



A U X T E C H

AUXTECH – WISSENSCHAFT TRIFFT DESIGN

Bachelorarbeit im Studiengang
Media Design

Vorgelegt von
Julia Schneider – 221982
Jan Marc Zublasing – 222054

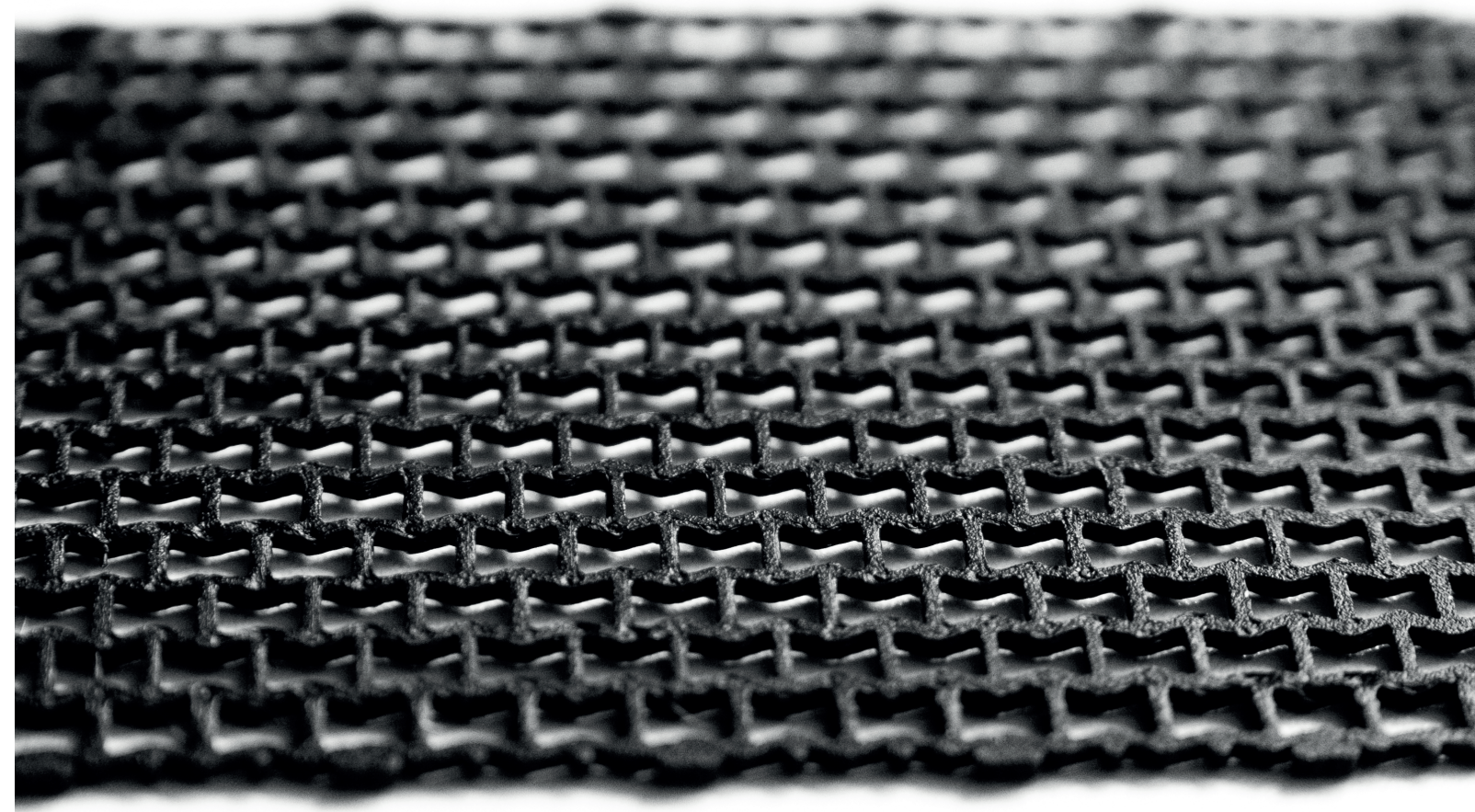
Seminargruppe
MD1016

Abgabetermin
21.02.2020

Betreuende Prüfer
Chris Jegl
Markus Eggart
Eduard Mittermaier

Verwendete Schriftart: »Nexa« – Font Family

INHALT



	Die smarte Zukunft
01	Forschungsstand
	Neri Oxman
	Fraunhofer Gesellschaft
	3D-Druck
	Druckfilamente
	Auxetik

02	Zielsetzung
	Strukturentwicklung
	Struktur-Test
	Produktentwicklung

03	Herangehensweise
	Testläufe 3D-Druck
	Processing 3.0

04	Problemstellung
	Programmierung
	3D-Druck
	Strukturentwicklung von 2D in 3D

05	Lösungsansätze
	Interview Fraunhofer-Gesellschaft
	Produktidee

06	Corporate Design
	Logo
	Name
	Schrift
	UI/UX
	Packaging
	Büroausstattung
	Messedesign

Fazit

Glossar

DIE SMARTE ZUKUNFT

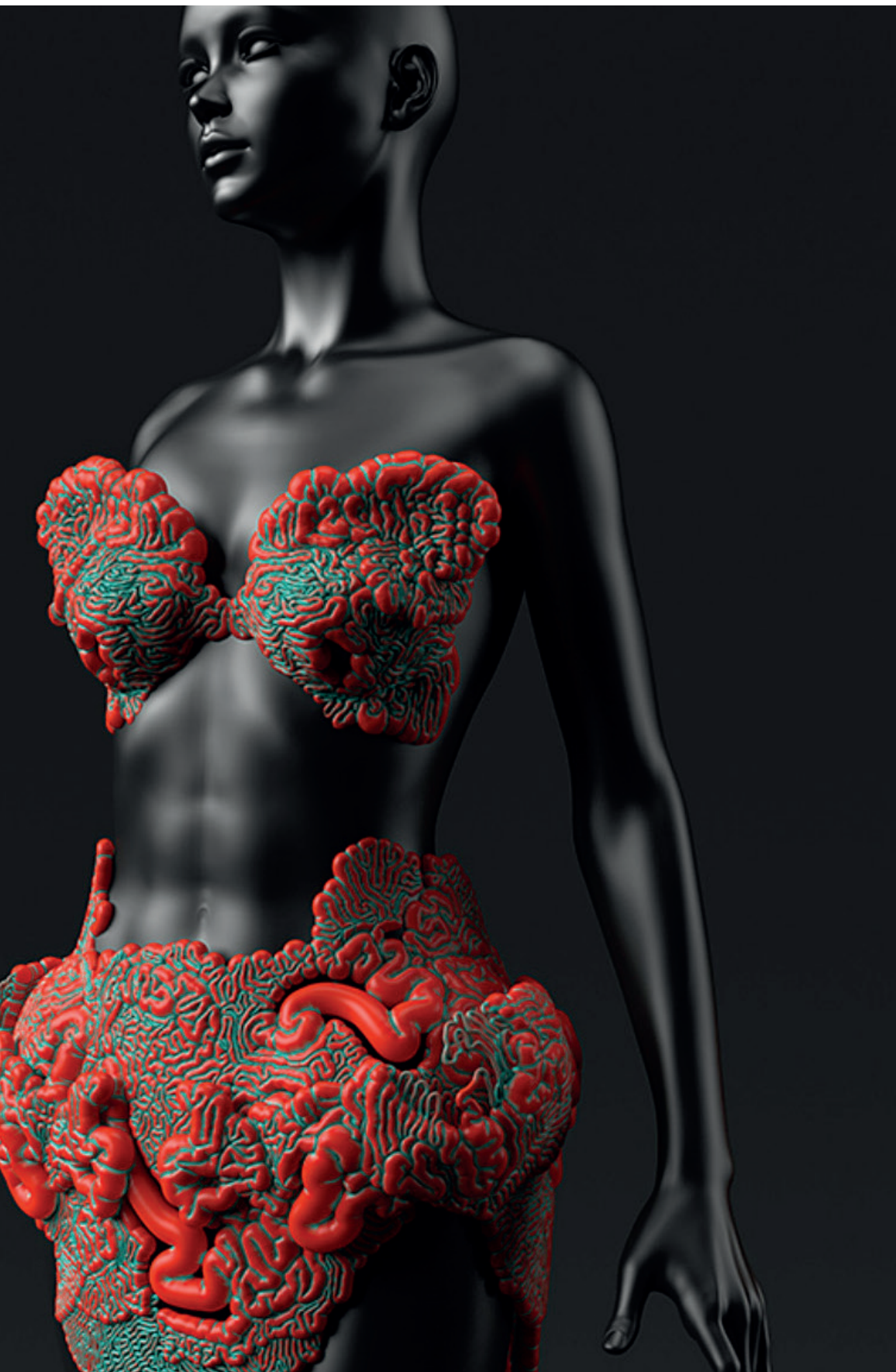
Smarte Materialien versprechen völlig neue Perspektiven im Produktdesign.

Produkte können sich nun individuell an ihre Nutzer und die Umgebung anpassen. Ein Werkstoff kann gleichzeitig unterschiedliche Funktionen erfüllen.

Die Produkte der Zukunft sind außerdem umweltfreundlich und leicht zu recyceln.

Wissenschaftler auf der ganzen Welt arbeiten inzwischen an der Umsetzung der intelligenten Materialien.

Wir erforschten das Thema durch eigene Experimente mit der 3D-Drucktechnologie und arbeiteten interdisziplinär mit Wissenschaftlern zusammen, um abschließend ein eigenes, zukünftig realisierbares Produkt zu entwickeln. Für uns als Designer war es das Ziel, kreativ neuartige Anwendungsmöglichkeiten von Metamaterialien zu finden, um Menschen für die smarte Zukunft zu begeistern!



© Photography by Yoram Reshef

NERI OXMAN

Die Folge »Abstract: The art of design – Neri Oxman: Bio Architecture« auf Netflix, befasst sich mit der Frage wie man die Natur und Design vereinen kann, um zukunftsweisende Methoden zu erforschen. In dieser führt die Wissenschaftlerin Neri Oxman Folgendes an:

»Nature is a brilliant engineer and builder. It knows how to create seashells that are twice as strong as the most resistant ceramics human beings can manufacture, and it produces silk fibers five times stronger than steel. Nature also knows how to create multipurpose forms.«¹

Neri Oxmans Team forscht am MIT (Massachusetts Institute of Technology) mit neuesten Technologien an innovativen Lösungsmöglichkeiten und frischen Ideen in der Kombination der Bereiche synthetische Biologie, digitale Fertigung, Medizin und Architektur. Die Umsetzung der Erkenntnisse erfolgt mittlerweile oft mittels der 3D-Drucktechnologie. Im Fokus liegt wie oben beschrieben das **Vorbild der Natur**. Dabei zeigt sie auf, dass wir durch den inzwischen immer kommerziell günstiger

werdenden 3D-Druck neue Wege beschreiten können und dies im Hinblick auf unseren Planeten im Sinne von beispielsweise **Recycling** auch tun sollten.²

»Can we design our way out of this? If we are to survive, we must design our way out of this. It's now on us to decide where we're going from here.«³

Ein Beispiel hierfür ist ihr Projekt »**Wearable Skins: Mushtari**«. Dies ist das erste durch 3D-Druck hergestellte Kunstobjekt, »das **additive Multimediaanfertigung mit synthetischer Biologie** verbindet. [...] Die Bekleidungsobjekte besitzen ein integriertes Kanalsystem für die Unterbringung von Mikroorganismen«, erklärte Oxman. Das bedeutet, dass »Mushtari beherbergt – ähnlich dem menschlichen Verdauungstrakt – Mikroorganismen in einer Parallelkultur aus Kolibakterien und fotosynthetischen Cyanobakterien. Diese synthetischen Organismen fluoreszieren im Dunklen und können unter Sonneneinstrahlung Zucker oder sogar Biokraftstoff produzieren.«⁴

»**Wearable Skins: Mushtari**«
by Neri Oxman

FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

» Die Zukunft der Werkstoffe...

...ist die Verbindung von Logik und Material. Funktionalitäten werden direkt in die Struktur des Materials eingeschrieben und ersetzen so komplette Systeme inklusiv Sensoren, Aktoren und Stromversorgung.

Stellen Sie sich eine Welt vor, in der mehr Platz ist. In der man kaum noch Maschinen, Geräte oder Automaten zu Gesicht bekommt, weil sie direkt in Materialien und Oberflächen integriert sind.

Stellen Sie sich Elektrofahrräder vor, deren Reifen in Kurven mehr Grip bekommen und im Winter Spikes ausbilden.

Stellen sie sich Kleidung vor, deren Atmungsaktivität mit Ihrer körperlichen Aktivität zunimmt und bei einem Sturz Schutzpolster ausbildet oder Schuhe, die sich zum Einsteigen weiten, bei Belastung verstärken und beim Laufen mehr Vortrieb verleihen.

Stellen sie sich Möbel vor, die sich an ihre Körperspannung und damit ihren Tagesablauf anpassen.

Stellen sie sich Gebäude vor, deren Fenster je nach Sonneneinfall automatisch abdunkeln oder deren Fassadendämmung tagsüber gespeicherte Wärme erst nachts wieder abgibt, um ein Aufheizen der Stadt zu verhindern.

Willkommen in der Welt der programmierbaren Materialien! «¹

**International Conference
on Programmable Materials,
Berlin, April 27-29, 2020**

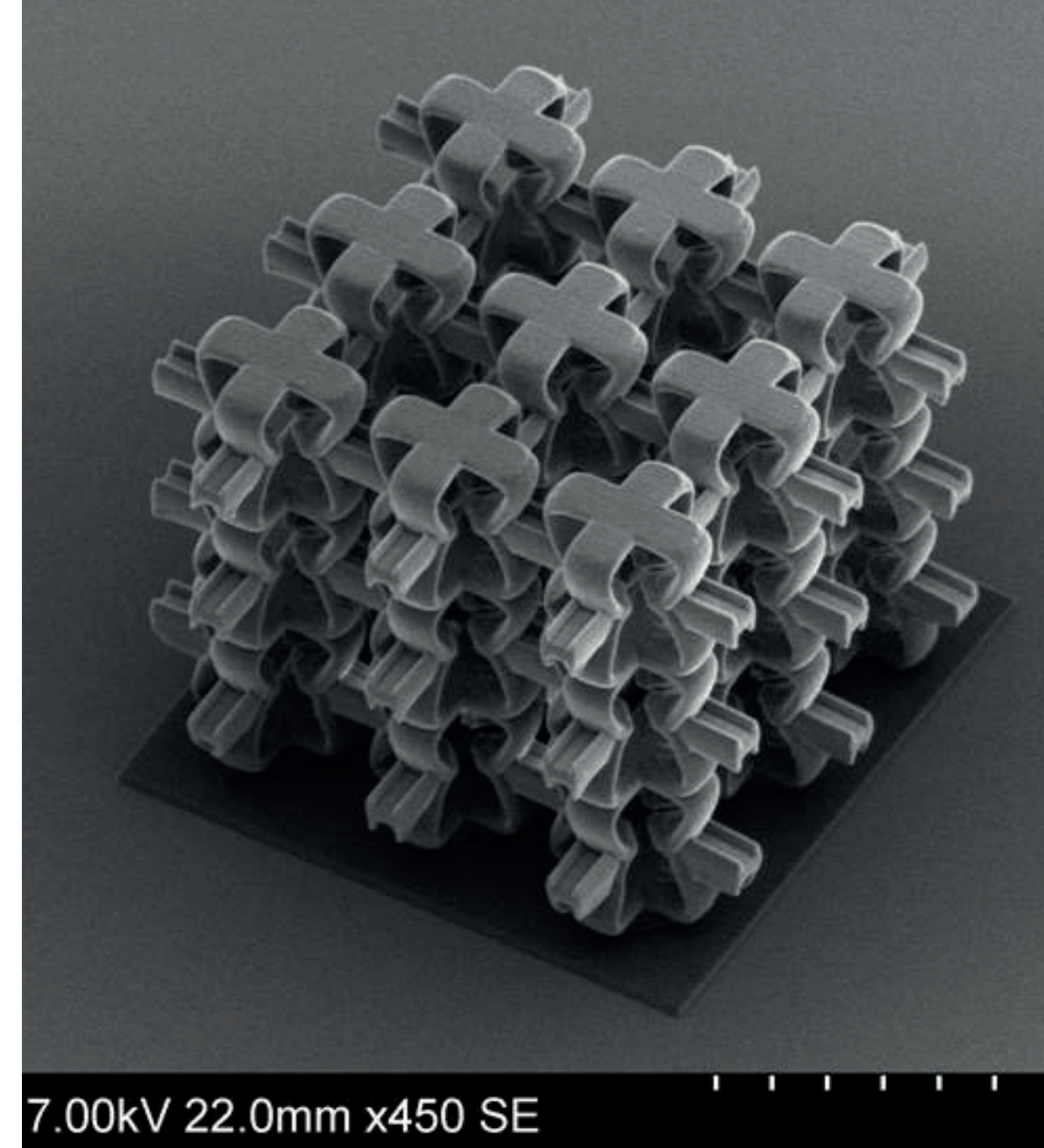
ORGANISED BY FRAUNHOFER CLUSTER OF EXCELLENCE

FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

» Es gibt eine Fülle an Werkstoffen, und je nachdem, welchen Zweck ein Produkt erfüllen soll, kann man das passende Material wählen. Allerdings gibt es Grenzen. Manche Werkstoffe scheiden für bestimmte Einsatzgebiete aus, obwohl sie sonst die richtigen Eigenschaften hätten – zum Beispiel viele Kunststoffe bei hohen Temperaturen oder bestimmte Stähle, die für aggressive Umgebungen ungeeignet sind. Natürlich kann man durch **kluges Materialdesign**, durch eine Änderung der Produktionsverfahren oder den Austausch von Atomen in Metallmischungen, den Legierungen, die Eigenschaften beeinflussen und bis zu einem gewissen Grad nach den eigenen Wünschen verändern. Dennoch ist jeder Werkstoff in seinen Anwendungsmöglichkeiten beschränkt. Wissenschaftler vom Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM in Freiburg wollen diese Grenzen künftig ein Stück weit verschieben – und klassischen Werkstoffen neue Fähigkeiten verleihen. Und zwar nicht, indem sie das Material selbst verändern, sondern dessen **Struktur**.«

»Forscher vom Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM haben jetzt ein Verfahren entwickelt, mit dem sie Polymere, Metalle oder Keramiken gezielt mit bestimmten Strukturmustern herstellen. Diese Muster verleihen den klassischen Werkstoffen neue Fähigkeiten, weshalb sie als **Programmierbare Materialien** bezeichnet werden. Damit sollen künftig ganz neue Einsatzgebiete erobert werden.«

»Natürlich sind elastische Kunststoffe schon seit Jahrzehnten auf dem Markt. Eberl« (Anm. Prof. Dr. Chris Eberl, Stellvertretender Institutsleiter des Fraunhofer Instituts für Werkstoffmechanik) »aber geht einen großen Schritt weiter: »Mit unserem Verfahren kann man ein Werkstück aus Kunststoff kleinräumig und gezielt an bestimmten Stellen strukturieren und verändern.« Er denkt zum Beispiel an neue Arten von Armaturenbretern in Autos, die überall steif, an manchen Punkten aber dank der Mikrostrukturierung nachgiebig sind. Solche Stellen könnte man als Schalter nutzen. Der Vorteil: Für andere Schalter, etwa auf Basis von Piezokeramiken, die elektrische Impulse erzeugen, benötigt man ein ganzes Schaltsystem aus Empfänger, Leiter und Aktuator, um eine Bewegung auszulösen. Eberl: »Bei uns aber soll der Kunststoff selbst zum Schalter werden.« Das Material erfüllt damit eine Systemfunktion.«²

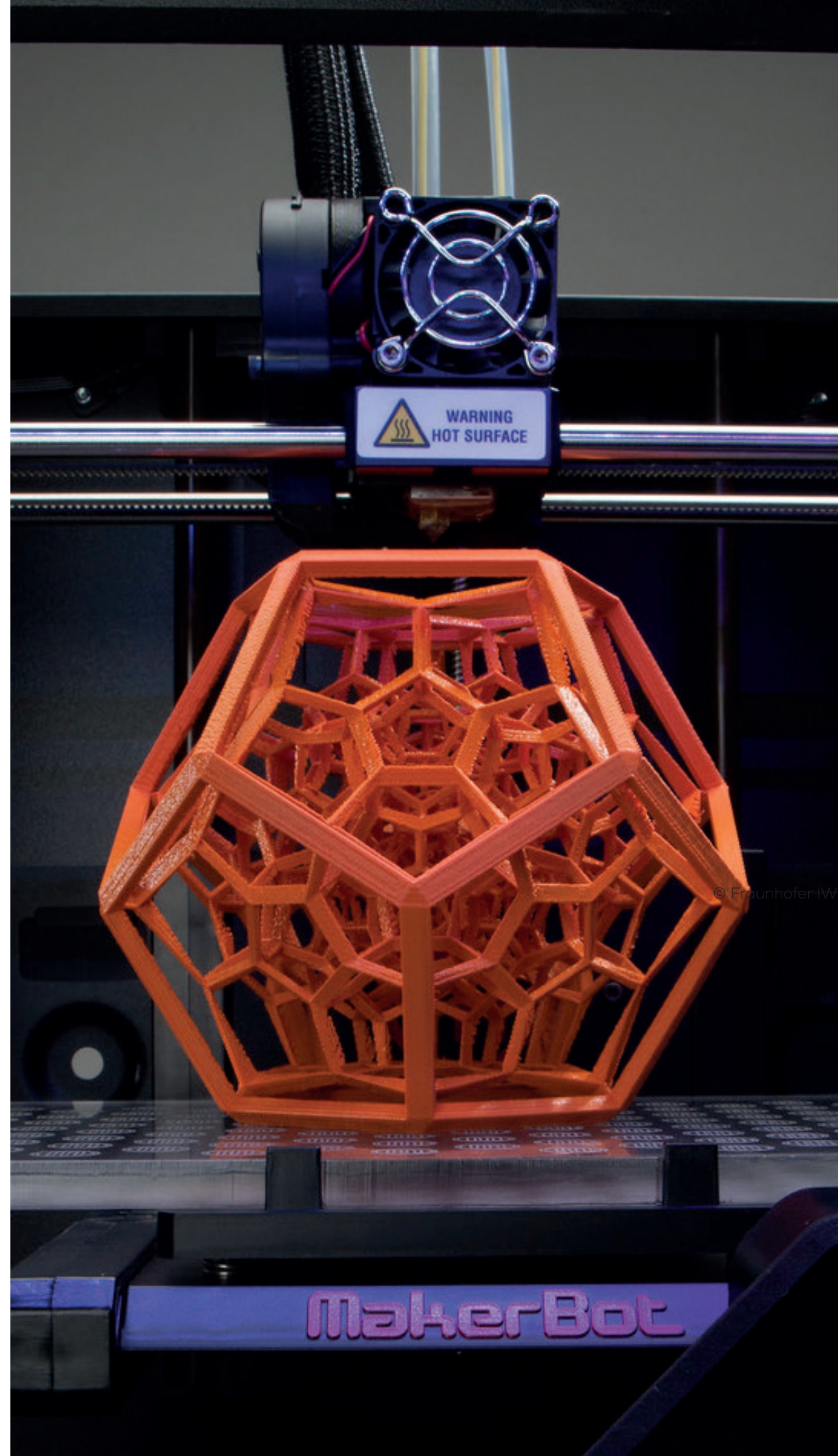


© Fraunhofer IWM

Der »Auxetic Cube« ist so strukturiert, dass er auf unterschiedliche Belastungen intelligent reagiert. Bei leichtem Druck gibt er nach, ab einer bestimmten Stärke bleibt er steif.

