



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## Origami metamaterials : design, symmetries, and combinatorics

Dieleman, P.

### Citation

Dieleman, P. (2018, October 16). *Origami metamaterials : design, symmetries, and combinatorics*. *Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/66267>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/66267>

**Note:** To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/66267> holds various files of this Leiden University dissertation.

**Author:** Dieleman, P.

**Title:** Origami metamaterials : design, symmetries, and combinatorics

**Issue Date:** 2018-10-16

---

## Samenvatting

---

Bij het vouwen van een vouwpatroon verandert men een tweedimensionaal plat materiaal in een vaak complexe driedimensionale vorm. Voorbeelden van zulke vouwpatronen kent men al eeuwenlang als ‘origami’, maar recent hebben materiaal- en natuurkundigen ontdekt dat sommige vouwpatronen in hun opgevouwen toestand exotische materiaaleigenschappen hebben. Een voorbeeld hiervan is het zogenaamde ‘Miura-ori’ vouwpatroon (zie hoofdstuk 1), dat in zijn opgevouwen toestand een negatieve Poisson-factor heeft, wat betekent dat het in meerdere richtingen krimpt als het wordt ingeduwd. Zulk soort eigenschappen hangen alleen af van de geometrie van het vouwpatroon en zijn dus toepasbaar op zowel hele kleine schaal, zoals voor insectenvleugels, als op hele grote schaal, zoals voor het opvouwen van zonnepanelen in satellieten. In het eerste gedeelte van dit proefschrift kijken we daarom naar de geometrie van vouwpatronen. In het bijzonder focussen we hier ons op vouwpatronen bestaande uit vier-vertices; dit zijn punten waar vier vouwlijnen samenkomen. Een enkele vier-vertex is het simpelste voorbeeld van een vouwpatroon dat kan worden gevouwen zonder het materiaal te verbuigen, en heeft een opmerkelijke eigenschap: ondanks zijn enkele vrijheidsgraad heeft hij twee verschillende vouwbewegingen. We maken gebruik van deze eigenschap, en laten zien hoe we willekeurig grote vier-vertex vouwpatronen kunnen ontwerpen die op twee of meer manieren op kunnen vouwen. Dit is in tegenstelling tot andere methodes, die vouwpatronen produceren die slechts op één manier vouwen. In het tweede gedeelte bekijken we enkele vier-vertices, en laten we een robuuste methode zien om een vertex te maken met drie energiminima, welke corresponderen met drie verschillende stabiele vouwtoestanden. Ook dit is in tegenstelling tot andere methodes, die slechts bistabiele vertices of patronen genereren.

De meeste vouwpatronen die bestaan uit vier-vertices zijn periodiek, en worden gemaakt door een enkele eenheidscel steeds te kopiëren, waardoor het patroon willekeurig groot kan worden gemaakt. Deze patronen voldoen aan de zogenaamde ‘starre-vouw voorwaarde’ die zegt dat de panelen tussen de vouwlijnen in –in dit geval vierhoeken– niet mogen ver-

vormen tijdens de vouwbeweging. Een dergelijk vouwpatroon kan beschouwd worden als een mechanisme, bestaande uit starre vierhoekige panelen verbonden door vrij bewegende scharnieren. Wij laten in dit werk een methode zien die op combinatorische wijze star-vouwbare vier-vertex vouwpatronen genereert, die op meer dan één manier kunnen vouwen, en bovendien aperiodiek kunnen zijn. We doen dit door vouwpatronen op te bouwen uit puzzelstukjes. Elk van deze puzzelstukjes representeert een minimaal vier-vertex vouwpatroon waarbij de vier hoeken van een vierhoek allen worden bezet door een vier-vertex. Door gebruik te maken van een set vertices die door symmetrie aan elkaar gerelateerd zijn, kan elk puzzelstukje op tenminste twee verschillende manieren star opvouwen. Daarnaast zijn deze puzzelstukjes zo ontworpen dat twee of meer aan elkaar passende puzzelstukjes automatisch leiden tot een star-vouwbaar patroon. De resulterende combinatorische vouwpatronen zijn in te delen in klassen, aangezien sommige puzzelstukjes wel samen binnen één en hetzelfde patroon kunnen voorkomen, en sommige niet. We tellen de hoeveelheid vouwpatronen van een bepaalde grootte binnen elke klasse, en het aantal mogelijke vouwbewegingen per patroon, dat varieert per klasse.

Hierna focussen we ons op een bijzondere klasse die precies twee vouwbewegingen heeft, ongeacht de grootte van het patroon. In deze klasse kan de vorm van beide vouwbewegingen onafhankelijk van elkaar aangepast worden, door specifieke puzzelstukjes te kiezen aan de zij- en bovenkant van het patroon. We demonstreren deze ontwerpstrategie door twee plastic vellen met identiek lasergesneden vouwpatronen op te vouwen tot twee verschillende vormen. Dit is voor zover wij weten de eerste (experimentele) demonstratie van een dergelijk tweevoudig vouwbaar vouwpatroon.

In het tweede gedeelte van dit proefschrift kijken we naar het gedrag van de enkele vier-vertex. Onze aandacht gaat in het bijzonder uit naar niet-euclidische vier-vertices. Dit zijn vertices die niet gevouwen kunnen worden uit een vlak stuk materiaal, omdat de vier hoeken tussen de vier lijnen van de vertex niet optellen tot 360 graden, maar juist meer, óf minder. Dit zorgt ervoor dat de twee vouwbewegingen –die voor een euclidische vier-vertex samenkomen in de vlakke toestand– van elkaar worden gescheiden door de starre-vouw voorwaarde. Deze scheiding maakt het onmogelijk te wisselen van vouwbeweging zonder de panelen te verbuigen. Echter, het is nog wel mogelijk van vouwbeweging te wisselen door de vertex dóór de vlakke toestand heen te duwen. Effectief hebben we zo

een energiebarrière gecreëerd tussen de twee vouwbewegingen, aangezien het materiaal van de vertex in de praktijk verbogen moet worden.

We laten zien hoe deze energiebarrière gebruikt kan worden om vier-vertices te ontwerpen die drie stabiele vouwtoestanden hebben door het toevoegen van één enkele torsiebeer op één van de vouwen. Deze beer zorgt ervoor dat op één van de twee vouwbewegingen twee stabiele vouwtoestanden ontstaan, die corresponderen met een globaal minimum in de energie. Op de andere vouwbeweging ontstaat daarentegen een lokaal minimum, dat stabiel is mits de bovengenoemde energiebarrière groot genoeg is. We geven een experimentele demonstratie van een dergelijk systeem door niet-euclidische vier-vertices te 3D-printen van plastic, en op een van de vouwen één enkele torsiebeer te plaatsen. We laten zien dat de verkregen vertices inderdaad drie stabiele vouwtoestanden hebben. Als laatste vergelijken we de theoretische energiecurves van de vouwbewegingen met experimentele energiecurves. Dit doen we door de geprinte vertices te testen in een torsietester, waarmee we het krachtmoment en de energie meten die nodig zijn om van de ene stabiele vouwtoestand naar de andere te schakelen.

De ontwerpstrategieën gepresenteerd in dit proefschrift kunnen worden gemaakt door gebruik te maken van nieuwe, computergestuurde productietechnieken, zoals lasersnijders en 3D-printers. Deze technieken kunnen worden toegepast om patronen te maken met vouwen ter grootte van enkele centimeters, zoals in dit proefschrift, maar zijn ook toe te passen op de kleinere schaal van micro- en millimeters. Daarmee komen materialen met geheel nieuwe functionaliteiten binnen handbereik.

