







## Neudenken von Keramik

Experimentelle Zugänge  
in architektonischer Baukeramik

## Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Ingenieur  
Masterstudium Architektur

Lukas Gosch, BSc

eingereicht an der  
Technischen Universität Graz

Betreuerin:  
Assoc.Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn. Milena Stavric  
Institute of Architecture and Media  
März 2021





## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Diplomarbeit identisch.

Graz, am 01.03.2021

.....  
(Lukas Gosch, BSc)



## Danksagung

Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Milena Stavric  
FL. Dipl.-Päd. Christian Ingolf  
Dipl.-Ing. Julian Jauk  
Mag. Eva-Maria Gosch  
Ing. Werner Gosch  
Hanna Pfeffer, BSc

Institute of Architecture and Media,  
Technical University Graz  
HTBLUVA Ortweinschule Graz  
Advanced Computational Design, TU Wien



# Neudenken von Keramik

---

Experimentelle Zugänge  
in architektonischer Baukeramik

# Abstract – Deutsch

---

Der Mensch ist zu einem der wichtigsten Einflussfaktoren vieler Prozesse der Erde geworden. Durch seine Bedürfnisse hat er das Anthropozän eingeleitet – Das Erdzeitalter des Menschen. Als Architekt\*innen haben wir die Möglichkeit, die Form eines der stärksten dieser Bedürfnisse zu modellieren – den gebauten Lebensraum.

Das Pariser Klimaabkommen schreibt eine Reduktion von aktuell 40 Mrd. Tonnen auf 5 Mrd. Tonnen CO<sub>2</sub> bis 2050 vor. Diese Arbeit evaluiert den derzeitigen Stand gebauter Realität und deren Baustoffe.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf zwei Projekten mit experimentellen Zugängen, die neue architektonische Denkansätze im Bereich der technischen Keramik liefern und sich an State-of-the-Art-Forschung und -Projekten orientieren. Das erste Projekt beschäftigt sich mit dem Einsatz von gebündelter Sonnenenergie als Ersatz des Trocknungs- und Sintervorgangs von keramischen Massen. Im zweiten Projekt wird ein keramisches Modulsystem vorgestellt, das als Bauteil die natürliche Ventilation umliegender Luftmassen durch den Venturi-Effekt begünstigt.

Die Abschlussarbeit „Neudenken von Keramik – Experimentelle Zugänge in architektonischer Baukeramik“ wurde im Rahmen des SFB-Projekts, Subprojekt SP9: „Material- and Structurally Informed Freeform Structures“ ausgeführt.

# Abstract – English

---

We are living in the Anthropocene, the age of humans. With our needs, humanity has become to one of the largest influences of many processes of the earth. As architects we are obliged to shape one of the strongest needs – lebensraum.

The Paris Climate Agreement demands the drastic reduction of greenhouse gas emissions from 40 billion tons to 5 billion tons of CO<sub>2</sub> until 2050. This Thesis evaluates recent construction-habits and building materials.

Main part of this thesis consists of two experimental projects incorporating alternative approaches regarding technical building ceramics. Furthermore, state-of-the-art research and projects are incorporated as a starting point. The first project is focused on incorporating collectible sunlight for drying and sintering of ceramics. The second project aims to create a modular system to increase natural ventilation via the Venturi effect.

This thesis “Rethinking Ceramics - An Experimental Approach in Architectural Building Ceramics“ was executed as part of a SFB project, Subproject SP9: “Material- and Structurally Informed Freeform Structures“.





# Zusammenfassung

---

In der Einleitung dieser Arbeit werden die Motivation und Inspiration als Startpunkt und meine ersten Schnittpunkte mit den Themen ‚Ressourcen‘ und ‚Energie‘ im Bachelorstudium beschrieben.

Als Umriss der Problemstellung folgt eine Analyse des Jetztstands gebauter Realität, deren Auswirkungen auf die Umwelt und eine Erläuterung der Problematik um den Begriff der Nachhaltigkeit. Als Folge dessen ermittelt sich das Ausgangsmaterial, die Keramik, und die Kriterien, nach denen Nachhaltigkeit in dieser Arbeit konkretisiert wird.

Der Hauptteil umfasst zwei Projekte als Antwort auf die Problemstellung. Sie sind von einem experimentellen Zugang geprägt und vertiefen sich infolge der Aufarbeitung. Diese Projektkapitel beinhalten jeweils einen eigenen Rechercheteil, Hauptteil und Ausblick.

Am Ende befinden sich eine Konklusion als Zusammenfassung und ein weiterer Ausblick.

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>16</b>
1.1	Motivation	16
1.2	Inspiration	20
<b>2</b>	<b>Problemstellung</b>	<b>22</b>
2.1	Bauen im Anthropozän	22
2.1.1	Probleme mit dem Begriff Nachhaltigkeit	23
2.2	Baustoffe mit größtem CO <sub>2</sub> -Fußabdruck	25
2.3	Baustoffe mit kleinstem CO <sub>2</sub> -Fußabdruck	27
2.3.1	Lehm & Ton	28
2.4	Projekte	30
<b>3</b>	<b>Projekt I</b>	<b>35</b>
3.2	Technische Recherche	38
3.2.1	Sinterung	38
3.2.2	Forschung	38
3.3	Ideelle Recherche	40
3.3.1	Fresnel Lens Solar Concentrator	40
3.3.2	Solar Cookers	40
3.3.3	SEGS	41
3.3.4	Ziel	41
3.4	Projektbeschreibung	42
3.5	Prototypen	42
3.5.1	Prototyp 1	43
3.5.2	Prototyp 2	44
3.6	Software	44
3.6.1	Rhinoceros und Grasshopper	45
3.6.2	Ladybug	45
3.6.3	Firefly	48
3.7	Hardware	48
3.7.1	Arduino Board	48
3.7.2	Linse	49
3.8	Prozess	52
3.8.1	Materialvorbereitung	52
3.8.2	Trocknung	54
3.8.3	Vorwärmung	54
3.9	Sinterung	58
3.10	Alternativprozess	60
3.10.1	Laser	60
3.10.2	Material	60

3.10.3	Modellvariablen	60
3.10.4	Materialverhalten	62
3.10.5	Extraktion und Wiederverwendung	64
3.11	Ausblick	67
<b>4</b>	<b>Projekt II</b>	<b>71</b>
4.1	Technische Recherche	74
4.1.1	Venturi-Effekt	74
4.1.2	Forschung	76
4.2	Ideelle Recherche	77
4.2.1	Bangladeshian Cooling Panel	77
4.2.2	A Venturi Shaped Roof	78
4.2.3	Sprühnebelanlagen	80
4.2.4	Ziel	80
4.3	Projektbeschreibung	81
4.4	Testmodell	82
4.5	Messungen	82
4.5.1	Umsetzung	84
4.5.2	Ergebnis	86
4.6	Modell	89
4.7	Ausblick	90
<b>5</b>	<b>Konklusion</b>	<b>94</b>
<b>6</b>	<b>Anhang</b>	<b>96</b>
6.1	Literaturverzeichnis	96
6.2	Abbildungsverzeichnis	102

# 1 Einleitung

---

## 1.1 Motivation

Aus einem meiner Entwurfsprojekte am Institut für Gebäude und Energie während des Bachelorstudiums der Architektur definierten sich bereits meine ersten Ansätze für die Vertiefung im Masterstudium.

Vorgegeben war ein Bauplatz in der Nähe des Meeres für ein Hochhaus in Malaysiens Hauptstadt Kuala Lumpur. Die Besonderheit: Das Gebäude war auf einen ökologischen Mehrwert hin zu planen und für den Standort klimatisch zu optimieren. Wie, war den Studierenden selbst überlassen.

Das war der erste Anlass während meiner Studienzeit über eine logarithmisch, parametrische Planung nachzudenken und die Energiebilanz und Funktionalität anderen Aspekten überzuordnen. Neben einer adaptiven Lamellenfassade mit Solarfolien, die sich der Sonneneinstrahlung gemäß automatisch ausrichtet und virtuell simuliert werden konnte, war die eigentliche Besonderheit die Gebäudekühlung: Durch strömungsoptimierte freiliegende Zwischenebenen konnte die Feuchtigkeit des vorherrschenden Winds mit speziellen Matten



Abb. 1.1 *Nebeltrinker Käfer*

aufgefangen werden. Das durch die Luft gesammelte Wasser wurde über ein Leitungssystem in die Zwischendecken eingespeist und kühlte dadurch das Gebäude. Zusätzlich war die Nutzung als Brauchwasser möglich.

Diese speziellen Matten und Geflechte sind eine Entdeckung der Bionik und imitieren die Überlebensstrategie des *Onymacris unguicularis*, auch als ‚namibischer Nebeltrinker-Käfer‘ bekannt:<sup>1</sup> Um auf den Dünen in der trockenen Wüste überleben zu können, nutzt er den feuchten Wind und nimmt auf deren Kämmen eine bestimmte Position ein. Durch die Beschaffenheit seiner Panzerung sammelt sich Kondenzwasser an seinem Körper, das nach gewisser Konzentration über den Hinterleib zum Kopf läuft und so konsumiert werden kann. Diese Matten sind unter anderem in der Wüste Chiles im Einsatz, um Wasser für die Bevölkerung zu sammeln.<sup>2</sup>

1 Vgl. Rüter, Martina: *Bionik: Wassergewinnung nach Art des Nebeltrinker-Käfers*, 16.10.2015, <https://www.martina-rüter.de/text-fachtexte-naturwissenschaften/bionik/bionik-wassergewinnung-nach-art-des-nebeltrinker-kaefers/>, 07.08.2020.

2 Vgl. Kramer, Katharina: *Nebelfischer*, 01.08.2004, [https://web.archive.org/web/20120719170350/http://www.mare.de/index.php?article\\_id=1628](https://web.archive.org/web/20120719170350/http://www.mare.de/index.php?article_id=1628), 07.08.2020.

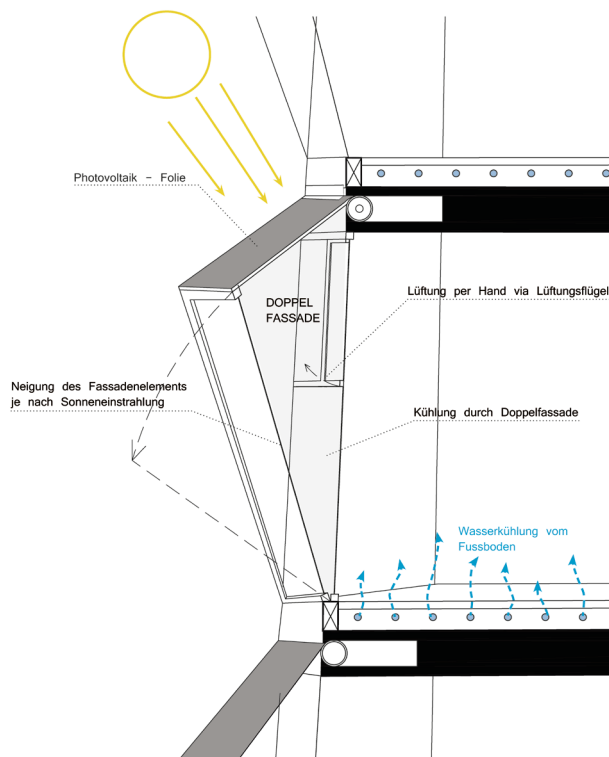


Abb. 1.2 Adaptive Fassade

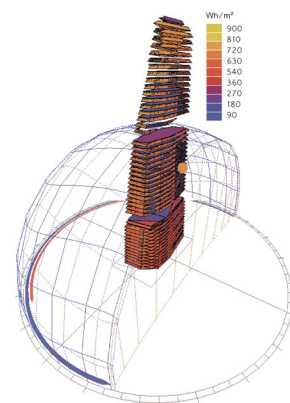
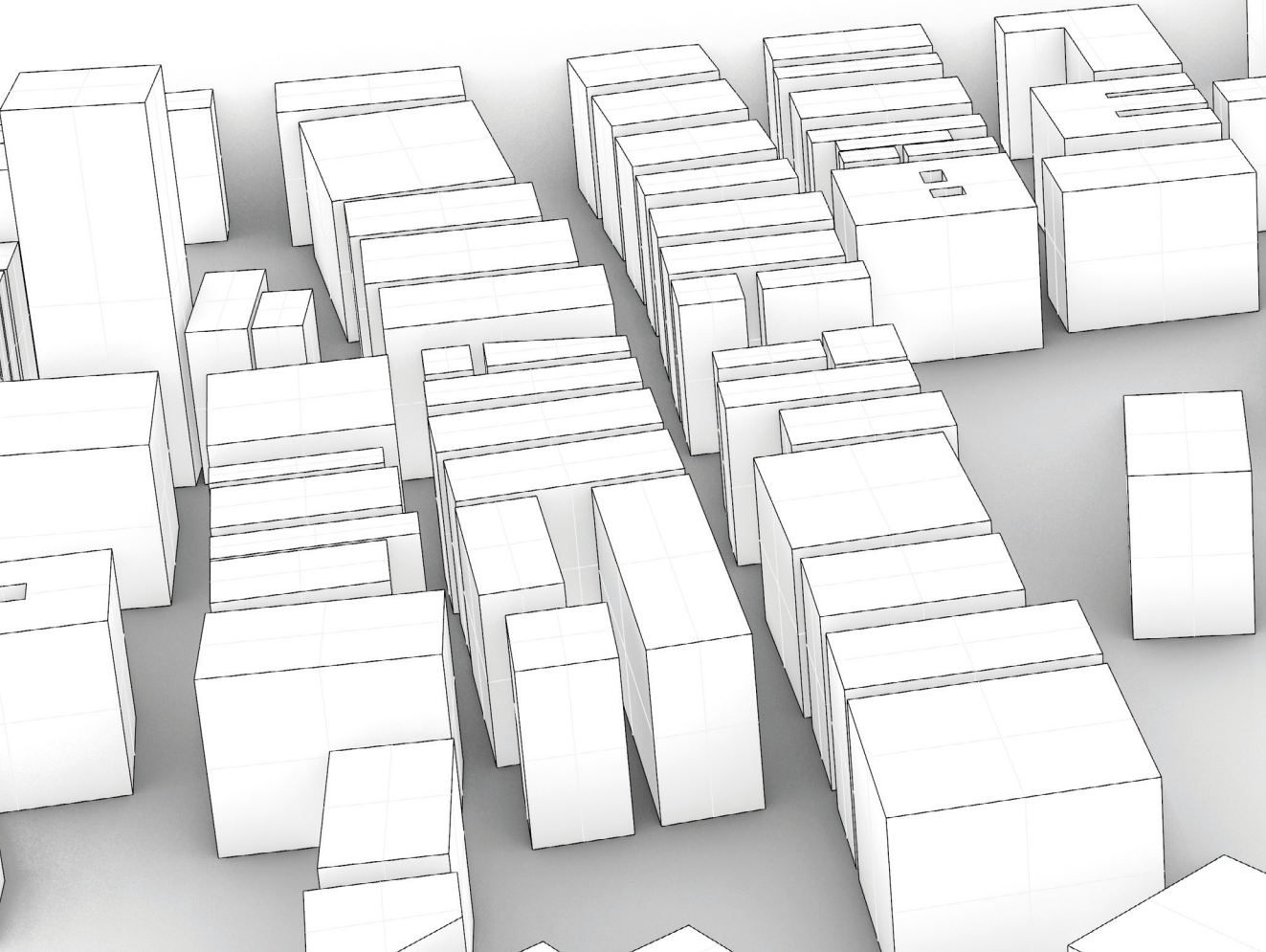
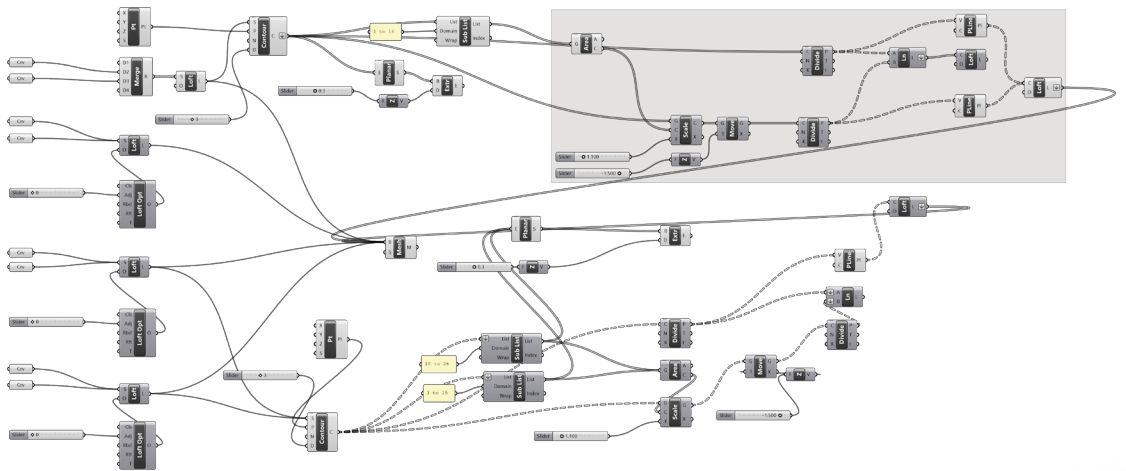
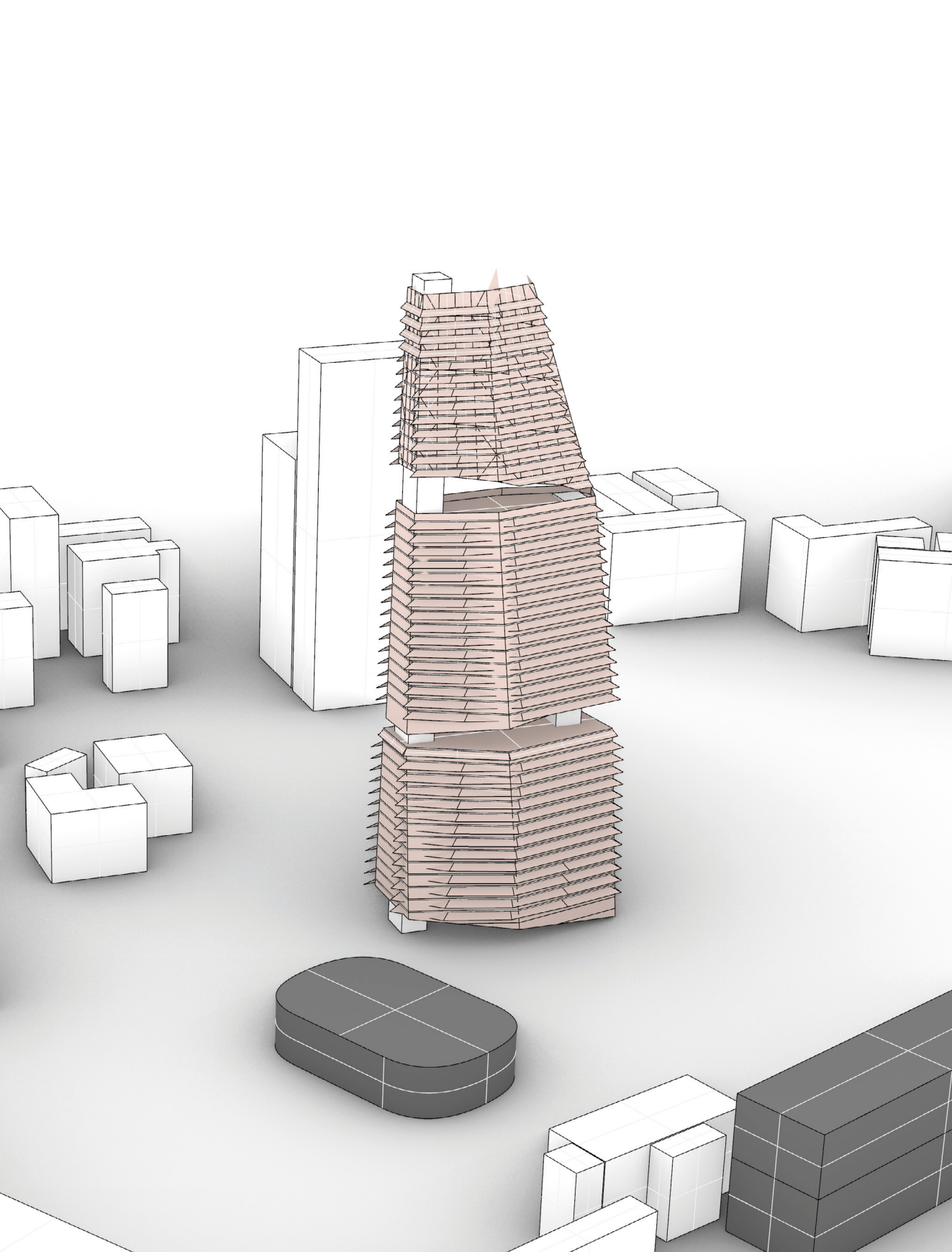


Abb. 1.3 Simulationstest

Abb. 1.4 High Rise - Zero Energy







## 1.2 Inspiration

2011 entwickelte der Künstler, Designer und Erfinder Markus Kayser das ‚Solar Sinter Project‘. In den Wüsten von Marokko und Ägypten testete er erfolgreich einen autarken Roboter mit einer Sammellinse. Das Ergebnis: Durch die gebündelten Sonnenstrahlen konnte Wüstensand im Fokuspunkt zu Glas verschmolzen werden. Eine schichtweise Aufschüttung von Material erlaubten ein Verfahren, das jenem des 3D-Druck ähnelt und mit dem glasähnliche Objekte hergestellt werden konnten.<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Vgl. Kayser, Markus: *Solar Sinter*, (o.J.), <https://kayser-works.com/#/798817030644/>, 07.08.2020.

Aufgrund der Viralität des Projekts eröffnete sich ein breiter Diskurs, der unsere Art zu produzieren in Frage stellte. Auf der offiziellen Homepage wird das Projekt wie folgt beschrieben:

*„In a world increasingly concerned with questions of energy production and raw material shortages, this project explores the potential of desert manufacturing, where energy and material occur in abundance. [...] Solar-sintering aims to raise questions about the*



Abb. 1.5 Markus Kayser - Solar Sinter Project



*future of manufacturing and triggers dreams of the full utilisation of the production potential of the world's most efficient energy resource - the sun. Whilst not providing definitive answers, this experiment aims to provide a point of departure for fresh thinking."*<sup>4</sup>

**4** Vgl. Kayser, Markus: *Solar Sinter*, (o.J.), <https://kayser-works.com/#/798817030644/>, 07.08.2020.

Diese Gedankengänge wurden zum Ausgangspunkt für diese Arbeit. Im folgenden Kapitel soll erläutert werden, wie dieses Konzept in eine weitere Ausführung einfließt.

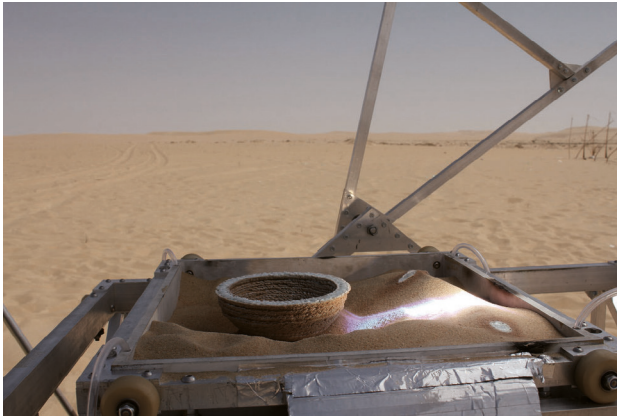


Abb. 1.6 Markus Kayser - Glasobjekt

## 2 Problemstellung

---

5 Vgl. Rockström u.a. 2017, 1269.

Laut dem Pariser Klimaabkommen müssen die Emissionen von aktuellen 40 Mrd. Tonnen CO<sub>2</sub> auf 5 Mrd. Tonnen bis 2050 reduziert werden.<sup>5</sup> Nach wie vor reagiert die Baubranche nur träge und Zement bleibt eiserner Spitzenreiter beim weltweiten Ausstoß. Die allgemeine Ressourcenbeschaffung ist heikel und gebaute Realität endet oft als nicht rückführbarer Problemstoff.