3D-DRUCK

» Der 3D-Druck auch bekannt unter den Bezeichnungen Additive Fertigung, Additive Manufacturing (AM), Generative Fertigung oder Rapid-Technologien, ist eine umfassende Bezeichnung für alle Fertigungsverfahren, bei denen Material Schicht für Schicht aufgetragen und so dreidimensionale Gegenstände erzeugt werden. Dabei erfolgt der Aufbau schichtweise und computergesteuert aus einem oder mehreren flüssigen oder festen Werkstoffen nach vorgegebenen Maßen und Formen. Beim Aufbau finden physikalische oder chemische Härtungs- oder Schmelzprozesse statt. Typische Werkstoffe für das 3D-Drucken sind Kunststoffe, Kunstharze, Keramiken und Metalle. Seit Neustem gibt es auch **biologisch abbaubare Stoffe wie Lignin oder PLA** (Polymilchsäuren) und des Weiteren wurden auch Carbon- und Graphitmaterialien für den 3D-Druck von Teilen aus Kohlenstoff entwickelt. Obwohl es sich oft umformende Verfahren handelt, sind für ein konkretes Erzeugnis **keine speziellen Werkzeuge** erforderlich, die die jeweilige Geometrie des Werkstückes gespeichert haben (zum Beispiel Gussformen). Seit längerem werden 3D-Drucker in der Industrie, im Modellbau und der Forschung eingesetzt zur schnellen und kostengünstigen Fertigung von Modellen, Mustern, Prototypen, Werkzeugen und Endprodukten. Teilweise schon heute aber noch vermehrt in Zukunft werden diese Bereiche durch Architektur und Medizin ergänzt. «¹



Der 3D-Druck wird für die Zukunft sehr an Bedeutung gewinnen. Jedoch ist die Technologie gegenwärtig noch nicht massenfertigungstauglich. Deshalb werden 3D-Drucker vor allem für Forschungszwecke und **Entwicklung von Prototypen** verwendet. Durch die Vielseitigkeit der Einsatzmöglichkeiten gibt es keine Branche, die nicht profitieren würde. Außerdem werden durch Materialeinsparung und effiziente Materialnutzung Produkte **umweltfreundlicher und leichter recyclebar**.

DRUCKFILAMENTE

PLA ist eines der bekanntesten 3D Drucker Materialien. » PLA steht für Polylactid Acid bzw. Polymilchsäure im Deutschen. PLA ist ein bioaktives und biologisch abbaubares Polyester und besteht aus Milchsäurebausteinen. Frühere Anwendungen des Materials waren meist auf biomedizinische Bereiche beschränkt, weil es biologisch sicher absorbiert werden kann. In den letzten Jahrzehnten gewann PLA durch den Anstieg des Umweltbewusstseins in der Bevölkerung und der Entwicklung wirtschaftlicher Produktionsmethoden immer

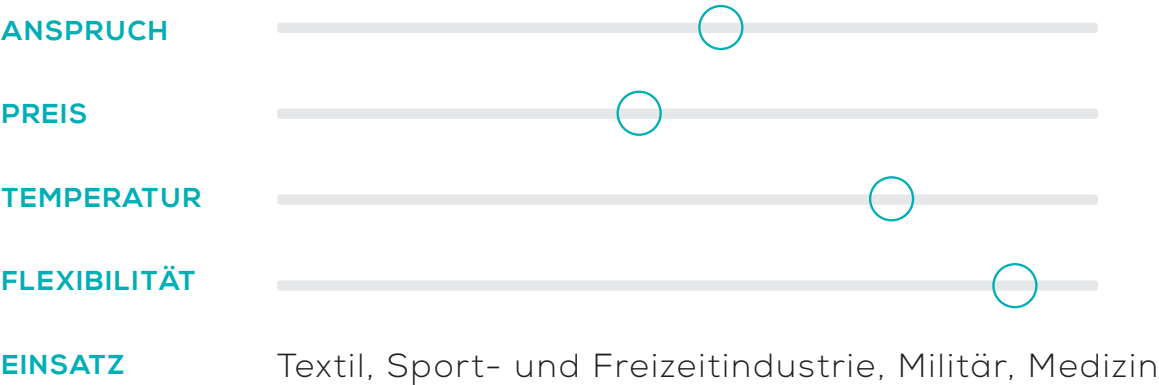
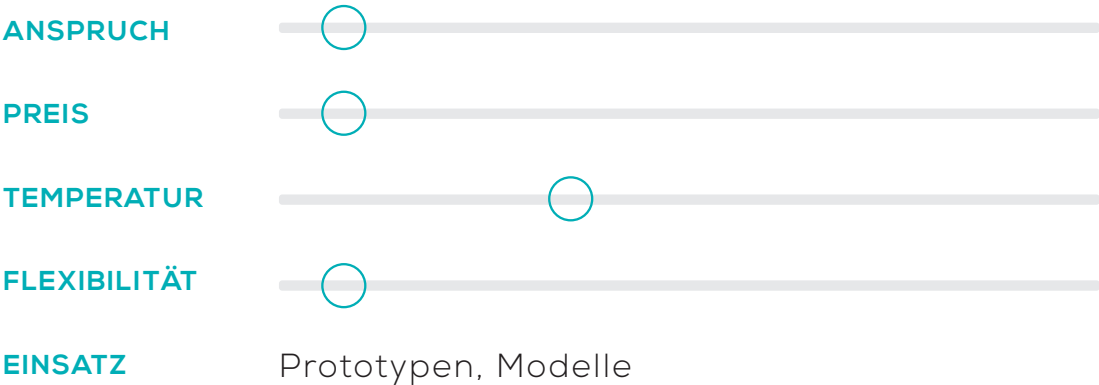
mehr an Bedeutung. Dabei wird es häufig in der Konsumgüterindustrie für das Verpackungsmaterial eingesetzt. PLA wird aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt und ist unter perfekten Bedingungen kompostierbar.«¹ Die Drucktemperatur kann zwischen 180 und maximal 230 Grad Celsius liegen, die Temperatur des Druckbettes (Heizbettes) zwischen 0 und 80 Grad Celsius. Die Druckgeschwindigkeit kann bis zu etwa 150 mm/s betragen.

TPU » Thermoplastisches Elastomer auf Urethanbasis gehört zur Polymergruppe der thermoplastischen Elastomere (TPE's). Es sind Polymere, die bei Raumtemperatur über elastisches Verhalten verfügen und sich dabei wie klassische Elastomere (Gummi) verhalten.«² Da TPU im Vergleich zu anderen im 3D-Druck verwendeten Kunststoffen viel flexibler ist besteht eine Reihe an Anforderungen an Maschine und Prozessparameter, um einen stabilen Prozess zu gewährleisten. Der empfohlene Extrusionstemperaturbereich liegt

zwischen 225-250 ° C, abhängig vom Typ eines 3D-Druckers und dem TPU-Filament. Beachten Sie jedoch, dass beim Drucken mit höheren Temperaturen das Filament schneller schmelzen und leichter von einer Düse fließen kann. TPU druckt normalerweise am besten bei langsameren Geschwindigkeiten. Es empfiehlt sich, die Hälfte der Durchschnittsgeschwindigkeit (15 mm/s - 20 mm/s) einzustellen, um qualitativ hochwertige Ausdrücke zu gewährleisten.

- △ Für 3D-Druck Anfänger besonders geeignet
- △ Biologische Abbaubarkeit
- △ Geringe Temperaturbeständigkeit
- △ Umweltschonendere Herstellung

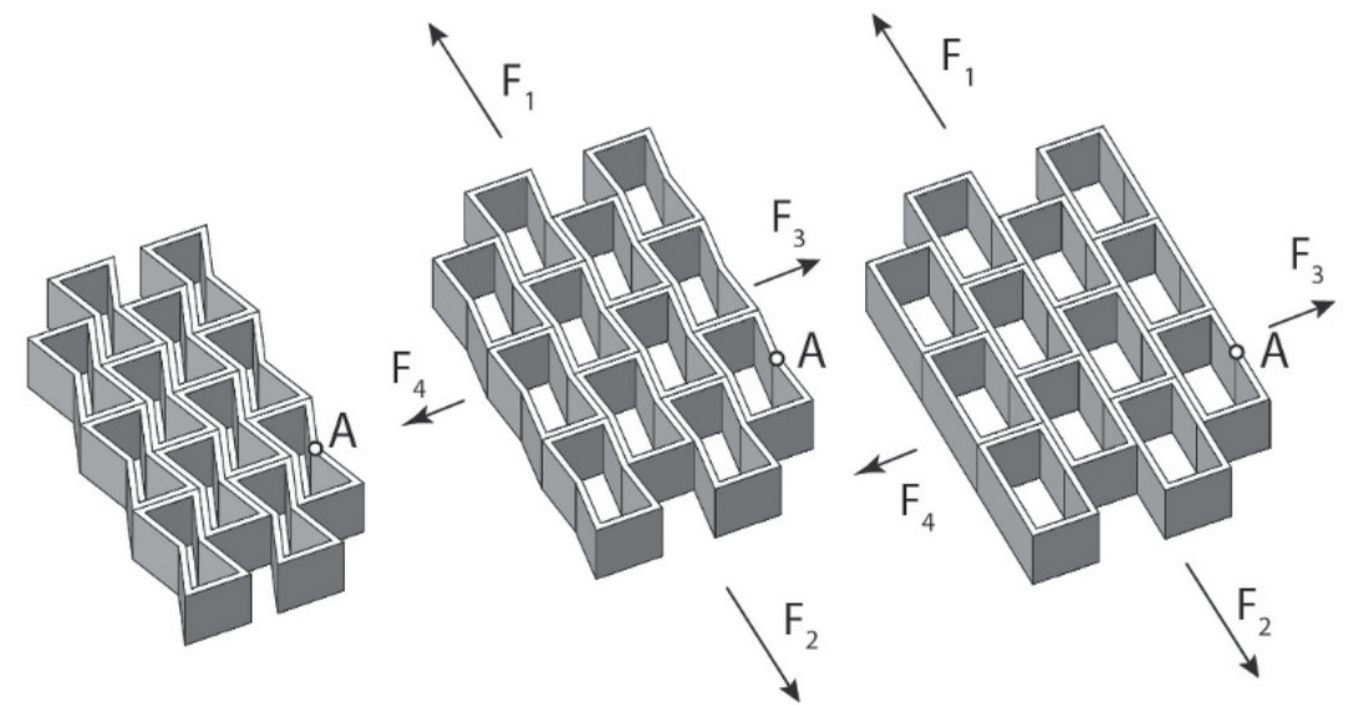
- △ Eigenschaften ähnlich zu Kautschuk
- △ Relativ neues Druckmaterial für den 3D-Druck
- △ Hohe Beständigkeit gegen eine Vielzahl von Ölen und Fetten
- △ Hohe Witterungs- und UV-Beständigkeit



AUXETIK

» Unsere alltägliche Erfahrung lehrt uns, dass ein Gegenstand, den man streckt, dünner wird. Drückt man ihn zusammen, wird er dicker. Aber es gibt auch Materialien, die sich so ganz entgegen unserer Intuition verhalten: Sie werden beim Strecken dicker und beim Zusammendrücken dünner. «¹

» Auxetische Materialien besitzen eine negative Poissonzahl. Die Poissonzahl (auch genannt Querkontraktionszahl) ist bei herkömmlichen Materialien positiv, weswegen zum Beispiel ein Gummiband bei Dehnung in der Mitte dünner wird. Auxetische Materialien hingegen nehmen im Querschnitt zu. Dies bedeutet, dass sich das Verhalten desselben Materials nur aufgrund der Strukturänderung komplett gegenteilig zu herkömmlichen Materialien verhält und sich ausdehnt. „Zu den auxetischen Materialien gehören unter anderem hochverstrecktes Teflon und die Haut von Kuhzitzen. Auxetisches Verhalten ist seit Anfang des 20. Jahrhunderts bekannt. Eines der ersten künstlich hergestellten auxetischen Materialien, die RFS-Struktur (Rauten-Falt-Struktur), wurde 1978 von dem Berliner Forscher K. Pietsch erfunden. Er verwendete zwar nicht den Begriff Auxetik, beschreibt aber erstmals die zu Grunde liegende Hebelmechanik sowie deren nicht linearen mechanische Reaktion und gilt daher als Erfinder des in der Grafik oben dargestellten Auxetischen Netzes. «²



© Stavric, M. & Wilsche, A. Nexus Netw J (2019) – RFS-Struktur

EIGENSCHAFTEN

- △ Bessere Absorption von Energie
- △ Besonders bruchfest und risszäh
- △ Gute Filtereigenschaften
- △ Stoß- und schlagfest

ANWENDUNGSBEREICHE

- △ Automotive – Stoßstangen, Sicherheitsgurte
- △ Medizin – Verbände für Wundpolsterung
- △ Sicherheit – Protektoren, Sicherheitswesten
- △ Sonstiges – Netze, Seile, Rohrabdichtungen, Dämpfung

STRUKTURENTWICKLUNG

Zu Beginn der Bachelorarbeit nahmen wir uns vor, eine eigene Struktur mit dem Vorbild aus der Natur zu finden. Hierfür recherchierten wir unterschiedlichste Quellen, um erst einmal herauszufinden, was genau einer Struktur besondere Eigenschaften gibt. Bei unseren Recherchen sind wir unter anderem auf die Zitrusfrucht namens Pomelo gestoßen. Diese übersteht aufgrund des intelligenten Aufbaus ihrer Schale sogar einen Sturz aus 10 Meter Höhe unbeschadet. Forscher fanden heraus, dass **die Schale eine ideale Leichtbaustruktur besitzt**, die als Energiedämpfer fungiert. Die Forschung macht sich diesen Umstand zunutze und entwickelt auf Basis der Technik der Pomelo inzwischen Schäume von Protektoren, die ähnliche stoßdämpfende Eigenschaften besitzen.¹ » In einem Fahrradhelm könnte so, bei gleicher Schaumdicke, ein 20 bis 30 Prozent höherer Schutz erzielt werden. Die Firma Uvex hat einen Prototyp gebaut, dessen Schaum nach dem Pomelo-Prinzip funktioniert. Prof. Dr. Thomas Speck geht davon aus, dass der Fahrradhelm in ein bis zwei Jahren auf den Markt kommen könnte.«²



»Mandillo Helmet« Prototyp von Lukas Franz

Das Interessante daran ist, dass nicht das Material der Schale, sondern die **Struktur selbst der aus-schlaggebende Faktor** für diese stoßdämpfenden Eigenschaften ist. Die Pomelo ist eines der wenigen Beispiele für angewandte auxetische Strukturen in der Natur. Die Entwicklung solcher Strukturen steht in der heutigen Forschung noch am Anfang, zumal sich diese fast ausschließlich mit der relativ neuen Technologie des 3D-Drucks herstellen lassen. Für den ersten Teil der Forschungsarbeit fokussierten wir uns deswegen auf das Entwickeln einer eigenen auxetischen Struktur. Der erste Anhaltspunkt hierfür war, dass jede auxetische Struktur eine negative Poissonzahl besitzen muss.

STRUKTUR-TEST

Um nun eine eigene auxetische Struktur entwickeln zu können, wurde Processing 3.0 als geeignetes Programm bestimmt. »Processing ist eine objektorientierte, stark typisierte Programmiersprache mit zugehöriger integrierter Entwicklungsumgebung. Die Programmiersprache ist auf die Einsatzbereiche Grafik, Simulation und Animation spezialisiert. [...] Die Klassenbibliotheken der Programmiersprache zielen vor allem auf das Einsatzgebiet von Processing und berücksichtigen die Themen Video, Grafik, Grafikformate, Sound, Animation, Typographie, 3D, Simulation, Datenzugriff und -transfer, sowie Netz-

werkprotokolle.«¹ Deshalb war unser Ziel mit Processing 3.0 ein Programm zu schreiben, dass zunächst die Strukturen, die wir davor mit Adobe Illustrator entwickelt hatten, importieren kann. Diese sollten dann mit **simulierten physikalischen Zugkräften** anschaulich die auxetischen oder nicht-auxetischen Eigenschaften zeigen. Mit diesem Algorithmus soll in Zukunft das Finden von auxetischen Strukturen vereinfacht und beschleunigt werden. Des Weiteren soll er sowohl Forschern als auch Designern dabei helfen, eigene Strukturen zu finden und zu testen.

PRODUKTENTWICKLUNG

Nach dem Feststellen der Auxetik in einer Struktur stand für uns die **praktische Anwendung** im Vordergrund. Wie kann diese Technik am besten in der Realität angewendet werden? Findet sich eine clevere Produktumsetzung, die durch 3D-Druck

ermöglicht wird? Unser Ziel war es einen Gegenstand umzusetzen, der einen **Mehrwert für den Alltag** schafft. Anfangs konkretisierten wir uns nicht weiter, um alle Wege und Möglichkeiten offen zu halten.

TESTLÄUFE 3D-DRUCK

Zunächst wurden im Internet verschiedene 3D-Modelle zu auxetischen Strukturen gesucht. Da es schon vorgefertigte Modelle zum Herunterladen gibt, wurden zwei ausgewählt, um das Prinzip der auxetischen Strukturen besser verstehen zu können. Dabei fanden wir heraus, dass vor allem die Größe und Dichte der Struktur ausschlaggebend für die Funktionalität der Testdrucke war. Die gezeigte Struktur (Abb. 1) wurde besonders dünn und groß gedruckt, sodass sie sich durch **enorme Flexibilität** auszeichnet. Auch der auxetische Effekt der Ausdehnung lässt sich hier durch die Größe des Musters recht gut beobachten. Das hier verwendete Material nennt sich *PLA*. Dieses *Polymer* ist biologisch abbaubar, aber wie das untere Beispiel an den Ecken zeigt, nicht besonders gut geeignet, um den auxetischen Effekt zu nutzen.

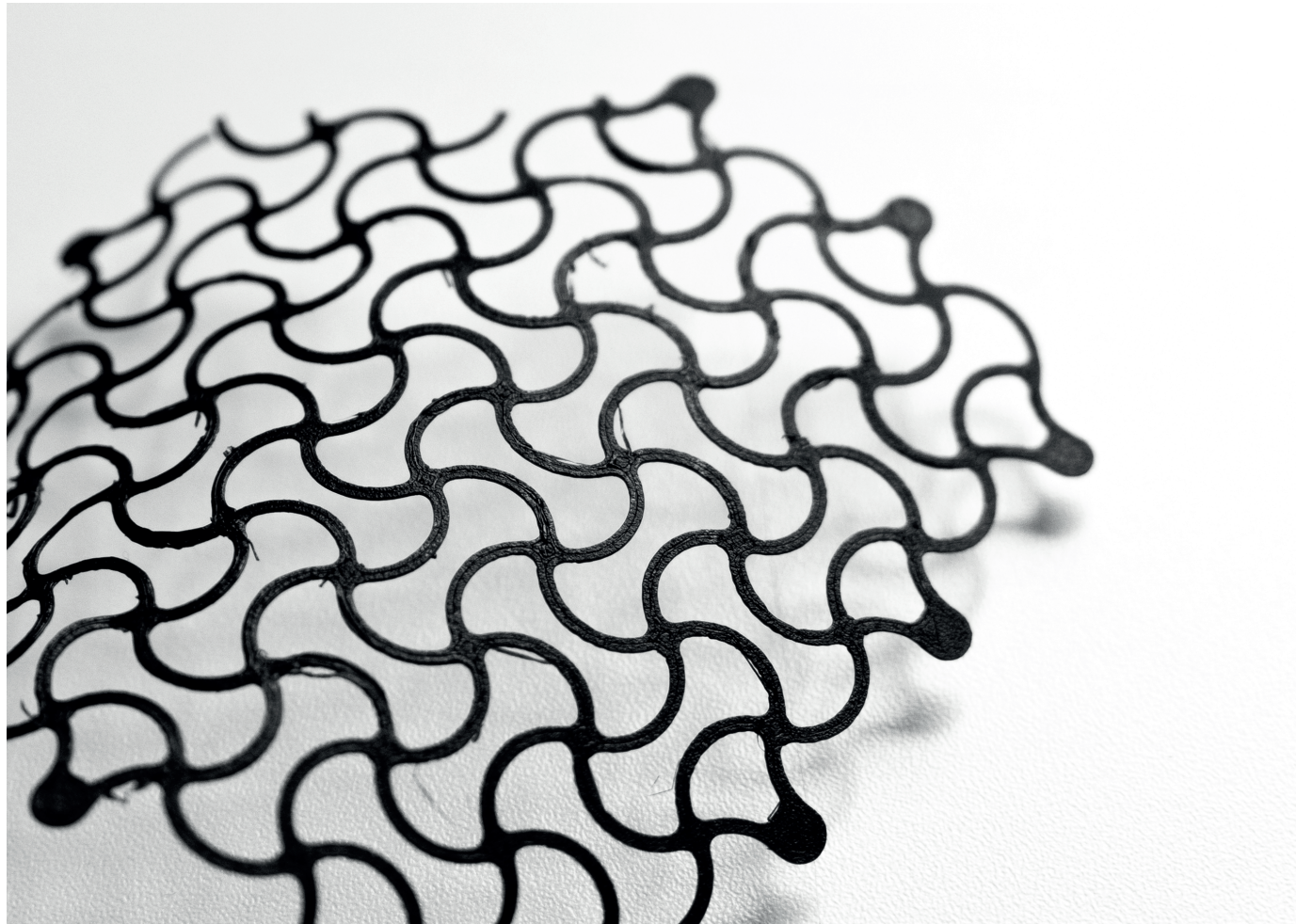


Abb. 1

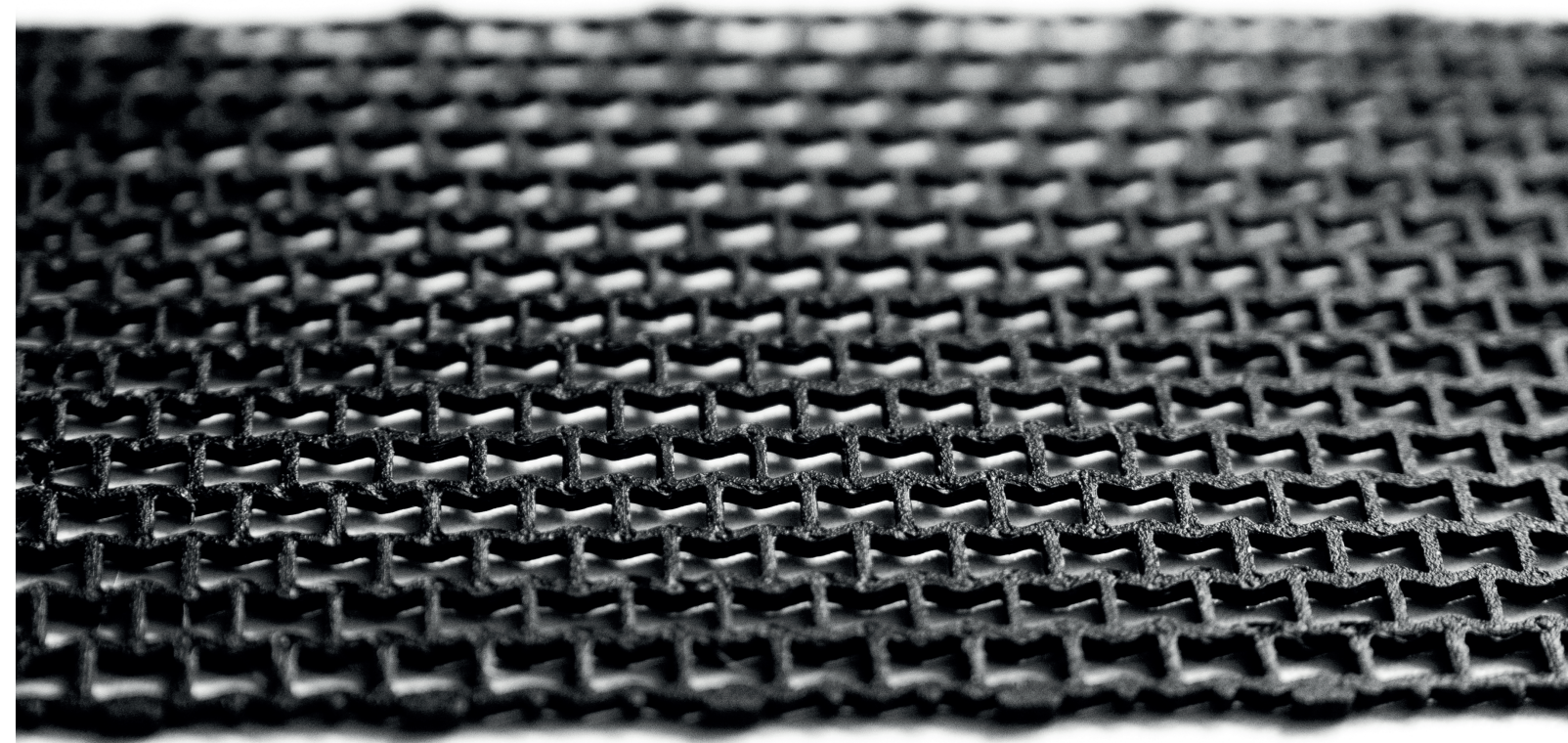


Abb. 2

Das auxetische Muster in Abb. 2 zeigt die auxetische Struktur in der bekannten Sanduhr-Form. Auch hier wurde für den Testdruck das Material *PLA* verwendet. Bei diesem Modell beträgt die Höhe ungefähr 3 mm. Da das Material ein **hartes Plastik** ist, ließ sich die Struktur weder ziehen noch verformen. Deswegen suchten wir nach anderen Materialien zum besseren Beobachten des auxetischen Effekts.

