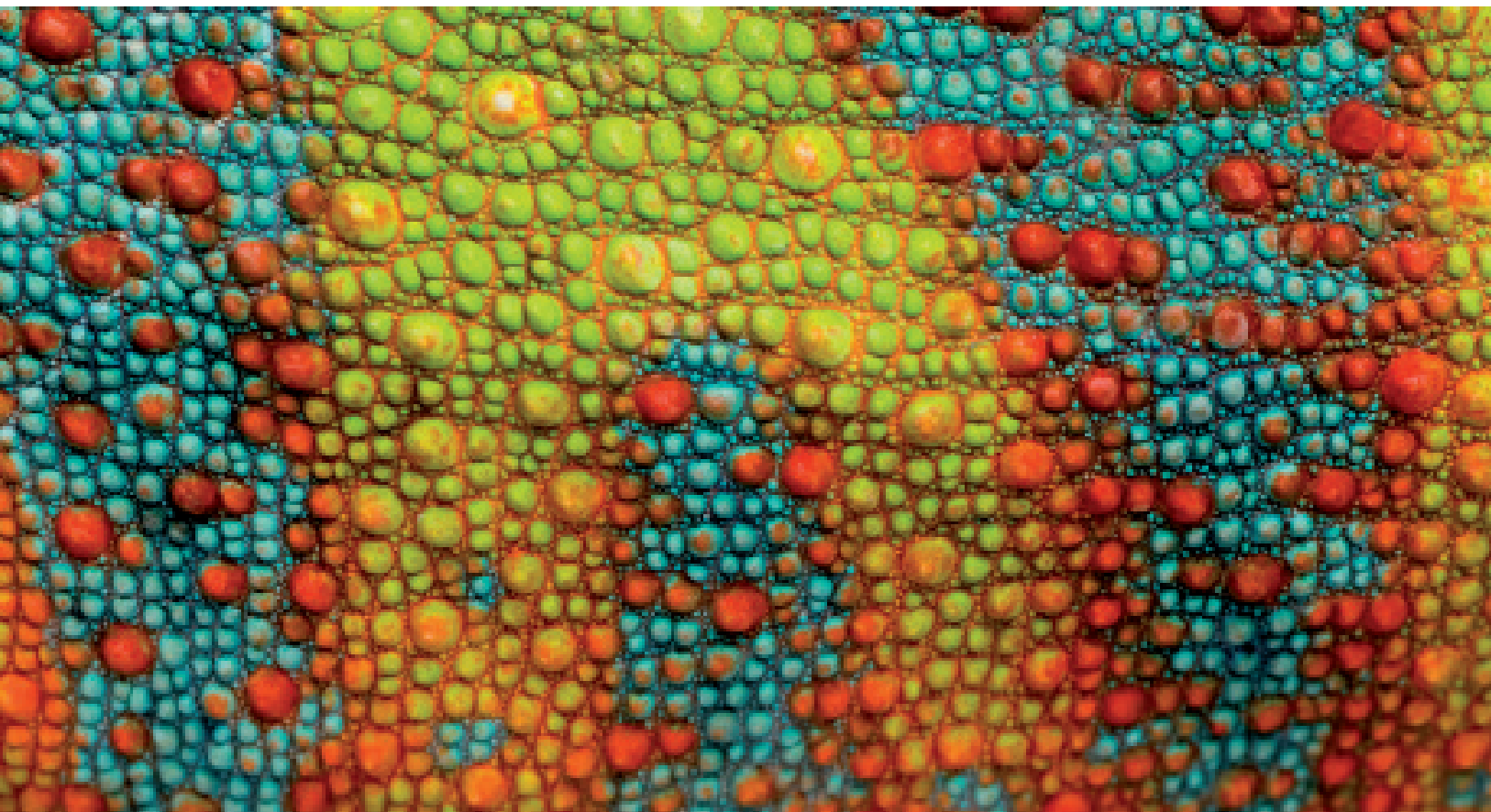
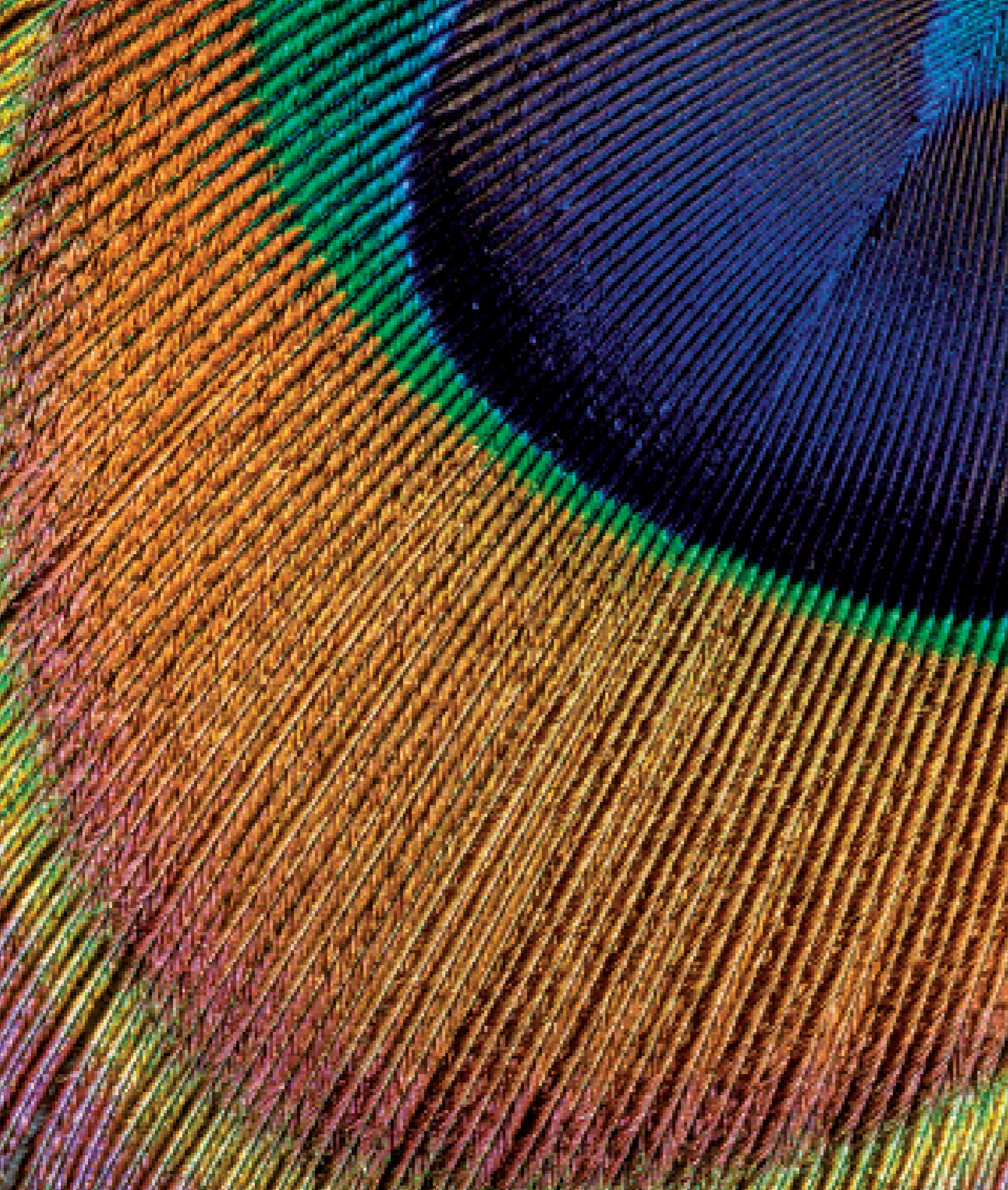