### 2.1 Bauen im Anthropozän

6 Vgl. Steffen/Crutzen/McNeill 2007, 618.

Die Auswirkungen des Menschen auf den Klimawandel sind mittlerweile unumstritten, weswegen in diesem Zusammenhang unsere jetzige geochronologische Epoche oft als Zeitalter des Menschen, das ‚Anthropozän‘ bezeichnet wird.<sup>6</sup> Der Mensch ist zu einem der wichtigsten Einflussfaktoren vieler Prozesse der Erde geworden und beeinflusst diese aktiv durch seine Bedürfnisse.

Eines der stärksten dieser Bedürfnisse ist es, ein Dach über dem Kopf zu haben.

7 Vgl. Laschinger/Lötscher 1975, 122.

Als Architekt\*innen haben wir die Befugnis, die Ausführung dieser Grunddaseinsfunktion<sup>7</sup> direkt zu beeinflussen. Sei es im öffentlichen oder privaten Bereich, es ist die Pflicht der Architekt\*innen, sich mit diesen Prozessen und den Auswirkungen der Entscheidungen, die sie in ihrem Rahmen treffen, auseinanderzusetzen.

8 Vgl. Folkers 2020, 592.

In Folkers Abhandlung über den interdisziplinären Diskurs des Anthropozäns läuft die Argumentation oft über die Aussage was das Anthropozän gewesen sein wird und nicht, wie es letztendlich bezeichnet werden wird oder wo es genau anfängt.<sup>8</sup> Er begründet diese Formulierung mit der Notwendigkeit einer außenstehenden Objektivität und verweist sinnbildlich auf eine fremde Zivilisation, die das Dasein des Menschen aus seinen Überresten rekonstruiert.<sup>9</sup> Gleichzeitig verdeutlicht aber jene Formulierung auch den Ernst der Lage, indem

9 Vgl. Ebd., 592.

auf wissenschaftlicher Basis bereits mit dem Ende der Menschheit als Konsequenz kalkuliert wird.

Durch die Aufklärung im 18. Jahrhundert verschob sich das theozentrische Weltbild vermehrt zu einem anthropozentrischen.<sup>10</sup> Die logische Konsequenz wäre dieses Weltbild hinsichtlich unserer Abhängigkeit gegenüber der Umwelt gänzlich neu zu definieren. Diese Thematiken werden nach eigener Erfahrung im Studium nur stiefmütterlich behandelt. Folkers Frage ‚Was wir gewesen sein werden‘ ist vor allem in der Architektur und im Bau von grundlegender Bedeutung und zu großem Teil beeinflussbar. Wir dürfen keine Problemstoffe produzieren, die nicht wiederverwendet werden können und als Sondermüll letztendlich auf eine autodestruktive Zivilisation schließen lassen.

10 Vgl. Schwaabe 2018, 89.

Die Fragen, die sich für die Praxis daraus ableiten lassen, könnten folgende sein: Welche Ressourcen, Energien und Baustoffe fließen in mein Gebäude mit ein? Zu welchem Teil und auf welche Weise können Baustoffe wiederverwendet, recycled, upcycled oder rückgeführt werden? Wo sind die Grenzen der Umsetzung? Und was ist Nachhaltigkeit überhaupt?

## 2.1.1 Probleme mit dem Begriff Nachhaltigkeit

Der Begriff der Nachhaltigkeit wird in allen Lebensbereichen inflationär gebraucht. Wird ein Konsumgut, Produkt oder eine Dienstleistung als ‚nachhaltig‘ angepriesen, wird automatisch suggeriert, dass dieses mit reinem Gewissen konsumiert werden kann. Doch ist das wirklich so?

*„Klar ist, dass sich hinter dem Begriff ‚nachhaltige Entwicklung‘ keineswegs ein analytisch präzise gefasstes Konzept verbirgt. Jedes Individuum und jede Gruppe muss sich also durch Reflexion oder Diskurs seine oder ihre Bedeutungszuweisung für Nachhaltigkeit erarbeiten, die getragen ist von den Prinzipien der Verantwortung und Gerechtigkeit im Raum.“<sup>11</sup>*

11 Zimmermann 2016, 21.

12 Vgl. *Spot-bremen.de: Nachhaltiges Bauen: Mit der Natur unter einem Dach*, (o.J.) <https://spot-bremen.de/magazin/meine-immobilie/begruente-daecher-fuer-ein-besseres-klima/>, 07.08.2020.

13 Vgl. *Tutoria.de: Digitalisierung an Schulen: So könnte der Unterricht anno 2020 aussehen*, (o.J.), <https://www.tutoria.de/schule-ratgeber/schulalltag/digitalisierung-an-schulen/>, 07.08.2020.

14 Vgl. *Parguel/Benoit-Moreau/Larceneux 2011*, 16.

15 Vgl. *Braungart/McDonough/Bollinger 2007*, 1137-1348.

Diese Fehlentwicklung führte z.B. zu einer irreführenden Konnotation des Begriffs in der Architektur, sodass er fälschlicherweise für Solarpaneele oder begrünte Fassaden verwendet wurde.<sup>12</sup> Ähnliches passierte beim Begriff der ‚Digitalisierung‘ im Bildungswesen, unter dem man Schüler\*innen versteht, die ihre Hausaufgaben mittels Tablet oder PC löst, anstatt in Handschrift.<sup>13</sup>

Zur Veranschaulichung empfiehlt sich ein einfaches Beispiel der Umwandlung von Kartoffeln zu Chips. Sind die Kartoffeln ‚regional‘, ist die Entlohnung ‚fair‘ und die Verpackung ‚ökologisch‘, sind die Chips dann ‚nachhaltig‘? In der Kalkulation fließt nicht ein, dass ein energetisch aufwändiger Prozess dahintersteht, der objektiv das Ausgangsmaterial ‚Kartoffel‘ demnach nicht optimiert, sondern aus gesundheitlicher Betrachtungsweise das Endprodukt sogar verschlechtert.

Zertifikate sind oft nicht objektiv und aussagekräftig, die Nachverfolgung von Produkten unscharf und die Herstellungsketten zum Endprodukt sehr komplex. Diese bewusste Verbrauchertäuschung wird auch oft als Greenwashing<sup>14</sup> bezeichnet. ‚Nachhaltigkeit‘ kann somit nicht einheitlich adressiert werden und dient der Wirtschaft und Industrie oft als Totschlagargument, sich adaptiert zu haben und wie gehabt weitermachen zu können.

Um Nachhaltigkeit im Rahmen dieser Arbeit zu adressieren und zu konkretisieren, definiert sie sich also durch folgende Aspekte:

- 1) Material und Verfügbarkeit
- 2) Rückführbarkeit
- 3) energetisch effiziente Prozesse

Das Projekt lehnt somit an ein von Michael Braungart und Bill McDonough entwickeltes Produktionskonzept namens „Cradle to Cradle“ (C2C) an.<sup>15</sup> Dieses stützt sich auf ein zirkulares bzw. schleifenförmiges System (Abb. 2.1). Es bildet ein Gegenkonzept zur jetzigen Situation des linearen Wirtschaftssystems, in dem Produkte mit

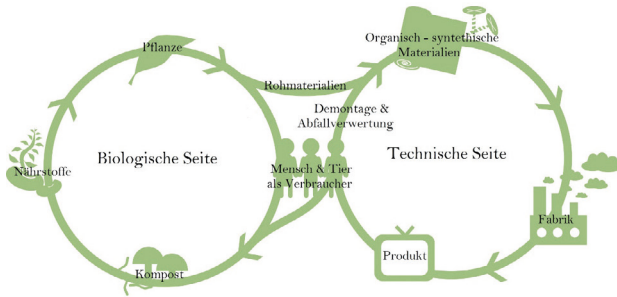


Abb. 2.1 Cradle to Cradle Prinzip

nur einem Lebenszyklus (Rohstoffe - Transformation - Disposition) vorherrschen. C2C sieht also einen Kreislauf ohne ‚downcycling‘ vor.<sup>16</sup> Produkte werden getrennt und wiederverwertet, ohne Qualitätsverluste zu erleiden, bzw. dient der Abfall alter Produkte als ‚Nahrung‘ für neue - Ein Prinzip, das seit Anbeginn der Zeit in der Natur vorherrscht. Das lineare System hat durch die Endlichkeit der Ressourcen und exponentielles Bevölkerungswachstum keine Zukunft.

Um auf die Materialien, ihre Verfügbarkeit und Rückführbarkeit einzugehen, müssen zuerst die Baustoffe mit der größten Auswirkung auf die globale Emission, also ihr ökologischer Fußabdruck, beleuchtet werden. In weiterer Folge ermitteln sich die keramischen Massen als Kontrapunkt und Ausgangsmaterial dieser Arbeit. Die Umwandlungsprozesse und Lösungsansätze werden in Form von experimentellen Projekten im weiteren Verlauf der Arbeit beleuchtet.

## 2.2 Baustoffe mit größtem CO<sub>2</sub>-Fußabdruck

Der sogenannte Portland-Zement von Joseph und William Aspdin hat sich seit Mitte des 19. Jahrhunderts in Form von gießbarem hydraulischen Beton weltweit an die Spitze der verbauten Baustoffe durchgesetzt.<sup>17</sup> Zement erreicht mit 3% Beteiligung an globaler CO<sub>2</sub>-Emission (Abb. 2.2) mit Abstand eine Ausnahmestellung in der Bauindustrie.<sup>18</sup>

16 Vgl. Ebda., 1137 f.

17 Vgl. Grimm, Roland, Was ist Portlandzement?, 27.04.2017, <https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknow-how/grundstoffe-des-bauens/portlandzement-definition-geschichte-joseph-aspdin-isaac-charles-johnson-zement-klinker-din-en-197-1-portlandkompositzement-hochofenzement/>, 15.11.2020.

18 Vgl. Ge/Friedrich, 4 Charts Explain Greenhouse Gas Emissions by Countries and Sectors, 06.02.2020, <https://www.wri.org/blog/2020/02/greenhouse-gas-emissions-by-country-sector>, 15.11.2020.

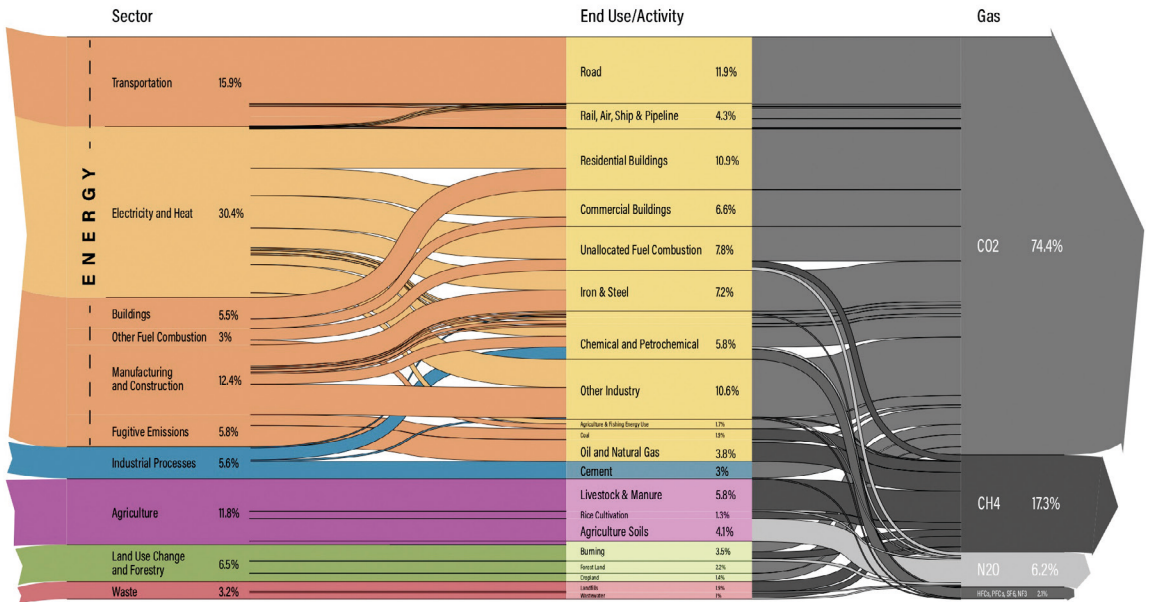


Abb. 2.2 Greenhouse Gas emission - World Resources Institute

19 Vgl. Aitcin/Flatt 2016, 33.

20 Vgl. Cankaya/Cankaya 2015, 243.

21 Vgl. Ebda., 245-249.

22 Vgl. UNEP 2019, 13.

Dem zugrunde liegt nicht nur ein aufwändiger und langer Herstellungsprozess durch verschiedene Mahlstufen und dem Brand des Pulvers auf über 1450°C,<sup>19</sup> sondern auch die hohen Emissionen in allen Stufen der Zementherstellung und Extraktion der Rohstoffe wie Kalkstein und Zuschlagstoffe.<sup>20</sup> Den kritischen Diskurs bestimmen weiters toxische Komponenten, sowie das hohe Risiko von Arbeitsunfällen.<sup>21</sup>

Um Beton zu erhalten, wird dem Zement eine große Menge Sand und Kies beigemischt. Die Verarbeitung von Sand wird unterdessen auf 50 Mrd. Tonnen pro Jahr geschätzt, das sind 18kg pro Person und Tag. Durch den massiven Abbau liegt er damit geschätzt auf Platz zwei im globalen Verbrauch von Ressourcen nach Wasser.<sup>22</sup> Dazu wird im Report vom United Nation Environment Programme (UNEP) die Lage zum Sandabbau wie folgt beschrieben:

„The scale of the challenge inherent in sand and gravel extraction makes it one of the major sustainability

*challenges of the 21st century. These materials are one of the largest resources extracted and traded by volume, yet is one of the least regulated activities in many regions. [...] Local and international journalists are currently leading in uncovering the scale of the impacts while science and policies to support responsible consumption and extraction are lagging behind.”*<sup>23</sup>

23 UNEP 2019, 16.

Es kann festgehalten werden, dass Baustoffe wie Glas, Beton und Asphalt, die alle einen Großteil an Aggregat<sup>24</sup> benötigen, ebenfalls von dieser Problematik betroffen sind.

24 „Aggregate“ (dt. Aggregat) fasst Sand und Kies zusammen und beschreibt Sedimentationsstufen von 0,063 - 63mm Korngröße.

Zusammenfassend sind also die konstruktiven Grundpfeiler des Bauens unserer modernen Zivilisation abhängig von einem Baustoff, der nicht zukunftsträchtig ist. Es ist daher notwendig, einen alternativen Kurs einzuschlagen und sich über Herkunft, Emission, Verarbeitungsprozess und Rückführung baulicher Stoffe Gedanken zu machen.

## 2.3 Baustoffe mit kleinstem CO<sub>2</sub>-Fußabdruck

„In-Situ“ ist lateinisch und bedeutet so viel wie ‚am Ort‘ oder ‚in der ursprünglichen Position‘.<sup>25</sup> Dieser Ausdruck ist durch eine weitreichende interdisziplinäre Prägung gekennzeichnet und findet sich u.a. in Medizin und Archäologie wieder.<sup>26</sup>

25 Vgl. Duden.de: *in situ*, (o.J.), [https://www.duden.de/rechtschreibung/in\\_situ](https://www.duden.de/rechtschreibung/in_situ), 27.10.2020.

26 Vgl. Ebda.

Im Bereich der extraterrestrischen Forschung, ist dieser Begriff unumgänglich: Um Bauprojekte am Mond oder Mars zu realisieren, muss sich der Ressourcen und Energie vor Ort bedienen werden. Die Umstände erzwingen somit unweigerlich die Nutzung und Verarbeitung lokal verfügbarer Rohstoffe.

Das stellt einen Zugang dar, den wir durch die Globalisierung aus den Augen verloren haben. Auch auf der Erde muss diese Denkweise wieder in den Fokus rücken. Da

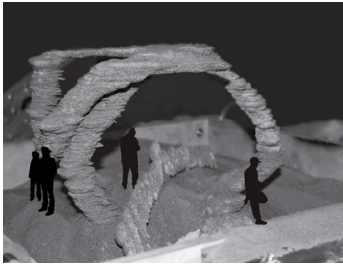


Abb. 2.3 Markus Kayser - Solar Sintered Object, Sand

die Nachforschung der Herkunft unscharf und Prozesse der Herstellungen komplex sind, kann Nachhaltigkeit mit diesem Kriterium leichter greifbar gemacht werden.

Das in der Einführung erwähnte Kunstprojekt von Markus Kayser deutet - bewusst oder unbewusst - auf diese Thematik hin: Er verarbeitete feinen Wüstensand direkt in Marokko und Ägypten mittels Sonnenenergie und formte somit In-Situ Kunstobjekte in einem autarken Verarbeitungsprozess (Abb. 2.3).

Trotz seiner Ausbildung und Tätigkeit in der Forschung - Markus Kayser erlangte seinen PhD 2018 am Institute of Technology in Massachusetts - bezeichnet er sich in erster Linie als Designer, Künstler und Erfinder und tritt auch als solcher auf.<sup>27</sup> Wird dieses Projekt in einem wissenschaftlichen Kontext, betrachtet stellen sich natürlich viele weitere Fragen. Die künstlerische Abhandlung zielt dadurch viel besser auf eine gewisse Viralität ab und vermittelt einen Denkanstoß. Dieses Projekt sollte also als Ball interpretiert werden, der der Forschung und Industrie zugespielt wurde.

27 Vgl. Kayser, Markus: *About*, (o.J.), <https://kayserworks.com/about>, 07.08.2020.

### 2.3.1 Lehm & Ton

Ein Baustoff, der sich hinsichtlich des In-Situ-Modells sofort aufdrängt, ist die Keramik. Tonerden zu formen und dann zu brennen, um sie zu verfestigen, ist eine grundlegende Praxis menschlicher Kultur und bis zu deren Wurzeln belegt.<sup>28</sup> Durch geomorphologische Sedimentationsprozesse vollzog sich die Tonentstehung kontinuierlich durch alle Perioden und überall, wo Grundgestein vorhanden war.<sup>29</sup> „Kaum ein Land der Welt ist ohne Tonvorkommen“<sup>30</sup>, wird DuMonts Handbuch der keramischen Techniken eingeleitet.

Ein weiteres Indiz für die Erfolgsgeschichte direkter und lokaler Nutzung von keramischen Massen sind Ziegelwerke, wie die österreichische Firma Wienerberger. Ob eine Produktionsstätte eröffnet wird, hängt maßgeblich von der Bodenbeschaffenheit vor Ort und der

28 Vgl. Vandivier u.a. 1989, 1003.

29 Vgl. Frotscher 2006, 15.

30 Kenneth 1985, 8.



vorraussichtlichen lokalen Abdeckung mit Aufträgen im Umkreis von wenigen hundert Kilometern ab.

Auf den Homepages der Hersteller\*innen wird suggeriert, dass sowohl Produktion als auch Verbau nachhaltig sind. Produkte und Mauerziegel werden teils sogar als „klimapositiv“<sup>31</sup> angepriesen. Neben einem energieaufwändigen Brandvorgang und Materialausfall durch Risse sind es aber vor allem die Verbindung mit erdöl-basierten Dämmstoffen und der Verbau mit Mörtel, die eine Rückführung oder Wiederverwendung eines Mauerwerks schwierig bis unmöglich machen.

Mörtel übernimmt im Bauwerk wichtige defensive Aufgaben, wie die Kraftableitung und eine gewisse Ausgleichsfunktion der Elemente in der Wand.<sup>32</sup> Durch die schlüssige Verbindung bilden diese Teile ein Verbundsystem und sind schwer bis nicht mehr trennbar. Das gesamte Mauerwerk wird zum Problemstoff.

Das bewährte System der Mauerziegelherstellung hat außerdem zur Folge, dass sich, im Gegensatz zur Stahl- und Betonindustrie, die Branche seit zwei Jahrhunderten kaum verändert oder weiterentwickelt hat. Dies drückt sich auch durch die veraltete Technik in den Produktionsstätten aus (Abb. 2.4), die einem vielfältigen und innovativem, breiten Spektrum in Kunst und Materialität gegenübersteht.

Sowohl durch einen energetisch effizienten Prozess als auch die Vermeidung von Mörtel und anderen Zuschlagsstoffen könnte die toxische Komponente des Baustoffs vermieden werden. Er kann also dem ‚Cradle to Cradle‘-Prinzip gerecht werden. Es findet sich also im

31 Vgl. Wienerberger GmbH: Was macht den Ziegel klimaneutral?, (o.J.), <https://www.wienerberger.at/bauen-mit-ziegeln/wandloesungen/KlimapositiverZiegel/strategie.html>, 08.11.2020.

32 Vgl. Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V. (Hg.) 2018, 119.



Abb. 2.4 Produktion eines Mauerziegels

technischen Kreislauf ein, wird ohne downcycling wiederverwendet oder endet wieder als Ausgangsstoff im Boden (biologischer Kreislauf, Abb. 2.1), wo es auch extrahiert wird.

## 2.4 Projekte

Durch die erläuterten Umstände und Prinzipien formte sich der folgende Teil dieser Arbeit. Zusammen mit Expert\*innen, Firmenbesuchen und als Teil des Forschungsprojekts ‚Material- and Structurally Informed Freeform Structures‘ (SFB Projekt, Subprojekt SP9) kristallisierten sich schlussendlich zwei Projekte heraus, die jeweils besondere Potentiale in den zuvor erläuterten Rahmenbedingungen aufgewiesen haben und für eine weitere Vertiefung vorzuziehen waren.

Diese versuchen die vorher bestimmten Kriterien der Nachhaltigkeit jeweils auf ihre Art umzusetzen. So ist der Fokus des „energetisch effizienten Prozess“ beim ersten Projekt auf den Herstellungsprozess selbst, beim zweiten Projekt eher auf die Funktion als fertig installiertes Bauteil gerichtet. Um der Rückführung und Beschaffung gerecht zu werden wird auf zusätzliche Komponenten in der Keramik oder Zuschlagstoffe als solches verzichtet. Infolgedessen ist die Wiederverwendung von Ausfallmaterial in der Produktion ein zusätzliches angestrebtes Ziel.

Die Projekte sind von einer experimentellen Zugangsweise geprägt und konkretisieren sich im Laufe der Untersuchungen. In der vorliegenden Arbeit werden neben einer Einleitung die jeweils wichtigsten wissenschaftlichen Publikationen in der respektiven Forschung sowie Referenzprojekte als ideales Ziel angeführt und in den Projekten verwebt. Die Reproduzierbarkeit soll durch genaue Dokumentation sowie die Nutzung von Open-Source-Programmen nach Möglichkeit sichergestellt werden.



Abb. 2.5 Lasersinterung.















## 3.1 Technische Recherche

### 3.1.1 Sinterung

33 Vgl. *Dancer 2016*, 2.

Der Trocknungs- und Feuerungsprozess von keramischen Bauelementen ist der energieintensivste in der gesamten Produktion.<sup>33</sup> Diese Schritte sind somit verantwortlich für einen großen Anteil der CO<sub>2</sub> Emission.