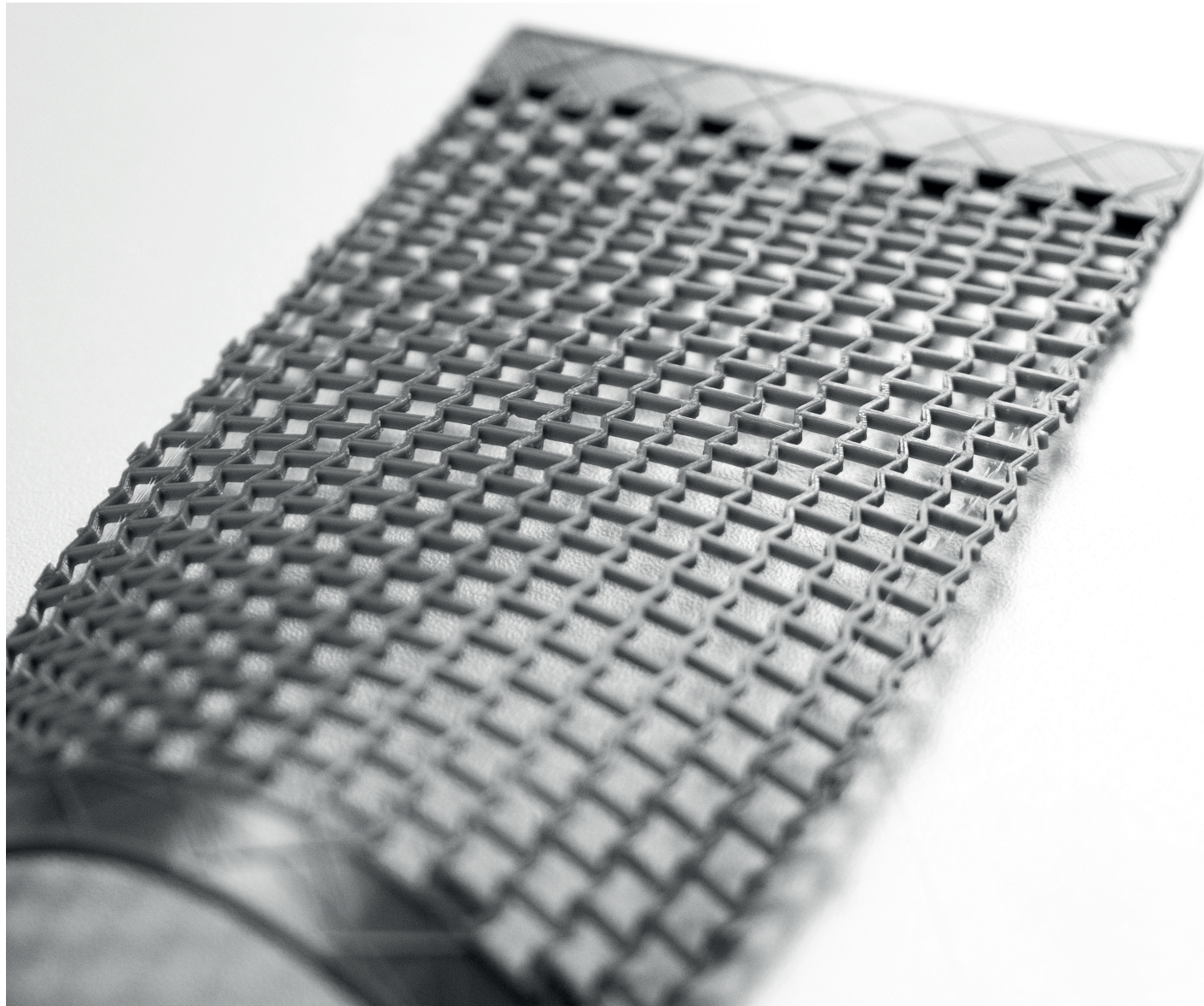


Abb. 3

In Abb. 3 wurde das *Polymer TPU* verwendet. » Es sind Polymere, die bei Raumtemperatur über elastisches Verhalten verfügen und sich dabei wie klassische Elastomere (Gummi) verhalten. Bei der Erwärmung der Polymere ist dann eine plastische Verformung möglich.«¹ Durch seine fast **gummiartige Struktur** ließ sich hier der auxetische Effekt des Ausdehnens sehr gut erkennen. Unsere Schlussfolgerung aus den Experimenten ist, dass sich das auxetische Phänomen zumindest mit unseren technischen Möglichkeiten nur bei dem nicht biologisch abbaubaren *TPU* umsetzen lässt. Aufgrund dieser Ergebnisse fokussierten wir uns nun vor allem auf den Aspekt der auxetischen Eigenschaften und stellten den Nachhaltigkeitsfaktor, den das Material *PLA* mit sich bringt, erstmal hinten an.

PROCESSING 3.0

Für die Arbeit wird das Programm Processing 3.0 verwendet, welches auf der Programmiersprache *Java* basiert. Processing eignet sich gut, um Strukturen zu testen und auszuwerten. Anhand des Ergebnisses lässt sich feststellen, ob die Struktur auxetisch ist oder nicht. Die Idee war es, das 3D-Modell einer Struktur selbst zu entwerfen und diese in das Programm zu importieren. Dabei wird die **Ausdehnung der Struktur virtuell simuliert**. Um dies zu zeigen, wird die Struktur in die Länge gezogen. Die Angriffspunkte sollten hierbei die Knotenpunkte der Struktur sein. Somit sollte das Programm anschaulich zeigen können, ob sich die Struktur ausdehnt oder zusammenzieht. Im Falle eines Ausdehnens würden wir eine auxetische Struktur erhalten. Dies kann dann durch die automatische Berechnung der negativen Poissonszahl belegt werden.

PROGRAMMIERUNG

Zu Beginn lag der Fokus auf der **Erstellung neuartiger Strukturen mit der Natur als Vorbild**. Processing 3.0 sollte sich eigenständig, anhand vom User eingestellten Parametern, Strukturen generieren und sie auf Eigenschaften, wie zum Beispiel auffallende Stabilität, validieren. Hier wurde mit **Kollisionserkennungen und Verbunden** gearbeitet, um unterschiedliche Strukturen zu generieren. Leider war das Ergebnis nicht zufriedenstellend, da die generierten Strukturen sich nicht verbinden ließen und deshalb nicht druckbar waren (s. Abb. 4). Des Weiteren hätte eine sogenannte *Künstliche Intelligenz* (KI) programmiert und eingebunden werden müssen, welche die Struktur auf spezielle Eigenschaften untersucht.

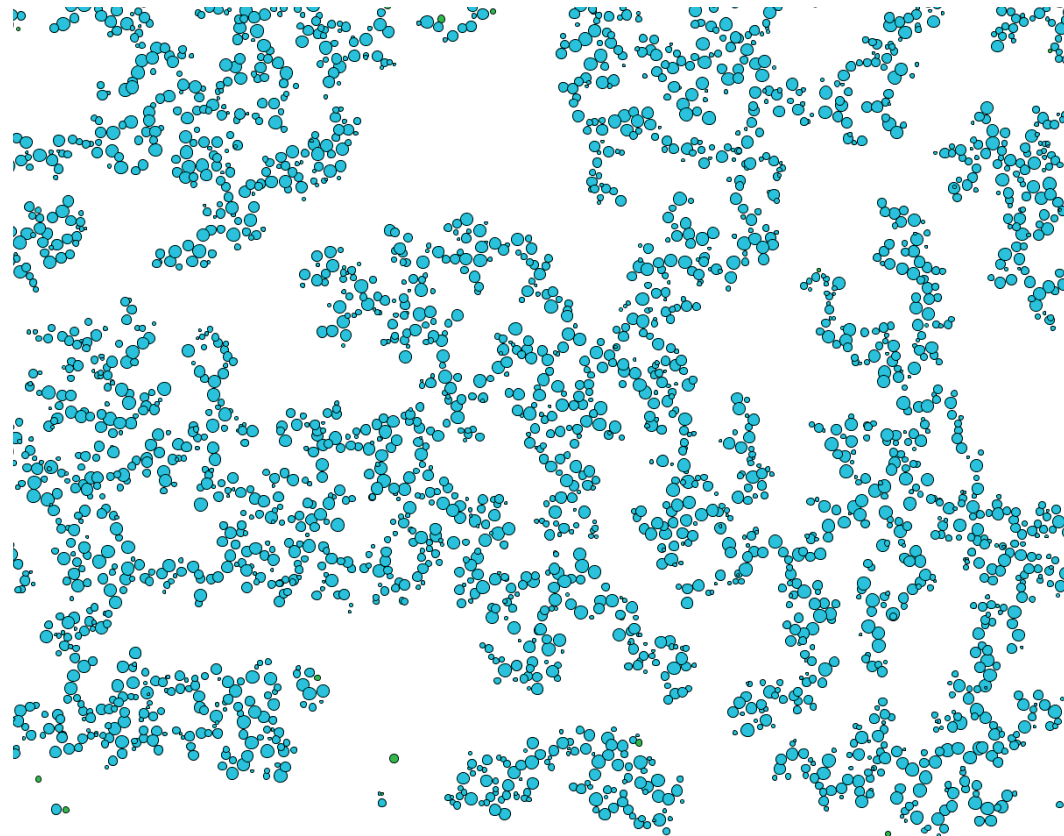


Abb. 4

Fehlende »KI«

Im nächsten Schritt wurde auch an die zukünftige Umsetzung gedacht und zu Beginn Strukturen gezeichnet, um eine Vorstellung zu bekommen, wie das Ergebnis aussehen könnte (Abb. 5). Denn das Ziel hinter der Strukturentwicklung war es, ein Produkt zu kreieren, welches **aufgrund der neuen Struktur verbessert** wird. Am Anfang lag der Fokus vor allem auf der Wabenstruktur und wie man diese neu anordnen könnte, um ihre Eigenschaften weiterzuentwickeln. » Wir haben uns für diese Struktur entschieden, da sie sich durch **enorme Stabilität** auszeichnet. Die Wabenbauten der Bienen weisen eine extrem hohe Stabilität auf und besitzen gleichzeitig ein äußerst geringes Gewicht. Belastungen werden über die Wabenwände auf den gesamten Wabenbau verteilt und wirken somit nicht punktuell. Die sechseckigen Waben verleihen der Konstruktion ihre Stabilität. «¹ Jedoch besitzt so eine stabile Struktur fast keine Flexibilität. In Abb. 5 versuchten wir, **die Flexibilität der Wabenstruktur mit Dreiecken und einem neu angeordneten Versatz zu erhöhen**.

Wabenform neu zusammengesetzt

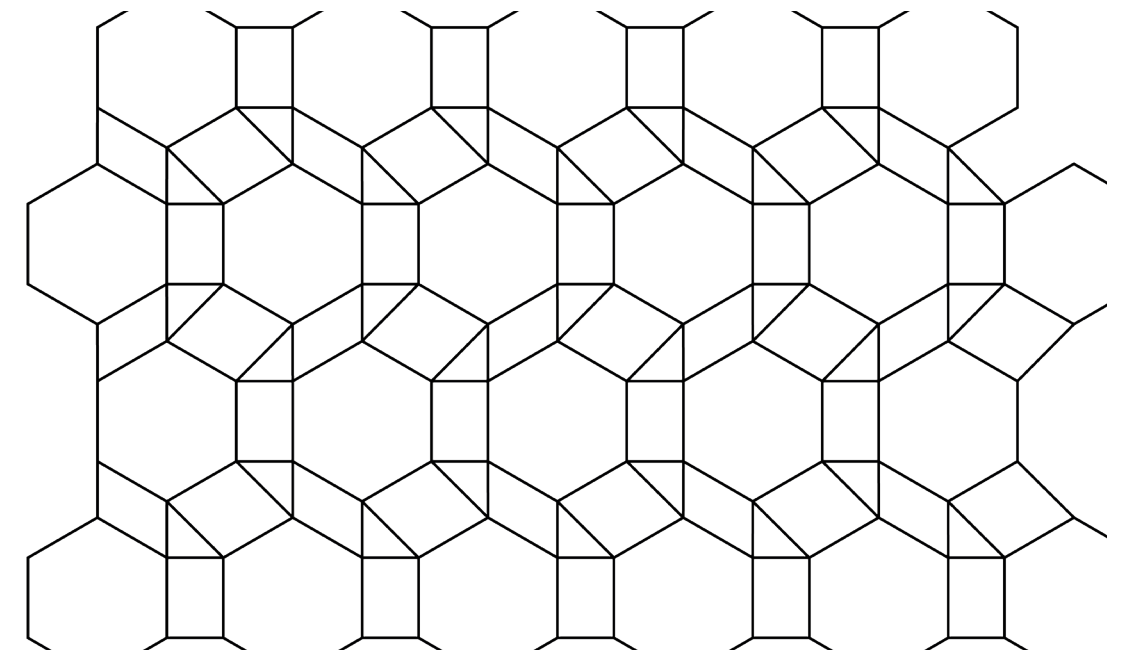


Abb. 5

Danach sollten die Skizzen in Processing 3.0 umgesetzt werden, um durch *generative Gestaltung* mehr Vielfalt in unsere Strukturen zu bekommen. Zu Beginn wurde ein Algorithmus geschrieben, der eine einfache Wabenstruktur in Processing 3.0 eigenständig zeichnet (Abb. 6). Diese Struktur passt sich der vorgegebenen **Größe des Fensters automatisch** an und berechnet wie viele Waben gezeichnet werden müssen.

Im nächsten Schritt sollten die Waben mit Versatz angeordnet werden, um neue Strukturen zu finden. Des Weiteren musste die Struktur in einem dreidimensionalen Raum umgesetzt werden, um sie später mit dem 3D-Druck anfertigen zu können. Dabei gab es mehrere Probleme. Es war nicht einfach, die Waben in den Raum zu setzen, da jede Wabe **einzel**n angeordnet werden musste. Dabei war es wichtig zu verstehen, wie ein dreidimensionaler sechseckiger Körper aussieht. Dieser Körper musste daraufhin zu einer gleichmäßigen Struktur innerhalb eines Rasters auf der x-, y- und z-Achse angeordnet werden (Abb. 7).

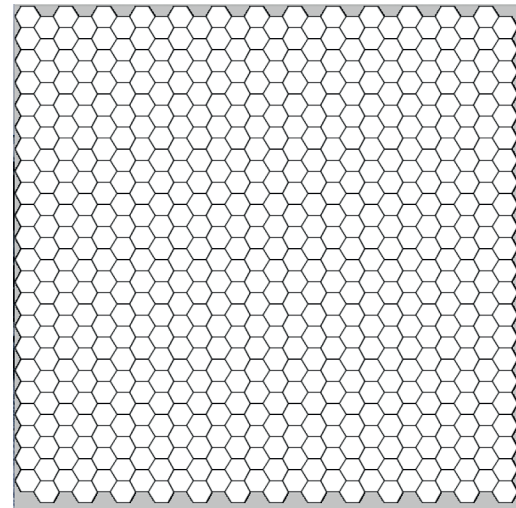


Abb. 6

Um diesen Schritt durchzuführen, war Recherche notwendig und dabei stießen wir auf die sogenannten **Platonischen Körper**.² »Platonische Körper, nach dem griechischen Philosophen Platon benannt, sind Polyeder (»Vielflächner«) mit größtmöglicher Symmetrie. Jeder von ihnen wird von mehreren kongruenten Ebenen mit regelmäßigen Vielecken begrenzt.«³ Bei diesen Körpern fiel besonders auf, dass man sie auf unterschiedlichste Art und Weise an-

ordnen und kombinieren kann, um Strukturen zu entwickeln. Da die Wabenform (sechseckig) allerdings in den bekannten Platonischen Körpern nicht vorkommt, wurde dieser Ansatz nicht weiterverfolgt. Stattdessen entschieden wir uns für die **Entwicklung einer Struktur basierend auf dem Körper Dodekaeder** (Abb. 8) – Flächen mit Fünfecken – fortzusetzen.

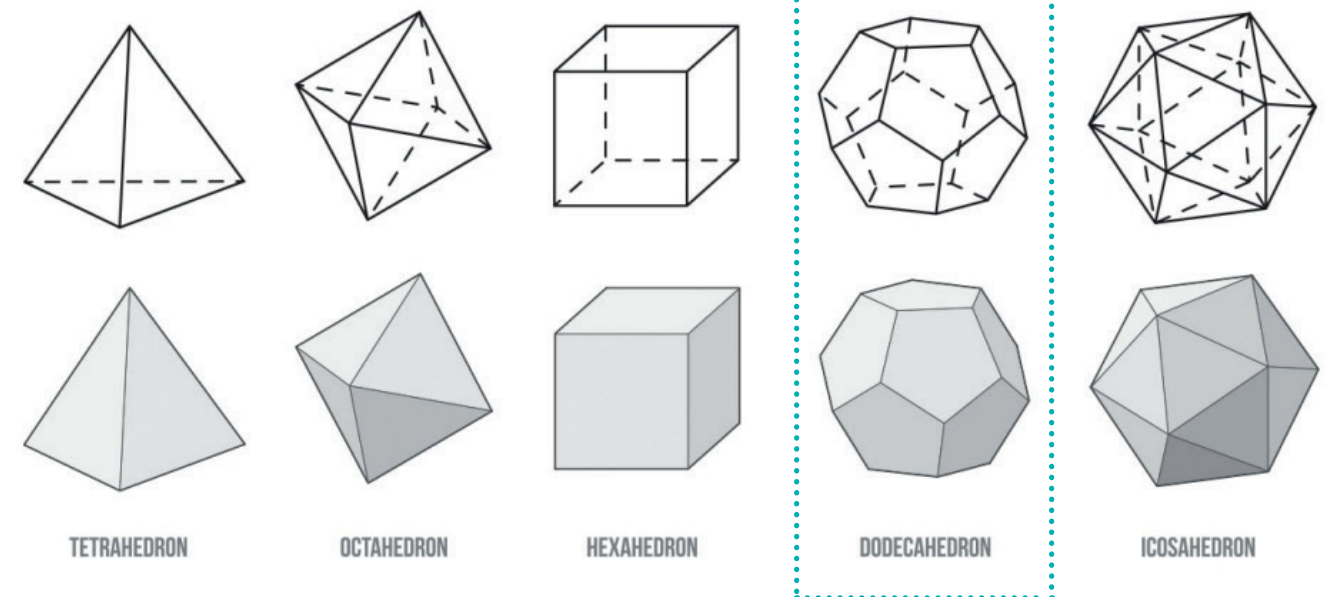


Abb. 8

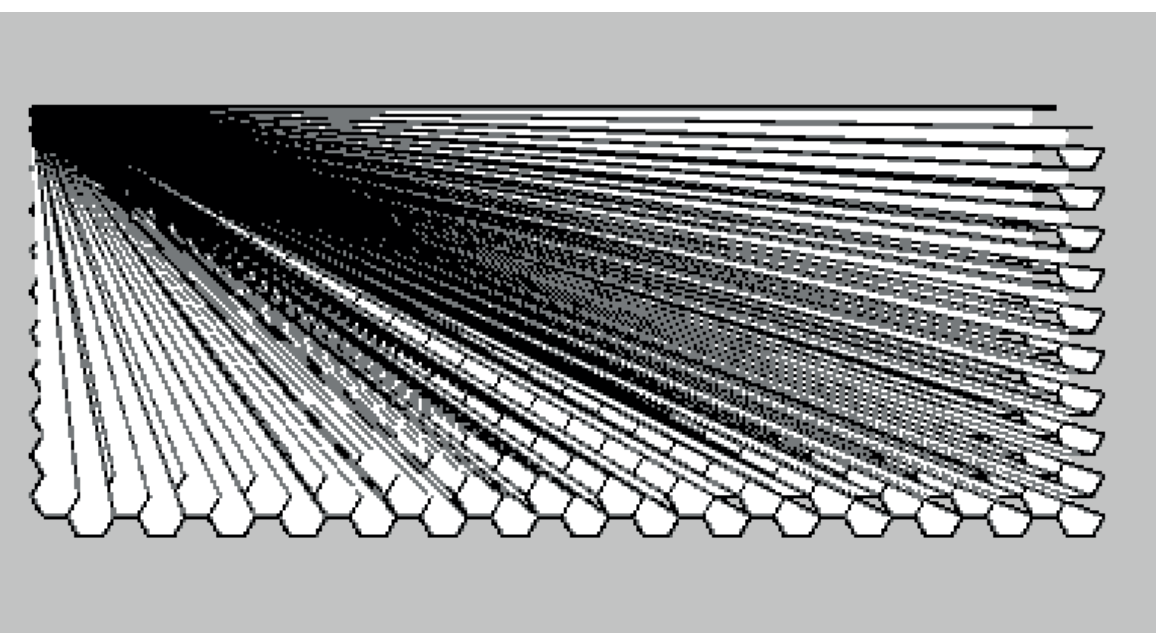


Abb. 7

Erforschung der Dreidimensionalität von Sechsecken

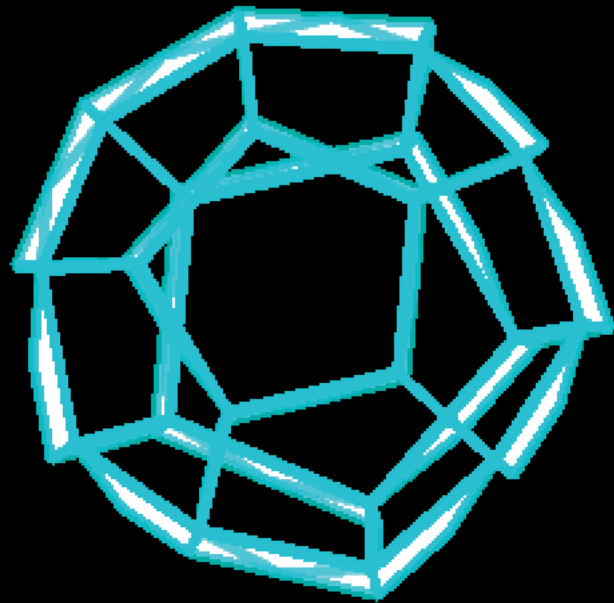


Abb. 9

Dies musste anschließend in Processing 3.0 umgesetzt werden, wobei die Dreidimensionalität eine große Herausforderung darstellte. Das Problem dabei war vor allem, dass wir die Platonischen Körper selbst berechnen mussten, um diese in dem Processing-Tool codetechnisch eingeben zu können. Hierbei bereitete uns das **Verständnis für die Tiefe des Körpers und der Regelmäßigkeit seines Aufbaus** Schwierigkeiten. Auf der Suche nach den mathematischen Hintergründen des Dodekaeders fanden wir ein Script, welches das Dodekaeder und andere platonische Körper zeichnet.⁴ Dieses wurde in den Code eingebunden und an unser Projekt angepasst (Abb. 9). Ein großes Problem dabei war es, die Konturen festzulegen, da ein Hohlkörper mit Konturen zur Strukturbildung benötigt wurde. Des Weiteren musste **die Kontur eine gewisse Tiefe** haben, um diese später drucken zu können. Jedoch erkannte der Code in diesem Fall nur die Flächen des Körpers, aber nicht seine Kontur. In Abb. 10 sieht man das Ergebnis, das uns leider erneut in eine Sackgasse führte. Zur gleichen Zeit wurde Recherche betrieben, wie man die Strukturen aus Processing 3.0 am Besten exportiert, um diese drucken zu können.

