

3D PRINTED FUTURE FACADE

Moritz Basil Mungenast



Entwicklung, Prototypenerstellung und experimentelle Untersuchung
einer 3D-gedruckten, transluzenten und funktionsintegrierten Gebäudehülle

Dissertation

Technische Universität München
Fakultät für Architektur
Professur für Entwerfen und Gebäudehülle

3D-Printed Future Facade -
Entwicklung, Prototypenerstellung und experimentelle Untersuchung einer
3D-gedruckten, transluzenten und funktionsintegrierten Gebäudehülle

Moritz Basil Mungenast

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Architektur der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor - Ingenieurs genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:	Prof. Dr. Alain Thierstein
Prüfer der Dissertation:	1. Prof. Dr. Bettina Wolf 2. Prof. Florian Musso

Die Dissertation wurde am 23.09.2019 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Architektur am 13.11.2019 angenommen.

Impressum

Technische Universität München
Fakultät für Architektur
Professur für Entwerfen und Gebäudehülle
Arcisstraße 21
80333 München
Tel. 089 289 28699

Text und Layout: Moritz Basil Mungenast
Alle Daten sind urheberrechtlich geschützt.

Abbildungen

Abbildungen Dritter werden als Zitate nach §51 UrhG eines veröffentlichten Werkes zum Zweck des Zitats, sofern die Nutzung in ihrem Umfang durch den besonderen Zweck gerechtfertigt ist, verwendet.

Sofern nicht anders angegeben, entstammen alle Bilder den zugrunde liegenden Werken und Publikationen. Alle weiteren Abbildungen stammen vom Verfasser dieser Arbeit und sind urheberrechtlich geschützt.

Cover

Projekt: Fluid Morphology
Foto: TUM, Heddergott

Copyright Moritz Basil Mungenast © 2019
All rights reserved

Moritz Basil Mungenast

3D-Printed Future Facade

Entwicklung, Prototypenerstellung und experimentelle
Untersuchung einer 3D-gedruckten, transluzenten und
funktionsintegrierten Gebäudehülle

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Entwerfen und Gebäudehülle der Technischen Universität München.

Die selbst gestellte Forschungsaufgabe war die Entwicklung einer 3-D-gedruckten und funktionsintegrierten Gebäudehülle. Warum dieses Thema zum Inhalt einer Doktorarbeit und somit zu einem Forschungsprojekt wurde, möchte ich hier erläutern.

Die Grundlage hierfür bilden mein professioneller Hintergrund als ausführender Architekt und die Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Architektur fakultät der TU München (seit 2011). Dort arbeite ich an zwei Lehrstühlen: zum einen am Lehrstuhl Emerging Technologies (2011 – 2017) – hier richtet sich der inhaltliche Fokus auf den Einsatz von neuen Materialien und Technologien in der Architektur – und zum anderen an der Professur für Entwerfen und Gebäudehülle mit dem Schwerpunkt Entwicklung neuer Fassadenkonzepte zur Energieeinsparung und Energiegewinnung unter architektonischen und technischen Gesichtspunkten.

Daraus ergibt sich die Kombination aus neuer Fertigungsmethode, die Additive-Fertigung, und die daraus resultierende Fragestellung nach einem sinnvollen Einsatzbereich, die Anwendung in der Gebäudehülle.

Die genauere Ausformulierung der Forschungsfrage konnte nur infolge einer langjährigen Auseinandersetzung mit dem Thema der Fertigungsmethode 3-D-Druck erfolgen. Diese Vertiefung betreibe ich seit 2012 im universitären Umfeld bzw. Austausch und durch Besuche von additiv gefertigten Projekten und 3-D-Drucker-Herstellern.

Wichtig ist für mich, mit der Arbeit an der Universität die Suche nach neuen Wegen in der Architektur zu entwickeln und umzusetzen. Diese Motivation, Bestehendes neu einzusetzen oder zu hinterfragen, ist immer mein Antrieb bei Projekten und bei der Betreuung von Architekturstudierenden. Ich sehe diese Herangehensweise neben der Grundlagenvermittlung als einen Grundpfeiler der universitären Architekturausbildung und der gesellschaftlichen Verantwortung, um zukünftige Herausforderungen im Baubereich bei der Entwicklung von nachhaltigen und bezahlbaren Gebäuden zu meistern.

Das Thema dieser Doktorarbeit spiegelt diesen Ansatz wider und evaluiert die Potenziale anhand eines Fallbeispiels.

Um in kurzer Zeit eine Vielzahl von verschiedenen Lösungsansätzen bearbeiten zu können, wurden von mir eigene Lehrveranstaltungen für Master-Architekturstudierende entwickelt.

Mein besonderer Dank gilt:

Frau Prof. Dr.-Ing. Tina Wolf für die Bereitschaft, bei der Betreuung dieser Arbeit das Hauptreferat zu übernehmen und mir die Möglichkeit einer eigenen Fassadenentwicklung zu geben.

Herrn Dr.-Ing. Ingo Ederer, Gründer der Firma voxeljet, als Mentor für diese Dissertaion, langjähriger Kontakt zur innovativen 3-D-Druck-Industrie und Unterstützer von vielen Projekten.

Herrn Prof. Dipl.-Ing. Florian Musso für die Übernahme des Koreferats und die fachlichen Diskussionen.

Herrn Prof. Dr.-Oec. Alain Thierstein für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und die methodische Begleitung.

Herrn Prof. Dr.-Ing Tillmann Klein für die Unterstützung und fachliche Diskussion.

Herrn Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer für die Aufnahme in die Doktorandengruppe und anregenden Diskussionen.

Meinem Kollegen Dr.-Ing. Philipp Lionel Molter für die wichtigen Diskussionen und die fortlaufende Motivation und Unterstützung.

Frau Rebekka Schlenker für die Unterstützung und das Lektorat.

Meinem Kollegen Dr.-Ing. Klaudius Henke für den Austausch, die Unterstützung und den gemeinsamen Glauben an die Sache.

Herrn Dipl.-Ing. Michael Merk für die tatkräftige und unkomplizierte Unterstützung bei den Materialversuchen.

Luc Morroni für den erbrachten Einsatz bei der Modellierung und Umsetzung der 3-D gedruckten Modelle.

Meinen Kollegen Max Langwieder und Oliver Tessin für die fachlichen Diskussionen und die Betreuung der Studierenden als Korrekturassistenten im Bereich Computational Design.

Matthias Müller und Jan Riepert für die Montage der Testelemente auf der Solartstaion.

Meiner Frau Adina für die Motivation und die zur Verfügung gestellten Freiräume.

Meinen Eltern und meiner Familie, die mich in allen Belangen unterstützt und mich in meinen Zielen stets bestärkt haben.

Inhalt

1. Einführung	14
1.1 Hintergrund der Untersuchung	15
1.2 Zielsetzung	18
1.3 Struktureller Aufbau der Dissertation	19
1.4 Problemstellung/Hypothese	19
2. Zukünftige Auswirkungen der Additiven Fertigung	20
2.1 Gesellschaft	20
2.2 Baugewerbe	21
2.3 Produktion	22
2.4 Ästhetik	24
3. Additive Fertigung in der Architektur / Stand der Technik	26
3.1 Grundprinzip	26
3.2 Druckverfahren im Bauwesen und deren Materialien	27
3.3 Prozesstechnik der Additiven Fertigung in der Architektur	34
4. Additive Fertigung in der Architektur / Stand der Forschung	36
4.1 Bauwesen	36
4.1.1 Typologien der Forschungsprojekte	40
4.2 Fassadenanwendung	44
5. Gebäudehülle	48
5.1 Einführung	48
5.2 Entwicklung	49
5.3 Anforderungen	50
5.4 Lowtech vs. Hightech	52
6. Problemstellung/Hypothese	53
6.1 Problemstellung	53
6.2 Hypothese	53
7. 3D-gedruckte Gebäudehüllen	54
7.1 Herleitung des Forschungsansatzes	54
7.2 Methodische Vorgehensweise	55
7.3 Architektonische Gestalt	55

8. Teil 1: Funktionsgeometrien (veröffentlicht)	57
8.1 Methodik	58
8.2 Parameter zur Entwicklung von Fassaden-Funktionsgeometrien	60
8.2.1 Druckbare Fassadenfunktionen	60
8.2.2 Freie Materialwahl	60
8.2.3 Freie Wahl des 3-D-Druckprozesses	60
8.3. Ergebnisse: 3D-gedruckte Fassaden-Funktionsgeometrien	61
8.4. Evaluierungsmatrix der Funktionsgeometrien zur Potenzialabschätzung	88
8.5. Zwischenfazit zu Teil 1: Funktionsgeometrien	89
9. Teil 2: Funktionsintegration (veröffentlicht)	91
9.1 Methodik	93
9.1.1 Gegenüberstellung	93
9.1.2 Auswahl Konstruktion und Material	93
9.1.3 Gegenüberstellung von bestehendem Fassadenprodukt „Today“ und 3D-gedrucktem Fassadenelement „Tomorrow“	94
9.1.4 Ort und Ausrichtung	95
9.2 Today-Element: Rodeca, Polycarbonatfassade	96
9.2.1 Material	96
9.2.2 Funktionen und Anwendungen	96
9.3 Tomorrow-Element: Parameter	98
9.3.1 Festlegung der Kombination von Fassadenfunktionen als Resultat von Teil 1	98
9.3.2 Prozesswahl: Schmelzschichtung / FDM-Prozess	99
9.3.3 Materialwahl: Polycarbonat / PETG	100
9.4 Tomorrow-Element: architektonische Gestalt	102
9.4.1 Einflüsse des FDM-Druckprozesses und der Funktionsintegration auf die Gestaltung	102
9.4.2 Ergebnisse der Gestaltungsansätze	103
9.4.3 Herstellung von Konzeptmodellen	104
9.4.4 Evaluierung und Auswahl	104

9.5 Tomorrow-Element: Zusammenführung von festgelegten Parametern und architektonischer Gestalt	106
9.5.1 Design-Ebenen	108
9.5.2 Funktions-Ebenen	118
9.5.3 Finaler Entwurf des Fassadenelements	128
9.6 Tomorrow-Element: Ergebnisse – Produktion von prototypischen Modellen	130
9.6.1 Eigenverschattung und Tageslichtnutzung Ausschnittsmodell M 1:1	130
9.6.2 Belüftung, Akustik, Dämm- und Tragstruktur Ausschnittsmodell M 1:1	131
9.6.3 Elementsegmentierung Gesamtmodell M 1:3	131
9.7 Tomorrow-Element: mögliche Einsatzbereiche	132
9.7.1 Einsatz in bestehendem Fassadensystem (Rodeca)	132
9.7.2 Einsatz als eigenständiges Fassadensystem	133
10. Teil 3: Dokumentation der Herstellung eines Prototyps und dessen Untersuchung der optischen, thermischen und statischen Eigenschaften	135
10.1 Herstellung des Today-Elements (Rodeca), M 1:1	137
10.2 Herstellung des Tomorrow-Elements, M 1:1	138
10.2.1 Drucker	138
10.2.2 Material	138
10.2.3 Druckdateien der 3D-Modelle - Programm Simplify	139
10.3 Druckergebnisse	140
10.3.1 Überprüfung der ausgedruckten Einzelelemente	140
10.3.2 Montage des Tomorrow-Elements	147

10.4 Materialtests: Zug- und Druckversuch, Transparenz	156
10.4.1 Material, Abmessungen und Herstellung der Testkörper	156
10.4.2 Zugversuch	157
10.4.3 Druckversuch	162
10.4.4 Transparenz	165
10.5 Bauteiluntersuchung	166
10.5.1 Biegeversuch	166
10.5.2 Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) und Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert)	174
10.5.3 Brandverhalten	178
10.5.4 Brandprüfung	180
10.6 Vergleichstest Today- und Tomorrow-Element auf der Solarstation	184
10.6.1 Eigenverschattung	184
10.6.2 Fassadenoberflächentemperatur	191
10.6.3 Beleuchtungsstärke	194
10.6.4 Tageslichtquotient (TQ)	198
10.7 Langzeittests auf der Solarstation	200
10.7.1 Witterungs- und UV-Beständigkeit PETG-Teststück	200
10.7.2 Tauwasserbildung und Verschmutzung Tomorrow-Element	202
11. Fazit und Ausblick	207
12. Anhang: Literatur- und Abbildungsverzeichnis Messprotokolle	213

Zusammenfassung

Der 3D-Druck bietet neue architektonische Potenziale in der Fertigung und im Prototyping. Kleine Serien in geringen Stückzahlen sind bereits wettbewerbsfähig und die digitale Kette (vom digitalen Design zum Produkt) wird mit weniger Ressourcen geschlossen. Die meisten Gebäude sind Prototypen, was bedeutet, dass ihre Gebäudehülle sich in Größe, Funktion und Standort unterscheidet. Wie aber können die Vorteile der additiven Fertigung an den Makrobereich, an die Architektur, angepasst werden? Was ist das architektonische Ergebnis? Materialeinsparung und Prozessoptimierung sind auch in der Baubranche ein drängendes Thema.

Ziel dieser Doktorarbeit ist es, ein Beispiel für eine sinnvolle Nutzung der additiven Fertigung in der Architektur zu entwickeln. Ausgewählt wurde die Fassade als ein Bauteil, welches viele verschiedene Funktionen auf einer kompakten Fläche abbildet. Das

entwickelte Fallbeispiel dieser Doktorarbeit ist ein Prototyp eines Fassadenelements im Maßstab 1:1 und beinhaltet verschiedene integrierte Fassadenfunktionen wie Dämmung, Lüftung, Sonnenschutz, Tageslichtregulierung und Lastabtragung der Windlasten. Die Ausformulierung einer neuen architektonischen Ausdrucksweise und die Reduzierung der technischen Gebäudeausrüstung werden ebenfalls aufgezeigt.

Über Funktionsgeometrien werden die Fassadenfunktionen abgebildet und in ein digitales Modell transferiert, der Prototyp des Fassadenelements wird mittels eines transparenten Kunststoffes durch einen FDM-Drucker hergestellt. Durch exemplarische Tests und einen Vergleich eines Standard-Fassadenelements aus Polycarbonat-Paneelen mit dem 3D-gedruckten Fassadenelement werden modellhafte Ergebnisse ermittelt, um eine Potenzialabschätzung für weitere Entwicklungen abzugeben.

1. Einführung

Motivation

Meine persönliche Motivation ergab sich aus dem frühen Erkennen der Potenziale der Additiven Fertigung im Bauwesen und im speziellen die Vereinfachung der Herstellung von Bauteilen bis hin zu ganzen Gebäuden. Der Einsatz des Computers zur Modellierung von Architektorentwürfen und deren digitaler Planung werden ihres Potenzials entsprechend effektiv einsetzbar.

Mit welcher Art der Forschungsmethodik kann ein Architekt hier seinen Beitrag zu Wissensgenerierung leisten?

Die Themen der Material- und Prozessentwicklung sind sinnvoller bei den jeweiligen Fachbereichen aufgehoben.

Das Thema der Anwendung und die Untersuchung der gestalterischen Potenziale im Zusammenspiel mit der Nutzung sind hingegen Bereiche, in denen der Architekt als Generalist seinen Beitrag in der Wissenschaft einbringen kann. Dies bedeutet: Bereits existierende Materialien und/oder Herstellungsprozesse in einer neuen Anwendung zusammenzuführen und dadurch neue Einsatzbereiche in der Architektur zu entwickeln. Dies sind

Kompetenzen von Architekten, wie zahlreiche Beispiele aus der Baugeschichte zeigen.

Zusammenhang zwischen Gestaltung, technischen Fertigungsmethoden und neuen Materialien

In der heutigen Phase der Architektur und des Designs kann man Parallelen zu baugeschichtlichen Entwicklungen wie zum Beispiel der Zeit der Gotik und des ‚Bauhaus‘ ziehen.

Neue Materialien und Fertigungsmethoden fanden Einzug in die Architektur. Architekten, Ingenieure und Künstler untersuchten deren Einsatz in Konstruktion und Produktion und trugen dadurch maßgeblich zu einer neuen Gestaltung der gebauten Umwelt bei. Beispielsweise in der Gotik das Maßwerk und Strebewerk und im Bauhaus der Einsatz von industriell gefertigten Stahlprofilen und großflächigen Glasscheiben.

Computerbasierte Entwurfswerkzeuge

Das computerbasierte Entwerfen ermöglicht die Entwicklung hockkomplexer Formen, die durch verschiedenste Funktio-

nen informiert und deren Parameter individuell an verschiedene Umgebungen, Nutzungen und Anforderungen adaptierbar sind. Dieses Entwurfsverfahren ermöglicht zahlreiche Varianten und birgt große Potenziale, die wiederum entwickelt, bewertet und untersucht werden müssen. Wie sieht in diesem Zusammenhang der Mehrwert durch den Einsatz der Additiven Fertigung aus? Die Herstellung dieser komplexen Formen ist aus konstruktiver und ökonomischer Sicht erst durch die Additive Fertigung möglich geworden.

Ich bin überzeugt, dass sich aus dem computerbasierten Entwerfen und der Additiven Fertigung eine effektive Verbindung bei der Entwicklung neuer gestalterischer und konstruktiver Anwendungen im Bauwesen und Design ergeben. Deshalb habe ich mich dieser Herausforderung gestellt, um einen Beitrag zur Weiterentwicklung dieses Forschungsthemas zu leisten.

Die Ergebnisse werden in dieser Dissertationsschrift exemplarischen Untersuchungen unterzogen, um die Potenziale einer Weiterführung dieser Idee zu analysieren.

1.1 Hintergrund der Untersuchung

Der Paragraph 28 der Agenda 2030 der Vereinten Nationen lautet wie folgt:

„28. We commit to making fundamental changes in the way that our societies produce and consume goods and services. Governments, international organizations, the business sector and other non-state actors and individuals must contribute to changing unsustainable consumption and production patterns, including through the mobilization, from all sources, of financial and technical assistance to strengthen developing countries' scientific, technological and innovative capacities to move towards more sustainable patterns of consumption and production. We encourage the implementation of the 10-Year Framework of Programmes on Sustainable Consumption and Production. All countries take action, with developed countries taking the lead, taking into account the development and capabilities of developing countries.

[1] (UN – United Nations Agenda 2030 for Sustainable Development 2015: Paragraph 28)“

Dieser Auszug aus der Agenda 2030 der Vereinten Nationen von 2012 beschreibt die Ziele der zukünftigen weltweiten nachhaltigen Entwicklung. Die Additive Fertigung wird im Bereich der Herstellung (Production) beim Erreichen dieser Ziele eine wichtige Rolle spielen.

Dieser Dissertationsschrift liegt der Gedanke zugrunde, die Vorteile der effizienten Fertigungsmethode „Additive Fertigung“ auf die Architektur (Bauwesen) anzuwenden und somit einen Beitrag zur Umsetzung der Agenda 2030 zu leisten.

Die Additive Fertigung ist keine neue Fertigungsmethode an sich. In der Herstellung von Figuren aus Keramik und chinesischen Gefäßen wurde diese händisch angewendet. In der Natur gibt es ebenfalls einige Beispiele für das Verfahren der Additiven Fertigung, wie beispielsweise den Bau von Wespennestern, Termitenhügeln und Schwalbennestern.

Die Additive Fertigung gleicht in der Herstellung nicht einem biologischen Wachstum, aber nähert sich diesem an. Zweifach ge-

krümmte und freie Formen einerseits und organisch gewachsene Geometrien andererseits stellen kein Problem in der Herstellung bzw. Nachbildung dar.

Die bisherigen Vorteile der Additiven Fertigung sind:

1. Materialeffizienz (Topologieoptimierung)
2. Herstellung von komplexen Geometrien ohne Mehrkosten
3. Design to Product
4. Funktionsintegration

Historisch gesehen ist die industrielle Entwicklung der Additiven Fertigung eine relativ neue Ära im industriellen Zeitalter. Diese Entwicklung wurde durch die Firma 3D Systems 1987 mit einem marktfähigen 3D-Drucker gestartet. Inzwischen sind viele Patentrechte (nach 20 Jahren) abgelaufen, welche die Fertigungsmethode des 3D-Druckens sehr exklusiv und teuer machte. Nun ist der Weg frei für eine Vielzahl von 3D-Drucker-Produkten, die einer breiten Masse zugänglich sein werden. Die Zukunft wird zeigen, ob sie sich durchsetzen und, wie der Personal Computer, fester Bestandteil in jedem Haushalt wird.

In der Industrie hat sich der Anwendungsbereich der Additiven Fertigung vom anfänglichen Modell- und Prototypenbau in weiteren Produktionsbereichen – neben konventionellen Herstellungsverfahren – etablieren können: Beispielsweise in der Luft- und Raumfahrt, im Gussformenbau und in der Dental- und Medizintechnik. Hier wird in bestimmten Industriezweigen schon wirtschaftlicher produziert als mit den herkömmlichen Methoden.

Eine Errungenschaft dieser Herstellungsmethode ist, dass der Schluß der digitalen Planung mit der baulichen Herstellung im Maßstab 1:1 erfolgt ist. Die Zerlegung der digitalen Planung in Einzelteile, um diese Einzelteile mit herkömmlichen Verbindungsmethoden (z. B. über Schraubverbindungen) zu einem Ganzen zusammensetzen, ist damit vorbei. Die Einschränkungen in den Außenmaßen zur Gewährleistung der Transportierbarkeit werden durch mobile 3D-Drucker hinfällig.

Eine neue Art der Entwurfskomplexität ist heute durch Computerprogramme mit Algorithmen (z. B. Grasshopper) kontrollierbar und anpassbar. Das bedeutet, dass verschiedene Einflussgrößen auf eine Tragstruktur, wie zum Beispiel Belichtungsöffnun-

gen und Lasteinträge, durch parametrische Computerprogramme zur Materialoptimierung des Tragwerks genutzt werden können. Das Ergebnis ist ein komplexes Tragwerk, welches nun durch die Additive Fertigung hergestellt werden kann.

Dies alles bedeutet nicht nur einen Meilenstein in unserer Entwicklung, sondern gleicht einer Revolution. Diese Revolution bedeutet jedoch ebenfalls, dass herkömmliche Methoden neu gedacht und entwickelt werden müssen, damit die neuen Möglichkeiten voll ausgeschöpft werden können. Dies betrifft in hohem Maße auch die Architektur und hier speziell die Konstruktionsweisen von einzelnen Bauteilen bis hin zur Gesamtkonstruktion.

