vergelijking een geschikte exponentiële functie inwerken.

Stap 3: Controleer of de bekomen oplossingen voldoen aan de voorwaarden:

- het grondtal moet strikt positief zijn, en verschillend van 1 zijn, en
- de $\log_a(f(x))$ bestaat enkel als $f(x) > 0$.

Stap 4: Stop de uitkomst in de opgave en controleer.

- Voorbeeld1: $\log_a(f(x)) = \log_a(g(x))$

Los op: $\log_3(x+4) + \log_3(x-2) = 2 \log_3 x$

$$\log_3(x+4) + \log_3(x-2) = 2 \log_3 x \quad (\text{stap 1})$$

$$\iff \log_3[(x+4)(x-2)] = \log_3 x^2$$

$$\iff 3^{\log_3[(x+4)(x-2)]} = 3^{\log_3 x^2} \quad (\text{stap 2})$$

$$\iff (x+4)(x-2) = x^2$$

$$\iff x^2 - 2x + 4x - 8 = x^2$$

$$\iff 2x - 8 = 0$$

$$\iff x = 4$$

In stap 3 controleren we de voorwaarden voor $x = 4$:

1) Voor $\log_3(x+4)$ moet gelden: $x+4 > 0 \iff x > -4$? ok.

2) Voor $\log_3(x-2)$ moet gelden: $x-2 > 0 \iff x > 2$? ok.

3) Voor $2 \log_3 x$ moet gelden: $x > 0$? ok.

Besluit: de oplossing $x = 4$ voldoet aan de voorwaarden, en is dus een oplossing van de vergelijking.

Stap 4: controleer je oplossing: $\log_3(4+4) + \log_3(4-2) = 2 \log_3 4$? ok.

Opmerking: stap 2 kan je ook in gedachten doen, m.a.w. hoef je niet op te schrijven.

- Voorbeeld2: $\log_a(f(x)) = c$

Los op: $\log_{(x+3)}(x+5) = 2$

$$\log_{(x+3)}(x+5) = 2 \quad (\text{stap 1})$$

$$\iff (x+3)^2 = x+5 \quad \text{definitie: } y = \log_a x \Leftrightarrow a^y = x$$

$$\iff x^2 + 6x + 9 = x + 5$$

$$\iff x^2 + 5x + 4 = 0$$

$$x_{1\text{en}2} = \frac{-5 \pm \sqrt{5^2 - 4 \cdot 1 \cdot 4}}{2 \cdot 1} = \frac{-5 \pm 3}{2} \iff x_1 = -1 \text{ en } x_2 = -4$$

In stap 3 controleren we de voorwaarden voor x_1 en x_2 :

1) Is $x+3 > 0 \iff x > -3$?

2) Is $x+5 > 0 \iff x > -5$?

Besluit: $x_1 = -1$ voldoet aan de voorwaarden, maar $x_2 = -4$ niet. Dus enkel $x_1 = -1$ is een oplossing van de vergelijking.

Stap 4: controleer je oplossing: $\log_{(-1+3)}(-1+5) = 2$? ok. Maar $\log_{(-4+3)}(-4+5) = 2$ gaat niet.

- Voorbeeld3: het grondtal is onbekend

Los op: $\log_a 250 = 3 + \log_a 2$

$$\begin{aligned}\log_a 250 &= 3 + \log_a 2 \\ \iff \log_a 250 - \log_a 2 &= 3 \\ \iff \log_a \left(\frac{250}{2}\right) &= 3 \\ \iff \log_a 125 &= 3 \\ \iff a^3 &= 125 \\ \iff a &= \sqrt[3]{125} = 5\end{aligned}$$

Alternatieve aanpak:

$$\begin{aligned}\log_a 250 &= 3 + \log_a 2 \\ \iff \log_a 250 &= 3 \log_a a + \log_a 2 \quad (\text{infeite is } \log_a a = 1) \\ \iff \log_a 250 &= \log_a a^3 + \log_a 2 \\ \iff \log_a 250 &= \log_a (a^3 \cdot 2) \\ \iff 250 &= 2a^3 \\ \iff a &= \sqrt[3]{\frac{250}{2}} = 5\end{aligned}$$

- Voorbeeld4: rekenen met zeer grote en kleine getallen

Uit hoeveel cijfers bestaat het getal 1995^{1995} ?

Stel $x = 1995^{1995}$

Dan is:

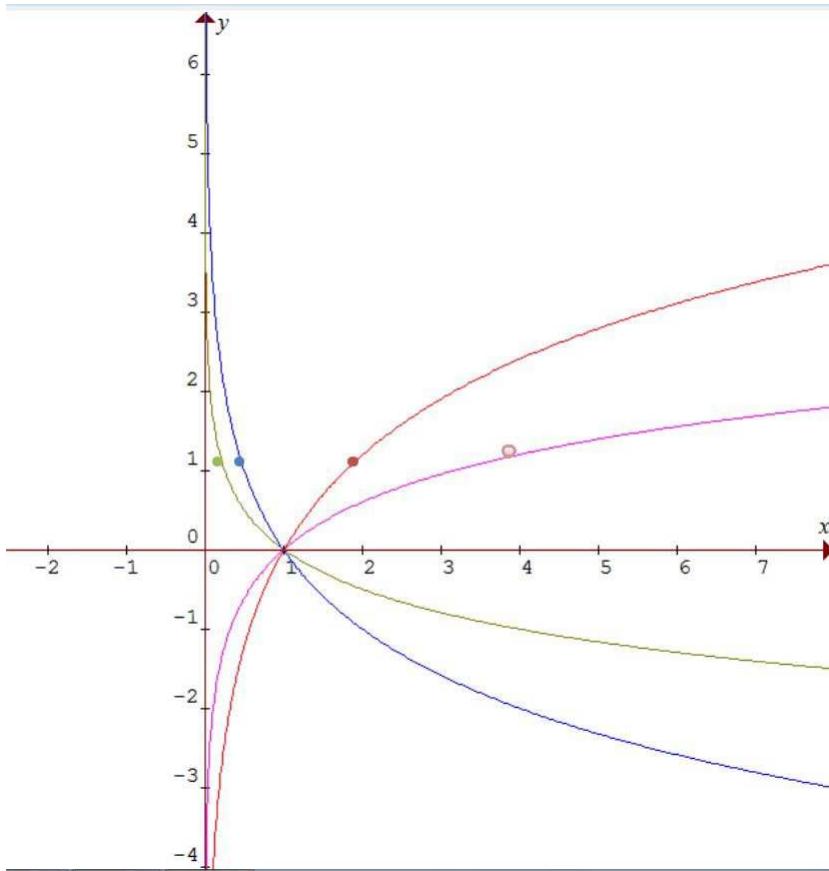
$$\begin{aligned}\log_{10} x &= \log_{10} (1995^{1995}) \\ &= 1995 \cdot \log_{10} (1995) \\ &= 6583,386\dots\end{aligned}$$

$$6583 < \log_{10} x < 6584$$

$$\log_{10} 10^{6583} < \log_{10} x < \log_{10} 10^{6584}$$

$$10^{6583} < x < 10^{6584}$$

Besluit: x is een geheel getal dat bestaat uit 6584 cijfers



De logaritmische functie

- Algemeen

Grafische voorstelling

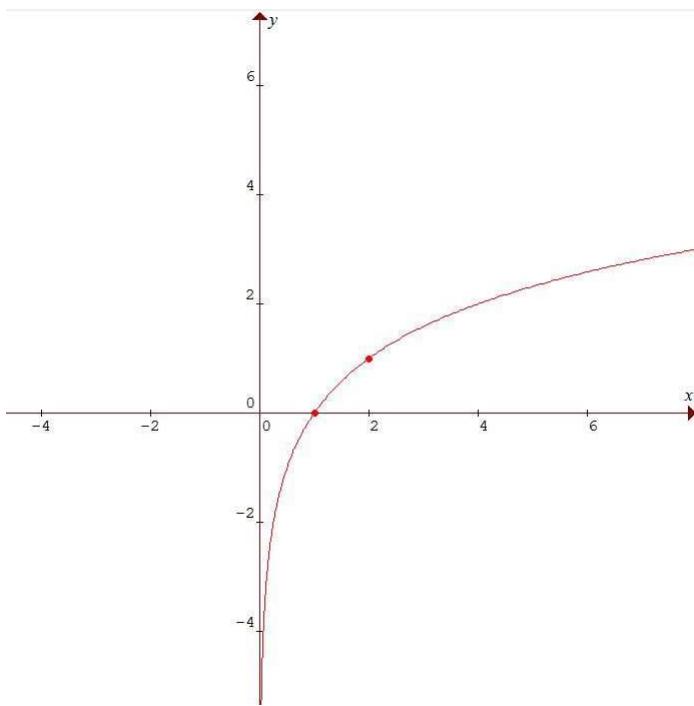
- Het domein van de logaritmische functie is \mathbb{R}_0^+ , dus alle strikt positieve getallen, de grafiek ligt rechts van de Y-as.
- Het beeld van de logaritmische functie is \mathbb{R} .
- De punten $(1, 0)$ en $(a, 1)$ behoren steeds tot de logaritmische functie $f(x) = \log_a x$.
- Als het grondtal $a > 1$ is het een stijgende functie.
- Als het grondtal $0 < a < 1$ is het een dalende functie.
- De grafieken $y = \log_a x$ en $y = \log_{\frac{1}{a}} x$ zijn elkaar spiegelbeeld t.o.v. de X-as.

Nulpunten

- De logaritmische functie heeft 1 nulpunt: het punt $(1,0)$ is het enige snijpunt met de X-as.
- Er zijn geen snijpunten met de Y-as. De Y-as is de verticale asymptoot.

Tekenverloop

x	0		1		$\rightarrow \mathbb{R}$
$\log_a x$ met $0 < a < 1$	/	+	0	-	
$\log_a x$ met $a > 1$	/	-	0	+	



- Voorbeeld: $y = \log_2 x$

Grafische voorstelling: (stap1) het grondtal is 2, en $2 > 0$, dus krijgen we een stijgende functie. Het punt $(a, 1)$ is hier dus $(2, 1)$ en behoort tot de functie $y = \log_2 x$.

Nulpunten: (stap2) er is altijd /'e/'en nulpunt; de X-as wordt altijd gesneden in het punt $(1, 0)$. De Y-as wordt nooit gesneden. De Y-as is de verticale asymptoot.

Tekenverloop: (stap3)	x	0		1		$\rightarrow \mathbb{R}$
	$\log_2 x$ met $a = 2 > 1$	/	-	0	+	

Grafiek: (stap4)

1.12 Goniometrische functies

De periode

Veel fenomenen in ons dagelijks leven herhalen zich, bijvoorbeeld je hartslag, de slingerbeweging van een staande klok, ... Ook in technische wetenschappen komen zichzelf herhalende patronen vaak voor, denk maar aan de trillingen in een gebouw, of het principe van wisselstroom. Deze zichzelf herhalende fenomenen worden voorgesteld door periodieke functies.

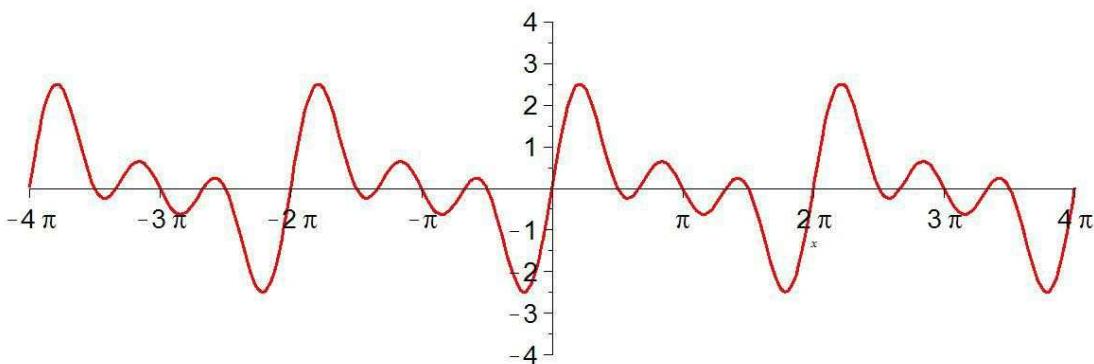
We noemen een functie periodiek als er een getal $T > 0$ bestaat zodat

$$f(x) = f(x + T) = f(x + 2T) = \dots \text{ en ook } f(x) = f(x - T) = f(x - 2T) = \dots$$

en dat voor alle x . Het kleinste getal T met deze eigenschap noemen we **de periode**.

We kunnen dit ook iets korter noteren: $f(x) = f(x + kT)$ met $k \in \mathbb{Z}$ en dit $\forall x \in \mathbb{R}$.

Een periodieke functie met periode T herhaalt zich dus telkens na een 'afstand' T . Je kan de periode ook zien als de 'breedte' van het zich herhalende stuk. Een voorbeeld:



Deze functie herhaalt zichzelf met periode 2π .

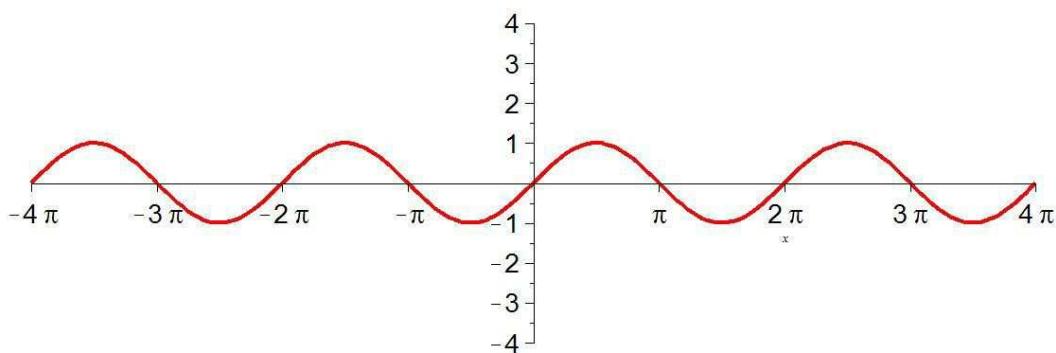
Goniometrische functies

Goniometrische functies zijn functies opgebouwd uit de basisfuncties sin, cos en tan.

Goniometrische functies gebruiken *radialen* als argument, en geen graden. Omdat deze basisfuncties zo belangrijk zijn, zetten we ze even op een rijtje met bijhorende grafieken.

- Sinusfunctie

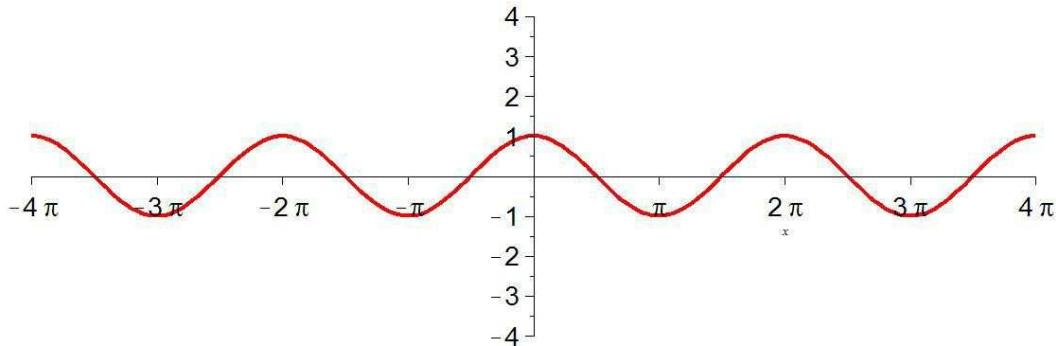
$$f(x) = \sin x$$



- De sinusfunctie kan je voor elke x berekenen.
- De sinusfunctie ligt altijd tussen -1 en 1 .
- De periode is 2π .
- De sinusfunctie is een oneven functie want $\sin(-x) = -\sin(x)$

- Cosinusfunctie

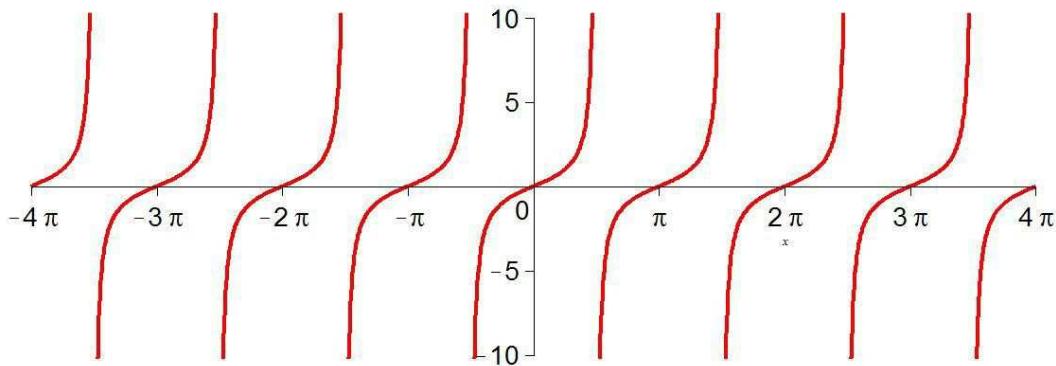
$$f(x) = \cos x$$



- De cosinusfunctie kan je voor elke x berekenen.
- De cosinusfunctie ligt altijd tussen -1 en 1.
- De periode is 2π .
- De cosinusfunctie is een even functie want $\cos(-x) = \cos(x)$

- Tangensfunctie

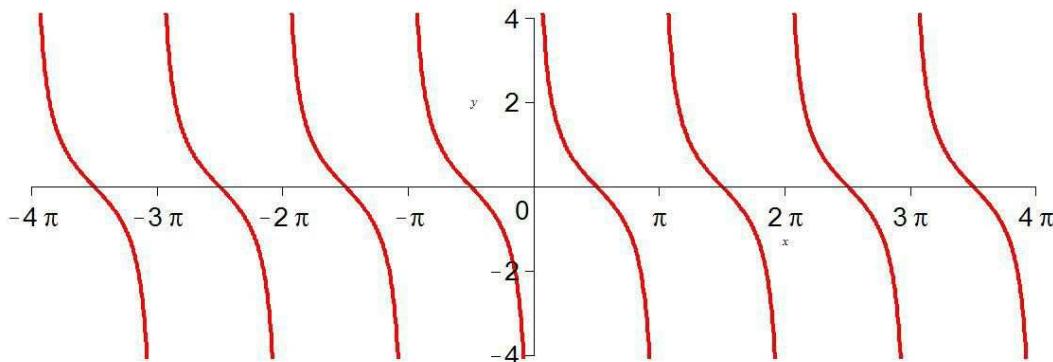
$$f(x) = \tan x = \frac{\sin x}{\cos x}$$



- De tangensfunctie kan je niet berekenen voor $\frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} + \pi, \dots$. Dus kortweg als $x = \frac{\pi}{2} + k\pi$ met $k \in \mathbb{Z}$. In deze punten zou de noemer immers nul worden; hier heeft de tangens verticale asymptoten.
- De tangensfunctie kan oneindig groot ($+\infty$) en oneindig klein ($-\infty$) worden.
- De periode is π .
- De tangensfunctie is een oneven functie want $\tan(-x) = -\tan(x)$

- Cotangensfunctie

$$f(x) = \cot x = \cotgx = \frac{\cos x}{\sin x}$$



- De cotangensfunctie kan je niet berekenen voor $0, \pi, -\pi, 2\pi \dots$ Dus kortweg als $x = k\pi$ met $k \in \mathbb{Z}$. In deze punten zou de noemer immers nul worden; hier heeft de cotangens verticale asymptoten.
- De cotangensfunctie kan oneindig groot ($+\infty$) en oneindig klein ($-\infty$) worden.
- De periode is π .
- De cotangensfunctie is een oneven functie want $\cot(-x) = -\cot(x)$

1.13 Cyclometrische functies

Relatie versus functie

Wanneer we van een (in radialen gemeten) hoek x weten dat $\sin x = \frac{1}{2}$, dan zijn er voor x oneindig veel mogelijkheden. De sinus is namelijk een periodieke functie, en bovendien wordt elke waarde (behalve 1 en -1) gedurende /'e/'en periode twee maal aangenomen. Zo geldt $\sin x = \frac{1}{2}$ voor $x = \frac{\pi}{6}$ en voor $x = \frac{5\pi}{6}$, en bij elk van die hoeken kunnen we nog willekeurige gehele veelvouden van 2π optellen. Als je nu zou afvragen welke x -waarde levert voor de sinusfunctie $\frac{1}{2}$ op, dan zou je moeten antwoorden met $x = \dots, \frac{\pi}{6}, \frac{5\pi}{6}, \frac{\pi}{6} + 2\pi, \dots$ En dat is nu niet bepaald duidelijk.

We definiëren de cyclometrische functies (ook wel arcfuncties of boogfuncties) als de inverse functies van de goniometrische functies. Maar, zoals we net gezien hebben, is de inverse van de goniometrische functie in feite geen functie maar gewoon een *relatie*. In een relatie horen bij /'e/'en waarde uit het domein (x -waarde) meerdere (tot zelfs oneindig) veel beelden (y -waarden). Om tot een functie te komen moeten we het domein van de oorspronkelijk functie beperken (hier was dit de sinus functie). Dit beperkt domein noemen we een hoofdwaardeinterval.

De cyclometrische functie wordt met een hoofdletter geschreven (bijv: Arcsin)

De cyclometrische relatie wordt met een kleine letter geschreven (bijv: arcsin)

De vergelijking $y = \arcsin(x)$ is geen functie, want met elke x -waarde komen oneindig veel y -waarden overeen.

Zo voldoet $y = \dots, \frac{\pi}{6} (30^\circ), \frac{5\pi}{6} (150^\circ), \frac{13\pi}{6} (390^\circ), \dots$ aan $y = \arcsin(\frac{1}{2})$

Om tot een functie te komen zullen we het domein van $y = \sin(x)$ beperken. We kiezen als hoofdwaarde-interval voor $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$. En we noteren nu de inverse functie van de sinusfunctie als $y = \text{Arcsin}(x)$

Nu geldt: $\text{Arcsin}(\frac{1}{2}) = \frac{\pi}{6} (30^\circ)$

Voor de cosinus, tangens en cotangens, waarbij soortgelijke problemen spelen, heeft men eveneens zulke voorkeursintervallen afgesproken: $[0, \pi]$ voor de cosinus en $]-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}[$ voor de tangens. Aangezien $\tan(\frac{\pi}{2})$ oneindig is, is de tangens niet gedefiniëerd voor hoeken gelijk aan $\frac{\pi}{2}$ en $-\frac{\pi}{2}$, vandaar de notatie met open i.p.v. gesloten haakjes.

Opmerking: op je rekenmachine vind je de cyclometrische functies meestal terug onder de namen (toetsen) \sin^{-1} , \cos^{-1} en \tan^{-1} . Verwar dit niet met $\frac{1}{\sin x} = (\sin x)^{-1}!!$

In tekstboeken vind je ook de notatie $\text{bgsin}(x)$ of $\text{argsin}(x)$ voor $\arcsin(x)$ en $\text{Bgsin}(x)$ of $\text{Argsin}(x)$ voor $\text{Arcsin}(x)$. Hierbij staan de letter ‘‘bg’’ voor boog en ‘‘arg’’ voor argument.

De cyclometrische functies

De grafieken van deze functies worden bekomen door spiegeling ten opzichte van de rechte $y = x$ van een gepaste beperking van de grafiek van de overeenkomstige goniometrische functies.

- De inverse van de sinusfunctie

$$y = \text{Arcsin}(x) \text{ met } y \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$$

De inverse van de sinusfunctie $y = \text{Arcsin}(x)$ kan je enkel voor $x \in [-1, 1]$ berekenen.

De inverse van de sinusfunctie ligt altijd tussen $y \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$.

- De inverse van de cosinusfunctie

$$y = \text{Arccos}(x) \text{ met } y \in [0, \pi]$$

De inverse van de cosinusfunctie $y = \text{Arccos}(x)$ kan je enkel voor $x \in [-1, 1]$ berekenen.

De inverse van de cosinusfunctie ligt altijd tussen $y \in [0, \pi]$.

- De inverse van de tangensfunctie

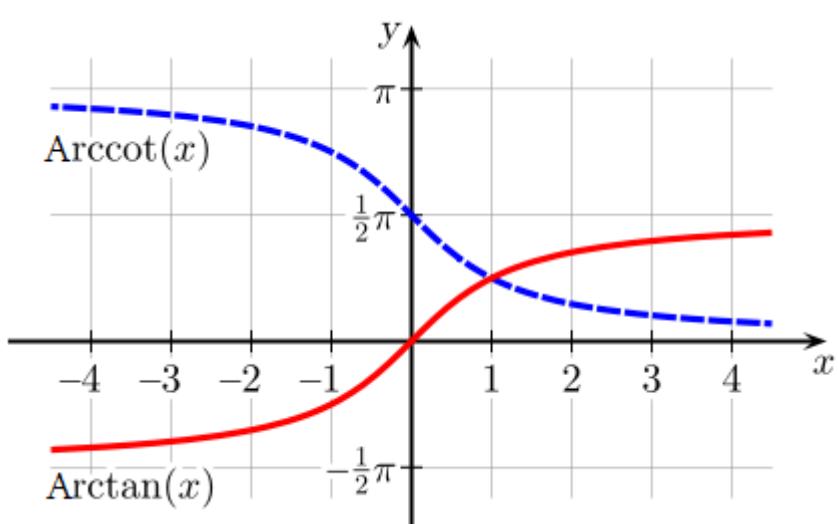
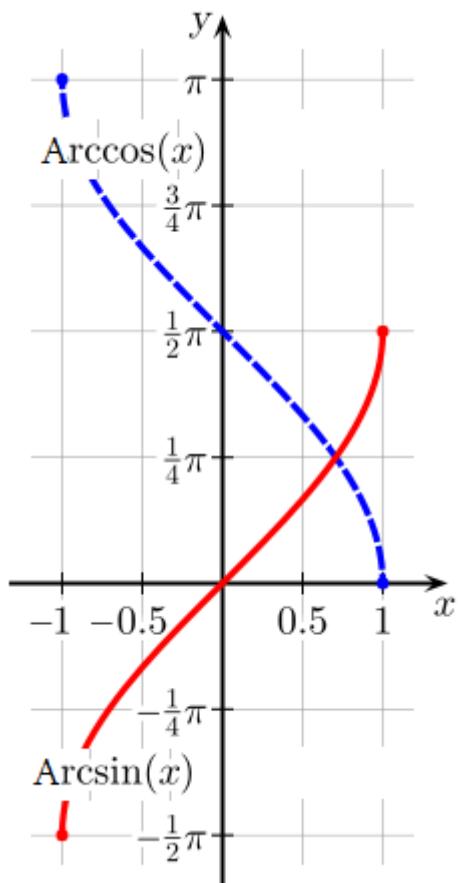
$$y = \text{Arctan}(x) \text{ met } y \in]-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}[$$

De inverse van de tangensfunctie $y = \text{Arctan}(x)$ kan je voor alle x berekenen.

De inverse van de tangensfunctie ligt altijd tussen $y \in]-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}[$.

De grafiek toont twee horizontale asymptoten: de lijnen $y = -\frac{\pi}{2}$ en $y = \frac{\pi}{2}$.

We noteren ook: $\lim_{x \rightarrow -\infty} \text{Arctan}(x) = -\frac{\pi}{2}$ en $\lim_{x \rightarrow +\infty} \text{Arctan}(x) = \frac{\pi}{2}$.



- De inverse van de cotangensfunctie

$$y = \text{Arccot}(x) \text{ met } y \in]0, \pi[$$

De inverse van de cotangensfunctie $y = \text{Arccot}(x)$ kan je voor alle x berekenen.

De inverse van de cotangensfunctie ligt altijd tussen $y \in]0, \pi[$.

De grafiek toont twee horizontale asymptoten: de lijnen $y = 0$ en $y = \pi$.

We noteren ook: $\lim_{x \rightarrow -\infty} \text{Arccot}(x) = 0$ en $\lim_{x \rightarrow +\infty} \text{Arccot}(x) = \pi$.

Rekenregels

Past men op een cyclometrische functie de overeenkomstige goniometrische functie toe, dan komt men als resultaat het argument waarvan men is uitgegaan.

$$\sin(\text{Arcsin}(x)) = x$$

$$\cos(\text{Arccos}(x)) = x$$

$$\tan(\text{Arctan}(x)) = x$$

$$\cot(\text{Arccot}(x)) = x$$

Past men in een goniometrische functie de overeenkomstige cyclometrische functie toe, dan komt men als resultaat *niet noodzakelijk* het argument waarvan men is uitgegaan, maar wel een waarde van het overeenkomstig hoofdwaarde-interval.

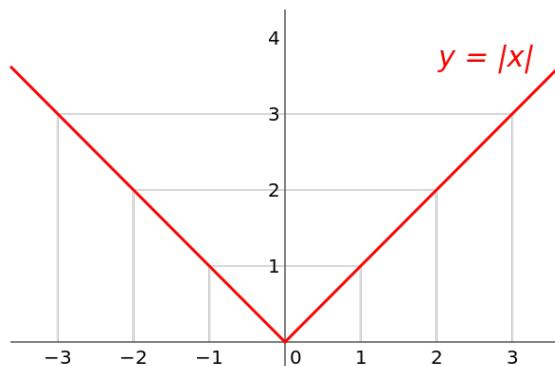
1.14 Bijzondere functies

De absolute waarde

In Module 1: Elementaire vaardigheden A heb je reeds de definitie gezien van de absolute waarde:

$$|x| = \begin{cases} -x & \text{als } x < 0 \\ x & \text{als } x \geq 0 \end{cases}$$

en de bijhorende grafiek:



We hebben er toen ook op gewezen dat je voorzichtig moet zijn met formules van het type $\sqrt{x^2}$.

Passen we dit toe op een functie die horizontaal verschoven is: $y = \sqrt{(x - 1)^2} = |x - 1|$.

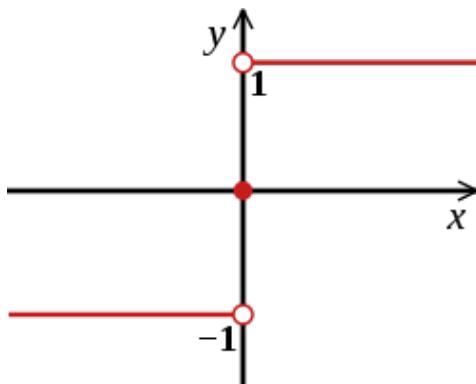
Als deze functie zou gegeven zijn als de veelterm $x^2 - 2x + 1$, dan loont het dus de moeite om dit te herschrijven als een volledig kwadraat: $x^2 - 2x + 1 = (x - 1)^2$.

De signum functie

De sign of signum functie $\text{sgn}(x)$ is een eenvoudige wiskundige functie, die eigenlijk het teken van het argument aangeeft:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} -1 & \text{als } x < 0 \\ 0 & \text{als } x = 0 \\ +1 & \text{als } x > 0 \end{cases}$$

De grafiek van de signum functie:



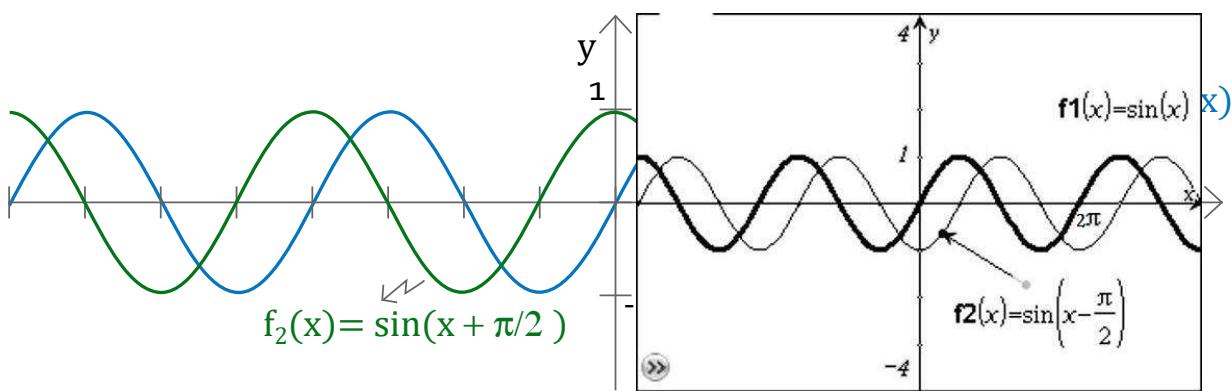
1.15 Verschuiven en herschalen

Verschuiven

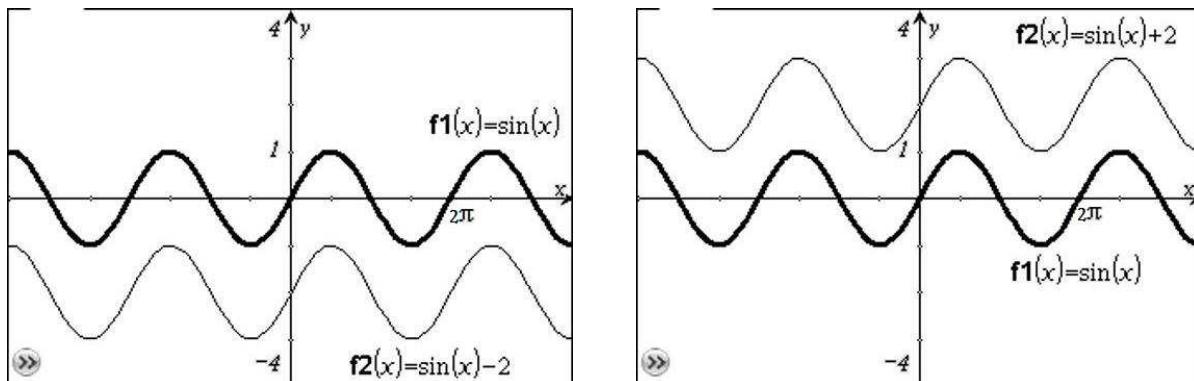
Wanneer we de grafiek van $y = f(x)$ kennen, kunnen we met verschuivingen (of translaties) de grafiek van $y = f(x + a)$ en $y = f(x) + a$ daaruit afleiden (met $a \in \mathbb{R}$).

De grafiek van $y = f(x + a)$ wordt verkregen uit de grafiek van $y = f(x)$ door alle punten op de grafiek met een afstand van a eenheden horizontaal te verschuiven (naar links als $a > 0$, en naar rechts als $a < 0$).

Het lijkt misschien een beetje tegenstrijdig dat de grafiek van een functie naar rechts verschuift als je bij het argument x een negatief getal optelt. Maar kijk eens naar de sinus functie $f_1(x) = \sin(x)$ in onderstaand voorbeeld. We weten dat de sinus functie onder andere een nulpunt heeft als het argument nul is, dus voor $x = 0$. Als we van x de waarde $\frac{\pi}{2}$ aftrekken, dan bekomen we terug datzelfde nulpunt als het argument nul is. Uit $x - \frac{\pi}{2} = 0$ volgt dat dit het geval zal zijn als $x = +\frac{\pi}{2}$. Met andere woorden, de functie $f_2(x) = \sin(x - \frac{\pi}{2})$ heeft dezelfde grafiek als de functie $f_1(x) = \sin(x)$ maar is $\frac{\pi}{2}$ eenheden naar rechts verschoven.



De grafiek van $y = f(x) + a$ wordt verkregen uit de grafiek van $y = f(x)$ door alle punten op de grafiek met een afstand van a eenheden verticaal te verschuiven (naar beneden als $a < 0$, en naar boven als $a > 0$).



Een voorbeeld: hoe ziet de grafiek eruit van de functie $y = x^2 + 2x + 3$?

We herschrijven de functie als: $y = (x^2 + 2x + 1) + 2 = (x + 1)^2 + 2$

We herkennen hierin de basisfunctie $y = x^2$. De gegeven functie stelt dus een parool voor die over 1 eenheid naar links en 2 eenheden naar boven is verschoven.

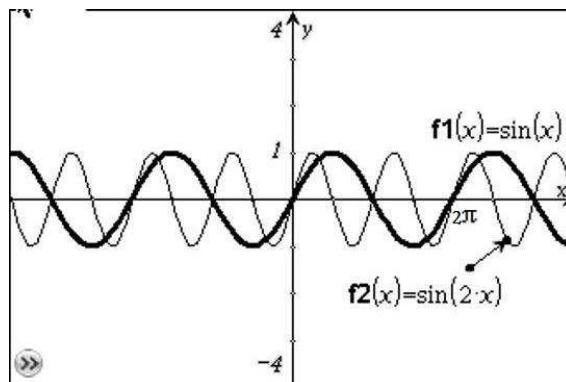
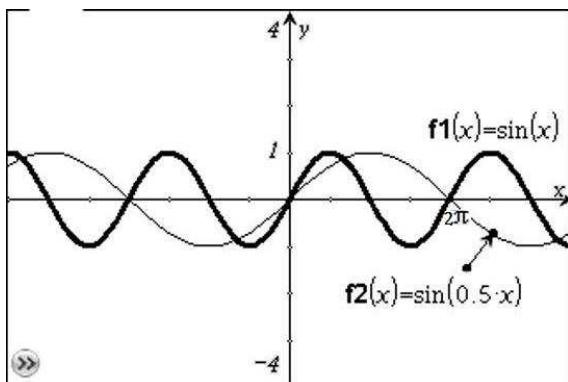
Herschalen

Wanneer we de grafiek van $y = f(x)$ kennen, kunnen we met herschalen (of vermenigvuldigen) de grafiek van $y = f(ax)$ en $y = af(x)$ daaruit afleiden (met $a \in \mathbb{R}$).

De grafiek van $y = f(ax)$ wordt verkregen uit de grafiek van $y = f(x)$ door, bij gelijkblijvende y -coördinaten, alle x -coördinaten van de punten op de grafiek met een factor $\frac{1}{a}$ te vermenigvuldigen (openrekken als $0 < a < 1$, en inkrimpen als $a > 1$).

Voor $a = 2$ bijvoorbeeld krimpt de grafiek in elkaar. Het is alsof de functie dubbel zo snel verloopt.

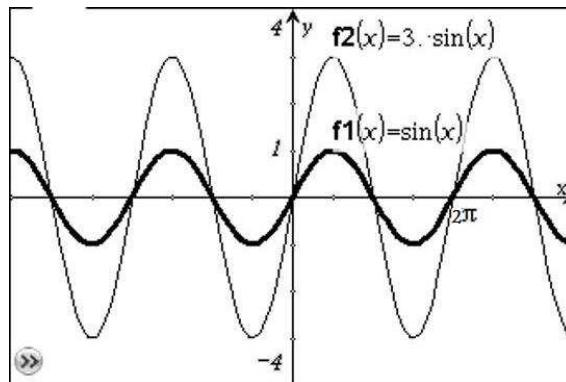
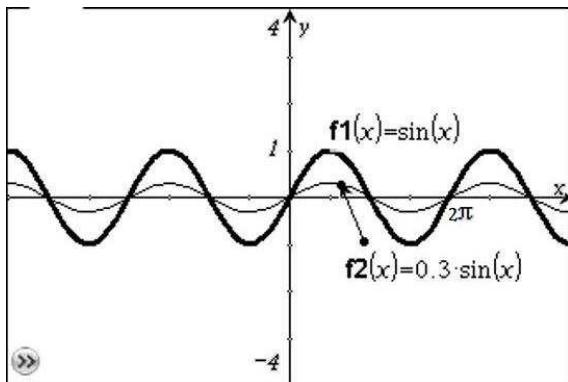
Een bijzonder geval treedt op als $a = -1$: de grafiek van $g(x) = f(-x)$ kan uit de grafiek van $f(x)$ worden verkregen door van alle punten op de grafiek de x -coördinaten met -1 te vermenigvuldigen, dus door de grafiek van $f(x)$ te spiegelen ten opzichte van de Y -as. Op die



We zeggen dat:	x_0, y_0	zijn de rechthoekige of cartesische coördinaten
	x_0	is de abscis van het punt P
	y_0	is de ordinaat van het punt P

manier kan je bijvoorbeeld heel eenvoudig afleiden dat de grafiek van de functie $g(x) = \sqrt{-x}$ bestaat en het spiegelbeeld is van $f(x) = \sqrt{x}$. Terwijl de functie $f(x)$ enkel gedefinieerd is voor alle positieve reële getallen, is de functie $g(x)$ dit enkel voor alle negatieve reële getallen.

De grafiek van $y = af(x)$ wordt verkregen uit de grafiek van $y = f(x)$ door, bij gelijkblijvende x -coördinaten, alle y -coördinaten van de punten op de grafiek met een factor a te vermenigvuldigen (inkrimpen als $0 < a < 1$, en openrekken als $a > 1$).

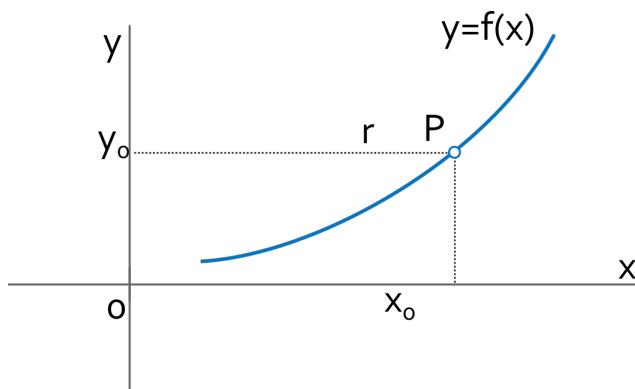


1.16 Coördinatenstelsels

Cartesisch of rechthoekig coördinatenstelsel

De vergelijking $y = f(x)$ voegt aan iedere x -waarde éénduidig een y -waarde toe. Met x_0 komt bijvoorbeeld y_0 overeen volgens $y_0 = f(x_0)$. Het getallenpaar (x_0, y_0) kunnen we als punt P in een rechthoekig of cartesisch coördinatenstelsel tekenen. De twee coördinaatassen staan loodrecht op elkaar, de horizontale as noemen we de X-as en de verticale as de Y-as. Het snijpunt is de oorsprong O.

Voor ieder getallenpaar krijgen we precies één punt. De verzameling van alle punten $(x, y = f(x))$ vormt de grafiek of kromme van de functie. De grafiek laat het verloop van de functie in een figuur zien.



Het cartesisch coördinatenstelsel is de gebruikelijke manier om een punt in een vlak aan te duiden. Omdat in dit platte vlak twee coördinaten nodig zijn om een punt vast te leggen, zeggen we dat een vlak tweedimensionaal is. In feite is 'de dimensie van een ruimte' het aantal coördinaten dat nodig is om de plaats van alle punten in die ruimte precies te kunnen bepalen. Zo bestaat de klassieke 3D-ruimte uit 3 dimensies en zijn er dus 3 coördinaten (x, y, z) nodig om de plaats van elk punt éénduidig te beschrijven.

Parametervoorstelling van een functie

Het is bij de wiskundige beschrijving van een bewegend lichaam vaak handig om de positie van het lichaam weer te geven door cartesische coördinaten die zelf een functie van de tijd zijn. We noteren dan:

$$x = x(t), \quad y = y(t) \quad \text{met } t_1 \leq t \leq t_2$$

We noemen een dergelijke voorstelling met een hulpvariable t de parametervoorstelling van een functie. In de natuurwetenschappen en de techniek betekent de parameter t meestal de tijd of een hoek.

We krijgen voor iedere waarde van t uit het interval $t_1 \leq t \leq t_2$ precies één punt van de kromme.

Voorbeeld 1: de horizontale worp

een lichaam wordt van een bepaalde hoogte horizontaal met een constante beginsnelheid v_0 weggeworpen. T.g.v. de zwaartekracht verloopt de beweging vervolgens als een parabool (parabolische baan). De parametervergelijkingen van deze beweging zijn:

$$x = v_0 t, \quad y = \frac{1}{2} g t^2 \quad \text{met } t \geq 0$$

Door het elimineren van de parameter vinden we de expliciete vergelijking van de grafiek (parabool). Dit doen we door t uit de vergelijking van x te halen en te substitueren in de vergelijking van y :

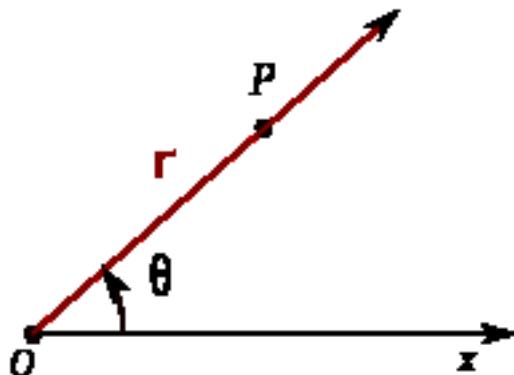
$$\text{uit } x = v_0 t \text{ volgt dat } t = \frac{x}{v_0} \text{ zodat } y = \frac{1}{2} g t^2 = \frac{1}{2} g \left(\frac{x}{v_0} \right)^2 = \frac{g}{2v_0^2} x$$

Voorbeeld 2: de cirkel

Een veel gebruikte parametrisatie voor de cirkel met vergelijking $x^2 + y^2 = R^2$ is de volgende:

$$x = R \cos(t), \quad y = R \sin(t) \quad \text{met } 0 \leq t < 2\pi$$

Opmerkingen:



- de parameter t stelt nu een hoek voor (uitgedrukt in radialen). Omdat $t = 0$ en $t = 2\pi$ hetzelfde punt voorstellen, zal men meestal 2π niet opnemen in het interval. Vandaar het $<$ en niet nog eens het \leq -symbool.
- om uit de parametervergelijkingen de cartesische vergelijking voor de cirkel te bekomen moeten we de parameter t elimineren. Daarvoor gebruiken we een trucje. We weten dat voor elke hoek α de goniometrische grondformule geldt: $\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha = 1$. Substitueren we nu $\cos(t) = \frac{x}{R}$ en $\sin(t) = \frac{y}{R}$ in de grondformule dan bekomen we inderdaad $x^2 + y^2 = R^2$
- .

Poolcoördinaten

De poolcoördinaten (r, θ) van een punt P in een vlak zijn de afstandscoördinaat r en de hoekcoördinaat θ . We noemen de afstand r de radius of de voerstraal en de hoek θ het argument.

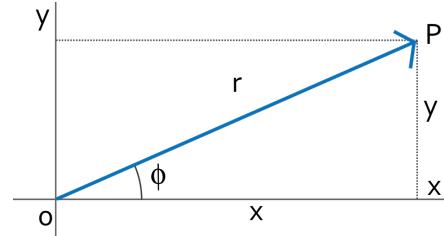
Enkele opmerkingen:

- we definiëren de voerstraal r steeds positief, dus $r \geq 0$.
- we definiëren de hoek θ positief als de pijl van de positieve X-as naar de plaatsvector van P tegen de klok in draait (andersom is de hoek negatief). Een hoek θ is éénduidig bepaald op veelvouden van 360° (of veelvouden van 2π in radialen) na. Meestal wordt de hoek θ gegeven in het interval $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ of $0 \leq \theta \leq 2\pi$. I.p.v. de Griekse letter theta (θ) wordt ook vaak de letter phi (φ) als hoekaanduiding gebruikt.
- de X- en Y-as maken geen deel uit van dit coördinatenstelsel. We tekenen echter wel vaak een horizontale en verticale hulplijn om het uitzetten van de hoeken te vergemakkelijken.
- het poolcoördinatenstelsel is een kromlijnig coördinatenstelsel: de coördinaatlijnen zijn concentrische cirkels met de oorsprong O als middelpunt en langs stralen die radiaal vanuit O lopen. We noemen de oorsprong ook vaak 'de pool' en de X-as de 'poolas'.
- de pool (dus de oorsprong O) heeft als voerstraal $r = 0$ terwijl de hoek θ onbepaald is.

- poolcoördinaten worden ook gebruikt bij het voorstellen van en het werken met complexe getallen.

Soms is het handig of noodzakelijk om over te stappen van cartesische coördinaten naar poolcoördinaten of omgekeerd. Daarvoor gebruiken we het volgende stel transformatievergelijkingen:

cartesische coördinaten		poolcoördinaten
gegeven P met (x, y)	→	dan is $\begin{cases} r = \sqrt{x^2 + y^2} \\ \operatorname{tg}\theta = \frac{y}{x} \end{cases}$
dan is $\begin{cases} x = r \cdot \cos\theta \\ y = r \cdot \sin\theta \end{cases}$	←	gegeven P met (r, θ)



Opmerking: let op bij het berekenen van de hoek θ . Je rekenmachine zal als resultaat van de Arctg ($\frac{y}{x}$) een hoek geven in het 1ste of 4de kwadrant. Je moet dus zelf, bij het resultaat van je rekenmachine nog 180° of π optellen als het punt P in het 2de of 3de kwadrant ligt.

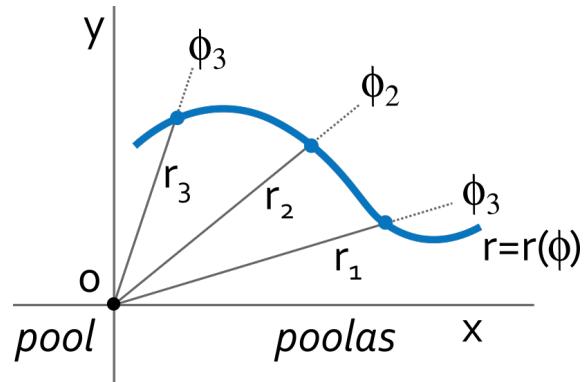
De voorstelling van een functie in poolcoördinaten

Een functie (kromme) in poolcoördinaten wordt beschreven door een vergelijking van de vorm:

$$r = r(\theta)$$

We stellen een functiewaardentabel op voordat we de grafiek van de functie tekenen. Voor verschillende waarden $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots$ berekenen we de bijhorende voerstralen $r_1 = r(\theta_1), \dots$ Daarna tekenen we de punten met coördinaten $(r_1, \theta_1), \dots$ en verbinden deze d.m.v. een vloeiente lijn.

θ	$r = r(\theta)$
θ_1	$r_1 = r(\theta_1)$
θ_2	$r_2 = r(\theta_2)$
\vdots	\vdots



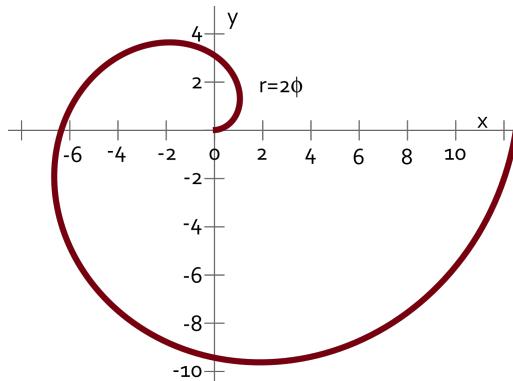
In de figuur zijn de hoeken aangeduid met φ ipv θ

Voorbeeld 1: de spiraal van Archimedes

Schets de kromme met vergelijking $r = \theta$ waarbij $0 \leq \theta \leq 2\pi$

We stellen een functiewaardentabel op (tip: kies niet te veel, maar ook niet te weinig hoeken; de intervallen tussen de hoeken hoeft niet noodzakelijk even groot te zijn).

θ	$r = r(\theta) = \theta$
0	0
$\frac{\pi}{4}$	0.785
$\frac{\pi}{2}$	1.571
$\frac{3\pi}{4}$	2.356
π	3.142
$\frac{5\pi}{4}$	4.712
2π	6.283

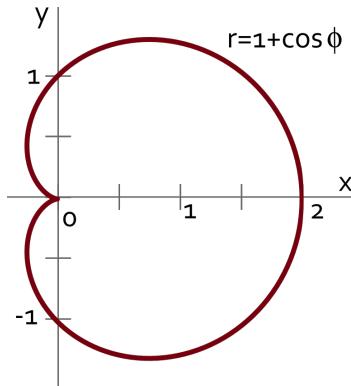


Voorbeeld 2: de cardioïde

Schets de kromme met vergelijking $r = 1 + \cos \theta$ waarbij $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$

We stellen een functiewaardentabel op. Wegens de symmetrie t.o.v. de X-as berekenen we slechts de radius-waarden tussen 0° en 180° .

θ	$r = r(\theta)$
0°	2
30°	1.866
60°	1.5
90°	1
120°	0.5
150°	0.134
180°	0



Voorbeeld 3: de cirkel

Schets de kromme met vergelijking $r = 2$ waarbij $0^\circ \leq \theta < 360^\circ$

Bij elke hoek θ hoort dezelfde voerstraal, namelijk $r = 2$. Het heeft dus weinig zin om een functiewaardentabel op te stellen.

Opmerking: de cartesische vergelijking van een cirkel heeft een duidelijk ingewikkeldere notatie: $x^2 + y^2 = 2^2$. Schrijven we y expliciet dan zien we meteen ook dat dit eigenlijk geen functie is (met elke x -waarde komen immers 2 y -waarden overeen): $y = \pm\sqrt{4 - x^2}$

2 Limieten

2.1 Het begrip limiet

Bij het bestuderen van het gedrag van een functie stuiten we soms op het probleem dat de functie in een bepaald punt niet gedefinieerd is. Dit kan bijvoorbeeld optreden als het voorschrift van de functie een breuk is waarvan de noemer nul wordt in dat punt. Toch willen we vaak weten hoe de grafiek van die functie in de buurt van zo'n punt er uitziet. Ook zijn we geïnteresseerd in het gedrag van een functie als het argument zeer groot of zeer sterk negatieve waarden aanneemt.

vermenigvuldiging		optelling		
$a.(+\infty) = +\infty$	als $a > 0$	$\pm\infty + a = \pm\infty$	met $a \in \mathbb{R}$	
$a.(+\infty) = -\infty$	als $a < 0$			
$a.(-\infty) = -\infty$	als $a > 0$			
$a.(-\infty) = +\infty$	als $a < 0$			
$(+\infty).(+\infty) = +\infty$		$(+\infty) + (+\infty) = +\infty$		
$(-\infty).(-\infty) = +\infty$		$(-\infty) + (-\infty) = -\infty$		
$(+\infty).(-\infty) = -\infty$				

Het begrip limiet is dus een belangrijke bouwsteen van de analyse. De begrippen continuïteit, onbepaalde integraal en bepaalde integraal steunen allen op het limietbegrip. Ook meetkundig is het limietbegrip van belang: men heeft het nodig bij de definitie van afgeleiden en asymptoten.