Die Objekte werden durch den *.obj-Export* exportiert und sind dann grundsätzlich druckbar. Um das Problem mit den flachen Konturen zu umgehen, war unser Lösungsansatz die Objekte in das 3D-Programm *Maya* von Autodesk zu importieren und dort die Konturen im Nachhinein zu verdicken. Leider fiel hier bald auf, dass Processing 3.0 den Körper auf eine eigene Art zeichnet und diese deswegen nicht ohne weiteres angepasst werden kann. Denn die einzelnen Konturen entstehen aus den Flächen des Körpers und werden nicht extra von Processing 3.0 gezeichnet. Dies bedeutet, dass wir den Code abändern mussten, sodass die Konturen auch wirklich gezeichnet werden.

Struktur blieb aufgrund der flachen Kontur undruckbar.

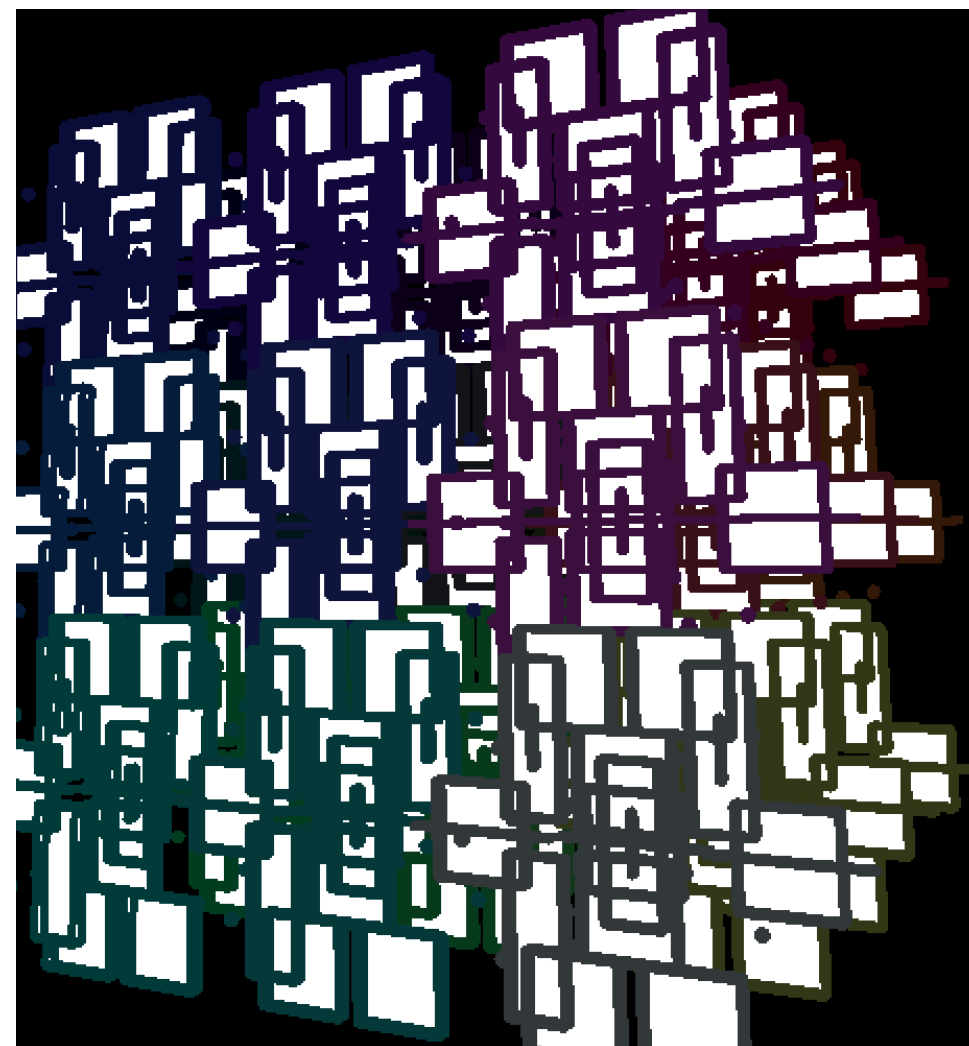


Abb. 10

Mit unserer **Weiterentwicklung** des Themas hin zu auxetischen Materialien konnten wir neue Ansätze bei der Strukturentwicklung verfolgen. Wir versuchten aus geometrischen Formen auxetische Strukturen zu erschaffen (Abb. 11). In folgendem Beispiel experimentierten wir erneut mit der Wabenform. Unser Ziel war es, möglichst viele und unterschiedliche Strukturen zu erschaffen und diese dann mit Processing 3.0 auf die **potentielle Auxetik** zu prüfen.

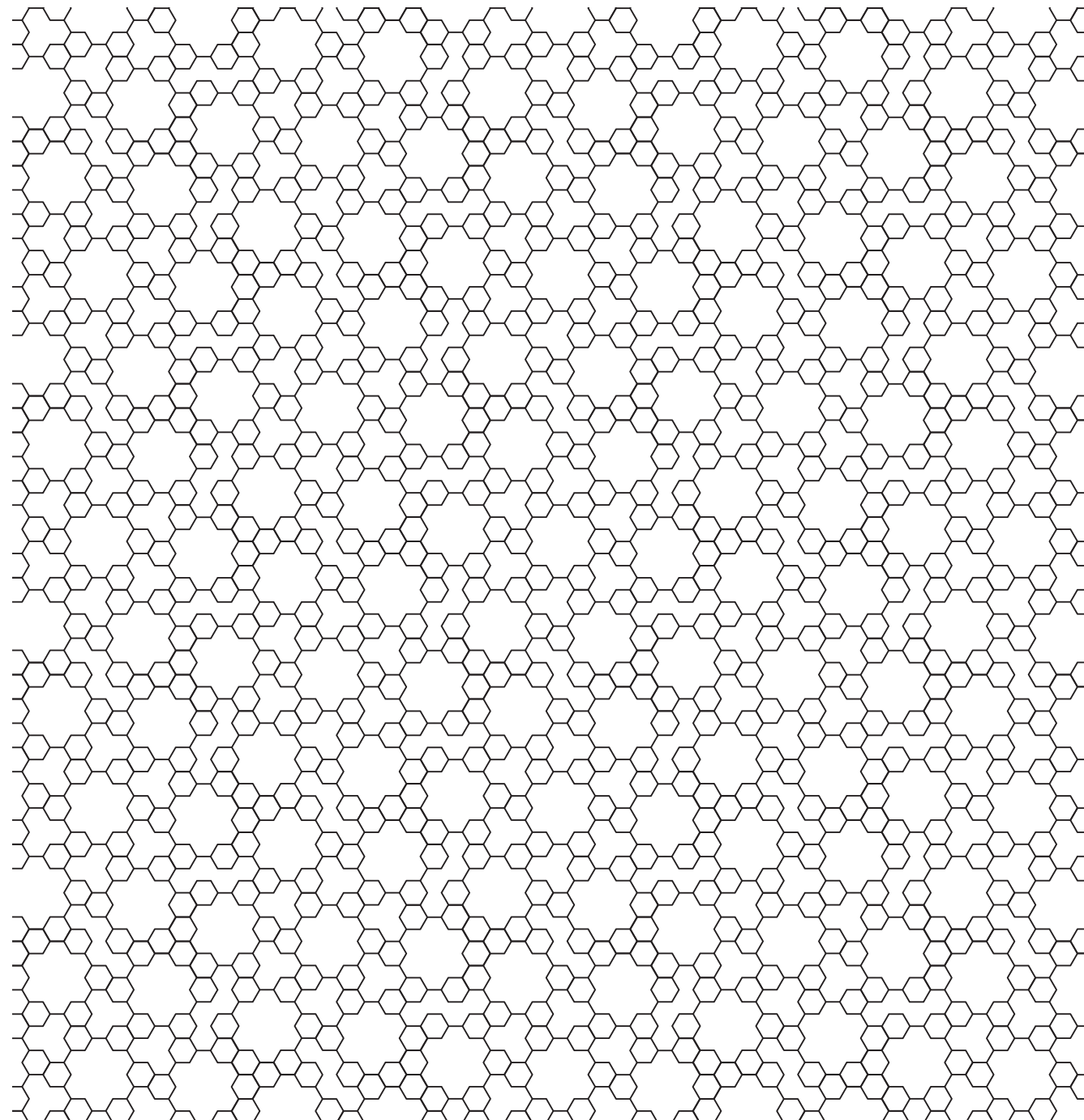


Abb. 11

Dafür mussten wir die Strukturen in mit dem Programm *Maya* in 3D umwandeln. Nach kleineren Rückschlägen, wie zum Beispiel der Import der Datei von Adobe Illustrator nach *Maya*, konnten wir schließlich die 3D-Strukturen im *.obj-Format* exportieren. Nun mussten diese in Processing 3.0 importiert werden. Das Programm musste zuerst die Dateien nachzeichnen. Hierfür gab es **mehrere Umsetzungsoptionen**, welche wir zu Beginn erforschten, um den effizientesten Weg herauszufinden. Denn jedes 3D-Programm verarbeitet Formen anders, zum Beispiel kann das Objekt entweder aus vielen kleinen Dreiecken oder Quadraten bestehen. Das hat zur Folge, dass man bei den Zeichenmöglichkeiten von Processing 3.0 entweder drei Punkte (Dreieck) oder vier Punkte (Quadrat) miteinander verbinden muss, um eine Fläche oder in unserem Fall eine Kontur nachzubilden. Daraus folgte, dass wir das Programm so umgeschrieben haben, dass man im Nachhinein die Zeichenstile anpassen kann, um den bestmöglichen Stil zu finden. Wichtig war vor allem, dass das Objekt richtig wiedergegeben wird und keine Fehler entstehen.

Ist diese Struktur nachweislich auxetisch?

Wie kann das am einfachsten bewiesen werden?

04 PROBLEMSTELLUNG

Als nächstes sollte eine **physikalische Zugkraft** simuliert werden. Welche von Anfang bis Ende in ihrer Intensität abnehmend verlaufen müsste, sodass die Struktur in die Breite gezogen wird, um den auxetische Effekt feststellen zu können. Hierfür mussten wir gewisse Aspekte beachten und im Code einbauen:

Wie weit dürfen die Linien auseinandergezogen werden, damit die Form erhalten bleibt und nicht auseinanderbricht?

Entsteht eine Elastizität?

Wie sind die einzelnen Knotenpunkte miteinander verbunden?

Wie stark nimmt die Zugkraft von Knotenpunkt zu Knotenpunkt ab?

Was passiert, wenn das Maximum an Dehnung erreicht ist?

Wie berechnet man aus dem Ergebnis die Poissonzahl?

Für jede dieser Fragen wurde der Code angepasst und erweitert, um das gewünschte Ergebnis zu erhalten. Die Ausdehnung und die Berechnung der Zugkraft waren für uns schwierig umzusetzen, da wir wenige Informationen hatten, welche physikalischen Kräfte wirken. Deshalb experimentierten wir zunächst mit einem Würfel anstatt einer Struktur, um die Kräfte besser zu verstehen. Dabei war vor allem **der Zusammenhalt der einzelnen Knotenpunkte eine große Herausforderung**, da die simulierte Zugkraft immer den gesamten Würfel und dessen Knotenpunkte auseinanderriss. Um das Problem zu lösen, mussten wir für jeden einzelnen Knotenpunkt die Benachbarten definieren und sie so miteinander verbinden, dass sie zusammenblieben. Nun hatte jedoch die simulierte Zugkraft **keine Wirkung** mehr, da durch die Verbindung aller Punkte keine Bewegung mehr zustande kommen konnte. Deshalb mussten wir eine minimale Elastizität einbauen, damit sich der Würfel wieder etwas verformt. Dies Verformung wird in Abb. 12 und 13 gezeigt.

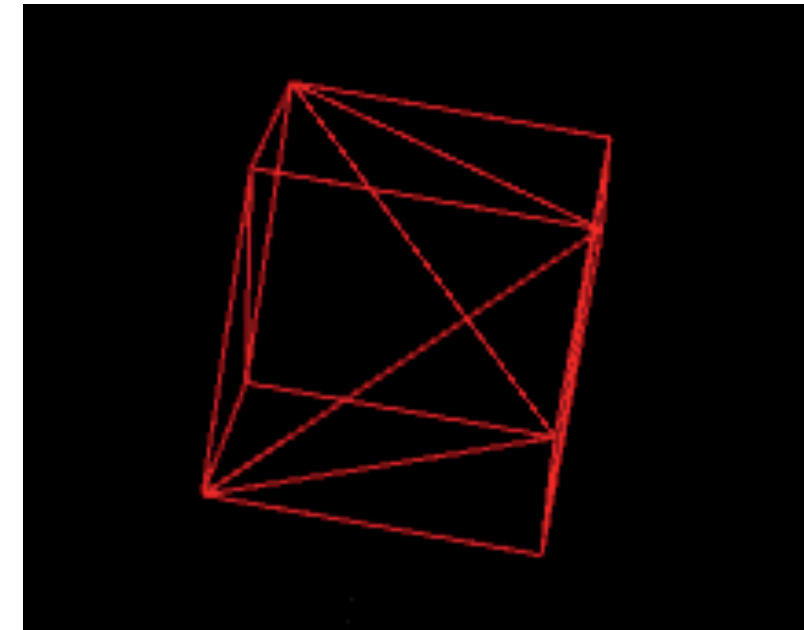


Abb. 12

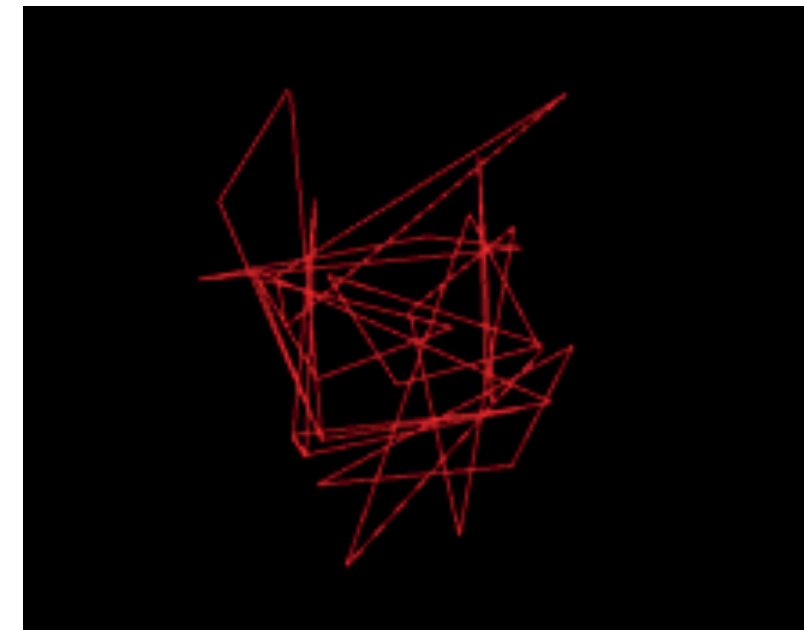


Abb. 13

Leider konnten wir die Anwendung aufgrund von Zeitmangel nicht mit Strukturen testen. Des Weiteren wäre die Programmierung des Testprogramms auf zweidimensionale Strukturen ausgelegt gewesen, welche für die Herstellung von auxetischen Materialien meist wenig relevant sind. Für ein in der Realität auch praktisch nutzbares Testprogramm müsste man die Simulation der Zugkräfte und die Berechnung der Poissonzahl **auf komplexe dreidimensionale Strukturen** anwenden können. Da eine solche Umsetzung entsprechendes **wissenschaftliches sowie informatisches Know-how** erfordert, war für uns der Versuch, ein Testprogramm für auxetische Strukturen zu erstellen, an diesem Punkt abgeschlossen. Für die weitere Produktentwicklung wurde mit bisherigen Forschungsergebnissen der Fraunhofer-Gesellschaft auf diesem Gebiet weitergearbeitet.

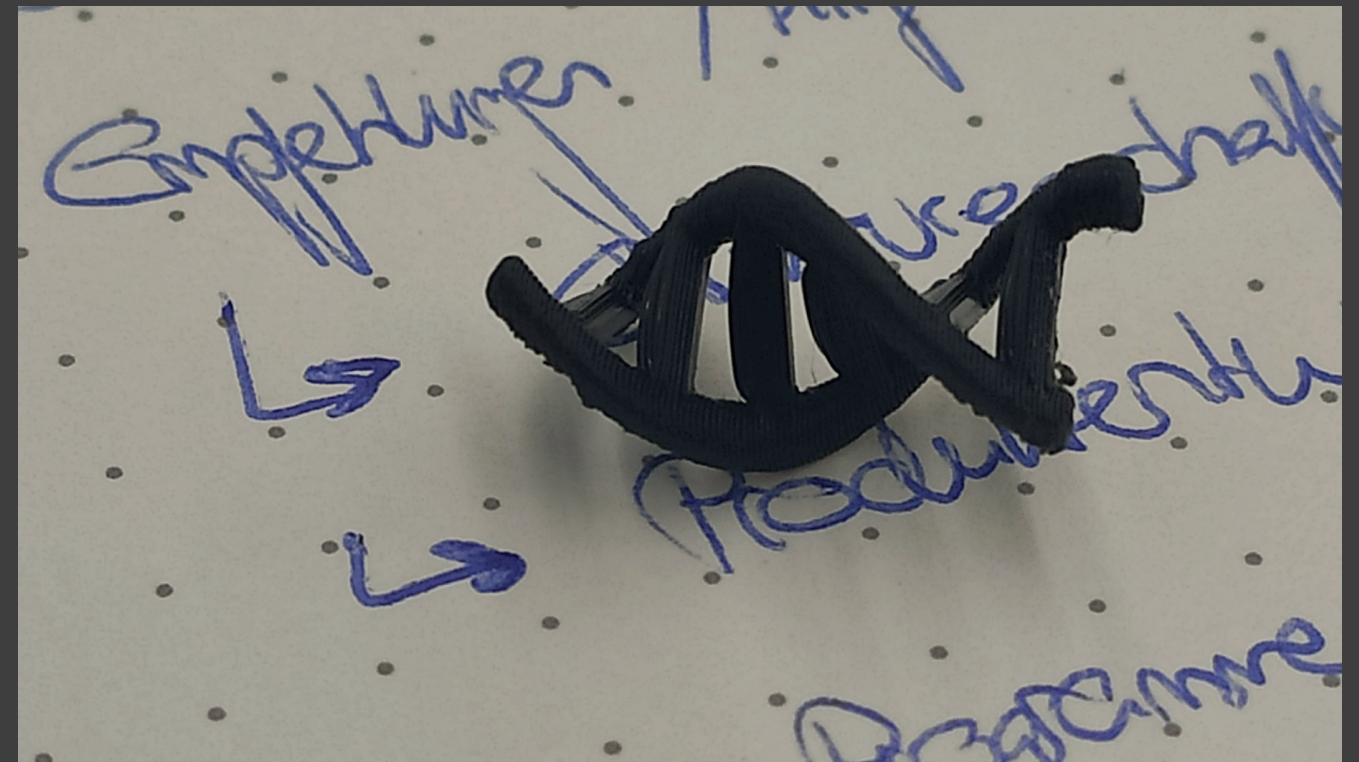
3D-DRUCK

Durch den hauseigenen 3D-Drucker hatten wir die Möglichkeit, die erstellten Strukturen zu drucken. Der Drucker stammt von der Marke Creality aus China und das Modell CR-10 Max ermöglicht es große Objekte zu drucken (450x450x470 mm). Zu Beginn mussten wir uns einige Zeit mit dem Gerät auseinandersetzen, **um das 3D-Druckverfahren zu erlernen**. Um uns das technische Know-how anzueignen, experimentierten wir mit vorgefertigten 3D-Modellen. Als Filament wurde zunächst *PLA* benutzt.

Wie man erkennen kann, waren diese Drucke erst **nicht sehr erfolgreich** (Abb. 14). Leider war das Justieren der Druckplatte schwieriger als erwartet, da man die vier Drehschrauben an den Ecken der Druckplatte exakt so einstellen musste, dass die Platte im vollkommenen Gleichgewicht auflag. Nach längerem Probieren schafften wir es, die Platte auszugleichen und den ersten erfolgreichen Druck anzufertigen. Dabei stellten wir fest, dass Überhänge im Objekt **von über 45 Grad** mit diesem Modell nicht druckbar sind.



Abb. 14



Überhänge über
45 Grad nicht druckbar

Erste Druckversuche

04 PROBLEMSTELLUNG

Als nächstes wollten wir herausfinden, wie der Drucker mit **Hohlräumen** in den Objekten umgeht. Dafür haben wir ein Objekt gedruckt und den Druck bewusst früh abgebrochen, um das Ergebnis festzuhalten. Hierbei stellten wir fest, dass der Drucker Hohlräume **mit Hilfe von Stützmaterial** herstellt (Abb. 15).