Um komplexe Bauaufgaben umsetzen zu können, fokussieren sich die Architekturausbildung bzw. die gängigen Konstruktionsweisen auf die Vereinfachung von komplizierten konstruktiven Lösungen. Aus ökonomischer Sicht ist die Verwendung von Standardprodukten und repetitiven Bauteilen gewünscht. Die Komplexität, die geometrisch durch die Additive Fertigung hergestellt werden kann, birgt, wie zuvor beschrieben, einerseits neue Potenziale, andererseits auch eine große Herausforderung in der

Entwicklung von sinnvollen Einsatzbereichen. Für die Herstellung einer massiven und geraden Fertigteil-Betonwand beispielsweise ist die Additive Fertigung aus wirtschaftlicher Sicht zum heutigen Zeitpunkt wenig sinnvoll.

Bei der Konstruktion eines Fensters sehen die Möglichkeiten hingegen ganz anders aus. Bis heute erfolgt die Konstruktion eines Fensters durch die Fertigung einzelner Komponenten aus verschiedenen Materialien, die in unterschiedlichen Herstellungsarten gefertigt werden.

Wie würde eine Fassade aus einem Material aussehen, hergestellt in einem einzigen Fertigungsschritt mittels Additiver Fertigung? Genauso wie eine heutige Fassade? Wohl kaum, da sich die Fertigungsmethode des 3-D-Drucks sehr stark von den bestehenden Methoden unterscheidet.

Aber wie sähe die adäquate „Antwort“ einer additiv gefertigten Fassade aus?

Genau darin liegt die Herausforderung und gleichzeitig das Potential. Um diese Frage beantworten zu können und um hierfür überzeugende Lösungen zu finden, ist in allen Bereichen eine Überprüfung der bekannten Gesetzmäßigkeiten erforderlich.

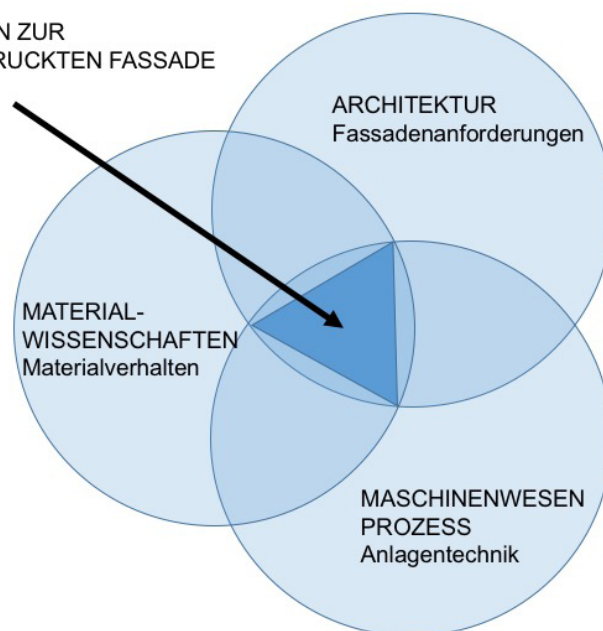
Folgende drei Forschungsbereiche sind notwendig für die Entwicklung von neuen Lösungen:

- **Anwendung und Planung**
(Architektur)
- **Baumaterial**
(Materialwissenschaften)
- **Prozess**
(Maschinenwesen)

Arbeiten diese einzelnen Forschungsfelder zusammen, gibt es die Entwicklungskompetenz von neuen Architekturanwendungen der Additiven Fertigung.

Diese Entwicklung versuche ich durch die vorliegende Dissertation voranzutreiben.

ENTWICKLUNGSKOMPETENZEN ZUR
HERSTELLUNG EINER 3D-GEDRUCKTEN FASSADE



[Abb. 1.1_1]

Entwicklungskompetenzen von 3 Fachbereichen zur Generierung von Anwendungsfeldern der Additiven Fertigung im Bauwesen

1.2 Zielsetzung

Längst ist der Maßstab 1:1 durch 3-D-Großformatdrucker im Baubereich – speziell mit dem Baustoff Beton – erreicht, und der „multiple 3-D-Druck“ (Drucken von verschiedenen Materialien in einem Fertigungsprozess) entwickelt sich rasant. Bauteile wie beispielweise Wände, Dächer und Treppen werden schon hergestellt.

Zur Herstellung von Gebäudehüllen sind noch keine marktreifen Konzepte entwickelt worden. Die heutige Nutzung der Additiven Fertigung, d. h. die geometrische Ausformulierung der Gebäudehülle, ist durch die alten Konstruktionsweisen und Produktionsformen geprägt, wie man etwa bei Winsun-Projekten sehen kann.

Die Technologie der Additiven Fertigung braucht neue Ansätze, was die Konstruktionsweise von Gebäudehüllen betrifft.

Mit der vorliegenden Arbeit sollen durch die Entwicklung und Untersuchung einer additiv gefertigten und funktionsintegrierten Gebäudehülle die Potenziale dieser Fertigungsmethode in der Fassadenherstellung herausgearbeitet werden.

Der Fokus der vorliegenden Untersuchung liegt darüberhinaus

aus folgenden Gründen auf der funktionsintegrierten Gebäudehülle:

Zum einen ist von den Gebäudeteilen die Gebäudehülle schon immer die Fläche für Innovationen gewesen; historische Beispiele sind die Entwicklung der Fensterflächen im Kirchenbau von der Romanik bis zur Gotik oder in der jüngeren Fassadengeschichte: von der Gründerzeit über Pfosten-Riegel-Fassaden bis hin zur Closed-Cavity-Fassade. Die Weiterentwicklung der Architekturtechnologie ist am Beispiel der Fassade auch hinsichtlich der Funktionsintegration sehr gut ersichtlich, da in diesem Bauteil eine Vielzahl von Funktionen auf einer geringen Fläche zusammentreffen.

Zum anderen verfolgt die Dissertation mit dieser Untersuchung das ganzheitliche Ziel herauszufinden, ob durch den Einsatz von 3D gedruckten Geometrien Fassadenfunktionen ausgeführt werden können, um die heute eingesetzten Gebäudetechnologien (Steuerung und Sensorik) zu reduzieren und die Anzahl an Baumaterialien zu minimieren. Durch diese Entwicklungen kann der Bauablauf vereinfacht, Energie eingespart, Baumängel minimiert, Material recycelt und die

digitale Kette von Planung bis hin zur Ausführung geschlossen werden.

Ausgangspunkt des Dissertationsvorhabens ist die Untersuchung und Entwicklung eines Grundschemas einer 3D-gedruckten Gebäudehülle an einem Fallbeispiel mit der zentralen Fragestellung:

Inwiefern ist die sinnvolle Nutzung der Additiven Fertigung mit der Integration der verschiedenen Anforderungen (Fassadenfunktionen) in der Gebäudehülle zu vereinbaren?

Die Untersuchung ist in folgende drei aufeinander aufbauende Teile gegliedert.

Teil 1:

Studien zu 3D-druckbaren Funktionsgeometrien für die einzelnen Fassadenfunktionen

Teil 2:

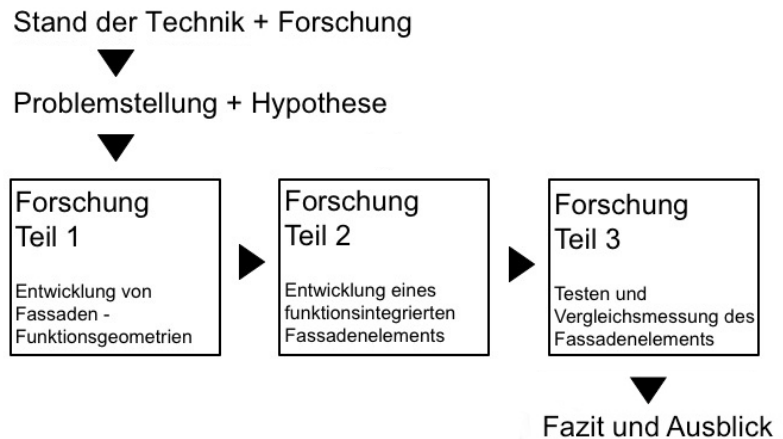
Kombination von Funktionsgeometrien zu einem funktionsintegrierten Fassadenelement

Teil 3:

Dokumentation der Herstellung eines Prototyps und dessen experimentelle Untersuchung der optischen, thermischen und statischen Eigenschaften

1.3 Struktureller Aufbau der Dissertation

In der folgenden Abbildung wird der Aufbau der vorliegenden Dissertation schematisch dargestellt.



1.4 Problemstellung / Hypothese

Problemstellung

Der Stand der Technik und der Forschung im Bereich der additiv gefertigten Fassade zeigt noch keinen Einsatz der Additiven Fertigung zur Entwicklung eines geschlossenen Materialkreislaufs zur Wiederverwertung von Fassaden und der Reduktion der technischen Fassadenkomponenten auf, um eine Überfrachtung der Fassade mit Regelungssystemen entgegenzutreten. Um diese Probleme zu lösen, wurden noch keine 3D-druckbaren Geometrien zur Funktionsintegration von Fassadenfunktionen für die additiv gefertigte Gebäudehülle entwickelt.

Hypothese

3D-gedruckte und funktionsintegrierte Gebäudehüllen machen bei gleicher Leistungsfähigkeit die technische Fassadenausrüstung überflüssig und es lässt sich ein geschlossener Materialkreislauf etablieren.
[10] (Mungenast, 2017)

[Abb. 1.3_1]
Struktureller Aufbau der Dissertation
(Mungenast, 2017)

2. Zukünftige Auswirkungen der Additiven Fertigung

2.1 Gesellschaft

Die Entwicklung wird sich von einheitlichen Massenherstellungen weg und hin zu individuellen Maßanfertigungen in allen Bereichen bei gleichem Kostenaufwand bewegen. Güter müssen zukünftig nicht zuerst produziert und dann dem Nutzer zugestellt werden, sondern können digital versendet und vor Ort einsatzbereit ausgedruckt werden. Nachbildungen aller Art (von Kunstwerken bis zu Körperteilen) können mittels 3D-Scanner und Additiver Fertigung angefertigt werden. Ebenfalls ändert sich die Vorhaltung von Ersatzteilen. Die kostenintensive Lagerung von Ersatzteilen wird in Bereichen, wie beispielsweise bei der Deutschen Bahn, reduziert und Ersatzteile werden nur ‚On Demand‘ produziert.

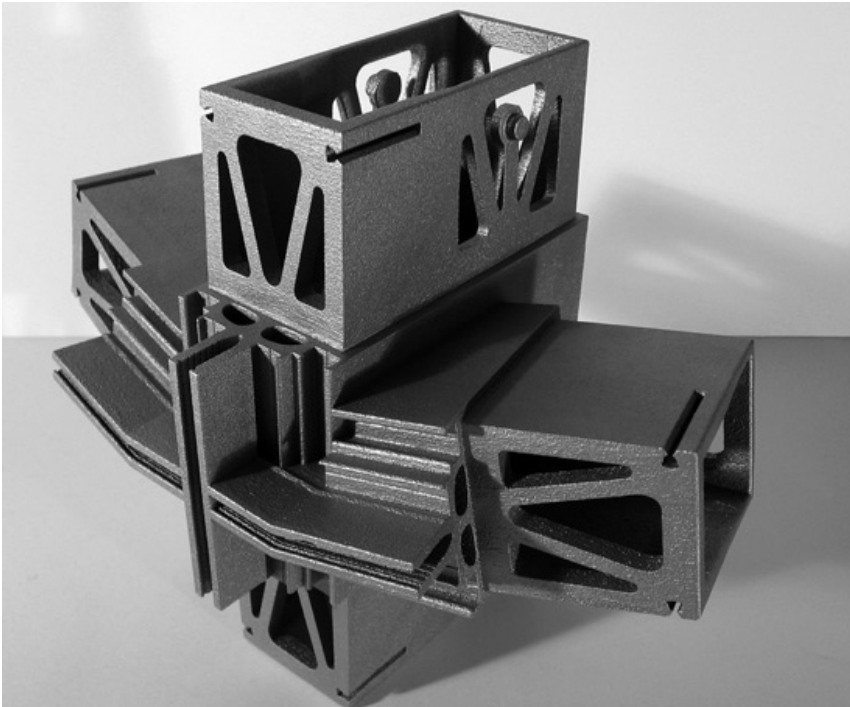
Diese Entwicklungen werden einen Einfluss auf die Gesellschaft hinsichtlich des Warenaustauschs und der individualisierten Produktpalette haben.

Gewohnte Arbeitswelten werden sich aufgrund der Automatisierung der Arbeitsschritte einer Produktionskette verändern. Zum jetzigen Zeitpunkt werden immer noch viele Arbeitsplätze in der Nachbearbeitung der additiv gefertigten Bauteile benötigt, jedoch für den Be- und Entladeprozess werden schon automatisierte Systeme entwickelt und verwendet.



[Abb. 2.1_1]
3D-gedruckte Beissschiene

2.2 Baugewerbe (Wirtschaft)



Im Baugewerbe ist im Bereich der Planung ein Umwandlungsprozess im Gange. Die Digitalisierung in der Planung, beispielsweise durch BIM, ermöglicht eine effiziente Abstimmung der beteiligten Planer. Der Einsatz von computerbasierten Optimierungsprogrammen (CAO), Softwareanwendungen zur Simulation und parametrischen Planungsprogrammen verringert den Planungsaufwand für komplexe Sonderlösungen enorm. Die additive Methode wird schon jetzt zur Umsetzung der digitalen Planung in anderen Industriebereichen wie der Zahntechnik und der Luft- und Raumfahrt erfolgreich und ökonomisch umgesetzt. Im Baugewerbe ist dies auch schon vereinzelt der Fall, beispielsweise für Einzellösungen von konstruktiven Knoten bei Pfosten-Riegel-Fassaden (Abb. oben).



Durch die weltweite Verteilung von Produktionsstätten, sogenannter Printer Farms, können zukünftig additiv gefertigte Bauteile nahe ihres Einsatzortes hergestellt werden. Durch kürzere Transportwege werden Energie- und Kosteneinsparungen erreicht.

Zukünftig wird der Einsatz der Additiven Fertigung und neuer Baumaterialien die Anzahl der Gewerke auf der Baustelle und damit den Abstimmungsaufwand reduzieren und somit Fehlerquellen verringern.

[Abb. 2.2_1]

Fassadenkontenprofil NematoxII-
2015, Holger Strauß

[Abb. 2.2_2]

3D-Drucker-Farm FIT AG

2.3 Produktion

Produktionstechnische Abläufe werden sich verkürzen und die Herstellung spezifischer Maschinen bzw. Werkzeuge für ein bestimmtes Produkt wird zurückgehen, da die Additive Fertigung die Möglichkeit zur Herstellung von mehreren Produkten auf der gleichen Maschine zulässt. Bei der Produktion von Sonderlösungen lassen sich durch den Einsatz der Additiven Fertigung die Produktionsschritte ebenfalls reduzieren, dies hat Materialeinsparungen und Zeitersparnis zur Folge. Ein Beispiel hierfür ist die Herstellung von Betonbauteilen.

Die Prozesskette bei der Herstellung von Betonkonstruktionen lässt sich schon heute verkürzen, da der Einsatz von Schalungen und deren Herstellung entfällt. Dieser Aspekt der Reduktion der Produktionsschritte lässt sich auch auf die Herstellung von anderen Bauteilen anwenden, wie beispielsweise bei der Herstellung von Freiformbetonstützen.



[Abb. 2.3_1]

Schalungsfreie Herstellung von
Freiformbetonstützen
Prototypes en béton, 2017,
EZCT Achitecture & Design Research

Produktionsszenarien: Vor-Ort-Druck vs. Vorfertigung

Es gibt zwei Szenarien, wie Gebäude zukünftig additiv gefertigt werden: der Vor-Ort-Druck und die Vorfertigung. Die Wirtschaftlichkeit der jeweiligen Varianten hängt wie bei allen vorgefertigten Bauteilen maßgeblich von der Entfernung der Produktionsstelle von der Baustelle ab.

Hier sind die Vor- und Nachteile der beiden Szenarien dargestellt.

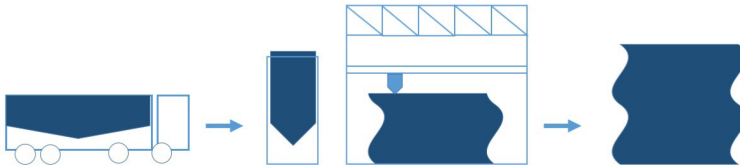
Szenario 1: Vor-Ort-Druck

Vorteile:

- keine Größenbeschränkung der Bauteile
- geringer Transportaufwand (nur Rohmaterial und Drucker)

Nachteile:

- Aufbau eines geschützten Bau- raums
- schwierigere Qualitätssicherung



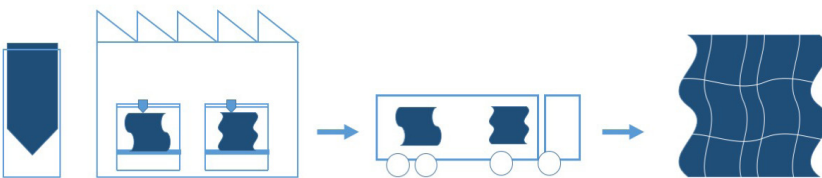
Szenario 2: Vorfertigung

Vorteile:

- Produktion in geschützter Um- gebung
- hohe Qualitätssicherung

Nachteile:

- Größenbeschränkung der Bau- teile wegen Transports
- höherer Transportaufwand



[Abb. 2.3_2]

Vor-Ort-Druck

Ablauf der Fertigungsschritte

[Abb. 2.3_3]

Vorfertigung

Ablauf der Fertigungsschritte

2.4 Ästhetik

Das Potenzial, dass sich zukünftig ein neuer Stil entwickeln wird, der durch die Möglichkeiten des computerbasierten Entwerfens und der Additiven Fertigung geprägt ist, liegt auf der Hand. In der Architekturgeschichte hatten neue Fertigungsmethoden immer Auswirkungen auf die architektonische Gestalt.

Man kann jetzt schon Parallelen zu der Zeit der Moderne ziehen. Der Einfluss von neuen Verfahren, wie damals die Möglichkeit große Verglasungen herzustellen, die Bewehrung im Stahlbeton genauer zu berechnen und die Optimierung der Herstellungsprozesse von Stahlprofilen, waren unter anderem maßgebliche Faktoren für eine neue Formensprache in der Architektur.

Die heutigen Entwicklungen mögen genauso verstörend wie begeisternd auf den Betrachter wirken wie damals.



[Abb. 2.4_0]
Glass skyscraper
1922, Mies van der Rohe



Die Auswirkungen auf die Ästhetik sind schon jetzt in allen Designbereichen zu sehen. Eine neue Formensprache, die es zuvor nur in digitalen Modellen gab, wird jetzt in Produkten wie Lampen, Bekleidung und Möbeln umgesetzt.

Diese Ästhetik hat oftmals einen starken Bezug zu Vorbildern aus der Natur (Lampe „Bloom“, Patrick Jouin) und zur Topologieoptimierung (Abb. rechts oben), aber es entwickeln sich immer eigenständigere Formensprachen wie zum Beispiel die Totenmasken von Neri Oxman (Abb. rechts unten). Diese Entwicklung ist teilweise in Architekturentwürfen zu erkennen. Die Umsetzung gebauter Beispiele ist aufgrund der sehr eingeschränkten Produktionsmöglichkeiten noch nicht über einzelne prototypische Beispiele hinaus gediehen.



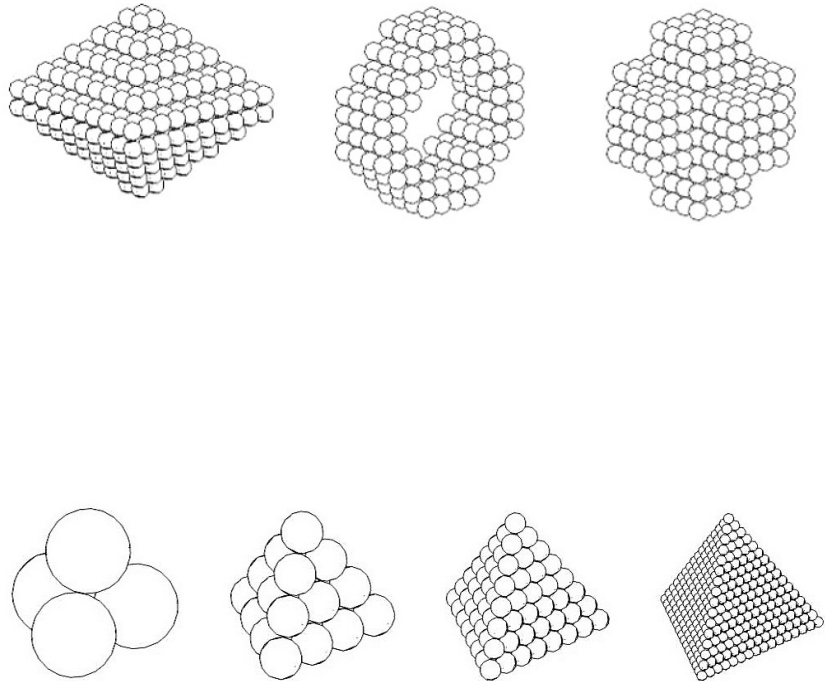
[Abb. 2.4_1]
3D-gedruckte Tischbeine
Transitional Fields
2014, Studio ALEKSA

[Abb. 2.4_2]
3D-gedruckte Totenmaske
Lazarus Mask
2014, Neri Oxman und MIT Mediate Lab

3. Additive Fertigung in der Architektur / Stand der Technik

3.1 Grundprinzip

„Das Grundprinzip der Additiven Fertigung ist das Aneinanderfügen von Einzelteilen in einem automatisierten Arbeitsschritt auf Grundlage eines am Computer generierten dreidimensionalen Modells. Je kleiner die Größe des Einzelteils oder die Schichthöhe des Materials ist, desto höher wird die Auflösung bzw. Genauigkeit des gefertigten Bauteils. Zur Herstellung von unterschiedlichen Bauteilen sind keine speziellen Werkzeuge wie beispielsweise Gussformen oder Fräsen notwendig, was den Herstellungsaufwand von Einzelstücken und Kleinserien viel wirtschaftlicher macht. Im Bauwesen werden viele Einzelstücke oder Kleinserien mit hoher Komplexität verbaut, da sich die Bauprojekte selten gänzlich gleichen – folglich ist die Additive Fertigung gegenüber herkömmlichen Verfahren im Vorteil. [2] (Henke 2016 : 12)“



[Abb. 3.1_1]
Prinzip der Additiven Fertigung
(Henke 2016 : 12)

[Abb. 3.1_2]
Prinzip der Auflösung
(Henke 2016 : 12)

3.2 Druckverfahren im Bauwesen und deren Materialien



In der Additiven Fertigung gibt es viele unterschiedliche Verfahren; hier wird auf die beiden wichtigsten Verfahren im Bauwesen und deren Untergruppen eingegangen.