# FASCINERENDE PATRONEN IN DE NATUUR





# FASCINERENDE PATRONEN IN DE **NATUUR**

VAN SLAKKENHUIZEN TOT STERRENSTELSELS

Philip Ball

FONTAINE UITGEVERS

Oorspronkelijke titel:  
*Patterns in Nature*

© 2016 Marshall Editions  
Eindredacteur: Chelsea Edwards  
Redacteur: Sarah Hoggett  
Senior Art Editor: Emma Clayton  
Ontwerp: Plum Partnership  
Fotoresearch: Sarah Bell  
Artdirector: Caroline Guest  
Creative director: Moira Clinch  
Oorspronkelijke uitgever: Paul Carslake

Voor de Nederlandstalige uitgave:  
© 2018 Fontaine Uitgevers BV, 's-Graveland  
www.fontaineuitgevers.nl

Redactie en productie: Vitataal, Feerwerd  
Vertaling: Nicole Seegers/Vitataal  
Vormgeving omslag: Wouter Eertink, Graven 13  
Opmaak binnenwerk: De ZrIJ, Maarssen

ISBN 978 90 5956 867 9  
NUR 410

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden veelevoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm, elektronisch databestand of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Deze uitgave is met de grootst mogelijke zorgvuldigheid samengesteld. Noch de maker, noch de uitgever stelt zich echter aansprakelijk voor eventuele schade als gevolg van eventuele onjuistheden en/of onvolledigheden in deze uitgave.

# INHOUD

6 INLEIDING

12

HOOFDSTUK 1  
SYMMETRIE

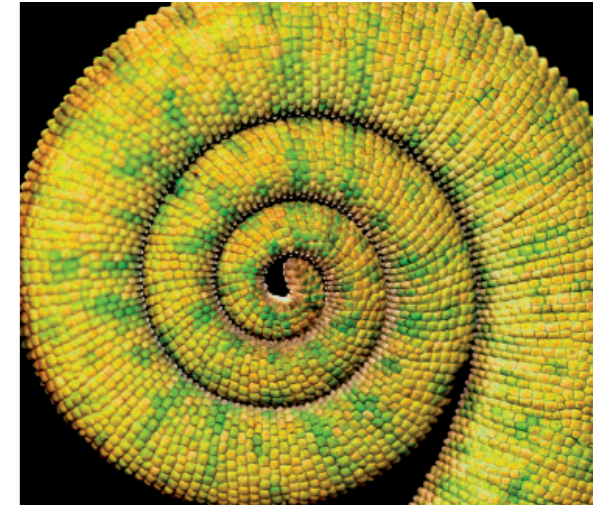


46

HOOFDSTUK 2  
FRACTALS

78

HOOFDSTUK 3  
SPIRALEN

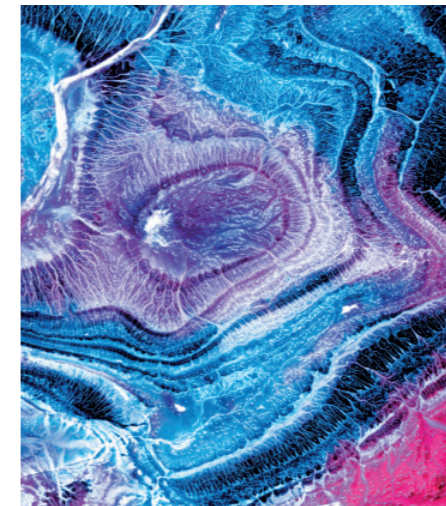


106

HOOFDSTUK 4  
STROMEN  
EN CHAOS

140

HOOFDSTUK 5  
GOLVEN  
EN DUINEN

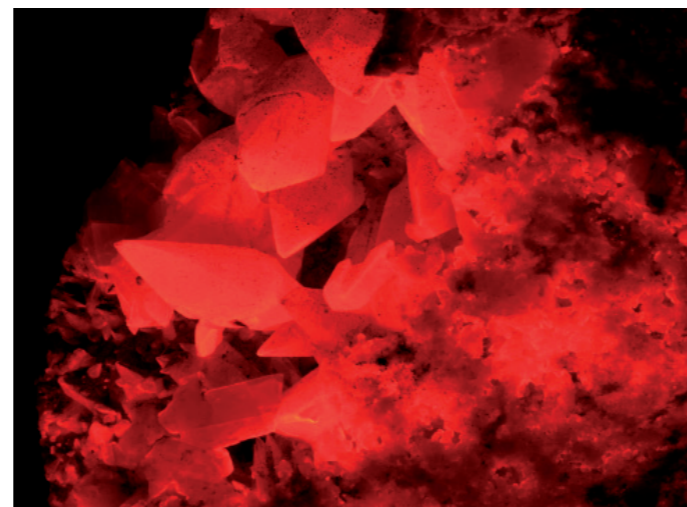


162

HOOFDSTUK 6  
BELLEN  
EN SCHUIM

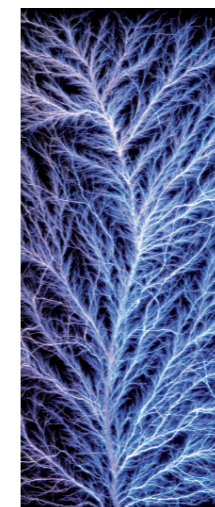
188

HOOFDSTUK 7  
RANGSCHIK-  
KINGEN EN  
BETEGELINGEN



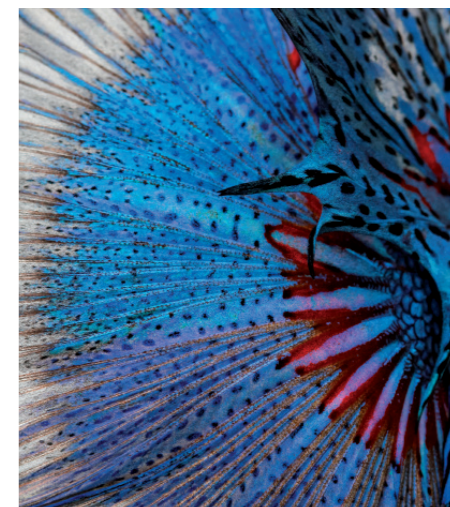
220

HOOFDSTUK 8  
BARSTEN



246

HOOFDSTUK 9  
VLEKKEN  
EN STREPEN



282 VERKLARENDE  
WOORDENLIJST

283 BIBLIOGRAFIE

284 REGISTER

286 FOTOVERANT-  
WOORDING

# Inleiding

De wereld is een verwarrende en onrustige plek, die we proberen te begrijpen door op zoek te gaan naar orde. We zien de regelmatige cycli van dag en nacht, het wassen en afnemen van de maan, de getijden en het terugkeren van de seizoenen. We speuren naar gelijksoortigheid, voorspelbaarheid, regelmatigheid: dat zijn voor de wetenschap altijd de leidende principes geweest. We proberen de complexe overvloed van de natuur te herleiden tot simpele regels om orde te scheppen in wat aanvankelijk oogt als chaos. We zijn allemaal patroonzoekers.