De verzameling $\bar{\mathbb{R}}$

Gegeven is de verzameling van de reële getallen \mathbb{R} . Stel, we nemen als deelverzameling het halfopen interval $[5, 10[$ van \mathbb{R} . Er bestaat dan bijvoorbeeld een getal uit die verzameling dat kleiner of gelijk is aan alle elementen uit die deelverzameling. We noteren dit als $\forall x \in [5, 10[$ waarvoor geldt dat $x \geq 5$. In dit geval is het gezochte getal 5. Maar dit is niet altijd zo eenvoudig.

Nemen we de deelverzameling $\{...3, 5, 7, 9\}$ van \mathbb{R} . Welk getal kunnen we vinden dat kleiner is dan alle elementen uit deze deelverzameling? Het getal 1? Of -1? Of -100? Het antwoord wordt gevonden door de verzameling uit te breiden met de elementen plus oneindig $(+\infty)$ en min oneindig $(-\infty)$.

We zeggen nu dat “streep R streep” gelijk is aan: $\bar{\mathbb{R}} = \mathbb{R} \cup \{-\infty, +\infty\}$ waarbij $\forall x \in \mathbb{R}$ geldt dat $-\infty < x < +\infty$.

Merk op dat de elementen $-\infty$ en $+\infty$ zelf geen reële getallen zijn. Let ook op met het symbool ∞ : afhankelijk van de context kan dit ” $+\infty$ ” betekenen, maar ook ” $+\infty$ of $-\infty$ ”. In dit laatste geval schrijven we soms $\pm\infty$.

Rekenen met ∞

Alhoewel $-\infty$ en $+\infty$ geen reële getallen zijn (maar wel symbolen), kunnen we er toch (mits enige voorzichtigheid) mee rekenen.

$\frac{1}{\infty} = 0$ maar let op: $\frac{1}{0} = \infty$ en dus onbepaald (want ∞ is geen reëel getal).

Soms maken we nog onderscheid tussen een heel klein positief of heel klein negatief getal: $\frac{1}{0^+} = +\infty$ en $\frac{1}{0^-} = -\infty$

De volgende vormen zijn ook onbepaald: $\frac{0}{0}$ en $\frac{\infty}{\infty}$, $0.\infty$, $+\infty - \infty$, 0^0 , ∞^0 , 1^∞ .

Hoezo, 1^∞ is onbepaald? Dit is toch gewoon $1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \dots$ en dus gelijk aan 1!? Het antwoord hierop vind je op het einde van dit hoofdstukje.

Merk op dat de vormen $\frac{0}{0}$ en $\frac{\infty}{\infty}$ in feite hetzelfde betekenen, immers $\frac{a}{b}$ kan je ook schrijven als $\frac{\frac{1}{b}}{\frac{1}{a}}$.

2.2 Intuïtieve uitleg limieten

Zie filmpje MOOC

2.3 Limieten en continuïteit

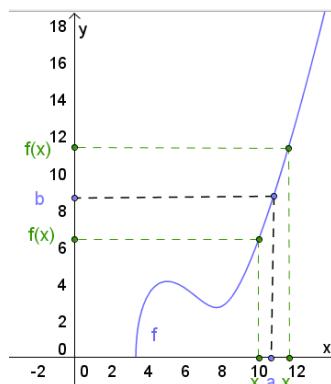
Het limietbegrip

Als x nadert tot a , dan nadert $f(x)$ tot b .

We zeggen wiskundig: de limiet van $f(x)$ voor x gaande naar a is b .

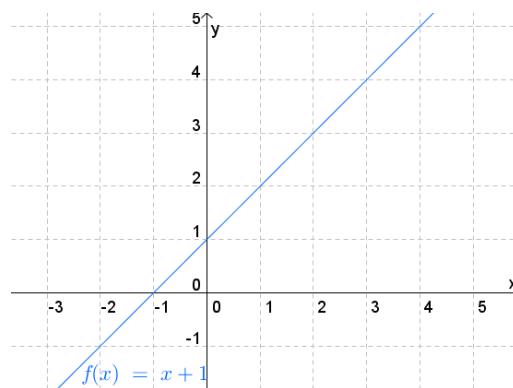
We noteren dit als: $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = b$

Grafisch:



Voorbeeld 1: de functie is continu in a

$$f(x) = x + 1$$



We merken meteen op dat $\text{dom } f = \mathbb{R}$ (m.a.w. we mogen voor x elk reëel getal kiezen).

Als we x voldoende dicht laten naderen tot bijvoorbeeld 1, dan nadert $f(x)$ tot 2 (zie grafiek).

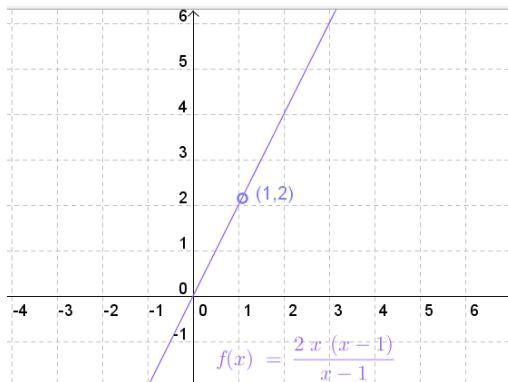
We noteren dit als: $\lim_{x \rightarrow 1} f(x) = \lim_{x \rightarrow 1} (x + 1) = 2$ en dit is hier ook $= f(1)$.

Omdat $\lim_{x \rightarrow 1} (x + 1) = f(1)$ zeggen we dat deze functie **continu** is in het punt $x = 1$.

Voorbeeld 2: de functie is discontinu in a

$$f(x) = \frac{2x^2 - 2x}{x - 1} = \frac{2x(x-1)}{x-1}$$

De noemer mag niet nul worden. Dus het domein van de functie is: $\text{dom } f = \mathbb{R} \setminus \{1\}$



Als we nu terug x voldoende dicht laten naderen tot 1, dan nadert $f(x)$ terug tot 2 (zie grafiek).

We noteren dit als: $\lim_{x \rightarrow 1} f(x) = \lim_{x \rightarrow 1} \frac{2x(x-1)}{x-1} = 2$ maar dit is $\neq f(1)$ want 1 behoort niet tot het domein van deze functie. En toch bestaat de limiet voor $x \rightarrow 1$.

Hier is $\lim_{x \rightarrow 1} \frac{2x(x-1)}{x-1} \neq f(1)$. De limiet is dus niet gelijk aan de functiewaarde; we zeggen dat de functie **niet-continu** of **discontinu** is in het punt $x = 1$.

Continu versus discontinu

Een functie f is continu in een **punt** $x = a$ als: $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = f(a)$

Het is belangrijk dat je inziet dat voor de limietberekenaar de functiewaarde niet belangrijk is, immers je gaat naar het punt a zonder het punt a zelf ooit te bereiken. Dit is het principe van het limietbegrip. Pas als je gaat kijken naar continuïteit moet je ook rekening houden met (het al dan niet bestaan van) de functiewaarde.

Het is je waarschijnlijk al opgevallen dat we nog niks gezegd hebben over “hoe je naar het punt a kan gaan”. Dit kan immers langs de linkerkant van a , of langs de rechterkant van a gebeuren (we spreken van respectievelijk de linker- en de rechterlimiet).

We noteren:	linkerlimiet	$\lim_{x \rightarrow a^-} f(x)$
	rechterlimiet	$\lim_{x \rightarrow a^+} f(x)$

Twee belangrijke besluiten:

- als de linkerlimiet en de rechterlimiet beiden bestaan en gelijk zijn aan elkaar, dan bestaat de limiet $\lim_{x \rightarrow a} f(x)$. De grafiek loopt van beide kanten naar dat punt $(a, f(a))$ toe.
- als bovendien de limiet ook nog gelijk is aan $f(a)$ dan zit daar geen discontinuïteit (geen gaatje), dus de grafiek bestaat in dat punt. Dit betekent dat de limiet gelijk is aan de functiewaarde en dat de functie continu is in het punt a .

Vereenvoudigd zegt men soms ook dat een functie continu is als je de grafiek ervan kunt tekenen zonder je potlood van het papier te halen.

Tenslotte zeggen we dat een functie f continu is over het gesloten interval $[a, b]$ indien:

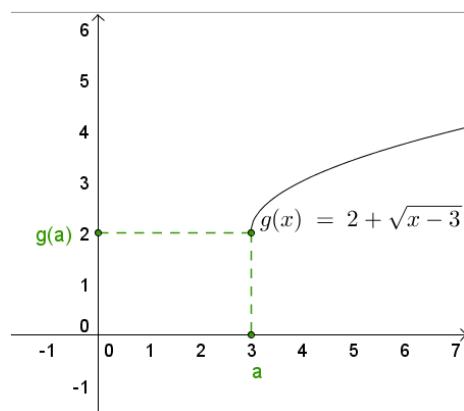
- f rechts continu is in a (m.a.w. $\lim_{x \rightarrow a^+} f(x) = f(a)$)
- f links continu is in b (m.a.w. $\lim_{x \rightarrow b^-} f(x) = f(b)$)
- $\forall x \in]a, b[$ geldt dat f continu is in x (m.a.w. $f(x)$ is continu in elk punt binnen het interval).

Je ziet dat een functie f discontinu kan zijn in een punt a omdat:

- ze in dat punt niet gedefinieerd is: $f(a)$ bestaat niet
- ze in dat punt een sprong maakt: $\lim_{x \rightarrow a^-} f(x) \neq \lim_{x \rightarrow a^+} f(x)$
- haar definitie in dat punt niet overeenkomt met de limiet: $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = b \neq f(a)$
- haar waarde onbeperkt toeneemt naarmate men het punt nadert: $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = \pm\infty$

2.4 Voorbeelden

Voorbeeld 1



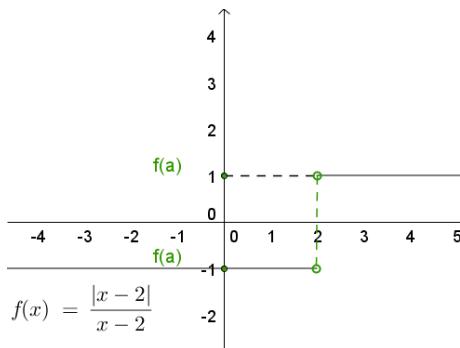
Bestaan de limieten als $x = 3$?

$$\left. \begin{array}{l} \lim_{x \rightarrow 3^-} g(x) \text{ bestaat niet want dom } g = [3, +\infty[\\ \lim_{x \rightarrow 3^+} g(x) = 2 \end{array} \right\} \Rightarrow \lim_{x \rightarrow 3} g(x) \text{ bestaat niet want } \lim_{x \rightarrow 3^-} g(x) \neq \lim_{x \rightarrow 3^+} g(x).$$

Is de functie continu in $x = 3$?

$$\left. \begin{array}{l} g \text{ is niet linkscontinu in } 3 \\ g \text{ is rechtscontinu in } 3 \end{array} \right\} \Rightarrow g \text{ is discontinu in } 3.$$

Voorbeeld 2



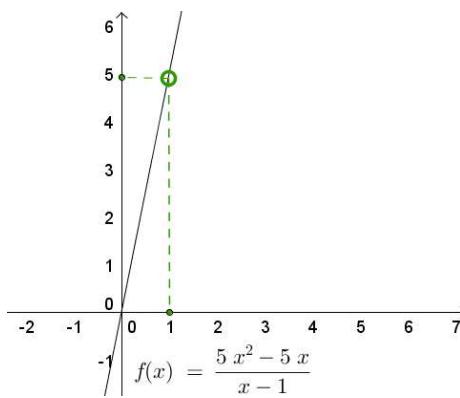
Bestaan de limieten in $x = 2$?

$$\left. \begin{array}{l} \lim_{x \rightarrow 2^-} f(x) = -1 \\ \lim_{x \rightarrow 2^+} f(x) = +1 \end{array} \right\} \Rightarrow \lim_{x \rightarrow 2} f(x) \text{ bestaat niet want } \lim_{x \rightarrow 2^-} f(x) \neq \lim_{x \rightarrow 2^+} f(x).$$

Is de functie continu in $x = 2$?

$$\left. \begin{array}{l} g \text{ is niet linkscontinu in } 2 \\ g \text{ is niet rechtscontinu in } 2 \end{array} \right\} \Rightarrow f \text{ is discontinu in } 2.$$

Voorbeeld 3



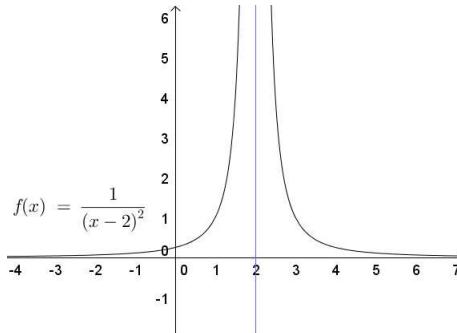
Bestaan de limieten in $x = 1$?

$$\left. \begin{array}{l} \lim_{x \rightarrow 1^-} f(x) = 5 \\ \lim_{x \rightarrow 1^+} f(x) = 5 \end{array} \right\} \Rightarrow \lim_{x \rightarrow 1} f(x) \text{ bestaat en is } 5$$

Is de functie continu in $x = 1$?

$$\left. \begin{array}{l} g \text{ is niet linkscontinu in } 1 \\ g \text{ is niet rechtscontinu in } 1 \end{array} \right\} \Rightarrow f \text{ is discontinu in } 1.$$

Voorbeeld 4



Bestaan de limieten in $x = 2$?

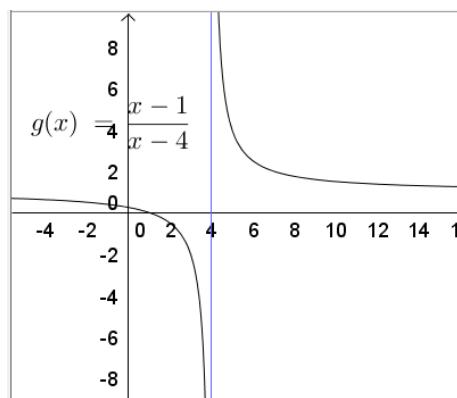
$$\left. \begin{array}{l} \lim_{x \rightarrow 2^-} f(x) = +\infty \\ \lim_{x \rightarrow 2^+} f(x) = +\infty \end{array} \right\} \Rightarrow \lim_{x \rightarrow 2} f(x) = +\infty.$$

Is de functie continu in $x = 2$?

$$\left. \begin{array}{l} g \text{ is niet linkscontinu in } 2 \\ g \text{ is niet rechtscontinu in } 2 \end{array} \right\} \Rightarrow f \text{ is discontinu in } 2.$$

We merken nog op dat $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 0$ en $\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = 0$. Hier spreken we over een horizontale asymptoot met vergelijking $y = 0$.

Voorbeeld 5



Bestaan de limieten in $x = 4$?

$$\left. \begin{array}{l} \lim_{x \rightarrow 4^-} g(x) = -\infty \\ \lim_{x \rightarrow 4^+} g(x) = +\infty \end{array} \right\} \Rightarrow \lim_{x \rightarrow 4} g(x) \text{ bestaat niet.}$$

Is de functie continu in $x = 4$?

$$\left. \begin{array}{l} g \text{ is niet linkscontinu in } 4 \\ g \text{ is niet rechtscontinu in } 4 \end{array} \right\} \Rightarrow f \text{ is discontinu in } 4.$$

Er is een verticale asymptoot met vergelijking $x = 4$. Merk verder op dat $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 1$ en $\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = 1$. Er is dus ook een horizontale asymptoot met vergelijking $y = 1$.

2.5 Limieten - voorbeeld

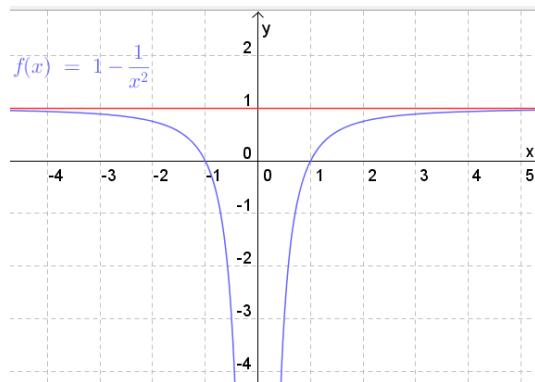
Filmpje in MOOC

2.6 Limieten van functies (en asymptoten)

Limiet bij onbeperkte toename van het argument

We stellen ons de vraag wat $f(x)$ wordt als we x naar (plus of min) oneindig laten gaan.

Laten we eerst naar een voorbeeld kijken. Stel $f(x) = 1 - \frac{1}{x^2}$



We stellen vast dat naarmate x toeneemt, $f(x)$ waarden aanneemt die onbeperkt dicht bij 1 komen te liggen. Hetzelfde gebeurt wanneer x negatief is, maar in absolute waarde onbeperkt toeneemt. We kunnen dit noteren (en berekenen) a.d.h.v. de limietnotatie: $\lim_{x \rightarrow +\infty} \left(1 - \frac{1}{x^2}\right) = 1$ en $\lim_{x \rightarrow -\infty} \left(1 - \frac{1}{x^2}\right) = 1$

Algemeen:

De afstand tussen de waarden van $f(x)$ en b wordt willekeurig klein, als het argument x maar voldoende groot wordt (argument neemt onbeperkt toe of af).

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = b \Leftrightarrow \forall \varepsilon > 0, \exists m > 0 : x > m \Rightarrow |f(x) - b| < \varepsilon$$

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = b \Leftrightarrow \forall \varepsilon > 0, \exists m > 0 : x < -m \Rightarrow |f(x) - b| < \varepsilon$$

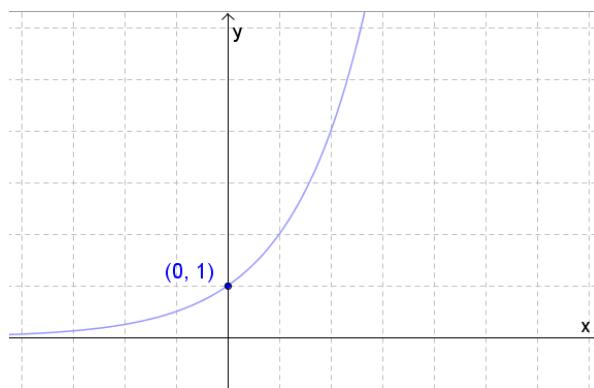
Dit houdt in dat men eerst een willekeurig positief getal ε kiest en in functie van deze gekozen ε , vastlegt hoe groot dan m moet zijn. Dit is uitvoerbaar, hoe klein men ε ook kiest. We kunnen ook zeggen: je kan $f(x)$ oneindig dicht bij b laten komen, mits je maar een heel grote waarde voor x kiest.

De horizontale rechte met vergelijking $y = b$ noemen we de **horizontale asymptoot** van de functie $f(x)$. In ons voorbeeld met de functie $f(x) = 1 - \frac{1}{x^2}$ is er één horizontale asymptoot met als vergelijking $y = 1$. Merk op dat de functie $f(x)$ deze horizontale rechte (de asymptoot) zowel voor $x \rightarrow -\infty$ als voor $x \rightarrow +\infty$ langs de onderkant benadert.

Het is ook mogelijk dat de waarden van $f(x)$ onbeperkt toenemen, naarmate x toeneemt, denk maar aan de veeltermfunctie $f(x) = x^2 + 1$ of de exponentiële functie $f(x) = 3^x$.

We stellen vast dat naarmate x toeneemt, ook $f(x)$ onbeperkt toenemt: $\lim_{x \rightarrow +\infty} 3^x = +\infty$.

Merk op dat de limiet van de functie 3^x voor x gaande naar $-\infty$ gewoon naar 0 gaat. Dus de rechte met vergelijking $y = 0$ is hier dan een horizontale asymptoot.



Algemeen:

De waarden van $f(x)$ worden groter dan om het even welk (groot) reëel getal, als men x maar voldoende groot neemt (argument neemt onbeperkt toe of af).

$$\begin{aligned}\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = +\infty &\Leftrightarrow \forall n > 0, \exists m > 0 : x > m \Rightarrow f(x) > n \\ \lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = -\infty &\Leftrightarrow \forall n > 0, \exists m > 0 : x > m \Rightarrow f(x) < -n\end{aligned}$$

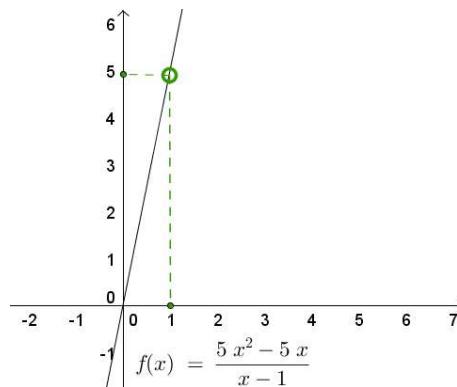
Hierbij legt men eerst vast hoe groot men wil dat $f(x)$ wordt; dit is het getal n . In functie van die gekozen n bepaalt men de benodigde m .

(gelijkaardige redenering en formuleringen voor $x \rightarrow -\infty$).

Limiet van een functie wanneer het argument onbeperkt nadert tot een vaste waarde a

Laten we nu even kijken naar het geval waarbij we x naar een welbepaalde vaste waarde a laten gaan: $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = b$. We kunnen alvast zeggen dat $b \in \mathbb{R}$.

Als voorbeeld beschouwen we de functie $f(x) = \frac{5x^2 - 5x}{x - 1} = \frac{5x(x - 1)}{x - 1}$



Wanneer we het argument x laten naderen tot 1, dan stellen we vast dat $f(x)$ nadert naar 5, en dit zowel langs de linker als langs de rechterkant van 1.

We schrijven: $\lim_{\substack{x \rightarrow 1 \\ <}} \frac{5x^2 - 5x}{x - 1} = 5$ en $\lim_{\substack{x \rightarrow 1 \\ >}} \frac{5x^2 - 5x}{x - 1} = 5$

Algemeen:

De afstand tussen de waarden $f(x)$ en b wordt willekeurig klein, als het argument x maar dicht genoeg nabij a komt.

$$\lim_{\substack{x \rightarrow a \\ <}} f(x) = b \Leftrightarrow \forall \varepsilon > 0, \exists \delta > 0 : x \in]a - \delta, a[\Rightarrow |f(x) - b| < \varepsilon$$

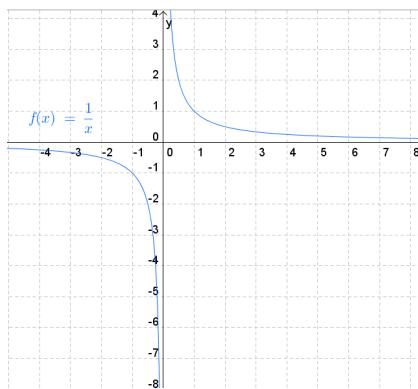
$$\lim_{\substack{x \rightarrow a \\ >}} f(x) = b \Leftrightarrow \forall \varepsilon > 0, \exists \delta > 0 : x \in]a, a + \delta[\Rightarrow |f(x) - b| < \varepsilon$$

Hierbij gaat men ervan uit dat men eerst ε vrij (willekeurig klein) gekozen heeft en dat men dan δ bepaalt in functie van de gekozen ε .

Het gebruik van deze definitie veronderstelt dat $f(x)$ gedefinieerd is in een omgeving van a , maar niet noodzakelijk in a zelf (herinner je dat de limietberekenaar niet geïnteresseerd is in $f(a)$!)

Even terzijde: aangezien in bovenstaand voorbeeld zowel de linker- als rechterlimiet bestaan en gelijk zijn, bestaat de limiet: $\lim_{x \rightarrow 1} \frac{5x^2 - 5x}{x - 1} = 5$. Maar aangezien deze niet gelijk is aan de functiewaarde $f(1)$, want $1 \notin \text{dom } f$, kunnen we besluiten dat de functie discontinu is in het punt $x = 1$. Er zit bijgevolg een perforatie (gaatje) in de grafiek van f . Maar we zouden dit 'gat' in het domein kunnen opheffen door de functiewaarde in $x = 1$ 'erbij te definiëren': we stellen de functiewaarde gelijk aan de limiet (zodat de nieuwe, uitgebreide functie nu wel overal gedefinieerd is, en bovendien overal continu is). We spreken dan van een ophefbare discontinuïteit.

De "nieuwe" functie $f(x)$ wordt nu gedefinieerd als: $f(x) : \begin{cases} x \rightarrow \frac{5x^2 - 5x}{x - 1} & \text{als } x \neq 1 \\ x \rightarrow 5 & \text{als } x = 1 \end{cases}$



Uiteraard is het ook mogelijk dat $f(x)$ onbeperkt toeneemt als x onbeperkt nadert tot a . Als voorbeeld bekijken we de functie $f(x) = \frac{1}{x}$.

Nadert x langs rechts naar 0, dit wil zeggen langs waarden die groter zijn dan nul, dan worden de functiewaarden onbegrensd groot in positieve zin. $f(x)$ nadert naar plus oneindig als x langs rechts naar 0 nadert.

Nadert x langs links naar 0, dit wil zeggen langs waarden die kleiner zijn dan nul, dan worden de functiewaarden onbegrensd groot in negatieve zin. $f(x)$ nadert naar min oneindig als x langs links naar 0 nadert.

We schrijven: $\lim_{\substack{x \rightarrow 0 \\ >}} \frac{1}{x} = \frac{1}{0^+} = +\infty$ en $\lim_{\substack{x \rightarrow 0 \\ <}} \frac{1}{x} = \frac{1}{0^-} = -\infty$

Algemeen:

Indien de waarden van $f(x)$ onbeperkt toenemen als x maar dicht genoeg bij a komt, zegt men:

$$\lim_{x \rightarrow a} f(x) = +\infty \Leftrightarrow \forall n > 0, \exists \delta > 0 : 0 < |x - a| < \delta \Rightarrow f(x) > n$$

$$\lim_{x \rightarrow a} f(x) = -\infty \Leftrightarrow \forall n > 0, \exists \delta > 0 : 0 < |x - a| < \delta \Rightarrow f(x) < -n$$

Hierbij gaat men ervan uit dat men eerst n vrij gekozen heeft en dat men dan δ bepaalt in functie van de gekozen n .

De verticale rechte met vergelijking $x = a$ noemen we de **verticale asymptoot** van de functie $f(x)$. In ons voorbeeld met de functie $f(x) = \frac{1}{x}$ is er één verticale asymptoot met als vergelijking $x = 0$. Merk op dat de functie $f(x)$ deze verticale rechte (de asymptoot) voor $x \rightarrow 0^-$ naar $-\infty$ nadert, en voor $x \rightarrow 0^+$ naar $+\infty$ benadert.

2.7 Epsilon delta definitie voor limieten

Filmje in MOOC

2.8 Linkerlimiet en rechterlimiet

Soms is de waarde van $\lim_{x \rightarrow a} f(x)$ afhankelijk van de manier waarop we naar a naderen. We maken in dat geval een onderscheid tussen

de linkerlimiet	$\lim_{\substack{x \rightarrow a \\ <}} f(x)$	we naderen a langs de te kleine kant van a ("<")
	$\lim_{\substack{x \rightarrow a \\ >}} f(x)$	x stijgt tot aan de waarde van a
de rechterlimiet	$\lim_{\substack{x \rightarrow a \\ >}} f(x)$	we naderen a langs de te grote kant van a (">")
	$\lim_{\substack{x \rightarrow a \\ <}} f(x)$	x daalt tot aan de waarde van a

Wanneer de linker- en rechterlimiet van elkaar verschillen, zeggen we dat de limiet niet bestaat.

Enkel als $\lim_{\substack{x \rightarrow a \\ <}} f(x) = \lim_{\substack{x \rightarrow a \\ >}} f(x) = \lim_{x \rightarrow a} f(x) = b (\in \mathbb{R})$ zeggen we dat **de** limiet bestaat.

Zie ook het paragraafje over *continu versus discontinu*.

Redenen om een onderscheid te maken tussen een linker- en een rechterlimiet kunnen zijn:

- dat $f(x)$ slechts aan één van beide kanten van a bestaat
- dat naarmate x nadert tot a , de waarden die $f(x)$ doorloopt naar een ander waarde toe leiden naargelang x kleiner of groter blijft dan a (sprongdiscontinuïteit).

Een voorbeeld

Stel de functie $g(x) = \sqrt{x - 4}$

Deze functie bestaat enkel voor $x \geq 4$ (we schrijven $\text{dom } g = [4, +\infty[$)

We berekenen de linkerlimiet: $\lim_{\substack{x \rightarrow 4 \\ <}} \sqrt{x - 4}$ maar deze bestaat niet.

We berekenen de rechterlimiet: $\lim_{\substack{x \rightarrow 4 \\ >}} \sqrt{x - 4} = 0$

We kunnen besluiten dat de limiet $\lim_{x \rightarrow 4} \sqrt{x - 4}$ niet bestaat (enkel de rechterlimiet bestaat wel).

2.9 Rekenregels

In de onderstelling dat de limieten bestaan en eindig zijn gelden de onderstaande rekenregels.

De limieten van $f(x)$ en $g(x)$ bestaan en zijn eindig, dus: $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = F$ en $\lim_{x \rightarrow a} g(x) = G$.

1	$\lim_{x \rightarrow a} c = c$	met c een constante ($c \in \mathbb{R}$)
2	$\lim_{x \rightarrow a} x = a$	
3	$\lim_{x \rightarrow a} c.f(x) = c \cdot \lim_{x \rightarrow a} f(x) = c.F$	met $c \in \mathbb{R}$
4	$\lim_{x \rightarrow a} [f(x) \pm g(x)] = \lim_{x \rightarrow a} f(x) \pm \lim_{x \rightarrow a} g(x) = F \pm G$	
5	$\lim_{x \rightarrow a} [f(x) \cdot g(x)] = \lim_{x \rightarrow a} f(x) \cdot \lim_{x \rightarrow a} g(x) = F.G$	
6	$\lim_{x \rightarrow a} \left[\frac{f(x)}{g(x)} \right] = \frac{\lim_{x \rightarrow a} f(x)}{\lim_{x \rightarrow a} g(x)} = \frac{F}{G}$	mits $\lim_{x \rightarrow a} g(x) \neq 0$
7	$\lim_{x \rightarrow a} [f(g(x))] = f\left(\lim_{x \rightarrow a} g(x)\right)$	mits f continu is in het punt $\lim_{x \rightarrow a} g(x) = b$
	hier kunnen nog enkele eigenschappen bijkomen	

Eigenschap 7 in woorden: het omwisselen van het nemen van de limiet en het nemen van de functiewaarde door de functie f is enkel toegestaan als f een continue functie is in het betreffende punt. We zeggen ook wel eens 'de limiet passeert de functie f '.

Tip1: de rekenregels voor ∞ zijn vrij eenvoudig te onthouden en te gebruiken als $(+)\infty$ gelezen wordt als 'een heel groot (positief) getal', $-\infty$ als 'een heel groot negatief getal', 0^+ als 'een heel klein positief getal' en tenslotte 0^- als 'een heel klein negatief getal'.

Tip2: lees bijvoorbeeld de rekenregels 4, 5 en 6 ook eens op een andere manier: "de limiet van een som, is de som van de limieten" ...

Enkele eenvoudige voorbeelden:

- $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x}{4} = \frac{1}{4} \lim_{x \rightarrow +\infty} x = \frac{1}{4} \cdot (+\infty) = +\infty$
- $\lim_{x \rightarrow 3} [(x - 2)(x + 1)] = \lim_{x \rightarrow 3} (x - 2) \cdot \lim_{x \rightarrow 3} (x + 1) = 1 \cdot 4 = 4$
- $\lim_{x \rightarrow 3} (x^2 - x - 2) = \lim_{x \rightarrow 3} x^2 - \lim_{x \rightarrow 3} x - 2 \cdot \lim_{x \rightarrow 3} 1 = 9 - 3 - 2 = 4$
- $\lim_{\substack{x \rightarrow 0 \\ >}} \left(2x - \frac{1}{x} \right) = \lim_{\substack{x \rightarrow 0 \\ >}} 2x - \lim_{\substack{x \rightarrow 0 \\ >}} \frac{1}{x} = 2 \cdot 0 - (+\infty) = -\infty$
- $\lim_{x \rightarrow a} [\cos(g(x))] = \cos\left(\lim_{x \rightarrow a} g(x)\right)$
- $\lim_{x \rightarrow a} [e^{f(x)}] = e^{\lim_{x \rightarrow a} f(x)}$

2.10 Berekenen van limieten

Veeltermfuncties

Een veeltermfunctie van n^{de} graad:

$$f(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_2 x^2 + a_1 x + a_0 \text{ met } a_n \in \mathbb{R}_0 \text{ en } a_{n-1}, \dots, a_0 \in \mathbb{R}$$

Elke veeltermfunctie is continu over \mathbb{R} (want het domein is immers \mathbb{R})

De limiet voor x gaande naar $a \in \bar{\mathbb{R}}$ van een veeltermfunctie is gelijk aan de functiewaarde (m.a.w. vervang overal x door a):

$$\lim_{x \rightarrow a} (a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_2 x^2 + a_1 x + a_0) = f(a)$$

Een speciaal geval is de limiet voor x gaande naar oneindig. In dit geval is het enkel de hoogste graad term die van belang is. Kijk maar:

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} (a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0) = \lim_{x \rightarrow +\infty} a_n x^n \left(1 + \frac{a_{n-1} x^{n-1}}{a_n x^n} + \dots + \frac{a_1 x}{a_n x^n} + \frac{a_0}{a_n x^n} \right) = \lim_{x \rightarrow +\infty} a_n x^n (1 + \dots + 0) = \lim_{x \rightarrow +\infty} a_n x^n$$

Voorbeelden:

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} (-x^3 + 6x + 14) = \lim_{x \rightarrow +\infty} x^3 \left(-1 + \frac{6x}{x^3} + \frac{14}{x^3} \right) = \lim_{x \rightarrow +\infty} x^3 (-1) = -\infty$$

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} (3x^2 - 4x + 2) = \lim_{x \rightarrow +\infty} 3x^2 \left(1 - \frac{4x}{3x^2} + \frac{2}{3x^2} \right) = \lim_{x \rightarrow -\infty} 3x^2 = +\infty$$

Goniometrische en cyclometrische functies

Laat ons meteen opmerken dat bij de berekeningen van deze limieten het argument van de goniometrische of cyclometrische functie moet uitgedrukt zijn in radialen.

Enkele van deze limieten geven in eerste instantie aanleiding tot de onbepaalde vorm $\frac{0}{0}$, maar toch kan men de limiet vinden. We bekijken als voorbeeld de limiet van $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x}$. Maken we een tabel met x -waarden die steeds dichter naar 0 naderen, dan zien we dat de verhouding $\frac{\sin x}{x}$ naar 1 gaat.

x	$\frac{\sin x}{x}$
1	0.84147098480
0.1	0.99833416646
0.01	0.99998333341
0.001	0.99999983333
0.0001	0.99999999999

Aangezien $\lim_{x \underset{x < 0}{\rightarrow} 0} \frac{\sin x}{x} = \lim_{x \underset{x > 0}{\rightarrow} 0} \frac{\sin x}{x} = 1$ kunnen we concluderen dat $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = 1$ (hetzelfde geldt trouwens ook voor $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{x}{\sin x} = 1$).

De limiet $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\sin x}{x} = 0$ kunnen we dan weer wiskundig bewijzen a.d.h.v. de zogenaamde insluitstelling. Het komt er hierbij op neer dat je probeert een functie in te sluiten tussen twee andere functies die beide een gelijke limiet L hebben. De limiet van de ingesloten functie is dan ook gelijk aan L .

We weten dat de sinus-functie altijd een waarde oplevert tussen -1 en +1: $-1 \leq \sin x \leq +1$

Dit blijft gelden als we de vergelijking delen door een positieve x waarde: $\frac{-1}{x} \leq \frac{\sin x}{x} \leq \frac{+1}{x}$

We weten ook dat: $\lim_{x \rightarrow \infty} \left(\frac{-1}{x}\right) = 0$ en $\lim_{x \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{x}\right) = 0$

Passen we nu de insluitstelling toe dan concluderen we dat $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\sin x}{x} = 0$.

De limiet $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = 1$ noemen we een 'standaardlimiet', en we kunnen hiermee een andere standaardlimiet afleiden:

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\tan x}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\cos x}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x \cdot \cos x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} \cdot \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{\cos x} = 1 \cdot 1 = 1$$

Voorbeeld:

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\tan 2x}{\sin 3x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\tan 2x}{\sin 3x} \cdot \frac{2x}{2x} \cdot \frac{3x}{3x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\tan 2x}{2x} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{3x}{\sin 3x} = \frac{2}{3}$$

Nog enkele veel voorkomende limieten van goniometrische en cyclometrische functies (tip: kijk ook eens naar hun grafiek of de goniometrische cirkel)

$\lim_{x \rightarrow \frac{\pi}{2}^-} \tan x = +\infty$	$\lim_{x \rightarrow +\infty} \arctan x = \frac{\pi}{2}$	$\lim_{x \rightarrow 1^-} \arcsin x = \frac{\pi}{2}$
$\lim_{x \rightarrow -\frac{\pi}{2}^+} \tan x = -\infty$	$\lim_{x \rightarrow -\infty} \arctan x = -\frac{\pi}{2}$	$\lim_{x \rightarrow -1^+} \arcsin x = -\frac{\pi}{2}$
$\lim_{x \rightarrow 0^-} \cot x = -\infty$	$\lim_{x \rightarrow +\infty} \operatorname{arccot} x = 0$	$\lim_{x \rightarrow 1^-} \arccos x = 0$
$\lim_{x \rightarrow 0^+} \cot x = +\infty$	$\lim_{x \rightarrow -\infty} \operatorname{arccot} x = \pi$	$\lim_{x \rightarrow -1^+} \arccos x = \pi$

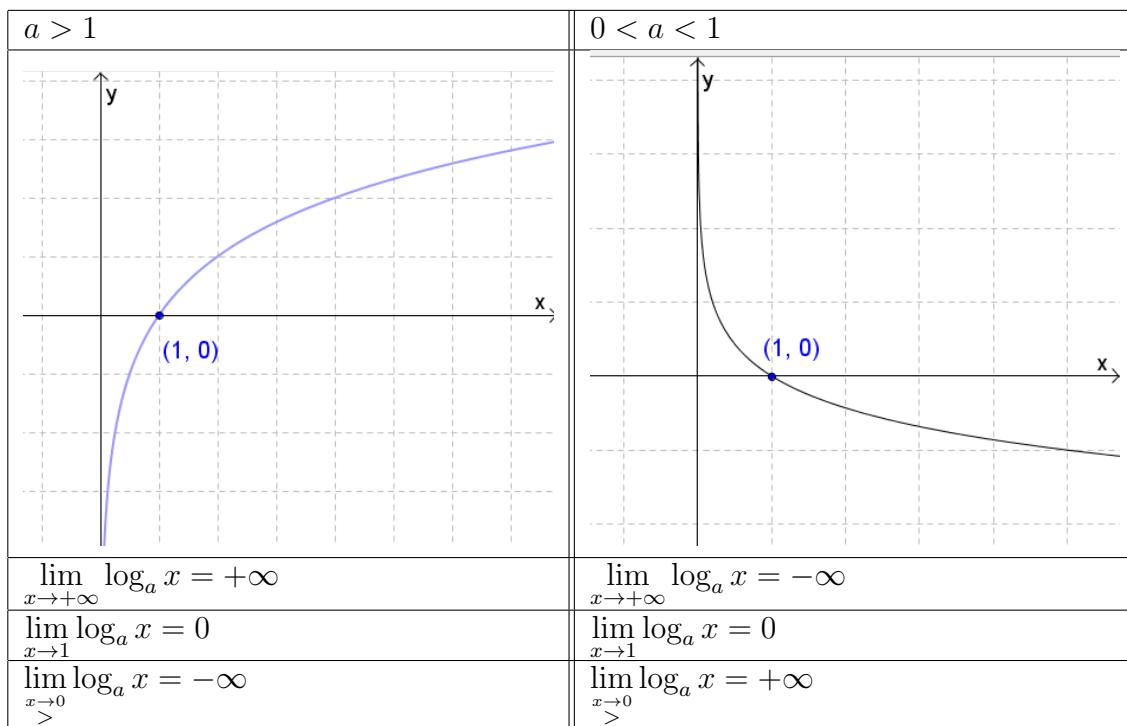
Exponentiële en logaritmische functies

Deze limieten laten zich gemakkelijk afleiden uit de grafieken:

Exponentiële functies

$a > 1$	$0 < a < 1$
$\lim_{x \rightarrow +\infty} a^x = +\infty$	$\lim_{x \rightarrow +\infty} a^x = 0$
$\lim_{x \rightarrow 0} a^x = 1$	$\lim_{x \rightarrow 0} a^x = 1$
$\lim_{x \rightarrow -\infty} a^x = 0$	$\lim_{x \rightarrow -\infty} a^x = +\infty$

Logaritmische functies



Enkele bijzondere limieten

Een bijzondere limiet is:

$$\lim_{x \rightarrow 0} (1+x)^{\frac{1}{x}} = e = 2.718281828\dots \text{ en ook } \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \left(1 + \frac{1}{x}\right)^x = e$$

Hier zie je ook al waarom we gezegd hebben dat 1^∞ niet zomaar gelijk is aan 1.

Deze bijzondere limiet kan worden uitgebreid naar:

$$\lim_{x \rightarrow 0} (1+px)^{\frac{q}{x}} = e^{pq} \text{ met } p, q \in \mathbb{R}_0 \text{ en ook } \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \left(1 + \frac{p}{x}\right)^{qx} = e^{pq}$$

2.11 Schijnbare onbepaaldheden

Onbepaalde vormen

Om de limiet $\lim_{x \rightarrow a} f(x)$ te berekenen moeten we dikwijls onbepaaldheden wegwerken. Daartoe gaan we opzoek naar functies die gelijkwaardig zijn met de oorspronkelijke functie, maar bij berekening van de limiet geen aanleiding meer geven tot een onbepaaldheid.

Soms kan een onbepaalde vorm omgezet worden naar een andere (eveneens onbepaalde) vorm: $0 \cdot \infty = \frac{1}{0} \cdot \infty = \frac{1}{\infty} \cdot \infty = \frac{\infty}{\infty}$. Hetzelfde geldt voor de factor oneindig: $0 \cdot \infty = 0 \cdot \frac{1}{\frac{1}{\infty}} = 0 \cdot \frac{1}{0} = \frac{0}{0}$.

We merken hier meteen op dat een andere aanpak om de onbepaaldheden $\frac{0}{0}$ en $\frac{\infty}{\infty}$ te evalueren de regel van de l'Hôpital is.

Limieten van functies van het type $f(x)^{g(x)}$ kunnen aanleiding geven tot de onbepaalde vormen 0^0 , ∞^0 en 1^∞ . In deze gevallen kan het herschrijven van de functie een oplossing bieden: $f(x)^{g(x)} = e^{\ln f(x)^{g(x)}} = e^{g(x) \cdot \ln f(x)}$. De functie $g(x) \cdot \ln f(x)$ leidt dan vaak tot iets van het type $0 \cdot \infty$.

De onbepaalde vorm $\frac{\infty}{\infty}$

- Rationale functies

We spreken van rationale functies, als $f(x)$ een quotiënt van is van twee veeltermen. Rationale functies zijn niet gedefinieerd in de eventuele nulpunten van de noemer; ze hebben daar geen functiewaarde. Het domein van een rationale functie is \mathbb{R} , met uitzondering van de verzameling nulpunten van de noemer. Elke rationale functie is continu over zijn domein.

Bij een rationale breuk die een onbepaalde vorm oplevert van het type $\frac{\infty}{\infty}$ omdat het argument naar ∞ streeft, hanteert men volgende regel:

beschouw in teller en noemer enkel de hoogstegraadstermen en bepaal de limiet van hun verhouding.

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \left(\frac{a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0}{b_p x^p + b_{p-1} x^{p-1} + \dots + b_1 x + b_0} \right) = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{a_n x^n}{b_p x^p} = \begin{cases} \pm\infty \text{ als } n > p \\ \frac{a_n}{b_p} \text{ als } n = p \\ 0 \text{ als } n < p \end{cases}$$

Merk op dat het teken van $\pm\infty$ moet nog nader bepaald worden.

Enkele voorbeelden:

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{2x^3 - 11}{x^2 + x - 10} = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{2x^3}{x^2} = \lim_{x \rightarrow -\infty} 2x = -\infty$$
$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{6 - x^2}{2x^2 + 5} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{-x^2}{2x^2} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{-1}{2} = -\frac{1}{2}$$

- Irrationale functies

Een irrationale functie is een functie waarin wortelvormen van rationale functies voorkomen. Elke irrationale functie is continu over haar domein. De uitdrukking onder het wortelteken van een even machtwortel moet wel positief zijn!

Bij een irrationale breuk die een onbepaalde vorm oplevert van het type $\frac{\infty}{\infty}$ omdat het argument naar ∞ streeft, hanteert men volgende regel:

zet in teller en noemer de hoogst mogelijke macht van x voorop en werk verder uit.

Hierbij maken we gebruik van het feit dat: $\sqrt{x^2} = |x| = \begin{cases} x & \text{als } x > 0 \\ -x & \text{als } x < 0 \end{cases}$

Twee voorbeelden:

$$1) \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{x^2 + 1} - 2x}{\sqrt[3]{x^3 + 1}} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{|x| \sqrt{1 + \frac{1}{x^2}} - 2x}{\sqrt[3]{x^3} \left(\sqrt[3]{1 + \frac{1}{x^3}} \right)}$$

Nu moeten we een onderscheid maken tussen de limiet gaande naar $+\infty$ en $-\infty$:

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x\sqrt{1 + \frac{1}{x^2}} - 2x}{x\left(\sqrt[3]{1 + \frac{1}{x^3}}\right)} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\sqrt{1 + \frac{1}{x^2}} - 2}{\sqrt[3]{1 + \frac{1}{x^3}}} = \frac{1 - 2}{1} = -1 \text{ en}$$

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{(-x)\sqrt{1 + \frac{1}{x^2}} - 2x}{x\left(\sqrt[3]{1 + \frac{1}{x^3}}\right)} = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{-\sqrt{1 + \frac{1}{x^2}} - 2}{\sqrt[3]{1 + \frac{1}{x^3}}} = \frac{-1 - 2}{1} = -3$$

$$2) \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{3x + 2}{4x - \sqrt{x^2 + 3}} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{x(3 + \frac{2}{x})}{4x - |x|\sqrt{1 + \frac{3}{x^2}}}$$

We maken terug onderscheid tussen de limiet gaande naar $+\infty$ en $-\infty$: $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x(3 + \frac{2}{x})}{4x - x\sqrt{1 + \frac{3}{x^2}}} = \lim_{x \rightarrow +\infty}$
en

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{x(3 + \frac{2}{x})}{4x - (-x)\sqrt{1 + \frac{3}{x^2}}} = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{3 + \frac{2}{x}}{4 + \sqrt{1 + \frac{3}{x^2}}} = \frac{3}{4+1} = \frac{3}{5}$$

De onbepaalde vorm $\frac{0}{0}$

- Rationale functies

Bij de limiet van een rationale functie in het punt a , waarbij a het nulpunt is van zowel de teller als noemer, zal zowel teller als noemer als limiet nul hebben. We zullen in teller en noemer de factoren $(x - a)$ af zoenderen en daarna deze factor $(x - a)$ wegdelen. Daarom gaan we eerst op zoek naar gemeenschappelijke factoren in teller en noemer; eventueel kan de regel van Horner helpen bij het ontbinden van de veelterm in factoren.

Twee voorbeelden:

$$1) \lim_{x \rightarrow 2} \frac{x^2 - 4}{x^2 - 7x + 10} = \frac{0}{0}$$

Teller en noemer ontbinden in factoren:

teller: $x^2 - 4 = (x - 2)(x + 2)$

noemer (via Horner):

2	1	-7	10
	↓	2	-10
	1	-5	0

dus $x^2 - 7x + 10 = (x - 2)(x - 5)$

zodat $\lim_{x \rightarrow 2} \frac{x^2 - 4}{x^2 - 7x + 10} = \lim_{x \rightarrow 2} \frac{(x - 2)(x + 2)}{(x - 2)(x - 5)} = \lim_{x \rightarrow 2} \frac{(x + 2)}{(x - 5)} = \frac{2 + 2}{2 - 5} = -\frac{4}{3}$

$$2) \lim_{x \rightarrow 3} \frac{x^2 - 9}{x^2 + x - 12} = \frac{0}{0}$$

Teller en noemer ontbinden in factoren:

teller: $x^2 - 9 = (x - 3)(x + 3)$

noemer (via Horner):

3	1	1	-12
↓	3	12	
	1	4	0

dus $x^2 + x - 12 = (x - 3)(x + 4)$

zodat $\lim_{x \rightarrow 3} \frac{x^2 - 4}{x^2 - 7x + 10} = \lim_{x \rightarrow 3} \frac{(x - 3)(x + 3)}{(x - 3)(x + 4)} = \lim_{x \rightarrow 3} \frac{(x + 3)}{(x + 4)} = \frac{3 + 3}{3 + 4} = \frac{6}{7}$

- Irrationale functies

Wanneer het nul worden van teller of noemer veroorzaakt wordt door het aftrekken of het optellen van wortelvormen, zal men teller en noemer met eenzelfde factor vermenigvuldigen. Deze factor wordt zo gekozen dat zijn product met de irrationale uitdrukking die nul werd, nu rationaal zal worden. Men noemt deze factor *een toegevoegde*.

Twee voorbeelden:

$$1) \lim_{x \rightarrow 3} \frac{\sqrt{x+1} - 2}{x - 3} = \frac{0}{0}$$

De teller gaan we rationaal maken door de teller (en de noemer) te vermenigvuldigen met $(\sqrt{x+1} + 2)$:

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow 3} \frac{\sqrt{x+1} - 2}{x - 3} &= \lim_{x \rightarrow 3} \frac{\sqrt{x+1} - 2}{x - 3} \cdot \frac{\sqrt{x+1} + 2}{\sqrt{x+1} + 2} \\ &= \lim_{x \rightarrow 3} \frac{(x+1-4)}{(x-3) \cdot (\sqrt{x+1} + 2)} \\ &= \lim_{x \rightarrow 3} \frac{x-3}{(x-3) \cdot (\sqrt{x+1} + 2)} \\ &= \lim_{x \rightarrow 3} \frac{1}{\sqrt{x+1} + 2} \\ &= \frac{1}{4} \end{aligned}$$

$$2) \lim_{x \rightarrow 2} \frac{x-2}{\sqrt{x+7}-3} = \frac{0}{0}$$

De noemer gaan we rationaal maken door de noemer (en de teller) te vermenigvuldigen met $(\sqrt{x+7} + 3)$:

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow 2} \frac{x-2}{\sqrt{x+7}-3} &= \lim_{x \rightarrow 2} \frac{x-2}{\sqrt{x+7}-3} \cdot \frac{\sqrt{x+7}+3}{\sqrt{x+7}+3} \\ &= \lim_{x \rightarrow 2} \frac{(x-2) \cdot (\sqrt{x+7}+3)}{(x+7-9)} \\ &= \lim_{x \rightarrow 2} \frac{(x-2) \cdot (\sqrt{x+7}+3)}{x-2} \\ &= \lim_{x \rightarrow 2} (\sqrt{x+7}+3) \\ &= 6 \end{aligned}$$

De onbepaalde vorm $\infty - \infty$

Bij irrationale functies vermenigvuldig je met en deel je door de toegevoegde irrationale vorm (en hoop je op die manier de onbepaaldheid weg te werken).