A) Bindeverfahren

(z. B. Lasersintern und Inkjet-Powder Printing)

„Bei Bindeverfahren wird zunächst eine komplette Schicht aus pulverförmigem, flüssigem oder Flächenmaterial ausgelegt, die das gesamte Bauvolumen ausfüllt. Dann zeichnet oder bindet der Druckkopf die Konturen des Objekts. Da jedes Mal eine gesamte Schicht des Materials vorhanden ist, wird das gedruckte Objekt die ganze Zeit durch das nicht verwendete Material abgestützt. Dadurch benötigt man keine zusätzliche Stützkonstruktion – außer bei der Stereolithografie. [3] (Dinge Drucken 2014 : 10)“

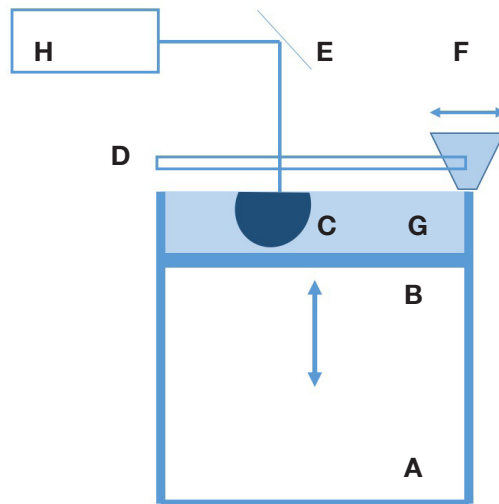
[Abb. 3.2_0]
Beispiel Bindeverfahren
Holzfaserpulver und Binder
2015, Materialize

Selektives Lasersintern (SLS)

„Beim selektiven Lasersintern schmilzt und bindet ein starker Laser ein pulverförmiges Material. Mit einer Walze wird auf einer Plattform eine dünne Schicht eines pulverförmigen Materials aufgebracht. Dann zeichnet der Laser die einzelnen Abschnitte des Objekts in das Pulver und schmilzt es zu einem festen Material. Nach jedem Laserdurchgang wird die Plattformform ein wenig abgesenkt, und aus einem seitlich angebrachten Behälter wird auf der Oberseite des Objekts eine neue Pulverschicht aufgetragen. [3] (Dinge Drucken 2014 : 11)“

Druckmaterialien in Pulverform sind: Kunststoffe (z. B. Nylon), Metalle, Keramik, Glas oder Sand.

Einsatzbereich im Bauwesen: Sonderteile im Metallbau.

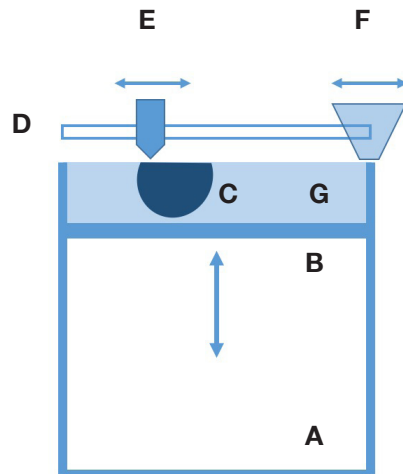


Legende:

- A** Bauraum
- B** Absenkbare Plattform
- C** Gedrucktes Objekt
- D** Druckkopfführung
- E** Umlenkspiegel
- F** Pulverförderung
- G** Pulverbett
- H** Laser

[Abb. 3.2_1]
SLS-Verfahren

Inkjet-Powder Printing (3DP)



„Das Inkjet-Powder Printing verwendet im Ansatz ein ähnliches Pulverbett wie das selektive Lasersintern. Aber anstatt das Pulver mit einem Laser zu schmelzen, wird auf das Material ein Bindemittel gesprüht, um die Partikel miteinander zu verkleben. Das Verfahren verwendet Inkjet-Druckköpfe, die denen ähneln, die man vom Tintenstrahldrucker her kennt, und der Prozess funktioniert ähnlich wie das Drucken auf Papier. Ein solcher Druckkopf ermöglicht es auch, komplett in verschiedenen Farben zu drucken. Mit Inkjet-Powder Printing hergestellte Teile sind empfindlicher als Teile, die man mit Prozessen anfertigt, die das Material schmelzen. In der Nachbearbeitung werden die fragilen Objekte mit Kunstharz überzogen, um sie robuster zu machen und sattere Farben zu erreichen. [3] (Dinge Drucken 2014 : 12)“

Druckmaterialien in Pulverform sind: Kunststoffe, Gips, Sand, Keramik und Glas.

Einsatzbereich im Bauwesen: Sonderbauteile im Innenbereich, z. B. Akustikpaneele, Prototypenherstellung, Gussformen.

Legende:

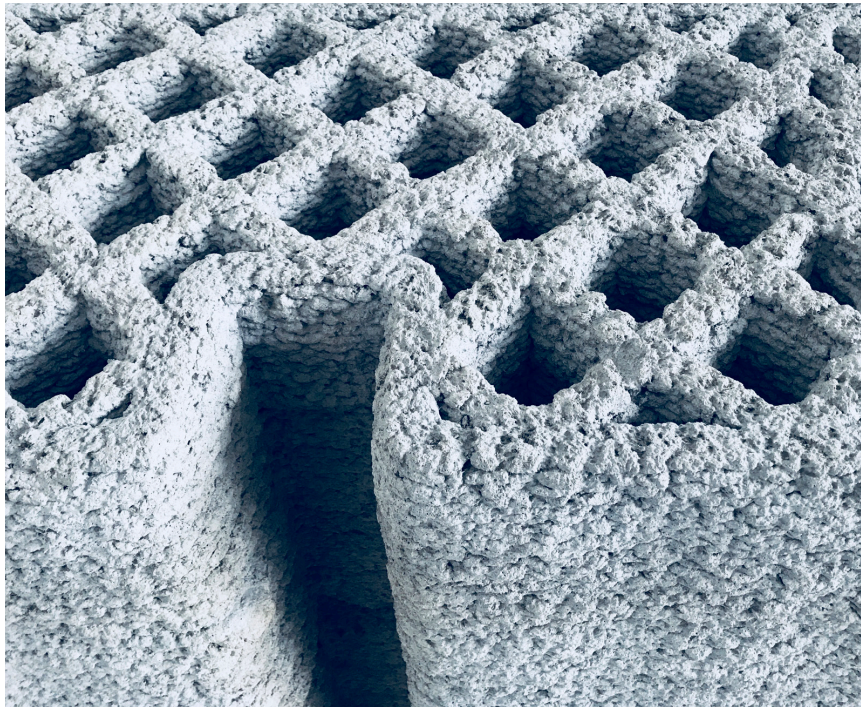
- A** Bauraum
- B** Absenkbare Plattform
- C** Gedrucktes Objekt
- D** Druckkopfführung
- E** Druckkopf
- F** Pulverförderung
- G** Pulverbett

[Abb. 3.2_2]
3DP-Verfahren

B) Abscheidungsprozesse

(Schmelzschichten, WAAM und Pastenextrusion)

„Bei Verfahren, die auf Abscheidungsprozessen basieren, wird über eine Düse im Druckkopf ein verflüssigtes Material abgegeben und Schicht für Schicht als Linienmuster auf einer sich absenkenden Plattform abgelegt. Da das Modell nicht wie bei der Familie der Bindeverfahren in das Material eingebettet ist, sondern frei auf der Bauplattform steht, müssen für überhängende Geometrien zusätzliche Stützstrukturen erzeugt werden. [3] (Dinge Drucken 2014 : 13)“



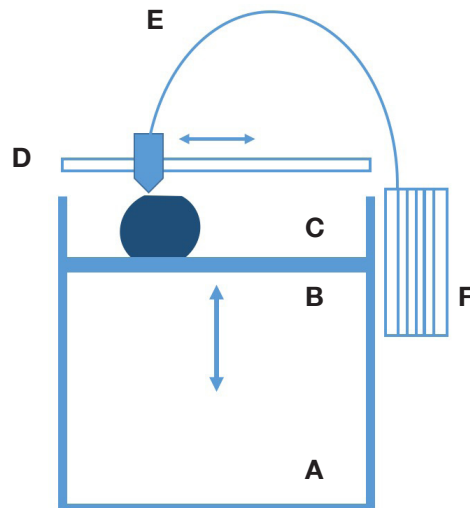
[Abb. 3.2_3]

Abscheidungsprozess

Pastenextrusion von Holzleichtbeton

2015, TUM Henke/Thalke

Schmelzsichten (FDM)



„Die Schmelzsichtung ist ein 3-D-Druckverfahren, bei dem ein thermoplastisches Filament in eine Schmelzkammer abgegeben und anschließend durch eine Düse extrudiert wird. Das Objekt wird durch geschmolzene Fäden aufgebaut, die sich durch die Hitze mit der vorherigen Schicht verbinden und sofort nach Verlassen der Düse aushärten. Dieser Prozess funktioniert so ähnlich wie eine Heißklebepistole. Aufgrund der Verwendung von Standardthermoplasten ist FDM gut für die Herstellung von Funktionsteilen mit großer mechanischer Festigkeit geeignet, auch wenn man der Oberfläche die Schichtung mehr ansieht, als dies bei anderen Techniken der Fall ist. [3] (Dinge Drucken 2014 : 13-14)“

Druckmaterialien als Filament sind Kunststoffe (z. B. ABS, Nylon, PLA, PETG, PC) und Füllstoffe (z. B. Holz, Metall, Carbon, Glas und Keramik).

Einsatzbereich im Bauwesen: Sonderteile im Schalungsbau, Prototypenherstellung.

Legende:

- A** Bauraum
- B** Absenkbare Plattform
- C** Gedrucktes Objekt
- D** Druckkopfführung
- E** Druckkopf
- F** Filamentzufuhr

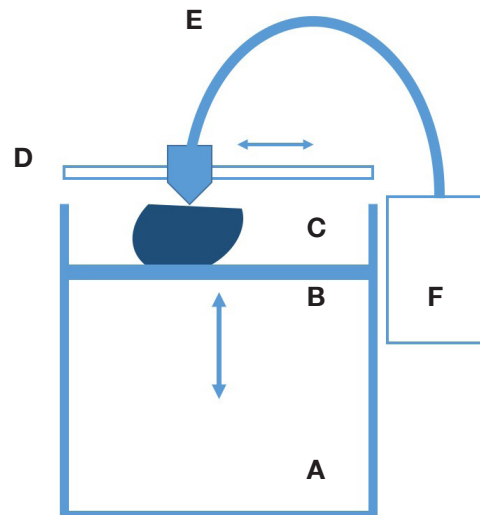
[Abb. 3.2_4]
FDM-Verfahren

Pastenextrusion

„Die Pastenextrusion ist ein mit der Schmelzschichtung verwandter Prozess, bei dem das Material in einem langen Faden, mit dem das Objekt gezeichnet wird, durch eine Düse extrudiert wird. Bei der Pastenextrusion wird jedoch nicht ein Kunststofffaden geschmolzen, sondern, wie der Name schon sagt, ein kaltes oder wenig erwärmtes Material mit pastenartiger Konsistenz abgegeben. Anschließend wird das Material gehärtet oder an der Luft getrocknet. Die Pastenextrusion kommt vor allem bei experimentellen Druckern zur Anwendung, damit mit einer breiten Palette von Materialien experimentiert werden kann. [3] (Dinge Drucken 2014 : 14)“

Druckmaterialien in Pastenform sind Beton und Zement, Ton, Lebensmittel wie z.B. Schokolade und viele andere. Füllstoffe sind z. B. Holzfasern, Blähglaskugeln, Carbon- und Glasfasern.

Einsatzbereich im Bauwesen: Wand- und Deckenelemente, Sonderbauteile.



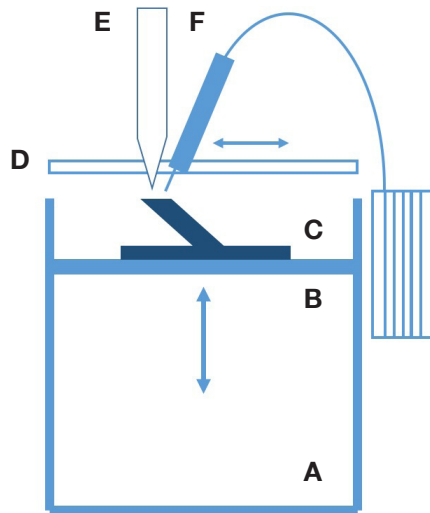
Legende:

- A** Bauraum
- B** Absenkbare Plattform
- C** Gedrucktes Objekt
- D** Druckkopfführung
- E** Druckkopf
- F** Materialzufuhr

[Abb. 3.2_5]

Pastenextrusionsverfahren

Wire-Arc Additive Manufacturing (WAAM)



Das schichtweise Aufschweißen von Metall im Lichtbogen-schweißverfahren, WAAM genannt, kann man als erweiterte FDM-Entwicklung sehen.

Schweißnähte werden schichtweise aufgebracht und verbinden sich zu einem zugfesten Bauteil. Aufgrund der groben Oberflächenstruktur findet teilweise eine Endbearbeitung mittels einer Fräse statt.

Druckmaterialien sind Edelstahl, Messing und Aluminium. Einsatzbereich im Bauwesen: Brückenkonstruktionen, konstruktive Sonderlösungen.

Legende:

- A** Bauraum
- B** Absenkbare Plattform
- C** Gedrucktes Objekt
- D** Druckkopfführung
- E** Stabelektrode
- F** Drahtzufuhr

[Abb. 3.2_6]
WAAM-Verfahren

3.3 Prozesstechnik der Additiven Fertigung in der Architektur

Prozesstechnik

Der aktuelle Stand bei der Prozesstechnik und Materialtechnik im Bereich der Additiven Fertigung in der Architektur wird hier anhand einiger Beispiele gezeigt.

Prozessseitig liegt die Herausforderung in der Herstellung von 3-D-Druckern mit großen Bauräumen und einer Erhöhung der Druckgeschwindigkeit. Firmen wie WinSun (Abb. oben) und WASP haben großformatige Drucker für die Betonextrusion entwickelt. Der Nachteil bei beiden Maschinen ist die grobe Auflösung.

Um bei der Metallverarbeitung größere Bauräume zu erreichen werden an herkömmliche Roboterportale (KUKA, ABB) Schweißgeräte installiert. Teilweise werden diese Portale verfahrbar eingesetzt, wie beispielsweise von MX3D (Abb. unten).

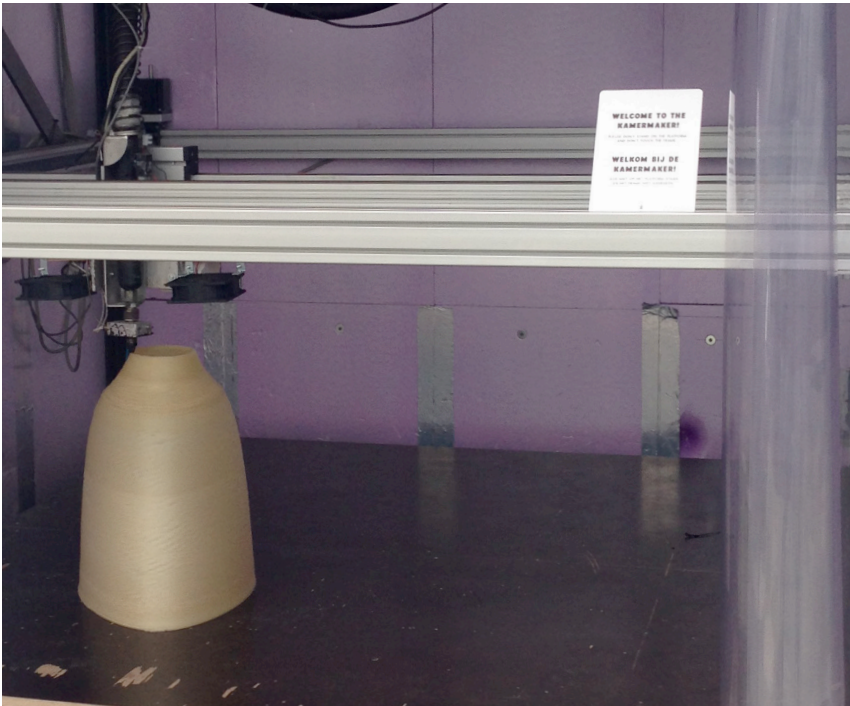


[Abb.3.3_1]

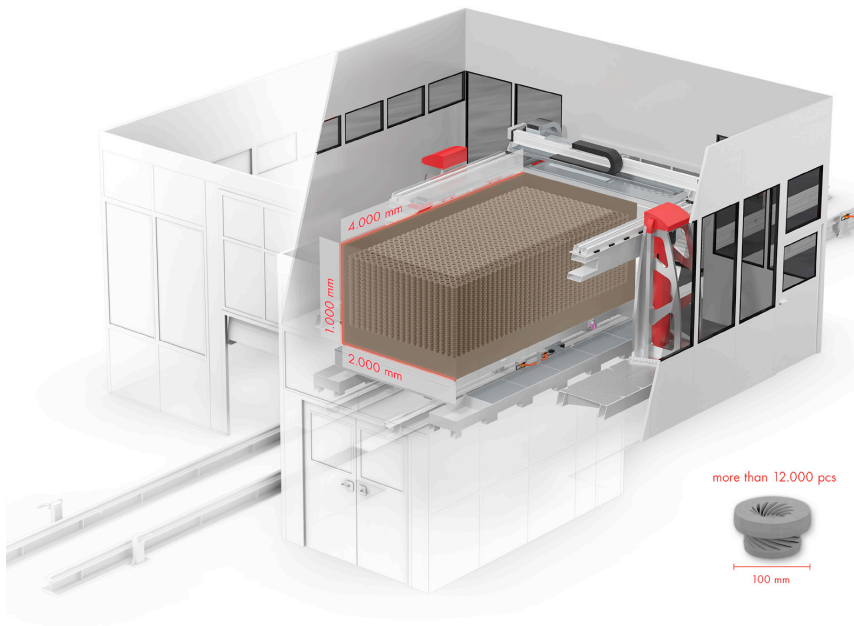
Großportal zur Produktion der 3-D-gedruckten Fertigteile mittels Beton-Pastenextrusion, 2016, Winsun

[Abb. 3.3_2]

Roboterportal für Metall 3-D-Druck, Firma MX3D



Im Kunststoffbereich existiert der FDM-Großformatdrucker „KamerMaker“ (Abb. oben), entwickelt für eigene Architekturanwendungen von DUS Architects. Weitere Großformatdrucker wie beispielsweise Thermwood LSAM, CI BAAM 100 Alpha 3D Printer und CEAD 3D Printer, können verschiedene Kunststoffarten – teilweise auch mit integrierten Carbon- oder Glasfasern – verarbeiten, wie zum Beispiel ABS, PETG und PC. Diese Drucker werden bis jetzt selten für Architekturanwendungen genutzt.



Eine andere Alternative bietet das Powder-Inkjet-Verfahren. Vorreiter in diesem großformatigen Bereich sind die Hersteller Dinitec und Voxeljet. Bei Dinitec werden Marmorsand und ein Bindemittel verwendet. Nachteilig wirkt sich aus, dass die Druckauflösung und die Druckgeschwindigkeit sehr gering sind. Die Firma Voxeljet kann mit dem großformatigen Drucker VX4000 eine hohe Genauigkeit von 600 dpi und ein Volumen von 8 qbm erreichen. Dies ist weltweit der größte industrielle 3D-Drucker, mit dem dieses Verfahren angewendet wird (Abb. unten).

[Abb. 3.3_3]
Großformat FDM-Drucker ‚KamerMaker‘,
DUS Architects

[Abb. 3.3_4]
Großformat Powder-Inkjet-Drucker
VX4000 Firma Voxeljet

4. Additive Fertigung in der Architektur / Stand der Forschung

4.1 Bauwesen

Das Bauen war schon immer von Einzelanfertigungen geprägt, häufig mit hoher geometrischer Komplexität. Für diese Anwendung sind additive Fertigungsverfahren perfekt geeignet und erfüllen die Anforderungen dieser Branche. Ein weiterer Aspekt ist bei Additiven Herstellungsverfahren aufzuführen: Sie ermöglichen die Optimierung von Bauteilen in Bezug auf strukturelle sowie bauphysikalische Eigenschaften. Außerdem ermöglicht die Additive Fertigung die Integration zusätzlicher Funktionen, wie zum Beispiel Kanäle und Einlässe. Zusammengenommen verspricht die Additive Fertigung enorme Vorteile für das Baugewerbe aus ökonomischer, ökologischer sowie funktionaler Sicht. Die Umwandlung etablierter additiver Techniken auf die Bauwirtschaft ist mit großen Herausforderun-

gen verbunden.

Im Gegensatz zu z.B. Luft- und Raumfahrt oder Medizintechnik steht die Additive Fertigung im Bauwesen vor mindestens zwei Herausforderungen:

Erstens, der große Maßstab der spezifischen Strukturen in Architektur und im Bauingenieurwesen.

Zweitens, die hohen und vielfältigen Anforderungen (z. B. Witterschutz, Tragfähigkeit, Haltbarkeit, Brandverhalten) der zu verwendenden Baustoffe.

Letztendlich besteht die Herausforderung darin, eine Fertigung in großem Maßstab zu entwickeln mit Materialien, die für Anwendungen gut geeignet sind.

Der aktuelle Forschungsstand des Themas „Additive Fertigung im Bauwesen“ entwickelt sich in den letzten Jahren immer schneller. Weltweit hat sich die Anzahl der Forschungseinrichtungen und Hersteller vervielfacht.

Die Abbildungen zeigen die weltweite Entwicklung ab 2000 bis 2017 im Bereich der Forschung und einzelner Projekte (Abb. 4.1_1).

Erste Forschungsprojekte und Anwendungen in der Additiven Fertigung im Bauwesen wurden von J. Pegna und von B. Khoshnevis veröffentlicht.