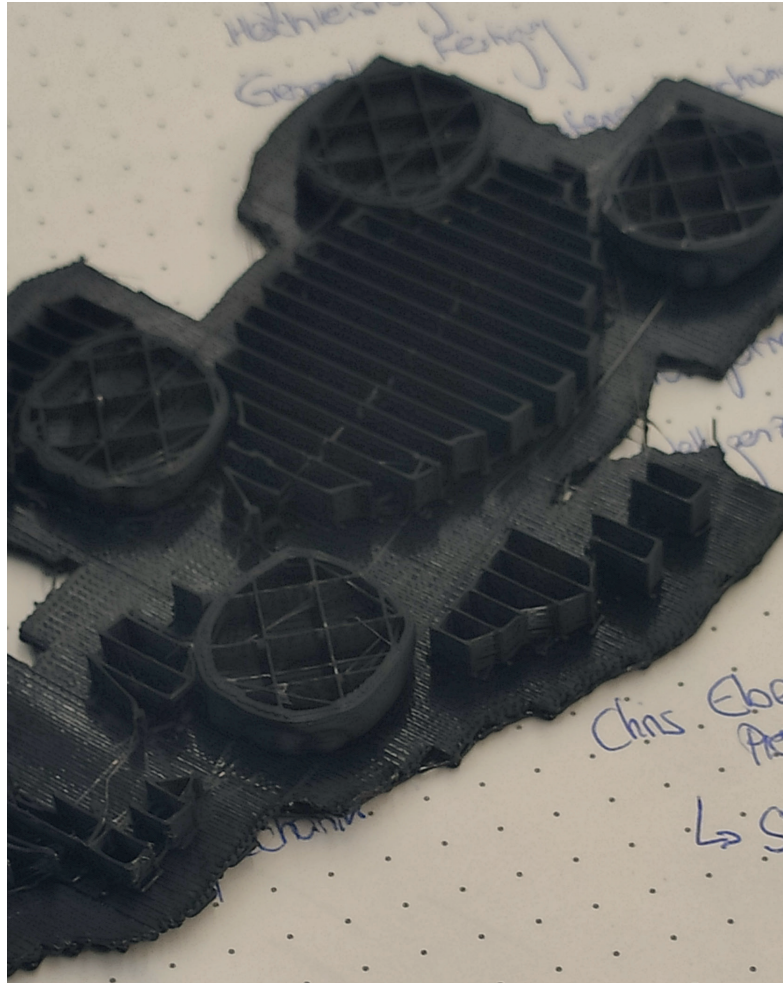


Abb. 15

Nach diesen Erfolgen versuchten wir erstmals, eine filigrane Struktur zu drucken, um die Präzision des Druckers zu ermitteln. Dafür suchten wir ein Objekt mit feinen Strukturen aus. Wir entschieden uns für eine Vase, die wir in einem besonders kleinen Maßstab (circa 5 cm) druckten (Abb. 16). Wie man sehr gut sehen kann, funktionierte der Druck ohne Probleme. **Die Präzision war allerdings ernüchternd.** Durch dieses Experiment erkannten wir, dass die Präzision erheblich abnimmt, wenn kleine, filigrane Strukturen gedruckt werden. Vor allem der Druck diagonal in die Höhe bereitet dem Drucker Schwierigkeiten.

Ergebnis



mangelnde Präzision

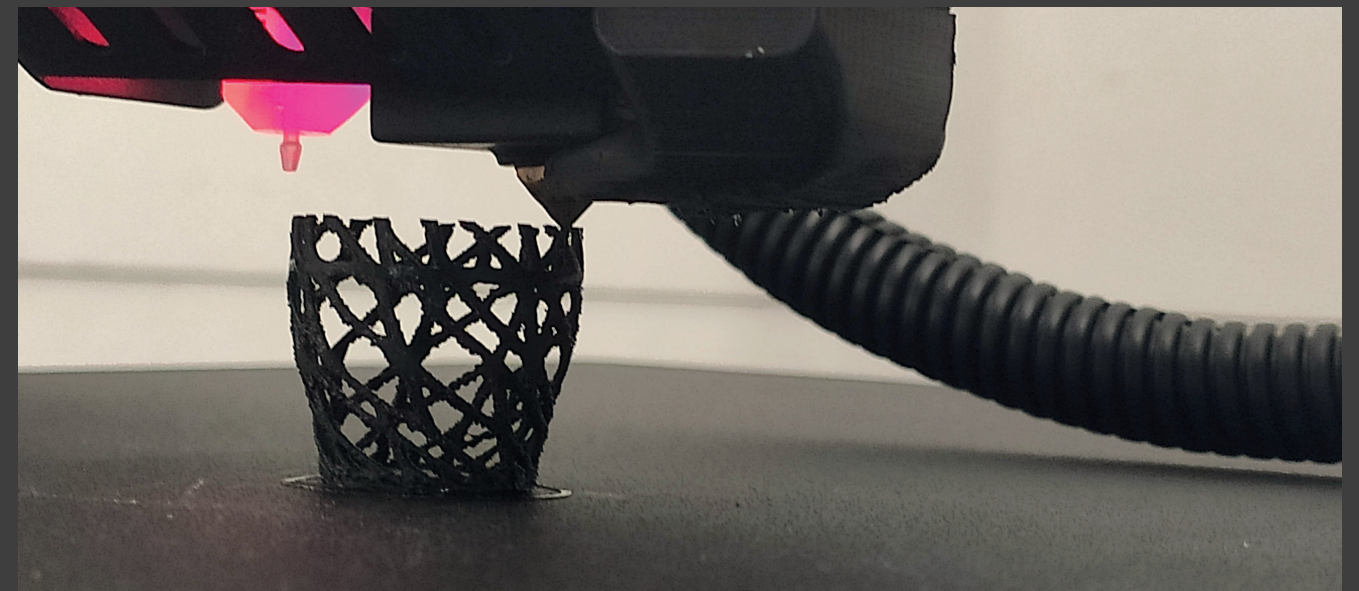


Abb. 16

Danach versuchten wir ein durch Processing 3.0 kreierte Objekt (Dodekaeder) zu drucken (Abb.17). Leider musste dieser Druck **abgebrochen** werden, da die Kontur des Dodekaeders sich nach außen bog und der Drucker ab einem gewissen Zeitpunkt in die Luft druckte. Damit war klar, dass es mit dieser Methode **nicht möglich war**, solche Strukturen zu drucken. Aus diesem Grund recherchierten wir, wie das Problem umgangen werden könnte, und fanden bei dem Designer Eric Esser eine Lösung. (Abb.18)

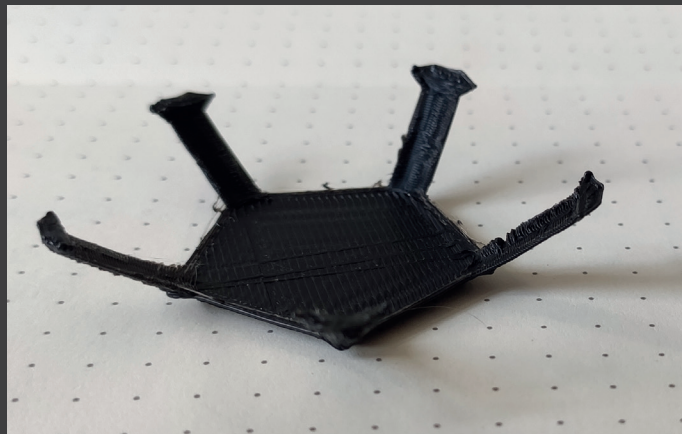


Abb. 17

Konturen zu
filigran

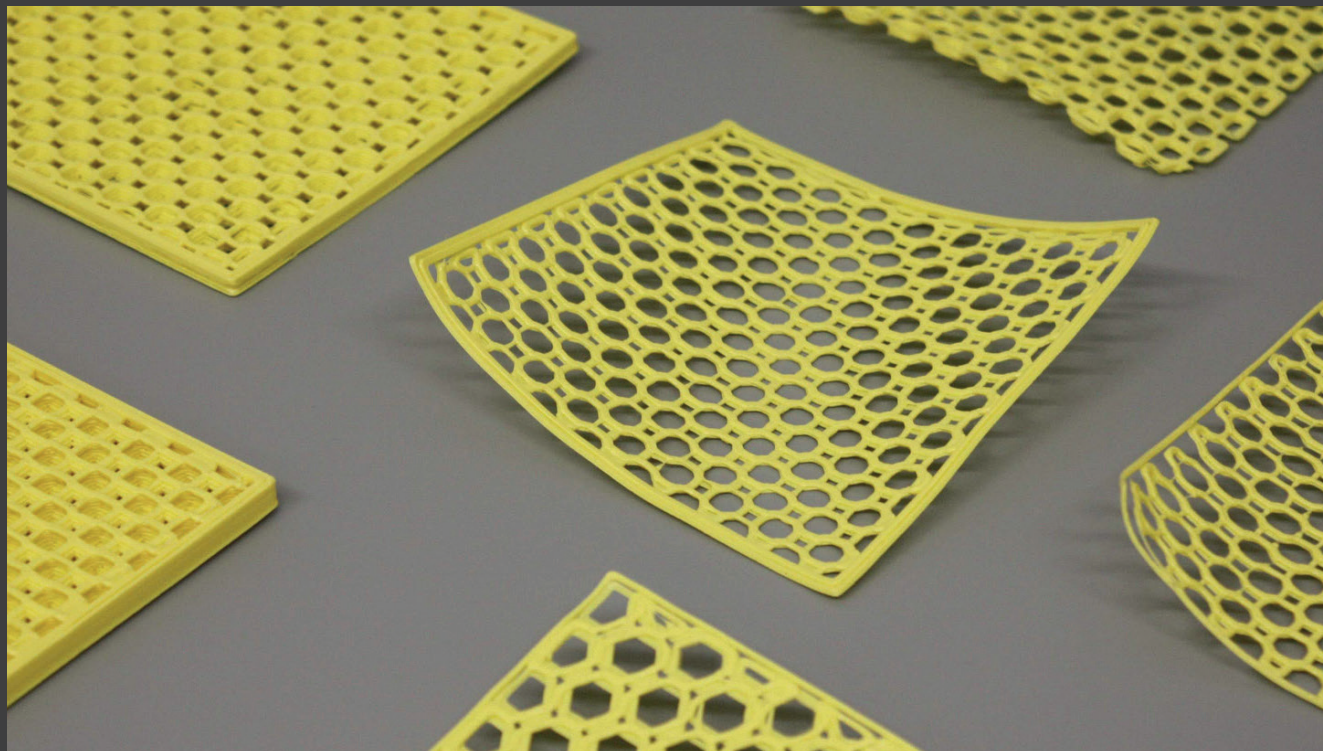


Abb. 18

Wie man hier sehen kann, wurden die Strukturen nicht in die Höhe konstruiert, sondern **flach auf die Platte** gedruckt. So lösten wir das Problem mit der mangelnden Präzision. Im nächsten Schritt wurden neue (schon vorgefertigte) Strukturen gedruckt, welche unter dem Namen *Auxetische Materialien* bekannt sind (Abb.19). Zunächst wurde mit dem Filament *PLA* in zufriedenstellender Qualität gedruckt. Danach versuchten wir, mit dem Material *TPU* zu drucken, um flexiblere Objekte zu

erhalten. Dabei kam es wiederum zu Problemen, da das Material sehr weich ist und den *Extruder* des Druckers immer wieder verstopfte. Nach mehreren Versuchen und einiger Recherche erfuhren wir, dass dieses Material eine **sehr geringe Druckgeschwindigkeit** braucht, um das Problem zu umgehen. Dies bedeutet, dass die übliche Geschwindigkeit von 100-130 mm/s auf 30 mm/s reduziert werden muss. Der Druck von *TPU* benötigt also viermal so lang wie ein herkömmlicher Druck mit *PLA*.

Da es mit dem vorhandenen Drucker **nicht möglich war**, Strukturen im Mikrobereich zu drucken, wurde unser ursprünglicher Plan, ein Produkt mit auxetischer Struktur zu drucken, verworfen. Wir entschieden deshalb, die Funktionsweise unserer Idee anhand **des Ablaufs der Formveränderung in mehreren Schritten** darzustellen.

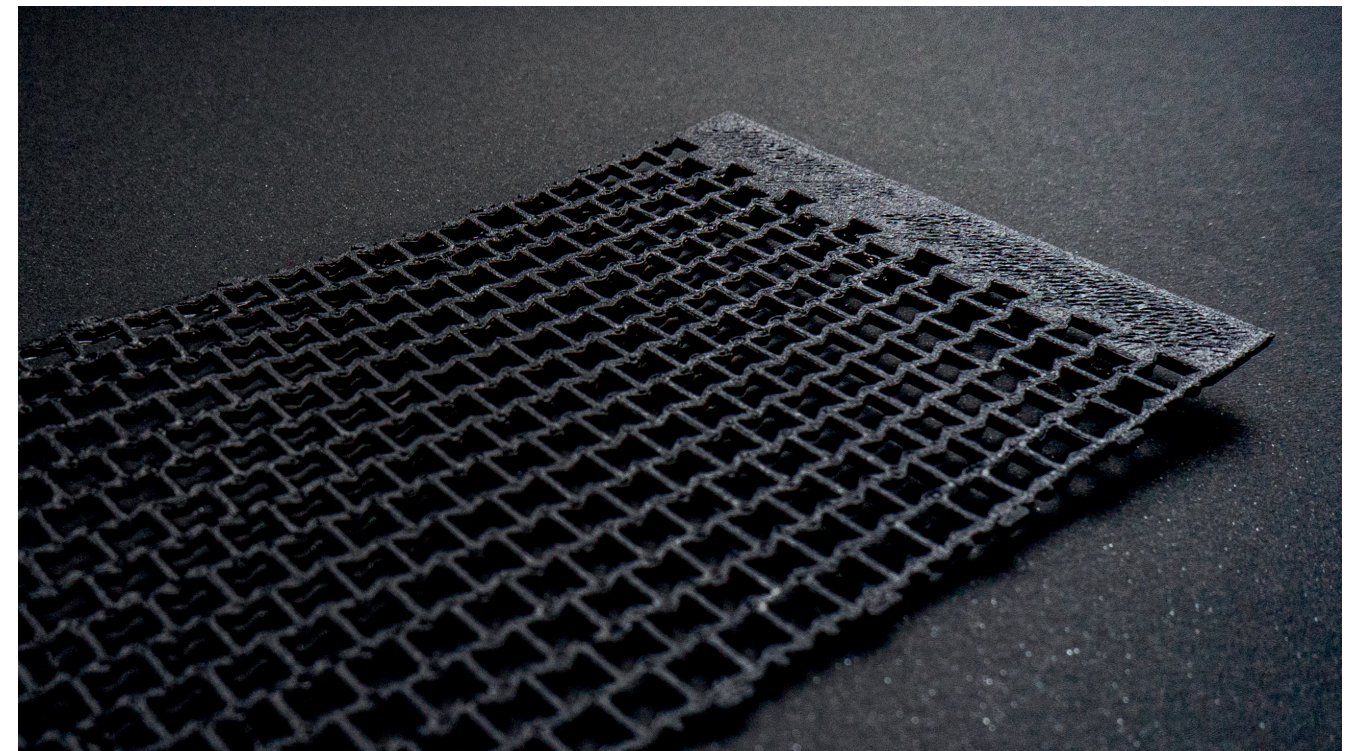


Abb. 19

STRUKTURENTWICKLUNG VON 2D IN 3D

Um eine geeignete Anwendung für die auxetischen Strukturen zu finden, analysierten wir alle bereits erforschten Eigenschaften. Unser Ziel war es, **von der Struktur ausgehend** eine Produktidee herzuleiten. Nach fortgeschrittener Recherche wurde klar, dass es mit auxetischen Strukturen, die nur linear – also in zwei Dimensionen – verlaufen, **beinahe unmöglich ist**, eine Umsetzung zu realisieren.

Die meisten Produkte, die sich die Auxetik zunutze machen, werden mit komplizierten 3D Strukturen hergestellt. (Abb. 21). » Viele zelluläre auxetische Strukturen sind anisotrop, das heißt sie weisen den auxetischen Effekt nur richtungsabhängig auf. **Das Finden von dreidimensionalen, richtungsunabhängigen auxetischen Strukturen ist daher von großem Interesse.**«¹

Die einzelnen Einheiten werden so zusammengefügt, dass ein Material entsteht. Aufgrund der **Komplexität** dieser 3D-Strukturen, ist es für den Laien fast unmöglich eigenständig festzustellen, ob das auxetische Phänomen greift. Des Wei-

teren müsste man über **wesentlich mehr Zeit sowie spezielles wissenschaftliches Know-how** verfügen, um eine solche neue Struktur erstellen zu können. Wir haben uns deshalb für **nachfolgende alternative Lösungsansätze** entschieden.

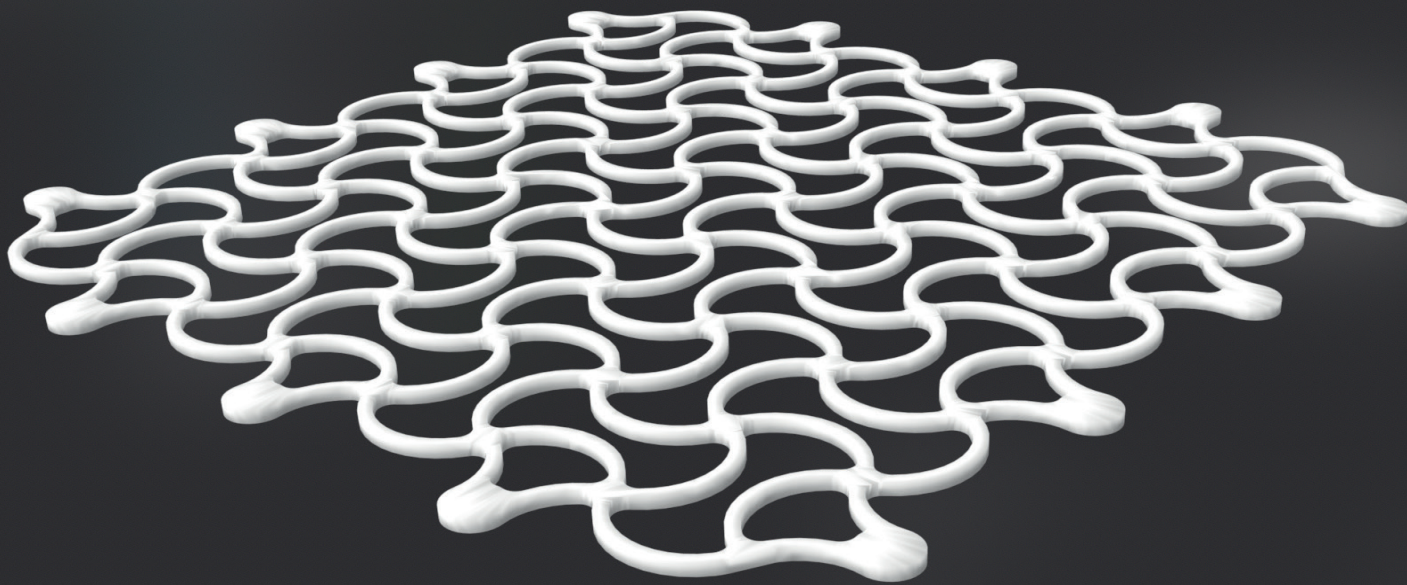


Abb. 20

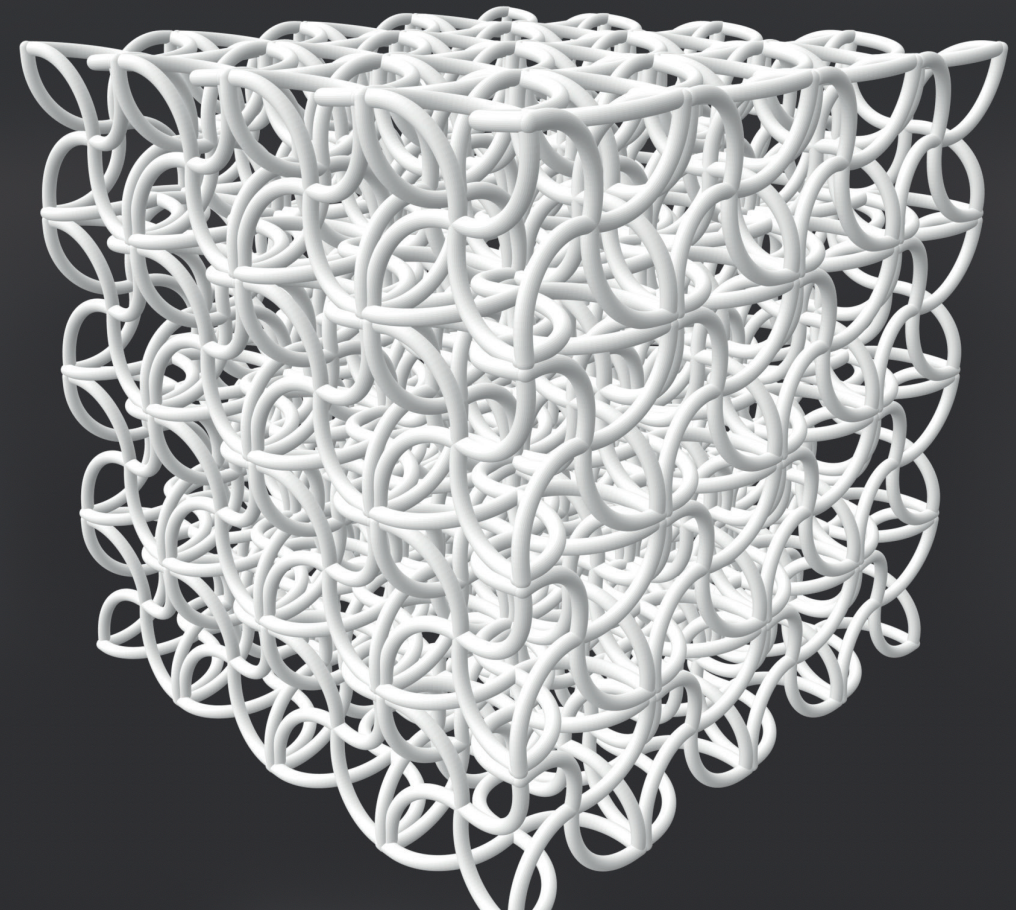


Abb. 21

PRODUKTIDEE

Die ausführlichen und informativen Interviews, die wir mit den Instituten der Fraunhofer-Gesellschaft führen durften, inspirierten uns dazu, die **bisherige Forschung mit ihren Möglichkeiten weiterzudenken**. Dabei interessierte uns besonders der **formverändernde Effekt** von Programmierbaren Materialien, da dieser in der Ausführung an den auxetischen Effekt der richtungsabhängigen Ausdehnung eines Materials erinnert. Außerdem wollten wir das ursprüngliche Thema **Alltagsgegenstand** in unser Produkt mit einfließen lassen. Um mit dem Produkt sowohl die Thematik anschaulich zu erklären, als auch etwas Nützliches mit Mehrwert zu entwickeln, erfanden wir das **Morph-Set**.

Dieses ermöglicht dem Nutzer, aus einer einfachen Gabel durch einen zugeführten Stimulus – in diesem Fall Druckausübung – ein anderes Besteckteil, wie zum Beispiel einen Löffel oder ein Messer, zu formen. Dabei verändert sich das Material **autonom und reversibel** in das gewünschte Objekt. Es ist wichtig zu erwähnen, dass das Besteck nur aus einem Werkstoff produziert wird, also keine Knöpfe oder ähnliches besitzt, und somit auch mühelos und **effizient recyclebar** ist. Des Weiteren ist die Herstellung mit einem 3D-Drucker ohne Weiteres umsetzbar. Hier könnte man das *biologisch abbaubare Filament PLA* verwenden.

Einfache Herstellung mit
3D-Druck-Technologie



INTERVIEW

FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

Um mehr über die professionellen Herangehensweisen für Produktentwicklungen zu erfahren, kontaktierten wir die Fraunhofer-Gesellschaft. Sie ist europaweit die größte Forschungseinrichtung für angewandte Wissenschaft und befasst sich unter anderem mit der Erforschung und potentiellen Anwendungsmöglichkeiten der Auxetik. Wir erfuhren, dass die Auxetik nur ein kleiner Teil eines Themenbereichs ist, der sich Programmierbare Materialien nennt.

Zunächst interviewten wir Frau Linda Weisheit. Sie ist seit ihrem Abschluss des Studiums der Werkstoffwissenschaft der TU Dresden im Bereich »Smart Materials« beim Fraunhofer Institut IWU tätig und integriert diese in Systemumgebungen bzw. optimiert das Material selbst für den jeweiligen Einsatz. Im Rahmen unserer Bachelorarbeit sprachen wir mit ihr über ihre Arbeit bei der Fraunhofer-Gesellschaft.