Voorbeelden:

$$1) \lim_{x \rightarrow \pm\infty} (\sqrt{x^2 + 1} - \sqrt{x^2 - x + 3}) = \infty - \infty \text{ (zowel voor } x \rightarrow +\infty \text{ als voor } x \rightarrow -\infty)$$

We vermenigvuldigen met het toegevoegde: $(\sqrt{x^2 + 1} + \sqrt{x^2 - x + 3})$

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow \pm\infty} (\sqrt{x^2 + 1} - \sqrt{x^2 - x + 3}) \cdot \frac{(\sqrt{x^2 + 1} + \sqrt{x^2 - x + 3})}{(\sqrt{x^2 + 1} + \sqrt{x^2 - x + 3})} &= \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{x^2 + 1 - (x^2 - x + 3)}{(\sqrt{x^2 + 1} + \sqrt{x^2 - x + 3})} \\ &= \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{x - 2}{(\sqrt{x^2 + 1} + \sqrt{x^2 - x + 3})} \end{aligned}$$

Nu moeten we een onderscheid maken tussen de limiet gaande naar $+\infty$ en $-\infty$:

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x - 2}{(\sqrt{x^2 + 1} + \sqrt{x^2 - x + 3})} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x(1 - \frac{2}{x})}{x(\sqrt{1 + \frac{1}{x^2}} + \sqrt{1 - \frac{x}{x^2} + \frac{3}{x^2}})} = \frac{1}{2} \text{ en}$$

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{x - 2}{(\sqrt{x^2 + 1} + \sqrt{x^2 - x + 3})} = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{x(1 - \frac{2}{x})}{(-x)(\sqrt{1 + \frac{1}{x^2}} + \sqrt{1 - \frac{x}{x^2} + \frac{3}{x^2}})} = -\frac{1}{2}$$

$$2) \lim_{x \rightarrow \pm\infty} (\sqrt{2x^2 + 5} - x)$$

Hier maken we meteen onderscheid tussen de limiet gaande naar $+\infty$ en $-\infty$ (omdat de limiet voor $x \rightarrow -\infty$ eigenlijk geen probleem oplevert): $\lim_{x \rightarrow -\infty} (\sqrt{2x^2 + 5} - x) = +\infty - (-\infty) = +\infty$

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} (\sqrt{2x^2 + 5} - x) = +\infty - (+\infty) \text{ dus...}$$

$$\begin{aligned} &= \lim_{x \rightarrow +\infty} (\sqrt{2x^2 + 5} - x) \cdot \frac{\sqrt{2x^2 + 5} + x}{\sqrt{2x^2 + 5} + x} \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{2x^2 + 5 - x^2}{\sqrt{2x^2 + 5} + x} \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x^2 + 5}{\sqrt{2x^2 + 5} + x} \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x^2(1 + \frac{5}{x^2})}{(+x)\sqrt{2 + \frac{5}{x^2}} + x} \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x(1 + \frac{5}{x^2})}{\sqrt{2 + \frac{5}{x^2}} + 1} \\ &= +\infty \end{aligned}$$

De onbepaalde vorm 1^∞

We hebben ons reeds eerder verbaasd over het feit dat 1^∞ niet zomaar hetzelfde is als 1.1.1.1. . . en dus niet zomaar gelijk hoeft te zijn aan 1!?

De reden is eigenlijk heel eenvoudig: we zitten hier in het hoofdstukje “Limieten”, met andere woorden zowel 1 als ∞ kunnen het resultaat zijn van het nemen van een limiet: $\lim_{x \rightarrow a} f(x)^{g(x)} = \dots = 1^\infty$.

Laten we, om deze module af te sluiten, kijken naar een numeriek voorbeeldje. In paragraaf **

“Enkele bijzondere limieten” hebben we gezien dat: $\lim_{x \rightarrow 0} (1+x)^{\frac{1}{x}} = e = 2.718281828\dots$ en ook

$$\lim_{x \rightarrow \pm\infty} (1 + \frac{1}{x})^x = e$$

x	$(1+x)^{\frac{1}{x}}$			x	$(1 + \frac{1}{x})^x$		
1	2^1	=	2.0	1	2^1	=	2.0
0.1	1.1^{10}	=	2.59374246	10	1.1^{10}	=	2.59374246
0.01	1.01^{100}	=	2.70481382	100	1.01^{100}	=	2.70481382
0.0001	1.0001^{10000}	=	2.71814592	10000	1.0001^{10000}	=	2.71814592

We zien dat, afhankelijk van de vorm die we bekijken, als x heel dicht bij 0 of bij oneindig nadert, de vorm schijnbaar naar 1^∞ gaat, maar de echte waarde gaat echter naar het “magische getal e”.

Module 3

Goniometrie & complexe getallen

1 Goniometrie

2 Complexe getallen

Inleiding

De verzameling van de complexe getallen \mathbb{C} is een uitbreiding van de verzameling van de reële getallen \mathbb{R} waarbij elk complex getal bestaat uit twee reële getallen. Het ene reëel getal wordt het reëel deel van het complex getal genoemd, het andere reëel getal het imaginaire deel. Alhoewel een eerste kennismaking met complexe getallen heel wat mensen hun wenkbrauwen doet fronsen blijkt dit soort getallen heel wat rekenwerk in de fysica en de techniek eenvoudiger te maken. Dit is bijvoorbeeld zeker het geval in vakgebieden als mechanica (trillingen), akoestiek (golven) en elektrotechniek (wisselstroom).

2.1 De imaginaire eenheid

Als eerste stap bij het bespreken van complexe getallen definiëren we de imaginaire eenheid i als het getal waarvoor geldt:

$$i^2 = -1$$

Hierbij moeten we enkele bedenkingen maken:

- Het gebeurt wel eens dat deze definitie wordt herschreven als $i = \sqrt{-1}$. Dit is echter totaal **fout**. We zullen verderop zien dat -1 meer dan één vierkantswortel heeft.
- In sommige vakgebieden zoals elektrotechniek geeft men de voorkeur aan de letter j als symbool voor de imaginaire eenheid.
- Een eigenschap van i die heel wat rekenwerk kan vereenvoudigen is het volgende:

$$i^2 = -1 \iff i = -\frac{1}{i} \iff -i = \frac{1}{i}$$

2.2 Het complex getal

Twee reële getallen x en y worden gecombineerd tot een complex getal z :

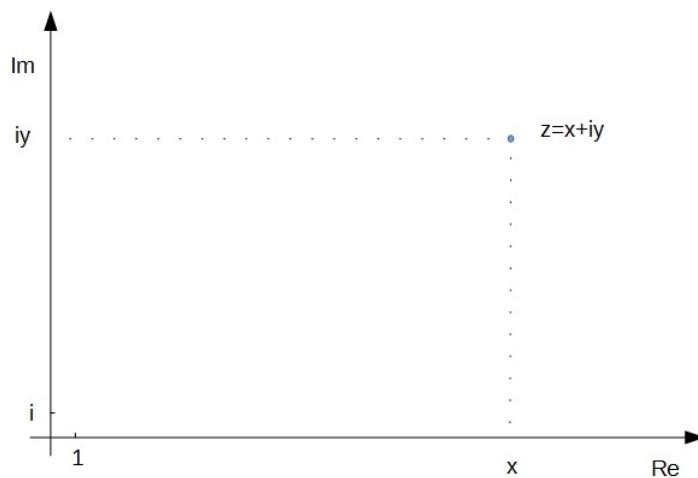
$$z = x + iy$$

Het reële getal x wordt het reële deel van z genoemd: $x = Re(z) = \Re(z)$.

Het reële getal y wordt het imaginaire deel van z genoemd: $y = Im(z) = \Im(z)$.

Merk op dat als $y = 0$ dan $z = x$ met $x \in \mathbb{R}$. Met andere woorden de verzameling van de reële getallen is een deelverzameling van de verzameling van de complexe getallen: $\mathbb{R} \subset \mathbb{C}$. Analoog geldt dat als $x = 0$ dan $z = iy$. Het getal iy wordt een **imaginair getal** genoemd.

Aangezien een complex getal bestaat uit twee reële getallen kan een complex getal meetkundig worden voorgesteld door een punt in een vlak. Dit vlak, **het complex vlak**, wordt bepaald door de getallenassen van de reële getallen, de reële as, met loodrecht daarop de imaginaire as. Deze laatste is de reële as waarop de eenheid (het getal 1) vervangen is door i .

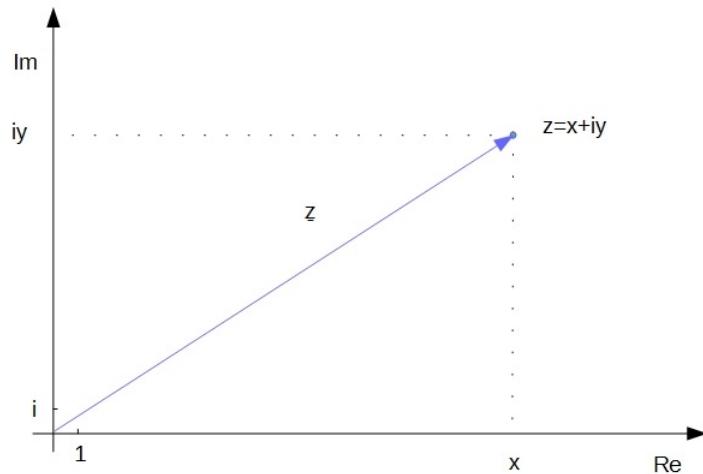


Figuur .1: Voorstelling van een complex getal $x + iy$ in het complex vlak

Met behulp van schuifknoppen kan je in de volgende interactieve voorstelling het reële en imaginaire deel van het getal veranderen en nagaan waar in het complex vlak het complex getal zich bevindt.

<https://ggbm.at/dduSjeQ6>

De plaats van een punt in een vlak is ook bepaald door de plaatsvector van het punt. Een complex getal z kan dus ook worden voorgesteld als een vector in het complex vlak. Een dergelijke vector wordt meestal aangeduid met het symbool \underline{z} .



Figuur .2: Voorstelling van een complex getal z met een vector \underline{z} in het complex vlak

Een interactieve voorstelling van een vector in het complex vlak.

<https://ggbm.at/yJhQKsDt>

2.3 Rekenen met complexe getallen

Som van complexe getallen

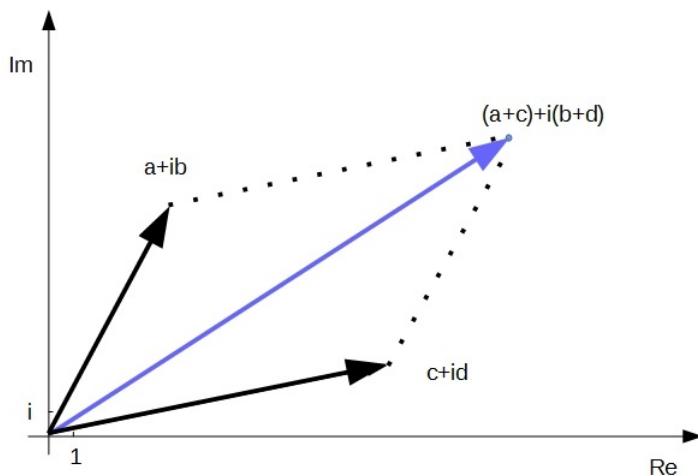
De som van twee complexe getallen $z_1 = a + ib$ en $z_2 = c + id$ is gedefinieerd als

$$z_1 + z_2 = (a + c) + i(b + d)$$

ofwel

$$\Re(z_1 + z_2) = \Re(z_1) + \Re(z_2) \quad \Im(z_1 + z_2) = \Im(z_1) + \Im(z_2)$$

Het afzonderlijk optellen van de reële en imaginaire delen van de complexe getallen kan beschouwd worden als het optellen van componenten van vectoren in het complex vlak. Met andere woorden: optellen van complexe getallen komt neer op optellen van vectoren in het complex vlak.



Figuur .3: Optellen van complexe getallen komt neer op optellen van vectoren in het complex vlak

Product van complexe getallen

Als we twee complexe getallen $z_1 = a + ib$ en $z_2 = c + id$ met elkaar willen vermenigvuldigen kunnen we dit in eerste instantie neerschrijven als $z_1 z_2 = (a + ib)(c + id)$.

Om het product te berekenen worden de haakjes uitgewerkt op de klassieke manier maar wordt er expliciet rekening gehouden met $i^2 = -1$.

$$z_1 z_2 = (a + ib)(c + id) = ac + iad + ibc + i^2bd = (ac - bd) + i(ad + bc)$$

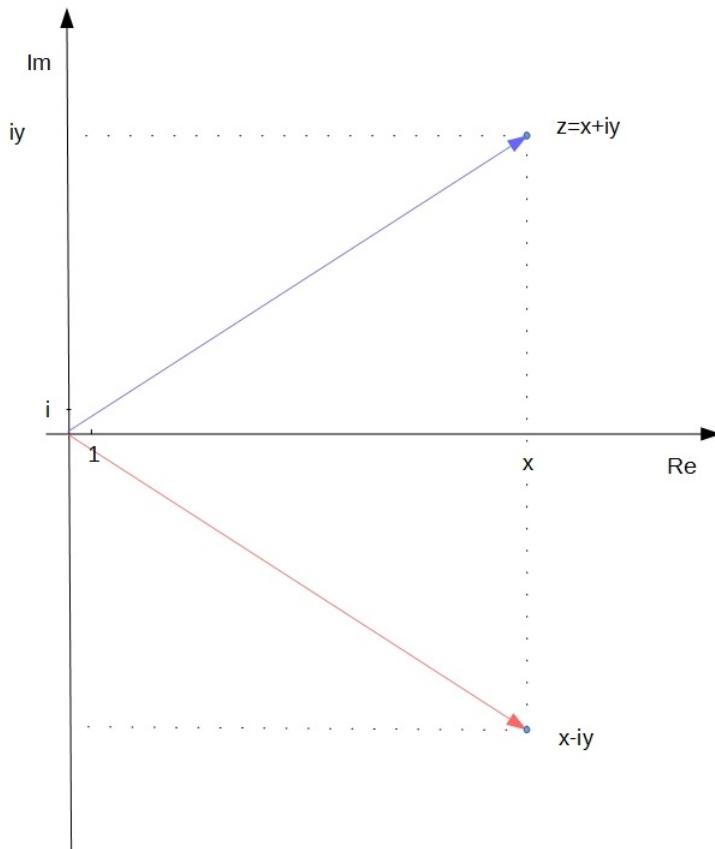
Complex toegevoegde van een complex getal

De complex toegevoegde van een complex getal vindt men door het imaginair deel van een complex getal van teken te veranderen. Men noteert de complex toegevoegde van z als \bar{z} .

Dus, als $z = x + iy$ dan is de complex toegevoegde van z het getal $\bar{z} = x - iy$.

Een getal vermenigvuldigen met zijn complex toegevoegde geeft het volgende interessante resultaat:

$$z\bar{z} = (x + iy)(x - iy) = x^2 - ixy + iyx - i^2y^2 = x^2 + y^2 \in \mathbb{R}$$



Figuur .4: Complex getal met complex toegevoegde

Een meer interactieve voorstelling wordt hieronder gegeven.

<https://ggbm.at/EDQNYsN8>

Modulus van een complex getal

De grootte van de plaatsvector van een complex getal wordt de modulus van dat getal genoemd. Met behulp van de stelling van Pythagoras wordt de grootte berekend als $|z| = |x + iy| = \sqrt{x^2 + y^2}$.

De modulus van het complex getal $z = x + iy$ kan dus ook geschreven worden als

$$|z| = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{z\bar{z}}$$

Quotiënt van complexe getallen

Het berekenen van het quotiënt van twee complexe getallen komt er op neer dat men er voor zorgt dat de noemer van de uitdrukking een reëel getal wordt. De gehele uitdrukking wordt dan een duidelijk leesbaar complex getal.

De eenvoudigste manier om dit te doen is teller en noemer vermenigvuldigen met de complex toegevoegde van de noemer.

Laten we de getallen $z_1 = a + ib$ en $z_2 = c + id$ delen door elkaar:

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{a + ib}{c + id} = \frac{(a + ib)(c - id)}{(c + id)(c - id)} = \frac{(ac + bd) + i(bc - ad)}{c^2 + d^2}$$

Voorbeeld:

$$\frac{4 - i}{1 + i} = \frac{(4 - i)(1 - i)}{(1 + i)(1 - i)} = \frac{4 - 4i - i - 1}{2} = \frac{3}{2} - \frac{5}{2}i$$

2.4 Rekenen met complexe getallen - voorbeeld

Zie filmpje MOOC

2.5 Goniometrische vorm van een complex getal

De plaats van een punt P in een vlak wordt traditioneel vastgelegd met behulp van de cartesische coördinaten (x, y) . Het is echter evengoed mogelijk hiervoor andere coördinaten te kiezen. Een mogelijk alternatieve keuze zijn de afstand r van het punt P tot de oorsprong en de hoek θ die de rechte OP maakt met de x -as, (r, θ) worden poolcoördinaten genoemd.

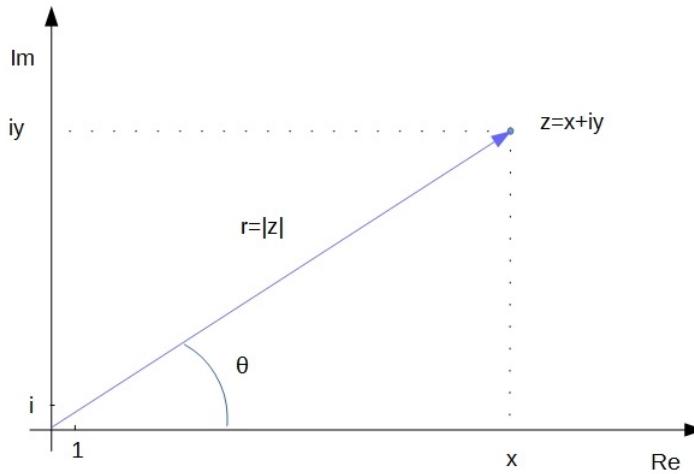
Passen we dit toe op een complex getal z in het complex vlak dat wordt de afstand r de modulus $|z|$ en de hoek θ de hoek die de vector \underline{z} maakt met de x -as.

Door de bij het getal $z = x + iy$ horende vector te projecteren op de reële as en op de imaginaire as vindt men

$$\begin{cases} x = \Re(z) = |z| \cos \theta \\ y = \Im(z) = |z| \sin \theta \end{cases}$$

In goniometrische vorm wordt dat

$$z = x + iy = |z|(\cos \theta + i \sin \theta)$$



Figuur .5: Goniometrische vorm van een complex getal. De plaats van het getal in het complex vlak wordt vastgelegd door de poolcoördinaten $r = |z|$ en θ

Met

modulus van $z = x + iy$	$ z = \sqrt{x^2 + y^2}$
argument van $z = x + iy$	$\theta = \arctan \frac{y}{x}$

Opmerkingen:

- Een punt in het complex vlak met $r = |z|$ en poolhoek θ kan ook beschreven worden met dezelfde r maar een poolhoek $\theta + 2\pi$, een poolhoek $\theta + 4\pi$, enz... Men zegt dat de hoek θ bepaald is op een geheel aantal keer 2π na.

$$z = |z|(\cos \theta + i \sin \theta) = |z|(\cos(\theta + k2\pi) + i \sin(\theta + k2\pi))$$

met k een geheel getal.

De hoek waarvoor geldt $\theta \in [0, 2\pi[$ is de **hoofdwaarde van het argument**.

- Bij het berekenen van het argument wordt gebruik gemaakt van de arctan-functie. Het bereik van deze functie is $] -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}[$ waardoor het berekende argument het complex getal altijd in het eerste of vierde kwadrant plaatst.

Het is dus zeer belangrijk om te controleren of het complex getal in werkelijkheid niet in het tweede of derde kwadrant ligt. Als dat het geval is moet een correctie op het berekende argument worden toegepast!

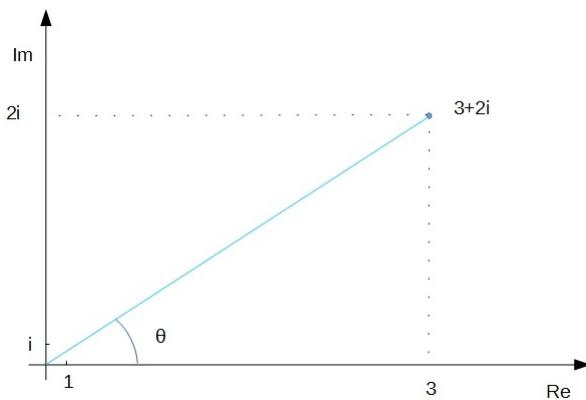
We illustreren hoe dit in zijn werk gaat met enkele voorbeelden.

Enkele voorbeelden:

We zetten de volgende complexe getallen in goniometrische vorm:

1. $z = 3 + 2i$

We maken een figuur om duidelijk te maken in welk kwadrant het getal ligt.



Het getal ligt in het eerste kwadrant. We kunnen dus gewoon de formule voor het argument gebruiken zonder correctie.

$$|z| = \sqrt{3^2 + 2^2}$$

$$\tan \theta = \frac{2}{3}$$

$$|z| = \sqrt{13}$$

$$\theta = 33,69^\circ$$

$$z = \sqrt{13}(\cos(33,69^\circ) + i \sin(33,69^\circ))$$

2. $z = -3 - 2i$

We maken een figuur om duidelijk te maken in welk kwadrant het getal ligt.

Het getal ligt in het derde kwadrant. We moeten dus een correctie toepassen op het berekende argument θ om het werkelijke argument θ' te vinden. We tellen 2π of 180° bij het berekende argument.

$$|z| = \sqrt{(-3)^2 + (-2)^2}$$

$$\tan \theta = \frac{-2}{-3} = \frac{2}{3}$$

$$\theta' = \theta + 180^\circ$$

$$|z| = \sqrt{13}$$

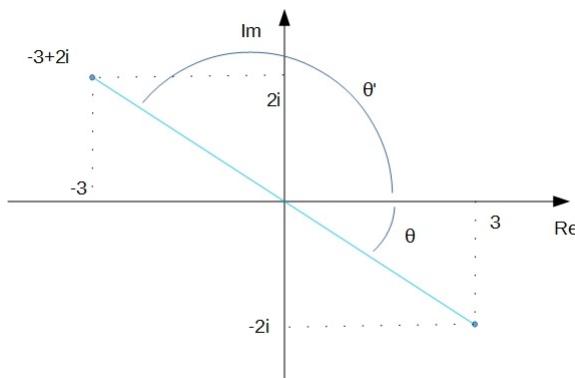
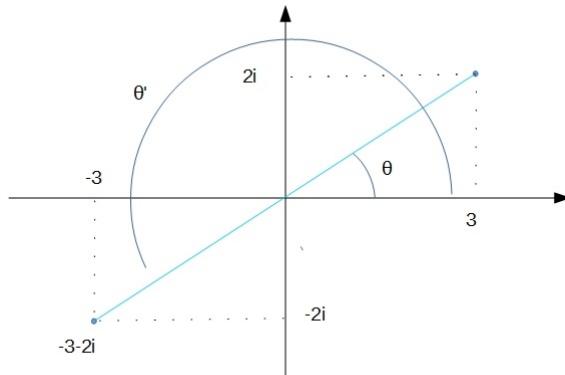
$$\theta = 33,69^\circ$$

$$\theta' = 213,69^\circ$$

$$z = \sqrt{13}(\cos(213,69^\circ) + i \sin(213,69^\circ))$$

3. $z = -3 + 2i$

We maken een figuur om duidelijk te maken in welk kwadrant het getal ligt.



Het getal ligt in het tweede kwadrant. We moeten dus een correctie toepassen op het berekende argument θ om het werkelijke argument θ' te vinden. We tellen 2π of 180° bij het berekende argument.

$$\begin{aligned}|z| &= \sqrt{(-3)^2 + 2^2} \\ \tan \theta &= \frac{2}{-3} = -\frac{2}{3} \\ \theta' &= \theta + 180^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}|z| &= \sqrt{13} \\ \theta &= -33,69^\circ \\ \theta' &= 146,31^\circ\end{aligned}$$

$$z = \sqrt{13}(\cos(146,31^\circ) + i \sin(146,31^\circ))$$

2.6 De exponentiële vorm van een complex getal

De formule van Euler

De formule van Euler drukt uit hoe de functies cos en sin in verband staan met de natuurlijke exponentiële functie.

Voor elk getal $x \in \mathbb{R}$ geldt:

$$e^{ix} = \cos(x) + i \sin(x)$$

Deze formule wordt bewezen in de analyse door aan te tonen dat de Taylorreeksontwikkeling van de functie e^{ix} en van de functie $\cos(x) + i \sin(x)$ hetzelfde zijn.

Voor praktisch rekenwerk met complexe getallen wordt de formule van Euler neergeschreven als:

$$\begin{aligned} e^{i\theta} &= \cos \theta + i \sin \theta \\ e^{-i\theta} &= \cos \theta - i \sin \theta \end{aligned}$$

Waarbij θ het argument voorstelt van de goniometrische vorm van een complex getal. De formule van Euler leidt dus tot een derde, voor de praktijk zeer belangrijke, schrijfwijze voor complexe getallen.

de algebraïsche vorm	$z = x + iy$
de goniometrische vorm	$z = z (\cos \theta + i \sin \theta)$
de exponentiële vorm	$z = z e^{i\theta}$

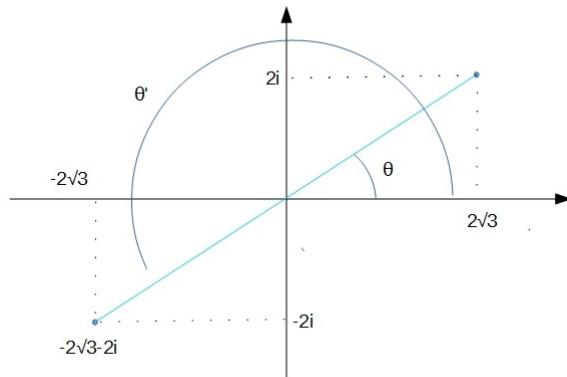
In principe moet in de formule van Euler, en dus ook in de exponentiële vorm van een complex getal, het argument θ uitgedrukt worden in radialen. Het gebeurt echter dikwijls dat het argument wordt uitgedrukt in graden. Dit is geen probleem zolang men beseft dat om de **numerieke waarde** van bijvoorbeeld e^{i45° rechtstreeks te berekenen men $e^{i\frac{\pi}{4}}$ moet uitrekenen.

Voorbeeld:

We schrijven het getal $z = -2\sqrt{3} - 2i$ in exponentiële vorm.

Als eerste stap maken we een figuur die het getal voorstelt in het complex vlak.

Het getal ligt in het derde kwadrant. Er zal dus een correctie op de berekende waarde voor het argument moeten worden toegepast.



$$\begin{aligned} |z| &= \sqrt{(-2\sqrt{3})^2 + (-2)^2} & |z| &= 4 \\ \tan \theta &= \frac{-2}{-2\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}} & \theta &= 30^\circ \\ \theta' &= \theta + 180^\circ & \theta' &= 210^\circ \end{aligned}$$

$$z = 4e^{i210^\circ} \text{ of ook } z = 4e^{i\frac{7}{6}\pi}$$

2.7 Bewerkingen in exponentiële vorm: som, product en quotiënt

De som

Er bestaat geen snelle manier om twee complexe getallen in exponentiële vorm op te tellen. Als je met dit probleem geconfronteerd wordt kan je op twee manieren te werk gaan.

Eerste werkwijze:

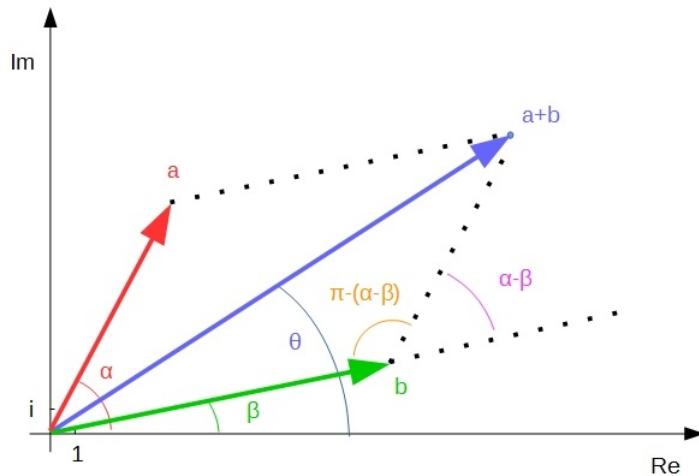
1. Reken de complexe getallen om naar hun algebraïsche vorm met behulp van de formule van Euler
2. Tel de getallen in algebraïsche vorm op
3. Zet de som terug om naar exponentiële vorm.

Tweede werkwijze:

Beschouw het optellen van de twee complexe getallen als het optellen van twee vectoren in het complexe vlak en gebruik driehoeksmeetkunde om de grootte (modulus) en de oriëntatie (argument) van de somvector te bepalen.

Beschouw twee complexe getallen $a = |a|e^{i\alpha}$ en $b = |b|e^{i\beta}$ waarvan je de som wil berekenen. Je wil dus modulus en argument van het complex getal $z = a + b = |z|e^{i\theta}$ vinden.

Maak nu een figuur waarin je de optelling grafisch voorstelt als de optelling van vectoren in het complex vlak:



Figuur .6: Grafische voorstelling van de optelling van twee complexe getallen als optelling van vectoren in het complex vlak. De modulus van de som $z = a + b$ wordt berekend met behulp van de cosinusregel.

In de driehoek gevormd door de vectoren \underline{a} , \underline{b} en de somvector $\underline{z} = \underline{a} + \underline{b}$ kan je de cosinusregel toepassen om de grootte van \underline{z} te berekenen:

$$|\underline{z}|^2 = |\underline{a}|^2 + |\underline{b}|^2 - 2|\underline{a}||\underline{b}|\cos(\pi - (\alpha - \beta))$$

Aangezien $\cos(\pi - (\alpha - \beta)) = -\cos(\alpha - \beta)$ kan de modulus van de som $z = a + b$ geschreven worden als:

$$|z| = \sqrt{|a|^2 + |b|^2 + 2|a||b|\cos(\alpha - \beta)}$$

Het argument θ van de som kan je vinden door op de driehoek de sinusregel toe te passen om de hoek tussen de vectoren \underline{b} en $\underline{a} + \underline{b}$ te berekenen en deze hoek op te tellen bij β .

Je kan ook een algemene maar vrij ingewikkelde formule opstellen voor het argument door met de formule van Euler het reëele deel en imaginaire deel van de getallen apart op te tellen.

$$\begin{aligned}\Re(z) &= \Re(a) + \Re(b) = |a| \cos \alpha + |b| \cos \beta \\ \Im(z) &= \Im(a) + \Im(b) = |a| \sin \alpha + |b| \sin \beta\end{aligned}$$

Het argument vind je via de algemene formule:

$$\tan \theta = \frac{\Im(z)}{\Re(z)} = \frac{|a| \sin \alpha + |b| \sin \beta}{|a| \cos \alpha + |b| \cos \beta}$$

Het product

In tegenstelling tot het optellen van complexe getallen in exponentiële vorm is het vermenigvuldigen zeer eenvoudig. Men kan gewoon de rekenregels voor het vermenigvuldigen van exponentiële functies toepassen.

Neem twee getallen $a = |a|e^{i\alpha}$ en $b = |b|e^{i\beta}$. Het product geeft dan:

$$z = |z|e^{i\theta} = ab = (|a|e^{i\alpha})(|b|e^{i\beta})$$

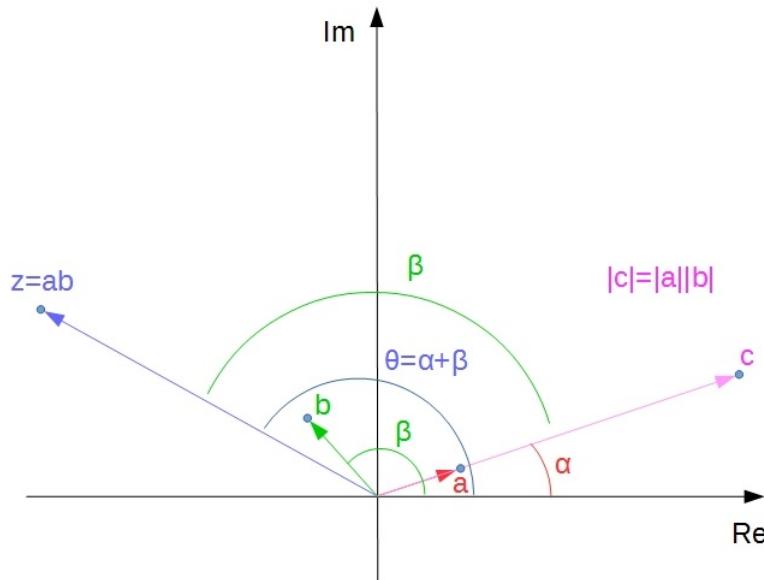
Dus:

$$z = |z|e^{i\theta} = |a||b|e^{i(\alpha+\beta)}$$

Met andere woorden: de nieuwe modulus wordt gevonden door de twee oorspronkelijke moduli te vermenigvuldigen, en het nieuwe argument wordt gevonden door de oorspronkelijke argumenten op te tellen.

Het vermenigvuldigen van twee complexe getallen kan ook grafisch geïnterpreteerd worden. De vermenigvuldiging van $a = |a|e^{i\alpha}$ met $b = |b|e^{i\beta}$ komt neer op het veranderen van de lengte van de met a geassocieerde vector gevolgd door het roteren van de nieuwe vector over een rotatiehoek β .

- De met $a = |a|e^{i\alpha}$ en $b = |b|e^{i\beta}$ geassocieerde vectoren in het complexe vlak worden voorgesteld in de figuur.
- Als eerste stap wordt een nieuw getal c geconstrueerd met hetzelfde argument als a maar met modulus $|c| = |a||b|$. De met c geassocieerde vector ligt dus evenwijdig met de met a geassocieerde vector maar heeft een andere lengte.



Figuur .7: Grafische interpretatie van het product van $a = |a|e^{i\alpha}$ met $b = |b|e^{i\beta}$.

- Vervolgens wordt de nieuwe vector \underline{c} geroteerd over een hoek β wat de vector \underline{z} oplevert. Het met deze vector geassocieerde complex getal $z = |a||b|e^{i(\alpha+\beta)}$ is het product van a en b .

Deze stappen worden geïllustreerd in deze demo:

<https://ggbm.at/hk53Gb2m>

Het quotiënt

Het complex getal $a = |a|e^{i\alpha}$ delen door het complex getal $b = |b|e^{i\beta}$ gebeurt op analoge manier als bij de vermenigvuldiging:

$$z = \frac{|a|e^{i\alpha}}{|b|e^{i\beta}} = \frac{|a|}{|b|}e^{i(\alpha-\beta)}$$

Grafisch wordt dit geïnterpreteerd als het opeenvolgens construeren van een vector \underline{c} , evenwijdig met de met a geassocieerde vector en met grootte $|c| = \frac{|a|}{|b|}$, gevolgd door rotatie van de nieuwe vector \underline{c} over een hoek $-\beta$.

2.8 Bewerkingen in exponentiële vorm: machtsverheffing en worteltrekking

Machtsverheffing

Een complex getal verheffen tot de macht $n \in \mathbb{N}$ kan je beschouwen als een speciaal geval van het vermenigvuldigen van complexe getallen. Het getal z wordt n keer met zichzelf vermenigvuldigd. Dus:

$$\text{Voor } z \in \mathbb{C} \text{ met } z = |z|e^{i\theta} \text{ en } n \in \mathbb{Z} \text{ geldt } z^n = (|z|e^{i\theta})^n = |z|^n e^{in\theta}.$$

Opmerkingen:

- Door de uitdrukking $(e^{i\theta})^n = e^{in\theta}$ om te zetten naar goniometrische vorm met de formule van Euler vindt men

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

Deze uitdrukking staat bekend als de **formule van de Moivre**.

- Zelfs als een complex getal gegeven is in algebraïsche vorm is het voor de machtsverheffing meestal aan te raden om het getal om te zetten in exponentiële vorm.

$$(1+i)^5 = (1+i)(1+i)(1+i)(1+i)(1+i) = \dots$$

In exponentiële vorm (het getal ligt in het eerste kwadrant):

$$(1+i) = \sqrt{(1^2 + 1^2)} e^{i \arctan 1}$$

dus

$$(1+i) = \sqrt{2} e^{i \frac{\pi}{4}}$$

Machtsverheffing:

$$\begin{aligned}(1+i)^5 &= (\sqrt{2})^5 e^{i \frac{5}{4}\pi} = 4\sqrt{2} e^{i \frac{5}{4}\pi} \\(1+i)^5 &= 4\sqrt{2} (\cos(\frac{5}{4}\pi) + i \sin(\frac{5}{4}\pi)) \\(1+i)^5 &= 4(-1 - i) \\(1+i)^5 &= -4 - 4i\end{aligned}$$

Worteltrekking

Een n -de machtswortel z_n van een complex getal (met $n \in \mathbb{N}$) wordt als volgt gedefinieerd:

z_n is een n -de machtswortel van $z \in \mathbb{C} \iff (z_n)^n = z$

Om de wortels te vinden schrijven we de complexe getallen in exponentiële notatie en drukken we expliciet uit dat het argument op een geheel aantal keer 2π na bepaald is.

het complex getal in exponentiële vorm $z = |z|e^{i(\theta+k2\pi)}$, $k \in \mathbb{Z}$
een n -de machtswortel van z $z_n = |z_n|e^{i\theta_n}$

Toepassen van de definitie geeft:

$$\begin{aligned} (|z_n|e^{i\theta_n})^n &= |z|e^{i(\theta+k2\pi)} \\ \iff |z_n|^n e^{in\theta_n} &= |z|e^{i(\theta+k2\pi)} \\ \iff |z_n| &= \sqrt[n]{|z|} \text{ en } \theta_{n,k} = \frac{\theta+k2\pi}{n}, k = 0, 1, 2, \dots, n-1 \end{aligned}$$

Er zijn maar n verschillende waarden voor k want zodra $k = n$ komt men hetzelfde argument als voor $k = 0$:

$$k = 0 \iff \theta_{n,0} = \frac{\theta}{n}$$

$$k = n \iff \theta_{n,n} = \frac{\theta+n2\pi}{n} = \frac{\theta}{n} + 2\pi$$

Besluit:

Elk complex getal $z = |z|e^{i\theta}$ heeft n verschillende n -de machtswortels:

$$z_{n,k} = \sqrt[n]{|z|}e^{i\frac{\theta+k2\pi}{n}}$$

met $k = 0, 1, \dots, n-1$

Voorbeelden:

1. Bereken de tweedemachtwortels van $z = -1$ (m.a.w. $\sqrt{-1}$).

We schrijven -1 eerst in exponentiële vorm:

$$z = -1 \iff z = 1e^{i\pi} \iff z = e^{i(\pi+k2\pi)}, k \in \mathbb{Z}$$

We passen de definitie van 2-de machtswortel toe:

$$\begin{aligned} (|z_2|e^{i\theta_2})^2 &= e^{i(\pi+k2\pi)} \\ \iff |z_2|^2 e^{i2\theta_2} &= 1e^{i(\pi+k2\pi)} \\ \iff \begin{cases} |z_2|^2 = 1 \\ 2\theta_2 = \pi + k2\pi, k \in \mathbb{Z} \end{cases} &\iff \begin{cases} |z_2| = 1 \\ \theta_2 = \frac{\pi+k2\pi}{2}, k = 0, 1 \end{cases} \end{aligned}$$

De twee tweedemachtswortels van $z = -1$ zijn dus

$$\begin{cases} z_{2,0} = 1e^{i\frac{\pi}{2}} = i \\ z_{2,1} = 1e^{i\frac{3\pi}{2}} = -i \end{cases}$$

Het complex getal $z = -1$ heeft dus **twee** vierkantswortels: i en $-i$. De in technische teksten veel gebruikte uitdrukking $i = \sqrt{-1}$ is dus **niet correct**...

2. Bereken de derdemachtswortels van 125: $\sqrt[3]{125} = ?$.

We beschouwen $z = 125$ als een complex getal en schrijven het in exponentiële vorm: $z = 125e^{i(0+k2\pi)}, k \in \mathbb{Z}$

Dan gebruiken we de definitie van de derde machtswortels: $(z_3)^3 = 125$

$$|z_3|^3 e^{i3\theta_3} = 125e^{ik2\pi} \iff |z_3| = \sqrt[3]{125} = 5 \text{ and } \theta_3 = k\frac{2\pi}{3}, k = 0, 1, 2$$

De derdemachtswortels van 125 zijn dus:

$$\begin{cases} z_{3,0} = 5 \\ z_{3,1} = 5e^{i\frac{2\pi}{3}} \\ z_{3,2} = 5e^{i\frac{4\pi}{3}} \end{cases}$$

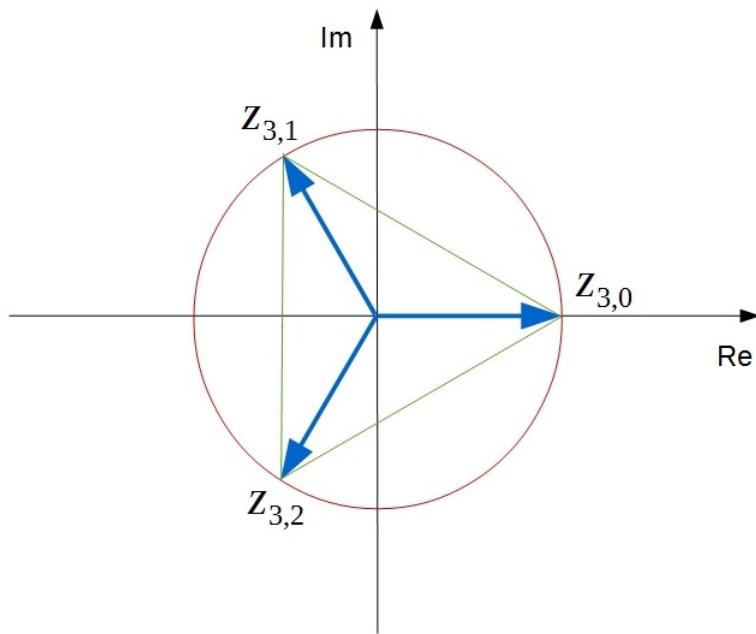
In het complex vlak liggen de wortels op een cirkel met de oorsprong als middelpunt en met straal $|z_3|$. De argumenten van de verschillende wortels zijn zodanig dat de drie wortels op de hoekpunten van een gelijkzijdige driehoek liggen.

Dit laatste kan veralgemeend worden. De n verschillende n -de machtswortels van een complex getal liggen allemaal op een cirkel met middelpunt de oorsprong van het complex vlak. De wortels vormen de hoekpunten van een gelijkzijdige n -hoek.

2.9 Toepassing: fasoren

Een complex getal $z = |z|e^{i\theta}$ komt meetkundig overeen met een punt in het complex vlak. De plaats van dat punt wordt aangeduid met een vector in het complex vlak.

Door nu het argument van het complex getal te veranderen als functie van de tijd, bijvoorbeeld



Figuur .8: De ligging van de drie derdemachtswortels van 125 in het complex vlak.

$\theta = \omega t + \alpha$, kan met de vector laten roteren met hoeksnelheid ω in het complex vlak, α komt dan overeen met het argument op tijdstip $t = 0$.

Een roterende vector in het complex vlak noemt men een **fasor**.

Hier is een fasor met beginfase $\alpha = \frac{\pi}{4}$ voorgesteld:

<https://ggbm.at/MuqyvsFU>

Fasoren kennen veel toepassingen, zo worden ze gebruikt in de elektrotechniek bij rekenwerk met wisselspanning, en in de mechanica bij de beschrijving van trillingen.

Met de formule van Euler kan bijvoorbeeld een wisselspanning $V = V_0 \cos(\omega t + \alpha)$ even goed geschreven worden als $V = \Re(V_0 e^{i(\omega t + \alpha)})$. Bovendien is rekenen met de exponentiële functie $e^{i\theta}$ dikwijls eenvoudiger dan rekenen met de cos of sin functies. Daarom wordt in elektrotechniek dikwijls gebruik gemaakt van de complexe spanning $V = V_0 e^{i(\omega t + \alpha)}$, de werkelijke, fysische spanning vindt men dan door het reële deel van de complexe spanning te nemen.

Een complexe wisselspanning of wisselstroom kan dus voorgesteld worden door een fasor waarvan het reële deel, dus de projectie op de reële as, de fysische spanning voorstelt. Op dezelfde manier kan men in de mechanica van trillingen werken met complexe plaatscoördinaten en complexe snelheden.

Hier zie je een fasor met de projecties op de reële en imaginaire as en de voorstelling van het reële en imaginaire deel als functie van de tijd.

<https://ggbm.at/UaC7rQNa>

Een gedempte trilling met startamplitude u_0 wordt beschreven door een fasor $u(t) = u_0 e^{-\alpha t} e^{i\omega t}$. Het reële deel van $u(t)$ beschrijft dan de fysische trilling. Hierbij kan $u(t)$, afhankelijk van de toepassing, zowel een spanning, een plaatscoördinaat, een snelheid of nog een andere grootheid voorstellen.

<https://ggbm.at/WsABj4EK>

2.10 Test complexe getallen

Module 4

Oppervlakteberekeningen, inhoudsberekeningen en analytische meetkunde

0 Intro

1 Oppervlakte- en inhoudsberekeningen

1.1 Omtrek, oppervlakte en volume

De omtrek O

De omtrek of de lengte van een vlakke figuur is de totale lengte van de buitenzijde. Om de omtrek van een figuur te bepalen meten we alle zijden en maken we de som. De SI-eenheid (= Internationale Standaard) van de omtrek is de meter, m. Het eenheidsstelsel dat we gebruiken voor de omtrek noemen we lengtematen.

kilometer	hectometer	decameter	meter	decimeter	centimeter	millimeter
1 km	1 hm	1 dam	1 m	1 dm	1 cm	1 mm
1000 m	100 m	10 m	1 m	0,1 m	0,01 m	0,001 m

Opmerking Het verschil tussen 2 opeenvolgende kolommen is telkens een factor 10.

De oppervlakte A

De oppervlakte van een vlakke figuur is eenvoudig voor te stellen als het gebied dat je kunt bedekken. Maar let op: het oppervlak is het scheidingsvlak aan de bovenkant tussen een lichaam en zijn omgeving, terwijl de oppervlakte de afmetingen van dit oppervlak voorstelt. Onthoud dus: een oppervlak heeft een oppervlakte. De SI-eenheid van de oppervlakte is de vierkante meter, m^2 . Het eenheidsstelsel dat we gebruiken voor de oppervlakte noemen we oppervlaktematen.

vierkante kilometer	vierkante hectometer	vierkante decameter	vierkante meter	vierkante decimeter	vierkante centimeter	vierkante millimeter
1 km^2	1 hm^2	1 dam^2	1 m^2	1 dm^2	1 cm^2	1 mm^2
$1 \cdot 10^6 \text{ m}^2$	10000 m^2	100 m^2	1 m^2	$0,01 \text{ m}^2$	$0,0001 \text{ m}^2$	$1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$
	1 hectare	1 are	1 centiare			

Opmerking Het verschil tussen 2 opeenvolgende kolommen is telkens een factor 100.

Landmaten geven ook een oppervlakte weer: hectare (ha), are (a), centiare (ca).

- $1 \text{ are} = 10m \cdot 10m = 100m^2$
- $1 \text{ hectare} = 100 \text{ are} = 100m \cdot 100m = 10000m^2$

Het volume V

De inhoud of het volume van een ruimtefiguur is de grootte van het gebied in de ruimte (drie- (of hoger-) dimensionaal) dat door het voorwerp wordt ingenomen. De SI-eenheid van het volume is de kubieke meter, m^3 . Het eenheidsstelsel dat we gebruiken voor het volume noemen we de ruimtematen.

kubieke kilometer	kubieke hectometer	kubieke decameter	kubieke meter	kubieke decimeter	kubieke centimeter	kubieke millimeter
$1 km^3$	$1 hm^3$	$1 dam^3$	$1 m^3$	$1 dm^3$	$1 cm^3$	$1 mm^3$
$1 \cdot 10^9 m^3$	$1 \cdot 10^6 m^3$	$1000 m^3$	$1 m^3$	$0,0001 m^3$	$1 \cdot 10^6 m^3$	$1 \cdot 10^{-9} m^3$
				1 liter	1 ml	

Opmerking Het verschil tussen 2 opeenvolgende kolommen is telkens een factor 1000.

Als inhoudsmaat wordt, voornamelijk voor vloeistoffen, ook de liter (l) gebruikt.

- $1 l = 1 dm^3$
- $1 ml = 1 cm^3 = 1 cc$

1.2 Vlakke figuren

Omtrek O en oppervlakte A

Zie Tabel .1 en .2.

In de MOOC zie je een animatie die de formule voor de berekening van de oppervlakte van een trapezium verklaart.

1.3 Ruimtefiguren

Prisma

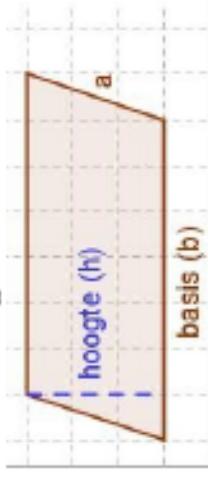
Een prisma, zie Figuur .1, is een ruimtefiguur waarvan twee zijvlakken evenwijdig zijn (bv. het grond- en bovenvlak) en de overige zijvlakken zijn evenwijdig met eenzelfde lijn die de evenwijdige vlakken snijdt. Een prisma wordt dus begrensd door twee evenwijdige en even grote veelhoeken (drie-, vier-, vijfhoeken,...) die we het *grondvlak* en *het bovenvlak* noemen. De *opstaande zijvlakken* bestaan uit rechthoeken of parallelogrammen. De ribben die niet in

Figuur	Omtrek	Oppervlakte
Rechthoek	$O = 2(l + b)$	$A = l \cdot b$
Vierkant	$O = 4z$	$A = z^2$
Rechthoekige driehoek	$O = b + h + s$	$A = \frac{b \cdot h}{2}$
Niet-rechthoekige of willekeurige driehoek	$O = a + b + c$	$A = \frac{b \cdot h}{2}$

Tabel .1: Omtrek en oppervlakte van vlakke figuren (1).

Figuur Omtrek Oppervlakte

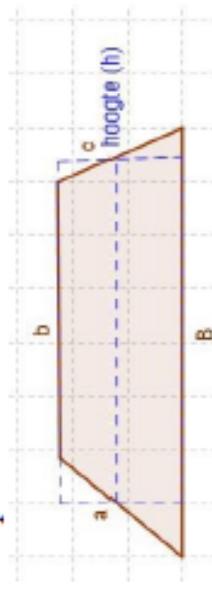
Parallellogram



$$O = 2(a + b)$$

$$A = b \cdot h$$

Trapezium

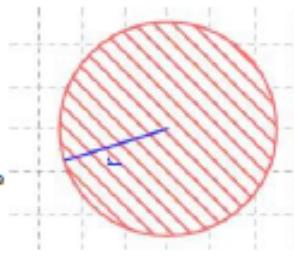


$$O = a + b + c + B$$

$$A = \frac{a+B}{2} \cdot h$$

Als basis gebruiken we de gemiddelde breedte

Schijf

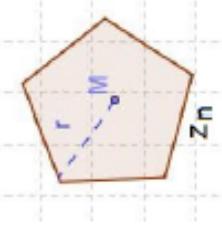


$$O = 2\pi r$$

$$\begin{aligned} \text{Diameter } D &= 2.r \\ r &\text{ is de straal} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A &= \pi r^2 \\ A &= \frac{\pi D^2}{4} \end{aligned}$$

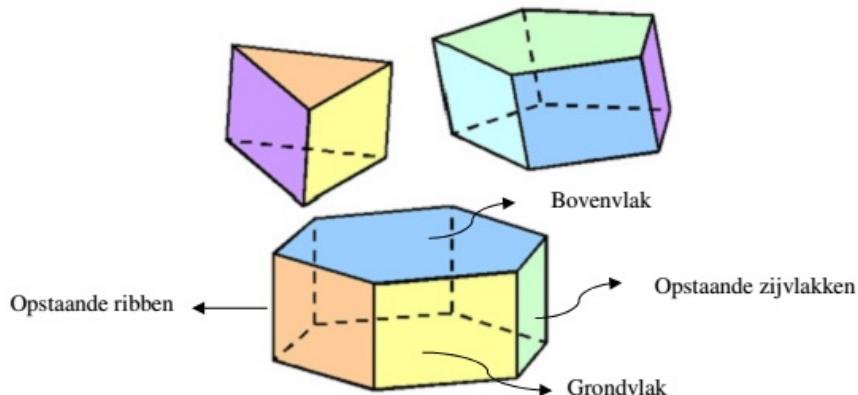
Regelmatige n-hoek of veelhoek
Bij zo'n veelhoek zijn alle zijden z_n even lang en zijn alle hoeken even groot.



$$\begin{aligned} O &= n.z_n \\ O &= n.2r \cdot \sin\left(\frac{\pi}{n}\right) \end{aligned}$$

$$A = n.r^2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{n}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{n}\right)$$

Tabel .2: Omtrek en oppervlakte van vlakke figuren (2).



Figuur .1: Prisma.

het grond- of bovenvlak gelegen zijn hebben allen dezelfde lengte, we noemen ze de *opstaande ribben*.

Naargelang het aantal opstaande zijvlakken spreken we van een driezijdig, vierzijdig, vijfzijdig,... prisma.

Een *recht* prisma is een prisma, waarin de verbindende ribben en zijvlakken loodrecht op het grondvlak staan. Dit houdt in dat de verbindende zijvlakken rechthoeken zijn. Een *scheef* prisma is een prisma, waarvan de verbindende ribben en zijvlakken niet loodrecht op het grondvlak staan. Dit houdt in dat de verbindende zijvlakken parallellogrammen zijn.

Onthoud

Oppervlakte van een prisma: $A = \text{opp}_{\text{grondvlak}} + \text{opp}_{\text{bovenvlak}} + \text{opp}_{\text{zijkanten}}$
Volume van een prisma: $V = \text{opp}_{\text{grondvlak}} \cdot \text{hoogte}$

We onderscheiden een drietal bijzondere prisma's.

Kubus of hectaëder

Elk zijvlak van de kubus vormt een vierkant, zie Figuur .2. Alle 8 ribben zijn dus even lang. Een kubus is een bijzonder recht prisma.