1995 verwendete J. Pegna das Pulverbett-Verfahren mit einer Sand-Zement-Mischung und nutzte Wasser um den Binder zu aktivieren. Dieses Verfahren funktionierte um kleine Modelle herzustellen.



[Abb. 4.1_1]

2000 Forschungsaktivitäten im Bereich der Additiven Fertigung im Bauwesen (Henke, 2016)

1999 entwickelte B. Khoshnevis den ‚Contour Crafting‘ Prozess, der über Extrusion Schichten von frischem Beton ausbringt und durch ein Glättungswerkzeug eine glatte Oberfläche generiert. Zwischen 2000 und 2010 sind folgende Forschungsprojekte entstanden (Abb.4.1_2):

2005 initiierten an der ETH Zürich F. Gramazio und M. Kohler einen Lehrstuhl für Architektur und Digitale Fabrikation mit Schwerpunkt auf den Einsatz von Robotern im Bauwesen. In Zusammenarbeit mit zahlreichen Studierenden wurde eine große Anzahl von Projekten realisiert, die die Möglichkeiten der digitalen Herstellung hinsichtlich der Konstruktion und des gestalterischen Ausdrucks untersuchten.

2007 konstruierte der Bauingenieur E. Dini in Pisa einen 3D-Drucker ‚D-Shape‘ mit einer druckbaren Fläche von 4 x 4 x 2 m. Das Pulverbett-Verfahren kommt hier zum Einsatz mit Marmorsand als Pulver und einer Salzlösung als Binder. Der große Maßstab wurde hier erstmalig erreicht und in der Folge ein komplettes Haus ‚Una casa‘ 2010 gedruckt.

2009 entwickelte M. Malé-Alemany zahlreiche Projekte im Extrusionsverfahren für Lehm und Beton am Institute for Advanced Architecture Catalonia IAAC Barcelona. Stützen wurden aus diesen Verfahren entwickelt.

2009 entwickelten X. De Kestelier und R. Buswell ‚Concrete Printing‘ an der Loughborough University, Department of Civil and

Building Engineering. Hier handelt es sich um ein Extrusionsverfahren für Beton. Der Schwerpunkt liegt auf dem Erreichen von möglichst großer geometrischer Freiheit und hohen Auflösungen.

Ab 2010 stieg die Anzahl der Forschungsprojekte stark an. In 2017 sind es mehr als 60 Forschungsprojekte im Bereich des Bauwesens (Abb. 4.1_3). Verschiedene Prozesse und Materialien werden untersucht wobei sich der Hauptfokus auf Beton im Extrusions- und Pulverbettverfahren (selektives Bindeverfahren) konzentriert.

Eine Auswahl der wichtigsten Forschungsprojekte:

Extrusionsverfahren
3D-Konkreter Hausdrucker von A. Rudenko, CONPrint3D an der



[Abb. 4.1_2]
2010 Forschungsaktivitäten im Bereich der Additiven Fertigung im Bauwesen (Henke, 2016)

TU Dresden, 3D-Betondruck an der TU Eindhoven
 Spritzbeton: SC3DP an der Universität Braunschweig.

Selektives Bindeverfahren
 Digitale Groteske von M. Hansmeyer und B. Dillenburger, 3D-Printing zementgebundener Formteile von A. Fromm, voxeljet AG in Zusammenarbeit mit diesen und anderen Forschern, K. Henke und D. Talke, TU München und 3D-Druckplatte an der ETH Zürich.

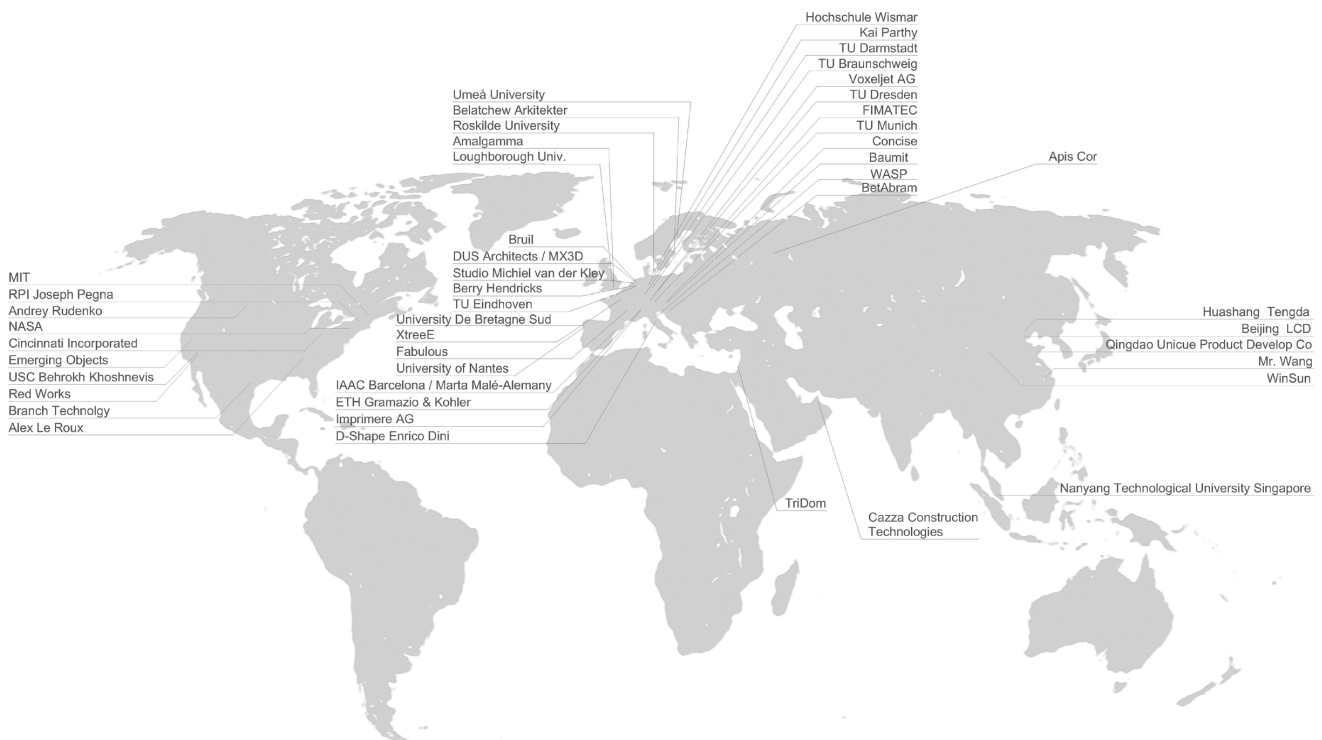
Die Integration von Bewehrungen stellt einen weiteren Forschungsschwerpunkt da. Folgende Projekte untersuchen diese Problemstellung: Mesh Mould von N. Hack an der ETH Zürich,

D. de Witte am Institute of Structural Mechanics and Design der TU Darmstadt, 3D Printing Reinforced Concrete der University of Naples Federico II und University of Pavia, ebenfalls das wissenschaftliche DFG-Netzwerk 'Adaptive Armierung geometrisch komplexer zementgebundener Formkörper'.

Erste Beispiele von Additiv gefertigten Gebäuden und Brücken aus Beton wurden in China, Russland, Holland und Italien umgesetzt. '3D Printing Architecture' von WinSun nutzen vorgefertigte Elemente, um bis zu fünf stöckige Häuser zu bauen. Vor Ort produzierte Beispiele liefern das Projekt Villa von Huashang Luhai, ApisCor – We print buildings aus

Russland, Bicycle Bridge Gemert von TU Eindhoven und '3D Printed Concrete House, Milan' von Arup.

Der Einsatz von neuen Baumaterialien wie beispielsweise Kunststoff, Salz, organische Materialien und Glas, wird in verschiedenen Forschungseinrichtungen seit 2012 von Emerging Objects by R. Rael, University of California Berkeley und V. San Fratello, San Jose State University und seit 2011 von der Mediated Matter Group unter der Leitung von N. Oxman am MIT Boston untersucht.



[Abb. 4.1_3]

2017 Forschungsaktivitäten im Bereich der Additiven Fertigung im Bauwesen (Aderer 2017, Henke 2017)

Im Rahmen dieser Materialuntersuchungen für eine Anwendung im Bauwesen in Kombination mit der Additiven Fertigung lassen sich einige Projekt herausstellen mit dem Schwerpunkt Lehm ‚Building Bytes‘ von B. Peters 2012, Holz ‚Woodconcrete‘ K. Henke und D. Talke TU München, Glas von der Mediate Matter Group am MIT Boston, Edelstahl ‚Steelbridge Amsterdam‘ MX3D und Kunststoff ‚3D Print Canal House, Amsterdam‘ DUS Architects.

Wie ist die Gewichtung der verschiedenen Materialien in Kombination mit den unterschiedlichen Prozessen? Die meisten der bisherigen Forschungs- und Entwicklungsprojekte im Bauwesen setzen dabei auf mineralische

Werkstoffe, insbesondere auf Beton. [2] (Henke 2017 : 39)

Hingegen ist der Einsatz von transparenten Werkstoffen wie Glas und Kunststoff im Baubereich in Forschungsprojekten noch sehr gering.

Für den Einsatz der Additiven Fertigung für die Gebäudehülle ist die Wahl eines transparenten oder zumindest transluzenten Materials notwendig, um eine Tageslichtnutzung zu gewährleisten.

Die Matrix (Abb. 4.1_4) zeigt die Häufigkeit des Einsatzes der verschiedenen Materialien in Kombination mit den unterschiedlichen Prozessen in den Forschungsprojekten.

	Holz	Lehm, Keramik	Naturstein, Kunststeine	Metall	Glas	Beton	Kunststoffe	neue Materialien
Stereolithography (SLA)								
Selective Laser Sintering/Melting (SLS/SLM)				●				
Selective Binding (3DP)	●					●		●
Fused Deposition Modelling (FDM)				●	●		●	●
Fluid Deposition	●	●				●		●
Solid Deposition	●		●				●	

[Abb. 4.1_4]
 Matrix Anzahl der Forschungsaktivitäten
 Material / AM-Prozes
 (Henke 2018)

4.1.1 Typologien der Forschungsprojekte

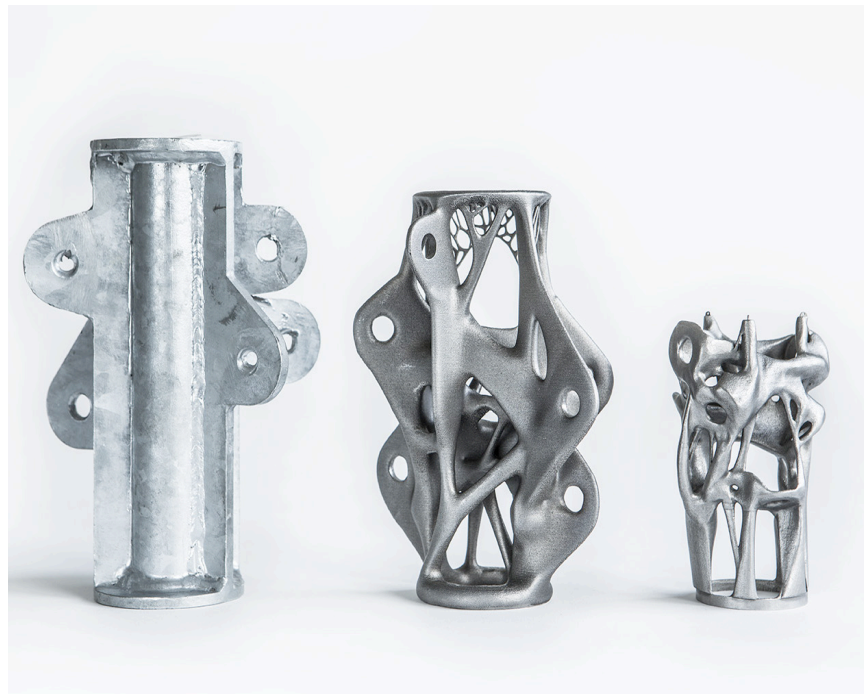
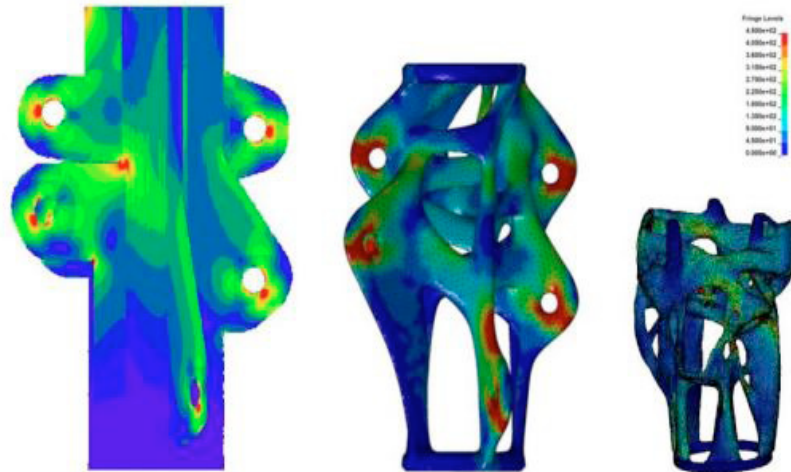
Die veröffentlichten Projekte sind zum Großteil typologisch in drei Bereiche zu unterteilen:

- Topologieoptimierung
- individuelle Formfindung
- Ökonomieoptimierung

Diese drei Themenbereiche werden im Folgenden anhand von Beispielen erläutert.

Topologieoptimierung

Topologieoptimierung ist der Begriff für die Anpassung der Form an den Kräfteverlauf, der in einem Bauteil herrscht. Diese Optimierungform wird in der Luft- und Raumfahrtindustrie eingesetzt um eine Kostenreduzierung zu erreichen und im Betrieb Treibstoff zu sparen. Viele Innovationen aus diesen Schlüsselindustrien haben den Weg in die Bauindustrie gefunden, z.B. Aluminium, Kunststoffe und Composite-Materialien. Dies gilt auch für Fertigungsmethoden, beispielsweise Spritzguss- und Strangpressverfahren. Durch die Weiterentwicklung von Simulationssoftware im Bereich der Kraftflüsse können optimal angepasste Geometrien entwickelt werden, die sehr komplex in der Fertigung sind und nur additiv gefertigt werden können.



[Abb. 4.1.1_1]

Kräfteverlauf

Links: Standard-Knoten

Mitte/Rechts: Topologieoptimierter Knoten,
2015, Arup, Salome Galjaard

[Abb. 4.1.1_2]

Topologieoptimierung eines konstruktiven Knotenpunktes

Links: Standard aus geschweißten Flachstählen

Mitte/Rechts: Additiv gefertigt

2015, Arup, Salome Galjaard



Hieraus resultierend sind hohe Materialeinsparungen möglich. Dies hat für die Bauindustrie hinsichtlich des nachhaltigen Einsatzes von Ressourcen eine enorme Bedeutung. Als Beispiel ist das Projekt „3d printed steel node“ von Salomé Galjaard vom englischen Ingenieurbüro Arup zu nennen.

Ein herkömmlicher Konstruktionsknotenpunkt wurde durch den Einsatz eines Topologieoptimierungsprogramms neu entwickelt und additiv gefertigt, dadurch wurde eine Materialeinsparung von 75 % erreicht [4] (Galjaard 2015 : 9).

Individuelle Form



Einzigartigkeit ist eines der Hauptthemen in der Architektur. Die meisten Gebäude sind Unikate und müssen sich an verschiedene Außeneinflüsse und unterschiedliche interne Nutzung anpassen. Die architektonische Gestalt spielt in der Akzeptanz wie in der Außen- und Innenwahrnehmung eine große Rolle, man denke beispielsweise an die Ornamentik einer Barockkirche. Die Additive Fertigung birgt hier auch enormes Entwicklungspotenzial, das etwa durch die Projekte von Hansmeyer/Dillenburger – z.B. „digital grotesque“ – gezeigt wird.

[Abb. 4.1.1_3]

Additive gefertigter Knoten mit 75 %
Gewichtsreduzierung
2015, Arup, Salome Galjaard

[Abb. 4.1.1_4]

Digital grotesque, Ausstellung
,Imprimer le monde', Centre Pompidou
2016, Dillenburger / Hansmeyer

Ökonomische Optimierung

ist ein weiterer Aspekt der Nutzung von Additiver Fertigung im Baubereich. Das weltweite Bevölkerungswachstum verlangt nach günstigem Wohnraum; vor allem im asiatischen Raum werden neue Wege gesucht. Die chinesische Firma WinSun hat einen Großdrucker für Beton entwickelt, für den recycelter Bauschutt als Zuschlag verwendet wird, um Rohbauteile wie Wände und Dächer zu drucken. Nach Angaben von WinSun können Häuser damit erheblich billiger produziert werden.



[Abb. 4.1.1_6]

3-D-gedruckte Fertigteile für Betonwände und Dächer der chinesischen Firma Winsun
2016, Winsun

[Abb. 4.1.1_7]

Testgebäude aus 3-D-gedruckten Fertigteilen der Firma Winsun
2016, Winsun



Projektaufistung

Es folgt eine Auflistung der wichtigsten additiv gefertigten Architekturprojekte der letzten 6 Jahre:

- „3d print canal house“, seit 2012, DUS Architects, NL
- “Habitable Lunar Settlement“, seit 2013, Forster+Partner and ESA, D-Shape
- „Saltygloo“, 2013, Rael San Fratello Architects, CA
- „Echoviren“, 2013, Ausstellungspavillon, Studio Smith Allen
- „3d printed concrete Mansion“, 2015, WinSun, China
- “5 story building“, 2015, WinSun, China
- „digital grotesque“, 2015, Hansmeyer / Dillenburger, Zürich
- „3d printed steel-node“, 2015, Salomé Galjaard, Arup
- „Office of the Future“, 2016, Dubai Future Foundation, Dubai
- „Urban Cabin“, 2016, DUS Architects, Amsterdam NL
- Fußgängerbrücke, 2017, IAAC und D-Shape, Barcelona
- Rundes Haus, 2017, Apis Cor, Russland
- „Steel bridge“, 2018, MX3D, Amsterdam NL
- „3D Printed House“, 2018, Arup, Milan
- „Dfab house“, 2018, NEST, Zürich



[Abb. 4.1.1_8]
,5 story building‘ in China,
2015, WinSun

[Abb. 4.1.1_9]
,3D-Printed House‘ in Milan,
2018, Arup

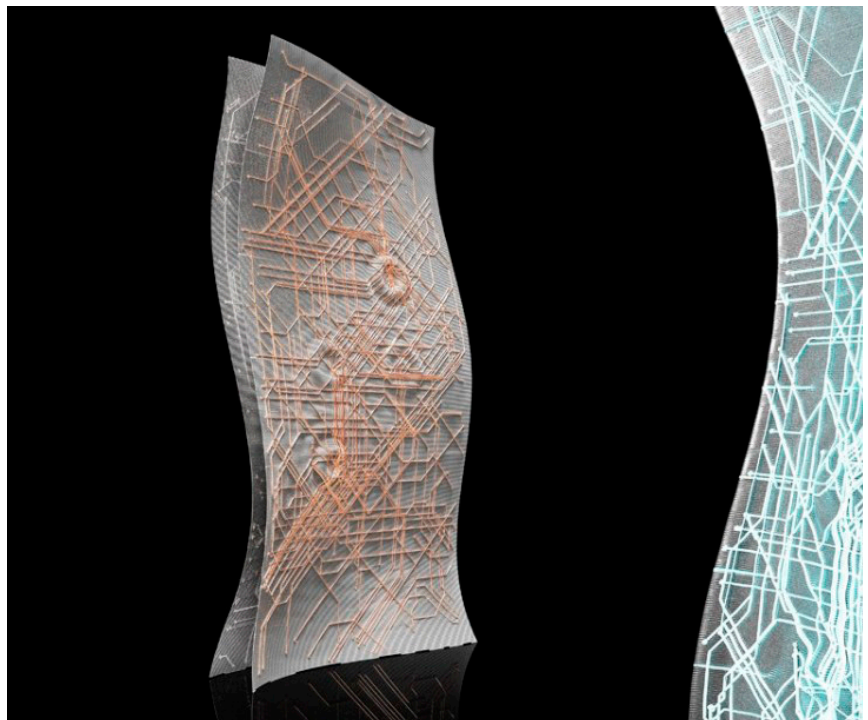
4.2 Fassadenanwendungen

Zu Beginn meiner Dissertation 2014 gab es für den Fassadenbereich außer in der Entwicklung von gedruckten Formsteinen (B. Peters Building Bytes) und Fassadenknoten aus Metall (H. Strauss TU Delft) keine Forschungsprojekte in der Additiven Fertigung. Fassadenfunktionen wurden in den Forschungsprojekten der gebauten Beispiele von WinSun (Abb. 4.2_0) und DUS Architects durch Standardlösungen, wie dem Einbau von Fenstern, in die additiv gefertigte Wandstruktur eingesetzt, also nicht in den Herstellungsprozess integriert. Während meiner Dissertation wurden folgende Projekte entwickelt:



Electrical Skin

„Electrical Skin“ ist ein Forschungsprojekt von H. Kwon, Digital Building Technologies (DBT) am Institute of Technology in Architecture (ITA) der ETH Zürich 2017. Bei diesem Projekt handelt es sich um eine robotergesteuerte 3D-gedruckte Freiform-Fassadenplatte mit integrierter Beleuchtung. Hier wird nicht nur die komplexe Form, sondern auch die elektrische Infrastruktur in einem einzigen Prozess hergestellt. Für die Herstellung wird das Extrusionsverfahren (Robotic FDM) und Kunststoff verwendet. Dieses Projekt wurde abgeschlossen, genauere Informationen, ob die Umsetzung über das Konzeptstadium hinaus funktioniert hat und weiter untersucht wird, sind nicht veröffentlicht. Eine Weiterentwicklung ist die Integration von Carbonfasern, die



[Abb. 4.2_0]

„3-D-printed concrete mansion“ in China, 2015, Winsun

[Abb. 4.2_1]

Unten: Electrical Skin ETH Zürich (Kwon, 2017)

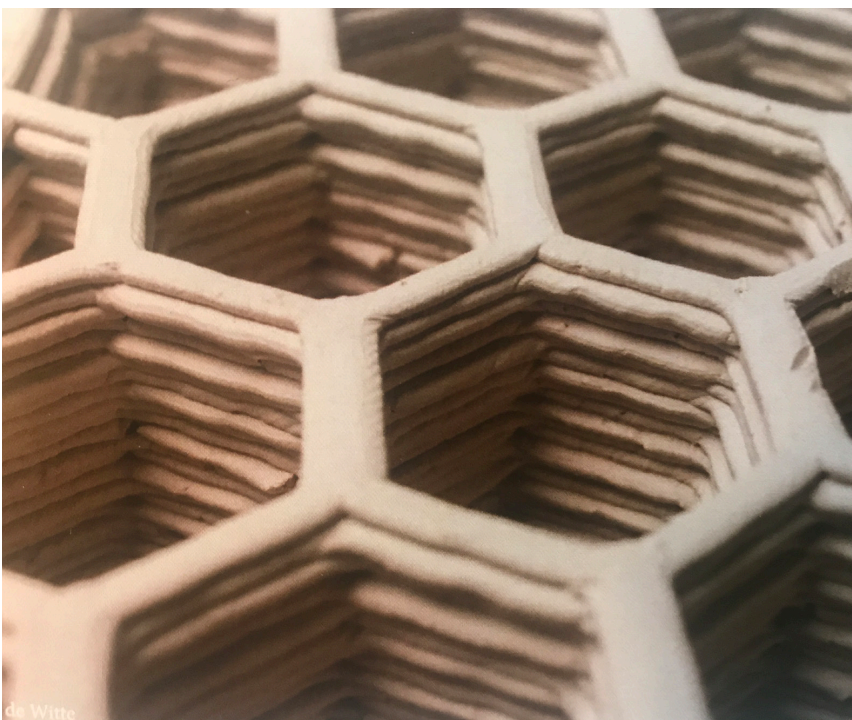


zur Verbesserung der statischen Eigenschaften dient. Hierzu wurde ein weiteres Forschungsprojekt aufgesetzt, bei dem es sich aber nicht mehr explizit um die Fassadenanwendung handelt, sondern der Fokus auf dem Prozess liegt. Als Studie wurde eine Liege veröffentlicht.