Het is een gewoonte die is ingebakken in onze hersenen. Vanaf het moment dat we ons als baby bewust worden van herhaalde geluiden en ervaringen gebruiken we patronen en regelmatigheden om te overleven en wegwijs te worden in de wereld. Patronen zijn voer voor wetenschappers, maar iedereen kan ervan genieten. Ze schenken ook esthetische en intellectuele voldoening. In bijna elke cultuur, van de oude Egyptenaren tot de indianen in Noord-Amerika en de Aboriginals in Australië, worden kunstvoorwerpen met regelmatige patronen versierd. We vinden deze structuren schijnbaar niet alleen aangenaam, maar ook geruststellend, alsof ze ons helpen te geloven dat overal logica en orde achter zit, wat het lot ook brengt.

Wanneer we echter onze eigen patronen maken, doen we dat weloverwogen en nauwkeurig door elk afzonderlijk element uit te knippen en op zijn plaats te leggen of een voor een in de stof te weven. De boodschap lijkt te zijn dat voor het maken van een patroon een patroonmaker nodig is. Daarom dachten mensen vroeger dat patronen in de natuur – een honingraat, de tekening van een dier, de spiraal van zaden in een zonnebloem, de zespuntige ster van een sneeuwvlok – het bewijs waren voor intelligent design, een teken dat een almachtige schepper had achtergelaten in zijn handwerk.

Wij hebben die hypothese niet meer nodig. Het is duidelijk dat een patroon, regelmatigheid of

vorm kan ontstaan uit de basiskrachten en -principes van de natuur- en scheikunde, mogelijk geselecteerd en verfijnd door de strenge biologische evolutie. Maar dat maakt het mysterie alleen maar groter. Hoe speelt het ingewikkelde wandkleed van de natuur het klaar om zonder blauwdruk of vooruitziendheid patronen te maken? Hoe vormen deze patronen zich spontaan?

Hoe ze eruitzien zegt al iets. Het merkwaardigst aan natuurlijke patronen is misschien dat ze uit een vrij beperkt palet komen en opduiken in verschillende afmetingen en systemen die schijnbaar niets met elkaar gemeen hebben. We zien bijvoorbeeld spiralen, zeshoeken, zich vertakkende spleten of bliksemschichten, stippen en strepen. Er zijn schijnbaar patroonvormingsprocessen die niet afhankelijk zijn van de bijzonderheden van een systeem maar overal kunnen ontstaan en zelfs moeiteloos de levende en de niet-levende wereld kunnen overbruggen. In die zin is patroonvorming universeel: de grens die wij doorgaans trekken tussen verschillende wetenschappen of verschijnselen bestaat simpelweg niet.

## Groei en vorm?

Hebben deze patronen iets met elkaar gemeen of is het toeval dat ze er hetzelfde uitzien?

De eerste die zich serieus met die vraag bezighield, was de Schotse zoöloog D'Arcy Wentworth Thompson. In 1917 publiceerde hij zijn meesterwerk, *Over groei en vorm*, waarin hij alles wat

## WISKUNDIGE ORDE

*In de traditionele islamitische architectuur komen vaak geraffineerde regelmatige geometrische patronen voor, die het idee van een geordende kosmos uitdrukken. Sommige kunstenaars leken vooral een voorkeur te hebben voor elementen waarmee het niet mogelijk is een vlak te vullen zonder dat er ruimten openblijven, zoals vijf- en achthoeken.*





toen bekend was over patronen en vormen in de natuur verzamelde in een schitterende synthese van biologie, natuurlijke historie, wiskunde, natuurkunde en techniek. Zoals de titel al zegt, wees Thompson erop dat patroonvorming, in elk geval in de biologie en vaak in de niet-levende wereld, niet iets statisch is, maar uit groei ontstaat. 'Alles is wat het is omdat het zo geworden is,' zei hij. Om het raadsel van patronen te kunnen oplossen, moeten we kijken naar hoe het zo geworden is, hoe het patroon is gegroeid. Dat ligt minder voor de hand dan het lijkt: een brug, moestuin of microchip wordt 'verklaard' door hoe hij eruitziet, niet door hoe hij was gemaakt.

Een van Thompsons doelen was het temperen van de enorme geestdrift in die tijd om elke vorm en orde in de levende wereld te verklaren op basis van Charles Darwins theorie van natuur-

lijke selectie: dat het patroon er was omdat het een adaptief doel diende door het organisme te helpen overleven. Dat hoefde niet per se zo te zijn, waarschuwde Thompson. Misschien had de natuur simpelweg geen keuze: de vorm wordt bepaald door fysieke krachten, niet door het belang voor de biologie. Zelfs levende wezens moeten slim in elkaar zitten om bestand te zijn tegen de grillen van het lot. Thompsons waarschuwing dat Darwins theorie te beperkt was, kwam precies op tijd, al botst die daar eigenlijk niet mee. In de levende wereld lijkt patroonvorming zowel de opties voor adaptieve verandering te beperken als nieuwe adaptieve kansen te bieden, dus parallel aan en soms in overeenstemming met Darwins evolutieleer te werken. Door patroonvorming ontstaat bijvoorbeeld de kleurtekening die dieren gebruiken als camouflage, om roofdieren af te

#### **1 NATUURLIJKE UITBUNDIGHEID**

*Het prachtige verenkleed van het gierparelhoen, dat voorkomt in het noordoosten van Afrika.*

#### **2 OVERAL PATRONEN**

*Regelmatigheid en orde komen overal voor in de natuurlijke wereld, in zowel de levende als de niet-levende. Soms zijn ze alleen te zien met een microscoop (of telescoop), zoals bij deze stuifmeelkorrels.*



schrikken of om soortgenoten te herkennen. Deze patronen zijn misschien niet willekeurig, maar kunnen wel nuttig zijn.

Maar Thompsons boek toonde ook aan waarom het niet gewoon toeval was dat dezelfde patronen en vormen in alle wetenschappen voorkwamen, waarom bijvoorbeeld de rangschikking van zeepbellen lijkt op die van een groep levende cellen of het gaasachtige skelet van kleine zee-wezens, waarom slakkenhuizen en de hoorns van een ram een wiskundige spiraal vormen, waarom de ruggengraat van dieren gevormd is als een cantileverbrug.

### **Te midden van al het wonderbaarlijke**

Thompson begreep lang niet alles, maar zat wel op het juiste spoor. In de eeuw sinds het verschijnen van *Over groei en vorm* zijn veel nieuwe natuurlijke patronen herkend en verklaard, en tegenwoordig zijn er wetenschappers die gespecialiseerd zijn in het bestuderen ervan. Ze maken gebruik van conceptuele en experimentele hulpmiddelen en natuurlijk de computer, zaken die Thompson niet had. De vragen zijn boeiend en moeilijk, maar de aantrekkingskracht van deze vormen en rangschikkingen ligt vermoedelijk grotendeels in hun enorme schoonheid.