34 Vgl. *Biesuz/Sglavo 2019*, 115.

Durch Sonnenenergie könnte eine gezielte Vorwärmung und Schnellsinterung<sup>34</sup> initiiert werden. Die Implementierung von gebündelten Sonnenstrahlen könnte als Ersatz des herkömmlichen Brennvorgangs angedacht werden.

### 3.1.2 Forschung

Als Ausgangspunkt wurde die ‚State-of-the-Art-Forschung‘ evaluiert und eine kleine Auswahl der wichtigsten wissenschaftlichen Publikationen getroffen, die für dieses Projekt am wichtigsten sind. Das Hauptaugenmerk lag auf Arbeiten im Bereich der solaren Sintermethoden [1, 3, 6, 8, 10], Einsatz von Fresnell Linsen [4, 5, 7] und Schnellsinterung [2, 9].

Keywords: Solar Sintering, Fast Sintering, Flash Sintering, Additive Manufacturing, Aggregate, In-Situ, Rapid Prototyping, Fresnel Lens

[1] M. Fateri, A. Meurisse, M. Sperl, *Solar Sintering for Lunar Additive Manufacturing*, Köln, 2019

[2] M. Biesuz, V. M. Sglavo, *Flash sintering of ceramics*, Trento, 2019

[3] A. Meurisse, A. Makaya, C. Willsch, M. Sperl, *Solar 3D printing of lunar regolith*, Köln, 2018

[4] H. Wang, J. Huang, M. Song, Y. Hu, Y. Wang, Z. Lu, *Simulation and Experimental Study on the Optical*



Abb. 3.1 *State of the Art - Map*

Performance of a Fixed-Focus Fresnel Lens Solar Concentrator Using Polar-Axis Tracking, Guangzhou, 2018

[5] A.D. Nawar Saif, S. N. Nagaraj, A. Anarghya, V.N. Abhishek, Development of Powerhouse Using Fresnel lens, Seeb, 2018

[6] B. Imhof, D. Urbina, P. Weiss, M. Sperl, Advancing solar sintering for building a base on the moon, Vienna, 2017

[7] T.Y. Park, J.Y. Jung, H.U. Oh, Experimental Investigation on the Feasibility of Using a Fresnel Lens as a Solar-Energy Collection System for Enhancing On-Orbit Power Generation Performance, Gwangju, 2017

[8] A. Ghosh, J.J. Favier, M.C. Harper, Solar sintering on lunar regolith simulant, Strasbourg, 2016

[9] C.E.J. Dancer: Flash sintering of ceramic materials, Warwick, 2016

[10] R. Román, I. Canadas, J. Rodríguez, M.T. Hernández, M. Gonzáles, Solar sintering of alumina ceramics: Microstructural development, Madrid, 2008

## 3.2 Ideelle Recherche

### 3.2.1 Fresnel Lens Solar Concentrator

Da die Anschaffung und Instandhaltung von Solarkonzentratoren sehr teuer ist, fokussiert sich dieser Artikel des Journals ‚Energies‘ auf ein mobiles System mit fixiertem Fokus einer beweglichen Fresnellinse und einer unbeweglichen Empfängerfläche (Abb. 3.2).<sup>35</sup>

35 Vgl. Wang, Hai u.a. 2018, 1.

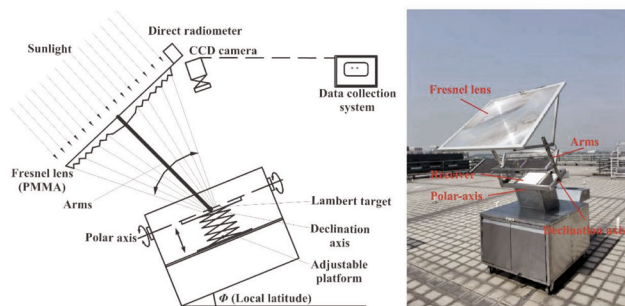


Abb. 3.2 Fixed-Focus Fresnel Lense Solar Concentrator

Im Zusammenhang mit diesem kostengünstigen und mobilen System wurden Form, Temperatur und Qualität des Fokuspunkts - sowie deren Veränderung bei Abweichungen der Linse von 0-2.5° zur Sonne gemessen.<sup>36</sup> Somit wurden wichtige Ergebnisse für jene mobile Sintersysteme ermittelt.

36 Vgl. Ebda., 11.

37 Vgl. Solar Cookers International (SCI): Chad, 29.09.2020, <https://solarcooking.fandom.com/wiki/Chad>, 17.11.2020.



Abb. 3.3 Solar CookKit, Tschad

### 3.2.2 Solar Cookers

Beim ‚the Solar CookKit‘ (Abb. 3.3) handelt es sich um eine mobile und faltbare Kochstation, die rein mit Sonnenenergie betrieben wird. Sie ist speziell für Familien in Not im Konfliktgebiet von Darfur Zwischen Sudan und Tschad entwickelt worden.<sup>37</sup> Das Projekt wurde zusammen mit der Ingenieursvereinigung ‚Solar Cookers International‘ realisiert und befreit die betroffenen Familien von der Abhängigkeit von Heizmaterial für das Kochen



und seiner Beschaffung.<sup>38</sup> Die Kocheinheiten wurden aus foliertem Karton gefertigt und die daraus gewonnenen Mahlzeiten können pro Kocheinheit bis zu sechs Personen ernähren. Für den Transport können diese in Din A4 Größe zusammengefoldet werden (Abb. 3.4).

Dieses System wurde von einigen Initiator\*innen aufgenommen. Eine Weiterentwicklung dieser Technik ist u.a. der „Gasy Nahandro“ in Madagascar, die durch verwebte Matten aus Gras vor allem auf eine lokale Produktion setzt und sich somit beim Stückpreis auf 2 US-Dollar beschränkt.<sup>39</sup>

### 3.2.3 SEGS

Das dritte Referenzprojekt stellen die Solar Energy Generating Systems (SEGS) in Kalifornien dar, die durch ihre Ausmaße als eine der größten Solarkollektoranlagen der Welt bezeichnet wird und mit herkömmlichen Kraftwerken konkurrieren kann. Nach dem Bau des ersten Abschnitts (SEGS I) wurden bis 1990 acht weitere Abschnitte an das Netz angeschlossen (SEGS II-IX) und liefern jährlich zwischen 560 und 660GWh an Strom aus reiner Sonnenenergie.<sup>40</sup> Zum Vergleich: Ein modernes Windrad erzeugt ungefähr 7-10 GWh pro Jahr.<sup>41</sup>

### 3.2.4 Ziel

Es wurden bewusst drei Projekte in sehr unterschiedlichen Bereichen und Maßstäben ausgewählt, um die Qualität, Vielfalt und Notwendigkeit der Nutzung von gebündelter Sonnenenergie zu verdeutlichen. Diese Auswahl war außerdem ausschlaggebend für die weitere Vorgehensweise des Projekts.

Der sozioökonomisch Aspekt wie bei ‚the Solar Cookit‘ ist mir ein persönliches Anliegen. Die Nutzung der Sonnenenergie ist nicht an kapitalistische oder marktwirtschaftliche Bedingungen gekoppelt. Wie sich dieser

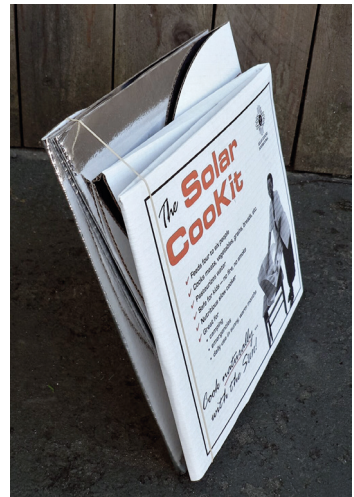


Abb. 3.4 Solar Cookit, gefaltet



Abb. 3.5 SEGS - Kalifornien

38 Vgl. SCI: Buy your Cookit here, (o.J.), <https://www.solarcookers.org/resources/cookit-purchase>, 17.11.2020.

39 Vgl. SCI: Gasy Nahandro, 26.08.2013. [https://solarcooking.fandom.com/wiki/Gasy\\_Nahandro](https://solarcooking.fandom.com/wiki/Gasy_Nahandro), 17.11.2020.

40 Vgl. Nextera Energy Resources: Solar Electric Generating Systems, (o.J.), <https://www.nexteraenergyresources.com/content/dam/nextera/us/en/pdf/portfolio/segs.pdf>, 03.01.2021.

41 Vgl. NÖ Energie- und Umweltagentur GmbH: Windenergie, (o.J.), <https://www.enu.at/windenergie>, 03.01.2021.

Einfluss ausdrückt, ist im Projektteil und dessen Zielsetzung ablesbar.

### 3.3 Projektbeschreibung

Durch die Kriterien aus der Recherche wird eine mobile Robotervariante genannt ‚SoSiCe‘ (Solar Sintered Ceramics) als Prototyp vorgestellt, die mittels eigens kreierter Software über ein ‚Arduino Board‘ zwei Rotationsachsen betreibt und somit der Sonne folgt. Über eine weitere gesteuerte Schienenvorrichtung können Proben prozessiert werden. Als Ziel wurde eine riss- und abplatzfreie Liniensinterung einer flach dimensionierten Keramikprobe inklusive Vorwärmung gesetzt.

### 3.4 Prototypen

Unter Einbeziehung der Forschung im Bereich des Sinterings, den Referenzprojekten und nach den Aspekten der Nachhaltigkeit dieser Arbeit wurden die Kriterien für den Prototypen wie folgt ausformuliert: Dieser soll

- 1.) mobil (dezentrale Anwendung)
- 2.) verhältnismäßig (nach Größe der Linse und Betriebstemperatur ausgerichtet)
- 3.) dreiaxsig (zwei Rotationsachsen für die Ausrichtung zur Sonne und eine Sinterbewegung - Linie)
- 4.) kostengünstig (Linse, Material und Steuerungsmechanik unter 100€)

sein. Im Idealfall soll diese Maschine einfach zu versenden sein. Um all dem gerecht zu werden, wurde als Ausgangsmaterial Finnplatte verwendet, die durch ein Stecksystem ihre Stabilität erhält. Die Einzelteile wurden aus 1m x 0,75m großen Platten gelasert. Die Platten könnten also als kleinere Variante mit den vorgeschrittenen Positionen bereits als Stapel für den Selbstbau verschickt werden.

### 3.4.1 Prototyp 1

Als Vorbereitung für die Umsetzung wurden verschiedene Prototypenarten als virtuelles Modell erstellt, simuliert und evaluiert. Die Dimension bezieht sich immer auf die verwendete Größe der Linse, diese beträgt 40 x 40cm.

Bevor das gesamte Konstrukt gebaut werden konnte, mussten zuerst die Belastungsgrenzen des unteren Systems ausgelotet werden. Dazu wurde ein erster Prototyp gebaut, der aus einem unteren Zahnkranzsystem und einer Trägerplatte bestand, die sich um eine Achse drehen konnte. Zwei der vier Zahnräder wurden durch Servos betrieben und führten mit deren Hilfe eine Rotationsbewegung des Systems aus. Danach wurde die

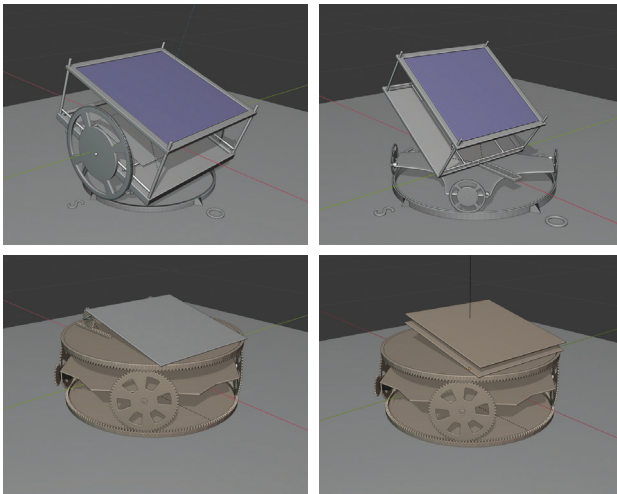


Abb. 3.6 Prototypen - virtuelle Testphase

Trägerplatte mit 500g Gewicht versehen und die Bewegung wiederholt. Das Gewicht wurde kontinuierlich bis über den geschätzten Wert der Oberkonstruktion von 2kg erhöht, wodurch der Beweis für die Funktionalität erbracht werden konnte.



Abb. 3.7 Prototyp 1 - Testlauf für die Sonnenverfolgung über zwei Stunden

### 3.4.2 Prototyp 2

Durch Erkenntnisse am Prototyp 1 konnten folgende Verbesserungen vorgenommen werden: Zahnkränze wurden verkleinert und eine gegenläufige zweite Trägerplatte installiert. Somit konnte letztendlich die komplette Konstruktion als Prototyp 2 realisiert werden.

Zur Steuerung der fünf verbauten Servos wurde ein ‚Arduino Uno Board‘ ausgewählt. Aufgrund der hohen Flexibilität durch die Ansteuerung mittels der Programme ‚Grasshopper‘ und ‚Rhinceros‘ konnte das Modell gleichzeitig im virtuellen Raum simuliert und die Bewegungen in Echtzeit umgesetzt werden. Ein weiterer Vorteil war die Stromversorgung, eine externe Stromquelle wäre mit Stepper-Motoren oder einer komplexeren Ausstattung unumgänglich gewesen. In dieser Konstellation konnte das System direkt über den Laptop betrieben und mit Strom versorgt werden.

## 3.5 Software

Für den erstellten Prototypen muss die Software folgende Aufgaben abdecken:

- 1.) den Sonnenpfad für den jeweiligen Standort berechnen
- 2.) den jeweiligen Sonnenstand mit der Jetztzeit synchronisieren
- 3.) auf die zwei Rotationsachsen umrechnen.

ad 1.) Um den Sonnenpfad zu berechnen ist zunächst der Standort wichtig. Um die globale Einsatzmöglichkeit des Systems sicherzustellen, wurde auf sogenannte ‚EnergyPlus-Weatherdata‘ (EPW) vom U.S. Department of Energy<sup>42</sup> zurückgegriffen. Diese Daten enthalten neben dem Sonnenpfad auch weitere wichtige Wetter- und Strahlungsinformationen, werden laufend durch Messungen aktualisiert und sind global für fast jeden Standort verfügbar.

42 Vgl. Geater, Jay: Was ist die EPW-Dateierweiterung?, 26.11.2018, <https://solvusoft.com/de/file-extensions/file-extensions-epw/>, 13.09.2020.



ad 2.) Die Auslese der Jetztzeit ist ausschlaggebend für eine genaue Ausrichtung der Linse zur Sonne. Auch geringe Abweichungen können die gebündelte Energie bereits drastisch reduzieren.

ad 3.) Um die Umrechnung zu ermitteln, wurden mehrere Testmessungen der maximalen Rotation jeweils von Achse 1 und Achse 2 durchgeführt und Durchschnittswerte ermittelt. Diese Werte dienten als Basis zur Umrechnung des virtuellen Modells auf die Servos.

### 3.5.1 Rhinoceros und Grasshopper

Die nachfolgenden Tools als Schnittstelle zwischen Software und dem Arduino Board sind Teil von ‚Grasshopper‘, einem grafischen Algorithmeditor,<sup>43</sup> der in dem 3D Programm ‚Rhinoceros‘ mittlerweile fest integriert ist. Aufgrund der Verknüpfungen von Berechnungen, virtuellen und ausführenden Bestandteilen, der hohen Flexibilität in seiner Programmierbarkeit und der freien Verfügbarkeit aller Bestandteile, wurde der Hauptteil des Programms in ‚Grasshopper‘ umgesetzt. Das eigentliche Hauptprogramm ‚Rhinoceros‘ bildet schlussendlich nur den visualisierenden Teil und wurde zur Überprüfung des Modells herangezogen.

43 Vgl. *Grasshopper3d.com: About Grasshopper...*, (o.J.), <https://www.grasshopper3d.com>, 14.09.2020.



Abb. 3.8 Ladybug Logo

### 3.5.2 Ladybug

Das Grasshopper-Plugin ‚Ladybug Tools‘ von Mostapha Sadeghipour Roudsari ist grundsätzlich als Analysetool ausgelegt und kommt für die Einlesung der EPW-Datei sowie der Berechnung der Sonnenstände zum Einsatz.<sup>44</sup>

Ursprünglich ist das Tool dazu gedacht, virtuelle Modelle (vor allem Gebäude) in ihrer geplanten Umgebung und Orientierung anhand von Wetterdaten, Wind und Sonneneinstrahlung zu visualisieren und analysieren. Die so gewonnenen Erkenntnisse definieren etwaige

44 Vgl. *Ladybug.tools: Our Story*, (o.J.), <https://www.ladybug.tools/about.html>, 14.09.2020.

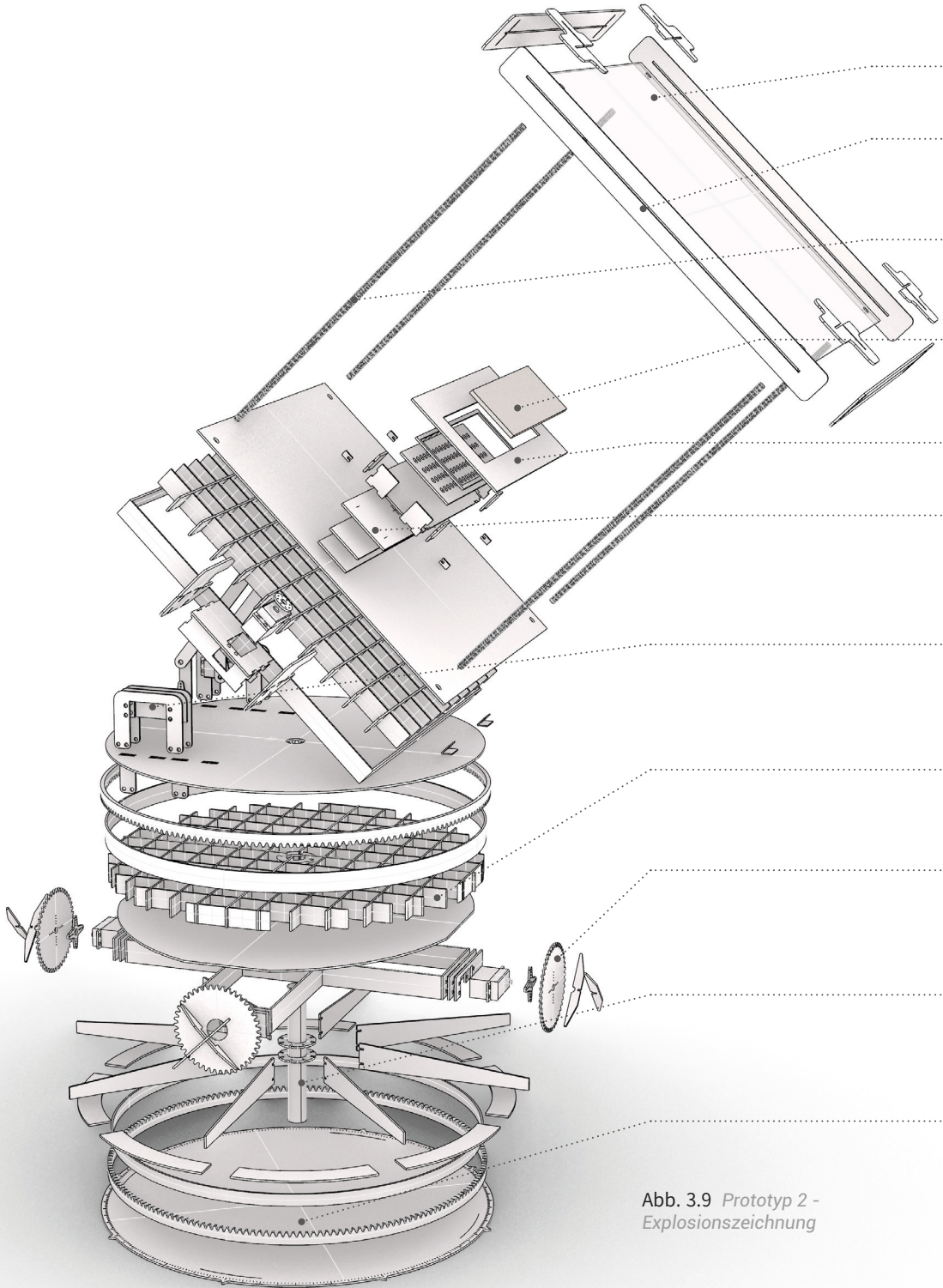


Abb. 3.9 Prototyp 2 -  
Explosionszeichnung

.....| **Linse:**

Fresnellinse 495x395mm, Kunststoff

.....| **Einfassung:**

Finnpappe, zur Stabilisierung und Vermeidung von Biegung der Linse

.....| **Führung:**

Manuell verstellbarer Fokus zum Vorwärmen des Stücks auf Gewindestangen, verstellbar mittels Mutter

.....| **Probe:**

Vorgefertigter, ‚knochentrockener‘ Ton in spezieller Abmessung und Dicke

.....| **Probenfassung:**

Austauschbar und reflektiv beschichtet

.....| **Schienensystem:**

Einachsiges Servosystem für kontinuierlich geradlinige Erwärmung und Sinterung mit aufsetzbaren Proben-schalen

.....| **Rotationsachse 2:**

Zwei Servos, die das komplette obere System neigen. Dieses ist mittels Scharnieren an der Trägerplatte befestigt. Steuerung der Rotationsachse 2 (Neigung)

.....| **Trägerplatte:**

Verstärkt durch Kreuzträger, ist auf die Zahnräder aufgelegt und multipliziert so die Rotation 1

.....| **Zahnräder:**

Zwei davon freilaufend, die anderen zwei symmetrisch mit Servos betrieben. Steuern die Rotationsachse 1 (Z-Achse)

.....| **Rotationskörper:**

Ein verstärkter Buchenstab hält die Gesamtachse des Roboters stabil, die jeweiligen Bauteile werden mittels Ausnehmung in Position gehalten

.....| **Grundplatte:**

Verstärkt und verzahnt mit Führungsmaterial

Problemzonen im Baukörper oder bei Bauteilen und bieten die Möglichkeit für standortoptimierte Maßnahmen.

Das Tool wurde so umfunktioniert, dass die zu simulierende Zeit auf einen kleinen Puffer vor und nach der Jetztzeit gesetzt wurde und die entsprechenden Sonnenstände synchronisiert und automatisch angesteuert werden konnten.

### 3.5.3 Firefly

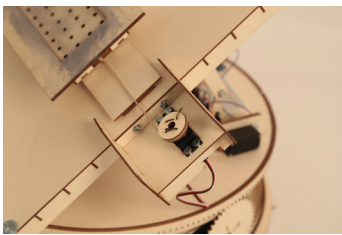


Abb. 3.10 Fünfter Servo - Steuerung der Sinterschiene

Mit dem Plugin ‚Firefly‘ können die ermittelten Daten zum Arduino-Steuerboard weitergeleitet werden, dadurch übernimmt es direkt deren Steuerung. Als letzte Folge wurden die Daten mittels ‚Remapping‘ auf die gemessenen Durchschnittswerte der Rotationen umgerechnet. Zusätzlich wurde für die Sinterung ein weiterer Servo angesteuert (Abb. 3.10), der mit einem Start- und Stopp Parameter sowie einem Geschwindigkeitswert die Vorwärmung und Sinterung der Linien steuert.