Brick 2.0

Das ‚Brick 2.0‘ - Projekt wurde von D. de Witte am ISDM der TU Darmstadt entwickelt und konzentriert sich hauptsächlich auf die Anwendung von 3D-gedruckten Tonprodukten. Mit der Idee, tonhaltige Keramikprodukte zu drucken, sollten bestehende Bauprodukte verbessert, aber auch die Vielfalt tonhaltiger Keramikprodukte gesteigert werden.

Zu den Produkten, die aus keramischem Mauerwerk hergestellt werden können, gehören Freiformelemente, Fassadenverkleidungen und Ecklösungen. Am interessantesten sind Produkte, die mit einer herkömmlichen Schalung oder einem Extrusionsverfahren nicht hergestellt werden können. Die innere dreidimensionale Geometrie ist ein Beispiel dafür. Die Herausforderung besteht darin, wie sich das Material im Produktionsprozess verhält und eine gleichbleibende Qualität bei sich ändernden Geometrien erreicht werden kann. Es gibt zum jetzigen Zeitpunkt keine weiteren Veröffentlichungen. Das Projekt ist noch nicht abgeschlossen und es wurden noch keine weiteren Funktionen integriert.



[Abb. 4.2_2]

‚Chaise Long‘ Digital composites, Carbon Fibre-Reinforced Plastics ETH Zürich (Kwon, 2018)

[Abb. 4.2_3]

Unten: Brick 2.0 ISDM TU Darmstadt (De Witte, 2017)

Sponge 3D

„Sponge 3D“ wurde von M. Sarkinioti an der TU Delft entwickelt und ist ein adaptives 3D-gedrucktes Fassadensystem, das mehrere Funktionen integriert, um die Wärmeleistung für die verschiedenen Umgebungsbedingungen im Laufe des Jahres zu optimieren. Das vorgeschlagene System ist schichtweise aufgebaut. Zum einen enthält es eine Schicht aus Luftkammern zur Dämmung, die beidseitig (innen und außen) mit einer wärmespeichernden Schicht aus Kanälen aufgebaut ist, durch die eine Flüssigkeit (Wasser plus Additive) fließt, um eine Wärmespeicherung bereit zu stellen. Zusammen bilden die Zusammensetzung der Kanäle und der Hohlräume eine komplexe Struktur, in der mehrere Funktionen zu einer einzigen Komponente zusammengefasst sind. Für die Herstellung wird das Extrusionsverfahren (FDM) und Kunststoff (PETG) verwendet. Es gibt zum jetzigen Zeitpunkt keine weiteren Veröffentlichungen. Das Projekt wurde noch nicht abgeschlossen und ein funktionsfähiger Prototyp noch nicht erstellt.



[Abb. 4.2_4]

„Sponge 3D“ TU Delft (Sarkinioti, 2017)

Zusammenfassung

Die genannten Projekte beschäftigen sich mit einem expliziten Thema, z. B. der Form, dem Material oder dem Kopieren bestehender Architekturlösungen. Ein Großteil der Arbeiten zeigt keine Lösungen zur Entwicklung von Funktionsgeometrien oder deren Verknüpfung in der Gebäudehülle auf.

Die Verbindung der Vorteile additiver Fertigungsverfahren, wie Materialreduzierung, Funktionsintegration und Topologieoptimierung, werden schon wettbewerbsfähig eingesetzt – beispielsweise in der Luft- und Raumfahrt –, finden jedoch in dieser Konsequenz noch keine Anwendung im Bauwesen und ebenfalls nicht in der Gebäudehülle.

Die Forschungsprojekte im Bereich der Additiven Fertigung im Bauwesen konzentrieren sich zum Großteil auf den Prozess und die Materialien. Prozessseitig steht das Extrusionsverfahren und materialseitig Beton im Vordergrund. Dies lässt sich bezüglich des Einsatzes im Bauwesen nachvollziehen und zeigt sich in verschiedenen Aspekten: Der Einsatzbereich von Stahlbeton reicht von Infrastrukturprojekten

bis hin zum Hochbau und hat somit weltweit einen großen Anteil an allen Bauaktivitäten. Beton vereinigt positive Eigenschaften im Brandverhalten, Witterungsbeständigkeit und Druckfestigkeiten. Eine wirkliche Herausforderung wird die Entwicklung von additiv gefertigtem Stahlbeton sein, um auch die notwendige Zugfestigkeit zu erreichen.

Die Forschungsdichte im Bereich der Integration von verschiedenen Funktionen in ein Bauteil ist verhältnismäßig gering. Dieser Bereich ist aber ausschlaggebend bei der Beurteilung der Verhältnismäßigkeit für den Einsatz der Additiven Fertigung im Bauwesen.

Hier muss ein Mehrwert generiert werden, um gegen die praktizierten Methoden zu bestehen. Ein Beispiel: Die Fertigteile eines Rohbaus für ein Verwaltungsgebäude werden nur dann additiv gefertigt werden, wenn weitere Funktionen wie Hohlräume für die Energie- und Wasserversorgung, Lüftungskanäle und akustische Oberflächenstrukturen integriert werden. Reine Fertigteile ohne integrierte Funktionen, werden aus wirtschaftlicher Sicht noch lange nicht wettbewerbsfähiger sein

gegenüber den heutigen Herstellungsmethoden.

In der Forschungslandschaft der Additiven Fertigung im Bauwesen ist die Fassade als Forschungsobjekt für Untersuchungen der Funktionsintegration in einem Bauteil noch nicht besetzt. Es werden in den aufgeführten Forschungsprojekten zwar einzelne Funktionen integriert, aber nur in geringem Umfang.

Um das Potenzial der Funktionsintegration durch die Additive Fertigung für das Bauteil Fassade zu überprüfen, sind hier umfangreiche Forschungsaktivitäten notwendig. Die Symbiose von Form und Funktion bei diesem Forschungsthema ist für eine Untersuchung durch Architekten wie geschaffen.

5. Gebäudehülle

5.1 Einführung

„Die Architektur ist eine reine Kunst der Erfindung, denn für ihre Formen gibt es keine fertigen Prototypen in der Natur, sie sind freie Schöpfungen der menschlichen Fantasie und Vernunft. Mit Rücksicht hierauf könnte man sie für die freieste aller Künste der Darstellung ansehen, wenn sie nicht von den allgemeinen Naturgesetzen und den mechanischen Gesetzen des Materials im Einzelnen durchaus abhängig wäre: Denn welchen Gegenstand der architektonischen Kunst wir auch betrachten mögen, die erste und ursprüngliche Konzeption derselben wird immer aus der Befriedigung irgendeines materiellen Bedürfnisses, vornehmlich desjenigen des Obdaches und des Schutzes gegen die Unbilden des Klimas und der Elemente oder andere feindliche Mächte, entstanden sein; und da wir solchen Schutz nur durch feste Verbindungen von Materialien, die uns die Natur bietet, erhalten können, so sind wir bei derartigen Konstruktionen genötigt, die statischen und mechanischen Gesetze streng zu berücksichtigen.“

Gottfried Semper, 1854
[5.1] (Müller; Vogel 1984 : 15)

Die Fassade bildet die Trenn- und Filterschicht zwischen der Natur und den Aufenthaltsräumen von Menschen. Der Wunsch des Menschen nach Schutz vor äußeren Umwelteinflüssen ist der primäre Anlass zu Schaffung eines Raumabschlusses.

Dies beinhaltet primär den Schutz vor extremen Temperaturen, Niederschlägen, Wind und intensiver Sonneneinstrahlung. Um diese Einflussparameter abzdämpfen und ein komfortables Innenraumklima zu gewährleisten, ist hierfür die Gebäudehülle das zentrale Bauteil eines Gebäudes.

Um dies umzusetzen muss die Gebäudehülle eine Vielzahl unterschiedlicher Funktionen übernehmen, woraus sich konzeptionell und konstruktiv verschiedene Fragestellungen ergeben.

1. Funktion: Welchen praktischen Nutzen hat die Gebäudehülle?
2. Konstruktion: Aus welchen Teilen besteht die Gebäudehülle, und wie sind diese zusammengefügt?
3. Gestalt: Wie sieht die Gebäudehülle aus?
4. Ökologie: Welchen Energieverbrauch hat die Gebäudehülle während der Herstellung, des Gebrauchs und der Entsorgung?

Bezogen auf das Wohlbefinden der Menschen in Gebäuden sind die funktionalen Eigenschaften gegenüber den konstruktiven, gestalterischen und ökologischen Aspekten von übergeordneter Bedeutung. Bei der Betrachtung

des ganzen Gebäudes sind sie jedoch gleichrangig, da sie sich gegenseitig beeinflussen und ineinandergreifen.

Das Gesamtsystem Gebäude lässt sich in verschiedene Subsysteme unterteilen: das Tragwerk, der technische Ausbau, das Raumgefüge und die Gebäudehülle. Die Gebäudehülle beinhaltet die Fassade und das Dach, zusammengefasst die Außenhaut, und stellt nicht nur in gestalterischer Hinsicht das dominierende System da. Die Außenhaut beinhaltet Lüftungssysteme, Sonnenschutzsysteme, Tageslichtsysteme, Wärmeschutzsysteme und Energiesysteme. Hieraus ergeben sich eine Vielzahl zentraler Funktionen, die darüber hinaus den Energieverbrauch des Gebäudes entscheidend beeinflussen. Zu diesen Funktionen gehören unter anderem: Belichtung, Belüftung, Feuchtigkeitsschutz, Wärmeschutz, Windschutz, Sonnenschutz, Lärmschutz, Sichtschutz, Einbruchschutz, Schallschutz, Brandschutz, Energiegewinnung, Durchsicht und Schutz vor mechanischer Beschädigung.

[5.2] (Lang 2001 : 29 - 30)

Neben den Schutzfunktionen gibt es auch Steuer- und Regelfunktionen. Die Regelbarkeit braucht man beispielsweise bei folgenden Funktionen: Tageslicht im Inneren, ausreichender Luftaustausch, visuelle Verbindungen nach außen bei gleichzeitiger Abgrenzung der Privatsphäre.

5.2 Entwicklung

Seit rund 20.000 Jahren bauen Menschen sowohl Kult- als auch Wohnstätten. Unsere gebaute Umwelt hat sich von diesen Ursprüngen in kleinen Schritten entwickelt. Analog dazu hat sich der Aufbau von technischen Details entwickelt.

Für neue bauliche Fragen wurden Lösungen gefunden, die das entsprechende Handwerk zuließ. Um beispielsweise dem Wunsch der Nutzer nach komfortablen Wohnräumen zu entsprechen, wurden Öffnungen in Wände eingebaut,

als Zugang für Licht und Luft. Sie entwickelten sich von einfachen Öffnungen über verschließbare Holzläden bis hin zum eigentlichen Fenster.

Die Fenster waren damit eine eigenständige Komponente der Gebäudehülle.

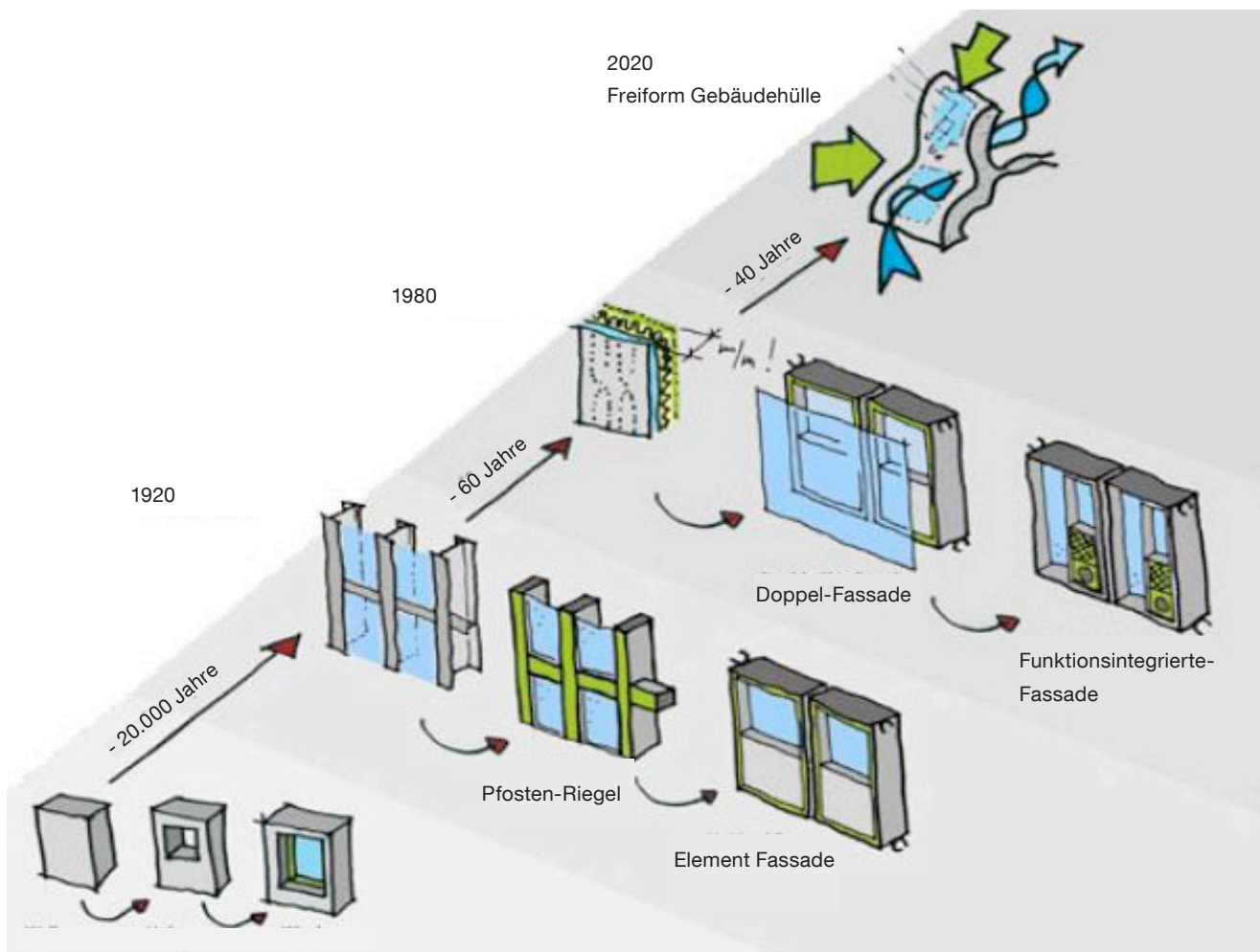
Die weitere Entwicklung hing stark mit den handwerklichen Möglichkeiten der jeweiligen Epoche zusammen.

Die im frühen 20. Jahrhundert entwickelte Vorhangfassade wur-

de zur Pfosten-Riegel-Fassade, zur Element-Fassade und bis hin zur heutigen Closed-Cavity weiterentwickelt.

Die konzeptionelle Idee der „Polyvalent Wall“ von Mike Davis in den 80er-Jahren des 20. Jahrhunderts beeinflusste die Entwicklung einer „Haut“, die alle Funktionen der Gebäudehülle in sich vereinigte. Dem kann man die Entwicklung der Doppelfassaden und der funktionsintegrierten Elementfassaden mit dezentralen Technikeinheiten zurechnen.

[5.3] (Strauss 2015 : 95 - 96)



[Abb. 5.2_1]
Fassadenentwicklung
(Strauss 2015)

5.3 Anforderungen

Die Anforderungen an eine Fassade gliedern sich in zwei Gruppen: ortsspezifische Außenbedingungen und Anforderungen an die Innenbedingungen.

Außenbedingungen sind bei jedem Standort einzigartig und durch die Planung in der Regel nicht beeinflussbar. Sie unterscheiden sich in Art und Intensität nach Gegend, Region, Land und Kontinent und werden vom direkten Umfeld und Mikroklima beeinflusst.

Die Anforderungen an die Innenbedingungen werden in der Planungsphase von der vorgesehenen Nutzung definiert. Neben den Anforderungen an das Innenklima, die im Wesentlichen durch den Begriff ‚Behaglichkeit‘ bestimmt werden, ergeben sich teilweise weitere Maßnahmen aus verschiedenen Erfordernissen wie beispielsweise erhöhter Einbruchsschutz und Gestaltungsanspruch.

Aus den klimatischen Bedingungen ergeben sich Anforderungen, die aus diesem Unterschied zwischen innen und außen resultieren. Diese Differenzen führen zu einer mechanischen Beanspruchung der Fassadenmaterialien und entstehen aufgrund von Temperatur-, Feuchtigkeits- und

Druckunterschieden. Diese klimabedingten Anforderungen sollten durch die Fassade möglichst umfassend abgedeckt werden, wodurch sich gebäudetechnische Einrichtungen zur Raumklimatisierung beispielsweise geringer halten lassen.

Die Leistungsfähigkeit einer Fassade lässt sich unter anderem im thermischen Komfort (Behaglichkeit) bemessen. Maßgebliche Einflussfaktoren der thermischen Behaglichkeit sind: Temperatur der Raumluft, relative Raumluftfeuchte, Oberflächentemperatur der raumbegrenzenden Bauteile und Luftströmungen am Körper. Diese messbaren Größen bestimmen in Abhängigkeit von Region, Gewohnheit, Kleidung, Tätigkeit und individuellem Empfinden die thermische Behaglichkeit.

Die konstanten Anforderungen zur Einhaltung der Behaglichkeit bei einem Gebäude erfordern eine genaue Abstimmung der Regelfunktion: Lüften, Heizen, Kühlen, Sonnenschutz sowie Lichtlenkung. Das Thema Behaglichkeit ist von persönlichen Wahrnehmungen eines individuellen Nutzers abhängig. Daher kann man Behaglichkeit nur eingrenzend erfassen und nicht mit objektiven Größen für alle Nutzer gleichermaßen definieren.

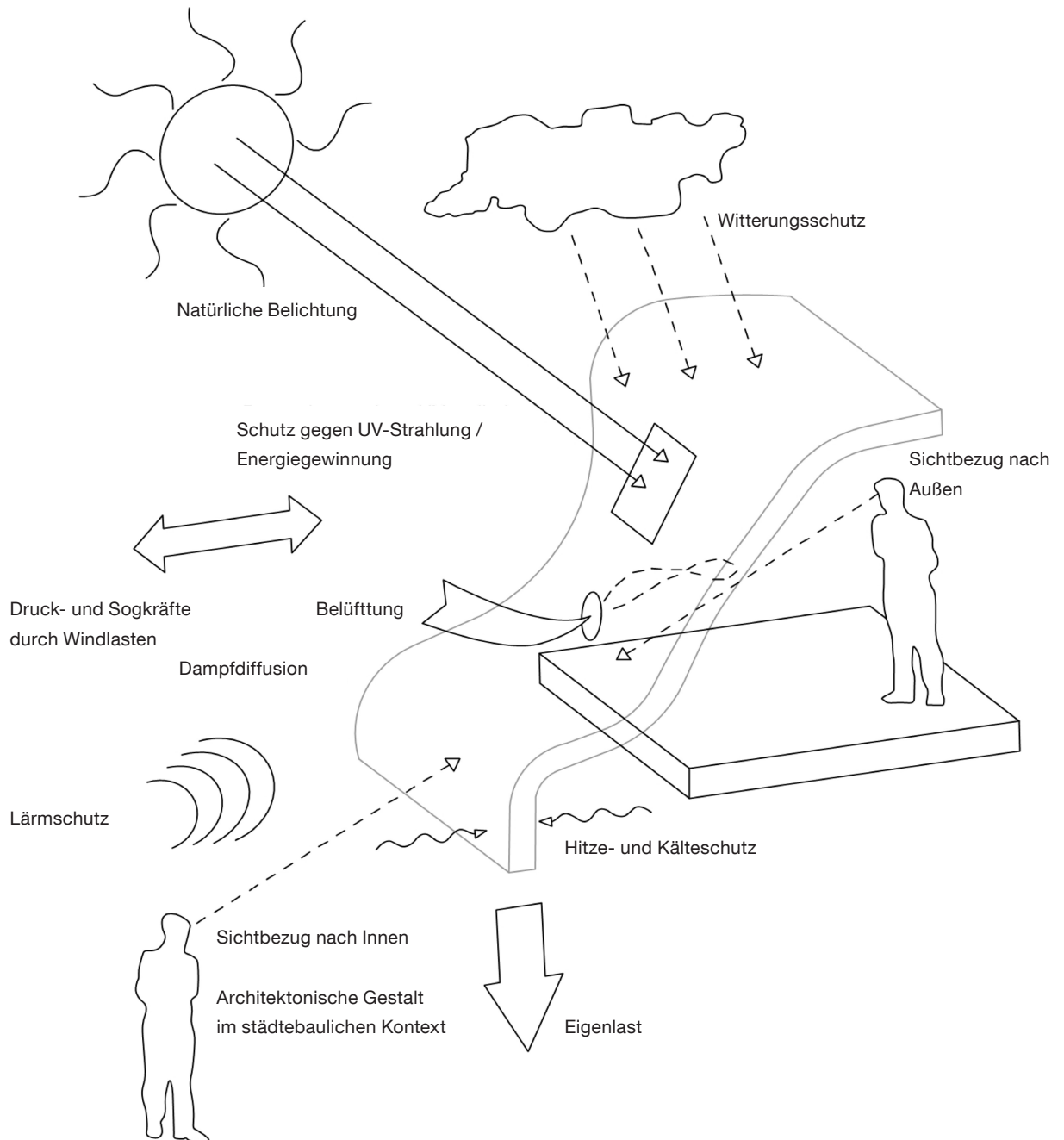
Die Behaglichkeit beinhaltet neben dem thermischen Komfort weitere Parameter; zu nennen sind hier der akustische Komfort, der visuelle Komfort und die Versorgung mit Frischluft.