Deze patronen bevestigen ook wat de Amerikaanse natuurkundige Richard Feynman heeft gezegd over de werking van het universum: 'De natuur gebruikt alleen de langste draden om haar patronen te weven, dus onthult elk stukje van haar weefsel de structuur van het hele tapijt.' De natuurwetten die op aarde heersen, zijn universeel, en soms herken je ze even duidelijk in een klein hoekje als in een panoramisch uitzicht: in een steelpan op het fornuis zie je misschien vaag de convectiepatronen die de wolken in de lucht rangschikken, en het netwerk van bloedvaten in je lichaam doet (terecht) denken aan de grote rivierennetwerken die continenten doorkruisen en bergketens vormen.

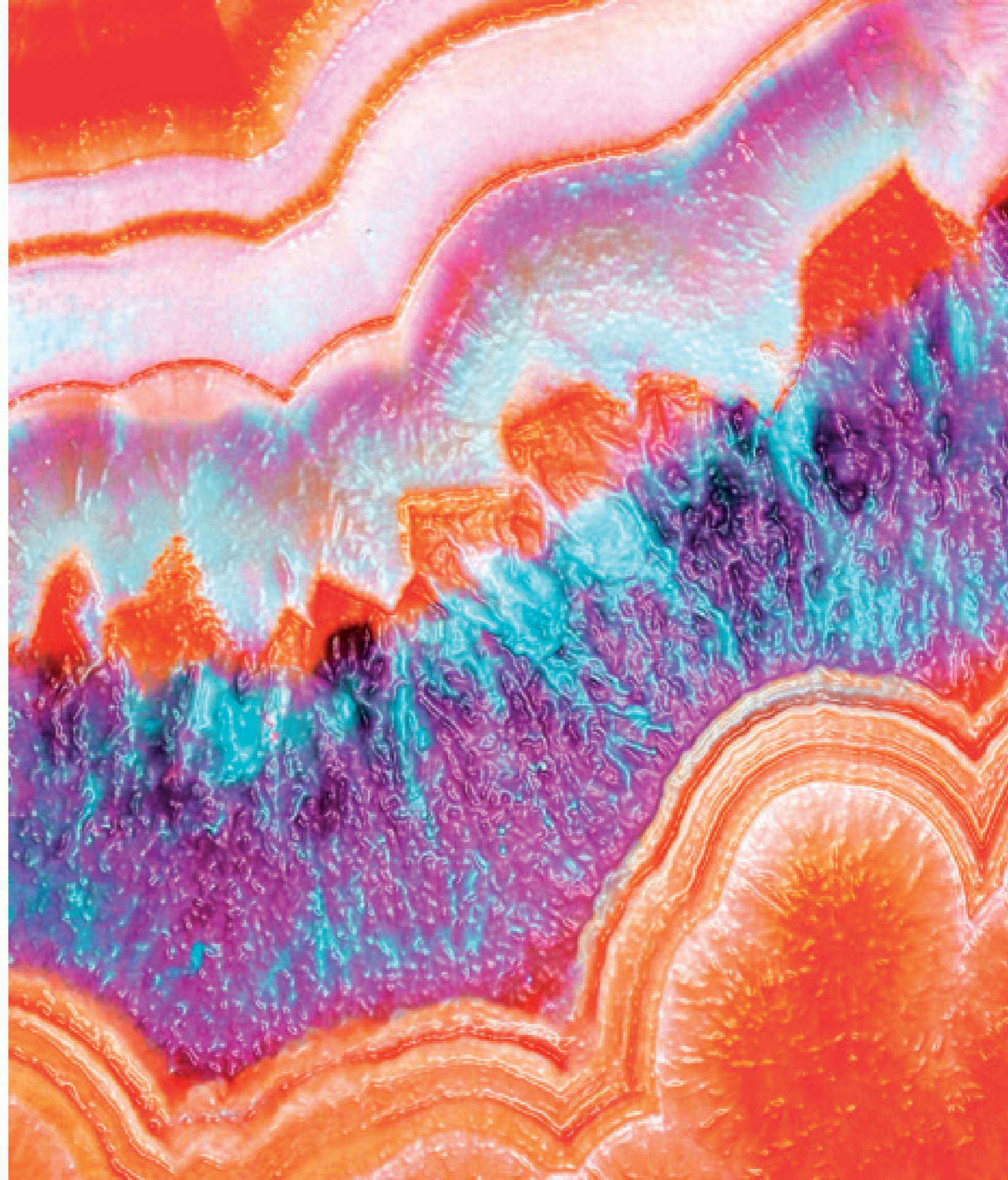
Dit wil niet zeggen dat één grote theorie al deze dingen verklaart, al hebben sommige wetenschappers daar wel van gedroomd en doen enkele dat nog steeds. Maar ze maakt wel veel patroonvariaties op een thema en weerspiegelt het feit dat

ze vaak ontstaan uit ongeveer dezelfde processen – processen waarbij een drijvende kracht, zij het zwaartekracht, hitte of evolutie, voorkomt dat het systeem vast komt te zitten in een onveranderde toestand, waarbij invloeden op elkaar inwerken, soms elkaar versterken, soms met elkaar botsen, waarbij patronen en vormen abrupt veranderen in een nieuwe gedaante zodra de drijvende kracht een drempelwaarde overschrijdt, waarbij kleine gebeurtenissen grote gevolgen kunnen hebben en iets wat hier gebeurt invloed kan hebben op iets wat elders plaatsheeft, en waarbij toevallige omstandigheden permanent kunnen worden en bepalen wat zich daarna voltrekt. Er is geen wet van patroonvorming, maar misschien wel een receptenboek.

In dit boek leggen we zeker niet al deze recepten uit; dat is elders al gedaan (zie de bibliografie op blz. 283). Het doel is om hier een indruk te geven van de recepten, maar vooral om de resultaten in al hun glorie te laten zien. Misschien meer dan welk ander onderwerp ook wordt dit gebied van wetenschappelijk onderzoek voortgedreven door verwondering. Ik moet bekennen dat de wetenschap sommige afbeeldingen in dit boek nog niet helemaal kan verklaren. De algemene principes zijn misschien duidelijk, maar de details en nuances niet. Sommige afbeeldingen zijn niet ter illustratie van een wetenschappelijk proces toegevoegd, maar louter omdat ze zo prachtig zijn. Behalve analyseren en rekenen moeten we ook bewonderen, ons verwonderen. Natuurlijke patronen bieden puur genot, maar wijzen ook op iets diepers, zoals Feynman duidelijk maakte. Ze laten zien dat we de wereld, om die te begrijpen, soms niet alleen moeten ontleden, maar ook weer in elkaar moeten zetten. Door de rijke interactie tussen de elementen verschijnen vormen en effecten die je nooit voor mogelijk had gehouden als je naar elk element afzonderlijk had gekeken. Dat we dit ontstaan van nieuwe vormen beschouwen als een soort spontane creativiteit in de natuur, heeft weinig te maken met mystiek en antropomorfisme. De wereld gebruikt eenvoudige regels om verscheidenheid en rijkdom voort te brengen, Darwins 'eindelose vormen, in al hun schoonheid'. Een deel van die schoonheid is vastgelegd in dit boek.