Was ist der Unterschied zwischen Smart Materials und Programmierbaren Materialien?

Der Hauptunterschied zwischen Smart Materials und Programmierbaren Materialien besteht darin, dass bei Smart Materials Eigenschaften ausgenutzt werden, die schon im Grundwerkstoff selbst vorhanden sind, also zum Beispiel Phasenumwandlungsphänomene bei Formgedächtnislegierungen. Bei den Programmierbaren Materialien geht man noch einen Schritt weiter und programmiert die gewünschte Eigenschaft durch eine innere Struktur. Die Strukturen sind bei mechanischen Metamaterialien eigenschaftsgebend. Es gibt auch schon Beispiele für Metamaterialien, die aus Formgedächtnispolymeren gedruckt wurden. Des Weiteren versuchen wir, Metamaterial aus Formgedächtnislegierungen zu drucken, sodass man reaktive Programmierbare Materialien erhalten kann.

Was sind die maßgeblichen Ziele Ihrer Forschung?

Ziel ist es, die Funktionsvielfalt von Produkten noch weiter zu erhöhen, weil auch die Anforderungen immer größer werden. Um die Systeme nicht noch komplexer zu machen, versuchen wir die Funktionen noch weiter in die Materialebene hineinzu bringen. Das führt zu Gewichtseinsparung, Bauraumeinsparung oder Komplexitäts senkung. Aber auch der Hintergrund Recycling ist ein ganz wichtiger Aspekt, da man keine Materialverbunde mehr herstellen muss, sondern unter Umständen allein durch die innere Struktur ein und desselben Werkstoffs Eigenschaften erzielt, die man sonst vom Materialverbund bekommt. Das vereinfacht das nachträgliche Recycling. Ziel ist es, das Bauteil aus möglichst wenigen Werkstoffen herstellen zu können.

Des Weiteren arbeiten wir an der Individualisierbarkeit von Produkten, sodass man nachträglich eine individuelle Funktionalität programmieren kann. So entsteht zum Beispiel ein individualisierter Innenraum. Ich kann also das Auto auf jeden Fahrer entsprechend umprogrammieren, das heißt die Anordnung der Knöpfe so ändern, damit sie auf dessen Ergonomie angepasst ist. Ebenso kann die Form beispielsweise eines Stuhls oder Bettes auf den Nutzer abgestimmt werden. Die mechanischen Metamaterialien sind nur ein Teil des Fraunhofer Clusters. Wir gehen auch über chemische Programmierbarkeit, zum Beispiel beim programmierbaren Stofftransport. Auch Wärmetransport ist vor allem für Batteriekühlung und Gebäudeklimatisierung ein Thema. Zudem untersuchen wir die Möglichkeit, Reibeigenschaften gezielt zu verändern.

Welchen Ansatz verfolgen Sie von der Forschung bis hin zur Produktentwicklung?

Grundlagenforschung ist wichtig. Wir versuchen bei den mechanischen Materialien systematisch herauszufinden, welche Geometrien Einfluss auf die Einheitszellen haben. Zum Lernen und Erforschen von Einflussfaktoren ist es wichtig, Verschiedenes auszuprobieren, zu simulieren und zu kombinieren. Aber man sollte von Anfang an vom Produkt ausgehen und eine genaues Anforderungsprofil erstellen.

Im April 2020 findet eine Konferenz über dieses Themengebiet statt.

Das ist eine internationale Konferenz. Wir haben Sprecher aus aller Welt von der Forschung bis zur Industrie. Es ist mehr oder weniger der erste Aufschlag in den Grundlagen zwischen Wirtschaft und Forschung. Wir planen auch, Vorträge zu Produktentwicklungen zu präsentieren. Beispielsweise wird auch die Kunsthochschule Weißensee vertreten sein. Es wird noch nicht so richtig um Produkte mit Programmierbaren Materialien gehen können, weil wir einfach noch nicht so weit sind, sondern eher um die Vision: was wäre wenn?

INTERVIEW

FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

Danach durften wir noch ein weiteres ausführliches Interview mit Herrn Marius Specht, einem Mitarbeiter des Fraunhofer Instituts IWM, führen. Er ist durch sein Studium der Materialwissenschaften darauf spezialisiert, welche Eigenschaften ein Material hat und für welchen Zweck es sich eignet. Wir sprachen mit ihm über seine Arbeit bei der Fraunhofer-Gesellschaft sowie über Zukunftstechnologien.

Wie viele Strukturen mit besonderen Eigenschaften wurden bisher entwickelt?

Wir arbeiten innerhalb des sogenannten Fraunhofer Cluster of Excellence an Programmierbaren Materialien. Das Cluster besteht aus sechs Kern-Fraunhofer-Instituten, die vor zwei Jahren angefangen haben sich mit dem Thema zu befassen. Mittlerweile sind wir allerdings schon 14 Institute, die innerhalb des Clusters zusammenarbeiten. Mit dieser fachübergreifenden Zusammenarbeit wollen wir dem klassischen Konkurrenzdenken entgegenwirken. In diesem Cluster gibt es etwa 20 Projekte, die gleichzeitig laufen, in denen sowohl Elementarzellen designt und neue Strukturen entwickelt als auch angewandt werden. Da ich nicht an allen Unterprojekten beteiligt bin, ist es schwer zu sagen, wie viele Strukturen schon entwickelt wurden. Schätzungsweise versuchen wir momentan 10 bis 20 Strukturen weiterzuentwickeln oder in mögliche Anwendungsbeispiele zu bringen. Wir stehen hier noch ganz am Anfang. Es gibt zwar auch viele Beispiele in der Literatur, an denen wir uns orientieren, aber wir sind noch nicht so weit, dass wir einen Katalog von 100 Strukturen haben, die wir beliebig kombinieren können.

Wie kann man sich die Zusammenarbeit innerhalb des Clusters vorstellen?

Innerhalb dieses Clusters gibt es verschie-

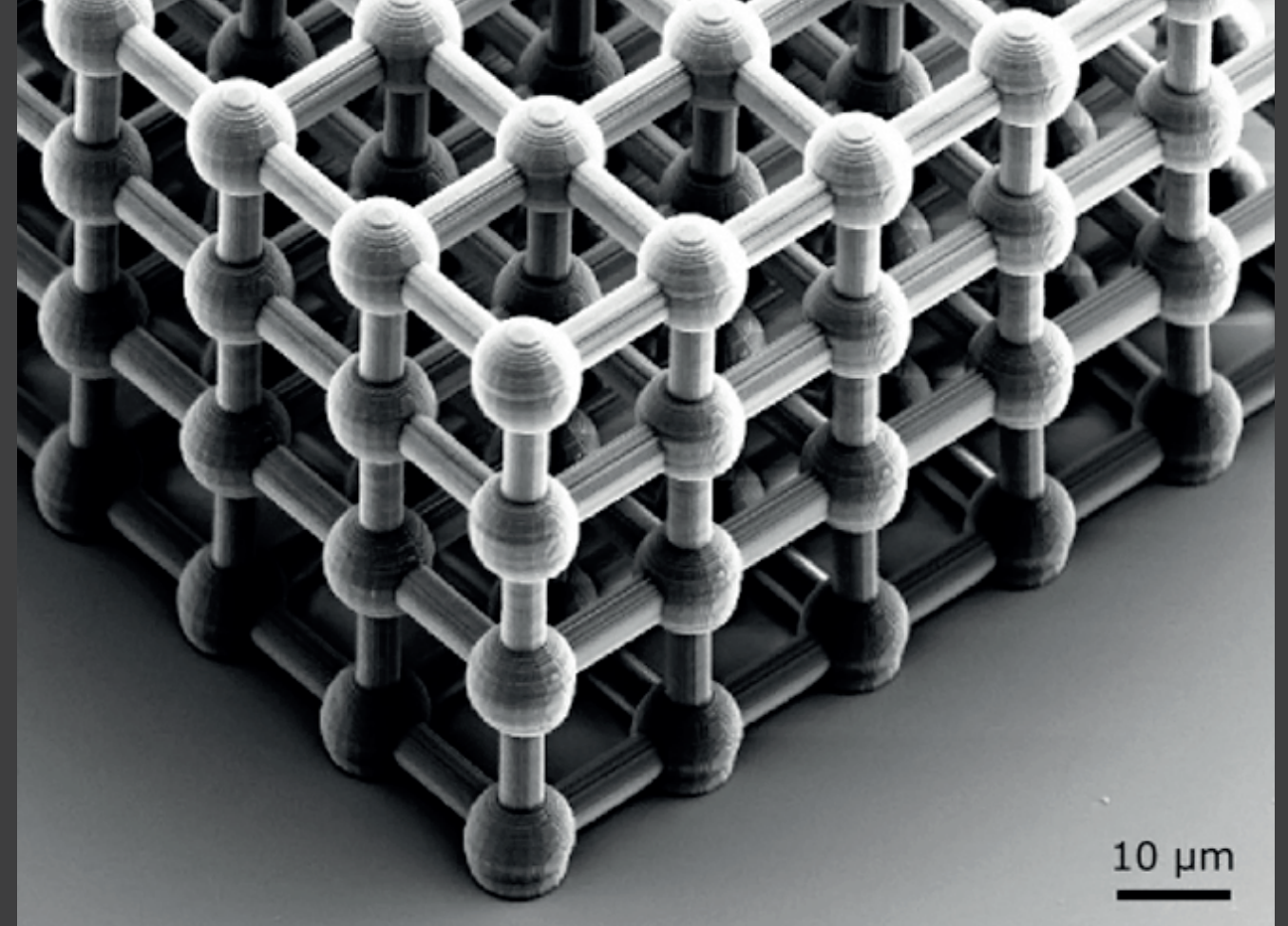
dene Bereiche, die sich in Materialdesign, Anwendungsermittlung und Fertigung unterteilen. Ich bin in einer der wenigen Gruppen, die sich mit dem Strukturdesign beschäftigen.

Wie gehen Sie bei der Entwicklung einer Struktur genau vor?

Generell überlegen wir zunächst, welchen Effekt wir erreichen wollen, welche Möglichkeiten es schon gibt und wo man diese nutzen kann. Danach fängt man an zu überlegen, wie man etwas konstruiert und versucht das am Computer umzusetzen. Sobald man soweit ist, wird das Ergebnis in ein Programm importiert, in dem Verformungen simuliert werden können.

Haben Sie den Algorithmus für das Simulationsprogramm selbst geschrieben?

Das Programm, das wir hauptsächlich nutzen, nennt sich Abaqus. Das ist ein FEM-Programm. Dazu braucht man ein selbst geschriebenes Script, das eine Doktorandin von uns selbst entwickelt hat, in dem man einzelne Zellen periodisch zusammensetzt. Im CAD wird eine einzelne Zelle rekonstruiert und exportiert. Das Script setzt die einzelnen Zellen periodisch zu einem Bauteil zusammen. Dieses wird wiederum in das Simulationsprogramm importiert, damit man die Teile nicht einzeln einsetzen muss.



Zwei Photonen-Lithographie-Druck von Nanoscribe

Welche 3D-Drucker benutzen Sie und wofür?

Wir haben hier an unserem Institut einen 3D-Drucker namens Ultimaker, der mit dem FDM-Verfahren funktioniert. Das ist ein eher günstiges Modell und kostet um die 8.000 Euro. Mit FDM-Druckern werden unsere Prototypen gedruckt. Inzwischen haben wir außerdem einen Stereolithografie – also Flüssigharz – 3D-Drucker bestellt, der eine noch bessere Auflösung hat. Ich benutze hauptsächlich einen Drucker, der mit zwei Photonen-Lithografie arbeitet. Das Gerät heißt Nanoscribe. Damit kann man sehr kleine hochauflösende Teile drucken. Die Auflösung hat eine Größenordnung von 150 Nanometer pro Punkt. Hierzu gibt es auch Youtube-Videos, in denen Gebäude auf einen Bleistift gedruckt wurden. Ich verwende den 3D-Drucker, um den Verformungsvorgang makroskopisch anzuschauen. Gleichzeitig drucke ich das Ganze in einer sehr kleinen Skala von circa 10 bis 50 Mikrometer – das ist von der Größenordnung ungefähr die Dicke eines Haares.

Welches Filament verwenden Sie bei makroskopischen Drucken?

Hier benutzen wir hauptsächlich das Material TPU, weil wir den elastischen Anteil prüfen wollen und ob es sich wirklich mechanisch verformen lässt. Allerdings versuchen wir, diesen Mechanismus nicht nur zu nutzen, wenn das Material elastisch ist, sondern arbeiten daran, auch harte und stabile Materialien zu verformen. Dafür könnte man auch andere Materialien wie zum Beispiel PLA testen. Wir haben gelesen, dass Sie derzeit überwiegend mit Polymeren arbeiten.

Was versprechen Sie sich von der Forschung mit zukünftigen Materialien wie Keramik in Bezug auf die praktische Verwendung?

Wir haben uns bereits Gedanken zum Druck mit Keramik gemacht, aber noch nicht die Möglichkeit, diese zu fertigen. Es gibt inzwischen einen 3D-Drucker, der auch mit Flüssigharzen und Keramiken drucken kann, aber das haben wir noch nicht ausprobiert. Das wäre auf jeden Fall auch für Hochtem-

peratur-Anwendungen sehr interessant. Momentan arbeiten wir hauptsächlich mit Polymeren und metallischen Materialien.

An welchen Eigenschaften von Strukturen oder Stoffen arbeiten Sie im Speziellen?

Wir haben Projekte, die sich mit Dämpfung befassen. Es geht darum, durch beschleunigungs- oder dehnungsabhängige Stimuli eine Dämpfung einzuleiten oder zu verändern. Beispielsweise wird ein Körper stärker gedämpft, je schneller er auf den Boden aufschlägt. Hauptsächlich beschäftigen wir uns mit Dämpfung bzw. Kraftabsorption, aber auch mit Ausdehnung, beispielsweise mit dehnungsabhängiger Höhen- oder Längenveränderung. Mit diesen Eigenschaften befassen wir uns insbesondere im Bereich von Materialtransporten. Und die dehnungsabhängige Querkontraktion – also die auxetischen Zellen – machen wir uns hauptsächlich als Einzelzellen oder in Kombination innerhalb eines Baukastens zunutze, um mit Druck eine Formveränderung zu

erhalten. Eine zukünftige Anwendung wäre beispielsweise ein Stuhl, bei dem Armlehnen herausfahren, sobald man sich hinsetzt.

Wenn ich es richtig verstehe, könnte man diese Eigenschaft zum Beispiel auf Besteck anwenden: erst hat man ein Messer, dann drückt man drauf und es verformt sich zu einer Gabel oder Löffel, je nachdem, was gerade benötigt wird.

Sowas wäre auch eine sehr interessante Idee. Eine Formänderung braucht immer einen Stimulus. Dabei wird die Struktur der Gabel so gewählt, dass sie z.B. auf Druck die Form verändert. Das wird durch Programmierung erreicht. Meine Aufgabe ist auch die Oberflächenrauigkeit zu verändern. Hier werden Strukturen auf die Oberfläche gedruckt, die ihre Oberflächenrauigkeit durch eine äußere mechanische Verformung ändern. Eine Anwendung ist beispielsweise, wenn sich die Oberfläche von hydrophil zu hydrophob ändern soll. Dies könnte bei wasserabweisender Kleidung eingesetzt werden.



Nike Free RN Motion Flyknit – auxetische Schuhsohle

Bei der Pomelo-Frucht kann man den stoßdämpfenden Effekt sehr gut beobachten...

Die Pomelo ist eine sehr gute Vorlage aus der Natur, um die Eigenschaften der Schale in Anwendung zu realisieren. Das Phänomen der Pomelo wird hauptsächlich genutzt, um Dämpfungssysteme zu fertigen.

Welche Unterschiede bringt die Größe der Strukturen mit sich? Haben Sie da schon Unterschiede festgestellt oder ist das größenunabhängig?

Es hat einen sehr großen Einfluss, ob man eine Einzelzelle im Zentimeterbereich oder im Mikro- oder Nanometerbereich hat. Je kleiner man die Zellen macht, desto weniger haben die Eigenschaften des Ausgangsmaterials der Einheitszellen einen Einfluss auf die Verformung und man kann daher von einem Metamaterial sprechen. Das bedeutet, dass die Eigenschaft der Zelle stärker ins Gewicht fällt, je größer sie ist. Wenn man ein sehr steifes Material benutzt, kann man auch ein großes Objekt kaum verformen, weil die stabilen Membranen dies nicht zulassen. Wird das Material jedoch aus einer sehr kleinen Zelle hergestellt, dann hat die Eigenschaft des Materials einen weniger großen Einfluss.

Kann man bei der Auxetik dieses Phänomen auch beobachten?

Die Wahl des Materials ist für das auxetische Verhalten nebensächlich. Aber trotzdem ist man dabei limitiert, weil manche Materialien schneller brechen können. Bei sehr harten Materialien oder Metallen müssen die Biegebalken sehr dünn gewählt werden, damit die Steifigkeit des Materials reduziert wird und es noch verformbar ist.

Kann man Materialien im Nachhinein auxetisch machen oder muss man davor schon wissen, was man auxetisch machen will und die Struktur dementsprechend drucken?

Es gibt zwei Fertigungsmöglichkeiten. Entweder man bedient sich eines 3D-Druckers, bei dem man eine hohe Fertigungsflexibili-

tät hat oder man nimmt Bleche, die durch Schneiden, Stanzen oder Lasern eine auxetische Struktur erhalten. Das 3D-Druckverfahren ist allerdings nicht massentauglich, sondern eher ein Verfahren für Prototypen.

Könnten Sie uns etwas über Ihre Arbeit erzählen, was durch unsere Fragen noch nicht abgedeckt wurde?

Ich habe selbst Materialwissenschaften studiert. Inhalt meines Studiums war nicht das Konstruieren und Designen, sodass die interdisziplinäre Zusammenarbeit innerhalb des Clusters sehr wichtig ist. Leider haben wir keine Designer am Institut für Werkstoffmechanik, sodass der Austausch mit anderen Projekten von Vorteil ist. Interessant sind auch multistabile Metamaterialien. Multistabil bedeutet, dass die hergestellten Materialien, stabil sind und beim Zusammendrücken noch stabiler werden. Es existieren also zwei „stabile“ Zustände. Es gibt bereits auxetische Strukturen in der Anwendung, wie zum Beispiel Stents in der Medizin. Hier handelt es sich um Einsätze in Venen, die diese aufdrücken, um Verstopfungen zu vermeiden. Diese Stents sind kleine Röhren, die eine auxetische Struktur haben. Ein weiteres Einsatzgebiet sind schusssichere Westen, die eine hohe Dämpfungsfunktion besitzen. Von programmierbaren Materialien kann man auch bei Sportschuhsohlen sprechen, deren Dämpfung sich individuell an das Gewicht des Sportlers anpasst. Es ist sehr schwierig, etwas Konkretes über Zukunftstechnologien zu sagen, weil die Entwicklungen sehr vielfältig und unterschiedlich sind, sodass nicht eingeschätzt werden kann, in welche Richtungen sich die Technologie entwickelt.

LOGO



A U X T E C H



A U X T E C H



A U X T E C H



Anthrazit

RGB 49 | 49 | 49

CMYK 0 | 0 | 0 | 90



Pink

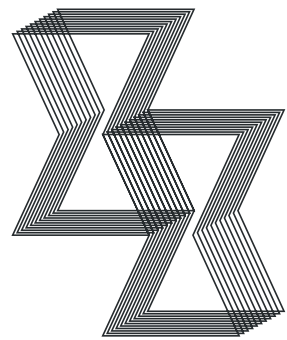
RGB 255 | 1 | 253

CMYK 0 | 100 | 0 | 0

Türkis

RGB 0 | 255 | 246

CMYK 93 | 0 | 34 | 0



A U X T E C H



A U X T E C H

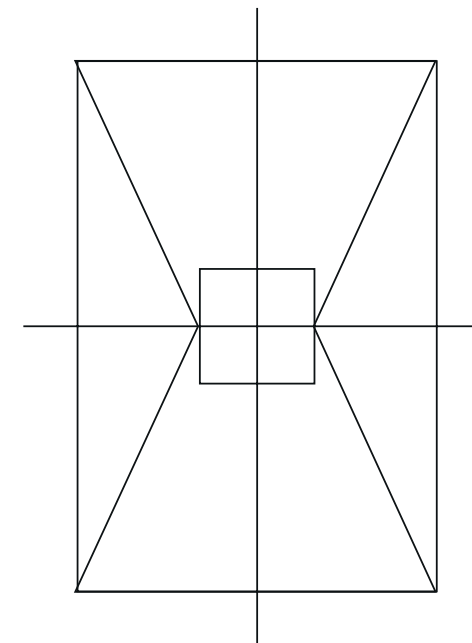


A U X T E C H

Font
Nexa Light: Caps
Letter spacing: 580

Font
Nexa Light: Caps
Letter spacing: 560

Font
Nexa Light: Caps
Letter spacing: 560
Outline: 0,5px



Form Konstruktion

Das Logo ist eine Kombination aus Wort- und Bildmarke. Die Bildmarke zeigt einen Ausschnitt der bekanntesten zweidimensionalen auxetischen Sanduhr-Struktur. Durch die gleichmäßig schräg angeordneten Linien entsteht der Eindruck von Tiefe, die auf unsere Arbeit mit dem 3D-Druck hinweist. Durch den Verlauf bekommt die Bildmarke eine eigene Dynamik, die mit einer Dreh-Animation auf der Website noch verdeutlicht wird. Die Wortmarke zeigt den Namen »AUXTECH« in Versalien, die durch die Schrift »Nexa Light« sehr modern und zurückhaltend wirkt, um die Bildmarke hervorzuheben. Es gibt außerdem eine kleine Version des Logos, die für sehr kleine Anwendungen, wie beispielsweise Kugelschreiber, gut geeignet ist. Hier besteht das Logo aus Flächen, anstatt aus einzelnen Linien und ist für den Druck optimiert. Der Verlauf wird hier 1:1 beibehalten.

NAME

Der Name »AUXTECH« setzt sich aus den Worten »Auxetic« und »Technology« zusammen. Diese wurden ausgewählt, um sowohl das Thema der programmierbaren und unter anderem auxetischen Materialien zu unterstreichen als auch den Forschungs- und Technologieaspekt unserer Arbeit zu verdeutlichen.