Die aufgeführten Komfortparameter und deren Funktionsebenen bilden die zentrale Fragestellung: Wie lassen sich die einzelnen Funktionen mittels der additiven Fertigung herstellen und kombinieren zur Bereitstellung von visuellem, akustischem und thermischem Nutzerkomfort?

Zur Umsetzung der Anforderungen sind folgende Fassadenfunktionen aufgeführt, die für diese Untersuchung von additiv gefertigten Fassaden relevant sind.

- Belichtung
- Belüftung/Abluft
- Sonnenschutz
- Schallschutz
- Bezug innen–außen
- Dämmung
- Lastabtragung (Windlast/Eigenlast)
- Witterungsschutz (Wind/Wasser)

Diese Funktionen werden u.a. in folgender Abbildung exemplarisch dargestellt.



[Abb. 5.3_1]
 Einflussparameter Fassadenfunktionen
 (Klein 2014)

5.4 Low-Tech vs. High-Tech

Heute sind wir bei hochtechnischen Fassadensystemen mit adaptiven Eigenschaften angekommen, die sich über digitale Steuerungssysteme, welche durch Wetterdaten gefüttert und mittels Sensorik und Elektromotoren an verschiedene Gegebenheiten angepasst werden können.

Des Weiteren entwickelt sich die Fassade durch zusätzliche Energiegewinnung (PV, Solarthermie) und schaltbare Verglasungen (Liquid-Crystal) zu einem immer stärkeren Hightech-Bauteil.

Dies wirft bei manchen Fassadenausführungen die Frage nach der Sinnhaftigkeit auf, die treffend in einem Zitat von Cedric Price von 1979 charakterisiert werden kann:

„Technology is the answer, but what was the question?“

Ist es nicht sinnvoller bei gleicher Performance weniger technische Komponenten zur Regelung von Fassadenfunktionen zu verwenden? Folgende Punkte sprechen dafür.

Erstens ist die Herstellung von Steuerungseinheiten mit Sensorik und Antriebstechnologien ein nicht unerheblicher Aufwand, der mit langen Lieferketten und teuren Materialien einhergeht. Zweitens ist die Steuerung dieser Regelungssysteme an einem Gebäude eine sehr komplexe Aufgabe, die sich aus der Vielzahl von Elementen und verschiedenen Anforderungen resultierend aus

der Orientierung und Nutzungen ergeben. Die Steuerung der Gebäudetechnologie stellt das Gebäudemanagement vor teilweise unlösbare und kostenintensive Herausforderungen.

Wäre es nicht sinnvoller die technischen Komponenten zu reduzieren? Hier bieten sich Low-tech-Lösungen an, die durch eine passive Strategie umgesetzt werden. Regeleinheiten werden durch feststehende geometrisch-optimierte Bauteile ersetzt. Dies bedeutet einen höheren Aufwand in der Planungsphase. Mit Hilfe von digitalen Planungs- und Simulationswerkzeugen lassen sich Individuallösungen für die spezifischen Gebäudeanforderungen, beispielsweise des Sonnenschutzes, entwickeln, die durch geometrisch angepas-

te Fassadenelemente eine Regelbarkeit obsolet machen. Als Beispiel kann man hier das Bürogebäude One Airport Square von Mario Cucinella Architects in Accra, Ghana anführen: Es hat eine angepasste Auskragung der Geschossdeckenplatte in Abhängigkeit des Sonnenstands, somit kann auf einen beweglichen Sonnenschutz verzichtet werden.

Ziel dieser Dissertationschrift ist die Reduzierung der mechanischen Fassadenkomponenten, wie Elektromotoren, durch die Entwicklung von komplexen und individuell auf das Bauvorhaben angepassten Geometrien.



[Abb. 5.4_1]

Passive Sonnenschutzstrategie, Bürogebäude One Airport Square, Accra Ghana
Mario Cucinella Architects, 2015

6. Problemstellung / Hypothese

6.1 Problemstellung

Aus den vorherigen Betrachtungen des Stands der Technik und der Forschung, den Anforderungen an die Gebäudehülle und den Hintergründen der Agenda 2030 der UN wurden die folgenden Problemstellungen eruiert. Darauf aufbauend wird folgende Hypothese aufgestellt.

Wiederverwertung

Die aktuellen Fassadenkonstruktionen sind in der Herstellungweise nicht nachhaltig. Es werden zu viele verschiedene Materialien verwendet, deren Wiederverwertung in einem geschlossenen Materialkreislauf nicht möglich ist.

Technische Überfrachtung

Um Fassadenfunktionen abbilden zu können, werden verschiedene technische Komponenten eingesetzt, z. B. Sonnenschutzlamellen oder dezentrale Klimageräte. Diese werden mit Elektromotoren, Steuerungen und Sensoren ausgestattet, deren Herstellung und Materialvielfalt führen zur technischen Überfrachtung der Fassade.

Geometrische Lösung

Um den Einsatz eines homogenen und recycelbaren Materials zu ermöglichen und gleichzeitig die technischen Komponenten zu reduzieren, müssen geometrische Lösungen entwickelt werden.

In der Forschung sind Geometrien zur Funktionsintegration von Fassadenfunktionen für die additiv gefertigte Gebäudehülle noch nicht ausreichend entwickelt worden, um diese in ein multifunktionales Fassadenelement zu integrieren.

6.2 Hypothese

Additiv gefertigte und funktionsintegrierte Gebäudehüllen machen bei gleicher Leistungsfähigkeit die technische Fassadenausrüstung überflüssig und es lässt sich ein geschlossener Materialkreislauf etablieren.

7. 3D-gedruckte Gebäudehüllen

7.1 Herleitung des Forschungsansatzes

Wie lassen sich die Vorteile der Additiven Fertigung für die Herstellung einer Gebäudehülle nutzen?

Die Vorteile sind:

1. Materialeffizienz (Topologieoptimierung)
2. Herstellung von komplexen Geometrien ohne Mehrkosten
3. Design to Product
4. Funktionsintegration

Die Vorteile 1. bis 3. werden in der Architektur bereits angewendet, dies wurde in der Einführung beschrieben.

Punkt 4, die Funktionsintegration, wird in der additiv gefertigten Gebäudehülle noch nicht konsequent umgesetzt.

Der Vorteil besteht darin, mit einem einzigen Produktionsschritt verschiedene Funktionen in ein Bauteil zu integrieren (Funktionsintegration) – dies bildet den Forschungsschwerpunkt dieser Untersuchung.

Wie lässt sich dieser Vorteil der Additiven Fertigung für funktionsintegrierte Bauteile nutzen?

Als Fallbeispiel für ein additiv gefertigtes und funktionsintegriertes Bauteil wird die Gebäudehülle gewählt. Die Gebäudehülle beinhaltet eine hohe Anzahl von Funktionen auf engstem Raum, wie zum Beispiel Sonnenschutz, Dämmung, Belüftung, Belichtung, Lastabtragung usw.

Wie lassen sich Fassadenfunktionen über die Additive Fertigung herstellen?

Durch die Additive Fertigung können nur komplexe Formen (Geometrien) hergestellt werden. Um dieses Potenzial für die Herstellung einer funktionsintegrierten Gebäudehülle voll auszunutzen, müssen die einzelnen Fassadenfunktionen über Geometrien abgebildet werden. Diese Geometrien werden „Funktionsgeometrien“ genannt.
[10] (Mungenast 2017 : 308)

7.2 Methodische Vorgehensweise

Daraus ergibt sich folgende methodische Vorgehensweise, die sich in 3 Teile gliedert:

1. Funktionsgeometrien

In Teil 1 werden „Funktionsgeometrien“ für die verschiedenen Fassadefunktionen exemplarisch entwickelt, um eine Vorauswahl zu treffen und Potenziale abschätzen zu können.

> Teil 1: Fassadenfunktion definieren und Lösungen entwickeln, die auf geometrischen Grundlagen eine Fassadenfunktion erfüllen können. Die Ergebnisse werden exemplarisch ausgewertet und evaluiert.

[10] (Mungenast 2017 : 308)

2. Funktionsintegration

In Teil 2 wird auf Grundlage der Ergebnisse von Teil 1 Fassadenfunktionen, Material und Additiver Fertigungsprozess definiert, um ein funktionsintegriertes Fassadenelement zu entwickeln. Die Potenziale der architektonischen Gestalt sollen ebenfalls in die Entwicklung einfließen.

> Teil 2: Funktionsintegration durch Funktionsgeometrien. Kombination von Fassadenfunktionen in einem Fassadenelement.

[12] (Sigmund 2017 : 79)

3. Prototypenherstellung und Untersuchungen

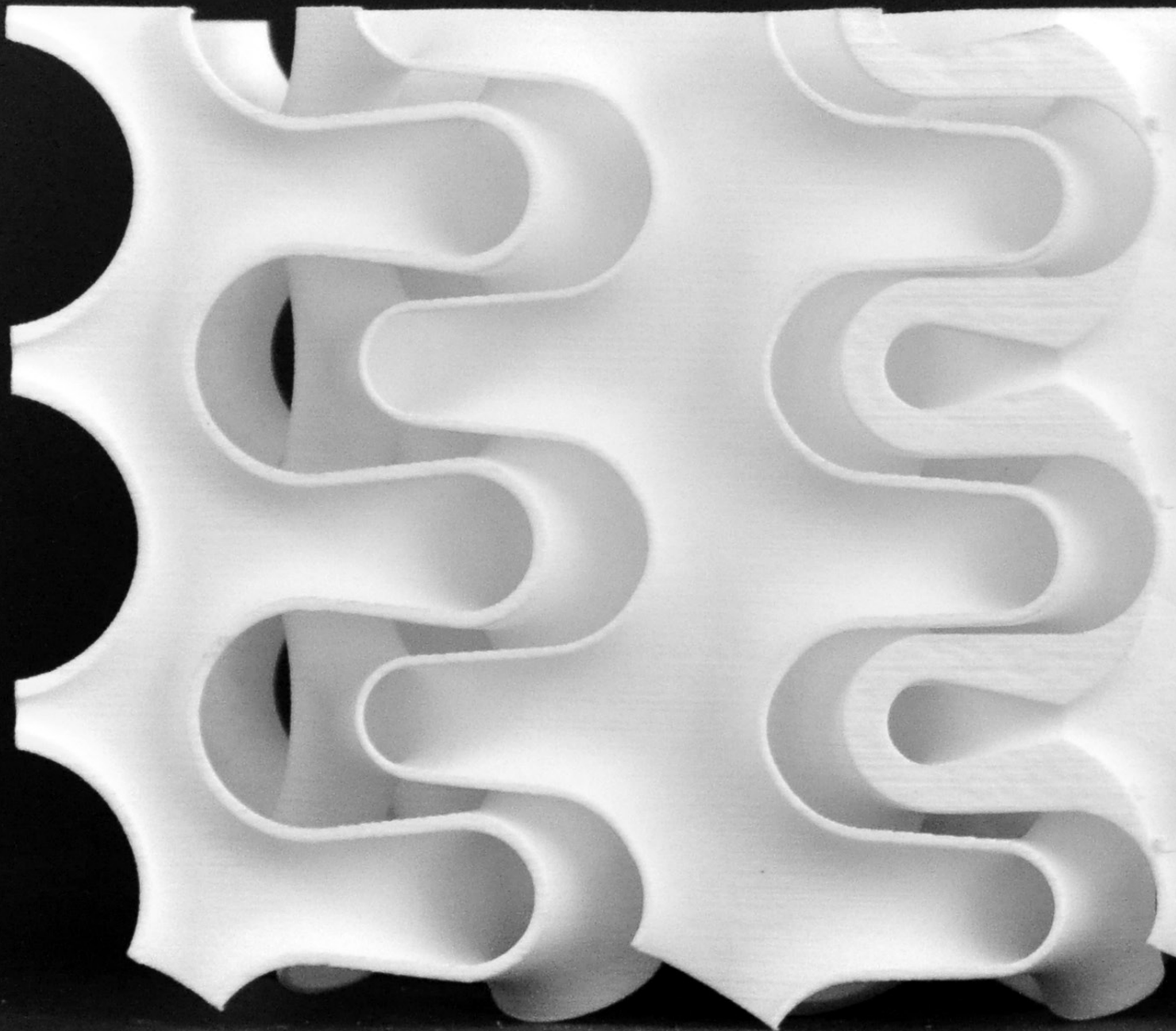
In Teil 3 steht die Produktion des entwickelten funktionsintegrierten Fassadenelements und die exemplarische Untersuchung der Eigenschaften für eine Potenzialabschätzung der getroffenen Entwicklungsschritte im Fokus, um die Machbarkeit zu beweisen, die Annahmen zu verifizieren und Verbesserungen für zukünftige Forschungsaktivitäten zu eruieren.

> Teil 3: Herstellung und Testen des Fassadenelements und des Referenzobjekts (vergleichbare Standardfassade), um Ergebnisse in Relation zum Stand der Technik zu setzen.

7.3 Architektonische Gestalt

Neben technischen und funktionalen Entwicklungen der Gebäudehülle und deren Umsetzung mittels Additiver Fertigung ist die architektonische Gestalt ein elementarer Teil der Gebäudehülle und der Kompetenz des Architekten. Diese außer Betracht zu lassen würde bedeuten, dass man einen wichtigen Einflussparameter für die Entwicklung und das Potenzial von additiv gefertigten Gebäudehüllen verliert. Verschiedene Architekturbüros haben großes Interesse an der Umsetzung ihrer Entwurfsideen mithilfe der Additiven Fertigung bekundet, da die heutigen Methoden noch nicht in vollem Umfang befriedigende Lösungen für Freiformen bieten.

Deshalb werden in Teil 2 dieser Dissertationsschrift die gestalterischen Potenziale exemplarisch aufgezeigt.



8. **Teil 1: Funktionsgeometrien**

Entwicklung von Geometrien, die verschiedene Fassadenfunktionen erfüllen.

> Vorauswahl Potenzialabschätzung

8. Teil 1: Entwicklung von Fassaden-Funktionsgeometrien

Vorbemerkung

In Teil 1 werden ‚Funktionsgeometrien‘ (Kapitel 7.1) der jeweiligen Fassadenfunktion für die Herstellung mittels der Additiven Fertigung entwickelt. Die Verwendung eines speziellen Druckprozesses und des passenden Materials ergeben sich aus der spezifischen Geometrie und dem Einsatzbereich der jeweiligen Fassadenfunktion.

Diese Untersuchung ist elementar, um aus der hohen Anzahl der verschiedenen Fassadenfunktionen eine Auswahl zur weiteren Vertiefung treffen zu können. Um dieses Verfahren auf einen kurzen Zeitraum zu beschränken, werden längere Überarbeitungsphasen und Tests auf ein Minimum reduziert. Die Ergebnisse von Teil 1 dienen einer Potenzialabschätzung, um effektiv auf ein Anwendungsbeispiel hinzuarbeiten. Ziel ist es, durch eine Evaluation der Ergebnisse eine erfolgversprechende Kombination aus Fassadenfunktionen, des passenden Additiven Fertigungsprozesses und des entsprechenden Materials zusammenzustellen.

Um diese Untersuchungen effektiv umzusetzen, entwickelte ich eine eigene Lehrveranstaltungen mit dem Namen ‚3D textile‘ und ‚3D envelope‘, welche als eigenständiges Bachelor-Thesis-Projekt und Modul im Master für Architekturstudierende stattfand. Diese Lehrveranstaltung teilte sich ein in zwei Bearbeitungsphasen. Nach der Einführung in die Thematik der Fassade mit ihren Funktionen und den technischen Eigenschaften der Additiven Fertigung wurden verschiedene Fassadenfunktionen, wie zum Beispiel die

Entwicklung einer Dämmgeometrie, Tragwerksgeometrie, Bewegungsmechanismen zur Regelbarkeit des Sonnenschutzes oder Lüftungsöffnungen, an die Studierenden(gruppen) verteilt. Phase 1 widmete sich der Recherche und Analyse bestehender Geometrien.

In Phase 2 wurde die Transformation in eine Funktionsgeometrie für eine bestimmte Fassadenfunktion erarbeitet.

Die Studierenden wurden von mir wöchentlich angeleitet und inhaltlich sowie auch in der Umsetzung instruiert. Ich hatte somit maßgeblichen Einfluss auf die einzelnen Ergebnisse, um diese für die vorgesehene Potenzialabschätzung zu nutzen. Für den Spezialbereich der parametrischen Programmierung wurde ein Korrekturassistent eingestellt.

8.1 Methodik

Forschungsfragen von Teil 1: Welche Fassadenfunktionen eignen sich für die Herstellung mit der Additiven Fertigung? Ist es möglich, Fassadenfunktionen durch 3D-gedruckte Geometrien herstellen zu können?

Um neue Lösungen zu entwickeln, ist die Orientierung an funktionierenden Lösungen aus anderen Bereichen, wie etwa der Pflanzen- und Tierwelt (Biologie) und/oder anderen Industrien, eine effektive Methode.

Referenzen

Diese Methodik wird in der Bionik sehr erfolgreich angewendet und hat sich in verschiedenen Bereichen bewährt, beispielsweise in der Luftfahrt (z. B. Adlerflügel > Flügelform Wingtip), Automobil (z. B. Aerodynamik Kugelfisch > Mercedes B-Klasse), Transport (z. B. Eisvogel > Shinkansen-Zug), aber auch in der Architektur, etwa in Projekten von Frei Otto (Seifenblasen-Minimalflächen > Olympiadaach München) und des ICD der Universität Stuttgart (Käferpanzer über Flügen > Elytra Pavilion).

Analyse

Die angewendete Methodik für den ersten Teil des Forschungsprojektes ist die Analyse von biologischen und künstlichen Geometrien, die ähnliche Funktionen ausführen, aber in anderen Zusammenhängen und Maßstäben.

Transformation

Nach der Analyse werden die vielversprechendsten Ergebnisse in die neue Anwendung übersetzt und an die jeweilige Funktion angepasst. Der Fokus liegt auf der Anpassung der verschiedenen Parameter der Geometrie.

Ablauf des iterativen Entwicklungsprozesses

Schritt 1:

Es wird eine druckbare Fassadenfunktion gewählt.

Schritt 2:

Recherche zu biologischer und künstlicher Geometrie mit ähnlicher Funktion.

Schritt 3:

Gegenüberstellung der Rechercheergebnisse und Auswahl des leistungsfähigsten Ergebnisses.

Schritt 4:

Analyse der Ergebnisgeometrie durch die Erstellung eines digitalen Modells.

Schritt 5:

Transformation der analysierten Geometrie in eine Funktionsgeometrie für die Fassadenfunktion.

Schritt 6:

Optimierung der Geometrie über parametrische Entwurfswerkzeuge zur Anpassung an verschiedene Anforderungen, z. B. über den Maßstab, Gradienten, Bewegung usw.

Schritt 7:

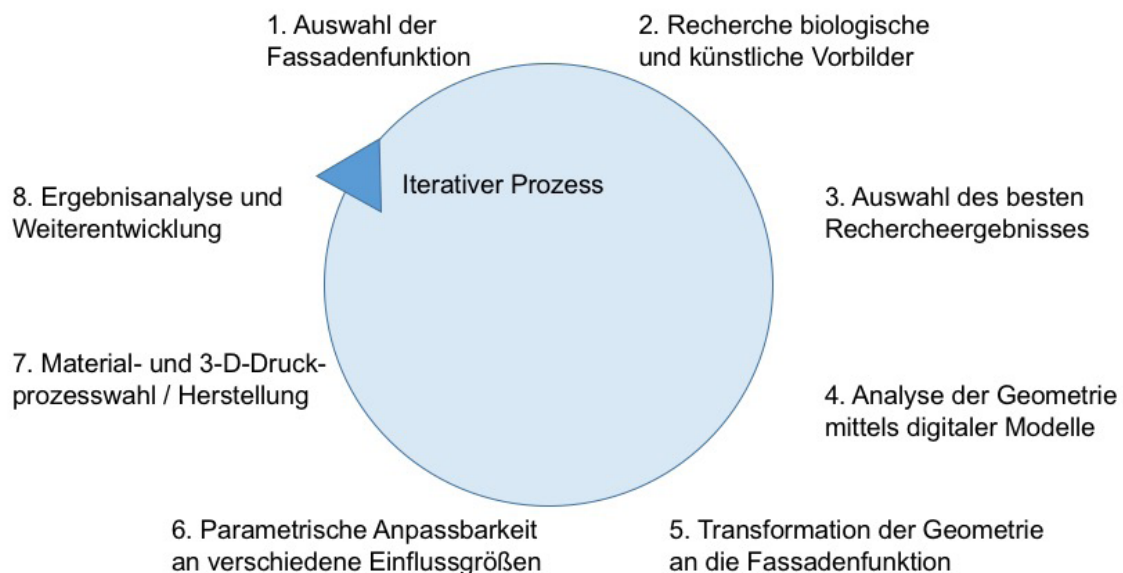
Herstellung von 3-D-gedruckten Modellen. Material und Druckprozess werden nach den jeweiligen Eigenschaften der Funktionsgeometrie gewählt.

Schritt 8:

Evaluierung der Ergebnisse durch verschiedene Faktoren. Iterativer Prozess, 3-D-gedruckte Modelle werden analysiert und Verbesserungen eingefügt. Neue Modelle werden gedruckt und wieder untersucht.