#### **HET PATRONENPALET**

*Bepaalde vormen en patronen komen telkens weer terug in de natuurlijke wereld, in systemen die schijnbaar niets met elkaar te maken hebben. Een voorbeeld hiervan zijn groeibanden, zoals in deze agaat.*



# 1 SYMMETRIE

Waarom je linker- en je rechterkant hetzelfde zijn  
(en waarom ze verschillen)

Wat is een patroon eigenlijk? We zien het meestal als iets wat zich almaar herhaalt. De wiskunde van de symmetrie beschrijft hoe deze herhaling eruitziet en waarom sommige vormen ordelijker en gestructureerder lijken dan andere. Daarom is symmetrie de fundamenteel-wetenschappelijke 'taal' van patronen en vormen. Symmetrie betekent dat iets er hetzelfde blijft uitzien wanneer het gereflecteerd wordt in een spiegel of gedraaid of bewogen wordt. Maar ons intuïtief inzicht in symmetrie kan misleidend zijn. Gedaante en vorm in de natuur ontstaan doorgaans niet uit de 'opbouw' van symmetrie, maar uit de breking van volmaakte symmetrie: het uiteenvallen van volledige, saaie uniformiteit, waar alles overal er hetzelfde uitziet. De kernvraag is dan ook: waarom is niet alles uniform? Hoe en waarom breekt symmetrie?



Al in de oudheid droomden mensen van een ordelijk universum, toen misschien vooral omdat ze kwetsbaarder waren voor de grillen van de natuur. 'God, die wenste dat alle dingen goed waren en niets onvolmaakt was, zover dat mogelijk was,' schreef de Griekse filosoof Plato in de vierde eeuw v.Chr., 'veranderde de wanorde van het zichtbare universum in orde, omdat hij meende dat orde in elk opzicht beter was.' Plato stelde zich een universum voor dat was geschapen volgens geometrische principes, gebaseerd op harmonie, evenredigheid en symmetrie. Deze visie vindt nog steeds veel weerklank. Moderne natuurkundigen gebruiken symmetrie om de wereld te begrijpen, en ze geloven dat de diepste natuurwetten deze eigenschap laten zien.

Wat zijn precies deze eigenschappen van symmetrie en patronen die we in de natuur vinden, en waar komen ze vandaan? We kunnen symmetrie het best zien als een eigenschap van een voorwerp die ons in staat stelt het te

veranderen terwijl het er precies hetzelfde uit blijft zien. Denk aan een bol: je kunt hem draaien zoals je wilt, maar hij blijft er hetzelfde uitzien. Of denk aan het raster van lijnen op ruitjespapier. Als je het papier precies één blokje opschuift in een richting evenwijdig aan de lijnen, ligt het raster in feite op het raster zoals het er eerst uitzag.

Dit zijn allebei symmetrieën, maar verschillende soorten. De bol heeft een draaisymmetrie, wat inhoudt dat hij er na draaiing hetzelfde uitziet. Het ruitjespapier (de randen buiten beschouwing gelaten) heeft een verschuivingsymmetrie. De bol bezit zelfs een volmaakte draaisymmetrie, wat wil zeggen dat hij bij elke draaihoek symmetrisch is. Stel je daarentegen een voetbal voor die uit aan elkaar genaaide zes- en vijfhoeken bestaat: alleen bij bepaalde draaihoeken liggen de zes- en de vijfhoeken precies boven op hun uitgangspositie.

Een andere vorm van symmetrie is spiegeling. Als je een spiegel rechtop op ruitjespapier zet, ziet

### 1 SUBTIELE SYMMETRIE

*De zanddollar, een soort zee-egel, lijkt te doen alsof hij vijfvoudig symmetrisch is, als een vijfhoek, maar de ovale spleten gooien roet in het eten.*

### 2 ZIJN ALLE KIEZELS HETZELFDE?

*Zelfs kiezels hebben gemiddeld een karakteristieke vorm die wiskundig beschreven kan worden door de reeks verschillende krommingen die hun oppervlak heeft, te benoemen.*

de weerspiegeling in de spiegel er precies zo uit als het vel papier dat erachter ligt. Dat is alleen het geval als het vlak van de spiegel precies in de juiste positie staat: op een van de rasterlijnen óf precies halverwege een vakje, zodat de halve vakjes die je kunt zien en de andere helften in de spiegel er samen uitzien als een heel vakje. Je kunt de spiegel ook nog anders plaatsen: precies op de diagonalen van de vakjes, zodat hij een hoek van 45° vormt met de rasterlijnen. Dat is dus een ander 'symmetrievlak' van het patroon. Bij elke andere hoek valt de spiegeling niet precies op het raster dat het verbergt: dat is dus geen echt symmetrievlak.

Wiskundigen noemen deze draaiingen, spiegelingen en verschuivingen 'symmetrieoperaties': bewegingen die niets veranderen aan hoe het voorwerp eruitziet. Een plusteken en een vierkant hebben dezelfde symmetrie: ze hebben een identieke set operaties waarbij ze er hetzelfde uit blijven zien. Een vierkant raster heeft echter een

andere set operaties dan een zeshoekig raster, zoals een honingraat of kippengaas.

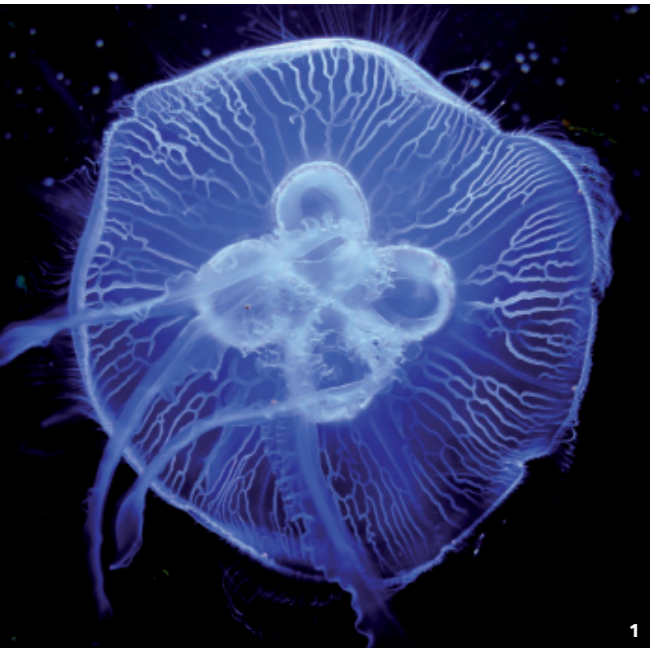
### Lichamen

Een van de meest voorkomende vormen van symmetrie in de natuur is bilaterale symmetrie, wat betekent dat een voorwerp er hetzelfde uit blijft zien wanneer er precies in het midden een spiegel wordt geplaatst. Met andere woorden: het heeft een linker- en een rechterkant die spiegelbeelden van elkaar zijn. Dit is natuurlijk een kenmerk van het menselijk lichaam, hoewel de symmetrie onvolmaakt is door allerlei grillen en ongelukjes in ons verleden. Het is aangetoond dat mensen met een symmetrisch gezicht doorgaans aantrekkelijker worden gevonden, en er wordt ook beweerd dat bij andere dieren met een bilateraal symmetrisch lichaam geldt: hoe symmetrischer, hoe meer partners.