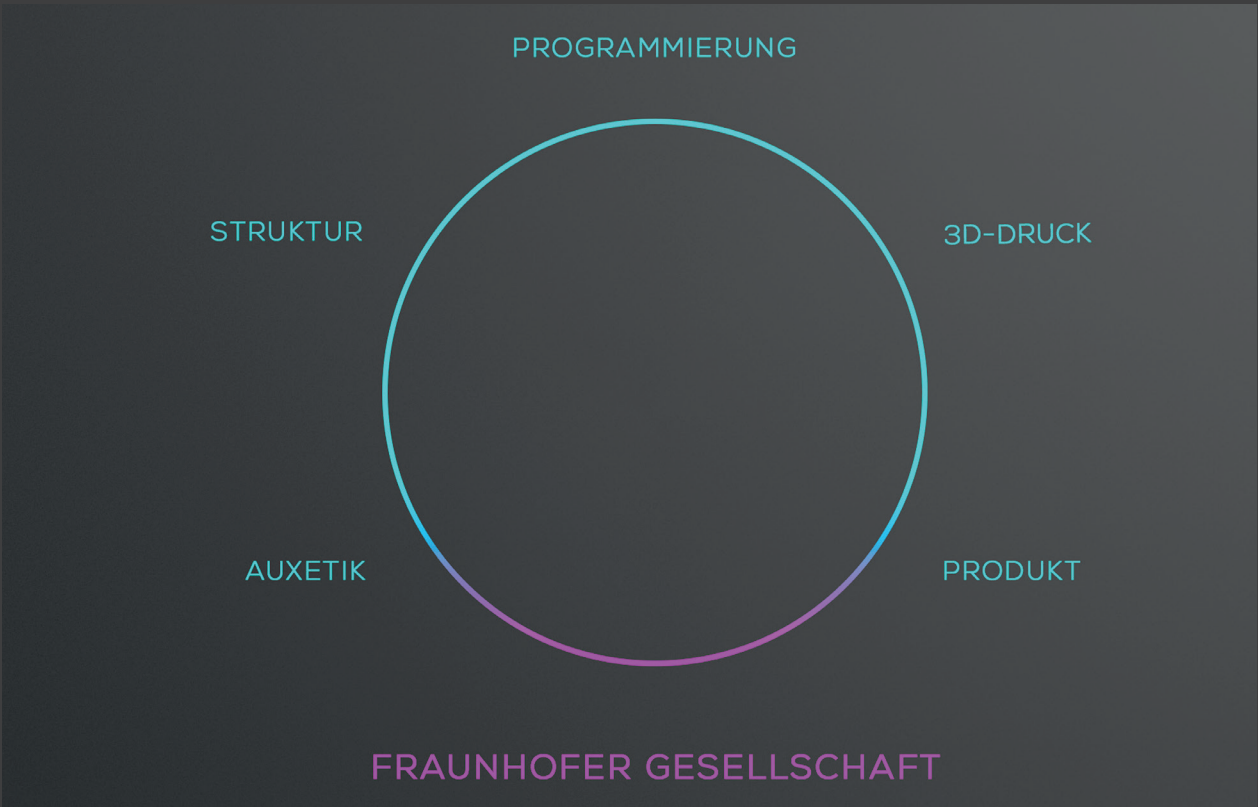
A U X T E C H

A U X T E C H

SCHRIFT

Die verwendete Schriftart nennt sich »Nexa«. Sie eignet sich sowohl für die Verwendung im Logo als auch im Fließtext, da sie serifenlos ist und somit eine gute Lesbarkeit für Webanwendungen besitzt. Des Weiteren wirkt der »Light«-Schnitt sehr unaufdringlich und modern und unterstützt so das Thema Fortschritt.

UX/UI



UX/UI



PROGRAMMIERUNG

Wann ist eine Struktur auxetisch?

Es sollte eine physikalische Zugkraft simuliert werden. Diese sollte von Anfang bis Ende in ihrer Intensität abnehmend verlaufen, sodass die Struktur in die Breite gezogen wird, um den auxetische Effekt feststellen zu können. Hierfür mussten wir gewisse Aspekte beachten und im Code einbauen:

Für jede dieser Fragen wurde der Code angepasst und erweitert, um das gewünschte Ergebnis zu erhalten. Die Ausdehnung und die Berechnung der Zugkraft waren für uns schwierig umzusetzen, da wir wenige Informationen hatten, welche physikalischen Kräfte wirken. Deshalb experimentierten wir zunächst mit einem Würfel anstatt einer Struktur, um die Kräfte besser zu verstehen.

Dabei war vor allem der Zusammenhalt der einzelnen Knotenpunkte eine große Herausforderung, da die simulierte Zugkraft immer den gesamten Würfel und dessen Knotenpunkte auseinanderdrückte. Um das Problem zu lösen, mussten wir für jeden einzelnen Knotenpunkt die Benachbarten definieren und sie so miteinander verbinden, dass sie zusammenbleiben. Nun hätte jedoch die simulierte Zugkraft keine Wirkung mehr, da durch die Verbindung aller Punkte keine Bewegung mehr zustande kommen konnte. Deshalb mussten wir eine minimale Elastizität einbauen, damit sich der Würfel wieder etwas verformt.

Leider konnten wir die Anwendung aufgrund von Zeitmangel nicht mit Strukturen testen. Des Weiteren wäre die Programmierung des Testprogramms auf zweidimensionale Strukturen ausgelegt gewesen, welche für die Herstellung von aueitischen Materialien meist wenig relevant sind. Für ein in der Realität auch praktisch nutzbare Testprogramm müsste man die Simulation der Zugkräfte und die Berechnung der Poissonzahl auf komplexe dreidimensionale Strukturen anwenden können.

Da eine solche Umsetzung entsprechendes wissenschaftliches sowie informatisches Know-how erfordert, war für uns der Versuch, ein Testprogramm für axetische Strukturen zu erstellen, an diesem Punkt abgeschlossen. Für die weitere Produktentwicklung wurde mit bisherigen Forschungsergebnissen der Fraunhofer-Gesellschaft auf diesem Gebiet weitergearbeitet.

```

float nd2 = d2 - d250.01;
//println("dist neu "+d1 + " " + d2);
if (nd1>nd1*1.2) {
    nm1=0;
} else {
    m1 = map(nd1, 0, ad1*1.2, 0, 1);
    m2 = map(nd2, 0, ad2*1.2, 0, 1);
    nm1 = m1 - m1*0.001;
    nm2 = m2 - m2*0.001;
    if (nm1>nm2) {
        nm1 = nm2;
    }
}
//println();
println(nm1, nd2);
pathLine s = haben.getChild(parseInt(vertexGroups.get(index)));
s.setVertex(parseInt(groupIndex.get(index)), location);
velocity.multiply(nm1);
//location.add(velocity);
}

void display() {
    stroke(255,2,253);
    strokeWeight(2);
    fill(127);
    pushMatrix();
    translate(location.x*scale, location.y*scale, location.z*scale);
    sphere(5);
    popMatrix();
}

```

Wann ist eine Struktur auxetisch?

Es sollte eine physikalische Zugkraft simuliert werden. Diese sollte von Anfang bis Ende in ihrer Intensität abnehmend verlaufen, sodass die Struktur in die Breite gezogen wird, um den auxetische Effekt feststellen zu können. Hierfür mussten wir gewisse Aspekte beachten und im Code einbauen:

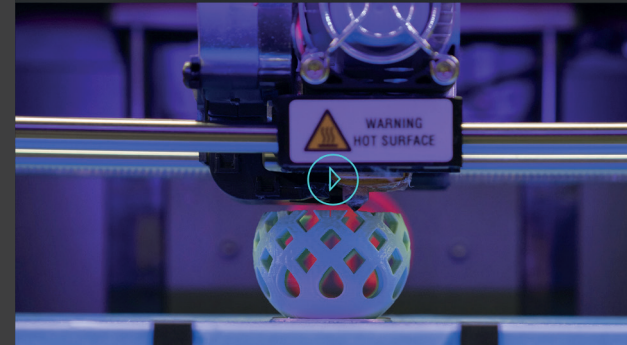
Für jede dieser Fragen wurde der Code angepasst und erweitert, um das gewünschte Ergebnis zu erhalten. Die Ausdehnung und die Berechnung der Zugkraft waren für uns schwierig umzusetzen, da wir wenige Informationen hatten, welche physikalischen Kräfte wirken. Deshalb experimentierten wir zunächst mit einem Würfel anstatt einer Struktur, um die Kräfte besser zu verstehen.

Dabei war vor allem der Zusammenhalt der einzelnen Knotenpunkte eine große Herausforderung, da die simulierte Zugkraft immer den gesamten Würfel und dessen Knotenpunkte auseinanderriß. Um das Problem zu lösen, mussten wir für jeden einzelnen Knotenpunkt die Benachbarten definieren und sie so miteinander verbinden, dass sie zusammenbleiben. Nun hatte jedoch die simulierte Zugkraft keine Wirkung mehr, da durch die Verbindung aller Punkte keine Bewegung mehr zustande kommen konnte. Deshalb mussten wir eine minimale Elastizität einbauen, damit sich der Würfel wieder etwas verformt.

Leider konnten wir die Anwendung aufgrund von Zeitmangel nicht mit Strukturen testen. Des Weiteren wäre die Programmierung des Testprogramms auf zweidimensionale Strukturen ausgelegt gewesen, welche für die Herstellung von austretenden Materialien meist wenig relevant sind. Für ein in der Realität auch praktisch nutzbares Testprogramm müsste man die Simulation der Zugkräfte und die Berechnung der Poissonzahl auf komplexe dreidimensionale Strukturen anwenden können.

Da eine solche Umsetzung entsprechendes wissenschaftliches sowie informatisches Know-how erfordert, war für uns der Versuch, ein Testprogramm für axetische Strukturen zu erstellen, an diesem Punkt abgeschlossen. Für die weitere Produktentwicklung wurde mit bisherigen Forschungsergebnissen der Fraunhofer-Gesellschaft auf diesem Gebiet weitergearbeitet.

3D-DRUCK

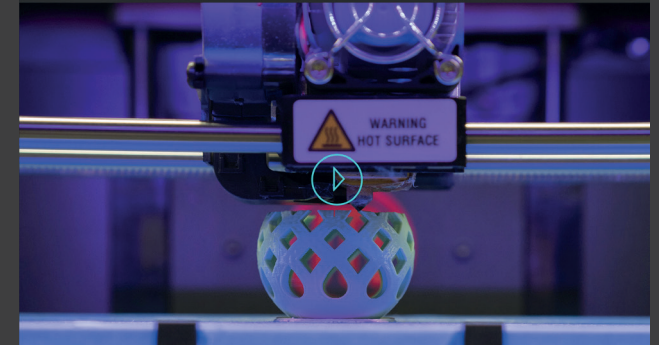


MATERIAL

Zunächst wurden im Internet verschiedene 3D-Modelle zu axetischen Strukturen gesucht. Da es schon vorgefertigte Modelle zum Herunterladen gibt, wurden zwei ausgewählt, um das Prinzip der axetischen Strukturen besser verstehen zu können. Dabei fanden wir heraus, dass vor allem die Größe und Dichte der Struktur ausschlaggebend für die Funktionalität der Testdrucke war. Die gezeigte Struktur (Abb. 1) wurde besonders dünn und groß gedruckt, sodass sie sich durch enorme Flexibilität auszeichnet. Auch der axetische Effekt der Ausdehnung lässt sich hier durch die Größe des

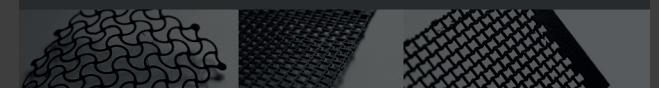
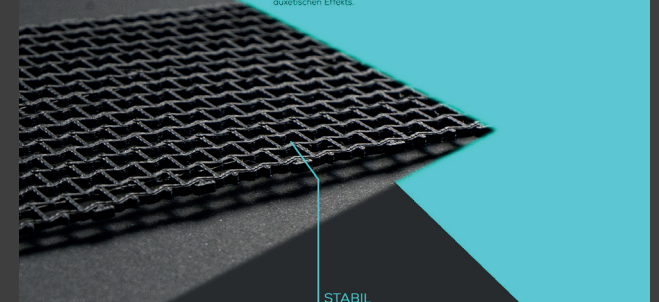


EXTREM FLEXIBEL



MATERIAL

Das äuxetische Muster zeigt die äuxetische Struktur in der bekannten Sanduhr-Form. Auch hier wurde für den Testdruck das Material PLA verwendet. Bei diesem Modell beträgt die Höhe ungefähr 3 mm. Da das Material ein hartes Plastik ist, ließ sich die Struktur weder ziehen noch verformen. Deswegen suchten wir nach anderen Materialien zum besseren Beobachten des äuxetischen Effekts.



PRODUKT



MORPH SET

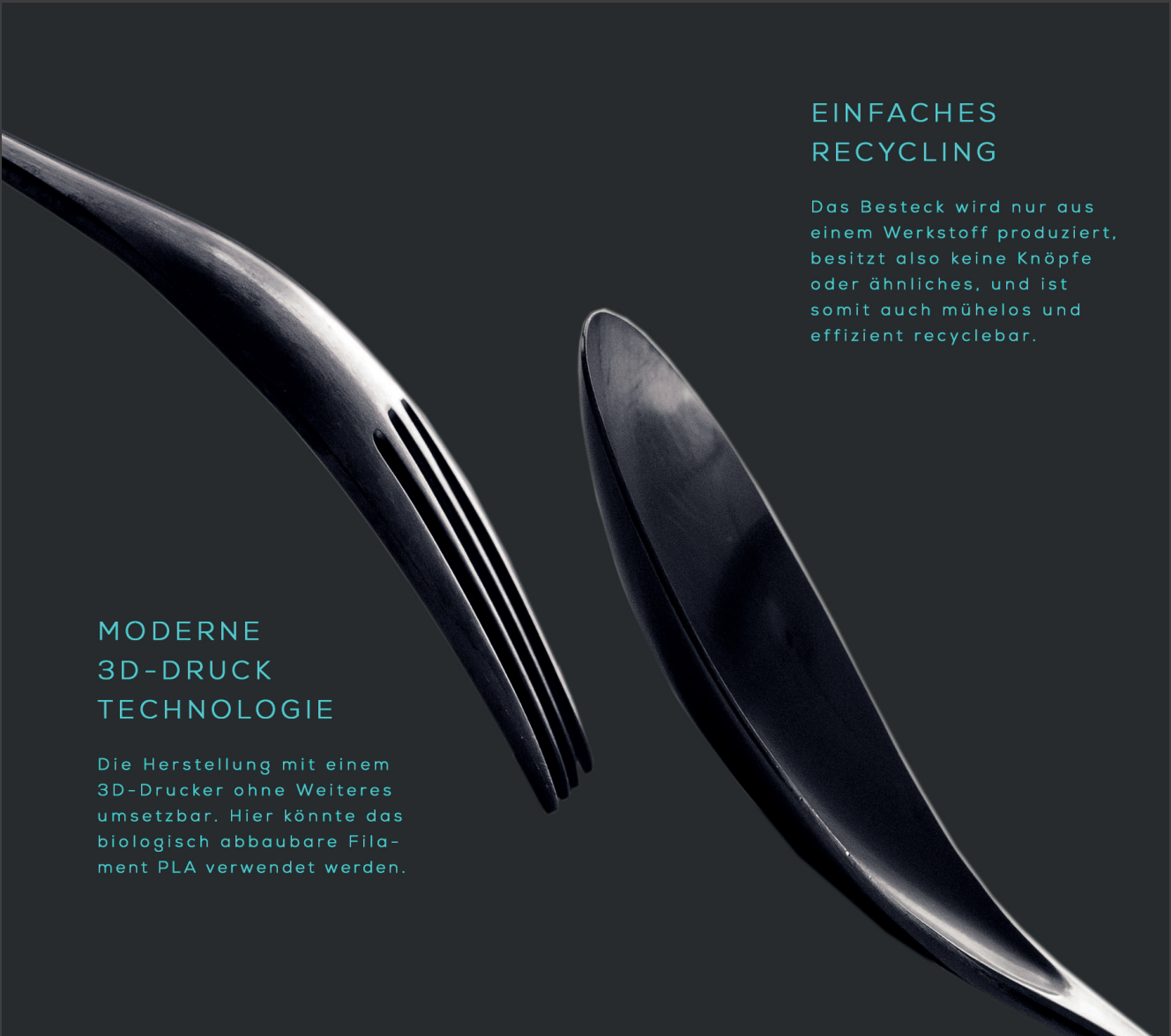
Erfahre mehr 



UNVERGLEICHLICH. INNOVATIV. NEUARTIG.

Das Material verändert sich bei Druck autonom
und reversibel in das gewünschte Besteckteil.

Erfahre mehr 



EINFACHES RECYCLING

Das Besteck wird nur aus
einem Werkstoff produziert,
besitzt also keine Knöpfe
oder ähnliches, und ist
somit auch mühelos und
effizient recyclebar.

MODERNE 3D-DRUCK TECHNOLOGIE

Die Herstellung mit einem
3D-Drucker ohne Weiteres
umsetzbar. Hier könnte das
biologisch abbaubare Fila-
ment PLA verwendet werden.

ANIMIERTES VIDEO
3D-RENDERING DES MORPH-SETS

FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

ZUM INTERVIEW MIT
MARIUS SPECHT

FRAUNHOFER IWU
EIN INTERVIEW MIT LINDA WEISHEIT

15. Januar 2020

» Ziel ist es die Funktionsvielfalt von Produkten noch weiter zu erhöhen, weil auch die Anforderungen immer größer werden.«

Linda Weisheit ist seit ihrem Abschluss des Studiums der Werkstoffwissenschaft der TU Dresden im Bereich »Smart Materials« beim Fraunhofer Institut IWU tätig und integriert diese in Systemumgebungen und optimiert das Material selbst für den jeweiligen Einsatz. Im Rahmen unserer Bachelorarbeit sprachen wir mit ihr über ihre Arbeit bei der Fraunhofer Gesellschaft.

AUXTECH: Was ist der Unterschied zwischen Smart Materials und Programmable Materials?

Linda Weisheit: Der Hauptunterschied zwischen Smart Materials und Programmierbaren Materialien besteht darin, dass bei Smart Materials Eigenschaften ausgenutzt werden, die schon im Grundwerkstoff selbst vorhanden sind, also zum Beispiel Phasenumwandlungsphänomene bei Formgedächtnislegierungen. Bei den Programmierbaren Materialien geht man noch einen Schritt weiter und programmiert die gewünschte Eigenschaft durch eine innere Struktur. Die Strukturen sind bei mechanischen Metamaterialien eigenschaftsgebend. Es gibt auch schon Beispiele für Metamaterialien, die aus Formgedächtnispolymeren gedruckt wurden. Des Weiteren versuchen wir, Metamaterial aus Formgedächtnislegierungen zu drucken, sodass man reaktive programmierbare Materialien erhalten kann.

AUXTECH: Was sind die maßgeblichen Ziele Ihrer Forschung?

Linda Weisheit: Ziel ist es, die Funktionsvielfalt von Produkten noch weiter zu erhöhen, weil auch die Anforderungen immer größer werden. Um die Systeme nicht noch komplexer zu machen, versuchen wir die Funktionen noch weiter in die Materialebene hineinzubringen. Das führt zu Gewichtseinsparung, Bauraumeinsparung oder Komplexitätssenkung. Aber auch der Hintergrund Recycling ist ein ganz wichtiger Aspekt, da man keine Materialverbunde mehr herstellen muss, sondern unter Umständen allein durch die innere Struktur ein und desselben Werkstoffs Eigenschaften erzielt, die man sonst vom Materialverbund bekommt. Das vereinfacht das nachträgliche Recycling. Ziel ist es, das Bauteil aus möglichst wenigen Werkstoffen herstellen zu können. Des Weiteren arbeiten wir an der Individualisierbarkeit von Produkten, sodass man nachträglich eine individuelle Funktionalität programmieren kann. So entsteht zum Beispiel ein individualisierter Innenraum. Ich kann also das Auto auf jeden Fahrer entsprechend umprogrammieren, das heißt die Anordnung der Knöpfe so ändern, damit sie auf dessen Ergonomie angepasst ist. Ebenso kann die Form beispielsweise eines Stuhls oder Bettes auf den Nutzer abgestimmt werden. Die mechanischen Metamaterialien sind nur ein Teil des Fraunhofer Clusters. Wir gehen auch über chemische Programmierbarkeit, zum Beispiel beim programmierbaren Stofftransport. Auch Wärmetransport ist vor allem für Batterie Kühlung und Gebäudetechnik ein Thema. Zudem untersuchen wir die Möglichkeit, Reibeeigenschaften gezielt zu verändern.

AUXTECH: Welchen Ansatz verfolgen Sie von der Forschung bis hin zur Produktentwicklung?

Linda Weisheit: Grundlagenforschung ist wichtig. Wir versuchen bei den mechanischen Materialien systematisch herauszufinden, welche Geometrien Einfluss auf die Einheitszellen haben. Zum Lernen und Erforschen von Einflussfaktoren ist es wichtig, Verschiedenes auszuprobieren, zu simulieren und zu kombinieren. Aber man sollte von Anfang an vom Produkt ausgehen und eine genaues Anforderungsprofil erstellen.

AUXTECH: Wir haben gelesen, dass im April 2020 eine Konferenz über dieses Themengebiet stattfindet...

Linda Weisheit: Das ist eine internationale Konferenz. Wir haben Sprecher aus aller Welt von der Forschung bis zur Industrie. Es ist mehr oder weniger der erste Aufschlag in den Grundlagen zwischen Wirtschaft und Forschung. Wir planen auch, Vorträge zu Produktentwicklungen zu präsentieren. Beispielsweise wird auch die Kunsthochschule Weihenstephan vertreten sein. Es wird noch nicht so richtig um Produkte mit Programmierbaren Materialien gehen können, weil wir einfach noch nicht so weit sind, sondern eher um die Vision: was wäre wenn?

ZUM INTERVIEW MIT
MARIUS SPECHT

ZUM INTERVIEW MIT
LINDA WEISHEIT

FRAUNHOFER IWM
EIN INTERVIEW MIT MARIUS SPECHT

28. Januar 2020

» Mit dieser fachübergreifenden Zusammenarbeit wollen wir dem klassischen Konkurrenzdenken entgegenwirken.«

Marius Specht ist Mitarbeiter des Fraunhofer Instituts IWM und ist durch sein Studium der Materialwissenschaften darauf spezialisiert was ein Material kann und erfüllen muss. Wir sprachen mit ihm über seine Arbeit bei der Fraunhofer Gesellschaft sowie über Zukunftstechnologien.

AUXTECH: Wie viel Strukturen mit besonderen Eigenschaften wurden bisher entwickelt?

Marius Specht: Wir arbeiten innerhalb des sogenannten Fraunhofer Cluster of Excellence an Programmierbaren Materialien. Das Cluster besteht aus sechs Kern-Fraunhofer-Instituten, die vor zwei Jahren angefangen haben sich mit dem Thema zu befassen. Mittlerweile sind wir allerdings schon 14 Institute, die innerhalb des Clusters zusammenarbeiten. Mit dieser fachübergreifenden Zusammenarbeit wollen wir dem klassischen Konkurrenzdenken entgegenwirken. In diesem Cluster gibt es etwa 20 Projekte, die gleichzeitig laufen, in denen sowohl Elementarzellen designt und neue Strukturen entwickelt als auch angewandt werden. Da ich nicht an allen Unterprojekten beteiligt bin, ist es schwer zu sagen, wie viele Strukturen schon entwickelt wurden. Schätzungsweise versuchen wir momentan 10 bis 20 Strukturen weiterzuentwickeln oder in mögliche Anwendungsbeispiele zu bringen. Wir stehen hier noch ganz am Anfang. Es gibt zwar auch viele Beispiele in der Literatur, an denen wir uns orientieren, aber wir sind noch nicht so weit, dass wir einen Katalog von 100 Strukturen haben, die wir beliebig kombinieren können.

AUXTECH: Wie kann man sich die Zusammenarbeit innerhalb des Clusters vorstellen?

Marius Specht: Innerhalb dieses Clusters gibt es verschiedene Bereiche, die sich in Materialdesign, Anwendungsidentifizierung und Fertigung unterteilen. Ich bin in einer der wenigen Gruppen, die sich mit dem Strukturdesign beschäftigen.

AUXTECH: Wie geht ihr bei der Entwicklung einer Struktur genau vor?

Marius Specht: Generell überlegen wir zunächst, welchen Effekt wir erreichen wollen, welche Möglichkeiten es schon gibt und wo man diese nutzen kann. Danach fragt man an zu überlegen, wie man etwas konstruiert und versucht das am Computer umzusetzen. Sobald man soweit ist, wird das Ergebnis in ein Programm importiert, in dem Verformungen simuliert werden können.