Onthoud

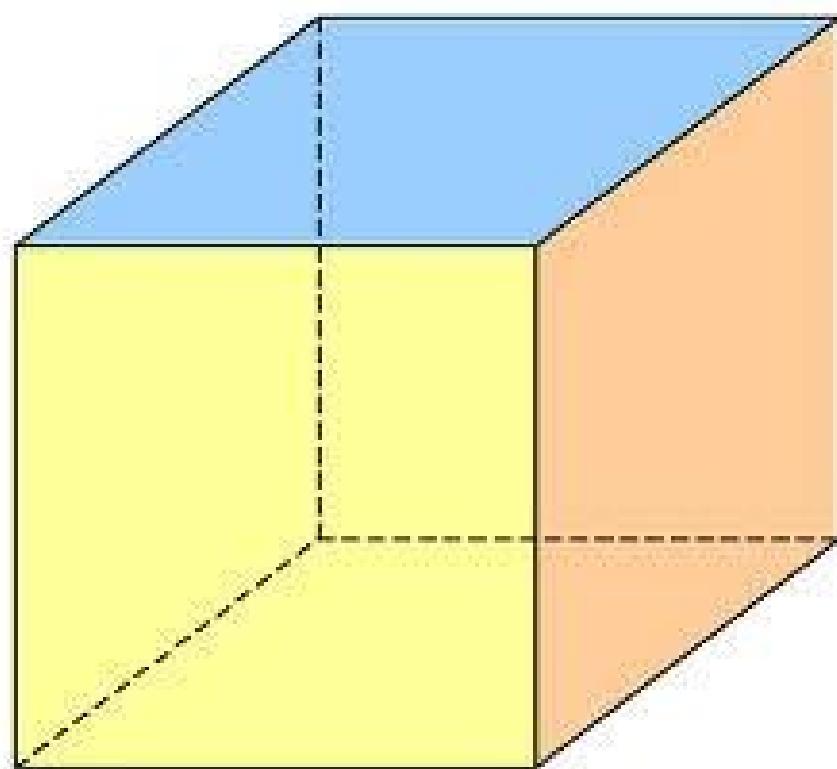
Oppervlakte van een prisma: $A = 6z^2$
Volume van een prisma: $V = z^3$

Balk

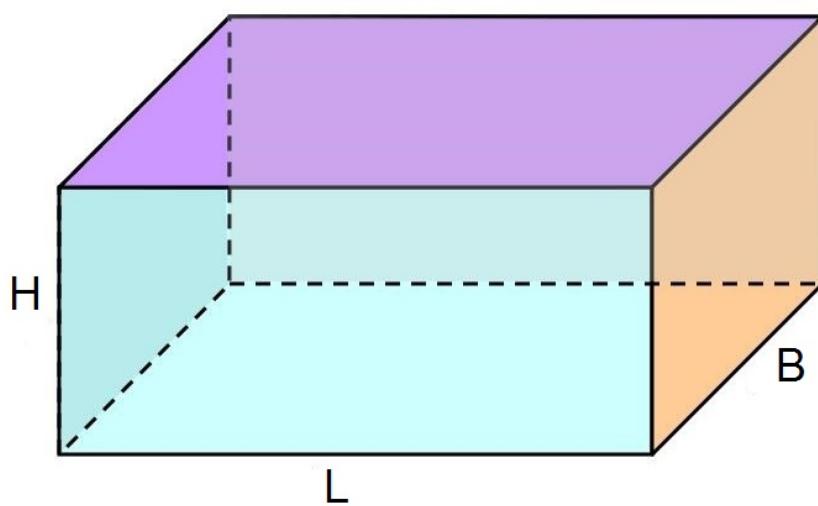
De 6 zijvlakken van de balk bestaan uit rechthoeken, zie Figuur .3. Een balk is ook een bijzonder recht prisma. Een balk is tevens een rechthoekig parallellepipedum.

Onthoud

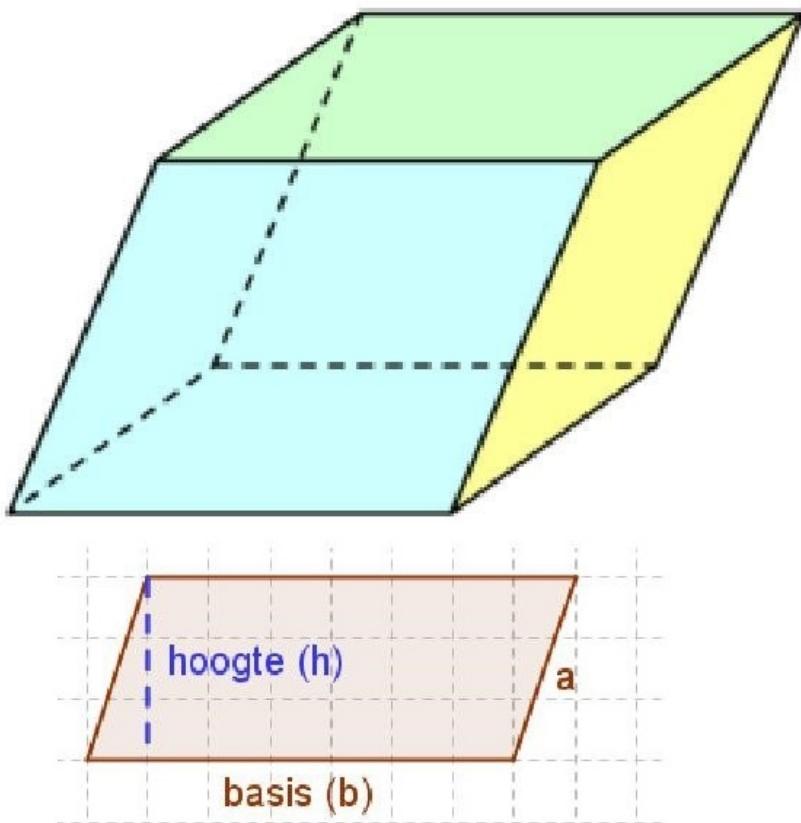
Oppervlakte van een prisma: $A = 2(L \cdot B + B \cdot H + H \cdot L)$
Volume van een prisma: $V = L \cdot B \cdot H$



Figuur .2: Kubus



Figuur .3: Balk.



Figuur .4: Parallellepipedum.

Parallellepipedum

Een parallellepipedum, zie Figuur .4, is een veelvlak waarvan alle 6 zijvlakken bestaan uit parallelogrammen die paarsgewijs gelijk en evenwijdig zijn. Dus ook het grond- en het bovenvlak zijn parallelogrammen. Een parallellepipedum is een bijzonder scheef prisma, terwijl de kubus en de balk speciale gevallen zijn van een parallellepipedum.

Onthoud

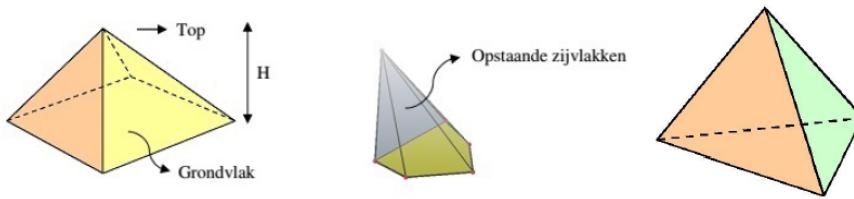
Oppervlakte van een prisma: $A = \text{som van de oppervlakten}$

Volume van een prisma: $V = \text{opp}_{\text{grondvlak}} \cdot \text{hoogte}$

Piramide

Een piramide is een ruimtefiguur waarvan het grondvlak een veelhoek (driehoek, vierhoek, vijfhoek, ...) is en waarvan de hoekpunten verbonden worden met een willekeurig punt in de ruimte, zie Figuur .5. Dit punt noemen we de top van de piramide. De opstaande zijvlakken zijn allemaal driehoekig. Een rechte piramide heeft als grondvlak een regelmatige veelhoek en de top ligt boven het centrum van het grondvlak. Alle zijvlakken hebben dezelfde driehoekige vorm.

Onthoud



Figuur .5: Piramide.

Oppervlakte: $A = \text{som van alle oppervlakten}$

Volume: $V = \frac{1}{3} \text{opp}_{\text{grondvlak}} \cdot \text{hoogte}$

Een *tetraëder of viervlak* is een ruimtefiguur bestaande uit vier driehoekige vlakken. Het is dus een piramide met een driehoekig grondvlak.

Een *regelmatig viervlak* bestaat uit vier gelijkbenige driehoeken.

1.4 Omwentelingslichamen

Deze lichamen hebben ten minste één grensvlak dat niet vlak is. We noemen dit vlak een gebogen vlak of zijdelingsoppervlak of manteloppervlak. Omwentelingslichamen ontstaan door het wentelen van een vlak rond een rechte. Deze rechte noemen we dan de omwentelingsas.

Cilinder

Een cilinder is een lichaam dat ontstaat wanneer we een rechthoek met afmetingen R en H om n van zijn zijden laten wentelen, zie Figuur .6. Beschouw de omwentelingscilinder, met R als de straal van het grond- en bovenvlak en H als de hoogte.

Het grond- en bovenvlak zijn twee evenwijdige schijven met dezelfde straal R . De afstand tussen (de middelpunten van) het grond- en bovenvlak noemen we de hoogte H . Bij een *rechte cilinder* staat de omwentelingsas loodrecht op het grondvlak, zo niet dan spreken we van een *scheve cilinder*.

De totale oppervlakte van de cilinder is gelijk aan de som van de oppervlakten van het grond- en het bovenvlak (= oppervlakte schijf is πR^2) en de zijdelingse oppervlakte (= een rechthoek met oppervlakte $2\pi R \cdot H$). De inhoud van de cilinder is het product van oppervlakte grondvlak met de hoogte.

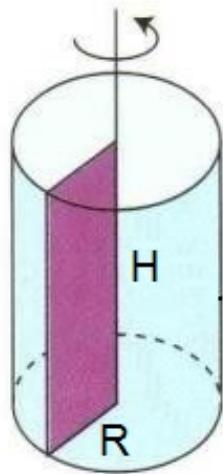
Onthoud

Oppervlakte: $A = 2\pi R^2 + 2\pi RH$

Volume: $V = \pi R^2 H$

Kegel

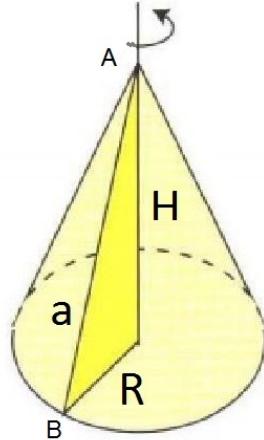
Een kegel is het lichaam dat ontstaat als we een rechthoekige driehoek laten wentelen om één van zijn rechthoekszijden, zie Figuur .7. Het grondvlak van de kegel is een schijf met straal R . De afstand van de top tot het middelpunt van het grondvlak noemen we de hoogte H van de kegel. Het apothema a van de kegel is de lengte van het lijnstuk $[AB]$, we spreken ook wel van



Figuur .6: Cilinder

de schuine hoogte. De lengte van het apothema kan gemakkelijk berekend worden a.d.h.v. de stelling van Pythagoras: $a = R + H$.

De totale oppervlakte van de kegel is gelijk aan de som van de oppervlakte van het grondvlak (= oppervlakte schijf is πR^2) en de zijdelingse oppervlakte (πRa). De inhoud van de kegel is het product van oppervlakte grondvlak met de hoogte en de constante.



Figuur .7: Kegel

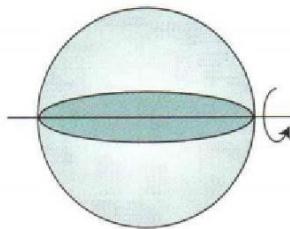
Onthoud

$$\text{Oppervlakte: } A = \pi R^2 + \pi Ra$$

$$\text{Volume: } V = \frac{1}{3} \pi R^2 H$$

Bol

Een bol is het lichaam dat ontstaat als we een schijf laten wentelen om de middellijn, zie Figuur .8. Een bol heeft maar één zijvlak, we spreken van het boloppervlak. Alle punten van het boloppervlak liggen op dezelfde afstand van het middelpunt. Deze afstand noemen we de straal R .



Figuur .8: Bol

Onthoud

$$\text{Oppervlakte: } A = 4\pi R^2$$

$$\text{Volume: } V = \frac{4}{3}\pi R^3$$

1.5 Test oppervlakte en inhoudsberekeningen

TODO

2 Analytische meetkunde

2.1 Abscis van een punt op een geijkte rechte

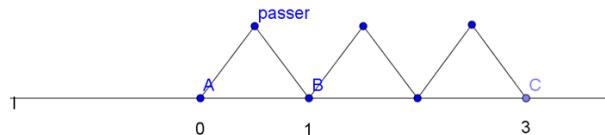
De verzameling \mathbb{R} van de reële getallen kun je voorstellen als de verzameling van de punten op een geijkte rechte. Een geijkte rechte is een rechte l waarop een paar van 2 verschillende punten ($A; B$) gekozen is. De volgorde van zulke punten heeft belang. Het eerste punt A heet de oorsprong van de ijk. Deze oorsprong komt overeen met het getal 0. Het tweede punt B komt overeen met het getal 1.



De richting van A naar B noem je de positieve richting van de geijkte rechte. Omdat op l door de ijk een positieve richting gedefinieerd is noem je l ook een georiënteerde rechte. Die oriëntatie duidt je vaak aan met een pijl. Je stelt een georiënteerde rechte ook voor zoals op volgende tekening.



Een natuurlijk getal n (bijvoorbeeld 3) komt overeen met het punt C op l langs dezelfde kant van A als het punt B door n keer vanuit A de afstand van A naar B af te passen. Je ziet dit geïllustreert voor $n = 3$.



Rationaal getal

Een rationaal getal gegeven door een positieve breuk $\frac{n}{m}$ stel je als volgt voor door een punt C op l . Je verdeelt het lijnstuk van A naar B in m gelijke delen (je ziet straks hoe je dat kunt construeren). Noem B' het eerste deelpunt na A . Als $n = a + \frac{n'}{m}$ met $0 < n' < m$ en a een natuurlijk getal, dan duidt je eerst het punt C' aan op l dat overeenkomt met het natuurlijke getal a . Vervolgens pas je vanuit C' in de positieve richting n' keer de afstand van A naar B' af. Dit is het punt C .

Je ziet dit geïllustreerd voor $\frac{n}{m} = \frac{11}{4} = 2 + \frac{3}{4}$ (dus $a = 2$ en $n' = 3$).

Negatief getal

Een negatief geheel getal of een negatief rationaal getal construeer je door afstanden af te passen naar de negatieve richting van de geijkte rechte l .

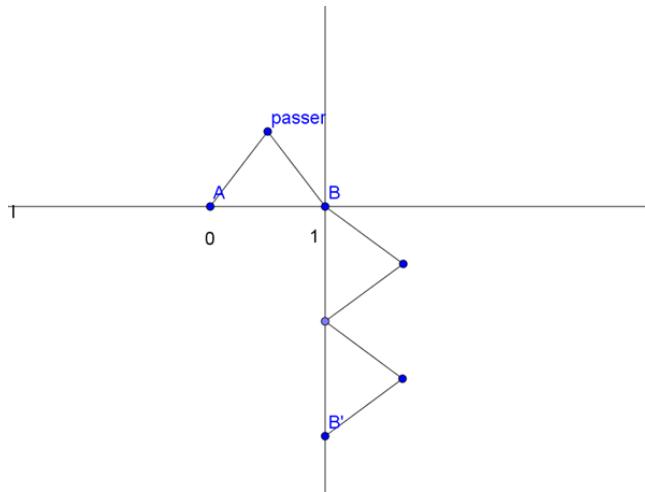
Reëel getal

Met veel meer geavanceerde wiskunde kan aangetoond worden dat ieder reëel getal (kommagetral) overeenkomt met een punt van l en dat ieder punt van l ook overeenkomt met een reëel getal. Een geijkte rechte is daardoor een meetkundige voorstelling van de verzameling \mathbb{R} van de reële getallen.

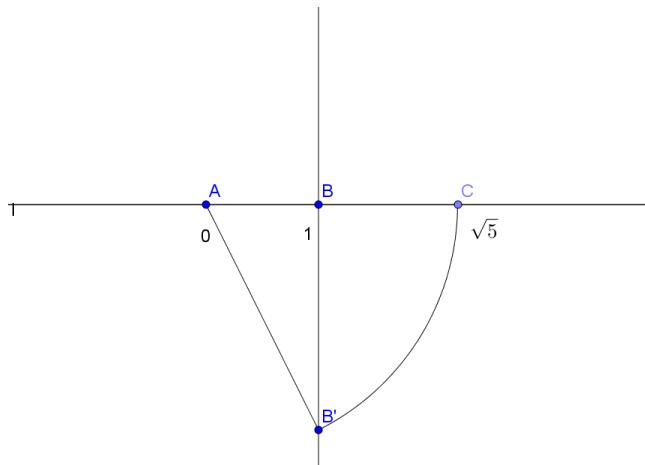
Door gebruik te maken van de Stelling van Pythagoras kun je bijvoorbeeld ook het punt van l dat overeenkomt met een vierkantswortels uit een natuurlijk getal construeren. Je ziet dit geïllustreerd voor $\sqrt{5}$. Je gebruikt daarbij dan $\sqrt{5}$ de schuine zijde is van een rechthoekige driehoek met rechthoekslijden 1 en 2.

Je start met de geijkte rechte waar A en B op liggen. Loodrecht (winkelhaak) op l door B trek je een rechte en daarop pas je met passer tweemaal vanuit B de afstand van A tot B af. Dit geeft het punt B' en het resultaat is te zien in Figuur .9.

Met de passer met middelpunt A en straal de afstand van A tot B' maak je een cirkelboog die op l het punt C geeft. Het resultaat is te zien in Figuur .10.



Figuur .9: Constructie vierkantswortel van een natuurlijk getal (1).



Figuur .10: Constructie vierkantswortel van een natuurlijk getal (2).

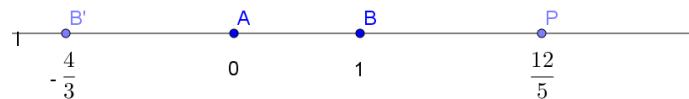
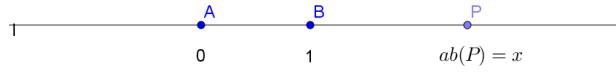
Algemeen kan voor ieder positief rationaal getal het punt op l dat overeenkomt met de vierkantswortel geconstrueerd worden.

Wiskundig kan aangetoond worden dat je het punt dat op l overeenkomt met $\sqrt[3]{2}$ niet op soortgelijke wijze kunt construeren. Ook een reëel getal zoals π kun je niet op l construeren.

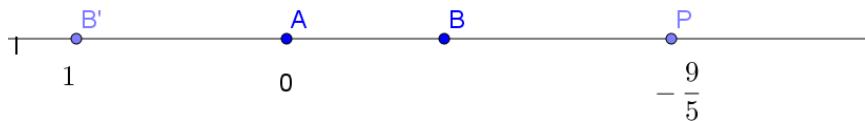
Definitie: Voor een punt P op l noem je het reële getal x dat met P overeenkomt de abscis van P en je schrijft $ab(P) = x$.

Merk op dat je pas over de abscis van een punt op een rechte kunt spreken nadat een ijk op de rechte vastgelegd is.

Voorbeeld l is een geïjkte rechte met ijk $(A; B)$. B' is het punt op l met $ab(B') = -\frac{4}{3}$ en P is het punt op l met $ab(P) = \frac{12}{5}$. Wat is de abscis van P als je op l de ijk $(A; B')$ neemt?



Het kleinste gemeenschappelijk veelvoud van 3 en 5 is 15. Met deze noemer bekom je $ab(B') = -\frac{20}{15}$ en $ab(P) = \frac{36}{15}$. De afstand van P tot A is $\frac{36}{15} \cdot \frac{15}{20} = \frac{36}{20}$ -ste van de afstand van A tot B' . Omdat P aan de andere kant van A ligt als B' is de abscis van P ten opzichte van de ijk $(A; B')$ gelijk aan $-\frac{36}{20} = -\frac{9}{5}$.



Kies een vaste lengte-eenheid (bijvoorbeeld 1 cm). Op een rechte l kies je een ijk $(A; B)$ zodat de afstand van A tot B gelijk is aan die lengte-eenheid. Je zegt dat de geijkte rechte dan overeenkomt met de lengte-eenheid.

Op een geijkte rechte l die overeenkomt met de lengte-eenheid kies je twee punten P en Q . De afstand van P tot Q is dan het verschil tussen de abscissen $ab(P)$ en $ab(Q)$. Noteer $d(P; Q)$ voor de afstand van P tot Q . Je bekomt in dat geval:

$$d(P; Q) = |ab(Q) - ab(P)| .$$

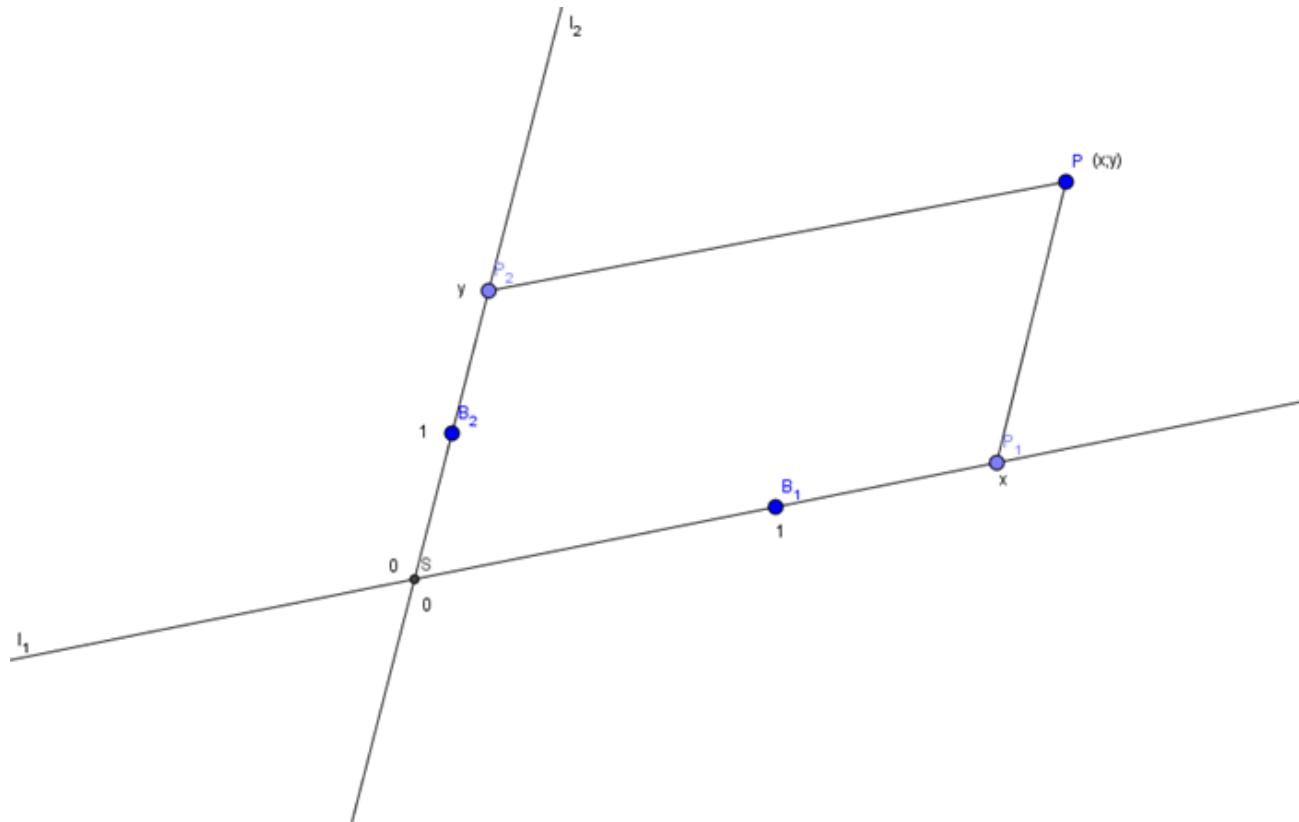
2.2 Reëel getal - voorbeeld

Zie filmpje MOOC.

2.3 Euclidische coördinaten in het vlak

In het vlak kies je een paar $(l_1; l_2)$ van snijdende rechten met snijpunt S , zie Figuur .11. Herinner, bij een paar is de volgorde van belang. Op beide rechten kies je een ijk met oorsprong S . Op l_1

noteer je $(S; B_1)$ voor die ijk en op l_2 noteer je $(S; B_2)$. Zulke twee geijkte rechten in het vlak noem je een assenstelsel in het vlak. Het snijpunt S van l_1 en l_2 noem je de oorsprong van het assenstelsel, vaak aangeduid met O .



Figuur .11

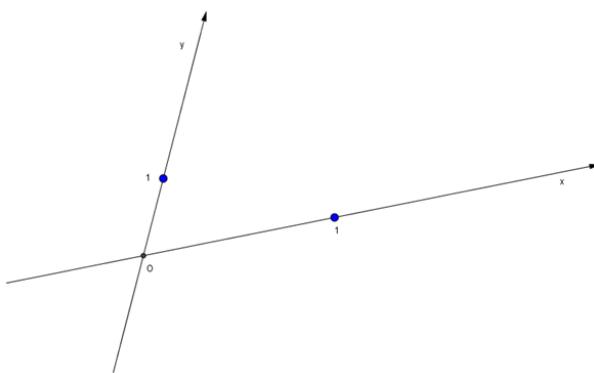
Neem een punt P in het vlak. Het beeld door P te projecteren evenwijdig aan l_2 op l_1 noem je P_1 . De abscis van P_1 op de geijkte rechte l_1 is x . Het beeld door P te projecteren evenwijdig aan l_1 op l_2 noem je P_2 . De abscis van P_2 op de geijkte rechte l_2 is y . Je noemt het paar reële getallen $(x; y)$ de coördinaten van P ten opzichte van het assenstelsel. Je noteert $\text{co}(P) = (x; y)$. Ook hier bedoelen we met een paar getallen $(x; y)$ dat de volgorde belang heeft. In dit geval mogen (en kunnen) de twee getallen x en y gelijk zijn.

Je noemt in deze situatie de geijkte rechte l_1 vaak de x -as en de geijkte rechte l_2 de y -as. Op een tekening noteer je vaak x en y bij die assen en je duidt ook de pijl van de oriëntatie aan, zie Figuur .12.

Merk op

- de coördinaten van de oorsprong O zijn $(0; 0)$.
- de coördinaten van punten op de x -as zijn van de vorm $(x; 0)$.
- de coördinaten van punten op de y -as zijn van de vorm $(0; y)$.

Kies een vaste lengte-eenheid (bijvoorbeeld 1 cm). Een Euclidisch assenstelsel in het vlak is een assenstelsel dat voldoet aan de twee volgende eisen



Figuur .12

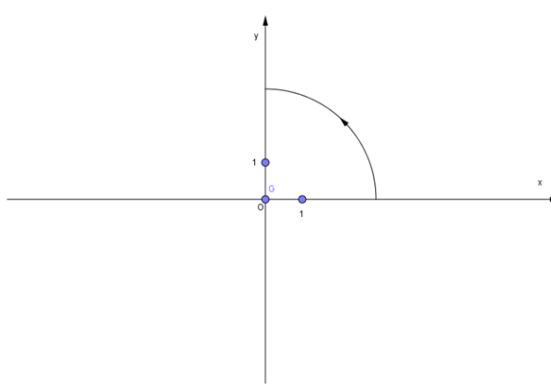
- de x -as en y -as staan loodrecht op elkaar.
- de geijkte assen x en y komen overeen met de lengte-eenheid.

De coördinaten van een punt P in het vlak voorzien van een Euclidisch assenstelsel heten Euclidische coördinaten. In het vervolg van de cursus (tenzij anders vermeld) gebruiken we enkel Euclidische coördinaten in een vlak.

Vaak teken je een Euclidisch assenstelsel als volgt

- de x -as horizontaal met de positieve richting naar rechts.
- de y -as verticaal met de positieve richting naar boven.

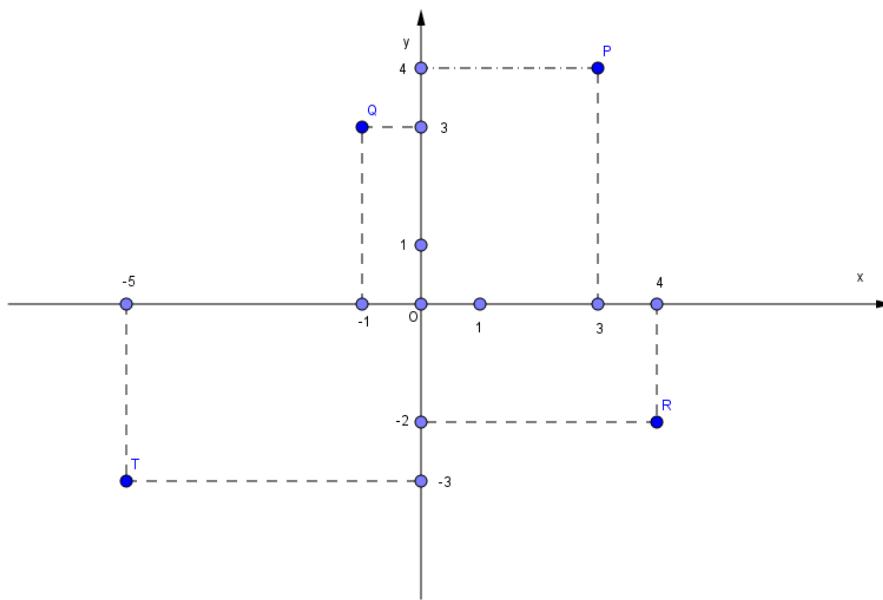
In deze ligging is de georiënteerde hoek van de positieve richting van de x -as naar de positieve richting van de y -as 90° in tegenwijzerszin, zie Figuur .13. Zulk assenstelsel in het vlak noem je positief georiënteerd.



Figuur .13

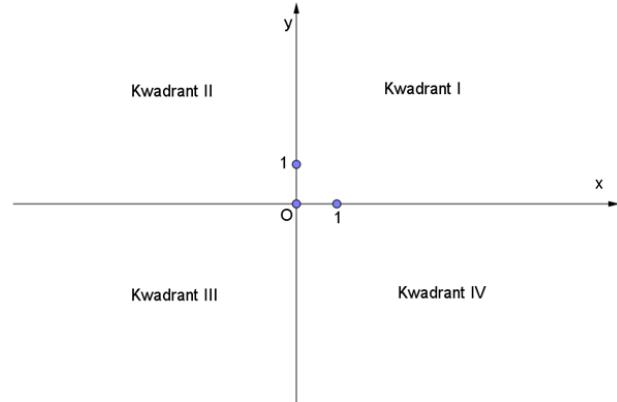
Op de volgende Figuur .14 zijn in een Euclidisch assenstelsel met die ligging de volgende punten met hun coördinaten aangeduidt: $P(3; 4)$, $Q(-1; 3)$, $R(4; -2)$ en $T(-5; -3)$.

Een assenstelsel verdeelt het vlak in 4 delen. Je noemt dat de kwadranten. Deze nummer je in tegenwijzerszin. Je start met het deel waar x en y allebei positief zijn. Dat noem je het eerste kwadrant, zie Figuur .15.



Figuur .14

kwadrant	x	y
I	+	+
II	-	+
III	-	-
IV	+	+



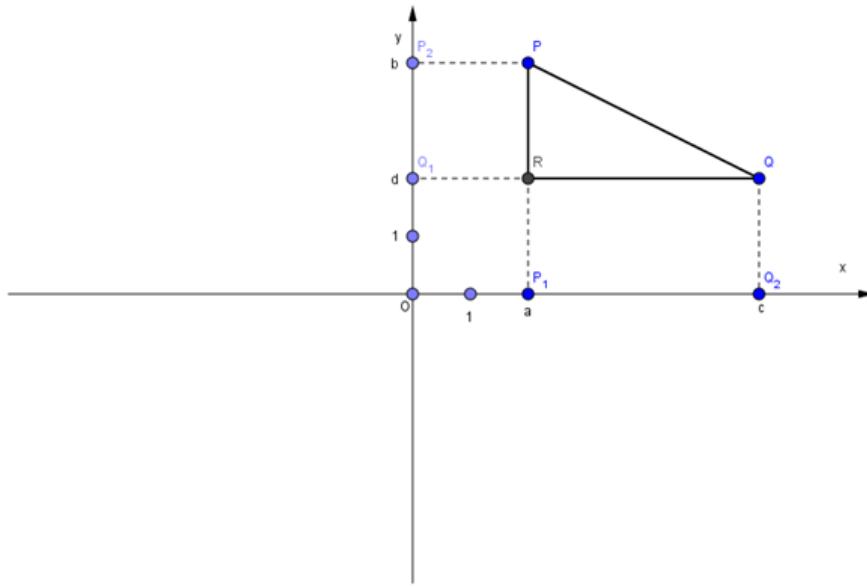
Figuur .15

2.4 Afstand tussen twee punten in het vlak

Het vlak is voorzien van een Euclidisch assenstelsel. Neem twee verschillende punten $P(a; b)$ en $Q(c; d)$ in het vlak, zie Figuur .16. We stellen de formule op waarmee je de afstand tussen P en Q (genoteerd $d(P; Q)$) uitdrukt met de Euclidische coördinaten van P en Q .

De loodrechte projecties van P en Q op de x -as noem je P_1 en Q_1 . De loodrechte projecties van P en Q op de y -as noem je P_2 en Q_2 . Deze punten hebben coördinaten $P_1(a; 0)$, $Q_1(c; 0)$, $P_2(0; b)$ en $Q_2(0; d)$.

Als $b = d$ dan is de rechte PQ evenwijdig met de x -as. Als $a = c$ dan is de rechte PQ evenwijdig met de y -as. Stel dat de rechte PQ noch horizontaal, noch verticaal is (dus $b \neq d$ en $a \neq c$). Het snijpunt van de rechte door P evenwijdig met de y -as met de rechte door Q evenwijdig met de x -as noem je R .



Figuur .16

In de rechthoekige driehoek PQR geeft de Stelling van Pythagoras:

$$|PQ|^2 = |PR|^2 + |QR|^2.$$

Er geldt $|PR| = |Q_2P_2| = d(Q_2; P_2) = |b - d|$. Dit laatste is waar omdat b en d abscissen zijn van P_2 en Q_2 op de geijkte y -as die overeenkomt met de lengte-eenheid. Er geldt ook $|QR| = |P_1Q_1| = d(P_1; Q_1) = |a - c|$. Invullen in de Stelling van Pythagoras geeft

$$|PQ|^2 = (b - d)^2 + (a - c)^2.$$

Hieruit vind je

$$d(P; Q) = \sqrt{(b - d)^2 + (a - c)^2}.$$

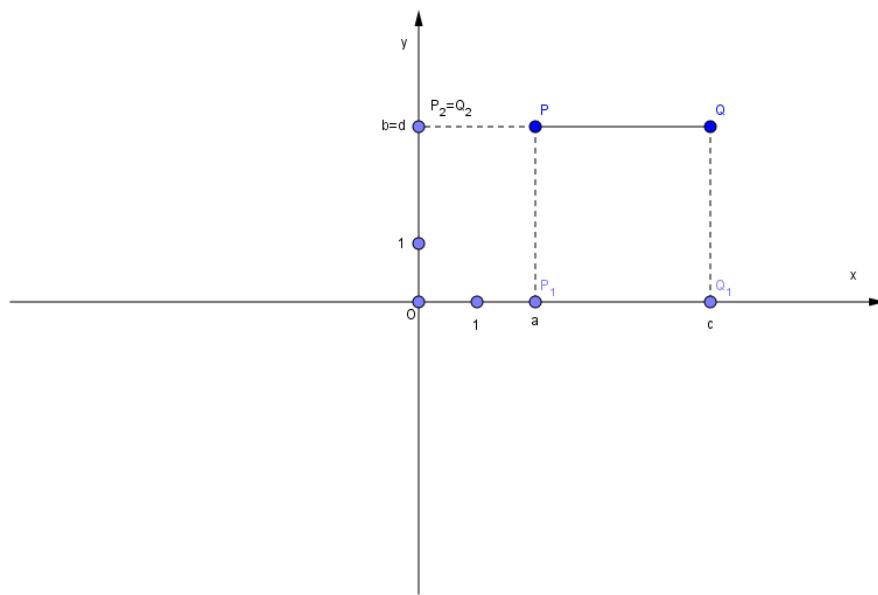
De formule geldt ook als de rechte PQ wel evenwijdig is met de x -as of de y -as.

- De rechte PQ is horizontaal, dus $b = d$, zie Figuur .17.

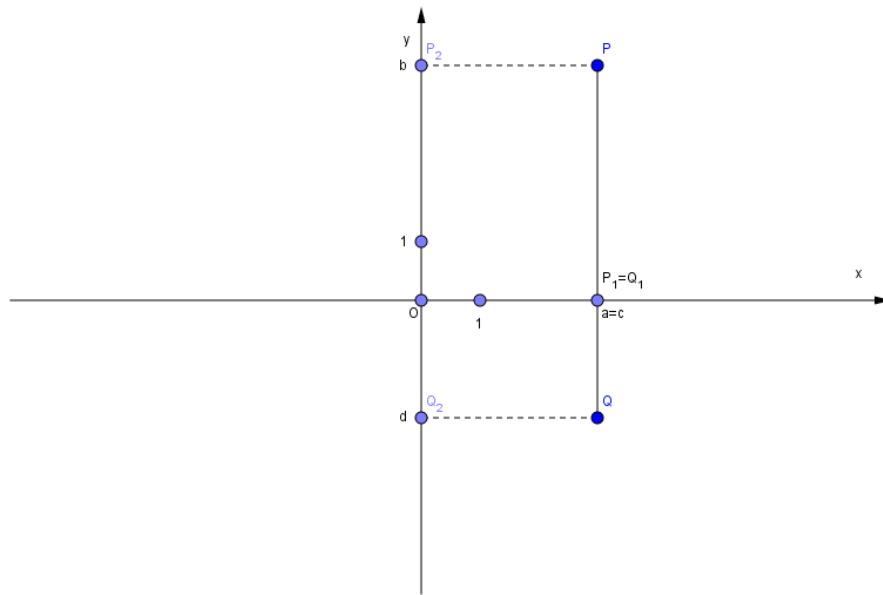
$$d(P; Q) = d(P_1; Q_1) = |c - a| \text{ en } \sqrt{(b - d)^2 + (a - c)^2} = |c - a|$$

- De rechte PQ is verticaal, dus $a = c$, zie Figuur .18.

$$d(P; Q) = d(P_2; Q_2) = |d - b| \text{ en } \sqrt{(b - d)^2 + (a - c)^2} = |b - d|$$



Figuur .17

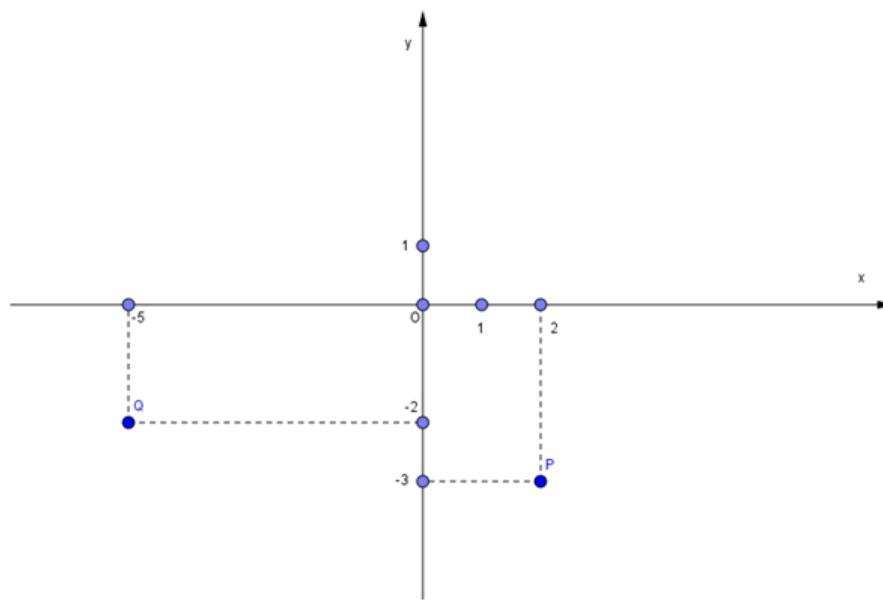


Figuur .18

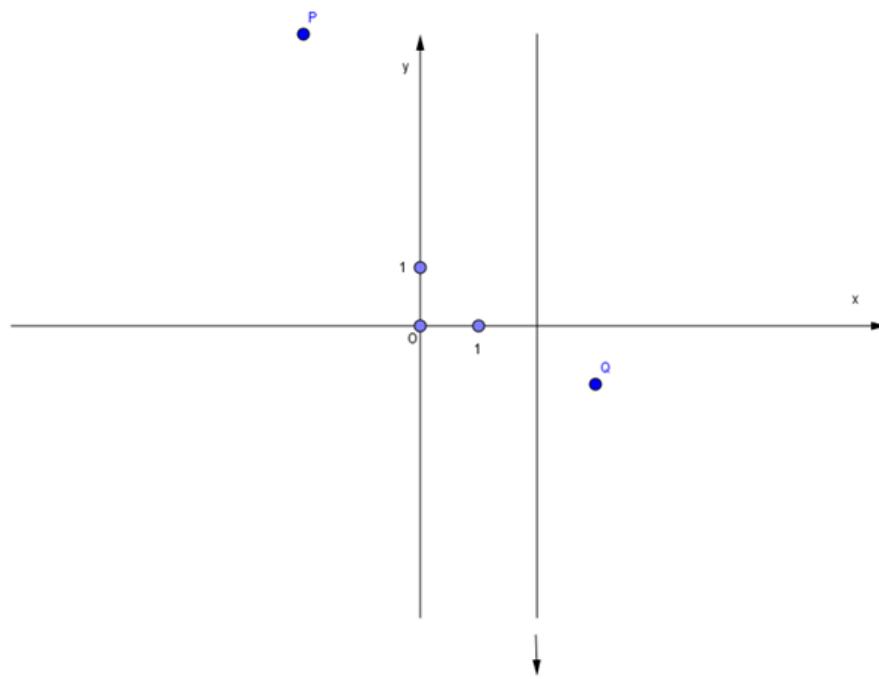
Voorbeeld: Bereken de afstand tussen $P(2; -3)$ en $Q(-5; -2)$, zie Figuur .19.

$$d(P; Q) = \sqrt{(-5 - 2)^2 + (-2 - (-3))^2} = \sqrt{50}$$

Voorbeeld: Gegeven zijn de punten $P(-2; 5)$ en $Q(3; -1)$, zie Figuur .20. Wat zijn de coördinaten van het punt R met x -coördinaat gelijk aan 2 dat even ver van P als van Q ligt?



Figuur .19: Voorbeeld 1.



Figuur .20: Voorbeeld 2.

R heeft coördinaten $(2; y)$. We zoeken y zodat $d(R; P) = d(R; Q)$.

$$d(R; P) = \sqrt{(-2 - 2)^2 + (y - 5)^2} = \sqrt{16 + (y - 5)^2}$$

$$d(R; Q) = \sqrt{(3 - 2)^2 + (y - (-1))^2} = \sqrt{1 + (y + 1)^2}$$

Hieruit volgt dat $d(R; P) = d(R; Q)$ als en alleen als

$$16 + (y - 5)^2 = 1 + (y + 1)^2$$

Uitwerken van de kwadraten geeft

$$16 + y^2 - 10y + 25 = 1 + y^2 + 2y + 1 \text{ dus } 12y = 39.$$

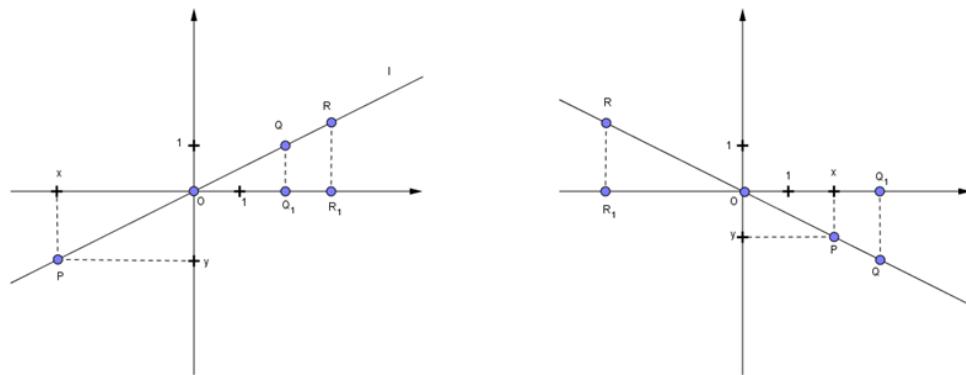
Het punt R heeft coördinaten $(2; \frac{39}{12})$.

2.5 Afstand tussen twee punten - voorbeeld

Zie filmpje MOOC.

2.6 Vergelijking van een rechte

Het vlak is voorzien van een Euclidisch assenstelsel met oorsprong O . In het vlak is l een rechte door O verschillend van één van de assen van het assenstelsel. Je neemt op l twee verschillende punten $Q(x_1; y_1)$ en $R(x_2; y_2)$ allebei verschillend van O . Je noemt Q_1 (resp. R_1) de loodrechte projectie van Q (resp. R) op de x -as. Omdat de rechthoekige driehoeken OQQ_1 en ORR_1 even grote overeenkomstige hoeken hebben zijn ze gelijkvormig. Hieruit volgt dat de verhoudingen



van lengten van overeenkomstige zijden gelijk zijn, dus

$$\frac{|RR_1|}{|QQ_1|} = \frac{|OR_1|}{|OQ_1|}.$$

In termen van coördinaten bekom je

$$\frac{|y_1|}{|y_2|} = \frac{|x_1|}{|x_2|} \text{ en dus } \frac{|y_1|}{|x_1|} = \frac{|y_2|}{|x_2|}.$$

Merk op dat op de linkse figuur voor een punt $P(x; y)$ op l verschillende van O steeds geldt dat $\frac{y}{x} > 0$ terwijl op de rechtse figuur steeds geldt $\frac{y}{x} < 0$. De tekens van $\frac{y_1}{x_1}$ en $\frac{y_2}{x_2}$ zijn dus steeds gelijk en je bekomt daardoor zelfs

$$\frac{y_1}{x_1} = \frac{y_2}{x_2}.$$

Je bekomt hieruit dat een getal $m \in \mathbb{R}_0$ bestaat zodat voor ieder punt $P(x; y)$ op l verschillende van O geldt

$$\frac{y}{x} = m \text{ en dus } y = mx .$$

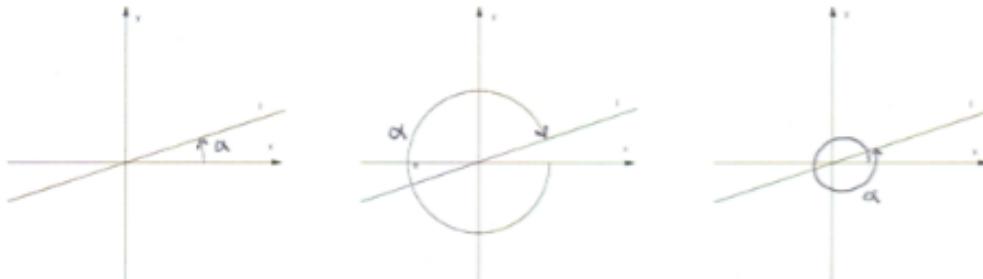
Deze laatste vergelijking is een nodige en voldoende voorwaarde opdat een punt $P(x; y)$ in het vlak tot de rechte l behoort. Het is een vergelijking van l . Voor l als op de linkse figuur is $m > 0$ en voor l als op de rechtse figuur is $m < 0$.

Als l de x -as is dan behoort een punt $P(x; y)$ van het vlak tot l als en alleen als $y = 0$. Dit laatste is dan een vergelijking van l (dus van de x -as). Merk op, door $m = 0$ te nemen in vorig resultaat bekom je dat je de vergelijking eveneens in de vorm $y = 0 \cdot x$ kan schrijven.

Als l de y -as is dan behoort een punt $P(x; y)$ van het vlak tot l als en alleen als $x = 0$. Dit laatste is dan een vergelijking van l (dus van de y -as). Merk op, er is geen enkel getal m zodat je die laatste vergelijking kunt schrijven in de vorm $y = mx$.

Voor een rechte l door de oorsprong is α een georiënteerde hoek van de x -as naar l .

- Een georiënteerde hoek is positief in tegenwijzerszin en negatief in wijzerszin.
- De hoek α is slechts op een veelvoud van 180° (π radialen) na bepaald (zie de figuur).

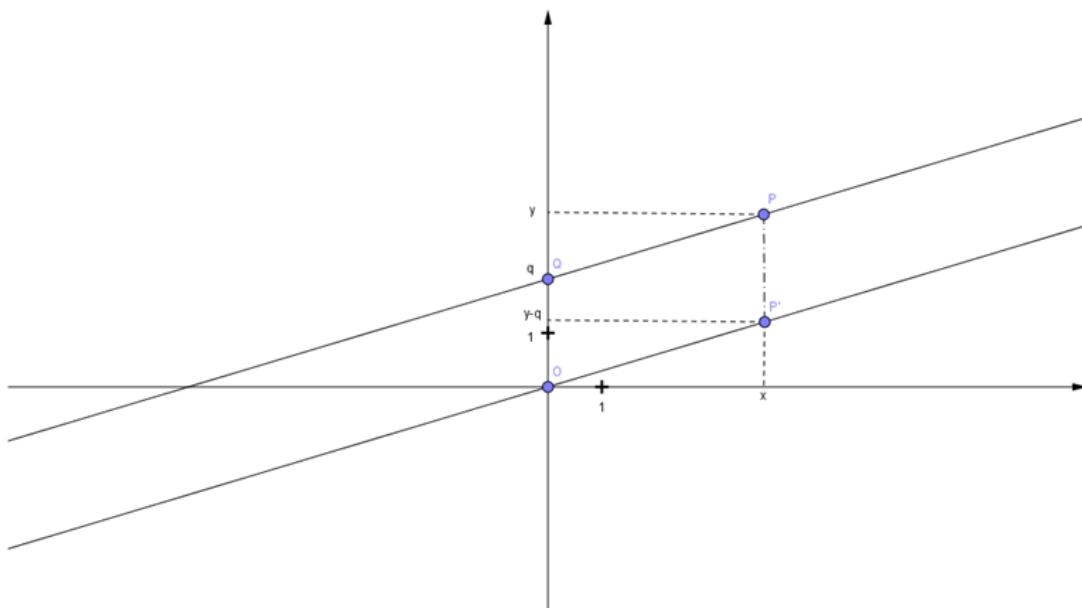


Zulke georiënteerde hoek komt overeen met een punt op de goniometrische cirkel. Uit de constructie van de tangens bekom je dat $(1; \tan \alpha)$ de coördinaten zijn van een punt op l (als l niet de y -as is). Omdat de punten van l moeten voldoen aan een vergelijking $y = mx$ bekom je $m = \tan \alpha$.

Samengevat bekomen we het volgende resultaat. De vergelijking van een rechte l door de oorsprong O verschillend van de y -as is $y = (\tan \alpha)x$. Hierbij is α de georiënteerde hoek tussen de positieve x -as en de rechte l . De vergelijking van de y -as is $x = 0$.

Een rechte l die niet door de oorsprong O gaat en niet evenwijdig is met de y -as snijdt de y -as in een punt $Q(0; q)$. De rechte l' door de oorsprong O die evenwijdig is aan l heeft een vergelijking $y = mx$.

Voor een punt $P(x; y)$ op l is P' de projectie van P op l evenwijdig met de y -as. De coördinaten van P' zijn $(x; y - q)$ en omdat P' tot de rechte l' met vergelijking $y = mx$ behoort moet $y - q = mx$. Je bekomt dat een nodige en voldoende voorwaarde opdat een $P(x; y)$ in het vlak tot de rechte l behoort is $y = mx + q$. Dat getal m is $\tan \alpha$ met α de georiënteerde hoek



tussen de positieve x -as en de rechte l . Je noemt m de richtingscoëfficiënt van l en je noteert $m = \text{rico}(l)$.

Je besluit : een vergelijking van l is $y = mx + q$.

Indien l een rechte is evenwijdig met de y -as dan bestaat $a \in \mathbb{R}$ zodat l bestaat uit alle punten $P(x; y)$ in het vlak waarvoor $x = a$. In dat geval is $x = a$ een vergelijking van l . Merk op dat je zulke vergelijking niet kunt schrijven in vorm $y = mx + q$, zulke rechte l heeft geen richtingscoëfficiënt.

Opmerking: Als $\text{rico}(l) = m$ en $P_0(x_0; y_0)$ is een punt op l dan is

$$y - y_0 = m(x - x_0)$$

een vergelijking van l . Duidelijk voldoen de coördinaten van P_0 aan de vergelijking. Je kunt de vergelijking herleiden tot de vorm $y = mx + (y_0 - mx_0)$. Dit is van de vorm $y = mx + q$ met $q = y_0 - mx_0$ en dus de vergelijking van een rechte. In die laatste vorm herken je ook dat m de richtinscoëfficiënt is van die rechte.

2.7 Vergelijking rechte - voorbeeld

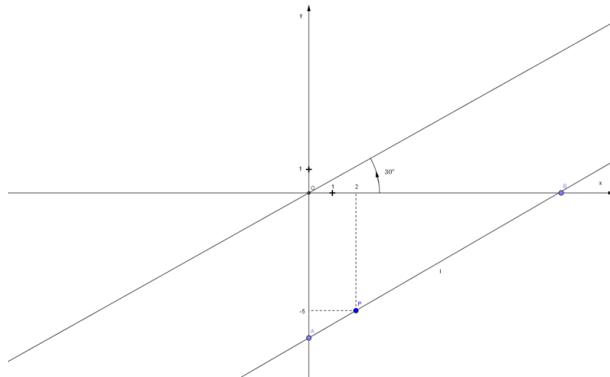
Zie filmpje MOOC.

2.8 Vergelijking rechte met richting en door gegeven punt - extra voorbeelden

Zie filmpje MOOC.