[10] (Mungenast 2017 : 308 - 309)

Methodik zur Entwicklung von Fassaden-Funktionsgeometrien für die Additive Fertigung



[Abb. 8.1_2]
Methodik zur Entwicklung von Funktionsgeometrien

8.2 Parameter zur Entwicklung von Fassaden-Funktionsgeometrien

Nicht alle Fassadenfunktionen lassen sich mittels einer Geometrie abbilden, weshalb es zunächst wichtig ist, die Fassadenfunktionen in druckbare (z. B. Dämmung) und nicht druckbare (z. B. Energiegewinnung) einzuteilen. Die druckbaren Fassadenfunktionen werden in folgende Kategorien unterteilt:

8.2.1 Druckbare Fassadenfunktionen

Kategorisierung der Fassadenfunktionen in Schichten und Öffnungen

Schichten

Unter den Schichten versteht man den opaken Teil der Gebäudehülle, der schichtweise aufgebaut ist. Jeder Schicht kann eine Funktion zugeordnet werden. Man unterscheidet zwischen feststehenden und dynamischen Schichten. Feststehende Schichten sind nichtbewegliche Bauteile; unter dynamischen Schichten versteht man Ebenen, die nur zeitweise Funktionen zugeordnet werden, d. h. entweder beweglich sind, sich geometrisch anpassen oder temporär aktiviert sind.

Feststehend: Tragstruktur, Dämmung, feststehender Sonnenschutz, Wetterschutz, thermische Trennung

Dynamisch: Energiegewinnung, akustische Anpassbarkeit, Sicherheit

Öffnungen

Bei der Bauteilkategorie „Öffnungen“ wird ebenfalls zwischen feststehender und dynamischer Funktion unterschieden. Unter feststehenden Öffnungen versteht man nichtbewegliche Bauteile, die aber trotzdem eine Verbindung zur Außenwelt herstellen. Dynamische Öffnungen passen sich der jeweiligen Anforderung an.

Feststehend: visuelle Verbindungen (Festverglasung)

Dynamisch: natürliche Belichtung, beweglicher Sonnenschutz, Lüftungsöffnung, Durchgang (z.B. Tür)

8.2.2 Freie Materialwahl

Das Material zur Herstellung der 3-D-gedruckten Modelle der entwickelten Funktionsgeometrien muss zu den verschiedenen Anforderungen passen. Verschiedenste Materialeigenschaften, z. B. von fest bis flexibel, oder Lichtdurchlässigkeiten von opak bis transparent, sind mit der jeweiligen Funktion gekoppelt. Deshalb wird das zur jeweiligen Funktion passende Material verwendet, um die Geometrie herzustellen.

8.2.3 Freie Wahl des 3D-Druckprozesses

Durch den Einsatz unterschiedlicher Materialien ist auch der 3-D-Druckprozess je nach Fassadenfunktion zu wählen. Um elastische Materialien zu drucken, eignet sich beispielsweise das FDM-Verfahren, und um Übergänge von fest zu flexibel in einer Geometrie umzusetzen, eignet sich das Bindeverfahren Stereolithografie (SLA). Transparente Teile lassen sich auch zum Beispiel über FDM-Verfahren herstellen. Pulverbasierte Druckprozesse lassen Durchdringungen und Auskragungen ohne zusätzliche Stützgeometrien zu.

[10] (Mungenast 2017 : 308 - 309)

8.3 Evaluierungskatalog der Ergebnisse: 3D-gedruckte Funktionsgeometrien für Fassaden

Die im vorhergehenden Kapitel beschriebene Methodik wurde im Rahmen der vom Verfasser dafür entwickelten Lehrveranstaltung „3d-envelope“ mit Studierenden des Masterstudiengangs Architektur an der TU München durchgeführt. Die Ergebnisse werden über die folgenden Bewertungskriterien evaluiert.

Definition der Bewertungskriterien der Funktionsgeometrie zur Weiterentwicklung und der Einsatzfähigkeit in einem funktionsintegriertem Fassadenelement:

1. Materialoptimierung

Die Möglichkeit, Material einzusparen (Topologieoptimierung), birgt gegenüber herkömmlichen Fertigungsmethoden einen wesentlichen Vorteil. Materialeinsparung ist ein wesentliches Potenzial von AM.

2. Materialfreiheit

Lässt sich die Funktionsgeometrie mit verschiedenen Materialeigenschaften herstellen (flexibel/fest) und lässt sie sich auf verschiedene Materialien (Kunststoff, Metall usw.) übertragen?

Dieses Merkmal ist wichtig für die spätere Herstellung von verschiedenen Funktionsgeometrien in einem Bauteil.

3. Prozessfreiheit

Lässt sich die Funktionsgeometrie mit verschiedenen AM-Fertigungsprozessen (Extrusion, z. B. FDM/Bindevverfahren, z. B. Inkjet-Powder-Printing) herstellen?

Dieses Merkmal ist wichtig für die spätere Herstellung von verschiedenen Funktionsgeometrien in einem Bauteil.

4. Anpassungsfähigkeit an Freiform

Kann sich die Funktionsgeometrie in verschiedenen Volumen/Formen (gerade/1-fach gekrümmt/2-fach gekrümmt) integrieren?

Dieses Merkmal ist wichtig für die spätere Herstellung von verschiedenen Funktionsgeometrien in einem Bauteil.

Die Herstellung von komplexen Formen ist ein wesentliches Potenzial von AM.

5. Kombinierbarkeit mit anderen Funktionen

Lässt sich die Funktionsgeometrie mit anderen Funktionsgeometrien kombinieren? Zur Entwicklung einer funktionsintegrierten Fassade ist dies ein wichtiges Merkmal, um mehrere Funktionen in einem Bauteil zu vereinen.

6. Einsatz von autoreaktiven Aktivatoren integrierbar

Lässt sich in diese Funktionsgeometrie ein Aktuator integrieren, um eine Regelung der Belüftung, Verschattung, Feuchte und Temperatur als autoreaktiv-adaptierbares (selbstregelndes) Fassadenelement herzustellen?

Folgende Funktionen werden in Teil 1 untersucht und folgende Funktionsgeometrien entwickelt:

Schichten/feststehend:

- Tragstruktur
- Dämmung

Öffnungen/dynamisch:

- beweglicher Sonnenschutz
- Lüftungsöffnung

Die Einordnung der Untersuchung erfolgt über diese Einteilung, um die Einflussparameter ablesbar zu machen:

- Kategorie (Schicht oder Öffnung/feststehend oder dynamisch)

- Funktion (die entsprechende Fassadenfunktion)

- Referenz (biologische oder künstliche Geometrie)

[10] (Mungenast 2017 : 308 - 309)

Legende Bewertungsgrößen:

+ = ja, hat das Potenzial

o = unter größerem Aufwand möglich, weitere Untersuchungen sind nötig / generell nicht notwendig

- = nein, nicht möglich

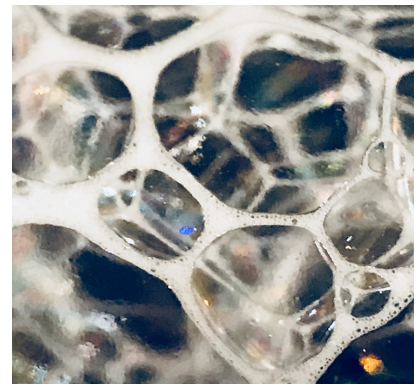
Untersuchung 1 / Schichten (U1)

Studierende: Luc Morrioni / Elena Giannitsopoulos

- Kategorie
Schicht/feststehend

- Funktion
Tragstruktur

- Referenz
Biologische Geometrie:
Voronoi / kangomische Zellen

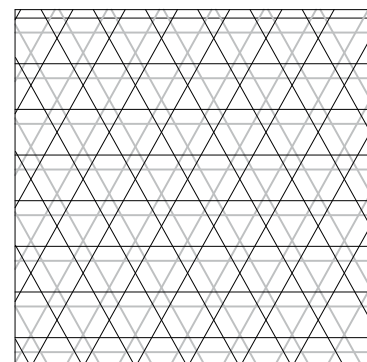
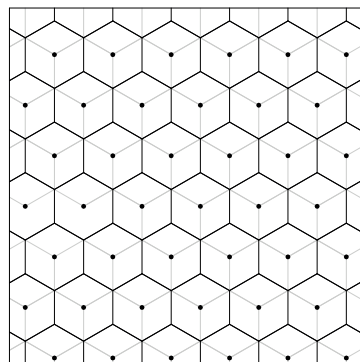
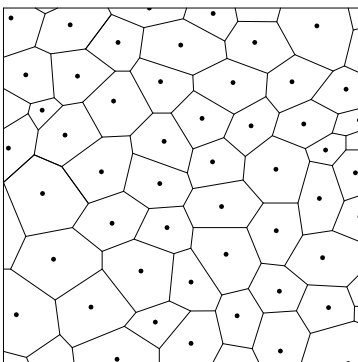


Beschreibung der Ausgangsgeometrien:

Voronoi sind polygonale (meist pentagonale und hexagonale) Strukturen in der Natur. Diese Strukturen erscheinen auf Schalen, Tierhäuten, Knochenstrukturen, Schmetterlingseiern und Pilzen. Sie können sich leicht an verschiedene Situationen anpassen. Da sie polygonale Strukturen haben, können sie leicht zusammengebaut werden und zeigen eine hohe statische Belastung. In dreidimensionalen Räumen ist die Voronoi-Struktur in vielen verschiedenen Richtungen miteinander verbunden und bildet eine stabile und leichte Struktur. Voronoi kann sich aufgrund sei-

ner idealen Aufteilung in seiner Struktur an alle Volumina anpassen. Es kann reguläre und zufällig generierte Strukturen erzeugen und sich daher auch an die statische Belastung anpassen, indem es entweder mehr Streben hinzufügt oder diese verstärkt. Öffnungen und geschlossene Bereiche können genau definiert werden. Eine weitere Studie wurde an den Kagomé-Zellen durchgeführt, die eine ähnliche Struktur wie die Voronoi aufweisen. Der Unterschied ist, dass die spezifische Struktur sich wiederholt und nicht so viele verschiedene Parameter hat, die ihr Aussehen verändern.

Die Kagomé-Zellen sind ein starres System, das sich nicht an unregelmäßige Randbereiche anpassen kann.

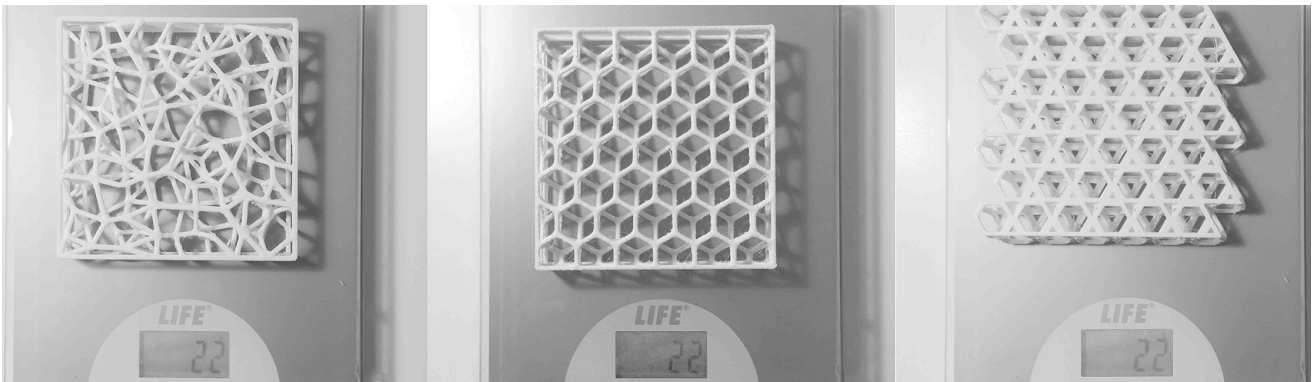


[Abb. 8.3_U1_1]

Oben rechts:
Voronoi-Struktur von Schaum

[Abb. 8.3_U1_2]

Links: ungerichtete Voronoi-Struktur;
Mitte: gerichtete Voronoi-Struktur
Rechts: kangomische Struktur



Inhalt der Geometrieanalyse:

Vergleich von drei verschiedenen Strukturen mit gleicher Masse zur Evaluierung der leistungsfähigsten Traggeometrie

1. Voronoi ungerichtet:

Unregelmäßige räumliche Anordnung von Sechsecken, gleicher Durchmesser, aber variierende Längen, geschlossener Randabschluss.

2. Voronoi gerichtet:

Regelmäßige räumliche Anordnung von Sechsecken, gleicher Durchmesser und gleiche Längen, geschlossener Randabschluss.

3. Kangomische Zellen:

Regelmäßige räumliche Anordnung von Dreiecken, gleicher

Durchmesser und gleiche Längen, offener Randabschluss.

Bewertung/Potenzial:

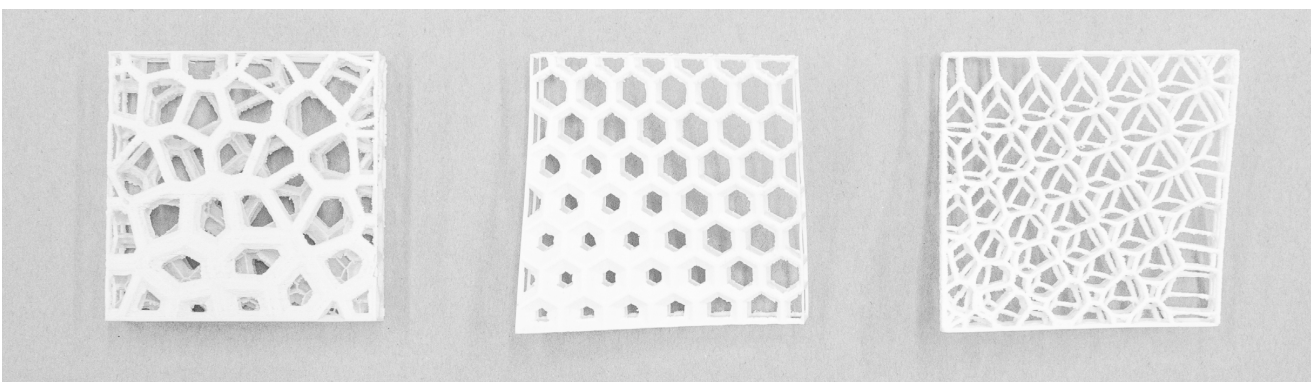
Diese drei Geometrien der gleichen Masse (22g) wurden getestet, um einen Hinweis auf die Tragfähigkeit zu erhalten.

Durch einen Drei-Punkt-Biegeversuch (horizontales Überspannen des Teststücks mit zwei Auflagerpunkten und Einführung einer vertikalen Last in der Mitte) zeigte sich, dass das gerichtete Voronoi die höchste Tragfähigkeit aufwies, da es nicht brach und bis über 57 kg standhielt. Die beiden anderen Testkörper hielten der Belastung nicht Stand und brachen.

Geometrietransfer zur Fassadenfunktion:

Die Voronoi-Struktur kann als tragende Struktur den verschiedenen Lastfällen angepasst werden. Mittels parametrischer CAD-Programme (z. B. Grasshopper) kann die Struktur geometrische Kanten bekommen (Randabschluss) und an eine organischere Form angepasst werden. Verschiedene Modelle zeigen die Möglichkeit eines Verlaufes (Gradienten) von Dichte und Materialdicken in einem doppelt gekrümmten Volumen. Diese Anpassungsmöglichkeiten an unterschiedliche Lastbedingungen innerhalb eines Strukturelements können somit zur Topologieoptimierung genutzt werden.

[11] (Mungenast 2016 : 19)



[Abb. 8.3_U1_3]

Oben: 3D-gedruckte Modelle (FDM) mit gleicher Masse für Vergleichstest der tragfähigkeit; links: ungerichtetes Voronoi; Mitte: gerichtetes Voronoi; rechts: kangomische Struktur

[Abb. 8.3_U1_4]

Unten: 3-D-gedruckte Modelle (FDM). Links: Gradienten Dichte und Materialdicke; Mitte: Gradient Materialdicke; rechts: Gradient Dichte

Ergebnis

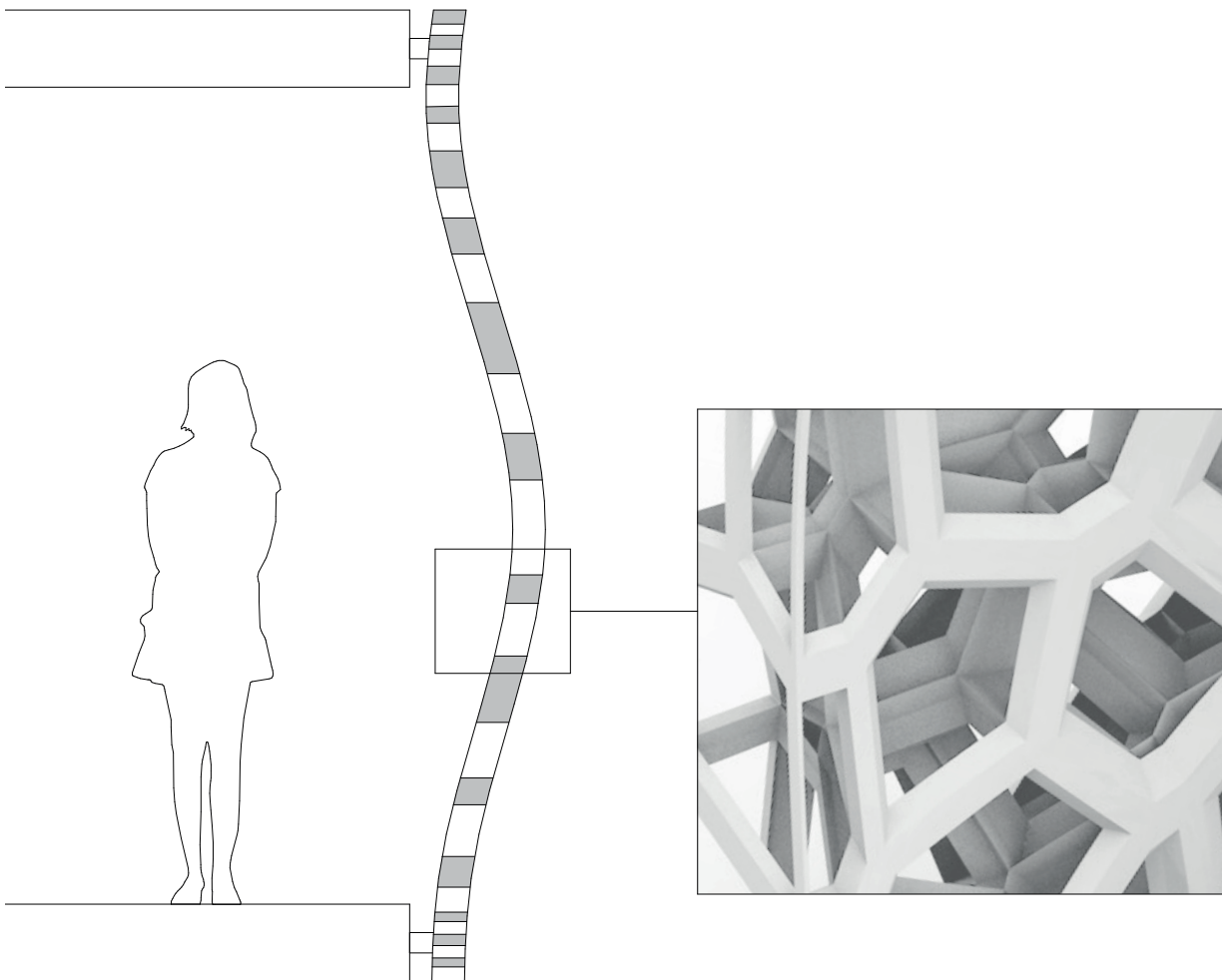
Vorteile:

1. Mit der Ausgangsgeometrie des gerichteten Voronoi lässt sich eine effiziente Geometrie (Festigkeit/Masse) an verschiedene Lastanforderungen und Freiformen anpassen.