AUXTECH: Haben Sie den Algorithmus für das Simulationsprogramm selbst geschrieben?

Das Programm, das wir hauptsächlich nutzen, nennt sich Abaqus. Das ist ein FEM-Programm. Dazu braucht man ein selbst geschriebenes Script, das eine Doktorandin von uns selbst entwickelt hat, in dem man einzelne Zellen periodisch zusammensetzt. Im CAD wird eine einzelne Zelle rekonstruiert und exportiert. Das Script setzt die einzelnen Zellen periodisch zu einem Bauteil zusammen. Dieses wird wiederum in das Simulationsprogramm importiert, damit man die Teile nicht einzeln einsetzen muss.

AUXTECH: Welches Filament verwenden Sie bei makroskopischen Drucken?

Hier benutzen wir hauptsächlich das Material TPU, weil wir den elastischen Anteil prüfen wollen und ob es sich wirklich mechanisch verformen lässt. Allerdings versuchen wir, diesen Mechanismus nicht nur zu nutzen, wenn das Material elastisch ist, sondern arbeiten daran, auch harte und stabile Materialien zu verformen. Dafür könnte man auch andere Materialien wie zum Beispiel PLA testen. Wir haben gelesen, dass Sie derzeit überwiegend mit Polymeren arbeiten.

AUXTECH: Könnten Sie uns etwas über Ihre Arbeit erzählen, was durch unsere Fragen noch nicht abgedeckt wurde?

Ich habe selbst Materialwissenschaften studiert. Inhalt meines Studiums war nicht das Konstruieren und Designen, sodass die interdisziplinäre Zusammenarbeit innerhalb des Clusters sehr wichtig ist. Leider haben wir keine Designer am Institut für Werkstoffmechanik, sodass der Austausch mit anderen Projekten von Vorteil ist. Interessant sind auch multistabile Metamaterialien. Multistabil bedeutet, dass die hergestellten Materialien, stabil sind und beim Zusammendrücken noch stabiler werden. Es existieren also zwei „stabile“ Zustände. Es gibt bereits auxetische Strukturen in der Anwendung, wie zum Beispiel Stents in der Medizin. Hier handelt es sich um Einätze in Venen, die diese aufdrücken, um Verstopfungen zu vermeiden. Diese Stents sind kleine Röhren, die eine auxetische Struktur haben. Ein weiteres Einsatzgebiet sind schussichere Westen, die eine hohe Dämpfungsfunktion besitzen. Von Programmierbaren Materialien kann man auch bei Sportschuhsohlen sprechen, deren Dämpfung sich individuell an das Gewicht des Sportlers anpasst.

Es ist sehr schwierig, etwas Konkretes über Zukunftstechnologien zu sagen, weil die Entwicklungen sehr vielfältig und unterschiedlich sind, sodass nicht eingeschätzt werden kann, in welche Richtungen sich die Technologie entwickelt.

AUXETIK

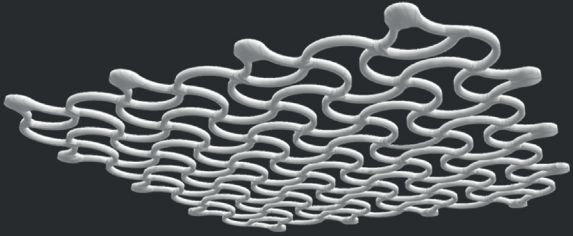
» Unsere alltägliche Erfahrung lehrt uns, dass ein Gegenstand, den man streckt, dünner wird. Drückt man ihn zusammen, wird er dicker. Aber es gibt auch Materialien, die sich so ganz entgegen unserer Intuition verhalten: Sie werden beim Strecken dicker und beim Zusammendrücken dünner.«

» Auxetische Materialien besitzen eine negative Poissonzahl. Die Poissonzahl (auch genannt Querkontraktionszahl) ist bei herkömmlichen Materialien positiv, weswegen zum Beispiel ein Gummiband bei Dehnung in der Mitte dünner wird. Auxetische Materialien hingegen nehmen im Querschnitt zu. Dies bedeutet, dass sich das Verhalten desselben Materials nur aufgrund der Strukturänderung komplett gegenteilig zu herkömmlichen Materialien verhält und sich ausdehnt. „Zu den auxetischen Materialien gehören unter anderem hochverstrecktes Teflon und die Haut von Kuhzitzen. Auxetisches Verhalten ist seit Anfang des 20. Jahrhunderts bekannt. Eines der ersten künstlich hergestellten auxetischen Materialien, die RFS-Struktur (Rauten-Falt-Struktur), wurde 1978 von dem Berliner Forscher K. Pletsch erfunden. Er verwendete zwar nicht den Begriff Auxetik, beschreibt aber erstmals die zu Grunde liegende Hebelmechanik sowie deren nicht linearen mechanische Reaktion und gilt daher als Erfinder des in der Grafik oben dargestellten Auxetischen Netzes.«

EIGENSCHAFTEN	ANWENDUNGSBEREICHE
Δ Bessere Absorption von Energie	Δ Automotive – Stoßstangen, Sicherheitsgurte
Δ Besonders bruchfest und risszäh	Δ Medizin – Verbände für Wundpolsterung
Δ Gute Filtereigenschaften	Δ Sicherheit – Protektoren, Sicherheitswesten
Δ Stoß- und schlagfest	Δ Sonstiges – Netze, Seile, Rohrabdichtungen, Dämpfung

ERKLÄR-VIDEO

STRUKTUR



» Das Finden von dreidimensionalen, richtungsunabhängigen auxetischen Strukturen ist von großem Interesse. «

Um eine geeignete Anwendung für die auxetischen Strukturen zu finden, analysierten wir alle bereits erforschten Eigenschaften. Unser Ziel war es, von der Struktur ausgehend eine Produktidee herzuleiten. Nach fortgeschrittener Recherche wurde klar, dass es mit auxetischen Strukturen, die nur linear - also in zwei Dimensionen - verlaufen, beinahe unmöglich ist, eine Umsetzung zu realisieren.

Die meisten Produkte, die sich die Auxetik zunutze machen, werden mit komplizierten 3D-Strukturen hergestellt. Die einzelnen Einheiten werden so zusammengefügt, dass ein Material entsteht. Aufgrund der Komplexität dieser 3D-Strukturen, ist es für den Laien fast unmöglich eigenständig festzustellen, ob das auxetische Phänomen greift.

Des Weiteren müsste man über wesentlich mehr Zeit sowie spezielles wissenschaftliches Know-how verfügen, um eine solche neue Struktur erstellen zu können.

3D-RENDERING



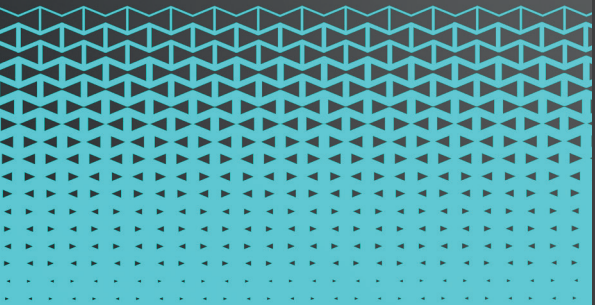
» Das Finden von dreidimensionalen, richtungsunabhängigen auxetischen Strukturen ist von großem Interesse. «

Um eine geeignete Anwendung für die auxetischen Strukturen zu finden, analysierten wir alle bereits erforschten Eigenschaften. Unser Ziel war es, von der Struktur ausgehend eine Produktidee herzuleiten. Nach fortgeschrittener Recherche wurde klar, dass es mit auxetischen Strukturen, die nur linear - also in zwei Dimensionen - verlaufen, beinahe unmöglich ist, eine Umsetzung zu realisieren.

Die meisten Produkte, die sich die Auxetik zunutze machen, werden mit komplizierten 3D-Strukturen hergestellt. Die einzelnen Einheiten werden so zusammengefügt, dass ein Material entsteht. Aufgrund der Komplexität dieser 3D-Strukturen, ist es für den Laien fast unmöglich eigenständig festzustellen, ob das auxetische Phänomen greift.

Des Weiteren müsste man über wesentlich mehr Zeit sowie spezielles wissenschaftliches Know-how verfügen, um eine solche neue Struktur erstellen zu können.

FOOTER





AUXTECH

ERFAHRE MEHRI

» Hier findest du unser Exposé zum Download

» info@auxtech.de

TEAM IMPRESSUM





JAN MARC ZUBLASUNG | MD.H

» Für uns als Designer war es das Ziel, kreativ neuartige Anwendungsmöglichkeiten von Metamaterialien zu finden, um Menschen für die smarte Zukunft zu begeistern! «



JULIA SCHNEIDER | MD.H

Smarte Materialien versprechen völlig neue Perspektiven im Produktdesign. Produkte können sich nun individuell an ihre Nutzer und die Umgebung anpassen. Ein Werkstoff kann gleichzeitig unterschiedliche Funktionen erfüllen. Die Produkte der Zukunft sind außerdem umweltfreundlich und leicht zu recyceln. Wissenschaftler auf der ganzen Welt arbeiten inzwischen an der Umsetzung der intelligenten Materialien. Wir erforschten das Thema durch eigene Experimente mit der 3D-Druck-technologie und arbeiteten interdisziplinär mit Wissenschaftlern zusammen, um abschließend ein eigenes, zukünftig realisierbares Produkt zu entwickeln.

TEAM

PACKAGING



VORDERSEITE



RÜCKSEITE

BÜROAUSSTATTUNG



MESSEDESIGN



FAZIT

Der Forschungsaspekt hat unsere Arbeit von Anfang an sehr stark begleitet. Wir haben zeitaufwändige und umfangreiche Recherchearbeit betrieben und sind so auf viele **spannende, innovative Technologien** gestoßen, die uns nach und nach zu unserer Produktidee geführt haben. Unsere Arbeit zeichnet sich vor allem durch ihre stetige **Weiterentwicklung** aus. Anfangs legten wir den Fokus auf verbesserte Strukturen aus der Natur. Es wurde uns jedoch bald bewusst, dass wir diese allgemeine Thematik eingrenzen müssen, um den zeitlichen Rahmen nicht zu sprengen.

Nach intensiver Recherche sind wir auf das Phänomen der Auxetik gestoßen. Dieses hat uns begeistert, weil es gegenwärtig vor allem in der Forschung durch die 3D-Druck-Technologie neu interpretiert und weiterentwickelt wird. Mit dieser Spezialisierung fanden wir unser Leitthema. Im weiteren Verlauf sind wir auf spannende Projekte in der Forschung gestoßen, die sich mit der Klasse der programmierbaren Metamaterialien, unter anderem auch auxetischen Strukturen, auseinandersetzen. An dieser Stelle gilt es, einen **großen Dank für die tatkräftige Unterstützung der Fraunhofer-Gesellschaft** auszusprechen, die uns die Möglichkeit gegeben haben, interessante Einblicke in ihre Arbeit und die Fortschritte der Forschung zu erhalten.

Wie aus der Bachelorarbeit hervorgeht, hatten wir einige Herausforderungen wie beispielsweise die Programmierung zu überwinden, die uns gezeigt haben, wie komplex die Thematik ist. Des Weiteren erkannten wir die Wichtigkeit von **interdisziplinärer und fachübergreifender Zusammenarbeit** nicht nur bei unserer Bachelorarbeit, sondern im Hinblick auf die wachsenden Anforderungen der heutigen Gesellschaft. Wir haben unsere Idee von »**Wissenschaft trifft Design**« von der Forschung über das Corporate Design bis hin zur Produktentwicklung motiviert und erfolgreich umgesetzt.

.obj-Format

OBJ (oder .obj) ist ein offenes Dateiformat zum Speichern von dreidimensionalen geometrischen Formen.

Abaqus

Abaqus FEA (abgeleitet vom mechanischen Rechenggerät Abakus) ist ein kommerzielles Programmpaket, mit dem sich Probleme der Festkörper-Statik und -Dynamik, der Wärmeleitung, des Elektromagnetismus und der Fluidodynamik bearbeiten lassen.

Auxetisches Material

Auxetische Materialien haben die ungewöhnliche Eigenschaft, sich bei einer Streckung quer zur Streckrichtung auszudehnen.

CAD

CAD (von engl. computer-aided design, zu Deutsch rechnerunterstütztes Konstruieren) bezeichnet die Unterstützung von konstruktiven Aufgaben mittels Elektronischer Datenverarbeitung zur Herstellung eines Produkts (beispielsweise Auto, Flugzeug, Bauwerk, Kleidung).

Extruder

Extruder sind Fördergeräte, die nach dem Funktionsprinzip der Archimedischen Schraube feste bis dickflüssige Massen unter hohem Druck und hoher Temperatur gleichmäßig aus einer formgebenden Öffnung herauspressen. Dieses Verfahren wird als Extrusion bezeichnet und wird beim 3D-Druck angewendet.

FDM-Verfahren

Fused Deposition Modeling (FDM; deutsch: Schmelzschichtung) bezeichnet ein Fertigungsverfahren aus dem Bereich des 3D-Drucks, mit dem ein Werkstück schichtweise aus einem schmelzfähigen Kunststoff oder auch – in neueren Technologien – aus geschmolzenem Metall aufgebaut wird.

FEM-Programm

Die Finite-Elemente-Methode (FEM) ist ein allgemeines, bei unterschiedlichen physikalischen Aufgabenstellungen angewendetes numerisches Verfahren. Am bekanntesten ist die Anwendung der FEM bei der Festigkeits- und Verformungsuntersuchung von Festkörpern mit geometrisch komplexer Form. Logisch basiert die FEM auf dem numerischen Lösen eines komplexen Systems aus Differentialgleichungen.

Formgedächtnislegierung

Formgedächtnislegierungen werden oft auch als Memorymetalle bezeichnet. Dies rührt von dem Phänomen her, dass sie sich an eine frühere Formgebung trotz nachfolgender starker Verformung scheinbar „erinnern“ können.

Generative Gestaltung

Generative Gestaltung bezeichnet eine Entwurfsmethode in den verschiedenen Bereichen der Gestaltung (Kunst, Architektur, Kommunikationsdesign, Produktdesign, ...). Wesentlich dabei ist, dass der Output – Bild, Sound, architektonisches Modell, Animation, ... – durch ein Regelwerk, bzw. einen Algorithmus (üblicherweise in Form eines Computerprogramms) erzeugt wird.

Java

Java ist eine objektorientierte Programmiersprache. Die Programmiersprache Java dient innerhalb der Java-Technologie vor allem zum Formulieren von Programmen.

Künstliche Intelligenz

Künstliche Intelligenz (KI), auch artificial intelligence, ist ein Teilgebiet der Informatik, welches sich mit der Automatisierung intelligenten Verhaltens und dem maschinellen Lernen befasst.

Lignin

Wissenschaftler entwickelten ein erneuerbares 3D-Druckmaterial auf Basis von Lignin. Lignin ist ein hartnäckiges Nebenprodukt der Bioraffinerie, an deren Verwendung bereits seit einiger Zeit gearbeitet wird.

Maya

Software für Animation, Modellierung, Simulation und Rendering in 3D

Metamaterialien

Metamaterialien sind künstlich hergestellte Werkstoffe mit optischen, elektrischen oder magnetischen Eigenschaften, die in der Natur nicht vorkommen. Ein spannendes Beispiel für ihre Anwendung sind sogenannte Tarnkappen: Man arbeitet an Metamaterialien, die Objekte unsichtbar machen. Dazu stellen Forscher den Brechungsindex des Tarnmaterials gerade so ein, dass es für das Licht günstiger ist, um das getarnte Objekt herumzulaufen anstatt vom ihm abgelenkt oder gestreut zu werden.

Piezokeramik

Piezokeramik sind funktionelle keramische Werkstoffe, die in der Lage sind, mechanische Energie in elektrische Energie umzuwandeln und umgekehrt.

PLA

Polylactide (kurz PLA), sind synthetische Polymere, die zu den Polyestern zählen. Aus ihnen wird Kunststoff gefertigt, der aus nachwachsenden und natürlichen Rohstoffen gewonnen wird (z.B. Maisstärke) – Biokunststoff. Es ist eines der beliebtesten Filamente für den 3D-Druck.

Polymer

Mit dem Begriff „Polymer“ werden chemische Verbindungen aus Ketten- oder verzweigten Molekülen bezeichnet. Synthetische Polymere sind in der Regel „Kunststoffe“.

Stereolithographiedrucker

Stereolithografie ist das älteste patentierte additive Fertigungsverfahren, bei dem ein Werkstück durch frei im Raum materialisierende Punkte schichtenweise aufgebaut wird. Die Fertigung eines Teils oder mehrerer Teile gleichzeitig erfolgt üblicherweise vollautomatisch aus am Computer erstellten CAD-Daten.

TPU

Es sind Polymere, die bei Raumtemperatur über elastisches Verhalten verfügen und sich dabei wie klassische Elastomere (Gummi) verhalten. TPU-Filament ist eines der beliebtesten FDM/FFF-Druckmaterialien für flexible gummiartige Produkte.

Zwei-Photonen-Lithographie

Mit Hilfe der Zwei-Photonen-Lithographie können dreidimensionale Teile in Nano-Präzision hergestellt werden. Das künstliche Harz wird durch einen Laser ausgehärtet, der durch bewegliche Spiegel gelenkt wird. Da das Harz nur beim Brennpunkt des Laserstrahls reagiert, kann der Strahl durch mehrere Schichten gelenkt werden, wobei nur die gewünschte Schicht erhärtet.

NERI OXMAN

- 1
- Abstract: The art of design – Neri Oxman: Bio Architecture, Netlix, 2019, Stand: 14.11.2019
- 2
- Vgl. UBM Development AG: Contemporary Vision Award für 3-D-Pionierin Neri Oxman, in: UBM Development AG, Stand: 14.11.2019
<https://www.ubm-development.com/magazin/contemporary-vision-award-fuer-3-d-pionierin-neri-oxman/>
- 3
- Abstract: The art of design – Neri Oxman: Bio Architecture, Netlix, 2019, Stand: 14.11.2019
- 4
- Vgl. UBM Development AG: Contemporary Vision Award für 3-D-Pionierin Neri Oxman, in: UBM Development AG, Stand: 14.11.2019
<https://www.ubm-development.com/magazin/contemporary-vision-award-fuer-3-d-pionierin-neri-oxman/>

FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

- 1
- Fraunhofer CPM, Die Zukunft der Werkstoffe, Stand: 10.01.2020 – <https://cpm.fraunhofer.de>
- 2
- Fraunhofer-Gesellschaft, Programmierbare Materialien, Stand: 20.12.2019
<https://www.fraunhofer.de/de/forschung/prioritaere-strategische-initiativen/programmierbare-materialien/eigenschaften-auf-wunsch.html>

3D-DRUCK

- 1
- Wikipedia: 3D-Druck, in: Wikipedia, Stand: 14.11.2019 – <https://de.wikipedia.org/wiki/3D-Druck>

DRUCKFILAMENTE

- 1
- Kahraman, Sercan; threedom, Stand: 17.02.20 – <https://threedom.de/3d-drucker-filament/pla-polylactid>
- 2
- LayerByLayer, Stand: 13.02.2020
<https://www.layerbylayer.de/de/3d-druck-wissen/tutorials/tpu-3d-druck-ein-leitfaden-fuer-den-3d-druck-von-flexiblen-teilen.html>
Vgl. filamentworld, Stand 12.02.2020, <https://www.filamentworld.de/das-richtige-filament-finden/>

AUXETIK

- 1
- idw – Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V., 24.08.2006 – AHE, Stand: 11.11.2019
- 2
- Wikipedia: Auxetisches Material, Stand: 09.11.2019 – https://de.wikipedia.org/wiki/Auxetisches_Material

STRUKTURENTWICKLUNG

- 1
- Youtube: Das Genie der Natur erforschen – Bionik, 07.11.2017, Stand: 15.10.2019 – <https://www.youtube.com/watch?v=hlYaUwAgTGw>
- 2
- Südwestrundfunk: Ein Fahrradhelm wie eine Pomelo-Frucht, Stand: 05.02.2020
<https://www.swr.de/swr2/wissen/fahrradhelmnach-vorbildderpomelo-frucht,article-swr-12466.html>

STRUKTUR-TEST

- 1
- Wikipedia: Processing, Stand: 10.09.2019 – <https://de.wikipedia.org/wiki/Processing>

TESTLÄUFE 3D-DRUCK

- 1
- Smart Advanced Systems GmbH: Informationen zur Verwendung von TPU im 3D Druck, Stand: 17.02.2020
<https://www.advanced-3d-printing.de/content/informationen-zur-verwendung-von-tpu-im-3d-druck-15>

PROGRAMMIERUNG

- 1
- Rüter, Martina: Wabenstrukturen: leicht und stabil, Stand: 15.01.2020
<https://www.martina-rüter.de/text-fachtexte-naturwissenschaften/bionik/wabenstrukturen-leicht-und-stabil/>
- 2
- Brefeld, Werner: Platonische Körper und Archimedische Körper (reguläre und halbbreguläre Polyeder), Stand: 23.11.2019
<http://www.brefeld.homepage.t-online.de/polyeder.html>
- 3
- Wikipedia: Platonischer Körper, Stand: 26.11.2019 https://de.wikipedia.org/wiki/Platonischer_Körper
- 4
- JP CARRASCAL: Platonic Solids in Processing
<http://blog.jp carrascal.com/2016/04/platonic-solids-in-processing/>

STRUKTURENTWICKLUNG VON 2D IN 3D

- 1
- DGM: Zellulare Auxetische Materialien, Stand: 31.01.2020
https://www.dgm.de/nachrichten/artikel/news/zellulare-auxetische-materialien/?tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&cHash=ab12ae31ba986c7502d1add70bce4c3 (31.01.2020)

08

OXMAN, NERI: MUSHTARI; FOTOGRAF: YORAM RESHEF

<https://www.arch2o.com/mushtari-neri-oxman/>

13

FRAUNHOFER IWM: AUXETIC CUBE

<https://www.fraunhofer.de/de/forschung/prioritaere-strategische-initiativen/programmierbare-materialien/eigenschaften-auf-wunsch.html>

14

CREATIVE TOOLS: MAKERBOT INDUSTRIES - REPLICATOR 2 - 3D-PRINTER 09

https://www.flickr.com/photos/creative_tools/8080034547/

19

NEXUS NETWORK JOURNAL, APRIL 2019, VOLUME 21, ISSUE 1, PP 79–90

<https://link.springer.com/article/10.1007/s00004-019-00428-5>

20

FRANZ, LUKAS; HTW BERLIN: MANDILLO HELMET

<https://ifworlddesignguide.com/entry/258587-madillo>

31

RAUM HARMONIE WUNDER, PLATONISCHE KÖRPER: UNENDLICHKEIT INSIDE

https://kristallwelten.swarovski.com/Content.Node/blog/01_Raum_Kristall.html

42

ESSER, ERIC: AUXTEX

<https://www.eric-esser-design.de/projects/auxtex/>

44

ROUND AUXETIC SURFACE

<https://www.thingiverse.com/thing:881094>

45

AUXETIC UNIT CELLS

<https://www.thingiverse.com/thing:1892427>

49

WEISHEIT, LINDA; FRAUNHOFER IWU

https://www.xing.com/profile/Linda_Weisheit

51

DESIGNBOOM: NANOSCRIBE: NANOSCALE 3D PRINTED MICROSTRUCTURES

https://www.designboom.com/technology/nanoscribe-nanoscale-3d-printed-microstructures/?utm_campaign=daily&utm_medium=e-mail&utm_source=subscribers

52

THE NIKE FREE RN MOTION FLYKNIT OFFERS THE MOST NATURAL RIDE YET ON A NIKE RUNNER

<https://www.kicksonfire.com/nike-free-rn-motion-flyknit/>