2.9 Vergelijking rechte met richting en door gegeven punt - extra voorbeelden

Voorbeeld 1: Geef een vergelijking van de rechte l zodat de georiënteerde hoek tussen de positieve x -as en l gelijk is aan 30° en zodat het punt $P(2; -5)$ tot l behoort, zie Figuur .21. Geef eveneens de coördinaten van het snijpunt van l met de x -as en met de y -as.



Figuur .21: Voorbeeld 1.

Er geldt $\text{rico}(l) = \tan(30^\circ) = \frac{1}{\sqrt{3}}$. De vergelijking van l is $y - (-5) = \frac{1}{\sqrt{3}}(x - 2)$ en je bekomt

$$y = \frac{1}{\sqrt{3}}x - 5 - \frac{2}{5} \text{ dus } y = 0,577x - 6,155 .$$

Omdat $q = -6,155$ is heeft het snijpunt A met de y -as coördinaten $(0; -6,155)$. (Dit vind je ook door $x = 0$ in de vergelijking in te vullen.) Op de x -as is $y = 0$. Voor het snijpunt B met de x -as geldt daarom $0,577x - 6,155 = 0$. Je bekomt

$$x = \frac{6,155}{0,577} = 10,667 .$$

Het snijpunt B met de x -as heeft coördinaten $(10,667; 0)$.

We stellen nu de vergelijking op van een rechte door twee gegeven verschillende punten $P_1(x_1; y_1)$ en $P_2(x_2; y_2)$. Als $x_1 = x_2$ dan is de rechte evenwijdig met de y -as en de vergelijking is $x = a$ (met $a = x_1$).

Stel dat $x_1 \neq x_2$ (de rechte is dus niet evenwijdig met de y -as). De rechte heeft een vergelijking van de vorm $y = mx + q$. Deze vergelijking moet gelden als je de coördinaten van P_1 en P_2 invult. Dit geeft volgende gelijkheden:

$$y_1 = m \cdot x_1 + q \text{ en } y_2 = m \cdot x_2 + q .$$

Neem je van beide leden van deze twee gelijkheden telkens het verschil dan bekom je

$$y_2 - y_1 = m \cdot (x_2 - x_1)$$

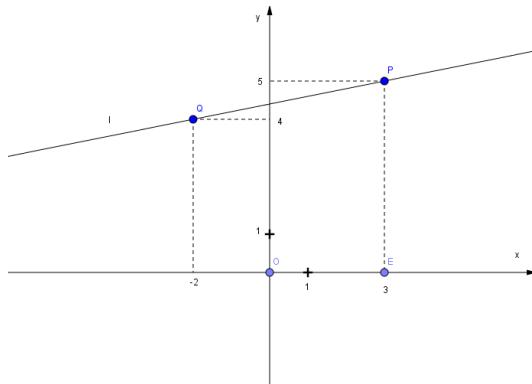
en omdat $x_1 \neq x_2$ bekom je

$$\text{rico}(P_1P_2) = m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} .$$

Je bekomt als vergelijking van de rechte P_1P_2

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}(x - x_1) .$$

Voorbeeld: Geef een vergelijking van de rechte l door de punten $P(3; 5)$ en $Q(-2; 4)$, zie Figuur .22.



Figuur .22: Voorbeeld 1.

Invullen in voorgaande formule geeft

$$y - 5 = \frac{4 - 5}{-2 - 3}(x - 3)$$

en mits wat rekenwerk bekom je hieruit

$$y = \frac{1}{5}x + \frac{22}{5} .$$

Je kunt een vergelijking van een rechte steeds schrijven in de vorm $ax + by + c = 0$ met a en b niet allebei 0. Omgekeerd, een vergelijking van de vorm $ax + by + c = 0$ met a en b niet allebei gelijk aan 0 steeds een vergelijking van een rechte.

- Indien $b = 0$ dan is $a \neq 0$ en je kunt de vergelijking omvormen tot $x = -\frac{c}{a}$. Je bekomt een rechte evenwijdig met de y -as (door het punt $(-\frac{c}{a}; 0)$).
- Indien $b \neq 0$ dan kun je de vergelijking omvormen tot

$$y = \left(-\frac{a}{b}\right)x + \left(-\frac{c}{b}\right) .$$

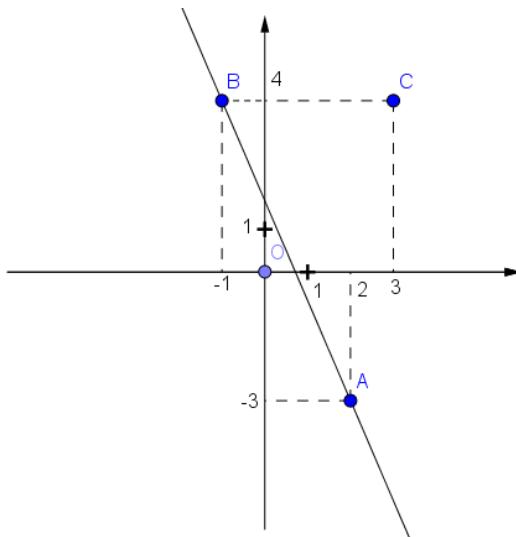
Je bekomt de rechte met richtingscoëfficiënt $-\frac{a}{b}$ door het punt $(0; -\frac{c}{b})$.

2.10 Onderlinge ligging van twee rechten

Twee rechten l_1 en l_2 in het vlak zijn evenwijdig als en alleen als de positieve richting van de x -as even grote georiënteerde hoeken maakt met l_1 en met l_2 . Hieruit volgen twee mogelijkheden:

- l_1 en l_2 zijn allebei evenwijdig met de y -as.
- $\text{rico}(l_1) = \text{rico}(l_2)$ (en dan zijn l_1 en l_2 niet evenwijdig met de y -as).

Voorbeeld 1: Gegeven zijn 3 punten $A(2 : -3)$, $B(-1; 4)$ en $C(3; 4)$, zie Figuur .23. Geef een vergelijking van de rechte l door C evenwijdig aan de rechte AB . De richtingscoëfficiënt m van



Figuur .23: Voorbeeld 1.

rechte AB is

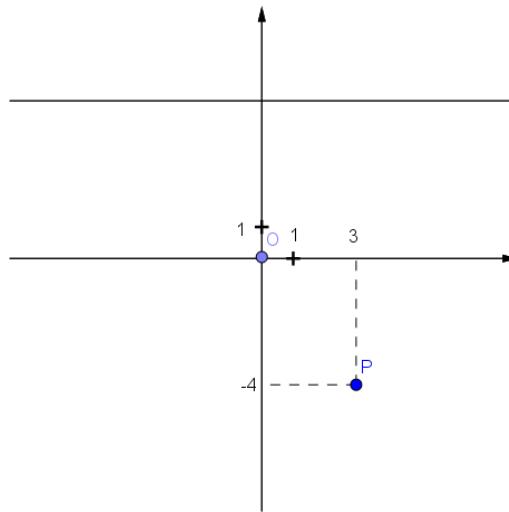
$$m = \frac{4 - (-3)}{-1 - 2} = -\frac{7}{3}.$$

De richtingscëfficiënt van l moet dus ook -4 zijn. Omdat l ook door het punt C moet gaan bekomen we volgende vergelijking van l :

$$y - 4 = \left(-\frac{7}{3}\right)(x - 3) \text{ dus } 7x + 3y - 33 = 0.$$

Een loodlijn op een rechte evenwijdig met de x -as (vergelijking van de vorm $y = b$) is een rechte evenwijdig met de y -as (vergelijking van de vorm $x = a$).

Voorbeeld 2: l is de rechte met vergelijking $y = 5$, zie Figuur .24. Geef een vergelijking van de loodlijn l' op l door $P(3; -4)$. Omdat l' een rechte is evenwijdig met de y -as heeft l' een vergelijking van de vorm $x = a$. Omdat $(P3; -4)$ op l' moet liggen moet $a = 3$. Een vergelijking van l' is dus $x = 3$.



Figuur .24: Voorbeeld 2

Een loodlijn op een rechte evenwijdig met de y -as (vergelijking van de vorm $x = a$) is een rechte evenwijdig met de x -as (vergelijking van de vorm $y = b$).

Stel nu dat l aan geen van beide assen evenwijdig is. Stel dat α een georiënteerde hoek is tussen de positieve richting van de x -as en de rechte l . In dat geval is de grootte van de hoek α geen veelvoud van 90° . Dit impliceert dat de richtingscoëfficiënt $m = \tan(\alpha)$ van de rechte l bestaat en verschillend is van 0. Als l' een loodlijn is op l dan is $\alpha + 90^\circ$ een georiënteerde hoek tussen de positieve richting van de x -as en l' . Omdat $\tan(\alpha + 90^\circ) = -\cot(\alpha) = -\frac{1}{\tan(\alpha)}$ bekom je dat $\text{rico}(l') = -\frac{1}{m} = -\frac{1}{\text{rico}(l)}$.

Besluit: Als l en l' loodrechte op elkaar staan en geen van beide is evenwijdig met een as van het assenstelsel dan is

$$\text{rico}(l) \cdot \text{rico}(l') = -1.$$

Voorbeeld 3: Gegeven zijn de rechte l met vergelijking $y = 2x - 3$ en het punt $P(-2; 3)$, zie Figuur .25. Geef een vergelijking voor de loodlijn l' door P op l . Geef eveneens de coördinaten van de loodrechte projectie van P op l . Omdat $\text{rico}(l) = 2$ is $\text{rico}(l') = -\frac{1}{2}$. Omdat l' ook door $P(-3; 2)$ moet gaan is de vergelijking van l'

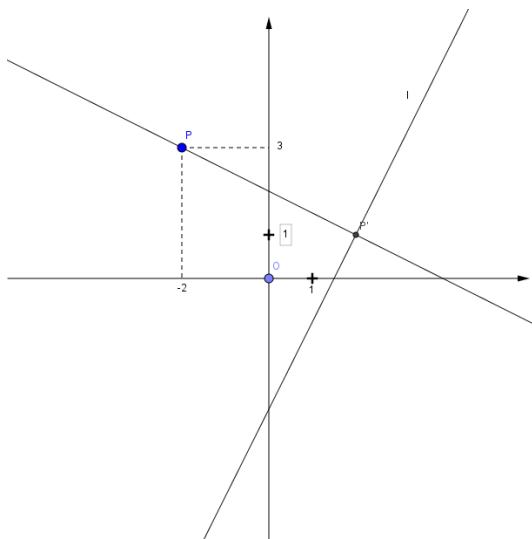
$$y - 3 = -\frac{1}{2}(x + 2) \text{ dus } y = -\frac{1}{2}x + 2.$$

De loodrechte projectie van P op l is het snijpunt P' van de rechten l en l' . De coördinaten (x, y) van het punt P' moeten dus voldoen aan de vergelijkingen van beide rechten:

$$l \leftrightarrow y = 2x - 3 \text{ en } l' \leftrightarrow y = -\frac{1}{2}x + 2.$$

Voor de x -coördinaat van P' bekom je hieruit de vergelijking

$$2x - 3 = -\frac{1}{2}x + 2$$



Figuur .25: Voorbeeld 3

met als oplossing $x = 2$. Vul je dit in de vergelijking van l (of l') in dan bekom je de y -coördinaat van P' :

$$y = 2 \cdot 2 - 3 = 1.$$

De coördinaten van P' zijn $(2; 1)$.

Twee verschillende punten A en B in het vlak bepalen een lijnstuk $[AB]$. De middelloodlijn van dat lijnstuk $[AB]$ is de rechte l loodrecht op de rechte AB door het midden M van het lijnstuk $[AB]$. Deze middelloodlijn is eveneens de verzameling van alle punten P in het vlak die evenver van A als van B liggen. In volgend voorbeeld zie je dit nagerekend.

Voorbeeld 4: Gegeven zijn de punten $A(3; 4)$ en $B(-2; 1)$.

- We berekenen eerst een vergelijking van de middelloodlijn l op $[AB]$ door de definitie te gebruiken. Het midden M van het lijnstuk $[AB]$ is het punt waarvan de coördinaten de gemiddelden zijn van de coördinaten van A en B , dus

$$M\left(\frac{3 + (-2)}{2}; \frac{4 + 1}{2}\right) = \left(\frac{1}{2}; \frac{5}{2}\right).$$

De richtingscoëfficiënt van de rechte AB is $\text{rico}(AB) = \frac{1-4}{-2-3} = \frac{3}{5}$. De richtingscoëfficiënt van de middelloodlijn l is dus $\text{rico}(l) = -\frac{5}{3}$. Je bekomt daardoor als vergelijking van de rechte l :

$$y - \frac{5}{2} = -\frac{5}{3}\left(x - \frac{1}{2}\right) \text{ dus } y = -\frac{5}{3}x + \frac{10}{3}.$$

- We stellen nu een vergelijking op voor de verzameling van de punten P in het vlak die evenver van A als van B liggen. Een punt $P(x, y)$ ligt evenver van A als van B als en alleen als

$$\sqrt{(x - 3)^2 + (y - 4)^2} = \sqrt{(x + 2)^2 + (y - 1)^2}.$$

Kwadrateren van beide positieve leden in voorgaande gelijkheid en uitrekenen van de kwadraten geeft volgende nodige en voldoende voorwaarde

$$x^2 - 6x + 9 + y^2 - 8y + 16 = x^2 + 4x + 4 + y^2 - 2y + 1 .$$

Merk op dat de kwadraten verdwijnen en als je alles oplost naar de veranderlijke y dan bekom je

$$y = -\frac{5}{3}x + \frac{10}{3} .$$

Je merkt op dat je in beide delen dezelfde vergelijking bekomt. In dit voorbeeld bekomen we dus dat de verzameling van de punten P evenver gelegen van A en B hetzelfde is als de middelloodlijn op het lijnstuk $[AB]$. Dit kan met behulp van elementaire meetkunde in alle gevallen bewezen worden (dat doen we in deze cursus niet).

Gegeven zijn twee rechten l en l' met vergelijkingen

$$l \leftrightarrow ax + by + c = 0 \text{ en } l' \leftrightarrow a'x + b'y + c' = 0 .$$

Hoe vind je de scherpe hoek $\angle(l, l')$ tussen de rechten l en l' ?

Uit de vergelijkingen kun je direct zien of een rechte evenwijdig is met de y -as. Van een rechte die niet evenwijdig is met de y -as kun je de richtingscoëfficiënt uit de vergelijking vinden. De richtingscoëfficiënt (als deze bestaat) van l duiden we aan met m en van l' met m' . Met deze richtingscoëfficiënten bereken je dan de georiënteerde hoek α (resp α') tussen de positieve richting van de x -as en de rechte l (resp. l') en genomen met grootte in het interval $] -90^\circ; 90^\circ]$ (voor een verticale rechte nemen we dus 90°).

Door eventueel l en l' te verwisselen kunnen we aannemen dat $\alpha \geq \alpha'$. Dan is $\angle(l, l')$ gelijk aan $\alpha - \alpha'$ als dit hoogstens 90° is en anders is $\angle(l, l')$ gelijk aan $180^\circ - (\alpha - \alpha')$. Als l evenwijdig is met de y -as dan bekomen we dat $\angle(l, l') = 90^\circ - |\alpha|$. We veronderstellen nu dat l niet evenwijdig is met de y -as (en l' dus ook niet).

Uit de vergelijkingen bekom je

$$\begin{aligned} \text{rico}(l) &= m = -\frac{a}{b} \text{ en dus } \tan(\alpha) = m = -\frac{a}{b} \\ \text{rico}(l') &= m' = -\frac{a'}{b'} \text{ en dus } \tan(\alpha') = m' = -\frac{a'}{b'} \end{aligned}$$

Omdat $\tan(\alpha - \alpha') = \frac{\tan(\alpha) - \tan(\alpha')}{1 + \tan(\alpha) \cdot \tan(\alpha')}$; $\tan(180^\circ - (\alpha - \alpha')) = -\tan(\alpha - \alpha')$ en de tangens van een scherpe hoek steeds positief is bekom je

$$\tan(\angle(l, l')) = \left| \frac{m - m'}{1 + m \cdot m'} \right|$$

(als $1 + m \cdot m' = 0$ dan staan l en l' loodrecht op elkaar) of nog

$$\tan(\angle(l, l')) = \left| \frac{-\frac{a}{b} - (-\frac{a'}{b'})}{1 + (-\frac{a}{b}) - \frac{a'}{b'}} \right| = \left| \frac{a'b - ab'}{aa' + bb'} \right| .$$

Vanwege de absolute waarden is het niet meer nodig dat in deze formules $\alpha \geq \alpha'$.

2.11 Onderlinge ligging van twee rechten - voorbeeld 1

Zie filmpje MOOC.

2.12 Onderlinge ligging van twee rechten - voorbeeld 2

Zie filmpje MOOC.

2.13 Onderlinge ligging van twee rechten - voorbeeld 3

Zie filmpje MOOC.

2.14 Afstand van een punt tot een rechte

De afstand $d(P; l)$ van een punt P tot een rechte l is de afstand van P tot de loodrechte projectie P' van P op l .

Voorbeeld 1: Gegeven zijn een punt $P(2; -4)$ en de rechte l met vergelijking $2x - 5y + 7 = 0$. De rechte $l' = PP'$ zal loodrecht staan op l . Omdat $\text{rico}(l) = \frac{2}{5}$ moet $\text{rico}(l') = -\frac{5}{2}$. De vergelijking van de rechte $PP' = l'$ is daarom

$$y - (-4) = -\frac{5}{2}(x - 2) \text{ dus } y = -\frac{5}{2}x + 1 .$$

Het punt P' is het snijpunt van l en l' . De coördinaten van P' zijn daarom de oplossing van het stelsel

$$\begin{cases} y = \frac{2}{5}x + \frac{7}{5} \\ y = -\frac{5}{2}x + 1 \end{cases}$$

De x -coördinaat van P' is daardoor de oplossing van

$$\frac{2}{5}x + \frac{7}{5} = -\frac{5}{2}x + 1 \text{ dus } x = -\frac{4}{29} .$$

Door deze waarde van x in te vullen in $y = -\frac{5}{2}x + 1$ (vergelijking van l') bekom je de y -coördinaat van P' .

$$y = -\frac{5}{2} \cdot \left(-\frac{4}{29}\right) + 1 = \frac{39}{29}$$

De coördinaten van P' zijn $(-\frac{4}{29}; \frac{39}{29})$.

De afstand van P tot de rechte l is de afstand van P tot P' . Je bekomt als afstand

$$\sqrt{\left(2 + \frac{4}{29}\right)^2 + \left(-4 - \frac{39}{29}\right)^2} = \frac{\sqrt{62^2 + 155^2}}{29} = 5,76 .$$

Er is een heel eenvoudige formule waarmee je de afstand van een punt $P(x_0; y_0)$ tot een rechte l met vergelijking $ax + by + c = 0$ kunt uitrekenen. Je hoeft dan de vorige werkwijze in het voorbeeld niet telkens uit te voeren. Deze formule is

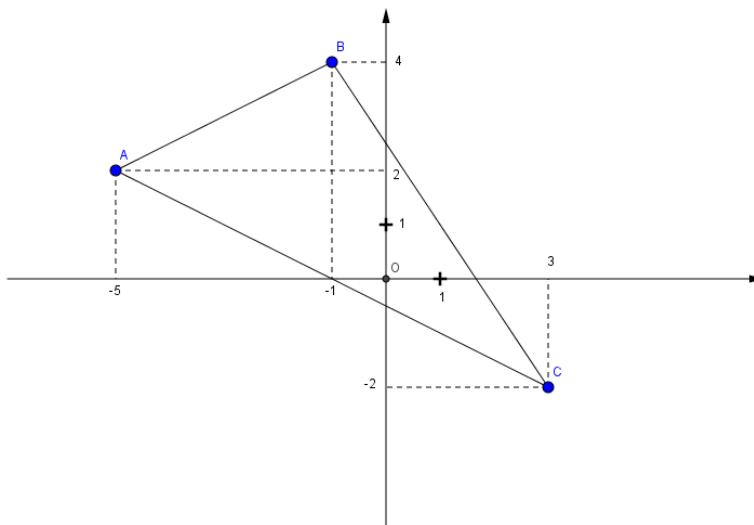
$$d(P; l) = \frac{|ax_0 + by_0 + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}}.$$

Pas je voorgaande formule toe op het voorbeeld dan bekom je

$$d(P; l) = \frac{|2.2 - 5.(-4) + 7|}{\sqrt{4 + 25}} = \frac{31}{\sqrt{29}} = 5,76.$$

Je merkt dat je inderdaad dezelfde uitkomst bekomt.

Voorbeeld 2: Gegeven zijn de punten $A(-5; 2)$, $B(-1; 4)$ en $C(3; -2)$, zie Figuur .26. Bereken de oppervlakte van driehoek ABC .



Figuur .26: Voorbeeld 2.

We vatten het lijnstuk $[A; B]$ op als basis van de driehoek. Dan is $d(A; B)$ de lengte van de basis. De hoogte van de driehoek is dan de afstand $d(C; AB)$ van het punt C tot de rechte AB . Je bekomt

$$d(A; B) = \sqrt{(-1 - (-5))^2 + (4 - 2)^2} = \sqrt{20}.$$

Een vergelijking van de rechte AB is

$$y - 2 = \frac{4 - 2}{-1 - (-5)}(x - (-5)) \text{ dus } 2y - x - 9 = 0.$$

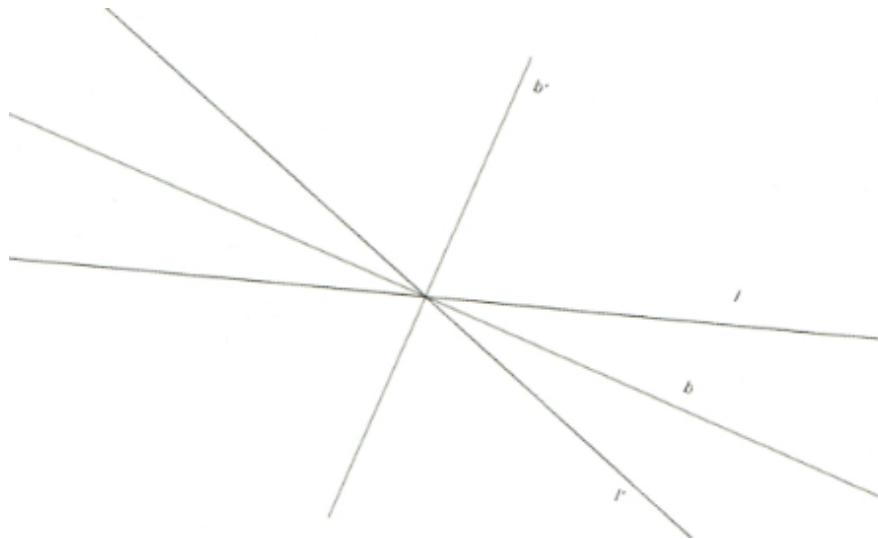
De afstand van C tot de rechte AB is dan

$$d(C; AB) = \frac{|2.(-2) - 3 - 9|}{\sqrt{4 + 1}} = \frac{16}{\sqrt{5}}.$$

De oppervlakte van driehoek ABC is dus gelijk aan

$$\frac{d(A; B) \cdot d(C; AB)}{2} = \frac{\sqrt{20} \cdot \frac{16}{\sqrt{5}}}{2} = 16.$$

De bissectrices van twee niet evenwijdige rechten l en l' zijn de rechten die een hoek tussen l en l' in twee gelijke delen verdelen. Twee niet evenwijdige lijnen l en l' hebben twee bissectrices b en b' die loodrecht op elkaar staan, zie Figuur .27.



Figuur .27: Bissectrice.

Er kan aangetoond worden dat deze twee rechten b en b' samen de verzameling is van alle punten P in het vlak die evenver van de rechten l en l' liggen. Door middel van de formule voor de afstand van een punt tot een rechte kun je met die formule vergelijkingen voor die bissectrices vinden.

Voorbeeld 3: Stel vergelijkingen op van de bissectrices van de rechten l en l' gegeven door de volgende vergelijkingen.

$$l \leftrightarrow 2x - 5y + 4 = 0 \text{ en } l' \leftrightarrow 3x + y - 2 = 0$$

Een punt $P(x; y)$ behoort tot één van de bissectrices b en b' als en alleen als $d(P; l) = d(P; l')$. Omdat

$$d(P; l) = \frac{|2x - 5y + 4|}{\sqrt{4 + 25}} \text{ en } d(P; l') = \frac{|3x + y - 2|}{\sqrt{9 + 1}}$$

bekom je dat P op een bissectrice ligt als en alleen als

$$\frac{|2x - 5y + 4|}{\sqrt{29}} = \frac{|3x + y - 2|}{\sqrt{10}}.$$

Laat je hierin de absolute waarde weg dan zijn de uitdrukkingen aan weerszijden van de gelijkheid gelijk of tegengesteld. Dit geeft aanleiding tot vergelijkingen van twee rechten: de bissectrices b en b' . Deze vergelijkingen zijn:

- voor b

$$\frac{2x - 5y + 4}{\sqrt{29}} = \frac{3x + y - 2}{\sqrt{10}}$$

$$(2\sqrt{10} - 3\sqrt{29})x + (-5\sqrt{10} - \sqrt{29})y + (4\sqrt{10} + 2\sqrt{29}) = 0$$

$$-9,83x - 21,20y + 23,42$$

- voor b'

$$\frac{2x - 5y + 4}{\sqrt{29}} = -\frac{3x + y - 2}{\sqrt{10}}$$

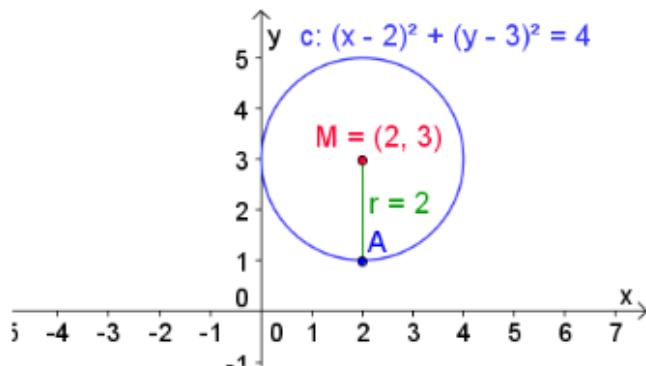
$$(2\sqrt{10} + 3\sqrt{29})x + (-5\sqrt{10} + \sqrt{29})y + (4\sqrt{10} - 2\sqrt{29}) = 0$$

$$22,48x - 10,43y + 1,88 = 0 .$$

2.15 Vergelijking van een cirkel in het vlak

Definitie: De cirkel met middelpunt $M(x_0; y_0)$ en straal r ($r > 0$) is de verzameling van de punten P in het vlak die op dezelfde afstand r van het middelpunt M liggen.

Notatie: $C(M, r)$



Figuur .28

Bovenstaande figuur .28 stelt de cirkel voor met middelpunt $M(2; 3)$ en straal $r = 2$. Dit is dus de cirkel $C((2; 3), 2)$.

Uit de formule voor de afstand tussen twee punten in het vlak (met Euclidische coördinaten) vinden we dat een punt $P(x; y)$ behoort tot de cirkel $C(M, r)$ met $M(x_0; y_0)$ als en alleen als

$$\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} = r .$$

Omdat beide leden van deze vergelijking positief zijn is deze voorwaarde geldig als en alleen als de gelijkheid tussen de kwadraten van beide leden geldt. We bekomen dan volgende vergelijking voor de cirkel $C(M, r)$:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2 .$$

Deze vergelijking zie je ook ingevuld in de tekening.

Voorbeelden:

1. De vergelijking van de cirkel met middelpunt $M(1; 4)$ en straal 5 is

$$(x - 1)^2 + (y - 4)^2 = 25 .$$

2. De vergelijking van de cirkel met middelpunt $O(0; 0)$ en straal 4 is

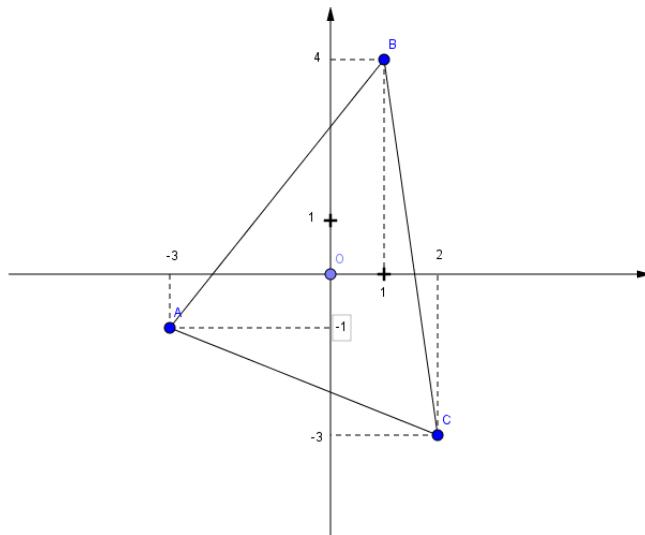
$$x^2 + y^2 = 16 .$$

3. De goniometrische cirkel is de cirkel met middelpunt $O(0; 0)$ en straal 1. De vergelijking van de goniometrische cirkel is

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

Stel dat C een cirkel is met middelpunt M en P een punt C . De raaklijn T aan C in P staat loodrecht op de straal MP . Dit kun je gebruiken om de vergelijking op de stellingen van een raaklijn aan een cirkel.

Voorbeeld 1: Δ is de driehoek met hoekpunten $A(-3; -1)$, $B(1; 4)$ en $C(2; -3)$, zie Figuur .29.
Stel een vergelijking op van de omgeschreven cirkel van Δ .



Figuur .29

Omdat het middelpunt M het snijpunt is van de middelloodlijnen van Δ berekenen we eerst twee middelloodlijnen van Δ . De middelloodlijn van het lijnstuk $[A; B]$ is de verzameling van de punten $P(x; y)$ die evenver van A als van B liggen. Als we $d(P; A)^2 = d(P; B)^2$ in coördinaten uitdrukken bekomen we

$$(x + 3)^2 + (y + 1)^2 = (x - 1)^2 + (y - 4)^2 .$$

Door de machten uit te werken en te vereenvoudigen bekom je

$$8x + 10y - 7 = 0 .$$

Dit is de vergelijking van de middelloodlijn m_C van de zijde BC van Δ .

Door $d(P; A)^2 = d(P; C)^2$ in coördinaten uit te schrijven bekom je

$$(x + 3)^2 + (y + 1)^2 = (x - 2)^2 + (y + 3)^2 .$$

Hieruit bekom je

$$10x - 4y + 3 = 0 .$$

Dit is de vergelijking van de middelloodlijn m_B van de zijde AC van Δ .

De coördinaten van het middelpunt $M(x_0; y_0)$ van de omgeschreven cirkel van Δ is de oplossing van het stelsel

$$\begin{cases} 8x + 10y - 7 = 0 \\ 10x - 4y + 3 = 0 \end{cases}$$

Lossen we beide vergelijkingen op naar y dan bekomen we

$$\begin{cases} y = -\frac{8}{10}x + \frac{7}{10} \\ y = \frac{10}{4}x - \frac{3}{4} \end{cases}$$

Hieruit volgt dat x_0 de oplossing is van de vergelijking

$$-\frac{8}{10}x + \frac{7}{10} = \frac{10}{4}x - \frac{3}{4} .$$

Hieruit bekom je dat $x_0 = \frac{29}{66} = 0,44$. Vul je dit in $y = -\frac{8}{10}x + \frac{7}{10}$ is dan bekom je y_0 , dus

$$y_0 = -\frac{8}{10} \cdot \frac{29}{66} + \frac{7}{10} = \frac{23}{66} = 0,35 .$$

Het middelpunt M van de omgeschreven cirkel van Δ is $M(0,44; 0,35)$.

De straal r van de omgeschreven cirkel is de afstand van M tot A :

$$r = d(M; A) = \sqrt{\left(-3 - \frac{29}{66}\right)^2 + \left(-1 - \frac{23}{66}\right)^2} = 3,69 .$$

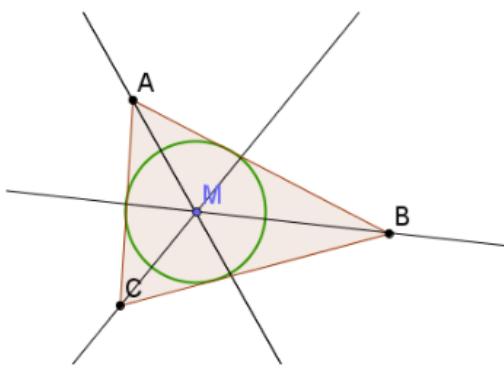
Je rekent zelf na dat dit ook $d(M; B)$ en $d(M; C)$ is.

De vergelijking van de omgeschreven cirkel is dus

$$(x - 0,44)^2 + (y - 0,35)^2 = 3,69^2 = 13,62 .$$

Een ingeschreven cirkel van een driehoek is een cirkel binnen de driehoek die raakt aan de drie zijden van de driehoek, zie Figuur .30. Het is de cirkel met maximale oppervlakte die binnen de driehoek ligt.

Noem M het middelpunt van die cirkel. Omdat iedere zijde van de driehoek een raaklijn aan de cirkel is en omdat de bijbehorende straal van cirkel (lijnstuk van M naar de zijde) loodrecht staat op de zijde is de afstand van M tot een zijde van de driehoek de straal r van de cirkel. Omdat deze afstand voor iedere zijde gelijk is ligt M evenver van iedere zijde van de driehoek. Hieruit bekom je dat M evenver ligt van iedere twee zijden van de driehoek en dus voor iedere



Figuur .30

twee zijden van de driehoek op een bissectrice ligt. Omdat M eveneens binnen de driehoek moet liggen moet M voor iedere twee zijden van driehoek gelegen zijn op de binnenissectrices (diegene die de hoek van driehoek in twee gelijke delen verdeelt). Je vindt daarom M door twee binnenissectrices van de driehoek te berekenen de daarvan het snijpunt te bepalen. De straal is dan de afstand van M tot eender welke zijde van de driehoek.

Voorbeeld 2: Voor de driehoek Δ uit het vorige voorbeeld stel je een vergelijking op van de ingesloten cirkel.

Omdat we binnenissectrices van Δ (dus bissectrices van de zijden van Δ) gaan we eerst vergelijkingen van de zijden van de driehoek opstellen. Door de formule voor een vergelijking van een rechte door twee gegeven punten te gebruiken bekom je de volgende vergelijkingen:

$$AB \leftrightarrow 5x - 4y + 11 = 0$$

$$AC \leftrightarrow 2x + 5y + 11 = 0$$

$$BC \leftrightarrow 7x + y - 11 = 0$$

Een bissectrice tussen AB en AC is gegeven door volgende vergelijking

$$\frac{5x - 4y + 11}{\sqrt{25 + 16}} = \frac{2x + 5y + 11}{\sqrt{4 + 25}}$$

$$(5\sqrt{29} - 2\sqrt{41})x + (-4\sqrt{29} - 5\sqrt{41})y + (11\sqrt{29} - 11\sqrt{41}) = 0 .$$

Je rekent na dat de richtingscoëfficiënt van deze bissectrice gelijk is aan 0,26. Deze bissectrice is dus een licht stijgende rechte. Dit komt overeen met de tekening, dit is dus een vergelijking van een binnenissectrice b_A van de driehoek.

Een bissectrice van AB en BC is gegeven door volgende vergelijking

$$\frac{5x - 4y + 11}{\sqrt{25 + 16}} = \frac{7x + y - 11}{\sqrt{49 + 1}}$$

$$(5\sqrt{50} - 7\sqrt{41})x + (-4\sqrt{50} - \sqrt{41})y + (11\sqrt{50} + 11\sqrt{41}) = 0 .$$

Je rekent na dat de richtingscoëfficiënt van deze bissectrice gelijk is aan $-0,27$. Deze bissectrice is een licht dalende rechte. Dit komt niet overeen met de tekening, het is dus niet een binnenissectrice van de driehoek.

De binnenissectrice heeft daarom vergelijking

$$\frac{5x - 4y + 11}{\sqrt{25 + 16}} = -\frac{7x + y - 11}{\sqrt{49 + 1}}$$

$$(5\sqrt{50} + 7\sqrt{41})x + (-4\sqrt{50} + \sqrt{41})y + (11\sqrt{50} - 11\sqrt{41}) = 0 .$$

De coördinaten van het middelpunt $M(x_0; y_0)$ van de ingeschreven cirkel is de oplossing van het stelsel vergelijkingen

$$\begin{cases} (5\sqrt{29} - 2\sqrt{41})x + (-4\sqrt{29} - 5\sqrt{41})y + (11\sqrt{29} - 11\sqrt{41}) = 0 \\ (5\sqrt{50} + 7\sqrt{41})x + (-4\sqrt{50} + \sqrt{41})y + (11\sqrt{50} - 11\sqrt{41}) = 0 \end{cases}$$

Na enig rekenwerk bekom je $M(-0,16; -0,25)$.

De straal r van de ingeschreven cirkel is de afstand van M tot de rechte AB . Je bekomt

$$r = \frac{|5.(-0,16) - 4.(-0,25) + 11|}{\sqrt{25 + 16}} = 1,75 .$$

Je rekent zelf na dat die ook de afstand van M tot de rechte AC en van M tot de rechte BC is.

De vergelijking van de ingeschreven cirkel is

$$(x + 0,16)^2 + (y + 0,25)^2 = 1,75^2 = 3,06 .$$

2.16 Vergelijking van een cirkel in het vlak - voorbeeld

Zie filmpje MOOC.

2.17 Test analytische meetkunde

Module 5

Vergelijkingen, Ongelijkheden, Stelsels en Matrices

1 Vergelijkingen, ongelijkheden en stelsels

Inleiding

Het oplossen van vergelijkingen is een praktische wiskundige vaardigheid waarvan ondersteld wordt dat elke ingenieur ze beheert. Op het eerste zicht lijkt vergelijkingen oplossen een spel met rare regeltjes bedacht door wereldvreemde leraars wiskunde. Zodra je echter gaat narekenen of een voorgestelde technische oplossing voor een probleem eigenlijk wel mogelijk is, iets wat in het Engels heel toepasselijk wordt aangeduid als "do the math", behoort het oplossen van vergelijkingen tot de standaardactiviteiten.

Enkele voorbeelden:

- In de thermodynamica speelt de toestandsvergelijking van een ideaal gas (in de volksmond "de ideale gaswet" genoemd) een belangrijke rol. Deze vergelijking geeft voor een hoeveelheid (aantal mol n) ideaal gas het verband tussen druk P , temperatuur T en volume V bij thermisch evenwicht van het gas:

$$PV = nRT$$

R is een gekende constante.

Als het volume van de gasfles en de druk en temperatuur van het gas in de fles gekend zijn kan je de hoeveelheid gas in de fles berekenen door de vergelijking op te lossen naar de onbekende n .

- Uit de fysica weten we dat een voorwerp dat op tijdstip $t = 0$ op een hoogte h_0 wordt losgelaten zich na een valtijd t op een hoogte h zal bevinden gegeven door:

$$h(t) = h_0 - \frac{1}{2}gt^2$$

Door de hoogte gelijk aan nul te stellen komt men de vergelijking:

$$h_0 - \frac{1}{2}gt^2 = 0$$



Oplossen van deze vergelijking naar de onbekende t geeft de tijd die het voorwerp nodig heeft om de grond te bereiken.

Bij sommige toepassingen, zoals bijvoorbeeld het doorrekenen van elektrische netwerken, komt men meerdere vergelijkingen met meerdere onbekenden tegen waarvoor men een oplossing zoekt die moet voldoen aan alle vergelijkingen tegelijkertijd. In zo een geval spreekt men van het oplossen van een stelsel van vergelijkingen.

1.1 Definities

- Wat is een vergelijking?
- Wat is een onbekende?
- Zijn er verschillende soorten vergelijkingen?

Een vergelijking drukt uit dat twee wiskundige uitdrukkingen aan elkaar gelijk zijn door een gelijkheidsteken tussen de uitdrukkingen te plaatsen.

Bijvoorbeeld:

$$5x^3 + 2x = 8x^2 + 17$$

De uitdrukking voor het gelijkheidsteken noemt met het linkerlid, de andere uitdrukking noemt men het rechterlid.

In een vergelijking staat altijd minstens één onbekende die met een letter wordt aangeduid. Dikwijls wordt hiervoor de letter x gebruikt maar een onbekende kan met eender welke letter worden aangeduid. Het oplossen van een vergelijking komt erop neer dat je die waarden voor de onbekende (of onbekenden) zoekt waarvoor het linkerlid inderdaad gelijk is aan het rechterlid.

In deze nota's beperken we ons tot **veeltermvergelijkingen**, dat zijn vergelijkingen waarbij zowel het rechterlid als het linkerlid veeltermen zijn, zoals in het voorbeeld hierboven. Er bestaan echter ook andere vergelijkingen. Bijvoorbeeld de vergelijkingen

$$3 \sin(x + 2) = x^3 - 4x - 1$$

en

$$\frac{1}{2}e^{-\pi y} - 4 = 37 \cos(y^2 + 1)$$

zijn géén veeltermvergelijkingen.

De **graad van een veeltermvergelijking** is de hoogste macht van de onbekende die in de vergelijking voorkomt. De manier waarop men een veeltermvergelijking oplost is verschillend naargelang de graad van de vergelijking.

Bijvoorbeeld

$$8t - 2 = 0$$

is een veeltermvergelijking van de eerste graad in de onbekende t , en

$$h^{23} - 2h^{12} + \frac{17}{3}h^7 + 4h^3 = \pi h - \frac{\pi}{2}$$

is een veeltermvergelijking van de 23-ste graad in de onbekende h .

1.2 Eerstegraadsvergelijkingen

We zullen het oplossen van eerstegraadsvergelijkingen verduidelijken met enkele voorbeelden.

Voorbeeld 1.

$$5x + 3 = 3x + 1$$

Het oplossen van de vergelijking komt er eigenlijk op neer dat je de vergelijking herschrijft op een zodanige manier dat je in één lid, en alleen daar, de onbekende hebt staan. Op die manier kan je de oplossing direct aflezen. Het herschrijven van de vergelijking kan je doen door op het linkerlid en het rechterlid steeds dezelfde bewerkingen uit te voeren, op die manier blijft de gelijkheid tussen linkerlid en rechterlid gelden.

In bovenstaande vergelijking kunnen we van beide leden $3x$ aftrekken:

$$5x + 3 - 3x = 3x + 1 - 3x$$

dit geeft

$$2x + 3 = 1$$

Vervolgens trekken we van beide leden 3 af:

$$2x + 3 - 3 = 1 - 3$$

dit geeft

$$2x = -2$$

Om nu in het linkerlid alleen nog de onbekende over te houden kunnen we linkerlid en rechterlid delen door 2:

$$\frac{2x}{2} = \frac{-2}{2}$$

dit geeft

$$x = -1$$

als oplossing van de vergelijking.

Enkele opmerkingen:

- Het uitvoeren van dezelfde optelling of aftrekking op het linker- en rechterlid komt erop neer dat je termen van het ene lid naar het andere verplaatst. Hierbij moet je er wel op letten dat het teken van de term verandert bij overbrenging naar het andere lid.

- Het uitvoeren van dezelfde deling (of vermenigvuldiging) op linker- en rechterlid komt neer op het overbrengen van een factor naar het andere lid. Hierbij wordt een vermenigvuldiging een deling en omgekeerd.
- Soms wordt de oplossing van een vergelijking genoteerd als een verzameling S . Voor het hierboven uitgewerkte voorbeeld schrijven we dan als oplossingenverzameling

$$S = \{-1\}$$

Voorbeeld 2.

$$5y + 4 = 5y - 1$$

We gaan opnieuw op dezelfde manier te werk. We kunnen bijvoorbeeld de term $5y$ uit het rechterlid overbrengen naar het linkerlid:

$$5y + 4 - 5y = -1$$

ofwel

$$4 = -1$$

Dit is natuurlijk onzin!

Er is geen enkele waarde voor y die ervoor kan zorgen dat $4 = -1$, deze vergelijking heeft geen oplossingen...

Dit kan men ook noteren door te schrijven dat de oplossingenverzameling leeg is:

$$S = \emptyset$$

Voorbeeld 3.

$$2(x - 4) = 7(3x - 1)$$

De eerste stap is hier het uitwerken van de haakjes:

$$2(x - 4) = 7(3x - 1) \Leftrightarrow 2x - 8 = 21x - 7$$

Vervolgens verplaatsen we de -8 naar rechts (min wordt plus):

$$2x = 21x - 7 + 8 \Leftrightarrow 2x = 21x + 1$$

Nu verplaatsen we de $21x$ van rechts naar links (plus wordt min):

$$2x - 21x = 1 \Leftrightarrow -19x = 1$$

Dan brengen we -19 over naar het rechterlid (pas op: teken verandert niet!):

$$x = \frac{1}{-19} = -\frac{1}{19}$$

Onthoud

Een goed stappenplan voor het oplossen van een eerstegraadsvergelijking is:

1. Reken alle haakjes uit.
2. Verplaats alle termen met onbekenden in naar een lid, alle termen zonder onbekenden naar het andere lid.
 - Elke bewerking die je links uitvoert, moet je rechts ook uitvoeren.
 - Termen kan je overbrengen door het teken te veranderen: min wordt plus, plus wordt min.
 - Factoren verplaats je door te delen of te vermenigvuldigen: een vermenigvuldiging wordt een deling en omgekeerd.

1.3 Oplossen van tweedegraadsvergelijkingen

- Hoeveel oplossingen heeft een tweedegraadsvergelijking?
- Hoe kan je die oplossingen vinden?

Een tweedegraadsvergelijking wordt in de praktijk dikwijls vierkantsvergelijking of kwadratische vergelijking genoemd.

Algemene methode om een tweedegraadsvergelijking op te lossen

Een tweedegraadsvergelijking in de onbekende x is een vergelijking van de vorm

$$ax^2 + bx + c = 0$$

met a, b en c reële getallen, bovendien moet $a \neq 0$ zijn want anders hebben we een eerstegraadsvergelijking.

Om een dergelijke vergelijking op te lossen herschrijven we de vergelijking door ze te delen door a :

$$x^2 + \frac{b}{a}x + \frac{c}{a} = 0$$

Dit kan je ook schrijven als

$$(x + \frac{b}{2a})^2 + \frac{c}{a} - \frac{b^2}{4a^2} = 0$$

Dit kan je controleren door de term met de haakjes uit te werken volgens het merkwaardige product $(A + B)^2 = A^2 + B^2 + 2AB$.

De term met de onbekende wordt nu naar het linkerlid verplaatst en de termen zonder de onbekende naar het rechterlid:

$$(x + \frac{b}{2a})^2 = \frac{b^2}{4a^2} - \frac{c}{a}$$

ofwel

$$(x + \frac{b}{2a})^2 = \frac{b^2 - 4ac}{4a^2}$$

Het berekenen van de vierkantswortel van linkerlid en rechterlid geeft

$$x + \frac{b}{2a} = \frac{\sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Dit is echter maar de helft van de oplossing. We zoeken immers die uitdrukkingen waarvan het kwadraat gelijk is aan $\frac{b^2 - 4ac}{4a^2}$, dit zijn zowel $\frac{\sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$ als $-\frac{\sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$. Vergelijk dit bijvoorbeeld

met $\sqrt{9} = 3$ want $3^2 = 9$, maar er geldt ook $(-3)^2 = 9 \dots$ Als je dus de oplossingen zoekt van $y^2 = 9$ geeft dit $y = 3$ en $y = -3$.

We moeten dus rekening houden met de twee mogelijkheden:

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

Deze eestegraadsvergelijkingen oplossen naar x geeft dan

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

We vinden dus in principe **twee oplossingen** voor een tweedegraadsvergelijking.

Merk op dat de uitdrukking onder de vierkantwortel, $b^2 - 4ac$, een belangrijke rol speelt. Als deze uitdrukking groter dan nul is hebben we twee verschillende reële oplossingen, als deze uitdrukking echter gelijk is aan nul dan zijn de twee oplossingen gelijk aan elkaar (praktisch gezien is er dan maar één reële oplossing), en als de uitdrukking kleiner is dan nul dan zijn er twee complexe oplossingen. Deze complexe oplossingen zijn bovendien elkaars complex toegevoegde. De tweedemachtwortels van een negatief reëel getal z zijn immers $\sqrt{|z|}i$ en $-\sqrt{|z|}i$.

De uitdrukking $b^2 - 4ac$ maakt dus een onderscheid (discrimineert) tussen de verschillende soorten oplossingen die mogelijk zijn. Men noemt deze uitdrukking dan ook de **discriminant**, meestal aangeduid met de Griekse hoofdletter delta Δ of soms ook met de hoofdletter D .

De algemene methode om een tweedegraadsvergelijking op te lossen kan dus worden samengevat als volgt:

- Schrijf de vergelijking in de vorm $ax^2 + bx + c = 0$ (a, b en c reële getallen)
- Bereken de discriminant $\Delta = b^2 - 4ac$
- Ga na hoeveel oplossingen er zijn:
 - Als $\Delta > 0$ dan zijn er 2 verschillende reële oplossingen
 - Als $\Delta = 0$ dan is er 1 reële oplossing (de 2 oplossingen zijn gelijk aan elkaar)
 - Als $\Delta < 0$ dan zijn er twee complexe oplossingen die elkaars complex toegevoegde zijn
- De oplossingen worden gegeven door

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

Opmerking: In het geval dat $\Delta < 0$ kan men (moet niet) de oplossingen ook schrijven als

$$x_1 = \frac{-b + i\sqrt{|\Delta|}}{2a} \text{ en } x_2 = \frac{-b - i\sqrt{|\Delta|}}{2a}$$

Voorbeeld 1

$$x(4x + 2) + 4 = -3x + 2$$

We schrijven deze vergelijking in de standaardvorm $ax^2 + bx + c = 0$:

$$x(4x + 2) + 4 = -3x + 2 \Leftrightarrow 4x^2 + 2x + 4 = -3x + 2 \Leftrightarrow 4x^2 + 5x + 2 = 0$$

Het symbool \Leftrightarrow betekent zoveel als “is equivalent met” of “als en slechts als”.

We berekenen nu de discriminant:

$$\Delta = 5^2 - 4 \cdot 4 \cdot 2 = 25 - 32 = -7$$

Aangezien $\Delta < 0$ zijn er twee complex toegevoegde complexe oplossingen:

$$S = \frac{-5 + i\sqrt{7}}{8}, -\frac{5 + i\sqrt{7}}{8}$$

Voorbeeld 2

$$-4x^2 + 5x + 2 = 0$$

We berekenen de discriminant:

$$\Delta = 5^2 - 4 \cdot (-4) \cdot 2 = 25 + 32 = 57$$

Er zijn dus twee verschillende oplossingen:

$$x_1 = \frac{-5 + \sqrt{57}}{2 \cdot (-4)} \text{ en } x_2 = \frac{-5 - \sqrt{57}}{2 \cdot (-4)}$$

ofwel

$$x_1 = \frac{5 - \sqrt{57}}{8} \text{ en } x_2 = \frac{5 + \sqrt{57}}{8}$$

De oplossingenverzameling is

$$S = \left\{ \frac{5 - \sqrt{57}}{8}, \frac{5 + \sqrt{57}}{8} \right\}$$

Opmerking: slordig zijn met haakjes veroorzaakt fouten... Gebruik haakjes en respecteer de regels om met haakjes te werken!

Speciale gevallen

Elke vergelijking van de vorm $ax^2 + bx + c = 0$ met $a \neq 0$ kan opgelost worden met de algemene methode met de discriminant. In sommige gevallen is het echter eenvoudiger om deze methode niet te gebruiken. We illustreren dit met enkele voorbeelden.

- Voorbeeld speciaal geval 1

$$x^2 = 36$$

Dit is een tweedegraadsvergelijking in de meest eenvoudige vorm ($b = 0$): in het linkerlid staat alleen een term met de onbekende en in het rechterlid staat alleen een getal. Om de onbekende te vinden trekken we van beide leden de vierkantswortel:

$$x = 6$$

Dit is zeker **een** oplossing want $6^2 = 36$. Maar er geldt ook dat $(-6)^2 = 36$... Dus heeft de vergelijking nog een tweede oplossing:

$$x = -6$$

De oplossingen van de vergelijking zijn dus $x_1 = +\sqrt{36}$ en $x_2 = -\sqrt{36}$.
Met de oplossingenverzameling wordt dit genoteerd als

$$S = \{-6, 6\}$$

Uiteraard had je hier ook de algemene methode kunnen gebruiken.

Door de oorspronkelijke vergelijking in de standaardvorm te zetten vinden we:

$$x^2 - 36 = 0$$

De discriminant is $\Delta = 0^2 - 4 \cdot 1 \cdot (-36) = 144$.

De twee verschillende oplossingen zijn dan

$$x_1 = \frac{-0 + \sqrt{144}}{2 \cdot 1} \text{ en } x_2 = \frac{-0 - \sqrt{144}}{2 \cdot 1}$$

ofwel

$$x_1 = 6 \text{ en } x_2 = -6$$

- Voorbeeld speciaal geval 2

$$3x^2 = 10x$$

We kunnen deze vergelijking oplossen door ze in de vorm $ax^2 + bx + c = 0$ te zetten:

$$3x^2 - 10x = 0$$

Hier is dus $a = 3$, $b = -10$ en $c = 0$.