Bilaterale symmetrie lijkt bij dieren bijna de standaardvorm te zijn. Vissen, zoogdieren,

'Moderne natuurkundigen gebruiken symmetrie om de wereld te begrijpen.'





1



2



4



5

### 1 KWALLEN

*'Eindeloze vormen, in al hun schoonheid', zo beschreef Charles Darwin de vormen die door de evolutie zijn ontstaan.*

### 2 EB

*Patronen in zand ontstaan spontaan, gegraveerd door de krachten van de natuur.*

### 3 BILATERALISME

*Een verhaal van twee helften: de atlasvlinder.*

insecten en vogels hebben alle deze eigenschap. Waarom is dat? Een mogelijkheid is dat bilaterale symmetrie het makkelijker maakt om in een bepaalde richting te bewegen: denk aan het gestroomlijnde glijden van een vis, vergeleken met het onhandige gekronkel van een zeester. Of misschien konden bilaterale wezens door hun vorm een ruggengraat en centraal zenuwstelsel ontwikkelen, met als voordeel gebundelde zenuwbanen naar de hersenen. Zelfs zeesterren zijn geëvolueerd uit bilaterale voorouders; hun larven zijn nog steeds bilateraal: zeesterren ontwikkelen hun vijfvoudig symmetrisch lichaam pas als ze volwassen worden. Deze vorm, die op zichzelf past als je hem met een bepaalde hoek rond één as draait, heet 'draaisymmetrisch'.

Minstens een half miljard jaar geleden ontwikkelden zich de eerste dieren met een bilateraal symmetrisch lichaam, en takken van het

dierenrijk die deze vorm niet hebben, laten zien wat het alternatief is: minder strenge of helemaal geen symmetrie. Zo zijn er de sponzen en koralen die met hun buisvormige, vertakte of gerimpelde zwamachtige vorm makkelijk kunnen worden aangezien voor zeeplanten. Er zijn anemonen met tentakels die vaak bijna draaisymmetrisch zijn: ze hebben een duidelijke boven- en onderkant, maar van opzij zien ze er vanuit elke hoek hetzelfde uit.

### Symmetriebreking en patroonvorming

Allerlei soorten systemen en processen, bij zowel levende als niet-levende voorwerpen, vinden spontaan een min of meer ordelijke, gestructureerde toestand: ze zijn zelforganiserend. Om dit te verklaren hoeven we niet langer onze toevlucht te zoeken tot een goddelijk plan. Er is

niets mysterieus aan, maar dat doet niets af aan onze verwondering en waardering wanneer we het zien gebeuren. Zonder een blauwdruk of leidraad rangschikken moleculen, deeltjes, korrels, stenen, vloeistoffen en levende weefsels zichzelf in regelmatige, soms geometrische patronen. De wetten van de natuur lijken 'gratis orde' te kunnen leveren. In systemen verschijnen patronen, ook al kunnen we daar geen recept voor vinden in de basisregels die het gedrag van de afzonderlijke delen bepalen. Deze patronen en ordening worden emergent genoemd: ze zijn een eigenschap van het hele systeem die niet zichtbaar is wanneer je naar de afzonderlijke delen kijkt.

Symmetrie speelt een cruciale rol bij het verkrijgen van inzicht in hoe zulke patronen verschijnen. Omdat we patronen meestal associëren met symmetrie – denk aan patronen op behang of Perzische tapijten – zijn we misschien geneigd

om te denken dat de spontane verschijning van een patroon in de natuur te maken heeft met de spontane vorming van symmetrie. Het tegenovergestelde is echter waar. Patronen ontstaan door de (gedeeltelijke) vernietiging van symmetrie.

Het meest symmetrische ding dat je je kunt voorstellen is iets wat je in elke richting kunt draaien, weerspiegelen of verschuiven zonder dat het er anders gaat uitzien. Dat is het geval bij volmaakt gelijkvormige dingen. Om een dergelijk voorwerp een patroon te geven, moet de symmetrie dus verminderd worden. Wetenschappers noemen dit symmetriebreking: de manier waarop de natuur dingen die aanvankelijk hetzelfde zijn, verandert in dingen die verschillend zijn. Hoe meer symmetrie wordt gebroken, hoe subtieler en ingewikkelder het patroon.

Willekeurigheid lijkt misschien het tegenovergestelde van gelijkvormigheid, maar deze twee

### 4 EEN GOEDE DRAAI

*Een koraal met radiale symmetrie: roteer hem, en om de paar graden ziet hij er hetzelfde uit.*