## 3.6 Hardware

### 3.6.1 Arduino Board

Als Schnittstelle zwischen Software und Hardware fungierte ein Arduino Uno Steuerboard. Die so gewonnenen und parametrisierten Daten konnten auf die Servos übertragen werden.

Die Servos werden mittels sogenannten Jumper Cables an das Board angeschlossen und gesteuert. Die Maximalrotation der verwendeten Servos beträgt  $180^\circ$ , die in weiterer Folge die maximale Drehung des Systems begrenzt. Da der Prozess der Vorwärmung und Sinterung aber nur 10 bis 15 Minuten dauert und die Maximale Abdeckung beider Rotationsachsen mehrere Stunden umfasst, ist diese Begrenzung völlig ausreichend. Zur Steuerung der

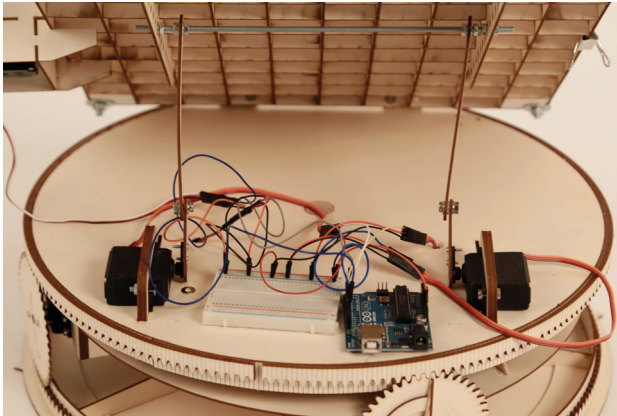


Abb. 3.11 *Arduino Uno Board und Verkabelung der unteren Servos*

Aufnahmeplatte für die Proben wurde jedoch ein Servo ohne Rotationsbeschränkung verwendet, um eine langsame, durchgehende Bewegung zu ermöglichen.

### 3.6.2 Linse

Um eine Bündelung der Sonnenstrahlen zu ermöglichen, wurde eine Fresnel-Linse verwendet. Durch die speziell gestauchte Version einer plankonvexen Sammellinse (Abb. 3.12) lässt sich eine flache, kostengünstigere und leichtere Version verbauen.

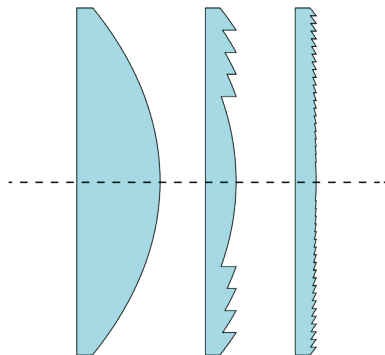


Abb. 3.12 *Prinzip der „Stauchung“ einer plankonvexen Sammellinse (links) zu einer Fresnel-Linse (rechts)*

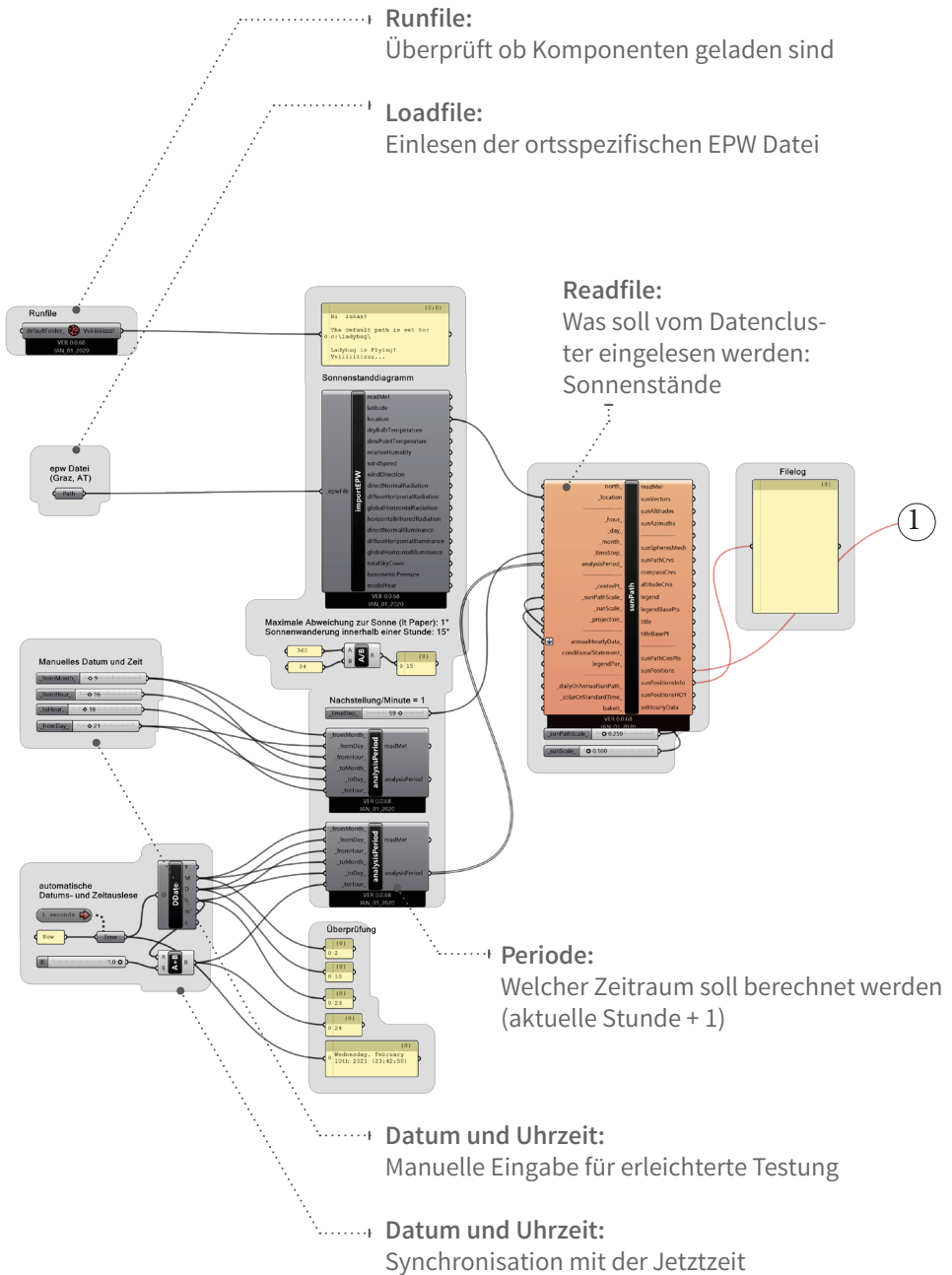
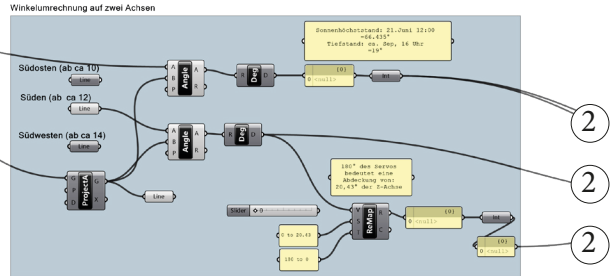
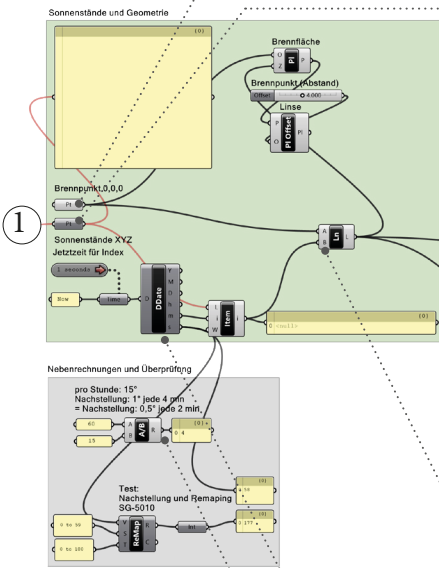


Abb. 3.13 Teil 1 des Programm-

**Brennpunkt:**  
Um diesen Punkt dreht sich das gesamte System

**Sonnenstände:**  
Eine Liste von Punkten mit 59 Einträgen

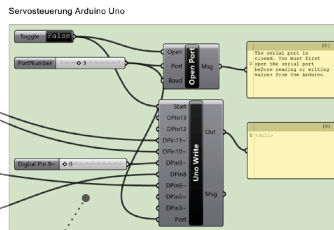


**Richtung:**  
Linie vom Brennpunkt (0,0,0) zu den Sonnenständen:  
Wird im nächsten Schritt (Blau) auf zwei Achsen projiziert und auf die Servos mittels Referenzlinie (Nord-Süd) umgerechnet.

**Jetztzeit auslesen:**  
Index der Liste (0-59) mit Minutenzähler synchronisieren

**Überprüfung:**  
Nebenrechnung und Überprüfung der Jetztzeit

2  
2  
2



**Servosteuerung:**  
Arduino-Module mit Toggle (ein-aus) und Steuerungen mit File Log.

Abb. 3.14 Teil 2 & 3 des Programcodes

## 3.7 Prozess

### 3.7.1 Materialvorbereitung

Die Dimension der Probe ist abhängig von der Größe der Linse und in weiterer Folge der Größe und Temperatur des Kegels für die Vorerwärmung. In der Länge ist die Probe durch das Schienensystem am Roboter begrenzt.

So ergaben sich 190mm Länge und 60mm Breite für die Probe (Abb. 3.15, 3.16). Die Materialdicke wurde durch ein Trial-Error-Verfahren ermittelt: Ist sie zu dünn, erhöht sich die Wahrscheinlichkeit von Rissen und Abplatzungen enorm. Ist sie zu dick, droht die Vorerwärmung ungleichmäßig zu werden wodurch die Chance auf Restfeuchte erhöht wird. Da der Fokuspunkt manuell verstellt werden und die Proben vor dem Verrutschen gesichert werden mussten, wurden Probenhalterun-



Abb. 3.15 Explosionszeichnung - Probenaufnahme und Probe

gen sowie eine Aufnahme erstellt, in denen trotz unterschiedlicher Probendicken die Fokusebene immer gleich auf der Probe lag.



Abb. 3.16 Probenaufnahme und Probe (190 x 60mm)



Die Probenvorbereitung mit feuchtem Ton erfolgte in zwei unterschiedlichen Varianten:

1.) Eindrücken und Abstreichen mittels Schablone und Rakel (Abb. 3.17): Der Vorteil dieser Variante ist, dass die Abmessungen und Dicken der Proben sehr konstant bleiben. Dieser Arbeitsschritt ist jedoch zeitintensiver und benötigt mehr Platz.

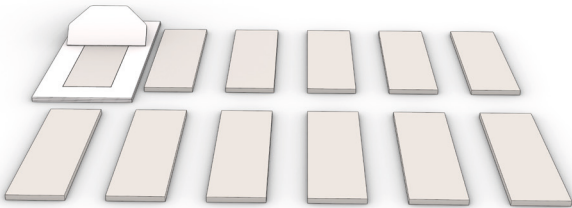


Abb. 3.17 Probenaufbereitung - Schablone und Rakel

2.) Aufbereitung als Platte und anschließendes Beschneiden (Abb. 3.18): Dieser Prozess erlaubt es, mehr Masse in kürzerer Zeit herzustellen, eine konstante Materialdicke ist jedoch schwer zu erreichen.



Abb. 3.18 Probenaufbereitung - Schablone und Rakel

Da eine konstante Materialdicke und glatte Oberfläche von großer Bedeutung für den Fokuspunkt sind, erwies sich die erste Variante als erfolgreicher.

### 3.7.2 Trocknung

Eine zu rasche Trocknung erhöht die Wahrscheinlichkeit von Verformung und Rissen. Hier bewährte sich das System der verlangsamten Trocknung. Dazu wurden die Proben nach der Aufbereitung mit einer luftdichten Folie bedeckt (Abb. 3.19) und einmal pro Tag kurz abgelüftet. Die Trocknung kann nicht beschleunigt werden und dauert in der Regel 10 Tage bis zum ‚knochentrockenen‘<sup>45</sup> Zustand. Variante 1 in der Materialvorbereitung ist hier ebenfalls von Vorteil, da die einzelnen Proben durch den Abstand an den Stirnseiten zusätzlich Feuchtigkeit abgeben können.

45 ‚knochentrocken‘ beschreibt einen Zustand, indem Ton soweit getrocknet wurde, bis sich der im Tonkörper verbleibende Feuchtigkeitsgehalt dem seiner Umgebung (normale Raumverhältnisse) vollständig angepasst hat. Also der trockenste Zustand der ohne Beihilfe erreicht werden kann.



Abb. 3.19 Abgedeckte Trocknung - Gegen Risse und Verformung

### 3.7.3 Vorwärmung

Eine Vorwärmung ist insofern unumgänglich, weil sich noch Restfeuchte im Probenstück befindet. Durch die schlagartige starke Erhitzung entweicht diese zu schnell und es kommt zu Abplatzungen (Abb. 3.20).

Die ‚knochentrockenen‘ Proben können mittels Probenhalterung in die Maschine eingespannt und vorgewärmt werden. Durch die Verschiebung der Linse lotrecht zur Probenoberfläche kann der Kegeldurchmesser und die Temperatur stufenlos reguliert werden.

Für eine gleichmäßige Erhitzung bewegt sich die Probe automatisiert auf ihrer Schiene von links nach rechts und wieder zurück. Die Temperatur wird pro Durchgang kontinuierlich mittels Verschiebung der Linse erhöht (Abb. 3.21). Dieser Vorgang dauert ungefähr 10 Minuten. Ist der Fokuspunkt erreicht, geht der Prozess fließend in die Sinterung über (Abb. 3.22).



Probe C  
6 mm



Probe B



Abb. 3.20 Sinterung ohne Vorwärmung



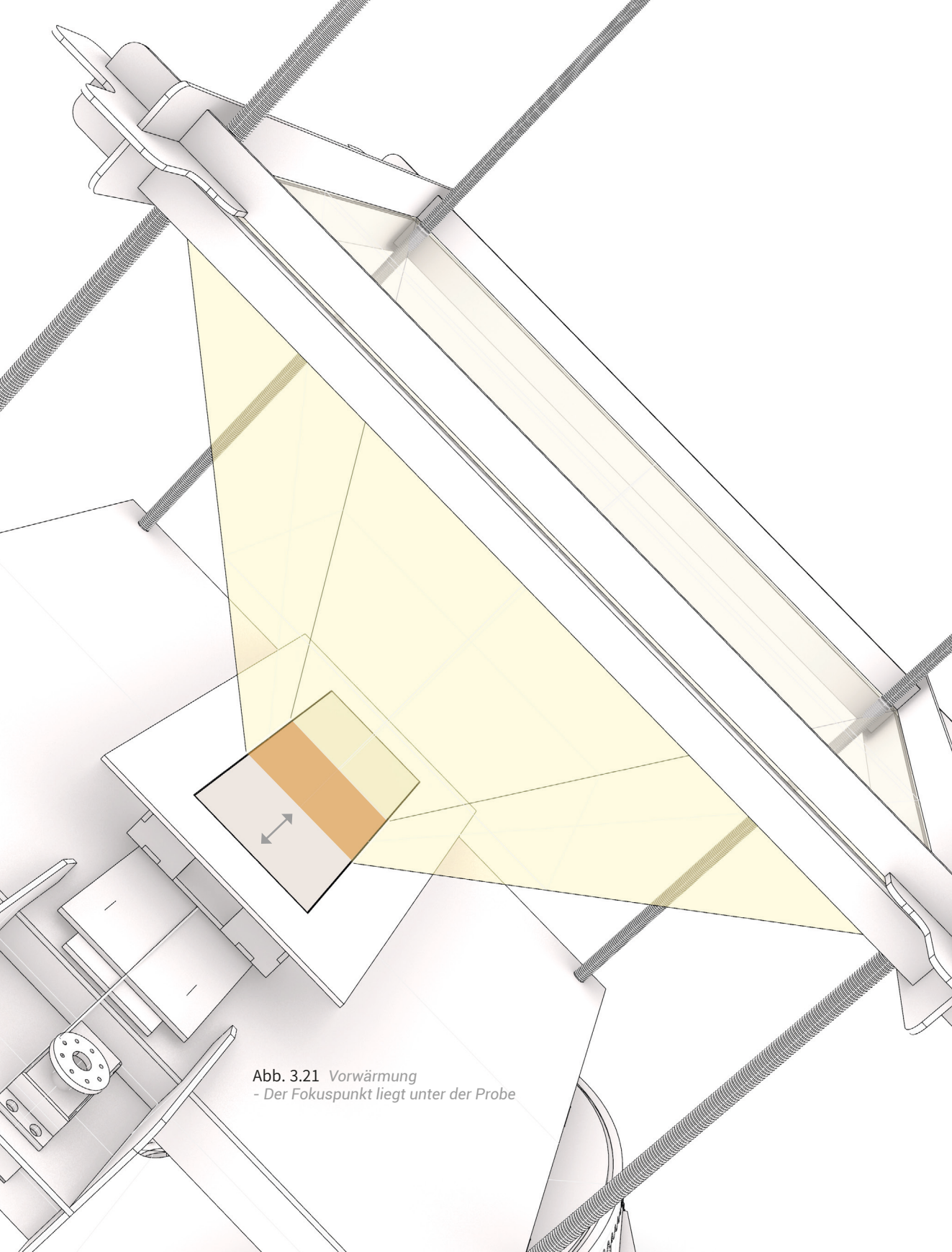


Abb. 3.21 Vorwärmung  
- Der Fokuspunkt liegt unter der Probe

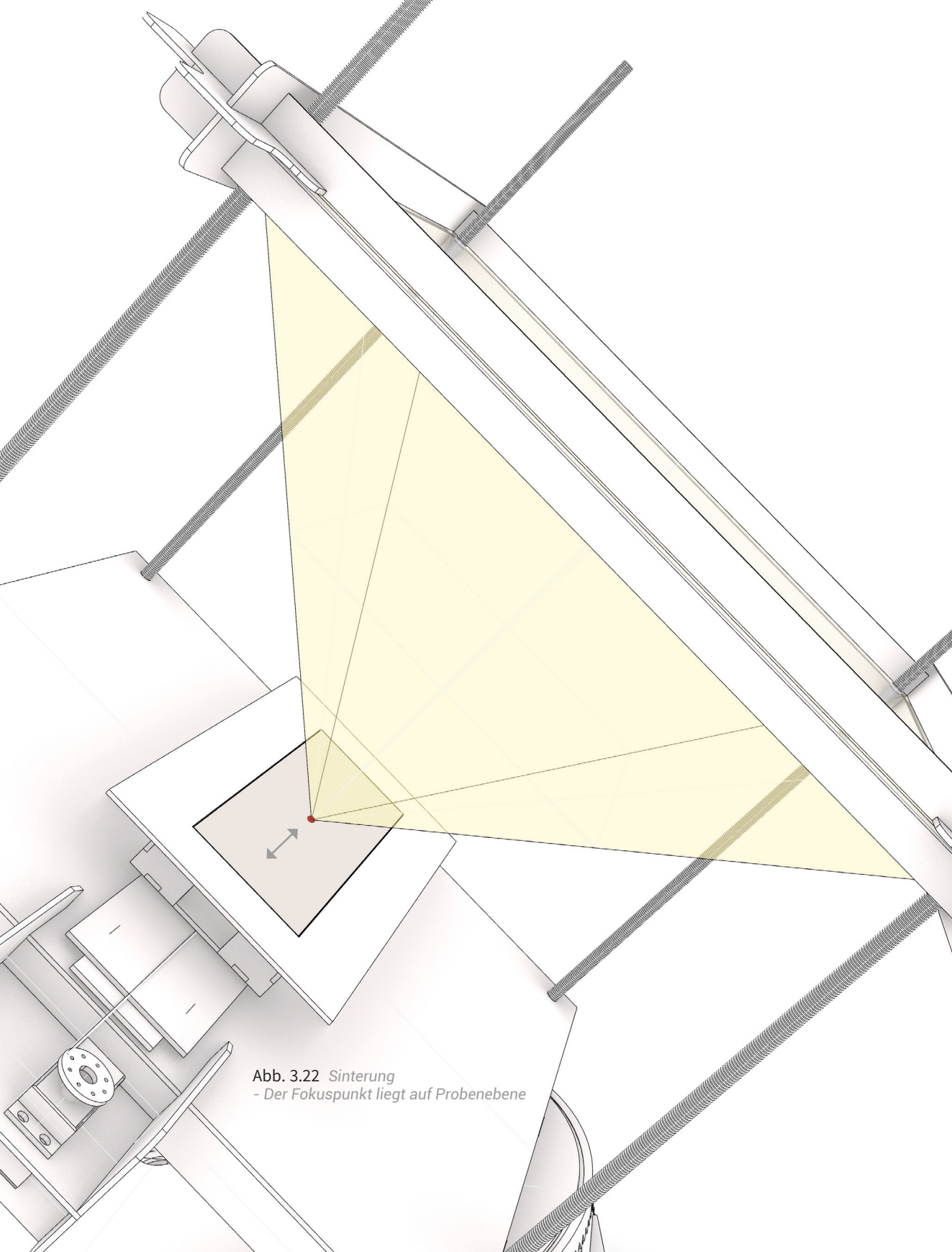


Abb. 3.22 Sinterung  
- Der Fokuspunkt liegt auf Probenebene





### 3.8 Sinterung

Hat das Probestück die Betriebstemperatur und der Abstand der Linse den Fokuspunkt erreicht, kann der Sintervorgang beginnen. Am bereitgestellten Foto (Abb. 3.23) ist ein erfolgreiches Sintervorgang ohne Abplatzungen und Risse ersichtlich. Es entstand nach einer Vorwärmung von ca. 10 Minuten und einem Sintervorgang von ca. 40 Sekunden von rechts nach links.





Abb. 3.23 Erfolgreiche Vorwärmung und Sinterung

## 3.9 Alternativprozess

46 Vgl. Pretenthaler/Podesser/  
Pilger 2010, 29.

Es war von äußerster Bedeutung bis zum Ende des Sommers erste Ergebnisse zu erzielen, denn dieses Projekt war auch von einem Wettlauf gegen die Zeit geprägt: Die Sonnenenergie nimmt im September<sup>46</sup> jahreszeitlich bedingt durch den Einfallswinkel in unseren Breitengraden kontinuierlich stark ab. Somit war vorgesehen, nach den erbrachten Beweisen auf ein alternatives System umzuschwenken.

### 3.9.1 Laser

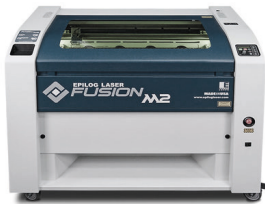


Abb. 3.24 Epilog Fusion - 75 Watt

So wurden weitere Testungen an einem programmierbarem Lasersystem durchgeführt, das dem von gebündelter Sonnenenergie ähnelt, jedoch mit Netzstrom arbeitet. Es handelt sich hier um einen Lasercutter des Modells Epilog „Fusion“ mit 75 Watt.

### 3.9.2 Material

Sowohl Probandimensionen als auch Ausgangsmaterial blieben gleich. Verwendet wurde ebenfalls handelsüblicher Schulton der Firma Gerstaecker mit und ohne Schamottanteile. Im Laufe der Testungen stellte sich heraus, dass Porellanton der Firma WASP (Limoges Porzellan) besonders geeignet ist. Aufgrund seiner Zusammensetzung und Partikelgröße reagiert dieser sehr defensiv auf Energieeintrag und hinterlässt ein schönes Bild der Versinterung. Er wurde vor allem bei den späteren Versuchsreihen verwendet und ist an seiner hellen, weißen Farbe erkennbar.