We berekenen de discriminant:

$$\Delta = (-10)^2 - 4 \cdot 3 \cdot 0 = 100 - 0 = 100$$

De twee oplossingen zijn dus:

$$x_1 = \frac{10 + \sqrt{100}}{2 \cdot 3} \text{ en } x_2 = \frac{10 - \sqrt{100}}{2 \cdot 3}$$

ofwel

$$x_1 = \frac{10}{3} \text{ en } x_2 = 0$$

Dit had echter veel eenvoudiger kunnen opgelost worden door de oorspronkelijke vergelijking te ontbinden in factoren:

$$3x^2 - 10x = 0 \Leftrightarrow x(3x - 10) = 0$$

De laatste vergelijking kan alleen maar nul zijn als $x = 0$ of $3x - 10 = 0$, met andere woorden de oplossingen zijn

$$x_1 = 0 \text{ en } x_2 = \frac{10}{3}$$

- Voorbeeld speciaal geval 3

$$17(x - 1)(x + \pi) = 0$$

De kwadratische vergelijking is hier gegeven als een product van factoren waarin de onbekende x lineair voorkomt. In dit geval is het **niet** interessant om de haakjes uit te werken (het mag wel!). Het product kan alleen maar nul zijn als minstens één van de factoren nul is. Er is dus voldaan aan de vergelijking als $x - 1 = 0$ of $x + \pi = 0$.

De oplossingen zijn dus:

$$x_1 = 1 \text{ en } x_2 = -\pi$$

Onthoud

Oplossen van tweedegraadsvergelijkingen:

- Schrijf de vergelijking in de vorm $ax^2 + bx + c = 0$ (a, b en c reële getallen)
- Bereken de discriminant $\Delta = b^2 - 4ac$
- Ga na hoeveel oplossingen er zijn:
 - Als $\Delta > 0$ dan zijn er 2 verschillende reële oplossingen
 - Als $\Delta = 0$ dan is er 1 reële oplossing (de 2 oplossingen zijn gelijk aan elkaar)
 - Als $\Delta < 0$ dan zijn er twee complexe oplossingen die elkaars complex toegevoegde zijn
- De oplossingen worden gegeven door

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

Als $\Delta < 0$ dan zijn er twee imaginaire oplossingen voor $\sqrt{\Delta}$: $i\sqrt{|\Delta|}$ en $-i\sqrt{|\Delta|}$

Opmerking: Respecteer de rekenregels voor haakjes, voor het optellen en vermenigvuldigen van breuken, enz... Denk niet dat je het sneller en beter kan op "jouw manier"!

1.4 Hogeregraadsvergelijkingen

- Hoe kan je vergelijkingen met een graad hoger dan twee oplossen?

1.5 Enkele nuttige weetjes over veeltermvergelijkingen in het algemeen

Uit de theoretische algebra weet men dat:

- een veeltermvergelijking van de n -de graad met reële coëfficiënten n complexe oplossingen heeft. Zo kan je op het zicht weten dat bijvoorbeeld de vergelijking $y^5 - \pi y^2 + 4y - 28 = 0$ vijf complexe oplossingen heeft. Denk er aan dat een reëel getal ook een complex getal is!
- een veeltermvergelijking met een oneven graad en reële coëfficiënten heeft altijd minstens één reële oplossing (de vergelijking uit het voorbeeld heeft dus zeker 1 reële oplossing).
- voor vergelijkingen van de derde en vierde graad bestaan er algemene oplossingsmethoden zoals voor tweedegraadsvergelijkingen (deze methoden zijn echter zeer langdradig en ingewikkeld en worden in de praktijk niet zoveel gebruikt).
- voor vergelijkingen vanaf de vijfde graad bestaan er geen algemene theoretische oplossingsmethoden (dergelijke vergelijkingen worden numeriek opgelost, meestal met behulp van een computer of rekenmachine).

In een aantal speciale gevallen is het echter mogelijk om een hogeregraadsvergelijking toch met de hand op te lossen. Deze gevallen bespreken we hier.

Substitutiemethode

Sommige hogeregraadsvergelijkingen kunnen opgelost worden door een slimme substitutie. Neem bijvoorbeeld de volgende vierdegraadsvergelijking:

$$x^4 + 3x^2 - 1 = 0$$

Door de substitutie $y = x^2$ toe te passen wordt deze vergelijking omgezet in een tweedegraadsvergelijking in de onbekende y .

$$y^2 + 3y - 1 = 0$$

Deze vergelijking kunnen we oplossen!

We berekenen de discriminant:

$$\Delta = 3^2 - 4 \cdot 1 \cdot (-1) = 9 + 4 = 13$$

Aangezien $\Delta > 0$ zijn er 2 verschillende oplossingen voor de tweedegraadsvergelijking.

$$y_1 = \frac{-3 + \sqrt{13}}{2} \text{ en } y_2 = \frac{-3 - \sqrt{13}}{2}$$

Dit zijn echter niet de oplossingen van de oorspronkelijke vierdegraadsvergelijking in de onbekende x . Het verband tussen de oplossingen van de vierdegraadsvergelijking en de waarden y_1 en y_2 wordt gegeven door de vergelijking $y = x^2$. We zoeken dus die waarden voor x waarvoor het kwadraat y_1 en y_2 oplevert.

$$x_1 = \sqrt{\frac{-3 + \sqrt{13}}{2}}, x_2 = -\sqrt{\frac{-3 + \sqrt{13}}{2}}, x_3 = i\sqrt{\frac{3 + \sqrt{13}}{2}}, x_4 = -i\sqrt{\frac{3 + \sqrt{13}}{2}}$$

De oplossingenverzameling is

$$S = \left\{ \sqrt{\frac{-3 + \sqrt{13}}{2}}, -\sqrt{\frac{-3 + \sqrt{13}}{2}}, i\sqrt{\frac{3 + \sqrt{13}}{2}}, -i\sqrt{\frac{3 + \sqrt{13}}{2}} \right\}$$

Ontbinden in factoren

Beschouw de volgende derdegraadsvergelijking

$$5x^3 - 2x^2 + 3x = 0$$

Het linkerlid van deze vergelijking kunnen we schrijven als een product

$$x(5x^2 - 2x + 3) = 0$$

Aan deze vergelijking kan alleen maar voldaan worden als $x = 0$ of $5x^2 - 2x + 3 = 0$. We hebben dus al één oplossing gevonden:

$$x_1 = 0$$

Om de eventuele andere oplossingen (maximaal drie) te vinden lossen we de vergelijking $5x^2 - 2x + 3 = 0$ op.

We berekenen de discriminant: $\Delta = (-2)^2 - 4 \cdot 5 \cdot 3 = 4 - 60 = -56 < 0$. Er zijn dus twee complexe oplossingen voor $5x^2 - 2x + 3 = 0$.

De oplossingenverzameling is

$$S = \left\{ 0, \frac{1+i\sqrt{14}}{5}, \frac{1-i\sqrt{14}}{5} \right\}$$

Onthoud

Er bestaan geen algemene methoden om vergelijkingen van vijfde graad of hoger met de hand op te lossen. Deze methoden bestaan wel voor derdegraadsvergelijkingen en vierdegraadsvergelijkingen maar deze methoden zijn zeer omslachtig en worden daarom weinig gebruikt in de praktijk.

In een aantal speciale gevallen kunnen hogeregraadsvergelijkingen echter opgelost worden met één van de volgende technieken:

- **Substitutiemethode**

1. Als de onbekende x is vervangen door x^2 dan een andere onbekende (zoals y) om een kwadratische vergelijking te bekomen.
2. Los deze vergelijking op naar y .
3. Los de vergelijkingen $y = x^2$ op naar de onbekende x .

- **Ontbinden in factoren**

1. Zet alle termen in het linkerlid zodat het rechterlid 0 is.
2. Ontbind het linkerlid in factoren door af te zonderen.
3. De oplossingen worden gevonden door elke factor gelijk te stellen aan 0.

Opmerking: Respecteer de rekenregels voor haakjes, voor het optellen en vermenigvuldigen van breuken, enz...

1.6 Stelsels van vergelijkingen

- Wat is een stelsel van vergelijkingen?
- Hoe kan men een eenvoudig stelsel van eerstegraadsvergelijkingen oplossen?

Inleiding

Een stelsel van vergelijkingen bestaat uit minstens twee vergelijkingen in minstens twee onbekenden. Het bepalen van de onbekenden die tegelijkertijd oplossing zijn voor al de vergelijkingen van het stelsel noemt men het oplossen van het stelsel van vergelijkingen.

Als het stelsel van vergelijkingen alleen bestaat uit veeltermvergelijkingen van de eerste graad noemt men dit stelsel **een lineair stelsel** of **een stelsel van lineaire vergelijkingen**.

Een voorbeeld van een lineair stelsel van drie vergelijkingen in drie onbekenden x , y en z :

$$\begin{cases} 2x + 3y - 4z = 0 \\ 3x + 2y = 5 \\ -x - 7y + z = -1 \end{cases}$$

In de ingenieurswereld is het niet ongewoon om stelsels van tientallen vergelijkingen in tientallen onbekenden tegen te komen.

In de algebra toont men aan er voor een stelsel van eerstegraadsvergelijkingen drie mogelijkheden zijn:

- Het stelsel is oplosbaar en heeft juist één oplossing.
- Het stelsel is oplosbaar en heeft oneindig veel oplossingen.
- Het stelsel heeft geen oplossingen.

In deze cursus beperken we ons tot het oplossen van stelsels van twee lineaire vergelijkingen. Voor dergelijke eenvoudige stelsels wordt gebruik gemaakt van de **substitutiemethode**.

De substitutiemethode toegepast bij een stelsel van twee lineaire vergelijkingen werkt als volgt:

- Kies één van de vergelijking en los deze op naar één van de onbekenden, hierbij doe je net alsof je de andere onbekende kent.
- Substitueer nu de oplossing van de ene vergelijking in de andere vergelijking, je komt nu een eerstegraadsvergelijking in één onbekende.
- Los de bekomen vergelijking op en substitueer de gevonden onbekende in de andere vergelijking, dit levert een eerstegraadsvergelijking in de nog te vinden onbekende.
- Los de overblijvende vergelijking op.

- De gevonden oplossing(en) zijn oplossing voor allebei de vergelijkingen van het stelsel. Controleer dit door de waarden te substitueren!

We demonstreren de substitutiemethode met enkele voorbeelden.

Voorbeeld 1

$$\begin{cases} 2x + y = 0 \\ x - 3y + 1 = 0 \end{cases}$$

We kiezen bijvoorbeeld de eerste vergelijking en lossen deze op naar de onbekende y waarbij we net doen alsof x een gekend getal is:

$$2x + y = 0 \Leftrightarrow y = -2x$$

We substitueren nu $y = -2x$ in de tweede vergelijking en lossen de nieuwe vergelijking op naar x :

$$x - 3(-2x) + 1 = 0 \Leftrightarrow x + 6x + 1 = 0 \Leftrightarrow 7x + 1 = 0 \Leftrightarrow x = -\frac{1}{7}$$

We substitueren de gevonden x nu terug in de eerste vergelijking $y = -2x$:

$$y = -2\left(-\frac{1}{7}\right) \Leftrightarrow y = \frac{2}{7}$$

De oplossing voor het stelsel is dus

$$\begin{cases} x = -\frac{1}{7} \\ y = \frac{2}{7} \end{cases}$$

Controle door deze waarden voor x en y in het oorspronkelijke stelsel te substitueren:

$$\begin{cases} 2\left(-\frac{1}{7}\right) + \frac{2}{7} = 0 \\ -\frac{1}{7} - 3\left(\frac{2}{7}\right) + 1 = 0 \end{cases}$$

Voorbeeld 2

$$\begin{cases} 3x + 2y = 4 \\ 2x - 3y = 22 \end{cases}$$

Soms wordt om de zaken overzichtelijk te houden bij elke stap het volledige stelsel opnieuw opgeschreven. Dit vraagt heel wat extra schrijfwerk maar het kan wel helpen om fouten te vermijden.

We kiezen bijvoorbeeld de eerste vergelijking en lossen deze op naar x :

$$\begin{cases} 3x + 2y = 4 \\ 2x - 3y = 22 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} 3x = 4 - 2y \\ 2x - 3y = 22 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} x = \frac{4-2y}{3} \\ 2x - 3y = 22 \end{cases}$$

Vervolgens substitueren we

$$x = \frac{4-2y}{3}$$

in de tweede vergelijking:

$$\begin{cases} x = \frac{4-2y}{3} \\ 2\left(\frac{4-2y}{3}\right) - 3y = 22 \end{cases}$$

Dit geeft dan:

$$\begin{cases} x = \frac{4-2y}{3} \\ \frac{2.4}{3} - \frac{2.2}{3}y - 3y = 22 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} x = \frac{4-2y}{3} \\ \frac{8}{3} - \frac{4}{3}y - 3y = 22 \end{cases}$$

en

$$\begin{cases} x = \frac{4-2y}{3} \\ \frac{-4-9}{3}y = \frac{66-8}{3} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} x = \frac{4-2y}{3} \\ -13y = 58 \end{cases}$$

dus

$$y = -\frac{58}{13}$$

Dit substitueren we nu in de eerste vergelijking:

$$\begin{cases} x = \frac{4-2(-\frac{58}{13})}{3} \\ y = -\frac{58}{13} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} x = \frac{4+\frac{116}{13}}{3} \\ y = -\frac{58}{13} \end{cases}$$

Uitwerken geeft:

$$\begin{cases} x = \frac{\frac{52+116}{13}}{3} \\ y = -\frac{58}{13} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} x = \frac{56}{13} \\ y = -\frac{58}{13} \end{cases}$$

Controleer zelf de correctheid van de gevonden oplossing door x en y te substitueren in het oorspronkelijke stelsel van vergelijkingen.

Opmerking: Hopelijk heb je gemerkt dat het zo goed als onmogelijk is dergelijke berekeningen uit te voeren zonder op een correcte manier met de rekenregels voor haakjes en breuken om te springen...

Voorbeeld 3

$$\begin{cases} \pi x - 5y = 0 \\ 2\pi x - 10y = \frac{\pi}{17} \end{cases}$$

De eerste vergelijking oplossen naar x geeft:

$$x = \frac{5}{\pi}y$$

Dit substitueren in de tweede vergelijking en uitwerken geeft:

$$\begin{cases} x = \frac{5}{\pi}y \\ 2\pi(\frac{5}{\pi}y) - 10y = \frac{\pi}{17} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} x = \frac{5}{\pi}y \\ 10y - 10y = \frac{\pi}{17} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} x = \frac{5}{\pi}y \\ 0 = \frac{\pi}{17} \end{cases}$$

De tweede vergelijking van het stelsel is duidelijk onzin, er bestaat geen x en y die ervoor kan zorgen dat deze vergelijking klopt.

Het stelsel van vergelijkingen heeft geen oplossingen!

Voorbeeld 4

$$\begin{cases} 84x - 210y = 21 \\ 2x - 5y = \frac{1}{2} \end{cases}$$

We lossen de tweede vergelijking op naar y :

$$2x - 5y = \frac{1}{2} \Leftrightarrow \frac{2x - \frac{1}{2}}{5} = y \Leftrightarrow y = \frac{4x - 1}{10}$$

Substitutie in de eerste vergelijking geeft dan

$$\begin{cases} 84x - 210(\frac{4x-1}{10}) = 21 \\ y = \frac{4x-1}{10} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} 84x - 84x + 21 = 21 \\ y = \frac{4x-1}{10} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} 21 = 21 \\ y = \frac{4x-1}{10} \end{cases}$$

Hier zien we dat de eerste vergelijking altijd geldig is, welke waarden voor x en y men ook kiest. Alleen de tweede vergelijking legt beperkingen op aan x en y , namelijk dat om een oplossing van het stelsel te hebben het verband tussen x en y moet gegeven worden door

$$y = \frac{4x - 1}{10}$$

Je kan dus ofwel x , ofwel y willekeurig kiezen. Als je de andere onbekende berekent met de tweede vergelijking zijn x, y een oplossing voor het stelsel.

Dit betekent dat het stelsel een oneindig aantal oplossingen heeft!

De oplossingen worden gegeven door

$$\begin{cases} x \in \mathbb{R} \\ y = \frac{4x-1}{10} \end{cases}$$

Onthoud

- Kies één van de vergelijking en los deze op naar één van de onbekenden, hierbij doe je net alsof je de andere onbekende kent.
- Substitueer nu de oplossing van de ene vergelijking in de andere vergelijking, je komt nu een eerstegraadsvergelijking in één onbekende.
- Los de gekomen vergelijking op en substitueer de gevonden onbekende in de andere vergelijking, dit levert een eerstegraadsvergelijking in de nog te vinden onbekende.
- Los de overblijvende vergelijking op.
- De gevonden oplossing(en) zijn oplossing voor allebei de vergelijkingen van het stelsel. Controleer dit door de waarden te substitueren!

Opmerking: Respecteer de rekenregels voor haakjes, voor het optellen en vermenigvuldigen van breuken, enz...

Tips:

- Let goed op bij substitutie dat je de hele uitdrukking substitueert, gebruik haakjes!
- Je mag een vergelijking apart afhandelen, maar vergeet niet op het einde alles terug in het stelsel te zetten!

1.7 Ongelijkheden

- Wat is een ongelijkheid?
- Hoeveel oplossingen zijn er voor een ongelijkheid en hoe kan je die vinden?

Inleiding

Men komt een ongelijkheid door in een vergelijking het “is gelijk aan” teken te vervangen door één van de volgende ongelijkheidstekens:

- $<$ “is kleiner dan”
- $>$ “is groter dan”
- \leq “is kleiner dan of gelijk aan”
- \geq “is groter dan of gelijk aan”

Je kan ongelijkheden op een soortgelijke manier manipuleren als vergelijkingen.

- Door bij het linkerlid en rechterlid van een ongelijkheid hetzelfde positieve of negatieve getal op te tellen blijft de ongelijkheid geldig. Door bijvoorbeeld in beide leden van de ongelijkheid $x + 1 > 8$ het getal 2 op te tellen vinden we $x + 3 > 10$ en door het getal 2 af te trekken komt men $x - 1 > 6$. Dit zijn drie equivalente ongelijkheden met dezelfde oplossingen: $x > 7$.
- Door beide leden van een ongelijkheid met hetzelfde (van nul verschillende) positieve getal te vermenigvuldigen komt men een equivalente ongelijkheid, door bijvoorbeeld $x + 1 > 8$ te vermenigvuldigen met 10 komt men $10x + 10 > 80$ met nog steeds dezelfde oplossingen $x > 7$.
- **Pas op!** Als men een ongelijkheid vermenigvuldigt met een negatief getal dan keert het ongelijkheidsteken om! Nemen we weer hetzelfde voorbeeld $x + 1 > 8$ en vermenigvuldigen we deze uitdrukking met -1 dan bekomen we $-x - 1 < -8$. Alleen op deze manier blijven de oplossingen hetzelfde: $x > 7$.

In deze cursus zullen we met behulp van een aantal voorbeelden illustreren hoe men ongelijkheden van de eerste graad kan oplossen.

Voorbeeld 1

$$5x - 7 < 2x + 1$$

Door bij beide leden $2x$ af te trekken en 7 bij te tellen vinden we

$$3x < 8$$

Delen door 3 geeft

$$x < \frac{8}{3}$$

Deze ongelijkheid heeft dus oneindig veel oplossingen!

Deze oplossingen worden soms ook genoteerd met de oplossingenverzameling:

$$S =] -\infty, \frac{8}{3}[$$

Met deze notatie wordt de verzameling van alle getallen tussen $-\infty$ en $\frac{8}{3}$ aangegeven, merk op dat $-\infty$ en $\frac{8}{3}$ niet tot de oplossingenverzameling behoren (dit wordt aangegeven door de naar buiten wijzende vierkante haakjes).

Voorbeeld 2

$$5x - 7 < 8x + 1$$

Door bij beide leden $8x$ af te trekken en 7 bij te tellen vinden we

$$-3x < 8$$

Delen door -3 geeft

$$x > -\frac{8}{3}$$

Let op! Het " $<$ "-teken wordt het " $>$ "-teken!

De oplossingenverzameling wordt genoteerd als

$$S = \left] -\frac{8}{3}, +\infty \right[$$

Voorbeeld 3

$$17x + 7 \geq 17x + 3\pi$$

Van beide leden $17x$ aftrekken geeft

$$7 \geq 3\pi$$

Er is geen enkele x die ervoor kan zorgen dat hieraan voldaan is. Deze ongelijkheid heeft geen oplossingen. De oplossingenverzameling is leeg:

$$S = \emptyset$$

Voorbeeld 4

$$\frac{x}{3} + 1 \leq -\frac{5}{7}x - 12$$

Vermenigvuldigen met 3 geeft

$$x + 3 \leq -\frac{15}{7}x - 36$$

Het wegwerken van de term met x in het rechterlid en de constante term in het linkerlid geeft

$$\frac{22}{7}x \leq -39$$

Vermenigvuldigen met $\frac{7}{22}$ geeft tenslotte

$$x \leq -\frac{273}{22}$$

De oplossingenverzameling is

$$S =] -\infty, -\frac{273}{22}]$$

Merk op dat het naar binnen wijzende vierkante haakje aanduidt dat $-\frac{273}{22}$ wel degelijk tot de oplossingenverzameling behoort.

Onthoud

- Ongelijkheden van de eerste graad lost men op door de onbekende af te zonderen op een soortgelijke manier als bij veeltermvergelijkingen van de eerste graad.
- Let op dat bij het vermenigvuldigen van de ongelijkheid met een negatief getal “groter dan (of gelijk aan)” wordt omgezet in “kleiner dan (of gelijk aan)” en omgekeerd.
- Een ongelijkheid heeft ofwel oneindig veel oplossingen ofwel geen oplossingen.

2 Matrices

Inleiding

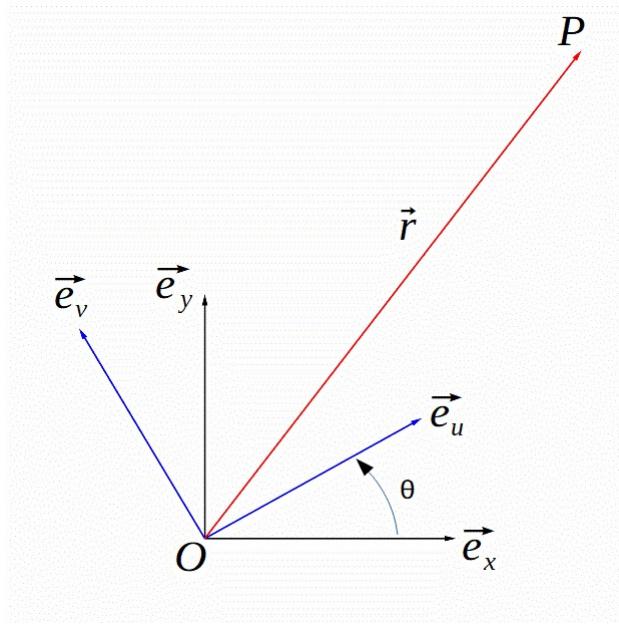
Stel dat je een computerspel speelt en je op een beeldscherm, of eventueel door een virtual reality headset, naar een door een computer gegenereerd landschap kijkt. Kijk je in deze wereld een beetje naar links of naar rechts dan berekent de computer hoe het landschap eruit ziet in je nieuwe kijkrichting en je ziet de virtuele wereld als het ware rond je gezichtspunt roteren. Misschien heb je er nog niet bij stilgestaan maar bij dit soort zaken wordt stevig gebruikt gemaakt van wiskunde.

We kunnen een idee krijgen van hoe dit in zijn werk gaat door ons in eerste instantie te beperken tot een twee dimensionale situatie. In de figuur is een punt P voorgesteld waarvan de positie in het vlak is vastgelegd door een plaatsvector \vec{r} . Deze plaatsvector kan voorgesteld worden ten opzichte van verschillende basissen.

In de figuur worden twee orthonormale basissen (m.a.w. basissen van loodrecht op elkaar staande éénheidsvectoren) gebruikt waarbij de basis $\{\vec{e}_u, \vec{e}_v\}$ over een hoek θ is geroteerd ten opzichte van de basis $\{\vec{e}_x, \vec{e}_y\}$.

De plaatsvector van het punt P wordt ten opzichte van de basis $\{\vec{e}_x, \vec{e}_y\}$ geschreven als

$$\vec{r} = x\vec{e}_x + y\vec{e}_y$$



en ten opzichte van de basis $\{\vec{e}_u, \vec{e}_v\}$ als

$$\vec{r} = u\vec{e}_u + v\vec{e}_v$$

Om te beschrijven wat er gebeurt bij een rotatie van ons referentiestelsel over een hoek θ moeten we het verband vinden tussen de coördinaten van het punt P in de twee referentiestelsels, met andere woorden we moeten het verband vinden tussen de componenten van \vec{r} ten opzichte van de basis $\{\vec{e}_u, \vec{e}_v\}$ en ten opzichte van de basis $\{\vec{e}_x, \vec{e}_y\}$.

Door te projecteren kunnen we de componenten van de éénheidsvectoren van de basis $\{\vec{e}_u, \vec{e}_v\}$ schrijven ten opzichte van de basis $\{\vec{e}_x, \vec{e}_y\}$.

$$\begin{cases} \vec{e}_u = \cos \theta \vec{e}_x + \sin \theta \vec{e}_y \\ \vec{e}_v = -\sin \theta \vec{e}_x + \cos \theta \vec{e}_y \end{cases}$$

Omgekeerd kunnen we de componenten van de basisvectoren $\{\vec{e}_x, \vec{e}_y\}$ ten opzichte van de basis $\{\vec{e}_u, \vec{e}_v\}$ neerschrijven als volgt:

$$\begin{cases} \vec{e}_x = \cos \theta \vec{e}_u - \sin \theta \vec{e}_v \\ \vec{e}_y = \sin \theta \vec{e}_u + \cos \theta \vec{e}_v \end{cases}$$

Door substitutie in $\vec{r} = u\vec{e}_u + v\vec{e}_v$ vinden we

$$\vec{r} = u(\cos \theta \vec{e}_x + \sin \theta \vec{e}_y) + v(-\sin \theta \vec{e}_x + \cos \theta \vec{e}_y)$$

ofwel

$$\vec{r} = (u \cos \theta - v \sin \theta) \vec{e}_x + (u \sin \theta + v \cos \theta) \vec{e}_y$$

De coördinaten van het punt P in het oorspronkelijke referentiestelsel worden dus als volgt geschreven in functie van de coördinaten van het punt P in het nieuwe referentiestelsel:

$$\begin{cases} x = u \cos \theta - v \sin \theta \\ y = u \sin \theta + v \cos \theta \end{cases}$$

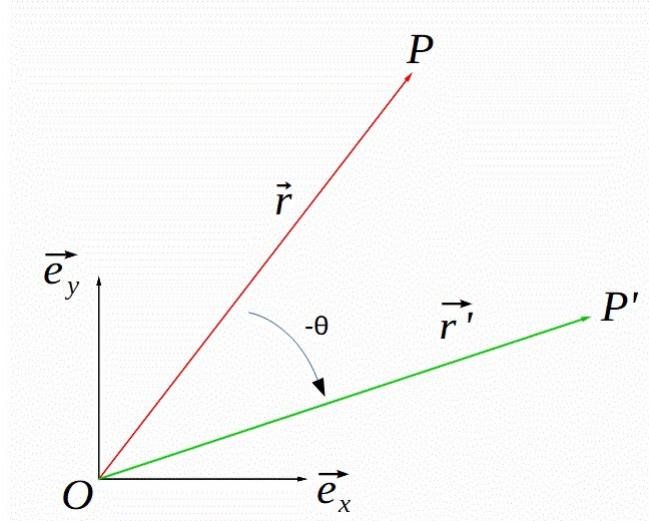
Op dezelfde manier vindt men door substitutie de coördinaten van het punt P in het nieuwe referentiestelsel, uitgedrukt in functie van de coördinaten van P in het oude referentiestelsel:

$$\begin{cases} u = x \cos \theta + y \sin \theta \\ v = -x \sin \theta + y \cos \theta \end{cases}$$

Deze uitdrukkingen kan men ook op een alternatieve, elegante manier neerschrijven met behulp van getallenschema's. De coördinaten in een referentiestelsel schrijft met in een kolom, een **kolommatrix** en het verband tussen de coördinaten in beide referentiestelsels drukt met uit met een **coördinatentransformatiematrix**.

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

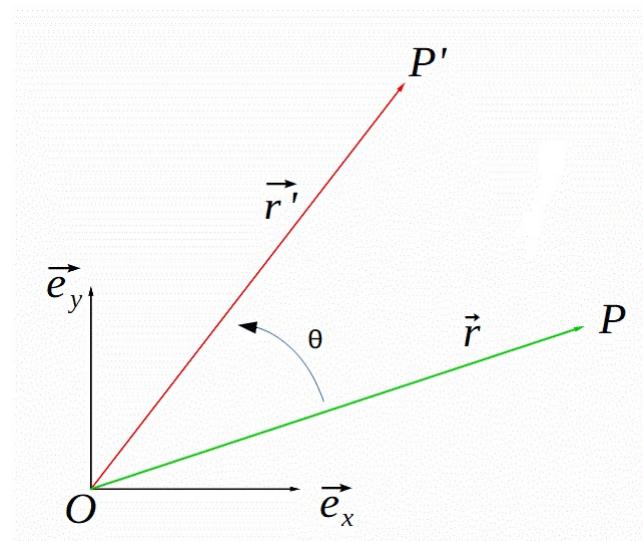
Een soortgelijke, maar verschillende situatie wordt in de volgende figuur voorgesteld. Een vector $\vec{r} = x\vec{e}_x + y\vec{e}_y$ roteert over een hoek $-\theta$ (dus gemeten in wijzerszin), na deze rotatie wordt de vector, die we nu \vec{r}' noemen, gegeven door $\vec{r}' = x'\vec{e}_x + y'\vec{e}_y$.



De componenten van \vec{r}' worden nu uitgedrukt in functie van de componenten van \vec{r} met

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

In de volgende figuur is de rotatie van een vector \vec{r} over een hoek θ in tegenwijzerszin voorgesteld. De transformatie voor deze rotatie vinden we door in de bovenstaande uitdrukking θ te vervangen door $-\theta$. We vinden dan:



$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

De matrix

$$\begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

wordt de rotatiematrix voor rotatie over een hoek θ genoemd.

Matrices zijn een handige manier om veranderingen van referentiestelsel, coördinatentransformaties, te beschrijven.

Daarnaast is er een hele familie bewerkingen, lineaire transformaties, waarbij een vector via een matrixbewerking wordt omgezet in een nieuwe vector. Typisch voorbeeld is het roteren van een vector zoals hierboven beschreven.

In dit hoofdstuk zullen we een aantal definities en eigenschappen van matrices bespreken en zullen we rekenwerk met matrices inoefenen met het oog op praktische toepassingen. Alle eigenschappen die besproken worden kunnen wiskundig bewezen worden maar dat gaan we in dit hoofdstuk dus niet doen.

2.1 Definities

- Wat is een matrix?
- Welke bewerkingen zijn er mogelijk met matrices?
- Wat hebben matrices te maken met het oplossen van stelsels van vergelijkingen?

Definitie van een matrix

Een $m \times n$ matrix A is een rechthoekig getallenschema waarin reële en/of complexe getallen in m rijen en n kolommen zijn gerangschikt. Het getal op de i -de rij en j -de kolom wordt symbolisch weergegeven als a_{ij} .

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}$$

Enkele veel voorkomende speciale matrices

- Een rijmatrix

Een matrix A met 1 rij en n kolommen wordt een $1 \times n$ matrix of rijmatrix genoemd.

$$A = (a_{11} \ a_{12} \ a_{13} \ \dots \ a_{1n})$$

- Een kolommatrix

Een matrix A met m rijen en 1 kolom wordt een $m \times 1$ matrix of kolommatrix genoemd.

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ a_{31} \\ \vdots \\ a_{m1} \end{pmatrix}$$

- Een vierkante matrix

Een matrix met evenveel rijen als kolommen wordt een vierkante matrix genoemd.
De onderstaande matrix A is een $n \times n$ matrix.

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}$$

- Een diagonaalmatrix

Een vierkante matrix A waarin alle getallen die niet op de diagonaal liggen nul zijn ($a_{ij} = 0$ als $i \neq j$) en minstens één getal op de diagonaal verschillend is van nul (voor minstens 1 getal a_{ii} geldt $a_{ii} \neq 0$) noemt men een diagonaalmatrix.

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}$$

- Een driehoeksmatrix

Een driehoeksmatrix is een vierkante matrix waarbij alle elementen onder de diagonaal nul zijn. De overige elementen zijn niet allemaal nul.

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & \dots & a_{1n} \\ 0 & a_{22} & a_{23} & a_{24} & \dots & a_{2n} \\ 0 & 0 & a_{33} & a_{34} & \dots & a_{3n} \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & & a_{4n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}$$

- Een symmetrische matrix

Een vierkante matrix A waarbij de diagonaal een spiegellijn vormt (m.a.w. voor alle $a_{ij} \in A$ geldt $a_{ij} = a_{ji}$) is een symmetrische matrix.

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{12} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1n} & a_{2n} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}$$

- Een éénheidsmatrix

Een diagonaal matrix waarbij alle getallen op de diagonaal gelijk zijn aan één (alle $a_{ii} = 1$) is een éénheidsmatrix I .

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

- Een nulmatrix

Een $m \times n$ matrix waarin alle $a_{ij} = 0$ is een nulmatrix O .

$$O = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}$$

Opmerking: de nulmatrix is niet noodzakelijk een vierkante matrix.

$$(0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0), \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \dots$$

worden allemaal nulmatrix genoemd.

2.2 Bewerkingen met matrices

Transponeren van een matrix

De getransponeerde A^t van een matrix A vindt men door de rijen en kolommen van A om te wisselen.

Voorbeeld:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 0 & 2 \\ 7 & 0 & 0 & 8 \\ 5 & 4 & 1 & 3 \end{pmatrix} \quad A^t = \begin{pmatrix} 1 & 7 & 5 \\ 3 & 0 & 4 \\ 0 & 0 & 1 \\ 2 & 8 & 3 \end{pmatrix}$$

Voor een symmetrische matrix B geldt dat $B^t = B$.

Voorbeeld:

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 0 \\ 3 & 0 & 4 \\ 0 & 4 & 1 \end{pmatrix} \quad B^t = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 0 \\ 3 & 0 & 4 \\ 0 & 4 & 1 \end{pmatrix}$$

De getransponeerde van een rijmatrix is een kolommatrix en omgekeerd.

Voorbeeld:

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 84 & -1 \end{pmatrix} \quad C^t = \begin{pmatrix} 1 \\ 84 \\ -1 \end{pmatrix}$$

Product van een matrix met een getal

Het product van een $m \times n$ matrix A met een reëel of complex getal λ is een nieuwe $m \times n$ matrix B die men vindt door elk element a_{ij} van de matrix te vermenigvuldigen met λ .

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad B = \lambda A = \begin{pmatrix} \lambda a_{11} & \lambda a_{12} & \lambda a_{13} & \dots & \lambda a_{1n} \\ \lambda a_{21} & \lambda a_{22} & \lambda a_{23} & \dots & \lambda a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda a_{m1} & \lambda a_{m2} & \lambda a_{m3} & \dots & \lambda a_{mn} \end{pmatrix}$$

Optellen van matrices

Het optellen van twee matrices A en B is alleen gedefinieerd als het aantal rijen van beide matrices gelijk is en als het aantal kolommen van beide matrices gelijk is. In dat geval is de som een matrix C met hetzelfde aantal rijen en kolommen als A en B die men als volgt vindt:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & \dots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & b_{m3} & \dots & b_{mn} \end{pmatrix}$$

$$C = A + B = \begin{pmatrix} a_{11} + b_{11} & a_{12} + b_{12} & a_{13} + b_{13} & \dots & a_{1n} + b_{1n} \\ a_{21} + b_{21} & a_{22} + b_{22} & a_{23} + b_{23} & \dots & a_{2n} + b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} + b_{m1} & a_{m2} + b_{m2} & a_{m3} + b_{m3} & \dots & a_{mn} + b_{mn} \end{pmatrix}$$

Voorbeelden:

1.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 4 & 8 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 6 & 2 & -2 \\ 1 & 1 & -1 \end{pmatrix} \quad A + B = \begin{pmatrix} 7 & 6 & 6 \\ 3 & 4 & 0 \end{pmatrix}$$

2.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 4 & 8 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix} \quad C = \begin{pmatrix} 6 & 2 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$$

De som $A + C$ is niet gedefinieerd.

Vermenigvuldiging van twee matrices

Het product van een matrix A met een matrix B is alleen gedefinieerd als het aantal kolommen van de eerste matrix A gelijk is aan het aantal rijen van de tweede matrix B .

In dat geval geldt dat het product van de $m \times n$ matrix A met de $n \times p$ matrix B een nieuwe matrix $C = AB$ is met m -rijen en p -kolommen.

Elk element c_{ij} van de productmatrix C wordt gegeven door:

$$c_{ij} = \sum_{k=1}^n a_{ik} b_{kj}$$

m.a.w. c_{ij} wordt gevonden door het eerste element van de i -de rij van A te vermenigvuldigen met het eerste element van de j -de kolom van B , het tweede element van de i -de rij van A te vermenigvuldigen met het tweede element van de j -de kolom van B , het derde element van de i -de rij van A te vermenigvuldigen met het derde element van de j -de kolom van B , enz... en vervolgens al deze producten op te tellen.

Voorbeelden:

1. Bereken de producten $C = AB$ en $D = BA$.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 & 4 \\ 0 & 2 & 3 & 5 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 10 \\ 12 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Het aantal kolommen van A is gelijk aan het aantal rijen van B , het product AB is dus gedefinieerd en is een 2×1 matrix C

$$C = AB = \begin{pmatrix} 1.10 + 0.12 + 2.0 + 4.0 \\ 0.10 + 2.12 + 3.0 + 5.0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10 \\ 24 \end{pmatrix}$$

Het aantal kolommen van B is verschillend van het aantal rijen van A . Dit betekent dat het product $D = BA$ niet gedefinieerd is.

2. Bereken de producten $C = AB$ en $D = BA$.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Het aantal kolommen van A is gelijk aan het aantal rijen van B , het product AB is dus gedefinieerd en is een 1×1 matrix C

$$C = AB = (1.1 + 0.0 + 1.1) = (2) = 2$$

Het aantal kolommen van B is gelijk aan het aantal rijen van A , het product BA is dus gedefinieerd en is een 3×3 matrix D

$$D = BA = \begin{pmatrix} 1.1 & 0.0 & 1.1 \\ 0.1 & 0.0 & 0.1 \\ 1.1 & 0.0 & 1.1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Opmerkingen:

- Bij het vermenigvuldigen van matrices geldt dus over het algemeen **NIET** dat $AB = BA$
- Het is zelfs **NIET** zo dat uit het feit dat het product van twee matrices $C = AB$ bestaat volgt dat het product BA ook bestaat.

2.3 Determinant

Inleiding

De determinant van een matrix is een getal dat via een welbepaalde procedure uit de elementen van een vierkante matrix kan berekend worden.

De determinant van een matrix is alleen **gedefinieerd voor vierkante matrices**.

Determinant van een 1×1 matrix

De determinant van een 1×1 matrix A is het enige element van de matrix.

$$A = (a_{11}) \quad \det A = |a_{11}| = a_{11}$$

Determinant van een 2×2 matrix

De determinant van een 2×2 matrix A wordt als volgt berekend:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \quad \det A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12}$$

Minor van een element van een vierkante matrix

De minor van een element a_{ij} van een vierkante matrix A is het getal dat men bekomt door in de matrix A de i -de rij en de j -de kolom te schrappen, en van de overblijvende matrix de determinant te berekenen.

Voorbeeld:

We berekenen de minor van het element a_{13} van de matrix $A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$

We schrappen de eerste rij en de derde kolom van A en berekenen de determinant van de overblijvende matrix.

$$\text{minor}(a_{13}) = \det \begin{pmatrix} a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{pmatrix} = a_{21}a_{32} - a_{31}a_{22}$$

Cofactor van een element van een vierkante matrix

De cofactor van een element a_{ij} van een vierkante matrix A is het getal dat men bekomt door de minor van a_{ij} te vermenigvuldigen met $(-1)^{i+j}$

$$\text{cofactor}(a_{ij}) = (-1)^{i+j} \text{minor}(a_{ij})$$

Voorbeelden:

1. We berekenen de cofactor van het element a_{ij} van de bovenstaande matrix A

$$\text{cofactor}(a_{ij}) = (-1)^{1+3} \text{minor}(a_{13}) = \text{minor}(a_{13}) = a_{21}a_{32} - a_{31}a_{22}$$

2. Bereken de cofactor van het element $a_{23} = 8$ van de matrix $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 0 & 4 & 8 \\ 2 & 5 & 8 \end{pmatrix}$

We schrappen de tweede rij en de derde kolom en berekenen de determinant van de resterende vierkante matrix.

$$\text{cofactor}(a_{23}) = (-1)^{2+3} (1.5 - 2.2) = (-1).1 = -1$$

Merk op dat in de berekening van de cofactor van a_{23} de waarde van a_{23} , in dit geval 8, geen enkele rol speelt.

Determinant van een $n \times n$ matrix

Om de determinant van een willekeurige $n \times n$ matrix te berekenen maken we gebruik van de ontwikkelingsformule van Laplace. Deze formule kan toegepast worden op eender welke rij of kolom van een $n \times n$ matrix, het resultaat is steeds de determinant van de matrix.

Toegepast op de i -de rij van de matrix noemt men dit **de ontwikkeling van de determinant naar de i -de rij**:

$$\det A = \sum_{k=1}^n a_{ik} \text{cofactor}(a_{ik})$$

Toegepast op de j -de kolom noemt men dit **de ontwikkeling van de determinant naar de j -de kolom:**

$$\det A = \sum_{k=1}^n a_{kj} \text{cofactor}(a_{kj})$$

Voorbeelden:

Bereken de determinant van de volgende matrices:

1.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 2 & 1 & 3 \\ 3 & 0 & 4 \end{pmatrix}$$

Oplossing: we passen ontwikkeling naar de eerste rij toe.

$$\begin{aligned} \det A &= 1(-1)^{1+1} \det \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 0 & 4 \end{pmatrix} + 2(-1)^{1+2} \det \begin{pmatrix} 2 & 3 \\ 3 & 4 \end{pmatrix} + 0(-1)^{1+3} \det \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 3 & 0 \end{pmatrix} \\ \det A &= (4 - 2(8 - 9)) = 6 \end{aligned}$$

2.

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 9 & -5 \\ \pi & 0 & 3 & 11 \\ 0 & \pi^2 & 4 & -3 \end{pmatrix}$$

Oplossing: de matrix B is geen vierkante matrix, de determinant bestaat niet.

3.

$$C = \begin{pmatrix} \pi & \pi^2 & \pi^3 & \pi^4 \\ 0 & 3 & 0 & 6 \\ 0 & 0 & 4 & 7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Oplossing: we passen ontwikkeling naar de eerste kolom toe.

$$\det C = \pi(-1)^{1+1} \det \begin{pmatrix} 3 & 0 & 6 \\ 0 & 4 & 7 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Op de overblijvende determinant passen we opnieuw ontwikkeling naar de eerste kolom toe.

$$\det C = \pi 3(-1)^{1+1} \det \begin{pmatrix} 4 & 7 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\det C = \pi \cdot 3 \cdot 4 \cdot 1 = 12\pi$$

Er geldt algemeen dat **de determinant van een driehoeksmatrix het product van de diagonalelementen is.**

Eigenschappen van determinanten

Alle matrices die in deze paragraaf voorkomen worden ondersteld vierkante matrices te zijn.

- De determinant van de getransponeerde van een matrix is hetzelfde als de determinant van de oorspronkelijke matrix.

$$\det A^t = \det A$$

- Als men twee rijen (of twee kolommen) van plaats wisselt in een matrix dat verandert de determinant van teken.

Voorbeeld:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \det A = 1$$

Wissel de eerste en tweede rij van plaats:

$$A' = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \det A' = 1(-1)^{1+2} \det \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \quad \det A' = -1$$

- Als de elementen van een rij (of kolom) van een matrix vermenigvuldigt worden met een getal λ dan wordt de determinant van de matrix vermenigvuldigt met λ .

Voorbeeld:

$$B = \begin{pmatrix} 3 & 2 \\ 2 & 4 \end{pmatrix} \quad \det B = 12 - 4 = 8$$

We vermenigvuldigen de eerste rij met $\lambda = 2$

$$B' = \begin{pmatrix} 6 & 4 \\ 2 & 4 \end{pmatrix} \quad \det B' = 24 - 8 = 16$$

- Als men de elementen van een rij (kolom) van een matrix vermenigvuldigt met een getal $\lambda \neq 0$ en deze vervolgens optelt bij de elementen van een andere rij (kolom) dan verandert de waarde van de determinant niet.

Voorbeeld:

We vertrekken opnieuw van de matrix B uit het vorige voorbeeld. We vermenigvuldigen nu de eerste rij met 2 en tellen deze rij op bij de tweede rij.

$$B'' = \begin{pmatrix} 3 & 2 \\ 8 & 8 \end{pmatrix} \quad \det B'' = 24 - 16 = 8$$

- De determinant van een matrix met een nulrij (nulkolom) is nul.

Voorbeeld:

$$C = \begin{pmatrix} \pi & \pi + 1 & \pi + 2 \\ 0 & 0 & 0 \\ \pi - 1 & \pi & \pi + 1 \end{pmatrix}$$

De determinant ontwikkelen naar de tweede rij geeft onmiddellijk $\det C = 0$

- Als twee rijen (kolommen) van een matrix gelijk zijn dan is de determinant nul.

Voorbeeld:

$$D = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 8 \\ 3 & 3 & 7 \\ 2 & 2 & 5 \end{pmatrix} \quad \det D = 1\det \begin{pmatrix} 3 & 7 \\ 2 & 5 \end{pmatrix} - 1\det \begin{pmatrix} 3 & 7 \\ 2 & 5 \end{pmatrix} + 8\det \begin{pmatrix} 3 & 3 \\ 2 & 2 \end{pmatrix}$$

$$\det D = 0 + 8(6 - 6) = 0$$

- Als twee rijen (kolommen) van een matrix evenredig zijn met elkaar dan is de determinant nul.

Voorbeeld: de tweede rij is drie maal de eerste rij.

$$E = \begin{pmatrix} 5 & 10 \\ 15 & 30 \end{pmatrix} \quad \det E = 150 - 150 = 0$$

- Als een rij (kolom) van een matrix een lineaire combinatie is van andere rijen (kolommen) van de matrix dan is de determinant nul.

Voorbeeld: De tweede rij is de derde rij waarbij twee keer de eerste rij is opgeteld. We ontwikkelen naar de derde rij.

$$F = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 6 & 4 & 10 \\ 4 & 0 & 4 \end{pmatrix} \quad \det F = 4\det \begin{pmatrix} 2 & 3 \\ 4 & 10 \end{pmatrix} + 4\det \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 6 & 4 \end{pmatrix}$$

$$\det F = 4(20 - 12) + 4(4 - 12) = 4(8 - 8) = 0$$

- Als A en B beide $n \times n$ matrices zijn dan geldt:

$$\det(AB) = (\det A)(\det B)$$

Voorbeeld:

$$A = \begin{pmatrix} 2 & 3 \\ 4 & 10 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 6 & 4 \end{pmatrix}$$

$$\det A = 8 \quad \det B = -8 \quad (\det A)(\det B) = -64$$

$$AB = \begin{pmatrix} 2+18 & 4+12 \\ 4+60 & 8+40 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 20 & 16 \\ 64 & 48 \end{pmatrix} \quad \det(AB) = 20 \cdot 48 - 64 \cdot 16$$
$$\det(AB) = 16(20 \cdot 3 - 64) = 16(-4) = -64$$

2.4 Inverse van een matrix

Reguliere en singuliere matrix

Een vierkante matrix A waarvoor geldt $\det A \neq 0$ is een reguliere matrix.

Een vierkante matrix A waarvoor geldt $\det A = 0$ is een singuliere matrix.

Inverse van een matrix

Als er voor een vierkante matrix A een vierkante matrix X bestaat waarvoor geldt $AX = XA = I$, met I de éénheidsmatrix dan is de matrix X de inverse van A .

Notatie:

$$X = A^{-1}$$

Opmerkingen:

- Opdat X de inverse van A zou zijn moet dus aan **beide** uitdrukkingen $AX = I$ en $XA = I$ voldaan zijn.
- Als de inverse van A bestaat dan geldt $(A^{-1})^{-1} = A$
- Als de inverse van A bestaat dan zegt men dat A inverteerbaar is.
- Men kan aantonen dat voor een inverteerbare matrix A geldt $\det A \neq 0$, met andere woorden "A is inverteerbaar" \Leftrightarrow "A is regulier".

Voorbeeld:

De inverse van de matrix $A = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$ is de matrix $B = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix}$

Controle:

$$AB = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

en

$$BA = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Adjunctmatrix van een vierkante matrix

De adjunctmatrix van een vierkante matrix A is de matrix die men bekomt door elk element van A te vervangen door zijn cofactor en vervolgens de matrix te transponeren.

Dus, met a_{ij} de elementen van de $n \times n$ matrix A geldt:

$$adj A = \begin{pmatrix} cofactor(a_{11}) & cofactor(a_{12}) & cofactor(a_{13}) & \dots & cofactor(a_{1n}) \\ cofactor(a_{21}) & cofactor(a_{22}) & cofactor(a_{23}) & \dots & cofactor(a_{2n}) \\ cofactor(a_{31}) & cofactor(a_{32}) & cofactor(a_{33}) & \dots & cofactor(a_{3n}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ cofactor(a_{n1}) & cofactor(a_{n2}) & cofactor(a_{n3}) & \dots & cofactor(a_{nn}) \end{pmatrix}^t$$

Het is mogelijk om aan te tonen dat voor een reguliere vierkante matrix A geldt:

$$A^{-1} = \frac{adj(A)}{\det A}$$

Voorbeeld:

De vierkante matrix $A = \begin{pmatrix} 1 & 8 & 0 \\ 1 & 7 & 2 \\ 0 & 3 & 1 \end{pmatrix}$.

We gaan na of deze matrix regulier is (m.a.w. of er een inverse matrix A^{-1} bestaat).

$$\det A = 1 \det \begin{pmatrix} 7 & 2 \\ 3 & 1 \end{pmatrix} - 8 \det \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = -7$$

Dus $\det A \neq 0$ zodat A is regulier, A^{-1} bestaat.

$$A^{-1} = \frac{\text{adj}(A)}{\det A} = \frac{1}{-7} \begin{pmatrix} 1 & -1 & 3 \\ -8 & 1 & -3 \\ 16 & -2 & -1 \end{pmatrix}^t$$

De inverse van A is dus

$$A^{-1} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{7} & \frac{8}{7} & -\frac{16}{7} \\ \frac{1}{7} & -\frac{1}{7} & \frac{2}{7} \\ -\frac{3}{7} & \frac{3}{7} & \frac{1}{7} \end{pmatrix}$$

2.5 De rang van een matrix

Onderdeterminant van p -de orde van een matrix

Een onderdeterminant van p -de orde van een $m \times n$ matrix A is een getal dat men bekomt door:

- $m - p$ rijen en $n - p$ kolommen van de matrix A te schrappen
- de determinant van de overblijvende vierkante matrix te berekenen

Opmerkingen:

- onderdeterminanten zijn dus ook voor niet-vierkante matrices gedefinieerd
- er staat **een** onderdeterminant... naargelang welke rijen en kolommen geschrapt worden zal je een andere onderdeterminant vinden

Voorbeeld:

Beschouw de 3×4 matrix $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 6 \end{pmatrix}$

We berekenen een onderdeterminant van 3-de orde door 3-3 = 0 rijen te schrappen en 4-3 = 1 kolom te schrappen en de determinant van de overblijvende vierkante matrix te berekenen.

- Schrappen van de vierde kolom levert als onderdeterminant van 3-orde:

$$\det \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 0 & 3 & 4 \\ 0 & 0 & 5 \end{pmatrix} = 15$$

- Schrappen van de derde kolom levert als onderdeterminant van 3-de orde:

$$\det \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 6 \end{pmatrix} = 18$$

We berekenen een onderdeterminant van 1-ste orde door $3 - 1 = 2$ rijen en $4 - 1 = 3$ kolommen te schrappen en de determinant van de overblijvende matrix te berekenen.

- Schrap de eerste twee rijen en de eerste drie kolommen. De onderdeierminant van 1-ste orde is

$$\det(6) = 6$$

- Schrap de eerste twee rijen en de laatste drie kolommen. De onderdeterminant van 1-ste orde is

$$\det(0) = 0$$

Rang van een matrix

De rang van een $m \times n$ matrix A is nu gedefinieerd als de hoogste orde r van alle van nul verschillende onderdeterminanten van A .

Er bestaan verschillende notaties voor de rang van een matrix maar de meest voorkomende zijn:

$$\text{rang}(A) = r, Rg(A) = r \quad \text{of} \quad \text{Rank}(A) = r$$

:opmerkingen:

- De rang van een $m \times n$ matrix A is nooit groter dan het minimum van m en n .

$$\text{rang}(A) \leq \min(m, n)$$

Bij het berekenen van de onderdeterminanten kan men immers nooit minder dan 0 rijen of kolommen schrappen...

- Voor een nulmatrix geldt: $\text{rang}(O) = 0$
- Voor een vierkante $n \times n$ matrix A geldt:
 - as A regulier is (m.a.w. $\det A \neq 0$) dan geldt $\text{rang}(A) = n$
De van nul verschillende determinant van A is immers de onderdeterminant van orde n .
 - als A singulier is (m.a.w. $\det A = 0$) dan geldt $\text{rang}(A) < n$

Voorbeeld:

We bepalen de rang van $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 7 \\ 2 & 5 & 6 & 7 \end{pmatrix}$

De matrix A is een 3×4 matrix. We weten dus op voorhand dat $\text{rang}(A) \leq 3$

We berekenen nu de onderdeterminanten, startend van onderdeterminanten van orde 3, tot we een onderdeterminant tegenkomen die verschillend is van nul. De orde van deze onderdeterminant is volgens de definitie de rang van de matrix.