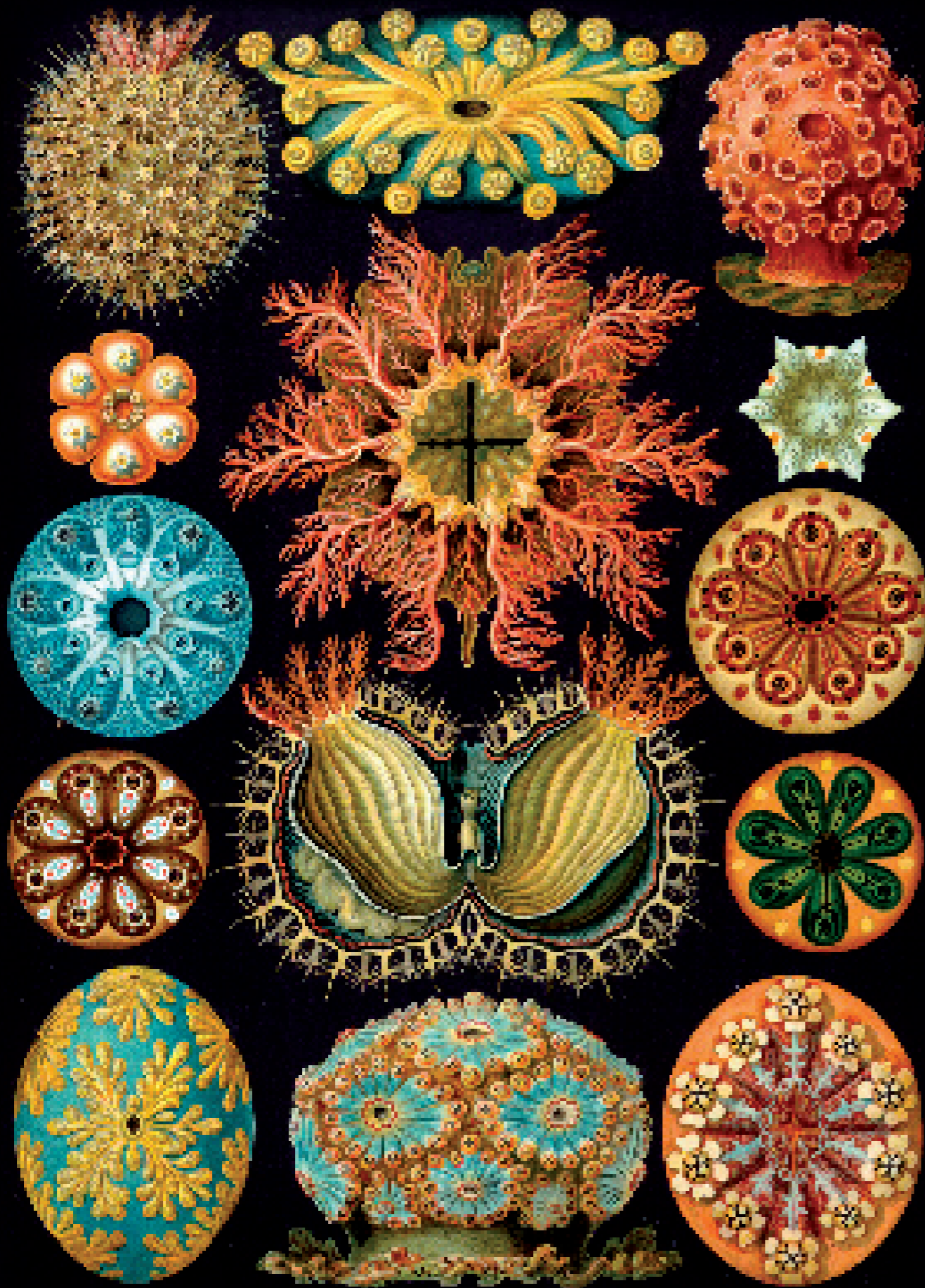
### 5 JE HEBT EEN PUNT

*De stervormige radiale symmetrie van een zoetwaterhydra.*

'Bilaterale symmetrie lijkt bij dieren bijna de standaardvorm te zijn. Vissen, zoogdieren, insecten en vogels hebben alle deze eigenschap.'



3



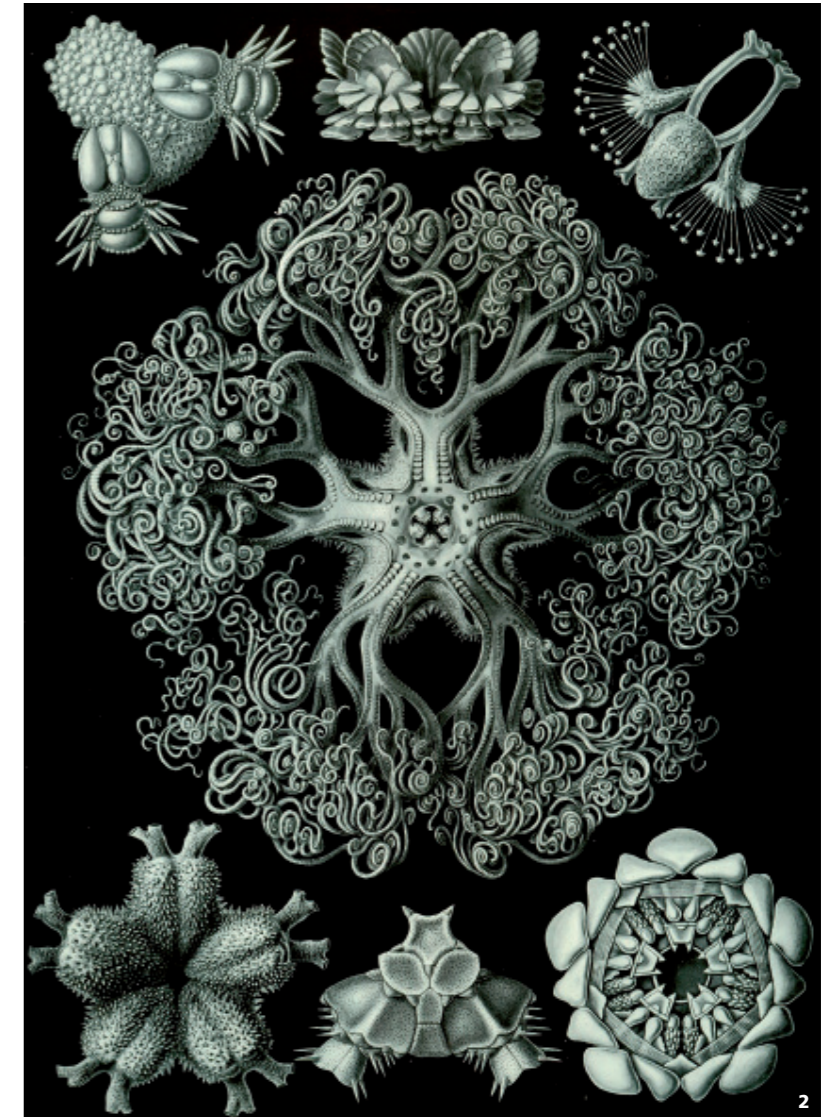
kunnen equivalenten zijn: een willekeurig patroon is doorgaans volmaakt symmetrisch en gelijkvormig, en kent dus ook geen 'specifieke' richtingen in de ruimte. In de natuur is volmaakte gelijkvormigheid of willekeurigheid verrassend moeilijk te vinden, tenminste op alledaagse schaal. Verbeeld je dat je op een strand bent. De lucht is bezaaid met wolken, misschien netjes in rijen of in de vorm van veren. Op het zeeoppervlak rimpelen golven die met een duidelijk ritme het strand op rollen. Rond de kust staan planten, elk met zijn eigen karakteristieke bloem- en bladvorm. Het zand bij de branding zit vol ribbels en ligt vol tere spiralen van schelpen. Overal zie je gedaanten en vormen: divers, ja, maar verre van willekeurig, verre van gelijkvormig. De symmetrie wordt gebroken, telkens opnieuw.

#### Oorzaak en gevolg

Wanneer symmetrie breekt in de natuur kunnen we daar vaak geen oorzaak voor aanwijzen. Ik zal het uitleggen. Als we een berg bakstenen veranderen in een muur met een regelmatig patroon komt dat doordat we elke baksteen op zijn plaats hebben gelegd. De uniforme symmetrie van een vel papier breekt wanneer we er een vliegtuigje van maken doordat we het zo vouwen. De symmetrie wordt gebroken door een kracht – onze bewegende hand – die haar dwingt zo te breken. Wij zijn duidelijk de oorzaak van de symmetriebreking.

Vergelijk dit met een druppel die op een glad wateroppervlak valt. In het begin is hij volmaakt circulair symmetrisch: hij ziet er in elke richting evenwijdig aan het oppervlak hetzelfde uit. Maar dan ontstaat door de plons een rand die uiteenvalt in een reeks spatjes, een kroon die kleine druppels uit zijn punten spuugt. De rand is zijn circulaire symmetrie kwijt en heeft nu een draaisymmetrie, zoals een zeester, waarbij sommige richtingen anders zijn dan andere. Door het proces van plonzen kreeg de druppel spontaan een symmetrie van een lager niveau.