### 3.9.3 Modellvariablen

Durch die ersten Testungen wurde die erforderliche Konzentration (Power) und Geschwindigkeit (Speed) des Lasers von 0 bis 100 zuerst in Fünferschritten erfasst,



um danach in Einserschritten die Auflösung weiter zu erhöhen. Durch diese Herangehensweise war es möglich, in absehbarer Zeit Aussagen hinsichtlich der optimalen Eingabevariablen zu treffen. Zusätzlich wurde auf die Einbindung der dritten Variable, der Frequenz (Frequency) verzichtet, um die Testungen auf ein umsetzbares Maß zu reduzieren. Diese wurde auf ihrem Standardwert von 50 belassen.

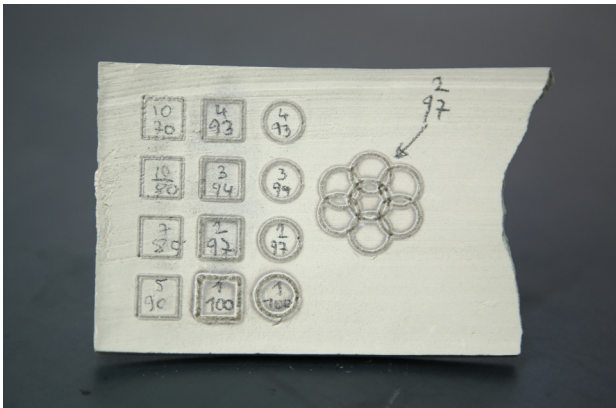


Abb. 3.25 Lasersinterungen - Testprobe (variierende Intensität und Geschwindigkeit sind mit Bleistift auf er Probe vermerkt)

Im Zuge dieser Testungen konnte eine gute Balance von Geschwindigkeit und Konzentration ermittelt werden. Darüber hinaus brachte dieser Versuch die Erkenntnis, dass der Laser seine Geschwindigkeit nicht linear erhöht, sondern, vor allem im niedrigeren Bereich, starke Sprünge aufweist. So ist z.B. 2 nicht die Hälfte von 4, sondern viel langsamer. Ebenso ist die Geschwindigkeit von der gezeichneten Vektorgrafik abhängig. Ein Kreis wird langsamer abgefahren als eine Linie, da die Auflösung der angesteuerten Punkte die Bewegung verlangsamt und Beschleunigung zwischen diesen ‚Targets‘ unmöglich macht. Ein ähnliches Problem, wie es mir bereits aus der Steuerung von Roboterarmen und 3D-Druckern bekannt war.

### 3.9.4 Materialverhalten

Es konnte durch eine 60-fache Vergrößerung (Abb. 3.26, 3.27) der gesinterten Linien erfasst werden, wie sich die verschiedenen Geschwindigkeiten und Energieeinträge auf jene auswirken.

Diese kann man in drei Szenarien zusammenfassen:

- 1.) zu viel Energieeintrag, zu wenig Geschwindigkeit (Abb. 3.28, links) - ‚Aufbäumen‘ des Materials und Verbreiterung des geschmolzenen Anteils.
- 2.) zu wenig Energieeintrag, zu viel Geschwindigkeit (Abb. 3.28, mitte) - Material verklumpt zu unzusammenhängenden Strukturen und fällt in sich zusammen.
- 3.) richtiger Energieeintrag und Geschwindigkeit (Abb. 3.28, rechts) - zusammenhängende, stabile Struktur, die sich nicht aufbäumt.



Abb. 3.26 Gesinterte und ausgelöste Struktur in 60-facher Vergrößerung

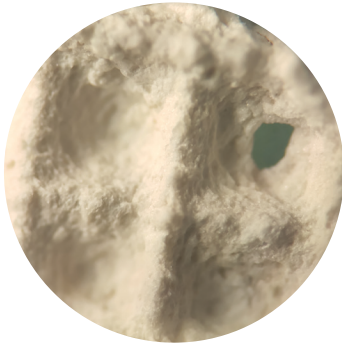


Abb. 3.27 Eine weitere gesinterte Struktur, Rückseite

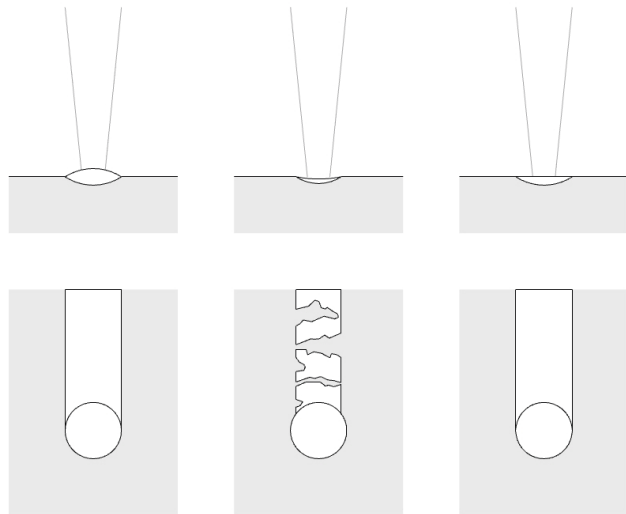


Abb. 3.28 Sinterverhalten von gelaserten Linien - Zu viel Energieeintrag (links), zu wenig Energieeintrag (mitte), optimaler Energieeintrag (rechts)

Im Falle einer doppelten oder mehrfachen Sinterung der selben Linie konnte anhand mehrerer Versuche keine Verbesserung festgestellt werden. Im Gegenteil, da zu enge Linien eine unkontrollierbare, verklumpte Masse formten (Abb. 3.29, rechts).

Ein weiterer wichtiger Punkt war die Wärmeverteilung und die Vermeidung von gestauter Hitze. Um das Verfahren so effizient wie möglich zu halten, wurde auf eine standardmäßige Vorerwärmung verzichtet und die Proben in knochentrockenem Zustand bearbeitet. Dieser Vorgang konnte vor allem durch zwei Aspekte optimiert werden:

1.) Ermöglichung von ‚Abkühlphasen‘ durch zeitliche Koordination von gesinterten Linien:

Liegen zwei oder mehrere Linien zu eng nebeneinander, staut sich Hitze auf und erhöht die Wahrscheinlichkeit von Absprengungen und Brüchen. Um dem entgegenzuwirken, wurden diese in verschiedene Layer aufgeteilt. So wurden z.B. Linie 1, 3 und 6 gesintert, um im nächsten Schritt dazwischen Linie 2 und 4 zu setzen (Abb. 3.30).

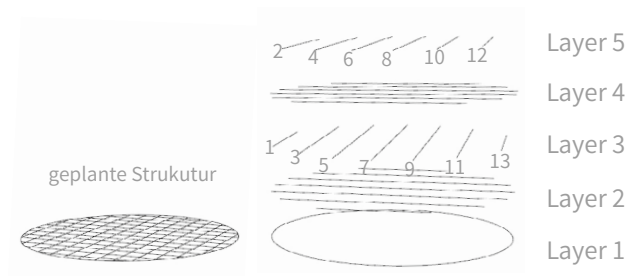


Abb. 3.30 Ermöglichung von Abkühlphasen durch Sinterablauf  
Bild von Autor

2.) Erhöhung der Materialdicke von Proben zur verbesserten Aufnahme und Ableitung von Hitze:

Durch eine geringe Probendicke erhöhte sich die Wahrscheinlichkeit von Abplatzungen auf der Unterseite drastisch. Für diese Konstellation von Laser und Material

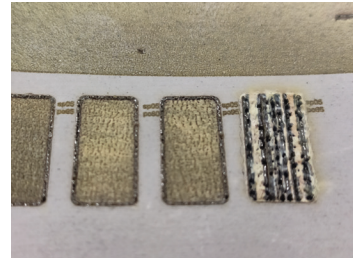


Abb. 3.29 Verklumpung bei zu engem und konzentriertem Energieeintrag (rechts)

erwies sich eine Materialdicke von mindestens 7mm als vielversprechend, um die Ableitung der aufgestauten Energie sicherzustellen (Abb. 3.31).

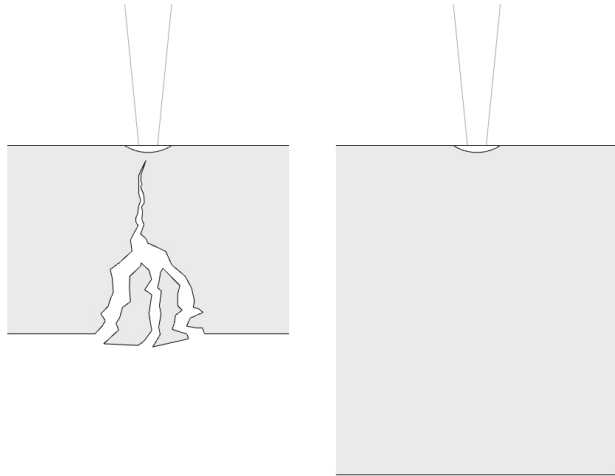


Abb. 3.31 Mindestdicke von Proben für die Aufnahme von Hitze

### 3.9.5 Extraktion und Wiederverwendung

47 Um trockenen, ungebrannten Ton in seine verformbare Ursprungsstadium zu versetzen, kann dieser mit Wasser angereichert oder in ein Wasserbad gesetzt werden. Diesen Vorgang bezeichnet man als ‚Einsumpfen‘.

Um die gesinterte Struktur zu extrahieren, wurde die Probe nach der Behandlung eingesumpft.<sup>47</sup> Der Ton des Trägermediums kann somit zu 100% vom Produkt getrennt und wiederverwendet werden (Abb. 3.32, 3.33). In der Größenordnung der verwendeten Proben ist dieser Vorgang bereits in wenigen Minuten abgeschlossen.



Abb. 3.32 Einsumpfen der Probe

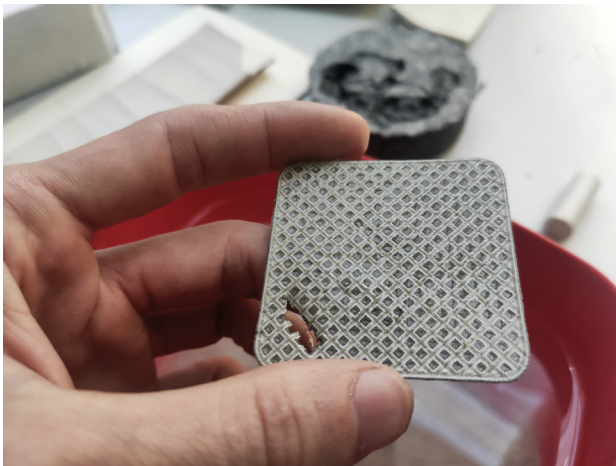


Abb. 3.33 Extrahierte gesinterte Geometrie



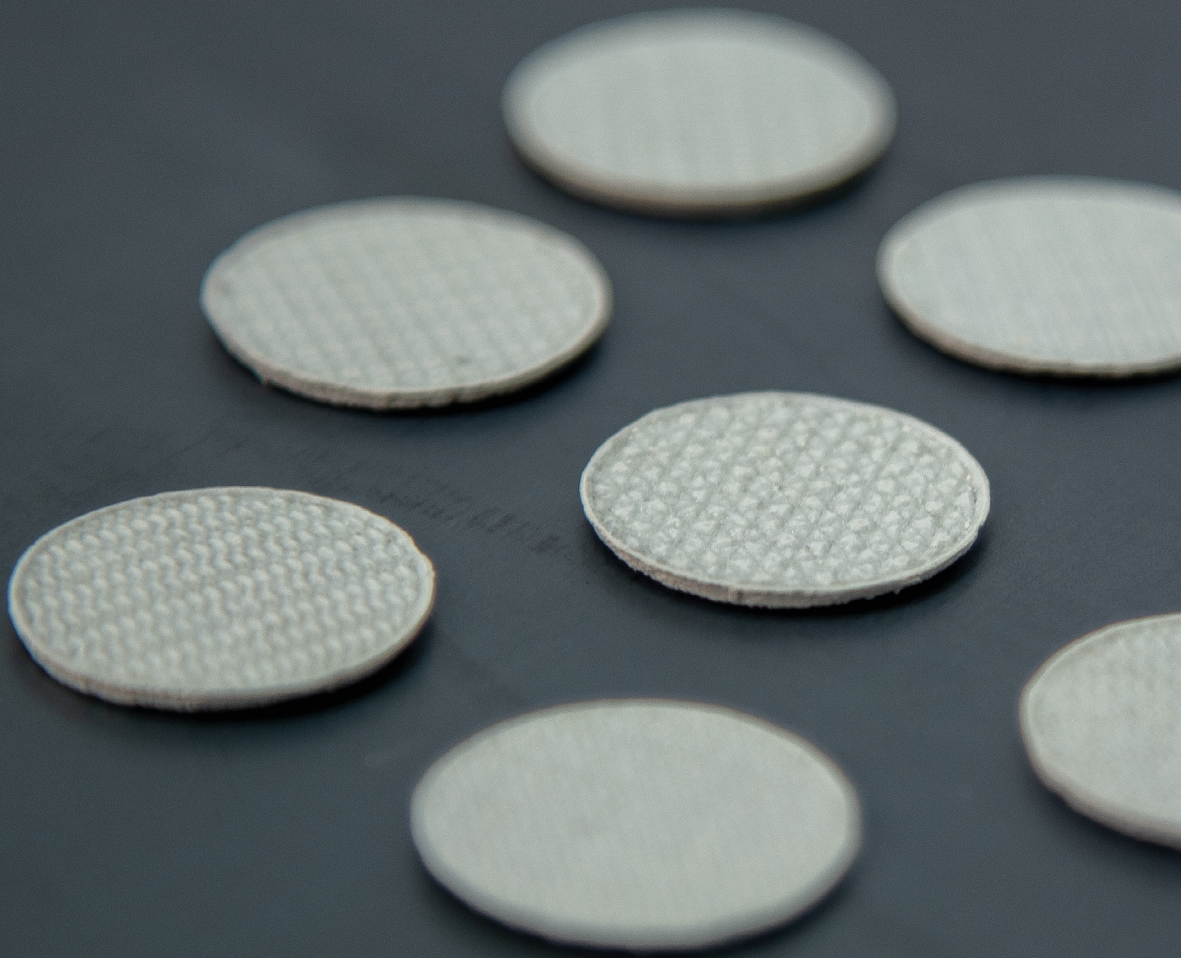


Abb. 3.34 Keramikfilter



### 3.10 Ausblick

Durch einen sehr experimentellen Zugang wurden wertvolle Erkenntnisse hinsichtlich des Verhältnisses von Sonnenenergie und Keramik erlangt. Die Methodik der Translation des Brennpunkts und somit Vorerwärmung des Teststücks zeigte großes Potential. Um eine Nähe zu bereits etablierten 3D-Druckverfahren und dem Selective Laser Sintering (SLS) zu vermeiden, wurde von einer mehrschichtigen Sinterung Abstand genommen und bewusst auf ein einschichtiges Verfahren gesetzt. Diese stützt sich vor allem auf eine Schnellsinterung („Fast-, oder Schellsinterung“) und der Extraktion des gesinteren Objektes, wobei durch Einsumpfung das Trägermaterial wiederverwendet werden kann.

Diese Methode soll nicht in Konkurrenz mit Rapid-Prototyping-Verfahren treten, sondern öffnet einen Weg zu einer Vorgangsweise widerstandsfähige, einschichtige Geometrien und Formen zu entwickeln, die schnell, energieeffizient und ohne herkömmlichen Brennvorgang hergestellt werden können.

In der Endphase dieses Projekts wurde über den Einsatz dieser Strukturen als Wasserfiltersystem diskutiert. Dieser Prozess deutet in die Richtung eines Nischen-systems in der Verfahrenstechnik. Durch die Steuerung der Struktur und Musterung der Sinterung eröffnet sich die Möglichkeit, Dichte und Durchlass in Form eines sehr dünnen Produkts umzusetzen, das im Gegensatz zum arbiträren Massemodell eines geschäumten Keramikfilters steht.





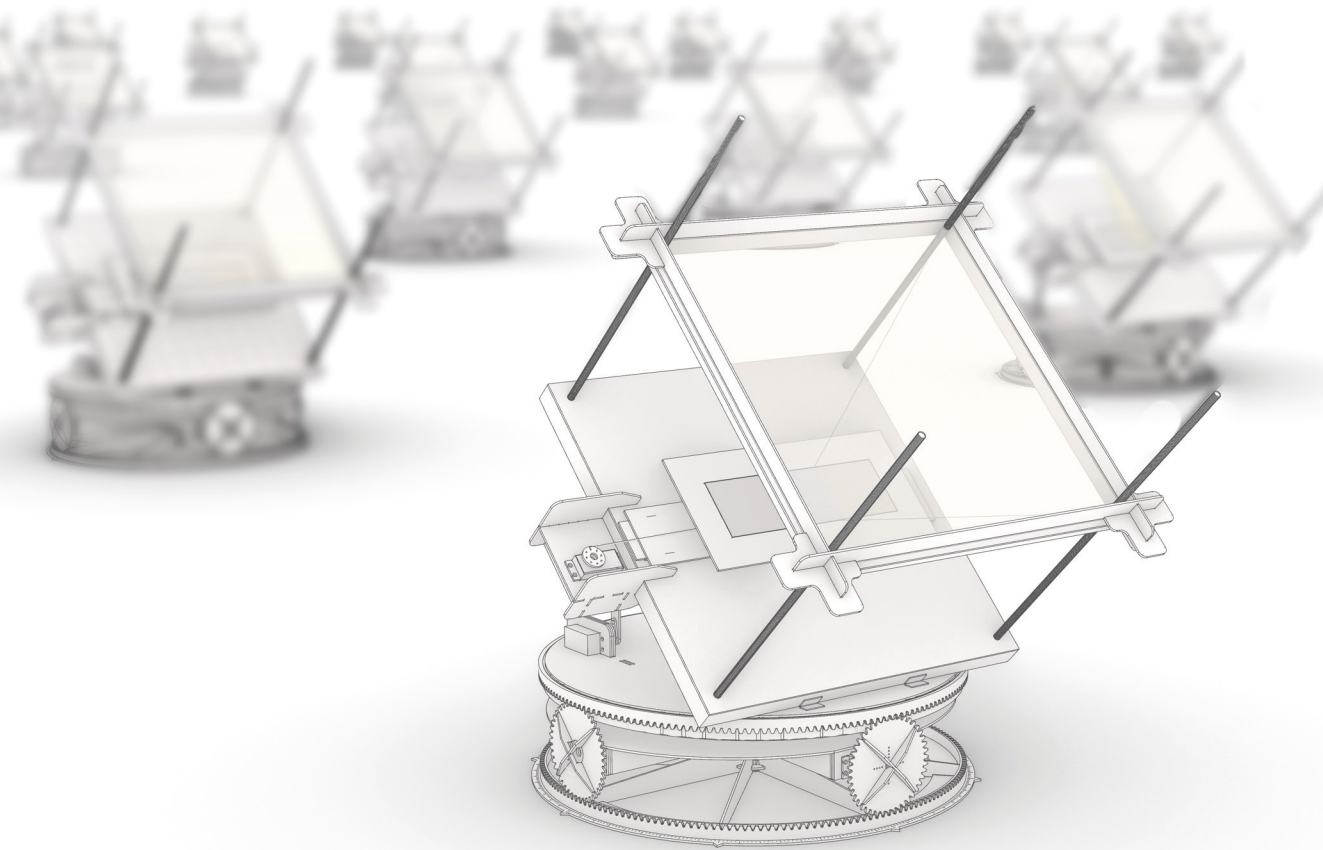


Abb. 3.35 Keramikfilter - Ausblick



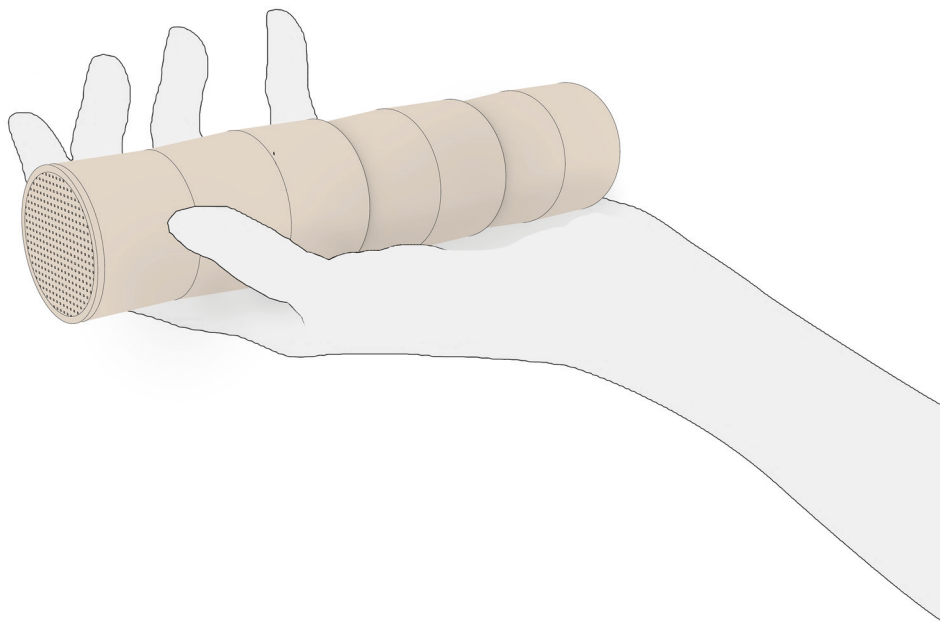
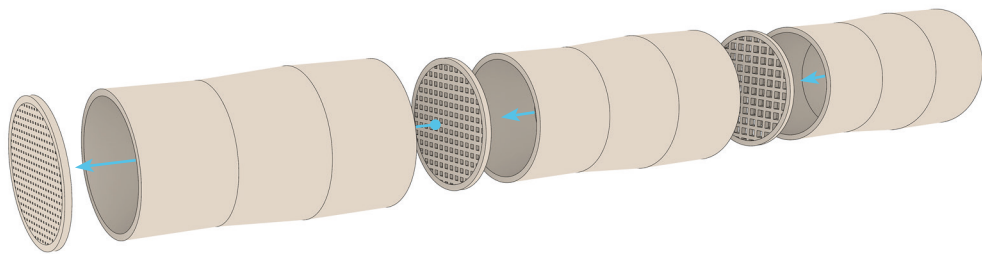