- Onderdeterminanten van orde 3.

We schrappen 0 rijen en 1 kolom.

$$\det \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 0 \\ 2 & 5 & 6 \end{pmatrix} = 0, \det \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 7 \\ 2 & 5 & 7 \end{pmatrix} = 0, \det \begin{pmatrix} 1 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 7 \\ 2 & 6 & 7 \end{pmatrix} = 0, \det \begin{pmatrix} 2 & 3 & 0 \\ 1 & 0 & 7 \\ 5 & 6 & 7 \end{pmatrix} = 0$$

De rang van de matrix zal dus kleiner zijn dan 3.

- Onderdeterminanten van orde 2.

We schrappen 1 rij en 2 kolommen.

Door de derde rij en de twee laatste kolommen te schrappen vinden we:

$$\det \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = 1 \neq 0$$

We vinden dus dat

$$rang(A) = 2$$

2.6 Elementaire omvormingen van een matrix

Definitie

Elementaire omvormingen van een matrix zijn omvormingen die de rang van een matrix niet veranderen. Er zijn drie elementaire omvormingen die men kan toepassen op de rijen of op de kolommen van een matrix.

- Twee rijen (of twee kolommen) van plaats wisselen.
- Alle elementen van een rij (of kolom) vermenigvuldigen met een getal $\lambda \neq 0$.
- Alle elementen van een rij (of kolom) vermenigvuldigen met een getal $\lambda \neq 0$ en deze dan optellen bij de elementen van een andere rij (kolom).

Opmerking:

De rang van een matrix wordt bepaald door na te gaan of determinanten verschillen zijn van nul of niet. De omvormingen die hierboven staan kunnen de waarde van een determinant wel veranderen maar hebben geen effect op het al dan niet nul zijn van een determinant (zie: eigenschappen van determinanten).

De rang van een matrix bepalen met elementaire omvormingen

- Echelonvorm van een matrix

Een matrix is in echelonvorm als

- alle eventuele nulrijen van de matrix onderaan de matrix staan
- de eerste rij begint met een element dat niet nul is, de tweede rij begint met een nul gevuld door een element dat niet nul is, de derde rij begint met twee nullen gevuld door een element dat niet nul is, enz... tot ofwel de nulrijen ofwel het einde van de matrix wordt bereikt.

Een $m \times n$ matrix in echelonvorm:

$$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & \dots & b_{1r} & b_{1,r+1} & b_{1,r+2} & \dots & b_{1n} \\ 0 & b_{22} & \dots & \dots & b_{2r} & b_{2,r+1} & b_{2,r+2} & \dots & b_{2n} \\ 0 & 0 & \ddots & \dots & b_{3r} & b_{3,r+1} & b_{3,r+2} & \dots & b_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & b_{rr} & b_{r,r+1} & b_{r,r+2} & \dots & b_{rn} \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \end{pmatrix}$$

met alle $b_{ii} \neq 0$ ($i = 1..r$) de elementen b_{ij} met $i \neq j$ kunnen zowel gelijk als verschillend van nul zijn.

- Praktische manier om de rang van een matrix te bepalen

De rang van een $m \times n$ matrix A bepalen door onderdeterminanten te berekenen blijkt in de praktijk nogal lastig en tijdrovend te zijn. Een veel handiger manier is gebaseerd op elementaire omvormingen.

Men gaat als volgt te werk:

- zet de matrix A met behulp van elementaire omvormingen om in een nieuwe matrix A' die in echelonvorm staat

$$A' = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & \dots & b_{1r} & b_{1,r+1} & b_{1,r+2} & \dots & b_{1n} \\ 0 & b_{22} & \dots & \dots & b_{2r} & b_{2,r+1} & b_{2,r+2} & \dots & b_{2n} \\ 0 & 0 & \ddots & \dots & b_{3r} & b_{3,r+1} & b_{3,r+2} & \dots & b_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & b_{rr} & b_{r,r+1} & b_{r,r+2} & \dots & b_{rn} \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \end{pmatrix}$$

- Het aantal niet-nulrijen van A' is dan gelijk aan de rang van de matrix A

$$\text{rang}(A) = r = \text{aantal niet nulrijen van } A'$$

Verklaring:

Elementaire omvormingen veranderen de rang van een matrix niet. Er geldt dus $\text{rang}(A) = \text{rang}(A')$.

De matrix A' heeft minstens één onderdeterminant van orde r want alle $b_{ii} \neq 0$ ($i = 1..r$) zodat de determinant van de $r \times r$ driehoeksmatrix, waarvan de b_{ii} de diagonaal vormen, niet nul is. Alle onderdeterminanten van een grotere orde dan r van A' zijn zeker nul, ze bevatten immers altijd minstens één nulrij.

Voorbeeld:

$$\text{Bereken de rang van } A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \\ 1 & 3 & 5 & 3 \\ 2 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

We gaan de matrix nu stap voor stap, met elementaire opvormingen, omzetten in een echelonmatrix. Hierbij gaan we van links naar rechts door de matrix: eerst maken we alle elementen onder het eerste element van de eerste rij nul, vervolgens maken we alle elementen onder het tweede element van de tweede rij nul, enz... tot we de echelonvorm bekomen.

- stap 1: rij 3 - rij 1 en rij 4 -2 rij 1

$$A' = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & -4 & -5 & 1 \end{pmatrix}$$

- stap 2: rij 3 - rij 2 en rij 4 + 4 rij 2

$$A' = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 13 \end{pmatrix}$$

- stap 3: wissel rij 3 en rij 4

$$A' = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 3 & 13 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

De resulterende 4×4 matrix A' staat in echelonvorm en heeft drie niet-nulrijen:

$$\text{rang}(A) = \text{rang}(A') = 3$$

2.7 Praktische berekening van de inverse van een matrix

Om na te gaan of een vierkante matrix regulier is moeten we de determinant berekenen. Voor een iets grotere matrix kan dit behoorlijk tijdrovend zijn. Als blijkt dat de matrix regulier is, kan men de inverse vinden door de adjunctmatrix te berekenen. Hiervoor moeten opnieuw talrijke determinanten worden uitgerekend. Dit maakt dat het berekenen van de inverse van een matrix op deze manier enorm veel tijd en moeite kost, in die mate zelfs dat het voor grotere matrices, zelfs met een computer, onpraktisch wordt.

Er is echter een methode ontwikkeld die toelaat om, met elementaire omvormingen, na te gaan of een matrix inverteerbaar is en eventueel de inverse te vinden. Deze methode staat bekend

als de methode van **Gauss-Jordan**. We geven hier deze methode zonder bewijs.

Methode van Gauss-Jordan om na te gaan of een vierkante $n \times n$ matrix A inverteerbaar is en om eventueel de inverse van A te vinden:

- Stap 1: Schrijf een nieuwe $n \times 2n$ matrix met links de matrix A en rechts de éénheidsmatrix I

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \dots & \dots & \dots & a_{1n} & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & & & & \vdots & 0 & 1 & & & 0 \\ \vdots & & & & \vdots & \vdots & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & & & & \vdots & \vdots & & \ddots & & \vdots \\ a_{n1} & \dots & \dots & \dots & a_{nn} & 0 & \dots & \dots & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

- Stap 2: Probeer de matrix A , door opeenvolgende elementaire omvormingen, om te zetten in de éénheidsmatrix I en pas tegelijkertijd dezelfde elementaire omvormingen toe op I . Om geen rekenfouten te maken is het aan te raden je te beperken tot elementaire rij-omvormingen.

Er zijn nu twee mogelijkheden:

1. Na een aantal omvormingen wordt de $n \times n$ matrix A omgezet in een matrix met een nulrij. Dus $\text{rang}(A) < n$, $\det A = 0$ en A is singulier. De inverse van A bestaat niet.
2. Na een aantal elementaire omvormingen is A omgezet in de éénheidsmatrix I . Dit betekent dat $\text{rang}(A) = n$, $\det A \neq 0$ en A is regulier (inverteerbaar). De éénheidsmatrix I is dan door de elementaire omvormingen omgezet in een nieuwe $n \times n$ matrix $B = A^{-1}$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & \dots & 0 & b_{11} & \dots & \dots & \dots & b_{1n} \\ 0 & 1 & & & 0 & \vdots & & & & \vdots \\ \vdots & \ddots & & & \vdots & \vdots & & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & \vdots & \vdots & & & & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 1 & b_{n1} & \dots & \dots & \dots & b_{nn} \end{pmatrix}$$

Voorbeeld:

We gebruiken de methode van Gauss-Jordan om na te gaan of de vierkante matrix A inverteerbaar is. Als dat zo is bepalen we meteen de inverse van A .

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 7 & 0 \\ 0 & 6 & 1 \\ 2 & 5 & 8 \end{pmatrix}$$

We schrijven de 3×3 matrix A in een 3×6 matrix door de éénheidsmatrix rechts bij te voegen.

$$\begin{pmatrix} 1 & 7 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & 5 & 8 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

We passen nu elementaire rij-omvormingen toe waarbij we proberen A om te zetten in de éénheidsmatrix. Tegelijkertijd passen we dezelfde rij-omvormingen toe op de éénheidsmatrix I . We gaan hierbij systematisch te werk waarbij we in A , van links naar rechts, de elementen onder de diagonaal omzetten in nullen.

- Stap 1: rij 3 - 2 rij 1

$$\begin{pmatrix} 1 & 7 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -9 & 8 & -2 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- Stap 2: rij 3 + 3/2 rij 2

$$\begin{pmatrix} 1 & 7 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{19}{2} & -2 & \frac{3}{2} & 1 \end{pmatrix}$$

- Stap 3: 1/6 rij 2 en 2/19 rij 3

$$\begin{pmatrix} 1 & 7 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \frac{1}{6} & 0 & \frac{1}{6} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{-4}{19} & \frac{3}{19} & \frac{2}{19} \end{pmatrix}$$

Pas als alle elementen onder de diagonaal nul gemaakt zijn bekijken we de elementen boven de diagonaal. We maken opnieuw gebruik van elementaire rij-omvormingen om deze elementen om te zetten in nullen. Deze keer gaan we systematisch van rechts naar links door de matrix.

- Stap 4: rij 2 - 1/6 rij 3

$$\begin{pmatrix} 1 & 7 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \frac{2}{57} & \frac{8}{57} & \frac{-1}{57} \\ 0 & 0 & 1 & \frac{-4}{19} & \frac{3}{19} & \frac{2}{19} \end{pmatrix}$$

- Stap 5: rij 1 - 7 rij 2

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \frac{43}{57} & \frac{-56}{57} & \frac{7}{57} \\ 0 & 1 & 0 & \frac{2}{57} & \frac{8}{57} & \frac{-1}{57} \\ 0 & 0 & 1 & \frac{-4}{19} & \frac{3}{19} & \frac{2}{19} \end{pmatrix}$$

De linkerhelft van de 3×6 matrix, A is omgezet in de éénheidsmatrix. De matrix A is dus inverteerbaar en tegelijkertijd is de rechterkant van de 3×6 matrix omgezet in $B = A^{-1}$

$$A^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{43}{57} & \frac{-56}{57} & \frac{7}{57} \\ \frac{2}{57} & \frac{8}{57} & \frac{-1}{57} \\ \frac{-4}{19} & \frac{3}{19} & \frac{2}{19} \end{pmatrix}$$

2.8 Methode van Gauss voor het oplossen van een stelsel van vergelijkingen

Stelsels van lineaire vergelijkingen in matrixnotatie

Een stelsel van lineaire vergelijkingen kan ook geschreven worden in matrixvorm. Neem een stelsel van m vergelijkingen in n onbekenden x_1, x_2, \dots, x_n :

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = c_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = c_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n = c_m \end{array} \right.$$

We merken op dat het **niet** noodzakelijk is dat het aantal vergelijkingen m gelijk is aan het aantal onbekenden n .

Door alle coëfficiënten a_{ij} in een mxn matrix $A = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & \dots & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & & & \vdots \\ \vdots & & & & \vdots \\ \vdots & & & & \vdots \\ a_{m1} & \dots & \dots & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}$ te schrijven, de onbekenden in een $nx1$ kolommatrix $X = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$ te plaatsen en de rechterleden van de vergelijkingen in een $mx1$ kolommatrix $C = \begin{pmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_m \end{pmatrix}$ te schrijven, kunnen we het stelsel van vergelijkingen beschouwen als een matrixvermenigvuldiging $AX = C$:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \dots & \dots & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & & & \vdots \\ \vdots & & & & \vdots \\ \vdots & & & & \vdots \\ a_{m1} & \dots & \dots & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_m \end{pmatrix}$$

In plaats van de matrixvermenigvuldiging explicet op te schrijven wordt het stelsel in matrixvorm dikwijls verkort genoteerd met behulp van de **verhoogde coëfficiëntenmatrix** ($A | C$) :

$$\left(\begin{array}{cccc|c} a_{11} & \dots & \dots & \dots & a_{1n} & c_1 \\ \vdots & & & & \vdots & \vdots \\ \vdots & & & & \vdots & \vdots \\ \vdots & & & & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & \dots & \dots & a_{mn} & c_m \end{array} \right)$$

Equivalentietransformaties van een stelsel lineaire vergelijkingen

Een equivalentietransformatie van een stelsel van vergelijkingen is een omvorming van het stelsel tot een nieuw stelsel van lineaire vergelijkingen dat nog steeds dezelfde oplossingen heeft als het oorspronkelijke stelsel.

Er zijn drie equivalentietransformaties:

- Twee vergelijkingen van het stelsel van plaats verwisselen
- Een vergelijking vermenigvuldigen met een getal $\lambda \neq 0$
- Een vergelijking vermenigvuldigen met een getal $\lambda \neq 0$ en het resultaat optellen bij een andere vergelijking.

Het is niet moeilijk in te zien dat de eerste twee inderdaad de oplossingen van het stelsel niet veranderen. De derde transformatie komt neer op de substitutiemethode voor het oplossen van een stelsel van vergelijkingen die we in het hoofdstuk over vergelijkingen besproken hebben.

Schrijven we nu een stelsel van lineaire vergelijkingen eerst in matrixvorm $AX = C$ en vervolgens in verkorte vorm met de verhoogde coëfficiëntenmatrix $(A | C)$. Het toepassen van de equivalentietransformaties op het stelsel komt dan neer op het toepassen van elementaire rij-omvormingen op de verhoogde coëfficiëntenmatrix.

Hierop is de methode van Gauss voor het oplossen van een stelsel van vergelijkingen gebaseerd.

Methode van Gauss

We schrijven een stelsel van m vergelijkingen in n onbekenden

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = c_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = c_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n = c_m \end{array} \right.$$

eerst in matrixvorm $AX = C$ en vervolgens in de verkorte notatie $(A \mid C)$:

$$\left(\begin{array}{cccccc|c} a_{11} & \dots & \dots & \dots & a_{1n} & c_1 \\ \vdots & & & & \vdots & \vdots \\ \vdots & & & & \vdots & \vdots \\ \vdots & & & & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & \dots & \dots & a_{mn} & c_m \end{array} \right)$$

We maken dan gebruik van elementaire rij-omvormingen (equivalentietransformaties) om de matrix om te zetten in echelonvorm $(A' \mid C')$. Omdat we alleen elementaire omvormingen gebruiken geldt dan steeds $\text{rang}(A) = \text{rang}(A')$ en $\text{rang}(A \mid C) = \text{rang}(A' \mid C')$.

In de meest algemene schrijfwijze heeft de echelonmatrix de vorm

$$(A' \mid C') = \left(\begin{array}{ccccccccc|c} a'_{11} & a'_{12} & \dots & \dots & a'_{1r} & a'_{1,r+1} & \dots & \dots & \dots & a'_{1n} & c'_1 \\ 0 & a'_{22} & \dots & \dots & a'_{2r} & a'_{2,r+1} & \dots & \dots & \dots & a'_{2n} & c'_2 \\ \vdots & 0 & \ddots & & \vdots & \vdots & & & & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots & \vdots & & & & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & & a'_{rr} & a'_{r,r+1} & \dots & \dots & \dots & a'_{rn} & c'_r \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & c'_{r+1} \\ \vdots & & & & \vdots & \vdots & & & & \vdots & \vdots \\ \vdots & & & & \vdots & \vdots & & & & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & c'_m \end{array} \right)$$

Merk op dat de rang van A het aantal niet-nulrijen van A' is: $\text{rang}(A) = r$

Er kunnen zich nu drie verschillende situaties voordoen.

Geval 1: voor minstens één van de $m - r$ laatste vergelijkingen (rijen) geldt $c'_i \neq 0$.

Dit betekent dat in het stelsel minstens één vergelijking voorkomt van de vorm $0 \neq 0$. Het is natuurlijk onmogelijk om aan deze vergelijking te voldoen: **het stelsel van vergelijkingen heeft geen oplossingen**.

Merk op dat in deze situatie geldt: $\text{rang}(A) \neq \text{rang}(A' \mid C')$

Geval 2: voor alle $m - r$ laatste rijen geldt $c'_i = 0$ (m.a.w. $\text{rang}(A) = \text{rang}(A' \mid C')$) en bovendien geldt $\text{rang}(A) = n$ met n het aantal onbekenden.

De echelonmatrix heeft dan de vorm:

$$(A' \mid C') = \left(\begin{array}{ccccccccc|c} a'_{11} & a'_{12} & \dots & \dots & a'_{1n} & c'_1 \\ 0 & a'_{22} & \dots & \dots & a'_{2n} & c'_2 \\ \vdots & 0 & \ddots & & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & & a'_{nn} & c'_n \\ 0 & & & & 0 & 0 \\ \vdots & & & & \vdots & \vdots \\ 0 & & & & 0 & 0 \end{array} \right)$$

In dit geval heeft het stelsel van vergelijkingen juist één oplossing die men vindt door de vergelijkingen één voor één op te lossen, beginnend met de laatste vergelijking. De oplossing van de laatste vergelijking $a'_{nn}x_n = c'_n$ wordt dan in de voorlaatste gesubstitueerd, enz...

Dit geeft een unieke oplossing x_1, x_2, \dots, x_n

Geval 3: voor alle $m - r$ laatste rijen geldt $c'_i = 0$ (m.a.w. $\text{rang}(A) = \text{rang}(\begin{array}{c|c} A' & C' \end{array})$) en $\text{rang}(A) < n$ met n het aantal onbekenden.

De echelonmatrix heeft nu de vorm:

$$\left(\begin{array}{c|c} A' & C' \end{array} \right) = \left(\begin{array}{ccccccccc|c} a'_{11} & a'_{12} & \cdots & \cdots & a'_{1r} & a'_{1,r+1} & \cdots & \cdots & \cdots & a'_{1n} & c'_1 \\ 0 & a'_{22} & \cdots & \cdots & a'_{2r} & a'_{2,r+1} & \cdots & \cdots & \cdots & a'_{2n} & c'_2 \\ \vdots & 0 & \ddots & & \vdots & \vdots & & & & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots & \vdots & & & & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & & a'_{rr} & a'_{r,r+1} & \cdots & \cdots & \cdots & a'_{rn} & c'_r \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & & & & \vdots & \vdots & & & & \vdots & \vdots \\ \vdots & & & & \vdots & \vdots & & & & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 \end{array} \right)$$

Het stelsel is oplosbaar en heeft een oneindig aantal oplossingen.

Men vindt de oplossingen door de vergelijkingen in het stelsel, van onder naar boven, één voor één op te lossen. De oplossing van de r -de vergelijking substitueert men in de $r - 1$ -ste vergelijking, enz...

De r -de vergelijking kan men oplossen naar de onbekende x_r door de onbekenden x_{r+1}, \dots, x_n als parameters te kiezen.

Voorbeelden:

We controleren met de methode van Gauss of de volgende stelsels oplosbaar zijn en we zoeken de eventuele oplossingen.

1.

$$\begin{cases} x_1 - 3x_2 + 5x_3 = 0 \\ 2x_1 + x_2 - 10x_3 = 2 \\ -x_1 + 2x_2 = 1 \end{cases}$$

We schrijven de verhoogde coëfficiëntenmatrix:

$$\left(\begin{array}{ccc|c} 1 & -3 & 5 & 0 \\ 2 & 1 & -10 & 2 \\ -1 & 2 & 0 & 1 \end{array} \right)$$

We gebruiken elementaire rijomvormingen om de matrix in echelonvorm te brengen.

rij 2 - 2 rij 1 en rij 3 + rij 1

$$\left(\begin{array}{ccc|c} 1 & -3 & 5 & 0 \\ 0 & 7 & -20 & 2 \\ 0 & -1 & 5 & 1 \end{array} \right)$$

Verwissel rij 2 en rij 3

$$\left(\begin{array}{ccc|c} 1 & -3 & 5 & 0 \\ 0 & -1 & 5 & 1 \\ 0 & 7 & -20 & 2 \end{array} \right)$$

rij 3 + 7 rij 2

$$\left(\begin{array}{ccc|c} 1 & -3 & 5 & 0 \\ 0 & -1 & 5 & 1 \\ 0 & 0 & 15 & 9 \end{array} \right)$$

We lezen af op de matrix dat $\text{rang}(A) = \text{rang}(A | C)$ (het stelsel is oplosbaar) en $\text{rang}(A) = 3$, het aantal onbekenden. Het stelsel heeft dus juist één oplossing.

We lossen het stelsel van onder naar boven op:

$x_3 = \frac{9}{15} = \frac{3}{5}$, substitutie in de voorlaatste vergelijking geeft $-x_2 + 5\frac{3}{5} = 1$, dus $x_2 = 2$, substitutie in de eerste vergelijking geeft $x_1 - 6 + 3 = 0$, dus $x_1 = 3$.

Het stelsel heeft als oplossing $x_1 = 3, x_2 = 2, x_3 = \frac{3}{5}$

2.

$$\begin{cases} x_1 - 3x_2 + 5x_3 = 0 \\ 2x_1 + x_2 - 10x_3 = 2 \\ -3x_1 + 9x_2 - 15x_3 = 0 \end{cases}$$

We schrijven de verhoogde coëfficiëntenmatrix:

$$\left(\begin{array}{ccc|c} 1 & -3 & 5 & 0 \\ 2 & 1 & -10 & 2 \\ -3 & 9 & -15 & 0 \end{array} \right)$$

We gebruiken elementaire rijomvormingen om de matrix in echelonform te brengen.

rij 2 -2 rij 1 en rij 3 + 3 rij 1

$$\left(\begin{array}{ccc|c} 1 & -3 & 5 & 0 \\ 0 & 7 & -20 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right)$$

We lezen af dat $\text{rang}(A) = \text{rang}(A | C)$ (het stelsel is oplosbaar) en $\text{rang}(A) = 2$, dit is kleiner dan het aantal onbekenden. In deze situatie heeft het stelsel een oneindig aantal oplossingen.

We lossen de tweede vergelijking op naar x_2 waarbij we x_3 gelijk stellen aan een willekeurig te kiezen parameter $x_3 = \lambda \in \mathbb{R}$. Dit geeft $x_2 = \frac{2+20\lambda}{7}$. Substitutie van x_2 en x_3 in de eerste vergelijking geeft $x_1 = \frac{25\lambda+6}{7}$.

Aangezien x_1, x_2, x_3 telkens een andere oplossing geeft als men een andere waarde voor λ kiest heeft men hier inderdaad een oneindig aantal oplossingen.

Opmerkingen:

- We herhalen nog eens dat het niet noodzakelijk is dat het aantal vergelijkingen gelijk is aan het aantal onbekenden.
- Laten we een homogeen stelsel van vergelijkingen (een stelsel waarbij alle rechterleden nul zijn) beschouwen:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = 0 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n = 0 \end{array} \right.$$

Dergelijk stelsel is altijd oplosbaar want in dit geval geldt $\text{rang}(A) = \text{rang}(A | C)$
Het stelsel kan één of oneindig veel oplossingen hebben maar $x_1 = 0, x_2 = 0, \dots, x_n = 0$ is altijd een oplossing van een homogeen stelsel.

2.9 De regel van Cramer

Inleiding

We bekijken hier het speciale geval van een niet homogeen stelsel van lineaire vergelijkingen waarbij er evenveel vergelijkingen als onbekenden zijn.

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = c_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = c_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n = c_n \end{array} \right.$$

In matrixnotatie wordt dit

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \dots & \dots & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & & & \vdots \\ \vdots & & & & \vdots \\ \vdots & & & & \vdots \\ a_{n1} & \dots & \dots & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ c_n \end{pmatrix}$$

en met de verhoogde coëfficiëntenmatrix

$$(A | C) = \left(\begin{array}{ccccc|c} a_{11} & \dots & \dots & \dots & a_{1n} & c_1 \\ \vdots & & & & \vdots & \vdots \\ \vdots & & & & \vdots & \vdots \\ \vdots & & & & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & \dots & \dots & a_{nn} & c_n \end{array} \right)$$

Volgens de methode van Gauss heeft een dergelijk $n \times n$ stelsel juist één oplossing als en slechts als $\text{rang}(A) = n$ met n het aantal onbekenden.

Omdat A een vierkante $n \times n$ matrix is geldt

$$\text{rang}(A) = n \Leftrightarrow \det A \neq 0 \Leftrightarrow A \text{ is inverteerbaar}$$

De regel van Cramer is een manier om, onafhankelijk van de methode van Gauss, de unieke oplossing van een dergelijk $n \times n$ stelsel te vinden.

Pas op! De regel van Cramer is op geen enkele andere situatie toepasbaar...

De regel van Cramer

Stel dat je een niet homogeen stelsel van n lineaire vergelijkingen in n onbekenden x_1, \dots, x_n hebt waarbij de coëfficiëntenmatrix A regulier is.

In matrixnotatie wordt dit

$$AX = C \quad \text{met} \quad \det A \neq 0$$

Door de matrixvergelijking links te vermenigvuldigen met de inverse van A vinden we

$$A^{-1}AX = A^{-1}C$$

of

$$X = A^{-1}C$$

Dit kan je ook schrijven als

$$X = \frac{1}{\det A} \text{adj}(A)C$$

of

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \frac{1}{\det A} \begin{pmatrix} \text{cofactor}(a_{11}) & \text{cofactor}(a_{21}) & \dots & \dots & \text{cofactor}(a_{n1}) \\ \text{cofactor}(a_{12}) & & & & \vdots \\ \vdots & & & & \vdots \\ \vdots & & & & \vdots \\ \text{cofactor}(a_{1n}) & \dots & \dots & \dots & \text{cofactor}(a_{nn}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_n \end{pmatrix}$$

Dit geeft voor elke x_i met $i = 1 \dots n$ de volgende uitdrukking

$$x_i = \frac{1}{\det A} (c_1 \text{cofactor}(a_{1i}) + c_2 \text{cofactor}(a_{2i}) + \dots + c_n \text{cofactor}(a_{ni}))$$

ofwel

$$x_i = \frac{\det A_i}{\det A}$$

met $i = 1 \dots n$ en A_i de coëfficiëntenmatrix A waarin de i -de kolom vervangen is door de kolommatrix C .

Voorbeeld:

Neem het volgende stelsel van 3 vergelijkingen in 3 onbekenden:

$$\begin{cases} 2x_1 + 3x_3 = 1 \\ x_2 + x_3 = 4 \\ -x_1 + x_2 = 3 \end{cases}$$

We controleren of de coëfficiëntenmatrix $A = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 3 \\ 0 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$ regulier is.

$$\det \begin{pmatrix} 2 & 0 & 3 \\ 0 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 0 \end{pmatrix} = 1 \neq 0$$

Dus A is regulier, A^{-1} bestaat.

We berekenen de unieke oplossing van het stelsel:

$$x_1 = \frac{\det A_1}{\det A} = \det \begin{pmatrix} 1 & 0 & 3 \\ 4 & 1 & 1 \\ 3 & 1 & 0 \end{pmatrix} = 2$$

$$x_2 = \frac{\det A_2}{\det A} = \det \begin{pmatrix} 2 & 1 & 3 \\ 0 & 4 & 1 \\ -1 & 3 & 0 \end{pmatrix} = 5$$

$$x_3 = \frac{\det A_3}{\det A} = \det \begin{pmatrix} 2 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 4 \\ -1 & 1 & 3 \end{pmatrix} = -1$$

Module 6

Afgeleiden en integralen

0 Intro

Zie filmpje MOOC.

1 Afgeleiden

1.1 Inleidend voorbeeld

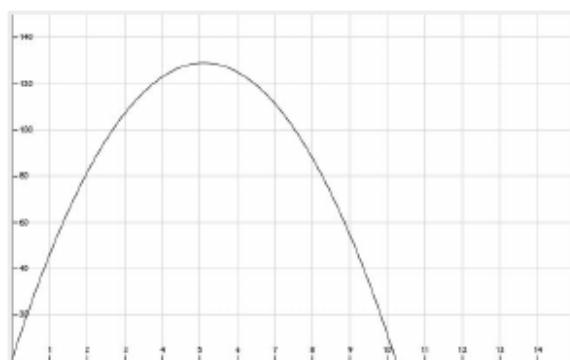
Zie filmpje MOOC.

1.2 Algemeenheden

Algemeenheden

In de algemene definities is $f(x)$ het voorschrift van een functie f en $a \in \text{dom}(f)$ zodat f continu is op een omgeving van a . Intuïtief betekent dit dat een open interval $I \subset \text{dom}(f)$ bestaat dat a bevat en zodat de grafiek van f boven het interval I geen "sprongen" vertoont.

Voorbeeld 1. In het inleidende voorbeeld is $f(x) = 1,5 + 50x - 4,9x^2$, $\text{dom}(f) = \mathbb{R}$ en $a = 2$. Deze functie is continu in 2. Je ziet hieronder de grafiek van de functie.



Naar analogie met dit inleidende voorbeeld introduceren we de volgende definitie.

Definitie Als de limietwaarde van $\frac{f(a+\Delta x)-f(a)}{\Delta x}$ voor $\Delta x = 0$ een reëel getal is dan heet dat reëel getal de afgeleide van f in a . In dat geval zeg je dat f afleidbaar is in a .

Notatie

Als $y = f(x)$ afleidbaar is in a dan zijn volgende notaties toegelaten om de afgeleide van f in a aan te duiden (zie Actimath cursus blz 4)

Voorbeeld 2. In het inleidend voorbeeld heb je voor de functie $f(x) = 1,5 + 50x - 4,9x^2$ gevonden dat deze afleidbaar is in 2 en voor de afgeleide in 2 heb je gevonden dat $Df(2) = 30,4$.

Vanuit het inleidende voorbeeld ken je een betekenis voor de afgeleide van een functie f in a .

De afgeleide van f in a is de snelheid waarmee de functiewaarde $f(x)$ verandert als x verandert vertrekende met de waarde $x = a$

De afgeleide heeft ook een belangrijke meetkundige betekenis.

De afgeleide van f in a is de richtingscoëfficiënt van de raaklijn aan de grafiek van f in het punt $P(a, f(a))$.

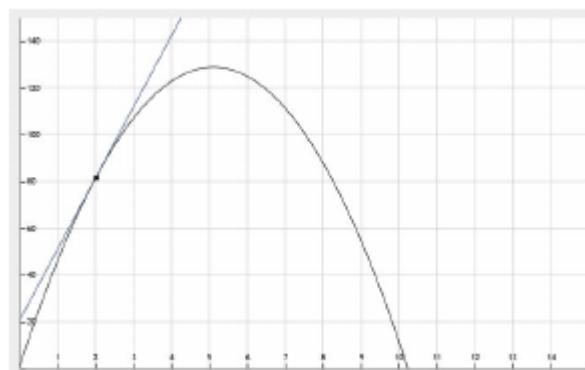
De verklaring hiervan zie je in het filmpje in de MOOC.

Voorbeeld 3. Voor de functie $f(x) = 1,5 + 50x - 4,9x^2$ uit het inleidend voorbeeld berekende je dat $Df(2) = 30,4$. Het punt op de grafiek bij $x = 2$ is het punt met coördinaten $P(2; 81,9)$. De vergelijking van de raaklijn aan de grafiek van f in P is

$$y - 81,9 = 30,4(x - 2)$$

of nog

$$y = 30,4x + 21,1$$



Definitie Als je a laat variëren in de punten waarin een functie f afleidbaar is dan verandert $Df(a)$ (meestal) ook. Je bekomt dan de afgeleide functie van f .

Notatie Voor het aanduiden van de afgeleide functie van een functie $y = f(x)$ mag je de volgende notaties gebruiken (actimath cursus blz 7).

1.3 Afgeleide raaklijn

Zie filmpje MOOC.

1.4 Afgeleiden van veeltermfuncties

Afgeleide van een constante functie

Voor $c \in \mathbb{R}$ is $y = c$ het voorschrijf van een constante functie. Intuïtief (afgeleide geeft snelheid aan waarmee een functiewaarde verandert) is $D(c) = 0$.

Via de definitie:

$$f(a) = c \text{ en } f(a + \Delta x) = c \text{ dus } \frac{y(a + \Delta x) - y(a)}{\Delta x} = \frac{c - c}{\Delta x} = 0$$

In de limiet als Δx nul wordt blijft dit 0. Je bekomt $D(c) = 0$.

Afgeleide van de identieke functie

Het voorschrijf $f(x) = x$ is het voorschrijf van de identieke functie. Waaraan is $D(x)$ gelijk?

Via de definitie:

$$f(a) = a \text{ en } f(a + \Delta x) = a + \Delta x \text{ dus } \frac{y(a + \Delta x) - y(a)}{\Delta x} = \frac{a + \Delta x - a}{\Delta x} = 1$$

In de limiet als als Δx nul wordt blijft dit 1. Je bekomt $D(x) = 1$.

Afgeleide van $y = x^2$

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

$$f(a) = a^2 \text{ en } f(a + \Delta x) = (a + \Delta x)^2 = a^2 + 2a\Delta x + \Delta x^2 \\ \text{dus } \frac{y(a + \Delta x) - y(a)}{\Delta x} = \frac{2a\Delta x + \Delta x^2}{\Delta x} = 2a + \Delta x.$$

In de limiet als Δx nul wordt dan bekom je $2a$. Je bekomt $Dy(a) = 2a$ en daarom $D(x^2) = 2x$.

Afgeleide van $y = x^n$

Algemeen geldt voor $n \in \mathbb{N}$ dat $D(x^n) = nx^{n-1}$.

Merk op, als $n = 0$ dan geeft dit $D(x^0) = 0x^{-1} = 0$. Omdat $x^0 = 1$ geeft dit $D(1) = 0$. Dat komt overeen met de afgeleide van een constante functie.

Afgeleiden van veeltermfuncties

Uit de afgeleide van $y = x^n$ met $n \in \mathbb{N}$ volgt dat je door middel van de volgende twee rekenregels van alle veeltermfuncties de afgeleide kunt berekenen.

Eigenschap 1 Afgeleide van een som :

$$D(f + g) = Df + Dg$$

Eigenschap 2 Afgeleide van een functie vermenigvuldigd met een constante : $D(cf) = cD(f)$

Voorbeeld 4.

$$\begin{aligned} D(5x^3 - 7x^2 + 18x - 9) \\ &= D(5x^3) + D(-7x^2) + D(18x) + D(9) \text{ (rekenregel som)} \\ &= 5D(x^3) - 7D(x^2) + 18D(x) + D(9) \text{ (rekenregel product met c)} \\ &= 5 \cdot 3x^2 - 7 \cdot 2x + 18 \cdot 1 + 0 \quad (D(x^n) = nx^{n-1}) \\ &= 15x^2 - 14x + 18 \end{aligned}$$

Voorbeeld 5. Bekijk terug de functie uit het beginvoorbeeld

$$f(x) = 1,5 + 50t - 4,9t^2$$

Met de rekenregels en afleiden van x^n bekom je

$$Df(x) = 50 - 9,8t$$

Merk op dat je door invullen vindt $Df(2) = 50 - 9,8 \cdot 2 = 30,4$. Dit is het resultaat dat we eerder gevonden hadden.

Uit de twee rekenregels volgt ook

Eigenschap 3 Afgeleide van een verschil

$$D(f - g) = Df - Dg$$

Eigenschap 4 De afgeleide $D(x^n) = nx^{n-1}$ geldt algemener voor alle $n \in \mathbb{R}$.

Voorbeeld 6. $D(\sqrt[5]{x}) = D(x^{1/5}) = \frac{1}{5}x^{-4/5} = \frac{1}{5x^{4/5}} = \frac{1}{5\sqrt[5]{x^4}}$

Voorbeeld 7. $D(\frac{1}{x^3}) = D(x^{-3}) = -3x^{-4} = -\frac{3}{x^4}$

Voorbeeld 8. $\begin{aligned} D(\sqrt[3]{x^2} - 5\sqrt{x^3}) &= D(\sqrt[3]{x^2}) - 5D(\sqrt{x^3}) \\ &= D(x^{2/3}) - 5D(x^{3/2}) \\ &= \frac{2}{3}x^{-1/3} - 5 \cdot \frac{3}{2}x^{1/2} = \frac{2}{3}\sqrt[3]{x} - \frac{15}{2}\sqrt{x} \end{aligned}$

1.5 Afgeleiden van veeltermfuncties - voorbeeld

Zie filmpje MOOC.

1.6 Basisafgeleiden en rekenregels

TODO

1.7 Basisafgeleiden en rekenregels - voorbeeld

Zie filmpje MOOC.

1.8 Enkele oefeningen

Je krijgt nog enkele oefeningen op het berekenen van afgeleiden. Als je de oefening opgelost hebt kun je nakijken of je de juiste oplossing gevonden hebt door de keuze "Wat is de oplossing?" te nemen. Als je vast loopt of niet weet hoe het komt dat je de juiste oplossing niet gevonden hebt dan kun je door de andere keuzes te maken zien hoe het verder moet of zien wat je fout gedaan hebt.

1. Bereken $D \left(5\sqrt[7]{x^{10}} + \frac{2}{\sqrt[4]{x^7}} - 9 \left(\frac{1}{\sqrt[3]{x}} \right)^5 \right)$

- Hoe schrijf je dit zodat je afgeleiden van machten van x moet uitrekenen?
Antwoord : $D \left(5x^{10/7} + 2x^{-7/4} - 9x^{-5/3} \right)$
- Wat is het resultaat van het toepassen van de regel voor het afleiden van machten ($D(x^a) = ax^{a-1}$)?
Antwoord : $5 \frac{10}{7} x^{3/7} + 2 \left(-\frac{7}{4} \right) x^{-11/4} - 9 \left(-\frac{5}{3} \right) x^{-8/3}$
- Wat is de oplossing?
Antwoord : $\frac{50}{7} \sqrt[7]{x^3} - \frac{7}{2 \sqrt[4]{x^{11}}} + \frac{15}{3 \sqrt[3]{x^8}}$

2. Bereken $D \left(3 \sqrt[5]{\frac{1}{1-2x^3}} + 4 \frac{1}{\sqrt[3]{x^2-3x+1}} - 9 \sqrt{(5x-7)^3} \right)$

- Hoe schrijf je dit zodat je afgeleiden van machten van veeltermen moet uitrekenen?
Antwoord : $D \left(3(1-2x^3)^{-1/5} + 4(x^2-3x+1)^{-1/3} - 9(5x-7)^{3/2} \right)$
- Wat bekom je als je die machten afleidt?
Antwoord : $3 \left(-\frac{1}{5} \right) (1-2x^3)^{-4/5} D(1-2x^3) + 4 \left(-\frac{1}{3} \right) (x^2-3x+1)^{-4/3} D(x^2-3x+1) - 9 \frac{3}{2} (5x-7)^{1/2} D(5x-7)$ (denk eraan dat je na het afleiden van de machten door het gebruik van de kettingregel die veeltermen nog moet afleiden).
- Wat bekom je als je die veeltermen nog afleidt?
Antwoord : $3 \left(-\frac{1}{5} \right) (1-2x^3)^{-4/5} (-6x^2) + 4 \left(-\frac{1}{3} \right) (x^2-3x+1)^{-4/3} (2x-3) - 9 \frac{3}{2} (5x-7)^{1/2} 5$
- Wat is de oplossing?
Antwoord : $\frac{18x^2}{5 \sqrt[5]{(1-2x^3)^4}} - \frac{8x-12}{3 \sqrt[3]{(x^2-3x+1)^4}} + \frac{135\sqrt{5x-7}}{2}$

3. Bereken $D \left(\sqrt[6]{\frac{1}{\sin^5 x}} \right)$

- Hoe schrijf je dit als een machtsverheffing die je moet afleiden?
 Antwoord : $D((\sin x)^{-5/6})$
- Wat bekom je als die macht afleidt?
 Antwoord : $-\frac{5}{6}(\sin x)^{-11/6}D(\sin x)$ (denk eraan dat je na het afleiden van de macht door het gebruik van de kettingregel de sinusfunctie nog moet afleiden).
- Wat bekom je nadat je ook de sinusfunctie nog afleidt?
 Antwoord : $-\frac{5}{6}(\sin x)^{-11/6}\cos x$
- Wat is de oplossing?
 Antwoord : $-\frac{5\cos x}{6\sqrt[6]{\sin^1}}$

4. $D\left(\cos\left(\frac{1}{\sqrt[3]{1+x^2}}\right)\right)$

- Welke functie moet je als eerste afleiden en wat bekom je dan?
 Antwoord : Je moet eerst de functie cos afleiden. Je bekomt dan

$$-\sin\left(\frac{1}{\sqrt[3]{1+x^2}}\right)D\left(\frac{1}{\sqrt[3]{1+x^2}}\right)$$

Denk er aan dat je na het afleiden van de cosinusfunctie vanwege de kettingregel de functie nog moet afleiden waarop de cosinus werkt.

- welke macht moet je vervolgens afleiden en wat bekom je dan?
 Antwoord : Omdat $\frac{1}{\sqrt[3]{1+x^2}} = (1+x^2)^{-1/3}$ moet je een macht $-1/3$ afleiden. Je bekomt

$$-\sin\left(\frac{1}{\sqrt[3]{1+x^2}}\right)\left(-\frac{1}{3}\right)(1+x^2)^{-4/3}D(1+x^2)$$

- Wat bekom je als je ook die veelterm afleidt?

Antwoord : $-\sin\left(\frac{1}{\sqrt[3]{1+x^2}}\right)\left(-\frac{1}{3}\right)(1+x^2)^{-4/3}2x$

- Wat is de oplossing?

Antwoord : $\frac{2x\sin\left(\frac{1}{\sqrt[3]{1+x^2}}\right)}{3\sqrt[3]{(1+x^2)^4}}$

5. $D\left(\frac{1}{1+e^{5x}}\right)$

- Wat bekom je na het gebruik van de rekenregel $D\left(\frac{1}{f(x)}\right) = -\frac{1}{f(x)^2}Df(x)$?
 Antwoord : $-\frac{1}{(1+e^{5x})^2}D(1+e^{5x})$
- Wat bekom je door het afleiden van de e-macht?
 Antwoord : $-\frac{1}{(1+e^{5x})^2}e^{5x}D(5x)$ (denk aan het gebruik van de kettingregel).
- Wat bekom je als afgeleide?
 Antwoord : $-\frac{1}{(1+e^{5x})^2}e^{5x}5$
- Wat is de oplossing?
 Antwoord : $-\frac{5e^{5x}}{(1+e^{5x})^2}$

6. $D(\cos(\tan(x^4)))$

- Wat bekom je nadat je de eerste keer de kettingregel gebruikt?
Antwoord : $-\sin(\tan(x^4))D(\tan(x^4))$
- Wat bekom je nadat je de tweede keer de kettingregel gebruikt?
Antwoord : $-\sin(\tan(x^4))\frac{1}{\cos^2(x^4)}D(x^4)$
- Wat bekom je nadat je de derde keer de kettingregel gebruikt?
Antwoord : $-\sin(\tan(x^4))\frac{1}{\cos^2(x^4)}4x^3$
- Wat is de oplossing?
Antwoord : $-\frac{4x^3 \sin(\tan(x^4))}{\cos^2(x^4)}$

7. $D\left(\sin\left(e^{\arctan(\frac{1}{x})}\right)\right)$

- Wat bekom je nadat je de eerste keer de kettingregel toepast?
Antwoord : $\cos\left(e^{\arctan(\frac{1}{x})}\right)D\left(e^{\arctan(\frac{1}{x})}\right)$
- Wat bekom je nadat je de tweede keer de kettingregel toepast?
Antwoord : $\cos\left(e^{\arctan(\frac{1}{x})}\right)e^{\arctan(\frac{1}{x})}D\left(\arctan(\frac{1}{x})\right)$
- Wat bekom je nadat je de derde keer de kettingregel toepast?
Antwoord : $\cos\left(e^{\arctan(\frac{1}{x})}\right)e^{\arctan(\frac{1}{x})}\frac{1}{1+(\frac{1}{x})^2}D\left(\frac{1}{x}\right)$
- Wat bekom je nadat je de vierde keer de kettingregel toepast?
Antwoord : $\cos\left(e^{\arctan(\frac{1}{x})}\right)e^{\arctan(\frac{1}{x})}\frac{1}{1+(\frac{1}{x})^2}\left(-\frac{1}{x^2}\right)$
- Wat is de oplossing?
Antwoord: $-\frac{\cos\left(e^{\arctan(\frac{1}{x})}\right)e^{\arctan(\frac{1}{x})}}{1+x^2}$

8. $D(\sin(x^3)e^{5x})$

- Wat bekom je door het toepassen van de rekenregel van de afgeleide van een product ($D(uv) = uDv + vDu$)?
Antwoord : $\sin(x^3)D(e^{5x}) + e^{5x}D(\sin(x^3))$
- Wat bekom je als je op de twee afgeleiden de kettingregel toepast?
Antwoord : $\sin(x^3)e^{5x}D(5x) + e^{5x}\cos(x^3)D(x^3)$
- Wat is de oplossing?
Antwoord : $5\sin(x^3)e^{5x} + 3x^2e^{5x}\cos(x^3)$

9. $D(\arcsin(7x)\log_5(1+9x))$

- Wat bekom je door het toepassen van de rekenregel van de afgeleide van een product?
Antwoord : $\arcsin(7x)D(\log_5(1+9x)) + \log_5(1+9x)D(\arcsin(7x))$

- Wat bekom je als je op de twee afgeleiden de kettingregel toepast?

Antwoord : $\arcsin(7x) \frac{\ln 5}{1+9x} D(1+9x) + \log_5(1+9x) \frac{1}{\sqrt{1-(7x)^2}} D(1+7x)$

- Wat is de oplossing?

Antwoord : $\frac{9(\ln 5) \arcsin(7x)}{1+9x} + \frac{7 \log_5(1+9x)}{\sqrt{1-49x^2}}$

10. $D \left(\frac{\arctan(x^3)}{\cos(4x-1)} \right)$

- Wat bekom je door het toepassen van de rekenregel van de afgeleide van een deling ($D\left(\frac{u}{v}\right) = \frac{vDu - uDv}{v^2}$)?

Antwoord : $\frac{\cos(4x-1)D(\arctan(x^3)) - \arctan(x^3)D(\cos(4x-1))}{\cos^2(4x-1)}$

- Wat bekom je als je op de twee afgeleiden de kettingregel toepast?

Antwoord : $\frac{\cos(4x-1) \frac{1}{1+x^6} D(x^3) - \arctan(x^3)(-\sin(4x-1))D(4x-1)}{\cos^2(4x-1)}$

- Wat is de oplossing?

Antwoord : $\frac{3x^2 \cos(4x-1) + 4(1+x^6) \arctan(x^3) \sin(4x-1)}{(1+x^6) \cos^2(4x-1)}$

11. $D \left(\frac{\sin(x^5)}{\cos^5(x)} \right)$

- Wat bekom je door het toepassen van de rekenregel van de afgeleide van een deling?

Antwoord : $\frac{\cos^5(x)D(\sin(x^5)) - \sin(x^5)D(\cos^5(x))}{\cos^{10}(x)}$

- Wat bekom je als je op de twee afgeleiden de kettingregel toepast?

Antwoord : $\frac{\cos^5(x) \cos(x^5) D(x^5) - \sin(x^5) 5 \cos^4(x) D(\cos(x))}{\cos^{10}(x)}$

- Wat is de oplossing?

Antwoord : $\frac{5x^4 \cos^5(x) \cos(x^5) + \sin(x^5) 5 \cos^4(x) \sin(x)}{\cos^{10}(x)}$

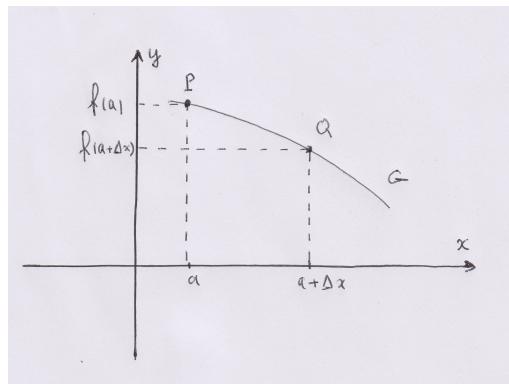
1.9 Afgeleide en verloop van een functie

Je weet dat $Df(a)$ aangeeft met welke snelheid functiewaarden veranderen als x vanuit $x = a$ verandert. Als $Df(a) < 0$ dan is dat met een negatieve snelheid. Wat betekent dat?

Dit betekent dat de functiewaarde $f(x)$ afneemt als je start met $x = a$ en dan x laat toenemen. Dit komt overeen met de volgende figuur.

In zulk geval heet de functie f dalend in a .

Op dezelfde manier bekom je dat als $Df(a) > 0$ dan is de functie stijgend in a . Je bekomt de volgende verbanden tussen Df en het verloop van f .



Eigenschap 5 Als de eerste afgeleide $f'(x) > 0$ is in een interval, dan zal de functie in dat interval **stijgen**.

Als de eerste afgeleide $f'(x) < 0$ is in een interval, dan zal de functie in dat interval **dalen**.

De functie zal een **relatief of lokaal extremum (maximum of minimum)** bereiken waar de kromme overgaat van een stijgende naar een dalende functie of omgekeerd. Dit gebeurt wanneer de eerste afgeleide van teken verandert.

Een functie $f(x)$ heeft in het punt (x_0, y_0) een extremum (relatief minimum of relatief maximum) als in dat punt aan volgende voorwaarden voldaan zijn: $f'(x_0) = 0$ en $f''(x_0) \neq 0$. Voor $f''(x_0) > 0$ is het extremum een lokaal minimum.

Voor $f''(x_0) < 0$ is het extremum een lokaal maximum.

Voorbeeld 9.

$$\begin{aligned}f(x) &= x^3 - 3x^2 \\f'(x) &= 3x^2 - 6x \\f''(x) &= 6x - 6\end{aligned}$$

Zie ook figuur .1. Voor welke waarden van x is de afgeleide gelijk aan 0? Stel dat $f'(x) = 0$, dus

$$3x^2 - 6x = 0,$$

maar aangezien $3x^2 - 6x = 3x(x - 2)$ moet dan gelden dat

$$3x = 0 \text{ of } x - 2 = 0$$

dus

$$x = 0 \text{ of } x = 2$$

zodat meteen volgt dat enkel $f'(0) = 0$ en $f'(2) = 0$.

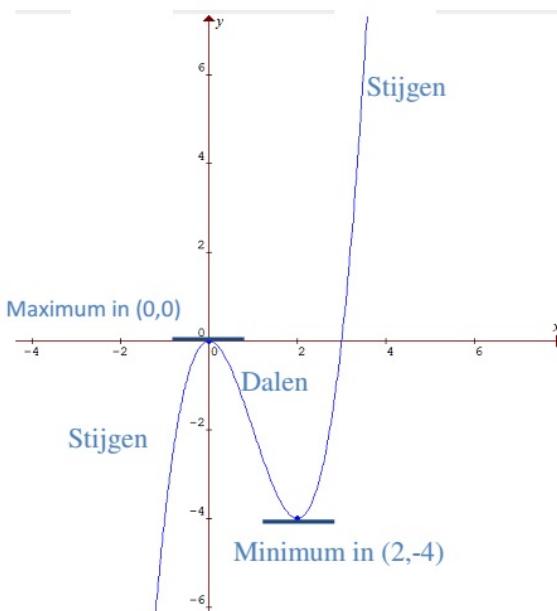
Om de y -coördinaat van de bijhorende punten te vinden, berekenen we de functiewaarden van f in 0 en 2. We vinden

$$\begin{aligned}f(0) &= (0)^3 - 3.(0)^2 = 0 \\f(2) &= (2)^3 - 3.(2)^2 = 8 - 12 = -4\end{aligned}$$

De functie bezit in die punten $(0, 0)$ en $(2, -4)$ dus een horizontale raaklijn. Zijn de punten ook extrema? Aangezien $f''(0) = -6 < 0$ is het punt $(0, 0)$ een lokaal maximum. Verder is $f''(2) = 6 > 0$ en dus is $(2, -4)$ een lokaal minimum.

Aangezien de eerste afgeleide een tweedegraadsfunctie is, zullen we het tekenverloop van de tweedegraadsfunctie toepassen.

x	0	2
$f'(x)$	+	-
$f(x)$	$\uparrow \frac{0}{\text{max}}$	$\downarrow \frac{-4}{\text{min}}$



Figuur .1: Voorbeeld verloop van een functie

1.10 Test afgeleiden

TODO

2 Integralen

2.1 Inleidend voorbeeld

Zie filmpje MOOC.

2.2 Primitieve functies en onbepaalde integralen

Beschouw een reële functie van één reëel veranderijke, bijvoorbeeld de functie:

$$F(x) = x^3 - 3x^2 + x - 1.$$

Deze functie heeft als afgeleide:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} = 3x^2 - 6x + 1.$$

Men zegt dat $F(x)$ een **stamfunctie** of een **primitieve functie** is van $f(x)$.