In dit boek komen we nog veel meer voorbeelden van symmetriebreking tegen. Een glad laagje



#### KUNSTVORMEN IN DE NATUUR

De Duitse bioloog Ernst Haeckel toonde begin twintigste eeuw de sierlijke symmetrieën en opvallende kleuren van ongewervelde zeedieren zoals manteldiertjes (1) en stekelhuidigen (2), soms met extra versieringen.

water dat van onderaf wordt verwarmd, valt uiteen in verticaal circulerende cellen. In een blok materiaal dat aan alle kanten krimpt, ontstaat een netwerk van barsten. In een perfect gemengde oplossing van chemische stoffen vormen zich spiraalvormige patronen. Veel natuurlijke patronen ontstaan als bij toverslag uit een saai landschap.

Op een spinnenweb kunnen we het ook zien gebeuren. Het web zelf is een fantastisch natuurlijk patroon, maar het is geen spontaan patroon: de spin moet hard werken om elke draad op zijn plek te weven. In de morgendauw blijkt het web echter prachtig versierd te zijn met kleine waterdruppeltjes, net een rij parels. Heeft de spin ze daar opgehangen? Absoluut niet: ze zijn een gevolg van zelforganisatie, doordat dauw condenseerde rondom de zijden draden. Een dunne waterkolom als deze is onstabiel: er ontstaat een golfing die hem afknijpt in druppeltjes op gelijke afstand van elkaar, op de plek van de toppen van de golf.

Symmetrie is een handig hulpmiddel als we patronen en vormen proberen te begrijpen, maar ook schijnbaar onregelmatige, asymmetrische voorwerpen kunnen een verborgen orde bezitten die door de wiskunde onthuld kan

worden. Neem een kiezel. Hoe zou je zijn vorm beschrijven? Ongeveer rond, zoals een bol, maar niet helemaal. Het oppervlak van een volmaakte bol heeft overal dezelfde kromming. Bij een kiezel varieert de kromming echter van plek tot plek en van kiezel tot kiezel. Er is een diversiteit aan krommingen. De algemene 'kiezelvorm' kan worden beschreven met een grafiek die de relatieve aantallen van verschillende maten van kromming van een verzameling kiezels laat zien.

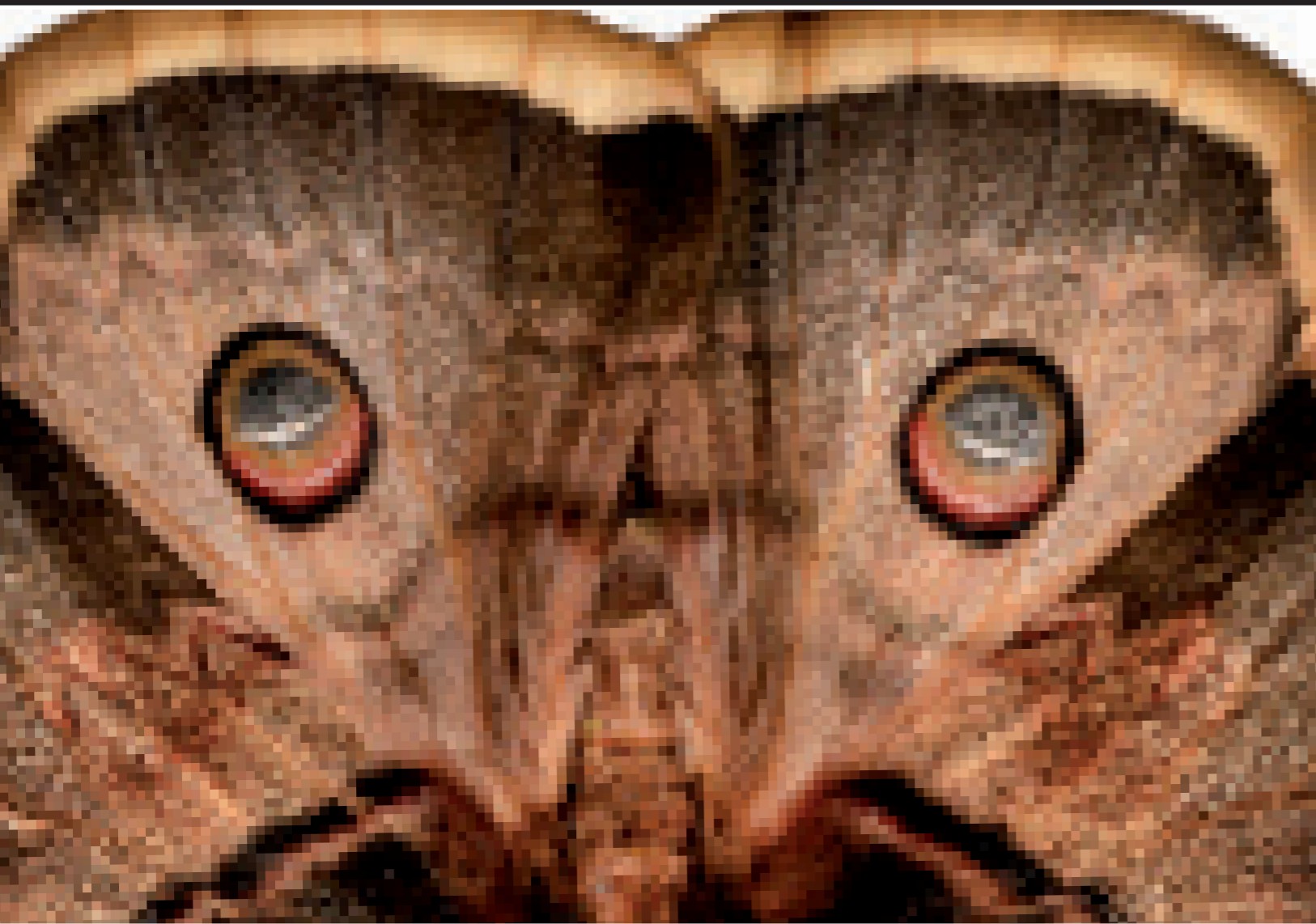
In tegenstelling tot een bol hebben kiezels vaak plekjes die eerder concaaf dan convex zijn: kuiltjes in plaats van bulten. In de wiskunde zegt men dat deze plekjes een negatieve kromming hebben. De grafiek die de verdeling van de krommingen van een kiezel weergeeft, laat dus negatieve en positieve waarden zien. Maar voor elke verzameling kiezels hebben de grafieken van de kromming globaal dezelfde vorm! Elke afzonderlijke vorm is anders, maar gemiddeld is er één 'kiezelvorm', beschreven door de verdeling van de krommingen. De wiskunde onthult de gemeenschappelijke vormen die ten grondslag liggen aan de zichtbare diversiteit.

#### NATUURLIJKE CURVEN

*Het zuigorgaan van een spanner krult zich op tot een sierlijke spiraal, versierd met regelmatig geplaatste haartjes.*



‘Ook schijnbaar onregelmatige, asymmetrische voorwerpen kunnen een verborgen orde bezitten die door de wiskunde onthuld kan worden.’



**TOEVALLIGE MIMICRY**  
*De nachtpauwoog en  
de kerkuil.*