Abb. 3.36 Keramikfilter - Ausblick



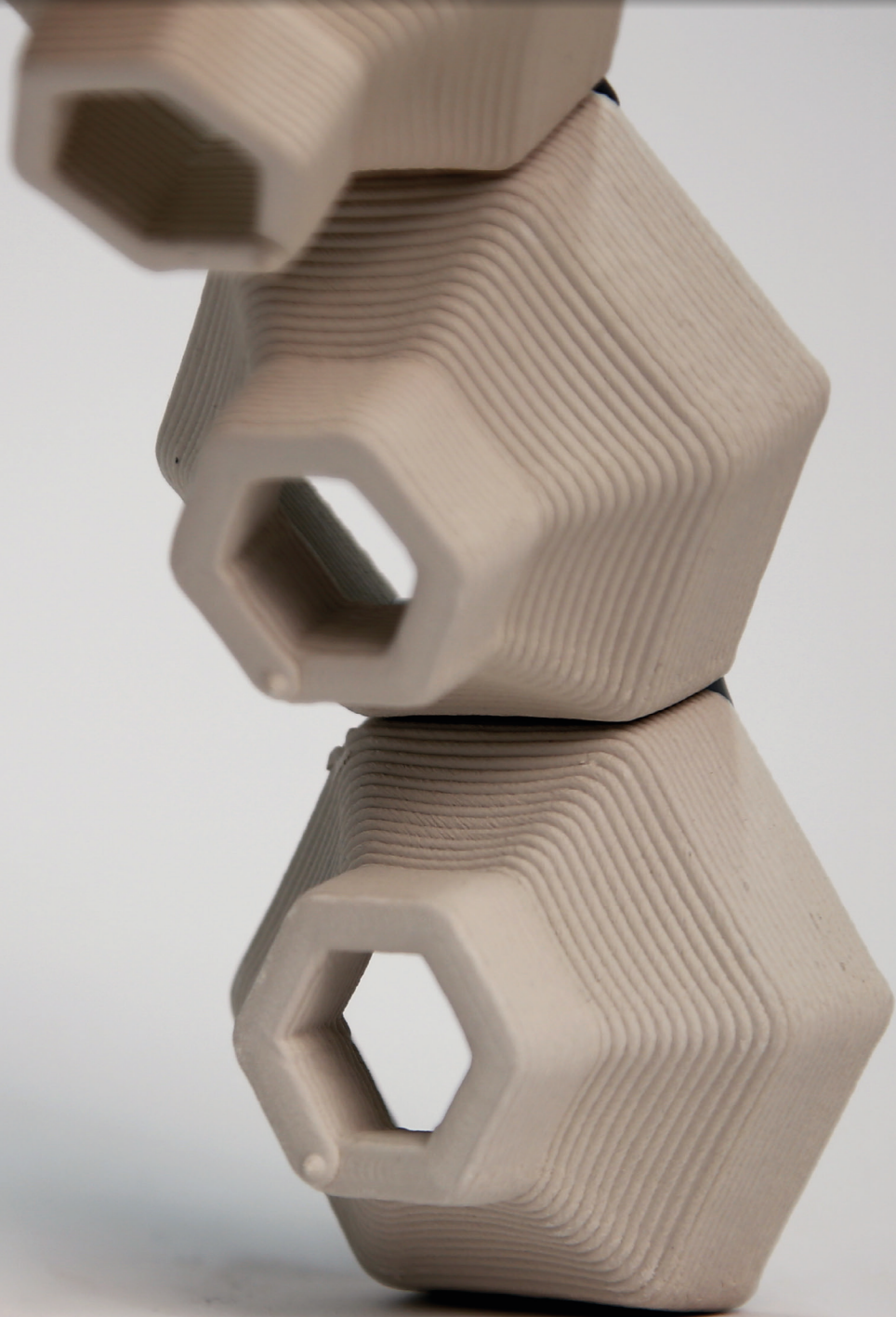




## 4 Projekt II

---





## 4.1 Technische Recherche

48 Vgl. Scalenghe/Marsan 2009, 3.

Die zunehmende Bodenversiegelung in Ballungszentren und Städten führt zum sogenannten ‚Urban Heat Island Effect‘.<sup>48</sup> Durch den fehlenden Feuchtigkeitsaustausch der Atmosphäre mit dem Untergrund, der verringerten Vegetation und wärmeabsorbierenden Materialien ist die Durchschnittstemperatur im urbanen Raum um ein vielfaches höher als im umliegenden ländlichen Bereich.<sup>49</sup>

49 Vgl. Fuladlu/Riza/Ilkan 2018, 4 f.

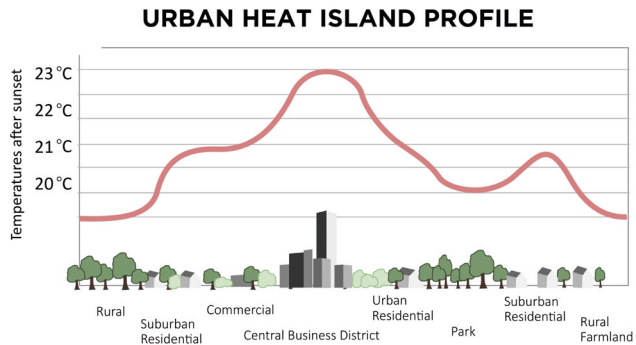


Abb. 4.1 *Urban Heat Island Profile*

50 Vgl. Montazeri/Blocken/Hensen 2015, 609.

Moderne Kühlsysteme sind oft ineffizient und verbrauchen zusätzlich begrenzt vorhandene Ressourcen.<sup>50</sup> Dieses Projekt orientiert sich an einer architektonischen Lösung in Form eines Modulsystem, das ohne externe Energiezufuhr rein durch Geometrie und physikalische Eigenschaften die natürliche Luftkonvektion antreibt.

### 4.1.1 Venturi-Effekt

Erstmals beschrieb der italienische Physiker Giovanni Battista Venturi 1797 die Veränderung im Strömungsverhalten von Flüssigkeiten und Gasen bei Querschnittsänderung des Durchflussmediums. Zusammen mit dem Schweizer Mathematiker und Physiker Daniel Bernoulli wurden Gesetzmäßigkeiten entdeckt, die von



herausragender Bedeutung in der Hydraulik und Aerodynamik sind.<sup>51</sup>

51 Vgl. Rapp 2017, 56.

Darunter befindet sich der sogenannte Satz von Bernoulli, oder auch Bernoulli-Gleichung.<sup>52</sup> Diese besagt, dass die spezifische Energie (e) von inkompressibler und viskositätsfreier Fluide (Flüssigkeiten und Gase) entlang einer Stromlinie konstant ist. Die Gleichung gilt für zwei Punkte auf der Strömungslinie, funktioniert somit in beide Richtungen und schaut wie folgt aus.<sup>53</sup>

52 Vgl. Ebda., 58.

53 Vgl. Ebda., 107.

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v^2_1 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v^2_2 + \rho g h_2$$

$P(x)$  = Druckenergie,  
 $\frac{1}{2} \rho v^2(x)$  = Kinetische Energie  
 $\rho g h(x)$  = Potentielle Energie

Vereinfacht gesagt, muss die spezifische Energie an den zwei Punkten P1 und P2 (Abb. 4.2) entlang der Strömungslinie S gleich bleiben. Erhöht sich die Durchflussgeschwindigkeit durch die Verengung, also an Punkt 2, verringert sich der Druck entgegen der Erwartung. Diese Eigenheit der Strömungslehre nennt sich Venturi-Effekt.

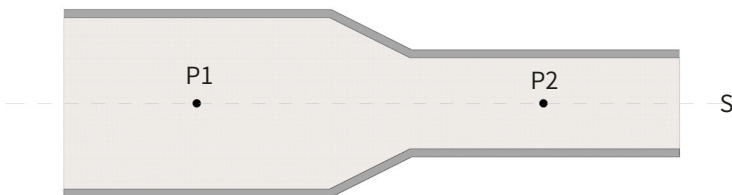


Abb. 4.2 Bernoulli-Gleichung und Venturi-Effekt



Abb. 4.3 *State of the Art - Map*

#### 4.1.2 Forschung

Um einen Überblick über den Forschungsbereich zu bekommen wurden die wichtigsten Publikationen ausgewählt, die innerhalb und außerhalb der Gebäudetechnik auf natürliche Ventilation, Strömungsdynamiken oder den Venturi-Effekt fokussiert sind [2,3,5,6,8,9]. Neben dem zukunftsgerichteten Ansatz wurden auch Paper berücksichtigt, die sich mit der Technik historischer Gebäude wie z.B. arabischen Windcatchern beschäftigen [4,10]. Vereinzelt wurden auch Arbeiten berücksichtigt, die sich mit dem etablierten System der Sprühnebelanlagen auseinandersetzen [1,7].

Keywords: Venturi Effect, Natural Ventilation, Building Ventilation, Computational Fluid Dynamics (CFD), Evaporative Cooling, Thermal Comfort, Wind Catching

[1] A. Sapit, A. Razali, A. N. Mohammed, B. Manshoor, A. Khalid, H. Salleh, M. F. Hushim, Study on Mist Nozzle Spray Characteristics for Cooling Application, Johor, 2019

[2] C. Tantasavasdi, D. Jareemit, A. Suwanchaiskul, T. Naklada, Evaluation and Design of Natural Ventilation for Houses in Thailand, Bangkok, 2018

- [3] B. Singh Shishodia, S. Sanghi, P. Mahajan, Computational and subjective assessment of ventilated helmet with venturi effect and backvent, New-Delhi, 2018
- [4] S.S. Zargari, B. Isik, Wind Catchers and Energy Efficiency in Buildings, Istanbul, 2016
- [5] F.D. Scheaua, Theoretical Approaches Regarding the Venturi Effect, Galati, 2016
- [6] A.D. Stavridou, Breathing architecture: Conceptual architectural design based on the investigation into the natural ventilation of buildings, Thessaloniki, 2015
- [7] M.W. Khalil, M. Loubani, Use of Venturi effect for effective and uniform talc pleurodesis, Kingston Upon Hull, 2012
- [8] T. van Hooff, B. Blocken, L. Aanen, B. Bronsema, A venturi-shaped roof for wind-induced natural ventilation of buildings: Wind tunnel and CFD evaluation of different design configurations, Eindhoven, 2011
- [9] G. van Moeseke, E. Gratia, S. Reiter, A. De Herde, Wind pressure distribution influence on natural ventilation for different incidences and environment densities, Ottignies-Louvain-la-Neuve, 2004
- [10] A.A. Badran, Performance of cool towers under various climates in Jordan, Amman, 2003

## 4.2 Ideelle Recherche

### 4.2.1 Bangladesian Cooling Panel

Besonders Interessant sind die Do-It-Yourself Kühlpaneele, die von der Bevölkerung in Bangladesh verwendet werden, um ihre Häuser zu kühlen (Abb. 4.4)



Abb. 4.4 Bangladesh - DIY Kühlpaneel aus alten PET Flaschen

54 Vgl. Distasio Cat: *This amazing Bangladeshi air cooler is made from plastic bottles and uses no electricity*, 08.01.2016, <https://inhabitat.com/this-amazing-bangladeshi-air-cooler-is-made-from-plastic-bottles-and-uses-no-electricity/>, 11.10.2020.

55 Vgl. Ebda.

Bangladesh ist besonders stark vom Klimawandel betroffen und die Bevölkerung in urbanen Gebieten lebt oftmals in selbsterbauten Hütten aus Wellblech.<sup>54</sup> Diese Hütten wirken im städtischen Gebiet wie ein Multiplikator für die Hitze im Gebäudeinneren. Um dem entgegenzusteuern, wird mittels Mundpropaganda und Workshops die Funktionsweise dieser Paneele überliefert: Dabei handelt es sich um PET-Flaschen, die überwiegend am Straßenrand zu finden sind, aufgeschnitten werden und auf einer Trägerplatte (meist Karton oder Sperrholz) angebracht werden.<sup>55</sup> Diese Paneele werden in dafür angefertigte Öffnungen oder in vorhandene Fensteröffnungen verbaut.

Strömt nun Luft durch diese Vorrichtung, die einer Venturi-Düse ähnelt, wird sie beschleunigt und ein kühlender Effekt tritt ein.

#### 4.2.2 A Venturi Shaped Roof

Diese Untersuchung ist Teil einer Publikation im Journal „Building and Environment“ von der Eindhoven University of Technology. Dabei wurden in einem Windkanal mittels Druck- und Geschwindigkeitssensoren Abluftsysteme untersucht, die speziell auf eine Anwendung als Dachkonstruktion von Gebäuden konzipiert sind. Dieses System stützt sich mitunter rein auf eine Geometrie, die auf dem Prinzip des Venturi-Effekts beruht: Durch den Druckabfall im verengten Teil der Konstruktion wird die Abluft begünstigt. Weiters wurden der Einfluss der

56 Vgl. Van Hooff u.a. 2011, 1797.

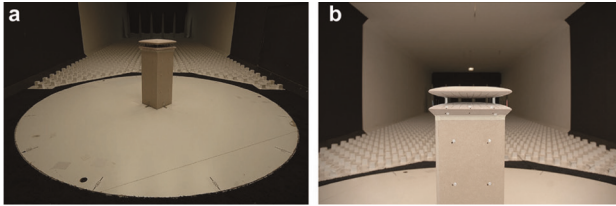


Abb. 4.5 A Venturi Shaped Roof - Testkanal

vertikalen Trägerelemente (Windfahnen) untersucht und ein Vergleich unterschiedlicher Modelle durchgeführt (Abb 4.6).

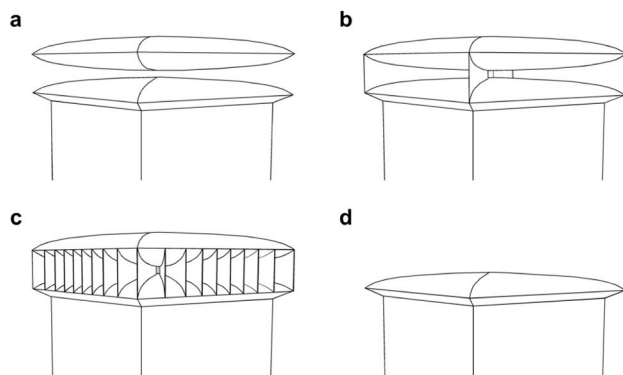


Abb. 4.6 A Venturi Shaped Roof - Testvarianten mit und ohne Windfahnen

Die Messungen ergeben, dass die Windfahnen den Venturi-Effekt der Konstruktion und damit die natürliche Ventilation dramatisch verschlechtern:

*„The configuration without guiding vanes strongly outperforms the other configurations in terms of the magnitude of the underpressure in the roof contraction. The reason is that adding guiding vanes strongly increases the flow resistance, which causes a larger part of the approaching wind flow to flow over and around the roof, rather than being forced through it. This phenomenon has been called wind-blocking effect in previous studies.“<sup>57</sup>*

57 Van Hooff u.a. 2011, 1806.

### 4.2.3 Sprühnebelanlagen

Das gängige Modell der urbanen Freiluftkühlung ist die Sprühnebelanlage. Ein Modell dieser Art wurde kürzlich auch am Grazer Tummelplatz getestet.<sup>58</sup>

58 Vgl. Winter-Pölsler 2020, 26.



Abb. 4.7 Sprühnebelanlage - Tummelplatz Graz

Wie Effizient diese Anlage ist und wieviel Kühlung der umliegenden und darunter befindlichen Flächen durch Luftmassenbewegung möglich ist, muss noch evaluiert werden.<sup>59</sup> Die Frage ist aber, ob dieses Modell der richtige Weg ist, da zusätzliche Ressourcen wie Strom und Trinkwasser für eine temporäre Kühlung verbraucht werden. Außerdem ist anzudenken, ob Sprühnebel eine Tröpfcheninfektion begünstigt.

59 Vgl. Ebda., 26.

### 4.2.4 Ziel

Durch die Referenzprojekte und Recherche ergeben sich folgende Kriterien für das Projekt:

- 1.) Die Konstruktion bedient sich keiner externen Energieversorgung und die natürliche Ventilation entsteht durch geometrisch, physikalische Gesetzmäßigkeiten, entsprechend dem Venturi-Effekt

2.) Durch die Verwendung einer symmetrischen oder runden Form – ähnlich den Cooling-Panels in Bangladesh oder dem Modell der Venturi-Düse – wird der Störfaktor einer tragenden Konstruktion, wie z.B. bei Windfahnen, umgangen.

3.) Eine Strömungsanalyse betreffend Oberflächenqualität, Winkel, Verengung und mögliche Verwirbelung des daraus entstehenden Elements muss weiter untersucht und getestet werden.

### 4.3 Projektbeschreibung

Um die auferlegten Kriterien der Recherche zu erfüllen, ergibt sich eine Ausführung der Geometrie als additives Modulsystem.

Die letztendliche Form und das Einsatzgebiet der Modulstruktur soll noch offen bleiben, als architektonisches Veranschaulichungsmodell wurde jedoch eine Kuppel gewählt. Dieses eignet sich besonders gut als eigenständiges Repräsentationsmodell, erregt durch eine interessante Form Aufmerksamkeit und kann Luftmassenbewegungen aus allen Richtungen verwerten. In weiterer Folge kann das Modell z.B. als Vorlage eines begehbaren Pavillons genutzt werden und in andere bauliche Maßstäbe übersetzt werden.

Aus logistischen Gründen soll die Kuppel aus maximal drei verschiedenen Modulen bestehen, die im Modellmaßstab durch den institutseigenen Keramikprinter der Marke ‚WASP‘ realisiert werden. Um einen effizienten Workflow zu ermöglichen und etwaige Messergebnisse hinsichtlich Strömungsverhalten anzupassen, soll das virtuelle Modell parametrisch aufbereitet werden.

## 4.4 Testmodell

Um das maximal druckbare Gefälle am Keramikprinter zu finden und Schwindungswerte in zukünftige Drucke miteinzubeziehen, wurde zuerst ein Testmodell erstellt. Dieses beruht auf einem ‚Fußballkörper‘ oder auch ‚Ikosaederstumpf‘ und benutzt deren Teilungsflächen als Basisflächen für die Module. Dieser geometrische Körper hat den Vorteil, dass er nur aus Sechsecken und Fünfecken besteht und relativ simpel aufgebaut ist, beides Aspekte, die förderlich für eine schnelle Fertigung und zuverlässige Funktionalität sind. Durch eine Fertigungszeit von 1:56 Minuten pro Modul am Drucker konnte so das das Testmodell realisiert werden (Abb 4.8)



Abb. 4.8 *Testmodell - Ikosaederstumpf*

## 4.5 Messungen

Anhand des Modells der Venturi-Düse kann der Druckunterschied veranschaulicht und gemessen werden: Verbindet man Teilstück A (größerer Durchmesser) und



Teilstück B (verengter Durchmesser) mit einem Rohr oder Schlauch und füllt dieses mit einer Flüssigkeit (Abb.4.9) wird durch deren Ausgleichsbewegung der Druckunterschied angezeigt, während Luft durch das Modul strömt (Abb. 4.10).

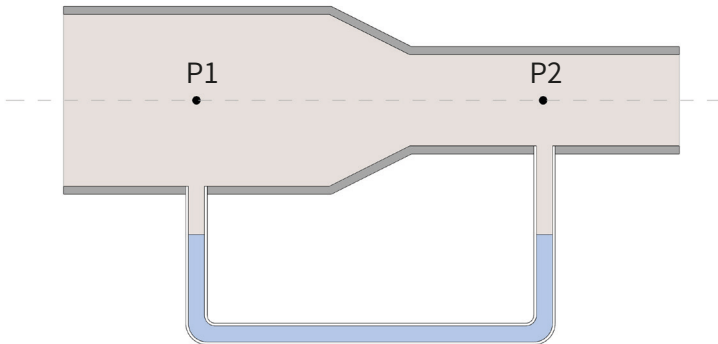


Abb. 4.9 Venturi-Düse - Stillstand

Da sich bei Verkleinerung des Querschnitts die Durchflussgeschwindigkeit erhöht und die spezifische Energie von P1 und P2 gleich bleiben muss, wird der Druck im engen Teil der Röhre (P2) niedriger. Durch Messung der unterschiedlichen Flüssigkeitsstände im Ruhezustand und Strömungszustand kann eine Aussage hinsichtlich des Druckunterschieds gemacht werden.

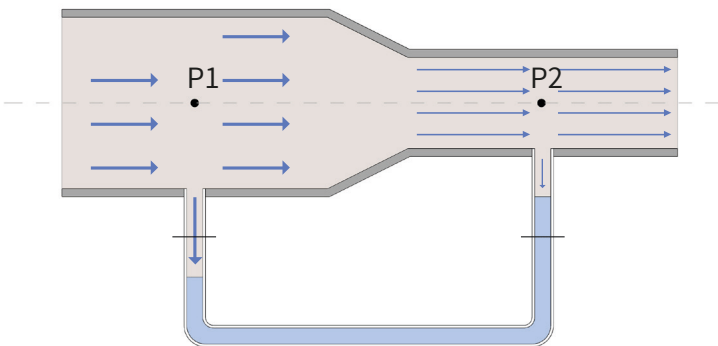


Abb. 4.10 Venturi-Düse - Luftstrom

## 4.5.1 Umsetzung

Um ein optimales Verhältnis von Neigung und Verengung für die Einzelmodule des geplanten Kuppelmodells zu finden, wurde diese Messmethode als Beweis für das Auftreten des Venturi-Effekts angewendet und für den Bau des endgültigen Modells ausgewertet und implementiert.

Die Messungen konzentrieren sich dabei auf zwei Variablen: Neigung des Übertrittsbereichs und Verengung. Als Grundkörper diente ein in Modell 1 verwendetes hexagonales Modul, welches für einen erleichterten Versuchsaufbau an beiden Enden verlängert wurde. Danach wurde pro Variable je eine Reihe von Abstufungen erstellt (Abb. 4.11 & 4.12).



Abb. 4.11 Abstufungen des Grundmoduls - Verengung



Abb. 4.12 Abstufungen des Grundmoduls - Neigung

Aus dieser Reihe von Abstufungen wurden dann jeweils die Extremwerte und ein Mittelwert ausgewählt und mit dem Keramikprinter gefertigt. Daraus ergaben sich sechs Module für die Messungen (Abb. 4.13).



Abb. 4.13 Testmodule

Diese wurden jeweils mittig der Kammern angebohrt und mit einem Schlauch verbunden, der mit Wasser gefüllt wurde. Um den Stand der Flüssigkeit besser sichtbar zu machen wurde diese blau eingefärbt (Abb. 4.14). Um einen Luftstrom zu simulieren wurde ein handelsüblicher Fön in Kaltluftstellung verwendet (Abb. 4.15), da dessen Luftstrom konstant eingestellt werden kann und die Messwerte daher vergleichbar sind.