Definitie Een primitieve functie $F(x)$ van een functie $f(x)$ is een willekeurige functie die als afgeleide naar x $f(x)$ heeft:

$$F'(x) = DF(x) = f(x)$$

Het zoeken naar een primitieve functie van een functie is eigenlijk het omgekeerde van afleiden.

$F(x)$ is niet de enige functie die als afgeleide $f(x)$ heeft.

De functies:

$$\begin{aligned} F(x) &= x^3 - 4x^2 + x - 1 \\ F(x) &= x^3 - 4x^2 + x + 3 \\ F(x) &= x^3 - 4x^2 + x - 2 \end{aligned}$$

Hebben allen als afgeleide:

$$f(x) = 3x^2 - 8x + 1$$

Functies die slechts een constante van elkaar verschillen, hebben immers allen dezelfde afgeleide. Omgekeerd kan men ook aantonen dat functies die dezelfde afgeleide hebben op een interval I een constant verschil op dat interval I hebben.

Definitie De verzameling van alle primitieve functies van $f(x)$ noemt men de onbepaalde integraal van $f(x)$. Als $F(x)$ een primitieve functie van $f(x)$ is dan schrijft men:

$$\int f(x)dx = F(x) + C$$

Terminologie:

\int	Het integraalteken
$f(x)$	De integrand (de te integreren functie)
dx	De differentiaal van de integratieveranderlike
C	De integratieconstante

2.3 Stelling van Newton Leibniz

Zie filmpje MOOC.

2.4 Bijzondere onbepaalde integralen

Iedere afgeleide van een bijzondere functie geeft aanleiding tot een bijzondere onbepaalde integraal.

Voorbeeld 10. Omdat $D(\sin x) = \cos x$ is $\int \cos x dx = \sin x + C$.

Voorbeeld 11. Omdat $Dx^n = nx^{n-1}$ is $\int nx^{n-1} dx = x^n + C$.

Als je dit wat herwerkt bekom je $D\left(\frac{x^{m+1}}{m+1}\right) = x^m$ en dus $\int x^m dx = \frac{x^{m+1}}{m+1} + C$. Deze onbepaalde integraal geldt voor alle $m \neq -1$. Die laatste voorwaarde komt door de noemer $m + 1$ die niet 0 mag zijn.

Voorbeeld 12. Omdat $D(\ln|x|) = \frac{1}{x}$ is $\int \frac{dx}{x} = \ln|x| + C$. Vanwege $\frac{1}{x} = x^{-1}$ staat hier ook een uitkomst voor $\int x^m dx$ als $m = -1$, namelijk $\int x^{-1} dx = \ln|x| + C$.

Op deze wijze ontstaat de volgende lijst van bijzondere onbepaalde integralen.

Rekenregels

$$\int dx = x + C$$

$$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} + C \quad (n \neq -1)$$

$$\int \frac{dx}{x} = \ln|x| + C$$

$$\int e^x dx = e^x + C$$

$$\int a^x dx = \frac{a^x}{\ln a} + C$$

$$\int \sin x dx = -\cos x + C$$

$$\int \cos x dx = \sin x + C$$

$$\int \frac{1}{\cos^2 x} dx = \tan x + C$$

$$\int \frac{1}{\sin^2 x} dx = -\cot x + C$$

$$\int \sec^2 x dx = \int \frac{1}{\cos^2 x} dx = \tan x + C$$

$$\int \csc^2 x dx = \int \frac{1}{\sin^2 x} dx = -\cot x + C$$

$$\int \frac{dx}{1+x^2} = \arctan x + C$$

$$\int \frac{dx}{a^2+x^2} = \frac{1}{a} \arctan \frac{x}{a} + C$$

$$\int \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}} = \arcsin x + C$$

$$\int \frac{dx}{\sqrt{a^2-x^2}} = \arcsin \frac{x}{a} + C$$

2.5 Eenvoudige rekenregels

Uit $D(f+g) = Df + Dg$ bekom je

Eigenschap 6 Onbepaalde integraal van een som :

$$\int (f(x) + g(x)) dx = \int f(x) dx + \int g(x) dx$$

Uit $D(cf) = cDf$ (c is een getal) bekom je

Eigenschap 7 *Onbepaalde integraal van een functie vermenigvuldigd met een constante :*

$$\int cf(x)dx = c \int f(x)dx$$

Met behulp van deze eigenschappen kun je alle integralen van veeltermfuncties uitrekenen.

Voorbeeld 13.

$$\begin{aligned}
 \int (7x^3 - 4x^2 + 9x + 13)dx &= \int 7x^3 dx + \int -4x^2 dx + \int 9x dx + \int 13 dx \quad (\text{rekenregel som}) \\
 &= 7 \int x^3 dx - 4 \int x^2 dx + 9 \int x dx + 13 \int dx \quad (\text{rekenregel product met } c) \\
 &= \frac{7x^4}{4} - \frac{4x^3}{3} + \frac{9x^2}{2} + 13x + C \quad (\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} + C)
 \end{aligned}$$

Voorbeeld 14.

$$\begin{aligned}
 \int (x+2)^2 dx &= \int (x^2 + 4x + 4) dx \\
 &= \int x^2 dx + 4 \int x dx + 4 \int dx \\
 &= \frac{x^3}{3} + 4 \frac{x^2}{2} + 4x + C \\
 &= \frac{x^3}{3} + 2x^2 + 4x + C
 \end{aligned}$$

Algemener kun je onbepaalde integralen uitrekenen van de vorm zoals in het volgende voorbeeld.

Voorbeeld 15.

$$\begin{aligned}
 \int (7\sqrt[3]{x^5} + \frac{2}{\sqrt[5]{x}} - \frac{3}{x})dx &= \int (7x^{5/3} + 2x^{-1/5} - \frac{3}{x})dx \\
 &= 7 \int x^{5/3} dx + 2 \int x^{-1/5} dx - 3 \int \frac{dx}{x} \\
 &= \frac{7x^{8/3}}{8/3} + \frac{2x^{4/5}}{4/5} - 3 \ln|x| + C \\
 &= \frac{21\sqrt[3]{x^8}}{8} + \frac{5\sqrt[5]{x^4}}{2} - 3 \ln|x| + C
 \end{aligned}$$

Sommige sommen zie je direct zoals in volgend voorbeeld

Voorbeeld 16.

$$\begin{aligned}
 \int (3 \sin x + 5 \cos x) dx &= 3 \int \sin x dx + 5 \int \cos x dx \\
 &= 3(-\cos x) + 5 \sin x + C \\
 &\quad - 3 \cos x + 5 \sin x + C
 \end{aligned}$$

Andere sommen zie je niet zo direct zoals in volgend voorbeeld

Voorbeeld 17.

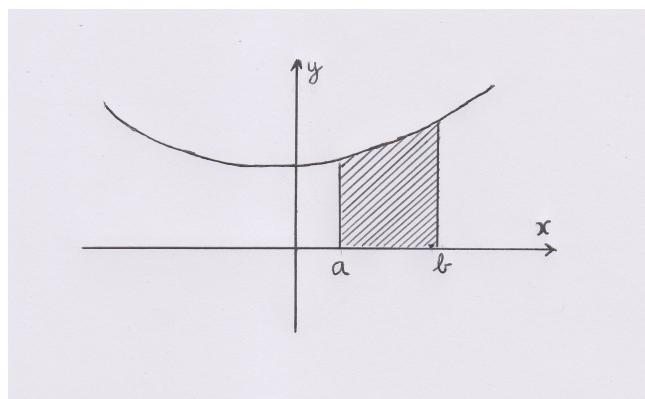
$$\begin{aligned}
 & \int \tan^2 x dx \\
 &= \int \frac{\sin^2 x}{\cos^2 x} dx \\
 &= \int \frac{1 - \cos^2 x}{\cos^2 x} dx \quad (\text{hoofdformule van goniometrie}) \\
 &= \int \left(\frac{1}{\cos^2 x} - 1 \right) dx \\
 &= \int \frac{1}{\cos^2 x} dx - \int dx \\
 &= \tan x - x + C
 \end{aligned}$$

2.6 Eenvoudige rekenregels - voorbeeld

Zie filmpje MOOC.

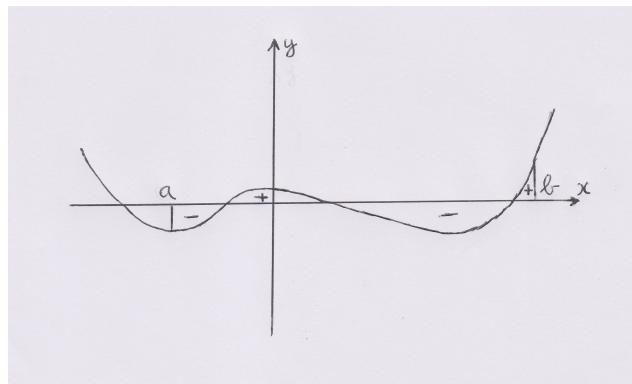
2.7 De bepaalde integraal

Voor een functie f continu en positief op een interval I en a, b binnen I met $a < b$ noteren we $\int_a^b f(x)dx$ voor de oppervlakte van het vlakdeel begrensd door de x -as, de grafiek van f en de verticale rechten $x = a$ en $y = b$. (Je ziet die oppervlakte gearceerd in Figuur .2.)



Figuur .2: Bepaalde integralen: de oppervlakte onder de curve berekenen.

Algemener, als f continu is op een interval I en a, b binnen I met $a < b$ dan is $\int_a^b f(x)dx$ gedefinieerd als de som van de oppervlakten tussen de x -as en de grafiek waar de functie f positief is minus de som van de oppervlakten tussen de x -as en de grafiek waar de functie f negatief is. Een + op de volgende Figuur .3 duidt een oppervlakte aan die positief meetelt en een - duidt een oppervlakte aan die negatief meetelt.



Figuur .3: Bepaalde integralen: oppervlakten die positief en negatief meetellen.

Nog algemener, als f continu is op een interval I en a en b binnen I dan is $\int_a^b f(x)dx$

reeds gedefinieerd als $a < b$

$-\int_b^a f(x)dx$ als $a > b$

0 als $a = b$.

Je noemt $\int_a^b f(x)dx$ de bepaalde integraal van de functie f van a naar b .

Dank zij de volgende eigenschap kun je bepaalde integralen uitrekenen door middel van onbepaalde integralen.

Eigenschap 8 Als f een continue functie is op een interval I en F is een primitieve functie van f dan geldt voor elementen a en b van I dat

$$\int_a^b f(x)dx = F(b) - F(a)$$

Vorige eigenschap is een gevolg van de belangrijke stelling van Newton-Leibnitz die volgend verband geeft tussen afgeleiden en bepaalde integralen.

Eigenschap 9 Als f een functie is continu op een interval I en a is een element van I dan voldoet de functie $F(x) = \int_a^x f(t)dt$ aan $DF(x) = f(x)$ voor alle x in I .

Deze stelling van Newton-Leibnitz wordt aan de hand van een filmpje getoond in een voorbeeld.

2.8 De bepaalde integraal - voorbeeld

Zie filmpje MOOC.

2.9 Berekenen van bepaalde integralen

Uit het voorgaande weten we dat uit $\int f(x)dx = F(x) + C$ volgt dat $\int_a^b f(x)dx = F(b) - F(a)$ (onder voorwaarde dat f continu is op een interval dat a en b bevat).

Hierbij maakt men vaak gebruik van de voorstellingswijze:

$$\int_a^b f(x) dx = [F(x)]_a^b = F(b) - F(a)$$

Voorbeeld 18.

$$\begin{aligned}\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin x dx &= [-\cos x]_{x=0}^{x=\frac{\pi}{2}} = -\cos \frac{\pi}{2} - \cos 0 = 0 + 1 = 1 \\ \int_1^3 2x^2 dx &= 2 \int_1^3 x^2 dx = [\frac{2x^3}{3}]_{x=1}^{x=3} = \frac{2 \cdot 27}{3} - \frac{2 \cdot 1}{3} = 18 - \frac{2}{3} = \frac{52}{3} \\ \int_{-3}^2 e^x dx &= [e^x]_{x=-3}^{x=2} = e^2 - e^{-3} \approx 7.339...\end{aligned}$$

Opmerking Bij berekening van de bepaalde integraal, noteer je de onbepaalde integraal tussen vierkante haken. Aan de rechterkant schrijf je onderaan de ondergrens en bovenaan de boven-grens. De integratieconstante C noteer je niet bij de berekening van de bepaalde integraal.

Eigenschap 10 *Bepaalde integraal van een som*

$$\int_a^b (f(x) + g(x)) dx = \int_a^b f(x) dx + \int_a^b g(x) dx$$

Eigenschap 11 *Bepaalde integraal van een functie vermenigvuldigd met een getal*

$$\int_a^b c \cdot f(x) dx = c \int_a^b f(x) dx$$

Eigenschap 12 *Opsplitsing van grenzen van een bepaalde integraal*

$$\int_a^b f(x) dx = \int_a^c f(x) dx + \int_c^b f(x) dx$$

Uit de definitie volgen ook nog de volgende twee rekenregels:

$$\int_a^a f(x) dx = 0$$

$$\int_a^b f(x) dx = - \int_b^a f(x) dx$$

Voorbeeld 19.

$$\begin{aligned}
 \int_1^5 [4 - (x - 3)^2] dx &= \int_1^5 4 dx - \int_1^5 (x - 3)^2 dx \\
 &= 4 \int_1^5 dx - \int_1^5 (x^2 - 6x + 9) dx \\
 &= 4 \int_1^5 dx - \int_1^5 x^2 dx + 6 \int_1^5 x dx - 9 \int_1^5 dx \\
 &= 4[x]_{x=1}^{x=5} - [\frac{x^3}{3}]_{x=1}^{x=5} + 6[\frac{x^2}{2}]_{x=1}^{x=5} - 9[x]_{x=1}^{x=5} \\
 &= 20 - 4 - \frac{125}{3} + \frac{1}{3} + 75 - 3 - 45 + 9 \\
 &= 52 - \frac{124}{3} \\
 &= \frac{156}{3} - \frac{124}{3} \\
 &= \frac{32}{3}
 \end{aligned}$$

2.10 Oppervlakte berekenen met bepaalde integralen - voorbeeld

Zie filmpje MOOC.

2.11 Oppervlakte berekenen met bepaalde integralen

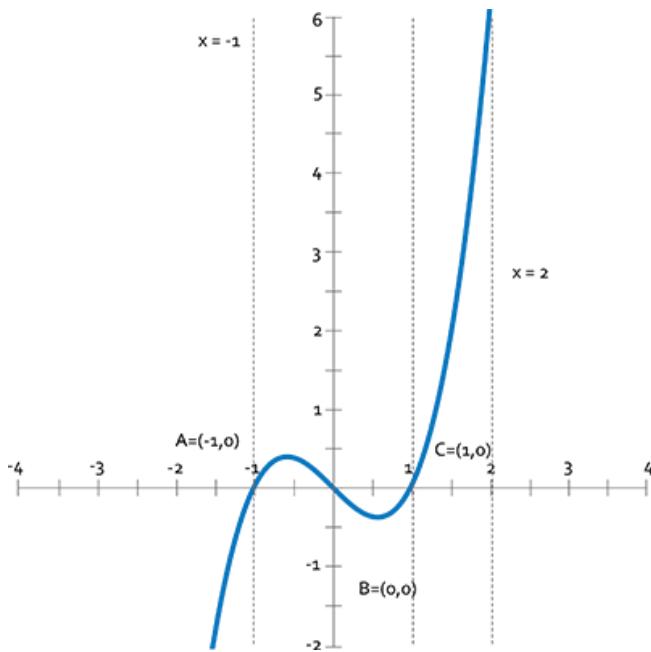
Voorbeeld 20. Bereken de oppervlakte begrensd door $y = x^3 - x$, $x = -1$, $x = 2$ en de x -as, zie Figuur 4.

Tekenonderzoek van de functie:

$$y = x^3 - x = x(x^2 - 1) = x(x - 1)(x + 1)$$

De nulwaarden zijn dus 0, -1 en 1. Het tekenverloop is

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



Figuur .4: Illustratie voorbeeld berekenen van bepaalde integralen.

$$\begin{aligned}
 S &= \int_{-1}^2 |x^3 - x| dx = \int_{-1}^0 (x^3 - x) dx - \int_0^1 (x^3 - x) dx - \int_1^2 (x^3 - x) dx \\
 &= [\frac{x^4}{4} - \frac{x^2}{2}]_{-1}^0 - [\frac{x^4}{4} - \frac{x^2}{2}]_0^1 + [\frac{x^4}{4} - \frac{x^2}{2}]_1^2 \\
 &= 0 - (\frac{1}{4} - \frac{1}{2}) - (\frac{1}{4} - \frac{1}{2}) + 0 + (4 - 2) - (\frac{1}{4} - \frac{1}{2}) \\
 &= \frac{1}{4} + \frac{1}{4} + 2 + \frac{1}{4} \\
 &= \frac{11}{4}
 \end{aligned}$$

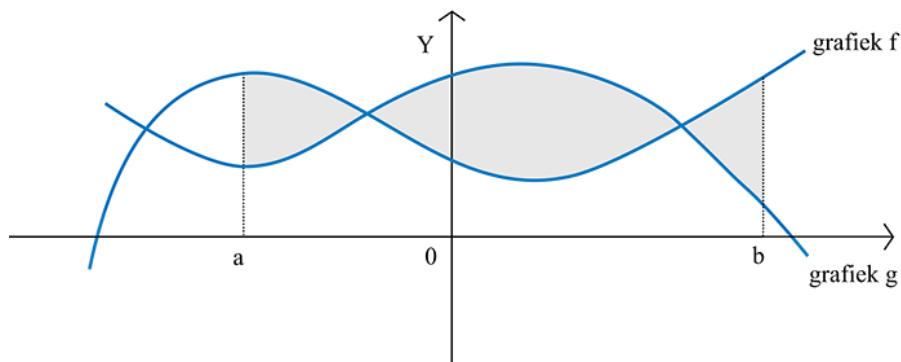
Algemener, stel dat f en g twee functies zijn die allebei continu zijn op een interval I . Stel dat a en b tot I behoren met $a < b$. Op Figuur ?? is de gearceerde oppervlakte de oppervlakte begrensd door de grafieken van $f(x)$ en $g(x)$ en de verticale rechten $x = a$ en $x = b$.

Deze oppervlakte bereken je met de volgende bepaalde integraal

$$\int_a^b |g(x) - f(x)| dx$$

Methodes:

- Maak een schets.
- Bepaal de grenzen van het interval welke het gebied begrenzen. Wanneer je de oppervlakte van het gebied bepaald door twee krommen wil berekenen, zoek je de snijpunten van de krommen.



Figuur .5: Berekenen van de oppervlakte tussen de grafieken van $f(x)$ en $g(x)$.

- Duid door middel van een rechthoekje een infinitesimaal klein deeltje aan. Duid op de figuur de breedte en de hoogte van het rechthoekje aan.
- Maak de som van de "deelintegralen". Elke deelintegraal stelt een oppervlakte voor en moet positief zijn.
- Oppervlakte gebied begrensd door $y = f(x)$ en $y = g(x)$:

$$S = \int_{x_2}^{x_1} |f(x) - g(x)| dx$$

Voorbeeld 21. Bereken de oppervlakte tussen de rechte $y = x$ en de parabool $y = x^2$.

$y = x$: stijgende rechte door de oorsprong = 1^{ste} bissectrice.

$y = x^2$: dalparabool met top in de oorsprong en de y -as als symmetrieas.

Om de krommen te kunnen schetsen zoek je best nog enkele punten die voldoen aan de vergelijking. De punten vind je hier door in de vergelijking willekeurige -waarden in te vullen en de bijhorende -coördinaat te berekenen.

Hierboven zie je de grafiek van beide functies. De oppervlakte die we wensen te berekenen is de oppervlakte tussen de twee krommen. De verticale strookjes zullen dus moeten vertrekken van het eerste snijpunt en moeten stoppen bij het tweede snijpunt. Dit zijn de onder- en bovengrenzen van de integraal.

De hoogte van het strookje is $x - x^2$, de breedte is dx , de oppervlakte van het rechthoekje is dan: We bepalen nu de grenzen van de integraal: dit zijn de x -waarden van de snijpunten van de parabool en de rechte, waar tussen de verticale strookjes gelegen zijn.

Om deze snijpunten te vinden, lossen we de volgende vergelijking op:

$$x = x^2 \iff x - x^2 = 0 \iff x(1 - x) = 0$$

De x -waarden van de snijpunten zijn dus: $x = 0$ en $x = 1$. De oppervlakte van het gebied tussen de parabool en de rechte vinden we dan door de volgende integraal:

$$\int_0^1 (x - x^2) dx = \left[\frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{3} \right]_{x=0}^{x=1} = \frac{1}{2} - \frac{1}{3} = \frac{1}{6}$$

2.12 Test integralen

TODO

3 Substitutie en partiële integratie

3.1 Onbepaalde integraal en de kettingregel voor het afleiden

Zie filmpje MOOC.

3.2 Differentialen en de substitutiemethode

Voor een functie $y = f(x)$ en $a \in \text{dom } f$ is $Df(a)$ de richtingscoëfficiënt van de raaklijn T aan de grafiek G van f in $P(a, f(a))$. De vergelijking van de raaklijn is dan

$$y - f(a) = Df(a).(x - a) .$$

Het punt op die raaklijn dat behoort bij $x = a$ voldoet aan $y = f(a)$ en is dus $P(a; f(a))$ (wat logisch is). Als je bij die x -waarden Δx bijtelt dan vul je $x = a + \Delta x$ in. Je bekomt dan de volgende waarde van y op de raaklijn:

$$y - f(a) = Df(a).(a + \Delta x - a) = Df(a).\Delta x$$

$$y = f(a) + Df(a).\Delta x .$$

De verandering van de y -waarde op de raaklijn is dan

$$\Delta y = Df(a).\Delta x .$$

Hierdoor wordt Δy een functie in Δx en je noemt deze functie de differentiaal van f in a . Je noteert $df(a)$ voor deze functie, dus

$$df(a) = Df(a).\Delta x .$$

Neem je als bijzonder geval $f(x) = x$ dan is $Df(a) = 1$ en dus $df(a) = \Delta x$. Deze functie in Δx noem je de differentiaal van x en je schrijft dx . Je bekomt dus

$$dx = \Delta x .$$

Daarom schrijft men ook

Definitie

$$df(a) = Df(a).dx .$$

Opmerking Let wel op: het gaat hier over twee functies in de veranderlijke Δx die een veelvoud zijn van elkaar.

Als je de oorspronkelijke functie noteert als $y = f(x)$ dan schrijf je ook $dy(a)$ in plaats van $df(a)$. Je bekomt dan

$$dy(a) = Df(a).dx .$$

Vervang je a door een willekeurig getal x dan schrijf je

$$dy = Df(x).dx .$$

Een onbepaalde integraal van een functie $y = f(x)$ genoteerd $\int f(x)dx$ kun je ook opvatten als een onbepaalde integraal van de differentiaal $f(x)dx$.

Uit de kettingregel voor het afleiden vinden we

$$\int Dg(f(x))Df(x) = g(f(x)) + C .$$

Stel nu $u = f(x)$, dan is $du = Df(x)dx$ en dan bekom je

$$\int Dg(f(x))Df(x) = \int Dg(u)du .$$

Per definitie is $\int Dg(u)du = g(u) + C$ en door u terug in te vullen vind je

Definitie

$$\int Dg(f(x))Df(x)dx = \int Dg(u)du = g(u) + C = g(f(x)) + C .$$

Omdat je in deze redenering $f(x)$ vervangt (substitutie) door een variabele u noem je dit de methode van substitutie. Het is gewoon een handige werkwijze om de kettingregel van het afleiden te gebruiken voor het berekenen van een onbepaalde integraal.

We hermaken nu de twee laatste voorbeelden uit vorig deel.

Voorbeelden

Voorbeeld 22. $\int \sqrt[3]{x+7}dx$

Stel $u = x + 7$, dan is $du = D(x + 7)dx = dx$. Je bekomt

$$\begin{aligned} \int \sqrt[3]{x+7}dx &= \int \sqrt[3]{u}du = \int u^{1/3}du = \\ &= \frac{u^{4/3}}{4/3} + C = \frac{3u^{4/3}}{4} + C = \frac{3\sqrt[3]{(x+7)^4}}{4} + C . \end{aligned}$$

Voorbeeld 23. Een iets moeilijker voorbeeld dat aantoont dat je niet steeds dx moet vervangen: $\int \frac{xdx}{x^2+1}$. (Dit lijkt mij geschikt om door middel van een filmpje te geven.)

Stel $u = x^2 + 1$ dan is $du = 2xdx$ en dus $xdx = \frac{du}{2}$. Je bekomt

$$\begin{aligned} \int \frac{xdx}{x^2+1} &= \int \frac{du/2}{u} = \frac{1}{2} \int \frac{du}{u} \\ &= \frac{1}{2} \ln |u| + C = \frac{1}{2} \ln (x^2 + 1) + C = \ln (\sqrt{x^2 + 1}) + C . \end{aligned}$$

3.3 Differentialen en de substitutiemethode - voorbeeld

Zie filmpje MOOC.

3.4 Voorbeelden van de substitutiemethode

Je leest nog enkele voorbeelden op het berekenen van integralen door middel van substitutie.

Voorbeeld 24. $\int e^{5x} dx$

Stel je $u = 5x$ dan is $du = 5dx$.

Je vervangt dan dx door $\frac{du}{5}$ en je bekomt

$$\int e^{5x} dx = \int e^u \frac{du}{5} = \frac{1}{5} \int e^u du = \frac{1}{5} e^u + C = \frac{1}{5} e^{5x} + C .$$

Voorbeeld 25. $\int \frac{dx}{1+9x^2}$

Deze integraal lijkt sterk op $\int \frac{dt}{1+t^2} = \arctan t + C$.

Stel $u = 3x$, dan is $du = \frac{du}{3}$ en je bekomt

$$\begin{aligned} \int \frac{dx}{1+9x^2} &= \int \frac{1}{1+u^2} \frac{du}{3} = \frac{1}{3} \int \frac{du}{1+u^2} = \\ &= \frac{1}{3} \arctan u + C = \frac{1}{3} \arctan(3x) + C . \end{aligned}$$

Voorbeeld 26. $\int \frac{x dx}{\sqrt{16-x^4}}$

Als je substitutie $u = 16 - x^4$ overweegt dan bekom je $du = -4x^3 dx$. In de teller staat enkel x .

De teller suggereert daarom eerder $u = x^2$ te gebruiken.

Omdat je $\int \frac{dt}{\sqrt{1-t^2}} = \arcsin t + C$ kent schrijf je

$$16 - x^4 = 16 \left(1 - \frac{x^4}{16}\right) = 16 \left(1 - \left(\frac{x^2}{4}\right)^2\right) .$$

De integraal die je moet oplossen is dus

$$\int \frac{x dx}{\sqrt{16-x^4}} = \int \frac{x dx}{\sqrt{16 \left(1 - \left(\frac{x^2}{4}\right)^2\right)}} = \frac{1}{4} \int \frac{x dx}{\sqrt{1 - \left(\frac{x^2}{4}\right)^2}} .$$

Stel $u = \frac{x^2}{4}$, dan is $du = \frac{x dx}{2}$ en dus $x dx = 2du$. De integraal wordt $\frac{1}{4} \int \frac{2du}{\sqrt{1-u^2}}$, dus

$$\int \frac{x dx}{\sqrt{16-x^4}} = \frac{1}{2} \int \frac{du}{\sqrt{1-u^2}} = \frac{1}{2} \arcsin u + C = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{x^2}{4}\right) + C .$$

Voorbeeld 27. $\int \frac{(\arctan x)^3 dx}{1+x^2}$

Stel $u = \arctan x$. Dan is $du = \frac{dx}{1+x^2}$ en je bekomt

$$\int \frac{(\arctan x)^3 dx}{1+x^2} = \int u^3 du = \frac{u^4}{4} + C = \frac{(\arctan x)^4}{4} + C .$$

Je merkt dat de juiste keuze maken bij substitutie wel wat oefenen vergt.

3.5 Substitutie bij bepaalde integralen

Stel dat je $\int_a^b f(x)dx$ moet berekenen en dat je $\int f(x)dx$ kunt berekenen door middel van substitutie. Als je eerst de onbepaalde integraal volledig uitrekent en daarna de grenzen invult, dan is er geen enkel probleem. Je kunt ook in de bepaalde integraal zelf substitutie toepassen. Je moet dan wel de grenzen aanpassen.

Voorbeeld 28. $\int_0^4 \sqrt{2x+1} dx$

Je lost eerst de onbepaalde integraal $\int \sqrt{2x+1} dx$ op. Je stelt $t = 2x + 1$ dus $dt = 2dx$ en je bekomt $\int \sqrt{2x+1} dx = \frac{1}{2} \int \sqrt{t} dt = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3/2} t^{3/2} + C = \frac{1}{3} \sqrt{(2x+1)^3} + C$. Hieruit vind je

$$\int_0^4 \sqrt{2x+1} dx = \frac{1}{3} \sqrt{(2x+1)^3} \Big|_0^4 = \frac{1}{3} (\sqrt{9^3} - \sqrt{1^3}) = \frac{26}{3}.$$

Let op: $\int_0^4 \sqrt{2x+1} dx \neq \frac{1}{2} \int_0^4 \sqrt{t} dt$ immers $\int_0^4 \sqrt{t} dt = \frac{3}{2} \sqrt{t^3} \Big|_0^4 = \frac{3}{2} (\sqrt{4^3} - \sqrt{0^3}) = 12$ en $\frac{1}{2} 12 = 8 \neq \frac{26}{3}$.

De volgende redenering is wel goed om $\int_0^4 \sqrt{2x+1} dx$ te berekenen. Stel $t = 2x + 1$ dan is $dt = 2dx$ en $t = 1$ als $x = 0$ en $t = 9$ als $x = 4$. Je bekomt

$$\int_0^4 \sqrt{2x+1} dx = \frac{1}{2} \int_1^9 \sqrt{t} dt = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3/2} \sqrt{t^3} \Big|_1^9 = \frac{1}{3} (\sqrt{9^3} - \sqrt{1^3}) = \frac{26}{3}.$$

In deze laatste berekening pas je de grenzen bij de substitutie aan.

3.6 Substitutie bij bepaalde integralen - voorbeeld

Zie filmpje MOOC.

3.7 Oefeningen op de substitutiemethode

Je krijgt nog enkele oefeningen op het integreren door middel van substitutie.

1. $\int \frac{dx}{\sqrt[5]{1-4x}}$

- Welke substitutie?

Antwoord: $u = 1 - 4x$

- Welke integraal bekom je dan?

Antwoord: Uit $du = -4dx$ volgt $dx = -\frac{du}{4}$. Je bekomt

$$\int \frac{dx}{\sqrt[5]{1-4x}} = -\frac{1}{4} \int \frac{du}{\sqrt[5]{u}}$$

- Hoe bekom je daaruit de oplossing?

Antwoord:

$$-\frac{1}{4} \int \frac{du}{\sqrt[5]{u}} = -\frac{1}{4} \int u^{-1/5} du = -\frac{1}{4} \frac{u^{4/5}}{4/5} + C = -\frac{5}{16} \sqrt[5]{1-4x} + C$$

- Wat is de oplossing?

$$-\frac{5}{16}\sqrt[5]{1-4x} + C$$

2. $\int \frac{dx}{2x-9}$

- Welke substitutie?
Antwoord: $u = 2x - 9$
- Welke integraal bekom je dan?
Antwoord: Uit $du = 2dx$ bekom je $dx = \frac{du}{2}$. Je bekomt

$$\int \frac{dx}{2x-9} = \frac{1}{2} \int \frac{du}{u}$$

- Hoe bekom je daaruit de oplossing?

Antwoord:

$$\frac{1}{2} \int \frac{du}{u} = \frac{1}{2} \ln|u| + C = \frac{1}{2} \ln|2x-9| + C$$

- Wat is de oplossing?

$$\frac{1}{2} \ln|2x-9| + C$$

3. $\int \frac{x^3 dx}{\sqrt{x^2+2}}$

- Welke substitutie?
Antwoord: $t = x^2 + 2$
- Welke integraal bekom je dan?
Antwoord: $x^3 dx = \frac{1}{2}x^2 \cdot 2x dx$

Omdat $t = x^2 + 2$ is $x^2 = t - 2$ en $dt = 2x dx$. Daardoor gaat $x^3 dx$ vervangen worden door $\frac{1}{2}(t-2)dt$.

Bovendien wordt $\sqrt{x^2+2}$ vervangen door \sqrt{t} en je bekomt

$$\int \frac{x^3 dx}{\sqrt{x^2+2}} = \frac{1}{2} \int \frac{t-2}{\sqrt{t}} dt$$

- Hoe bekom je daaruit de oplossing?

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \int \frac{t-2}{\sqrt{t}} dt &= \frac{1}{2} \int \frac{t}{\sqrt{t}} dt - \frac{1}{2} \int \frac{2}{\sqrt{t}} dt = \\ &= \frac{1}{2} \int t^{1/2} dt - \int t^{-1/2} dt = \frac{k1}{2} \frac{t^{3/2}}{3/2} - \frac{t^{1/2}}{1/2} + C = \frac{1}{3} \sqrt{(x^2+1)^3} - 2\sqrt{x^2+1} + C \end{aligned}$$

- Wat is de oplossing?

$$\frac{1}{3} \sqrt{(x^2+1)^3} - 2\sqrt{x^2+1} + C$$

3.8 Test integraalrekening - substitutiemethode

TODO

3.9 Onbepaalde integralen en de productregel voor het afleiden

Zie filmpje MOOC.

3.10 Methode van partiële integratie

De productregel voor het afleiden is

$$D(f(x)g(x)) = Df(x).g(x) + f(x).Dg(x) .$$

Je kunt dit ook schrijven als

$$f(x)Dg(x) = D(f(x)g(x)) - g(x)Df(x) .$$

Omdat per definitie $\int D(f(x)g(x))dx = f(x)g(x) + C$ bekom je hieruit

$$\boxed{\int f(x)Dg(x)dx = f(x)g(x) - \int g(x)Df(x)dx}$$

We noteren dit met differentiaLEN. We stellen $u = f(x)$ en $v = g(x)$ zodat $du = Df(x)dx$ en $dv = Dg(x)dx$. Je bekomt dan

$$\boxed{\int u dv = uv - \int v du}$$

Voorbeeld 29. Nog een voorbeeld: $\int xe^x dx$.

Stel $u = x$ en $dv = e^x dx$. Je vindt v uit $\int e^x dx = e^x + C$, dus $v = e^x$. Er geldt $du = dx$. Je bekomt

$$\int xe^x dx = xe^x - \int e^x dx = xe^x - e^x + C .$$

Het is belangrijk goed na te denken over de keuze van u en v . Voor het oplossen van $\int x \sin x dx$ zou je ook volgende keuze kunnen maken:

Stel $u = \sin x$ en $dv = x dx$. Uit $dv = x dx$ en $\int x dx = \frac{x^2}{2} + C$ bekom je $v = \frac{x^2}{2}$. Uit $u = \sin x$ bekom je $du = \cos x dx$. Je bekomt

$$\int x \sin x dx = \frac{x^2}{2} \sin x - \int \frac{x^2}{2} \cos x dx .$$

Dit is correct, maar je moet $\int x \sin x dx$ vinden en je probeert dat te doen met $\int x^2 \cos x dx$. Deze laatste integraal is door de factor x^2 in plaats van de factor x moeilijker dan de integraal die je wil oplossen. Dit komt omdat je een verkeerde keuze maakt van u en van v . Je moet u afleiden en v vind je door te integreren. Dit moet er voor zorgen dat de integraal die je daarna nog moet uitrekenen er eenvoudiger uitziet dan de oorspronkelijke integraal.

Voorbeeld 30. $\int x^2 \ln x dx$.

Als je x^2 gaat afleiden dan wordt dit $2x$; dit is eenvoudiger. Je moet dan wel $\ln x$ integreren maar je kent $\int \ln x dx$ mogelijk nog niet.

Als je x^2 gaat integreren dan wordt dit $\frac{x^3}{3}$; dit is moeilijker. Maar je moet dan $\ln x$ afleiden en $D(\ln x) = \frac{1}{x}$. Dit is veel eenvoudiger.

Daaruit volgt dat de laatste keuze toch de meest geschikte is.

$$u = \ln x \text{ en dus } du = \frac{dx}{x}.$$

$$dv = x^2 dx \text{ en dus } v = \frac{x^3}{3}.$$

Hieruit bekom je

$$\begin{aligned}\int x^2 \ln x dx &= \frac{x^3}{3} \ln x - \int \frac{x^3}{3} \frac{1}{x} dx = \\ &= \frac{x^3}{3} \ln x - \frac{1}{3} \int x^2 dx = \frac{x^3}{3} \ln x - \frac{x^3}{9} + C.\end{aligned}$$

3.11 Methode van partiële integratie - voorbeeld 1

Zie filmpje MOOC.

3.12 Methode van partiële integratie - voorbeeld 2

Zie filmpje MOOC.

3.13 Voorbeelden

Welke types van integralen kun je oplossen door gebruik te maken van partiële integratie?

Rekenregels

Types:

$$\int x^n \sin(ax) dx$$

$$\int x^n \cos(ax) dx$$

$$\int x^n e^{ax} dx \text{ met } n \in \mathbb{N} \text{ en } a \in \mathbb{R}.$$

Je neemt $u = x^n$ en $dv = \sin(ax) dx$; $dv = \cos(ax) dx$; $dv = e^{ax} dx$.

Voorbeeld 31. $\int x^2 \cos\left(\frac{2x}{5}\right) dx.$

Neem $u = x^2$ en $dv = \cos\left(\frac{2x}{5}\right) dx$. Dan is $du = 2x dx$ en uit $\int \cos\left(\frac{2x}{5}\right) dx = \frac{5}{2} \sin\left(\frac{2x}{5}\right) + C$ vind je dat je $v = \frac{5}{2} \sin\left(\frac{2x}{5}\right)$ kunt nemen. Je bekomt

$$\int x^2 \cos\left(\frac{2x}{5}\right) dx = \frac{5}{2} x^2 \sin\left(\frac{2x}{5}\right) - 5 \int x \sin\left(\frac{2x}{5}\right) dx .$$

Je past op de bekomen integraal opnieuw partiële integratie toe. Je stelt $u = x$ en $dv = \sin\left(\frac{2x}{5}\right) dx$. Je bekomt $du = dx$ en uit $\int \sin\left(\frac{2x}{5}\right) dx = -\frac{5}{2} \cos\left(\frac{2x}{5}\right) + C$ bekom je dat je $v = -\frac{5}{2} \cos\left(\frac{2x}{5}\right)$ kunt nemen. Je bekomt

$$\int x \sin\left(\frac{2x}{5}\right) dx = -\frac{5}{2} x \cos\left(\frac{2x}{5}\right) + \frac{5}{2} \int \cos\left(\frac{2x}{5}\right) dx = -\frac{5}{2} x \cos\left(\frac{2x}{5}\right) + \frac{25}{4} \sin\left(\frac{2x}{5}\right) + C .$$

Voor de op te lossen integraal bekom je

$$\begin{aligned} \int x^2 \cos\left(\frac{2x}{5}\right) dx &= \frac{5}{2} x^2 \sin\left(\frac{2x}{5}\right) - 5 \left(-\frac{5}{2} x \cos\left(\frac{2x}{5}\right) + \frac{25}{4} \sin\left(\frac{2x}{5}\right) \right) + C = \\ &= \frac{5}{2} x^2 \sin\left(\frac{2x}{5}\right) + \frac{25}{2} x \cos\left(\frac{2x}{5}\right) - \frac{125}{4} \sin\left(\frac{2x}{5}\right) + C . \end{aligned}$$

Types:

$$\int x^n \ln(x) dx$$

$$\int x^n \arcsin(ax) dx$$

$\int x^n \arctan(ax) dx$ met $n \in \mathbb{N}$ en $a \in \mathbb{R}$ (bij de integraal met \ln mag $n \in \mathbb{R}$).

Je neemt $u = \ln(x)$; $u = \arcsin(ax)$; $u = \arctan(ax)$ en $dv = x^n dx$. Je bekomt weliswaar $u = \frac{x^{n+1}}{n+1}$ maar omdat $dv = \frac{dx}{x}$; $dv = \frac{adx}{\sqrt{1-a^2x^2}}$; $dv = \frac{adx}{1+a^2x^2}$ bekom je daarna de integraal uit een eenvoudiger functie die je mogelijk kunt oplossen.

Voorbeeld 32. $\int x^2 \arctan(5x) dx.$

Neem $u = \arctan(5x)$ en dus $du = \frac{5dx}{1+25x^2}$ en $dv = x^2 dx$ en dus $v = \frac{x^3}{3}$. Je bekomt

$$\int x^2 \arctan(5x) dx = \frac{x^3 \arctan(5x)}{3} - \frac{5}{3} \int \frac{x^3 dx}{1+25x^2} .$$

In de laatste integraal gebruik je substitutie $t = 1 + 25x^2$. Dan is $dt = 50x dx$ en $x^2 = \frac{t-1}{25}$. Je bekomt

$$\begin{aligned} \int \frac{x^3 dx}{1+25x^2} &= \frac{1}{50} \int \frac{x^2}{1+25x^2} 50x dx = \frac{1}{50} \int \frac{(t-1)/25}{t} dt = \\ &= \frac{1}{1250} \int \left(1 - \frac{1}{t}\right) dt = \frac{1}{1250} (t - \ln|t|) + C = \frac{1}{1250} (1 + 25x^2 - \ln(1 + 25x^2)) + C . \end{aligned}$$

Voor de op te lossen integraal kom je

$$\int x^2 \arctan(5x) dx = \frac{x^3 \arctan(5x)}{3} - \frac{5}{3750} (1 + 25x^2 - \ln(1 + 25x^2)) + C .$$

Voorbeeld 33. $\int \arcsin x dx$

Neem $u = \arcsin x$ dus $du = \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}}$ en $dv = dx$ dus $v = x$. Je komt

$$\int \arcsin x dx = x \arcsin x - \int \frac{x dx}{\sqrt{1-x^2}} .$$

In deze laatste integraal gebruik je substitutie $t = 1 - x^2$. Dan is $dt = -2x dx$ en je komt

$$\int \frac{x dx}{\sqrt{1-x^2}} = -\frac{1}{2} \int \frac{dt}{\sqrt{t}} = -\frac{1}{2} \frac{\sqrt{t}}{1/2} + C = -\sqrt{t} + C = -\sqrt{1-x^2} + C .$$

Voor de op te lossen integraal kom je

$$\int \arcsin x dx = x \arcsin x - (-\sqrt{1-x^2}) + C = x \arcsin x + \sqrt{1-x^2} + C .$$

Types:

$\int \sin(ax)e^{bx} dx$ met $a, b \in \mathbb{R}$ (en in plaats van sin dan er ook cos staan).

Door tweemaal na elkaar dezelfde rollen voor u en v te gebruiken kom je de som van een functie en een getal vermenigvuldigd met de te zoeken integraal. Hieruit vind je de te zoeken integraal door het oplossen van een vergelijking.

Voorbeeld 34. $\int e^{3x} \cos(5x) dx$

Stel $u = e^{3x}$ en $dv = \cos(5x) dx$. Je komt $du = 3e^{3x} dx$ en uit $\int \cos(5x) dx = \frac{1}{5} \sin(5x) + C$ vind je dat je $v = \frac{1}{5} \sin(5x)$ kunt nemen. Je komt

$$\int e^{3x} \cos(5x) dx = \frac{1}{5} \sin(5x) e^{3x} - \frac{3}{5} \int \sin(5x) e^{3x} dx .$$

Stel in de nieuwe integraal opnieuw $u = e^{3x}$ en $dv = \sin(5x) dx$. Je komt $du = 3e^{3x} dx$ en uit $\int \sin(5x) dx = -\frac{\cos(5x)}{5} + C$ vind je dat je $v = -\frac{\cos(5x)}{5}$ kunt nemen. Je komt

$$\int \sin(5x) e^{3x} dx = -\frac{\cos(5x) e^{3x}}{5} + \frac{3}{5} \int e^{3x} \cos(5x) dx .$$

Voor de op te lossen integraal kom je dan

$$\int e^{3x} \cos(5x) dx = \frac{1}{5} \sin(5x) e^{3x} - \frac{3}{5} \left(-\frac{\cos(5x) e^{3x}}{5} + \frac{3}{5} \int e^{3x} \cos(5x) dx \right) =$$

$$= \frac{1}{5} \sin(5x)e^{3x} + \frac{3}{25} \cos(5x)e^{3x} - \frac{9}{25} \int e^{3x} \cos(5x)dx .$$

Breng je de laatste integraal over naar het linkerlid dan bekom je

$$\left(1 + \frac{9}{25}\right) \int e^{3x} \cos(5x)dx = \left(\frac{1}{5} \sin(5x) + \frac{3}{25} \cos(5x)\right) e^{3x} + C .$$

Hieruit vind je

$$\int e^{3x} \cos(5x)dx = \frac{25}{34} \left(\frac{1}{5} \sin(5x) + \frac{3}{25} \cos(5x)\right) e^{3x} + C .$$

3.14 Oefeningen

Je krijgt nog enkele oefeningen op het berekenen van integralen door middel van partiële integratie.

1. Bereken $\int x^3 e^{-5x} dx$

- Wat neem je voor u en wat neem je voor dv als je partiële integratie $\int u dv = uv - \int v du$ gebruikt?

Antwoord : Neem $u = x^3$ en $dv = e^{-5x} dx$.

- Wat zijn dan du en v ?

Antwoord : $du = 3x^2 dx$ en uit $\int e^{-5x} dx = -\frac{e^{-5x}}{5} + C$ vind je dat je $v = -\frac{e^{-5x}}{5}$ kunt nemen.

- Wat bekom je als resultaat van deze partiële integratie?

Antwoord : $\int x^3 e^{-5x} dx = -\frac{x^3 e^{-5x}}{5} + \frac{3}{5} \int x^2 e^{-5x} dx$

- Wat bekom je als je op die nieuwe integraal dezelfde soort van partiële integratie toepast?

Antwoord : Je stelt $u = x^2$ en dus $du = 2x dx$ en opnieuw $dv = e^{-5x} dx$ en dus $v = -\frac{e^{-5x}}{5}$. Je bekomt $\int x^2 e^{-5x} dx = -\frac{x^2 e^{-5x}}{5} + \frac{2}{5} \int x e^{-5x} dx$

- Wat bekom je als je op die nieuwe integraal nogmaals partiële integratie toepast?

Antwoord : $\int x e^{-5x} dx = -\frac{x e^{-5x}}{5} + \frac{1}{5} \int e^{-5x} dx = -\frac{x e^{-5x}}{5} - \frac{1}{25} e^{-5x} + C$

- Wat bekom je voor de integraal die je moet oplossen?

Antwoord : $\int x^3 e^{-5x} dx = -\frac{x^3 e^{-5x}}{5} + \frac{3}{5} \left(-\frac{x^2 e^{-5x}}{5} + \frac{2}{5} \left(-\frac{x e^{-5x}}{5} - \frac{1}{25} e^{-5x} + C\right)\right) + C$

- Wat is de oplossing?

Antwoord : $\int x^3 e^{-5x} dx = \left(-\frac{x^3}{5} - \frac{3x^2}{25} - \frac{6x}{125} - \frac{6}{625}\right) e^{-5x} + C$

2. Bereken $\int \sqrt[3]{x^5} \ln x dx$

- Wat neem je voor u en wat neem je voor dv als je partiële integratie $\int u dv = uv - \int v du$ gebruikt?

Antwoord : Neem $u = \ln x$ en $dv = \sqrt[3]{x^5} dx$.

- Wat zijn dan du en v ?
Antwoord : $du = \frac{dx}{x}$ en uit $\int \sqrt[3]{x^5} dx = \int x^{5/3} dx = \frac{x^{8/3}}{8/3} + C$ bekom je dat je kan nemen $v = \frac{3x^{8/3}}{8}$.
- Wat bekom je als resultaat van deze partiële integratie?
Antwoord : $\int \sqrt[3]{x^5} \ln x dx = \frac{3x^{8/3}}{8} \ln x - \frac{3}{8} \int x^{8/3} \frac{1}{x} dx$
- Wat bekom je als oplossing van die nieuwe integraal?
Antwoord : $\int x^{8/3} \frac{1}{x} dx = \int x^{5/3} dx = \frac{x^{8/3}}{8/3} + C = \frac{3x^{8/3}}{8} + C$
- Wat bekom je voor de integraal die je moet oplossen?
Antwoord : $\int \sqrt[3]{x^5} \ln x dx = \frac{3x^{8/3}}{8} \ln x - \frac{3}{8} \left(\frac{3x^{8/3}}{8} \right) + C$
- Wat is de oplossing?
Antwoord : $\int \sqrt[3]{x^5} \ln x dx = \frac{3}{8} \sqrt[3]{x^8} \left(\ln x - \frac{3}{8} \right) + C$

3. Bereken $\int e^{-x/2} \sin\left(\frac{x}{3}\right) dx$

- Wat neem je voor u en wat neem je voor dv als je partiële integratie $\int u dv = uv - \int v du$ gebruikt?
Antwoord : Neem $u = e^{-x/2}$ en $dv = \sin\left(\frac{x}{3}\right) dx$ (je mag ook $u = \sin\left(\frac{x}{3}\right)$ en $dv = e^{-x/2} dx$ nemen).
- Wat zijn dan du en v ?
Antwoord : $du = -\frac{e^{-x/2}}{2} dx$ en uit $\int \sin\left(\frac{x}{3}\right) dx = -3 \cos\left(\frac{x}{3}\right) + C$ vind je dat je $v = -3 \cos\left(\frac{x}{3}\right)$ kan nemen.
- Wat bekom je als resultaat van deze partiële integratie?
Antwoord : $\int e^{-x/2} \sin\left(\frac{x}{3}\right) dx = -3e^{-x/2} \cos\left(\frac{x}{3}\right) - \frac{3}{2} \int e^{-x/2} \cos\left(\frac{x}{3}\right) dx$
- Wat bekom je als je op die nieuwe integraal dezelfde soort van partiële integratie toepast?
Antwoord: Je neemt opnieuw $u = e^{-x/2}$ en dus $du = -\frac{e^{-x/2}}{2} dx$ en $dv = \cos\left(\frac{x}{3}\right) dx$ waaruit je bekomt $v = 3 \sin\left(\frac{x}{3}\right)$. Je bekomt $\int e^{-x/2} \cos\left(\frac{x}{3}\right) dx = 3e^{-x/2} \sin\left(\frac{x}{3}\right) + \frac{3}{2} \int e^{-x/2} \sin\left(\frac{x}{3}\right) dx$.
- Wat bekom je voor de integraal die je moet oplossen?
Antwoord: $\int e^{-x/2} \sin\left(\frac{x}{3}\right) dx = -3e^{-x/2} \cos\left(\frac{x}{3}\right) - \frac{3}{2} (3e^{-x/2} \sin\left(\frac{x}{3}\right) + \frac{3}{2} \int e^{-x/2} \sin\left(\frac{x}{3}\right) dx)$
- Wat bekom je als je de integraal in het rechterlid mee naar het linkerlid brengt?
Antwoord : $(1 + \frac{9}{4}) \int e^{-x/2} \sin\left(\frac{x}{3}\right) dx = -3e^{-x/2} \cos\left(\frac{x}{3}\right) - \frac{9}{2} e^{-x/2} \sin\left(\frac{x}{3}\right) + C$
- Wat is de oplossing?
Antwoord: $\int e^{-x/2} \sin\left(\frac{x}{3}\right) dx = \frac{4}{13} e^{-x/2} (-3 \cos\left(\frac{x}{3}\right) - \frac{9}{2} \sin\left(\frac{x}{3}\right)) + C$

3.15 Partiële integratie bij bepaalde integralen

Je kunt partiële integratie onmiddellijk toepassen bij bepaalde integralen zoals in volgend voorbeeld.

$$\begin{aligned}\int_1^e \ln x dx &= x \cdot \ln x \Big|_1^e - \int_1^e x d(\ln x) = x \cdot \ln x \Big|_1^e - \int_1^e dx = (x \cdot \ln x - x) \Big|_1^e = \\ &= e \cdot \ln e - e - (1 \cdot \ln 1 - 1) = 1.\end{aligned}$$

Denk er aan dat je ook in het deel vu van de regel $\int u dv = uv + \int v du$ de grenzen moet invullen. Als je dat vergeet dan bekom je als uitkomst van een bepaalde integraal immers een functievoorschrift terwijl het resultaat van een bepaalde integraal een getal moet zijn.

3.16 Test integraalrekening - partiële integratie

TODO



Oplossingen van de oefeningen zonder *



Oplossingen van alle oefeningen

We kunnen (en willen) er niet rond: wiskunde speelt een sleutelrol in veel opleidingen. Bij een groot aantal vakken vormt wiskunde vaak de taal om complexe fenomenen te omschrijven. Ben je wat bezorgd over je parate wiskunde kennis? Dan is deze Massive Open Online Course (MOOC) Basiswiskunde voor (startende) studenten zeker iets voor jou.

Deze MOOC is een online leeromgeving waarmee je zelfstandig je wiskundekennis kan opfrissen of bijspijkeren. Deelname is volledig gratis.

Je neemt op eigen tempo verschillende modules rond een wiskundig thema door. Een module neemt ongeveer 3 uur in beslag en bestaat uit verschillende onderdelen. Elk onderdeel bestaat uit theorie, video's en voorbeeldoefeningen. Na elke module kun je een test afleggen om te zien of je alles onder de knie hebt.

Voor wie?

Studenten in de laatste jaren van het secundair onderwijs die zich willen voorbereiden op het hoger onderwijs, professionele bachelor studenten die eraan denken om te schakelen, eerstejaarsstudenten die nog wat extra oefening willen.

www.iiw.kuleuven.be/mooc-wiskunde