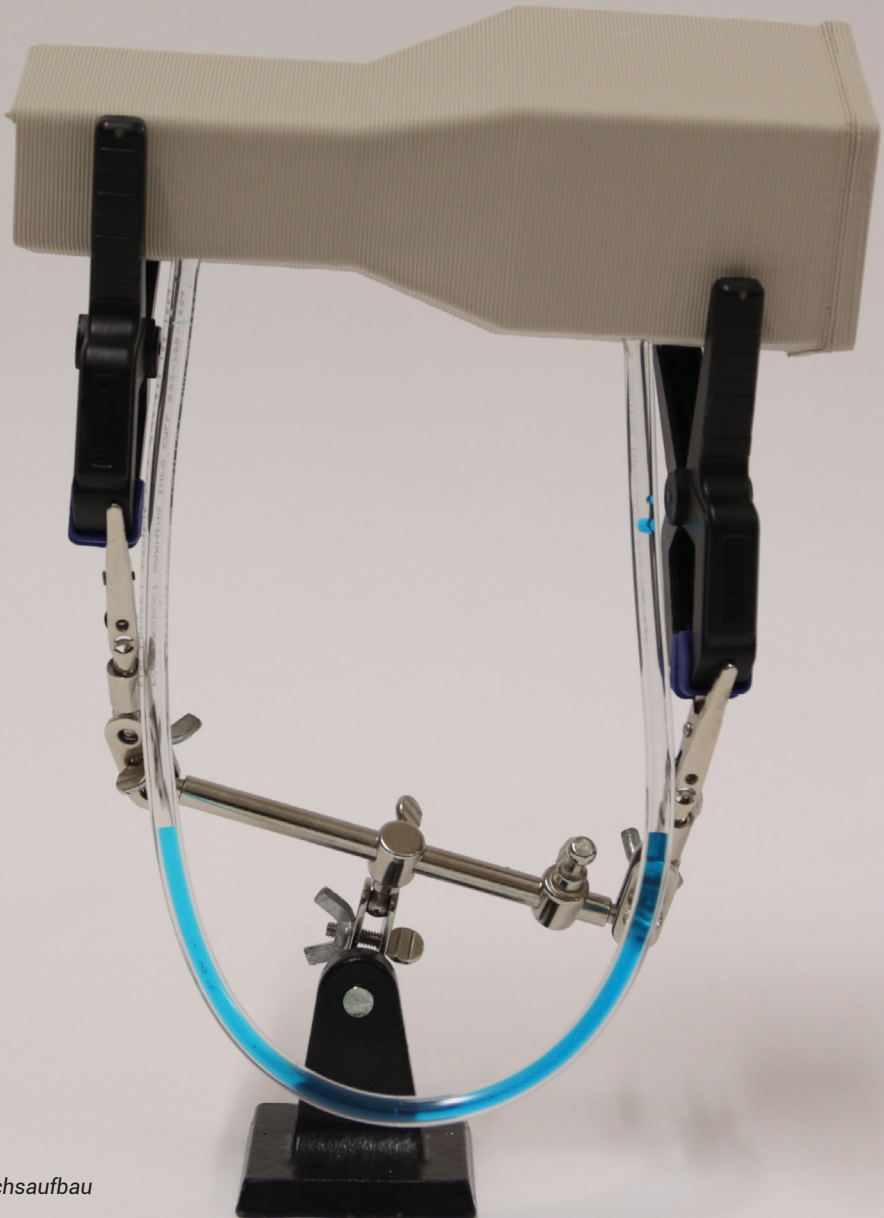


Abb. 4.14 Versuchsaufbau

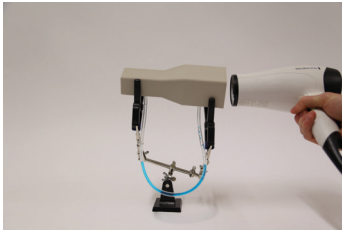


Abb. 4.15 *Luftstrom durch Fön*

## 4.5.2 Ergebnis

Durch das mathematische Modell der Bernoulli Gleichung konnte bereits eine Vorhersage getroffen werden. Diese Vorhersage sollten sich im Versuch bestätigen und damit den Beweis für das Funktionsprinzip erbringen.

Diese besagt, dass sich durch eine minimale Veränderung der Verengung der Wasserstand kaum bewegen dürfte, jedoch bei starker Verengung umso extremer ist. Dies wird am Modell sichtbar, dass den minimalsten Verengungswert besitzt (Abb. 4.18 – Probe 3b). Die Bewegung des Wasserstands ist auch im Versuch kaum sichtbar (Abb. 4.16).

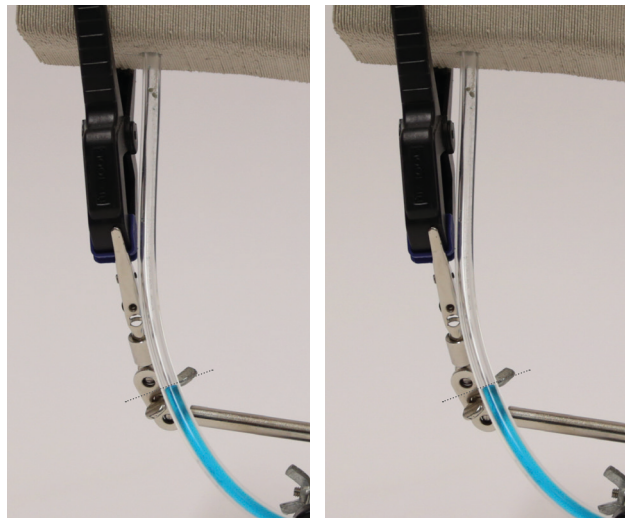


Abb. 4.16 *Probe 3b - links: Stillstand, rechts: Mit Luftstrom*

Um auszuschließen, dass der Luftstrom generell zu schwach ist um genügend Druck aufzubauen wurden anschließend mehrere Messungen des Modells mit der größten Verengung (Abb. 4.17 Probe 1b) durchgeführt. Eine signifikante Erhöhung des Wasserstandes war bereits mit freiem Auge sichtbar.

Danach wurden pro Modul jeweils drei Messungen durchgeführt und ein Mittelwert errechnet (Abb. 4.19):

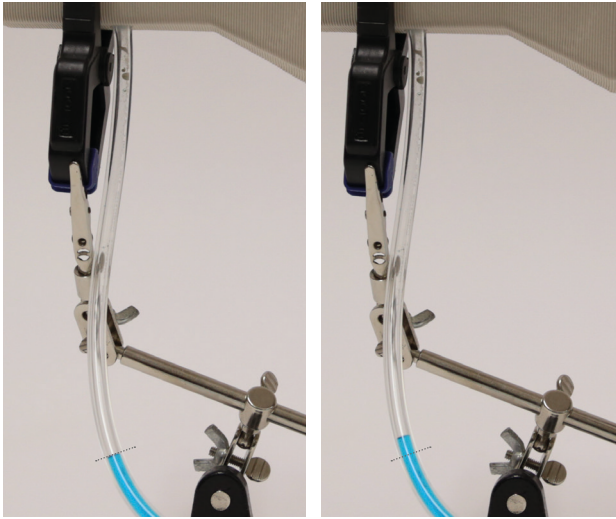


Abb. 4.17 Probe 1b - links: Stillstand, rechts: Mit Luftstrom

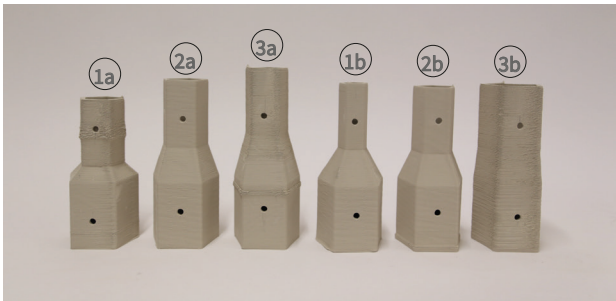


Abb. 4.18 Testmodule - Neigung (a), Verengung (b)

M1-M3: Messung 1-3

MW: Mittelwert der Messungen

1a-3a: Proben Neigung

1b-3b: Proben Verengung

	1a	2a	3a	1b	2b	3b
M1	5,5	3,5	4,0	7,3	3,0	0,0
M2	5,7	3,6	3,8	7,5	3,3	0,1
M3	5,5	3,5	3,6	7,2	3,5	0,1
MW	5,6	3,5	3,8	7,3	3,3	0,1

Abb. 4.19 Testmodule - Neigung (a), Verengung (b)



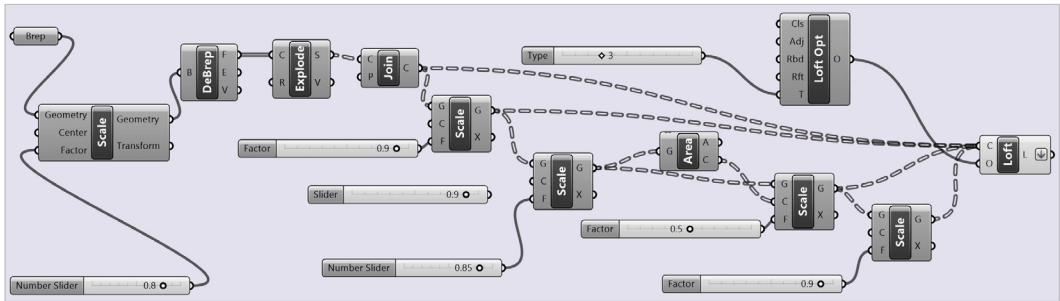


Abb. 4.20 Parametrisiertes Modell - Programmcode

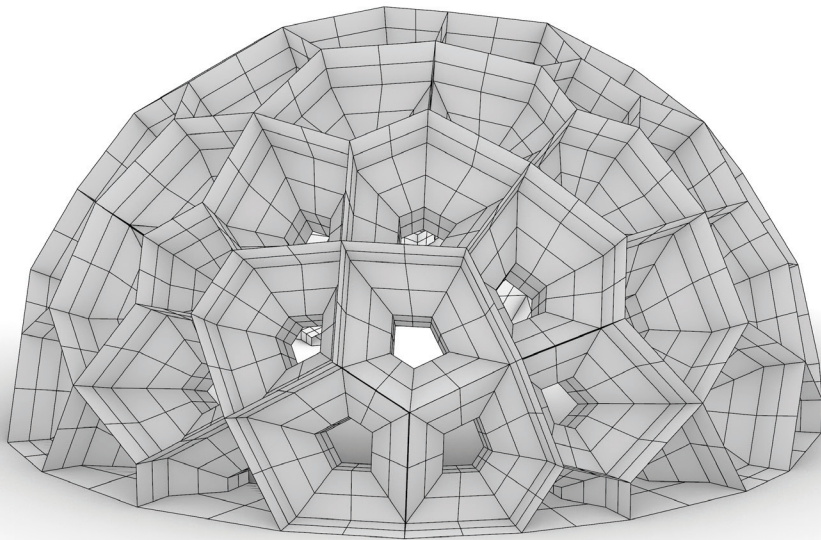


Abb. 4.21 132 Pentagon Polyhedron - Visualisierung

Der grundlegende Beweis des Funktionsprinzips konnte also erbracht werden. Zusätzlich zu beachten sind jedoch auch die etwaigen Faktoren, die die Messungen zusätzlich beeinflussen könnten und die aufgrund eines vereinfachten Versuchsaufbaus nicht berücksichtigt worden sind: die innere Oberflächenqualität (Verwirbelungen), Dichte des Systems und Schwachstellen in der Verbindung von Schlauch und Bohrung.

## 4.6 Modell

Um das Modell zu realisieren wurde ein 132 Pentagon Polyhedron<sup>60</sup> gewählt, das aus einem symmetrischen und zwei asymmetrischen Pentagonalflächen besteht. Das hat folgende Gründe: Durch den höheren Anteil an Unterteilungen und Flächen werden die Module im Verhältnis zum Innenraum kleiner, das System besteht aber, laut Anforderung, nur aus insgesamt drei verschiedenen Modularten (Abb. 4.21). Als Folge entsteht ein größerer Innenleerraum und eine höhere Flexibilität hinsichtlich der Neigung und Länge der Module, an die die Ergebnisse der Messungen angepasst werden konnten. Die Kuppel im Endformat misst 40 cm im Durchmesser und 20 cm in der Höhe (Abb. 4.24).

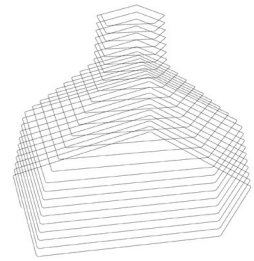


Abb. 4.22 Pfad für den Keramikprinter für eine 2mm Nozzle



Abb. 4.23 Gedruckte Module, bereit zur Trocknung

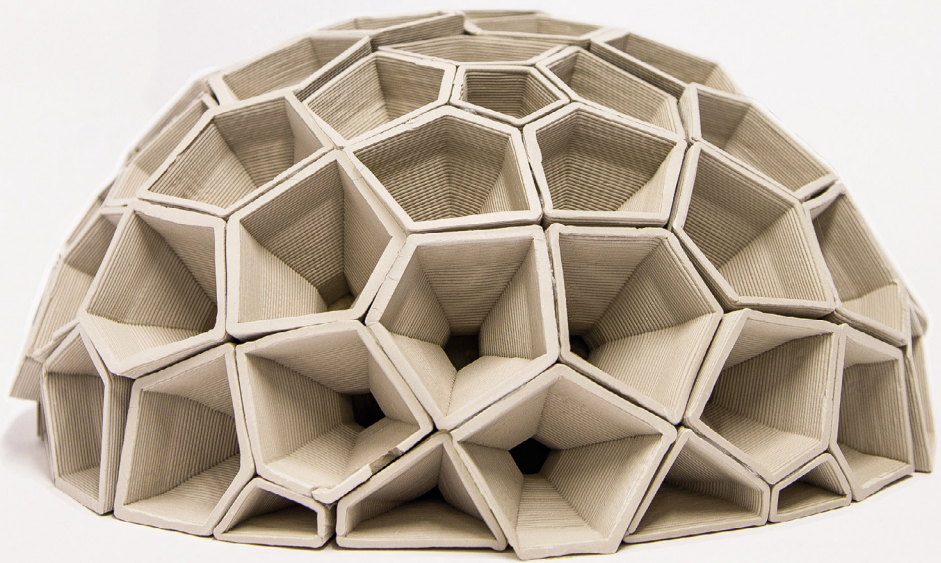
<sup>60</sup> Die Zahl 132 bezieht sich auf die Gesamtzahl der Pentagonalflächen als voller Körper, welcher für die Ausführung als Kuppel halbiert wurde.

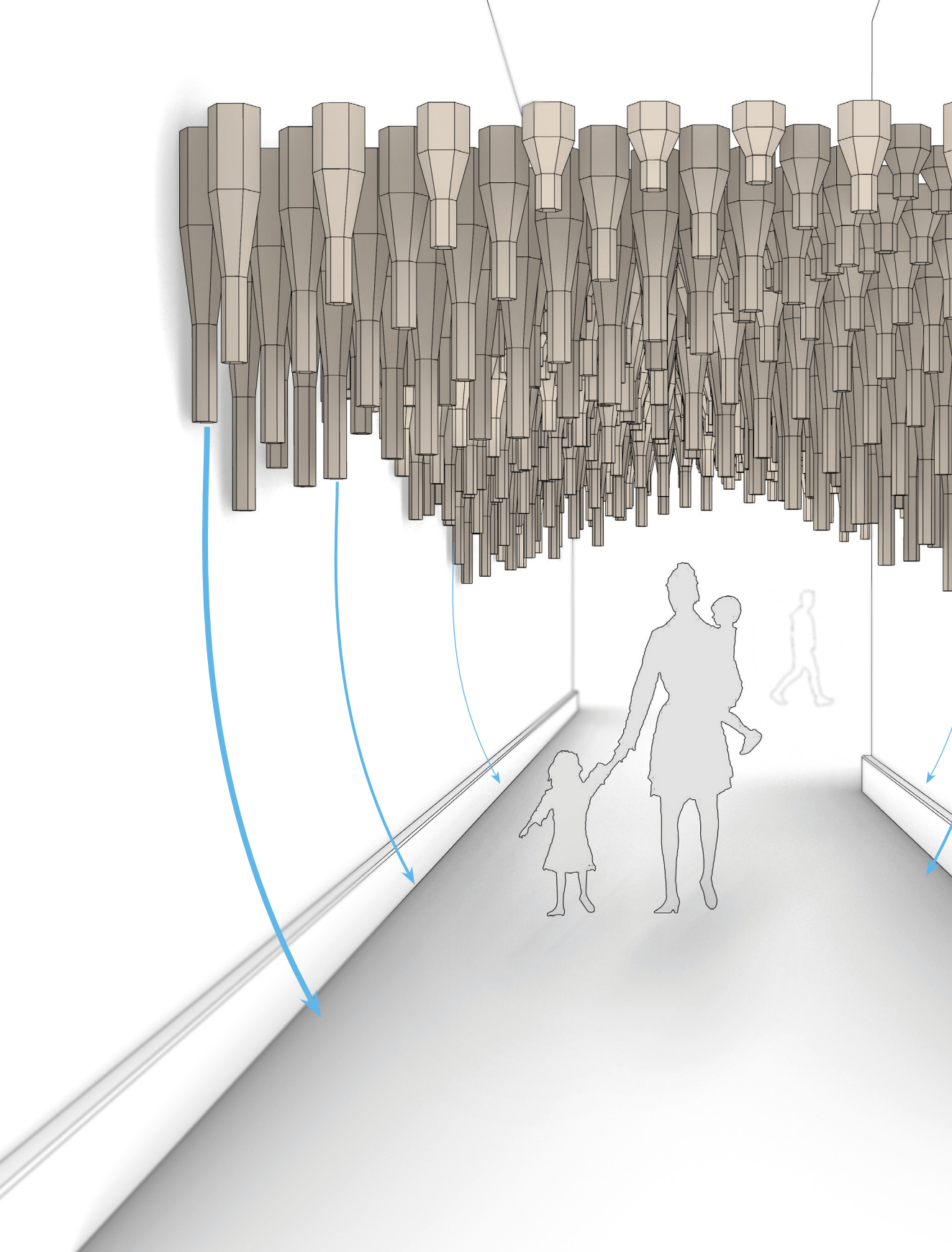
## 4.7 Ausblick

Luftströme gezielt zu leiten ist in vielen Bereichen von äußerster Notwendigkeit. In der Architektur bemächtigen wir uns nach wie vor ressourcen- und energieintensiver Mechanismen.

Sei es als Teil einer intelligenten Fassade, einer Temperaturregelnde Fußgängerüberdachung oder Kuppel eines Serverraums: Ich bin überzeugt davon, dass solche Systeme in Zukunft wichtige Aufgaben in Gebäuden und im öffentlichen Raum übernehmen.







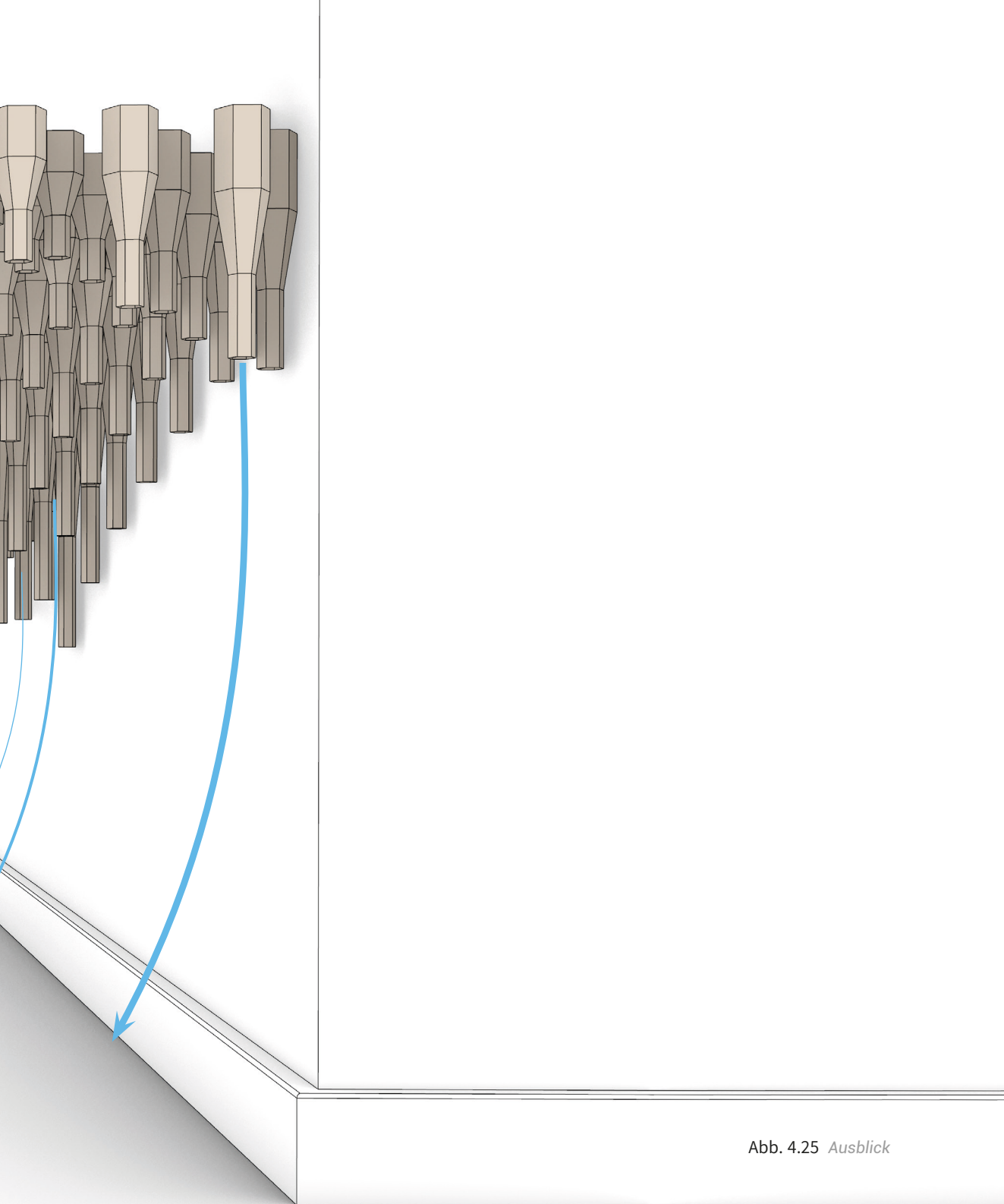


Abb. 4.25 Ausblick

## 5 Konklusion

---

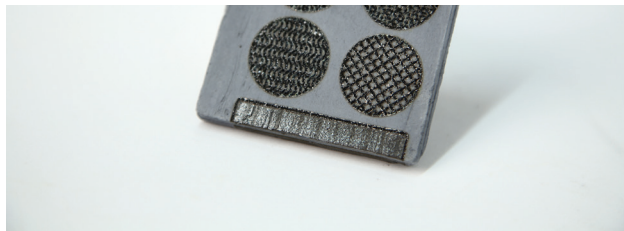
Durch die intensive Auseinandersetzung mit den zwei Themenbereichen und durch einen experimentellen Zugang konnte ein wertvolles und weitreichendes Fundament an Erkenntnissen geschaffen werden. Bemerkenswert und inspirierend war auch die Vielfalt an möglichen weiteren Potentialen, Anwendungsbereichen und Richtungen, die bei beiden Projekten in der Laufzeit der Arbeit immer wieder diskutiert und evaluiert wurden. Als Richtlinie und Leitfaden dieser Evaluierungen wurden immer die drei Kriterien der Nachhaltigkeit herangezogen:

- 1) Material und Verfügbarkeit
- 2) Rückführbarkeit
- 3) energetisch effiziente Prozesse

Der Ausblick wurde in weiterer Folge bewusst nicht in den Fokus gerückt, da sich eine immense Komplexität der beiden Projekte abzeichnete und eine zu konkrete Endanwendung in diesem Stadium den Prozessen noch nicht gerecht werden kann.

Neben den bereits erwähnten Möglichkeiten, die in den entsprechenden Kapiteln jeweils direkt an die Projekterläuterungen anschließen, soll an dieser Stelle auch auf Serendipitäten eingegangen werden, die im Zuge der Testungen zu Tage traten, da sie ebenfalls Ansatzpunkte für weitere Vertiefungen bieten.

Einer davon ist die Oberflächenversiegelung von ungebranntem Ton durch Lasersinterung (Abb 5.1). Im Projekt I (3.8 Alternativprozess) kam es bei der Probe zu einer unabsichtlichen Verstellung des Laser-Fokuspunkts.



**Abb. 5.1** Oberflächenversiegelung, schamottierter, ungebrannter Ton



Infolgedessen entstand eine glänzende und hydrophobe Oberfläche, die sich danach nicht mehr reproduzieren zu lassen schien. Eine Oberflächenversiegelung von ungebranntem Ton oder Lehm mittels Sonnenenergie könnte die Tür zu einer neuen Fertigungsmethode von Baukeramik aufstoßen.

Eine weitere interessante Entwicklung ergab sich durch die falsche, erstmalige Aufbereitung der Keramikproben für die Solare Sinterung: Diese wurden auf speziell zugeschnittene Unterlagen aus Finnplatte mittels Schablone aufgestrichen und zur Trocknung unabgedeckt liegen gelassen (Abb 5.2).



Abb. 5.2 *Perfekte Verformung durch Trocknung*

Durch die formschlüssige Verbindung von Ton und Finnplatte und die Spannung, die sich während der Trocknung aufbaute, war ein nahezu perfektes Paraboloid geformt worden. Dieser Umstand war in verschiedenen Schichtdicken und veränderte Form (länglich, quadratisch) reproduziert worden (Abb. 5.3), musste aus Zeitgründen jedoch auf eine spätere Untersuchung verschoben werden.



Abb. 5.3 *Verformung durch Trocknung - Weitere Versuche*

# 6 Anhang

---

## 6.1 Literaturverzeichnis

Aitcin, Pierre-Claude/Flatt, Robert J.: Science and Technology of Concrete Admixtures, Amsterdam/Boston/Cambridge 2016

Biesuz, Mattia/Sglavo, Vincenzo M.: Flash sintering of ceramics, in: Journal of the European Ceramic Society 39 (2019), 115-143

Braungart, Michael/Mc Donough, William/Bollinger, Andrew: Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions. A strategy for eco-effective product and system design, in: Journal of Cleaner Production 15 (2007), 1337-1348

Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V. (Hg.): Kalksandstein - Planungshandbuch. Planung, Konstruktion, Ausführung, Hannover 2018

Cankaya, Selcuk/Cankaya, Simge: Occupational Health and Safety in Cement Industry, in: Ecology & Safety 9 (2015), 243-250

Clark, Kenneth: DuMont's Handbuch der keramischen Techniken. Für Handwerk und künstlerisches Gestalten, Köln 1985

Dancer, C.E.J.: Flash sintering of ceramic materials, in: Materials Research Express 3 (2016), 102001

Distasio Cat (08.01.2016): This amazing Bangladeshi air cooler is made from plastic bottles and uses no electricity, <https://inhabitat.com/this-amazing-bangladeshi-air-cooler-is-made-from-plastic-bottles-and-uses-no-electricity/> in: inhabitat.com [11.10.2020]

Duden.de (o.J.): in situ, [https://www.duden.de/recht-schreibung/in\\_situ](https://www.duden.de/recht-schreibung/in_situ) in: duden.de [27.10.2020]

Folkers, Andreas: Was ist das Anthropozän und was wird es gewesen sein? Ein kritischer Überblick über neue Literatur zum kontemporären Erdzeitalter, in: NTM. Zeitschrift für Geschichte der Wissenschaften, Techniken und Medizin 28, 4 (2020), 589-604

Frotscher, Sven: Keramik und Porzellan, München 2003

Fuladlu, Kamyar/Riza, Müge/Ilkan, Mustafa: The Effect of Rapid Urbanization on the Physical Modification of Urban Area, Venice 2018

Ge, Mengpin/Friedrich, Johannes (06.02.2020): 4 Charts Explain Greenhouse Gas Emissions by Countries and Sectors, <https://www.wri.org/blog/2020/02/greenhouse-gas-emissions-by-country-sector>, in: <https://www.wri.org>

Geater, Jay (26.11.2018): Was ist die EPW-Dateierweiterung?, <https://www.solvusoftware.com/de/file-extensions/file-extensions-epw/>, in: <https://www.solvusoftware.com> [13.09.2020]

Grasshopper3d.com (o.J.): About Grasshopper..., <https://www.grasshopper3d.com>, in: grasshopper3d.com [14.09.2020]

Grimm, Roland (27.04.2017): Was ist Portlandzement?, <https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/grundstoffe-des-bauens/portlandzement-definition-geschichte-joseph-aspdin-isaac-charles-johnson-zement-klinker-din-en-197-1-portlandkompositzement-hochofenzement/>, in: baustoffwissen.de [15.11.2020]

Kayser, Markus (o.J.): About, <https://kayserworks.com/about>, in: kayserworks.com [07.08.2020]

Kayser, Markus (o.J.): Solar Sinter, <https://kayserworks.com/#/798817030644/> in: kayserworks.com [07.08.2020]

Kramer, Katharina (01.08.2004): Nebelfischer, [https://web.archive.org/web/20120719170350/http://www.mare.de/index.php?article\\_id=1628](https://web.archive.org/web/20120719170350/http://www.mare.de/index.php?article_id=1628), in: web.archive.org [07.08.2020]

Ladybug.tools (o.J.): Our Story, <https://www.ladybug.tools/about.html>, in: ladybug.tools [14.09.2020]

Laschinger Werner/Lötscher Lienhard: Urbaner Lebensraum, in: Geographica Helvetica 3 (1975), 119-132

Montazeri, Hamid/Blocken, Bert/Hensen, Jan L.M.: CFD analysis of the impact of physical parameters on evaporative cooling by a mist spray system, in: Applied Thermal Engineering 75 (2015), 608-622

Nextera Energy Resources (o.J.): Solar Electric Generating Systems, <https://www.nexteraenergyresources.com/content/dam/neer/us/en/pdf/portfolio/segs.pdf>, in: nexteraenergyresources [03.01.2021]

NÖ Energie- und Umweltagentur GmbH (o.J.): Windenergie, <https://www.enu.at/windenergie>, in: enu.at [03.01.2021]

Parguel, Béatrice/Benoit-Moreau, Florence/Larceneux, Fabrice: How Sustainability Ratings Might Deter „Greenwashing“: A Closer Look at Ethical Corporate Communications, in: Journal of Business Ethics 102, 1 (2011), 15-28

Prettenthaler, Franz/Podesser, Alexander/Pilger, Harald (Hg.): Klimaatlas Steiermark: Periode 1971-2000; eine anwendeorientierte Klimatographie, Graz 2010

Rapp, Christoph: Hydraulik für Ingenieure und Naturwissenschaftler: Ein Kurs mit Experimenten und Open-Source Codes, Wiesbaden 2017



**Rockström, Johan u.a.:** A roadmap for rapid decarbonization. Emissions inevitably approach zero with a „carbon law“, in: Science 355, 6331(2017), 1269-1272

**Rüter, Martina (16.10.2015):** Bionik: Wassergewinnung nach Art des Nebeltrinker-Käfers, <https://www.martina-rüter.de/text-fachtexte-naturwissenschaften/bionik/bionik-wassergewinnung-nachart-des-nebeltrinker-kaefers/>, in [www.martina-rüter.de](http://www.martina-rüter.de), [07.08.2020]

**Scalenghe Riccardo/Marsan Franco Ajmone:** The anthropogenic sealing of soils in urban areas, in: Landscape and Urban Planning 90 (2009), 1-10

**Schwaabe, Christian:** Politische Theorie. Von Platon bis zur Postmoderne, Paderborn 2018

**Solar Cookers International (o.J.):** Buy your CookKit here, <https://www.solarcookers.org/resources/cookit-purchase/>, in: [solarcookers.org](http://solarcookers.org) [17.11.2020]

**Solar Cookers International (29.09.2020):** Chad, <https://solarcooking.fandom.com/wiki/Chad>, in: [solarcooking.fandom.com](http://solarcooking.fandom.com) [17.11.2020]

**Solar Cookers International (26.08.2013):** Gasy Nahandro, [https://solarcooking.fandom.com/wiki/Gasy\\_Nahandro](https://solarcooking.fandom.com/wiki/Gasy_Nahandro), in: [solarcooking.fandom.com](http://solarcooking.fandom.com) [17.11.2020]

**Spot-bremen.de (o.J.):** Nachhaltiges Bauen: Mit der Natur unter einem Dach, <https://spot-bremen.de/magazin/meine-immobilie/begruente-daecher-fuer-ein-besseres-klima/>, in: [spot-bremen.de](http://spot-bremen.de) [07.08.2020]

**Steffen, Will/Crutzen, Paul J./McNeill, John R.:** The Anthropocene: Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature?, in: Ambio 36, 8 (2007), 614-621

**Tutoria.de (o.J.):** Digitalisierung an Schulen: So könnte der Unterricht anno 2020 aussehen, <https://www.tutoria.de/schule-ratgeber/schulalltag/digitalisierung-an-schulen/>, in: [tutoria.de](http://tutoria.de) [07.08.2020]

**UNEP:** Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources, Geneva 2019

**Van Hooff, T. u.a.:** A venturi-shaped roof for wind-induced natural ventilation of buildings: Wind tunnel and CFD evaluation of different design configurations, in: Building and Environment 46 (2011), 1797-1807

**Vandivier, Pamela B. u.a.:** The Origins of Ceramic Technology at Dolni Vestonice, Czechoslovakia, in: Science, New Series 246, 4933 (1989), 1002-1008

**Wang, Hai u.a.:** Simulation and Experimental Study on the Optical Performance of a Fixed-Focus Fresnel Lens Solar Concentrator Using Polar-Axis Tracking, in: Energies 11, 4 (2018), 887

**Wienerberger Österreich GmbH (o.J.):** Was macht den Ziegel klimaneutral, <https://www.wienerberger.at/bauen-mit-ziegeln/wandloesungen/Klimapositiver-Ziegel/strategie.html>, in: <https://www.wienerberger.at> [08.11.2020]

**Winter-Pölsler, Gerald:** Was bringt der Sprühnebel wirklich?, in: Kleine Zeitung, 15.07.2020, 26

**Zimmermann, Friedrich (Hg.):** Von Chancen und Herausforderung für eine nachhaltige Zukunft, Heidelberg 2016



## 6.2 Abbildungsverzeichnis

**Abb. 1.1** Nebeltrinker Käfer

[https://www.ditf.de/files/inhalt/Nachrichten/Presse-meldungen/bis%202017/Bilder/PM\\_ITV\\_Nebeltrinker-Käfer\\_Gobabeb\\_Henschel.jpg](https://www.ditf.de/files/inhalt/Nachrichten/Presse-meldungen/bis%202017/Bilder/PM_ITV_Nebeltrinker-Käfer_Gobabeb_Henschel.jpg)

**Abb. 1.2** Adaptive Fassade

Bild von Autor

**Abb. 1.3** Simulationstest

Bild von Autor

**Abb. 1.4** High Rise - Zero Energy

Bild von Autor

**Abb. 1.5** Markus Kayser - Solar Sinter Project

[https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/5adf2e4655b02c56208f06e4/1524585770947-WOR-WZ40RQ8OIYBCKSGYS/ke17ZwdGBToddI8pDm48k-BUFirDR\\_9FJwmETQ03YP4N7gQa3H78H3Y0t-xjaiv\\_0fDoOvxcdMmMkkDsyUqMSsMWxHk725yi-iHCClfrh8O1z4YTzHvnKhyp6Da-NYroOW3ZGjoBKy-3azqku80C789l0p5uBJOnOmCWBn4JfYsIDySvl3b-UTWNQlqr9ruguefhavNuZ9Vh8pnjJGXKvSbMCyQ/MarkusKayser\\_SolarSinter\\_02.jpg](https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/5adf2e4655b02c56208f06e4/1524585770947-WOR-WZ40RQ8OIYBCKSGYS/ke17ZwdGBToddI8pDm48k-BUFirDR_9FJwmETQ03YP4N7gQa3H78H3Y0t-xjaiv_0fDoOvxcdMmMkkDsyUqMSsMWxHk725yi-iHCClfrh8O1z4YTzHvnKhyp6Da-NYroOW3ZGjoBKy-3azqku80C789l0p5uBJOnOmCWBn4JfYsIDySvl3b-UTWNQlqr9ruguefhavNuZ9Vh8pnjJGXKvSbMCyQ/MarkusKayser_SolarSinter_02.jpg)

**Abb. 1.6** Markus Kayser - Glasobjekt

[https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/5adf2e4655b02c56208f06e4/1524585794034-6LRK4EPNLR9810AFIQX3/ke17ZwdGBToddI8pDm48kLkXF2plyv\\_F2eUT9F60jBl7gQa3H78H3Y0t-xjaiv\\_0fDoOvxcdMmMkkDsyUqMSsMWxHk725yi-iHCClfrh8O1z4YTzHvnKhyp6Da-NYroOW3ZGjoBKy3azqku80C789l0iyqMbMesKd95J-X4EargU9L-3Sa3U8cogeb0tjXbfawd0urKshkc5MgdBeJmALQKw/MarkusKayser\\_SolarSinter\\_04.jpg](https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/5adf2e4655b02c56208f06e4/1524585794034-6LRK4EPNLR9810AFIQX3/ke17ZwdGBToddI8pDm48kLkXF2plyv_F2eUT9F60jBl7gQa3H78H3Y0t-xjaiv_0fDoOvxcdMmMkkDsyUqMSsMWxHk725yi-iHCClfrh8O1z4YTzHvnKhyp6Da-NYroOW3ZGjoBKy3azqku80C789l0iyqMbMesKd95J-X4EargU9L-3Sa3U8cogeb0tjXbfawd0urKshkc5MgdBeJmALQKw/MarkusKayser_SolarSinter_04.jpg)

**Abb. 2.1** Cradle to Cradle Prinzip

[https://de.wikipedia.org/wiki/Cradle\\_to\\_Cradle#/media/Datei:Cradle\\_to\\_cradle.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Cradle_to_Cradle#/media/Datei:Cradle_to_cradle.jpg)

**Abb. 2.2** Greenhouse Gas emission - World Resources Institute

[https://wriorg.s3.amazonaws.com/s3fs-public/world-greenhouse-gas-emissions-sankey-chart-2019\\_2.jpg](https://wriorg.s3.amazonaws.com/s3fs-public/world-greenhouse-gas-emissions-sankey-chart-2019_2.jpg)

**Abb. 2.3** Markus Kayser - Solar Sintered Object, Sand

[https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/5adf2e4655b02c56208f06e4/1524585318292-BSP98D0AHE31FOO4PO46/ke17ZwdGBTod-dl8pDm48kCK\\_Aq9cpbLBNeHIhy7zV3Z7gQa3H78H3Y0t-xjaiv\\_0fDoOvxcdMmMKkDsyUqMSsMWxHk725yiiHCCLf-rh8O1z5QPOohDlaIeIjMHgDF5CVlOqpeNLcJ80NK65\\_fv7S1US7mCHYKAO8TOFmBHhRoVTfuCWkBU-FONc4VYOlRcxQAdVzIgdDbKuWbU6v7VINLj\\_HA/MarkusKayser\\_SolarSinter\\_10.jpg?format=1000w](https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/5adf2e4655b02c56208f06e4/1524585318292-BSP98D0AHE31FOO4PO46/ke17ZwdGBTod-dl8pDm48kCK_Aq9cpbLBNeHIhy7zV3Z7gQa3H78H3Y0t-xjaiv_0fDoOvxcdMmMKkDsyUqMSsMWxHk725yiiHCCLf-rh8O1z5QPOohDlaIeIjMHgDF5CVlOqpeNLcJ80NK65_fv7S1US7mCHYKAO8TOFmBHhRoVTfuCWkBU-FONc4VYOlRcxQAdVzIgdDbKuWbU6v7VINLj_HA/MarkusKayser_SolarSinter_10.jpg?format=1000w)

**Abb. 2.4** Produktion eines Mauerziegels

Bild von Autor

**Abb. 2.5** Lasersinterung.

Bild von Autor

**Abb. 3.1** State of the Art - Map

Bild von Autor

**Abb. 3.2** Fixed-Focus Fresnel Lense Solar Concentrator

Wang, Hai u.a.: Simulation and Experimental Study on the Optical Performance of a Fixed-Focus Fresnel Lens Solar Concentrator Using Polar-Axis Tracking, Guangzhou 2018, 4

**Abb. 3.3** Solar CookKit, Tschad

[http://2.bp.blogspot.com/\\_N3UsyvL2H6o/TQ-gcus-2Wnl/AAAAAAAAABts/T657z4jQRpU/s1600/PICT1848.JPG](http://2.bp.blogspot.com/_N3UsyvL2H6o/TQ-gcus-2Wnl/AAAAAAAAABts/T657z4jQRpU/s1600/PICT1848.JPG)

**Abb. 3.4** Solar CookKit, gefaltet

[https://static.wikia.nocookie.net/solarcooking/images/d/d1/CookKit\\_folded.jpg](https://static.wikia.nocookie.net/solarcooking/images/d/d1/CookKit_folded.jpg)

**Abb. 3.5** SEGS - Kalifornien

[https://thefraserdomain.typepad.com/photos/uncategorized/photo\\_troughs\\_2.jpg](https://thefraserdomain.typepad.com/photos/uncategorized/photo_troughs_2.jpg)

**Abb. 3.6** Prototypen - virtuelle Testphase  
Bild von Autor

**Abb. 3.7** Prototyp 1 - Testlauf für die Sonnenverfolgung  
über zwei Stunden  
Bild von Autor

**Abb. 3.8** Ladybug Logo  
<https://www.ladybug.tools/assets/img/logo.png>

**Abb. 3.9** Prototyp 2 - Explosionszeichnung  
Bild von Autor

**Abb. 3.10** Fünfter Servo - Steuerung der Sinterschiene  
Bild von Autor

**Abb. 3.11** Arduino Uno Board und Verkabelung der  
unteren Servos  
Bild von Autor

**Abb. 3.12** Prinzip der „Stauchung“ einer plankonvexen  
Sammellinse (links) zu einer Fresnel-Linse (rechts)  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Fresnel-Linse#/media/  
Datei:Fresnellinsen.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Fresnel-Linse#/media/Datei:Fresnellinsen.svg)

**Abb. 3.13** Teil 1 des Programmcodes  
Bild von Autor

**Abb. 3.14** Teil 2 & 3 des Programmcodes  
Bild von Autor

**Abb. 3.15** Explosionszeichnung - Probenaufnahme und  
Probe  
Bild von Autor

**Abb. 3.16** Probenaufnahme und Probe (190 x 60mm)  
Bild von Autor

**Abb. 3.17** Probenaufbereitung - Schablone und Raket  
Bild von Autor

**Abb. 3.18** Probenaufbereitung - Schablone und Raket  
Bild von Autor



**Abb. 3.19** Abgedeckte Trocknung - Gegen Risse und Verformung  
Bild von Autor

**Abb. 3.20** Sinterung ohne Vorwärmung  
Bild von Autor

**Abb. 3.21** Vorwärmung  
- Der Fokuspunkt liegt unter der Probe  
Bild von Autor

**Abb. 3.22** Sinterung  
- Der Fokuspunkt liegt auf Probenebene  
Bild von Autor

**Abb. 3.23** Erfolgreiche Vorwärmung und Sinterung  
Bild von Autor

**Abb. 3.24** Epilog Fusion - 75 Watt  
<https://5.imimg.com/data5/PC/CQ/MY-506980/epilog-fusion-m2-dual-source-laser-systems-500x500.jpg>

**Abb. 3.25** Lasersinterungen - Testprobe (variierende Intensität und Geschwindigkeit sind mit Bleistift auf er Probe vermerkt  
Bild von Autor

**Abb. 3.26** Gesinterte und ausgelöste Struktur in 60-facher Vergrößerung  
Bild von Autor

**Abb. 3.27** Eine weitere gesinterte Struktur, Rückseite  
Bild von Autor

**Abb. 3.28** Sinterverhalten von gelaserten Linien - Zu viel Energieeintrag (links), zu wenig Energieeintrag (mitte), optimaler Energieeintrag (rechts)  
Bild von Autor

**Abb. 3.29** Verklumpung bei zu engem und konzentriertem Energieeintrag (rechts)  
Bild von Autor

**Abb. 3.30** Ermöglichung von Abkühlphasen durch Sinterablauf  
Bild von Autor

**Abb. 3.31** Mindestdicke von Proben für die Aufnahme von Hitze  
Bild von Autor

**Abb. 3.32** Einsumpfen der Probe  
Bild von Autor

**Abb. 3.33** Extrahierte gesinterte Geometrie  
Bild von Autor

**Abb. 3.34** Keramikfilter  
Bild von Autor

**Abb. 3.35** Keramikfilter - Ausblick  
Bild von Autor

**Abb. 3.36** Keramikfilter - Ausblick  
Bild von Autor

**Abb. 4.1** Urban Heat Island Profile  
[http://www.metlink.org/wp-content/uploads/2013/07/UHI\\_profile1.png](http://www.metlink.org/wp-content/uploads/2013/07/UHI_profile1.png)

**Abb. 4.2** Bernoulli-Gleichung und Venturi-Effekt  
Bild von Autor

**Abb. 4.3** State of the Art - Map  
Bild von Autor

**Abb. 4.4** Bangladesh - DIY Kühlpaneel aus alten PET Flaschen  
<https://climatelaunchpad.org/wp-content/uploads/2016/07/Eco-cooler-bangladesh.png>

**Abb. 4.5** A Venturi Shaped Roof - Testkanal von Hooff u.a.: A venturi-shaped roof for wind-induced natural ventilation of buildings: Wind tunnel and CFD evaluation of different design configurations, Eindhoven 2011, 3

**Abb. 4.6** A Venturi Shaped Roof - Testvarianten mit und ohne Windfahnen  
von Hooff u.a.: A venturi-shaped roof for wind-induced natural ventilation of buildings: Wind tunnel and CFD evaluation of different design configurations, Eindhoven 2011, 3

**Abb. 4.7** Sprühnebelanlage - Tummelplatz Graz  
[https://media.kleinezeitung.at/images/uploads\\_520/a/8/1/5839489/3EF27CA9-D916-4B87-8F35-A382801A7D46\\_v0\\_h.jpg](https://media.kleinezeitung.at/images/uploads_520/a/8/1/5839489/3EF27CA9-D916-4B87-8F35-A382801A7D46_v0_h.jpg)

**Abb. 4.8** Testmodell - Ikosaederstumpf  
Bild von Autor

**Abb. 4.9** Venturi-Düse - Stillstand  
Bild von Autor

**Abb. 4.10** Venturi-Düse - Luftstrom  
Bild von Autor

**Abb. 4.11** Abstufungen des Grundmoduls - Verengung  
Bild von Autor

**Abb. 4.12** Abstufungen des Grundmoduls - Neigung  
Bild von Autor

**Abb. 4.13** Testmodule  
Bild von Autor

**Abb. 4.14** Versuchsaufbau  
Bild von Autor

**Abb. 4.15** Luftstrom durch Fön  
Bild von Autor

**Abb. 4.16** Probe 3b - links: Stillstand, rechts: Mit Luftstrom  
Bild von Autor

**Abb. 4.17** Probe 1b - links: Stillstand, rechts: Mit Luftstrom  
Bild von Autor

**Abb. 4.18** Testmodule - Neigung (a), Verengung (b)  
Bild von Autor

**Abb. 4.19** Testmodule - Neigung (a), Verengung (b)  
Bild von Autor

**Abb. 4.20** Parametrisiertes Modell - Programmcode  
Bild von Autor

**Abb. 4.21** 132 Pentagon Polyhedron - Visualisierung  
Bild von Autor

**Abb. 4.22** Pfad für den Keramikprinter für eine 2mm  
Nozzle  
Bild von Autor

**Abb. 4.23** Gedruckte Module, bereit zur Trocknung  
Bild von Autor

**Abb. 4.24** Modell - Höhe: 20 cm, Durchmesser: 40 cm  
Bild von Autor

**Abb. 4.25** Ausblick  
Bild von Autor

**Abb. 5.1** Oberflächenversiegelung, schamottierter, un-  
gebrannter Ton  
Bild von Autor

**Abb. 5.2** Perfekte Verformung durch Trocknung  
Bild von Autor

**Abb. 5.3** Verformung durch Trocknung - Weitere Ver-  
suche  
Bild von Autor