2. Hervorzuheben ist die einfache Schließung der Geometrie an den Rändern.

Nachteile:

1. Die Zwischenräume bzw. Hohlräume in der Voronoi-Struktur sind schwierig zu schließen.



[Abb. 8.3_U1_5]

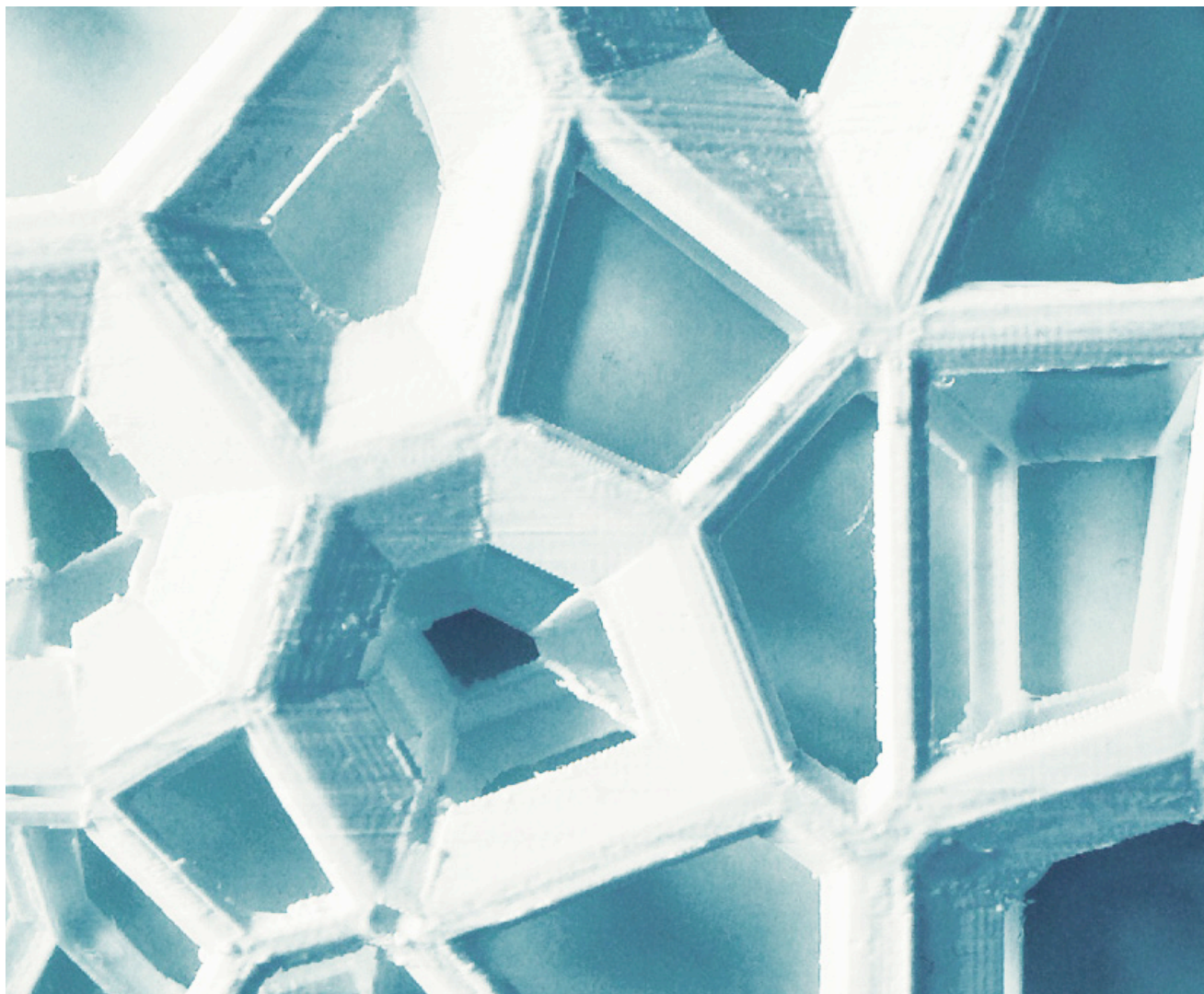
Fassadenschnitt:

Anwendung Voronoi-Tragstruktur

Bewertung

Bewertungskriterien für die Matrix der Funktionsgeometrie zur Weiterentwicklung und Einsatzfähigkeit als funktionsintegrierte Fassade

- | | |
|---|---|
| 1. Materialoptimierung | + |
| 2. Materialfreiheit | + |
| 3. Prozessfreiheit | + |
| 4. Anpassbar an Freiform | + |
| 5. Kombinierbarkeit mit anderen Funktionen | + |
| 6. Einsatz von autoreaktiven Aktivatoren integrierbar | o |



[Abb. 8.3_U1_6]
3-D-gedrucktes Modell (FDM)
der Voronoi-Tragstruktur

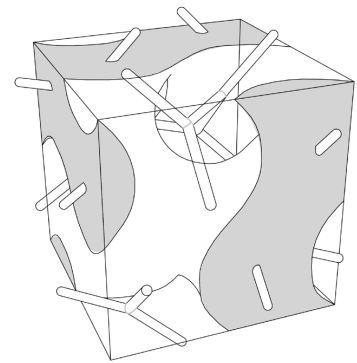
Untersuchung 2 / Schichten (U2)

Studierender: Bruno Knychalla

- Kategorie
Schicht/feststehend

- Funktion
Tragstruktur

- Referenz
Biologische Geometrie:
Schmetterlingsflügel / hyperbolische Minimalflächen



Beschreibung der Ausgangsgeometrien:

Der strukturelle Aufbau der Schuppen von Schmetterlingsflügeln besteht aus hyperbolischen Minimalflächen zur Reflektion von bestimmten Lichtfrequenzen und um stabil, leicht und luftdurchlässig zu sein.

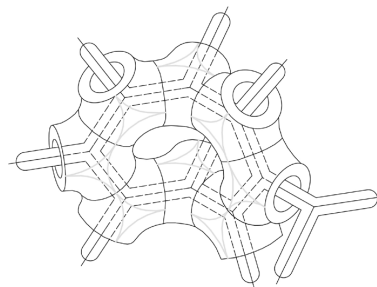
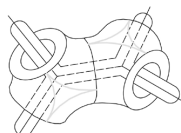
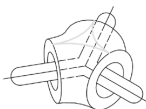
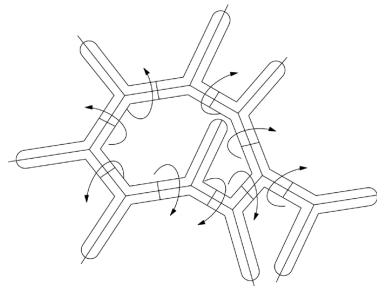
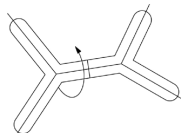
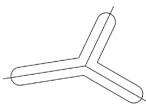
Graphen bilden die Grundgeometrie in deren Abhängigkeit die hyperbolischen Minimalflächen zu einem Kanalsystem sich aufspannen.

Inhalt der Geometrieanalyse:

Aufschlüsselung der Graphen-anordnung für ein singuläres Kanalsystem. Die Graphengeometrie besteht aus einzelnen Y-Grundgeometrien, die in Kombination mit einem zweiten Element mittels einer 90°-Drehung aneinandergesetzt werden. Durch die Fortführung dieses Systems entsteht ein dreidimensionales Raster. Entwickelt man um den Graphen eine Röhrenstruktur, entsteht eine in sich geschlossene Kanalgeometrie.

Bewertung/Potenzial:

Der effiziente Materialeinsatz und die komplexe Geometrie verschiedener Kanäle, die einander durchdringen, birgt ein hohes Potenzial zur Umsetzung von verschiedenen Fassadenfunktionen. Durch die Verwebung der einzelnen Kanalgeometrien miteinander ist diese Geometrie nur mittels Additiver Fertigung herstellbar.



[Abb. 8.3_U2_1]

Oben links: Schmetterlingsflügel

[Abb. 8.3_U2_2]

Oben rechts: Hyperbolische singuläre Kanalgeometrie von Schmetterlingsflügelschuppen

[Abb. 8.3_U2_3]

Unten: Obere Darstellungsreihe: Schrittweiser Aufbau der Graphengeometrie
Untere Darstellungsreihe: Schrittweiser Aufbau der Kanalgeometrie

Geometrietransfer zur Fassadenfunktion:

Diese einzelnen Parameter sind für jeden Kanal separat einstellbar:

- der lichte Durchmesser des Kanals
- der Durchmesser der Kanalwand (Wandstärke)
- die Füllung (intrinsisch und extrinsisch).

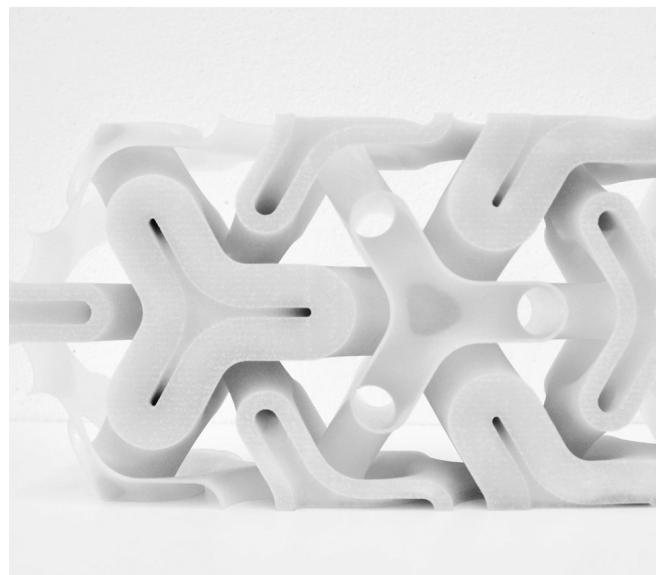
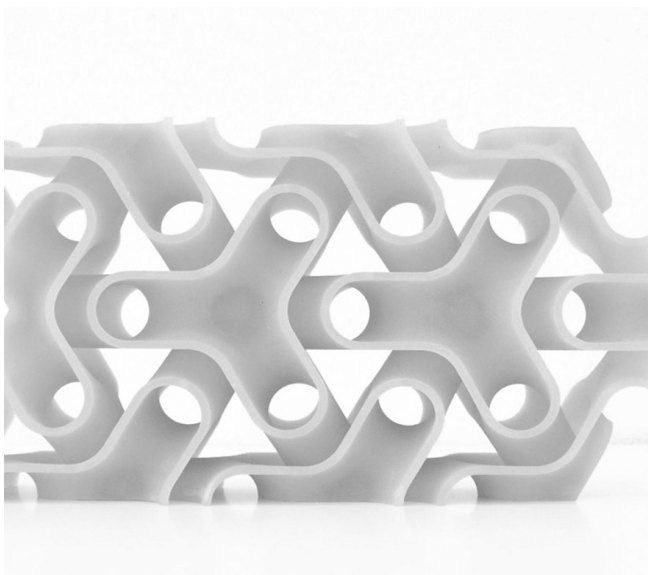
Der Verlauf kann individuell eingestellt werden, um die Unter-

schiede im Durchmesser des Kanals und der Wandstärke auszugleichen. Hieraus lässt sich ein tragendes Bauteil mit minimalem Materialeinsatz konstruieren, in das Kanäle zur natürlichen Lüftung und als Wärmetauscher integriert werden können.

Die Geometrie ist ein trikontinuierliches morphologisches Kanalsystem, das als multifunktionale und höchst materialeffiziente Gebäudehülle fungiert.

Das System besteht aus drei ineinandergreifenden Kanälen, die eine tragende Struktur bilden, wobei jeder Kanal eine einzigartige Aufgabe und Morphologie aufweist. Durch generische Programmierung kann der Transport von verschiedenen Medien wie Luft, Wasser und Licht innerhalb und außerhalb der Kanäle an jedem Punkt der Gebäudehülle kontrolliert werden.

[11] (Mungenast 2016 : 25)



[Abb. 8.3_U2_4]
3-D-gedrucktes Modell (3DP).
Darstellung der einzelnen Kanäle.
Gleicher lichter Durchmesser und gleiche
Wandstärke des Kanals

[Abb. 8.3_U2_5]
3-D-gedrucktes Modell (3DP).
Darstellung der verschiedenen Parameter der einzelnen Kanäle.
Unterschiedlicher lichter Durchmesser
und Wandstärke des Kanals

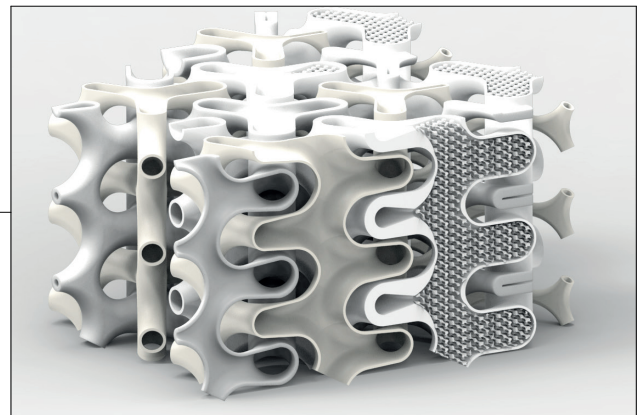
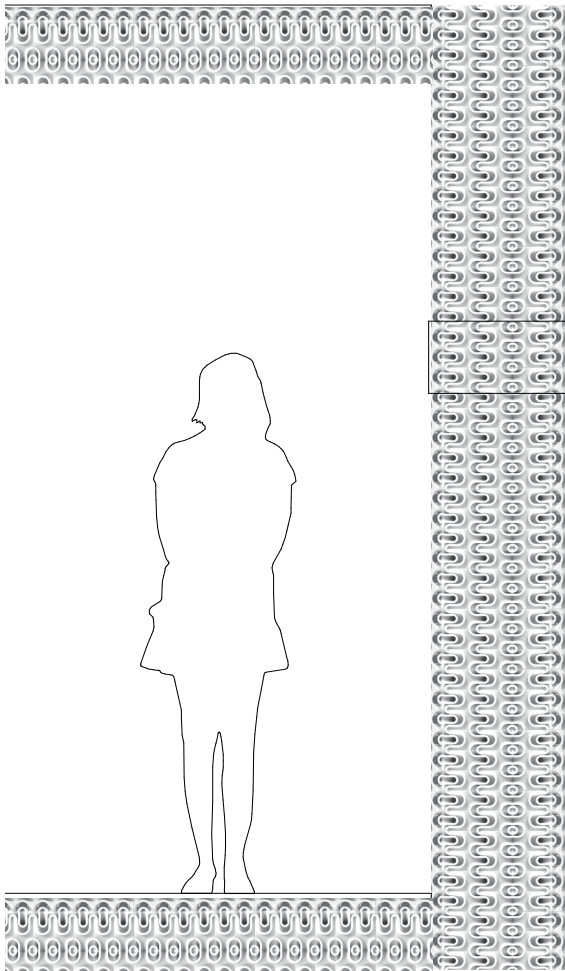
Ergebnis

Vorteile:

1. Hohe Festigkeit bei minimalem Materialeinsatz.
2. Flexibles Kanalsystem, individuell anpassbar an verschiedene Anforderungen (Funktionen) mit verschiedenen Medien.
3. Als Wand- und Deckengeometrie einsetzbar.

Nachteile:

1. Durch die ineinandergreifende Kanalstruktur ist die Herstellung nur mittels Bindeverfahren möglich.



[Abb. 8.3_U2_6]

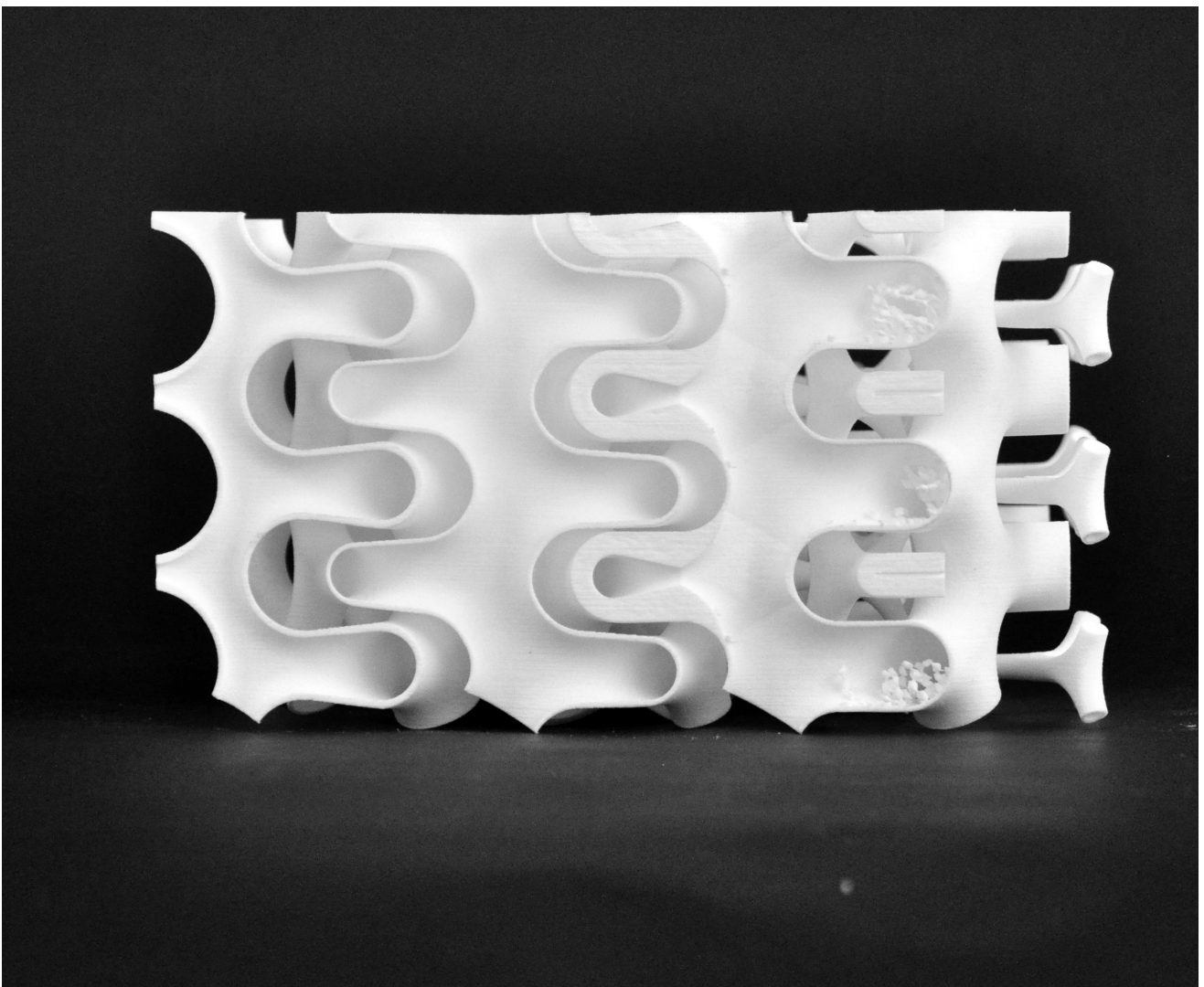
Fassadenschnitt:

Anwendung der hyperbolischen
Kanalstruktur

Bewertung

Bewertungskriterien für die Matrix der Funktionsgeometrie zur Weiterentwicklung und Einsatzfähigkeit als funktionsintegrierte Fassade

1. Materialoptimierung	+
2. Materialfreiheit	+
3. Prozessfreiheit	-
4. Anpassbar an Freiform	o
5. Kombinierbarkeit mit anderen Funktionen	o
6. Einsatz von autoreaktiven Aktivatoren integrierbar	+



[Abb. 8.3_U2_7]

3-D-gedrucktes Modell (3DP).

Ausschnitt der Wandgeometrie. Sichtbar sind die unterschiedlichen Ausführungen der Kanalgeometrie.

Verschiedene Parameter, Wandstärke und Durchmesser

Untersuchung 3 / Schichten (U3)

Studierende: Diego Buonanno / Tommaso Pojero

- Kategorie
Schicht/feststehend
- Funktion
Dämmung
- Referenz
Biologische Geometrie:
Korkstruktur
Künstliche Geometrie:
Aerogelstruktur

Beschreibung der Ausgangsgeometrien:

Die Geometrie dämmender Bauelemente ist in zwei Geometrieformen unterteilt: Fasern und Zellen. Zu den Faserdämmstoffen gehören zum Beispiel Mineralfaserdämmplatten und zu den Zeldämmstoffen beispielsweise Kork- oder PUR-Hartschaumplatten.

Faserdämmplatten haben den Nachteil geringerer statischer Festigkeit, da die Verbindung der einzelnen Fasern nur mittels Scherkräften hergestellt wird und eine gewisse Lockerheit ge-

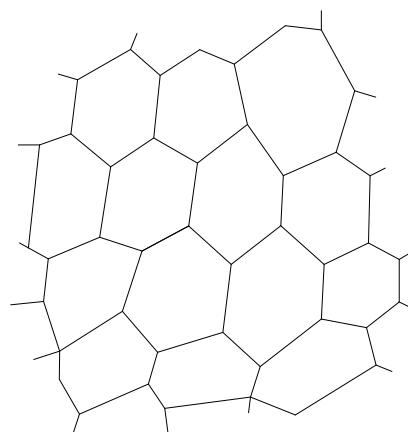
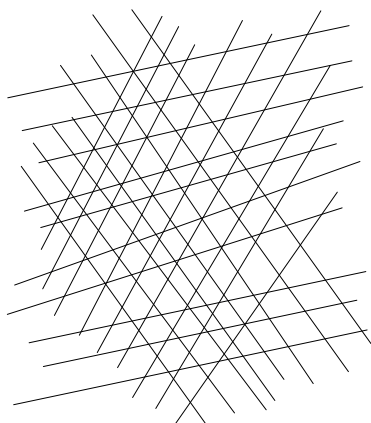
währleistet werden muss, damit der Luftanteil für die optimalen Dämmeigenschaften sichergestellt ist.

Zellstrukturen – PUR-Schäume, Glas (Foamglas-befahrbare Schwerlastdämmung) usw. – weisen vor allem höhere Druck-, aber auch bessere Zugfestigkeiten auf.



Inhalt der Geometrieanalyse:

Aus den zuvor aufgeführten Gründen konzentriert sich die Untersuchung auf Zellstrukturen und analysiert die Zellstruktur des sehr effizienten Dämmstoffs Aerogel. Die Zellstruktur von Aerogel besteht aus unregelmäßigen Zellen. Bei unregelmäßigen geschlossenen Zellstrukturen wie Aerogel ist das A/V-Verhältnis nicht ideal, aber es finden keine Luftbewegungen zwischen den Zellen statt. Druck- und Zuglasten lassen sich aufnehmen und komplexe Volumen füllen. Die Zellgeometrie lässt sich mittels 3-D-Druck herstellen.



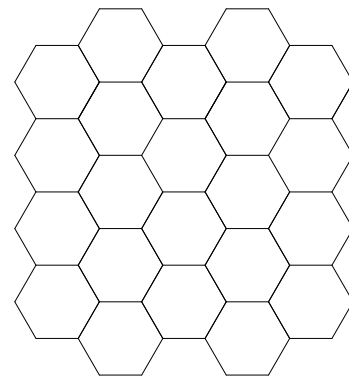
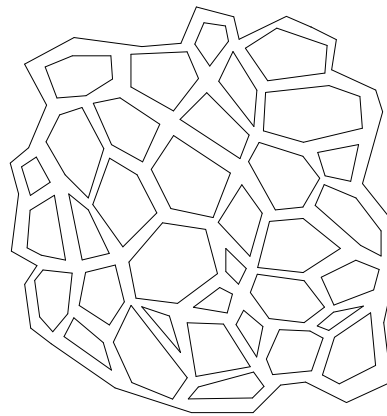
[Abb. 8.3_U3_1]

Oben: Korkzellstruktur

[Abb. 8.3_U2_2]

Unten: Kategorien der Dämmgeometrien

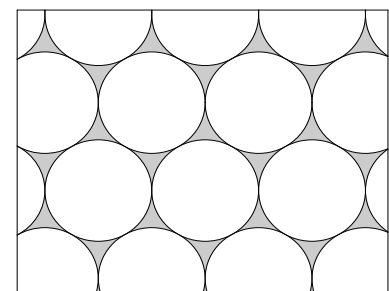
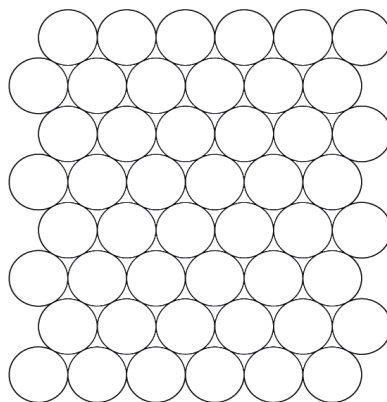
Links: Fasern Rechts: Zellen



Geometrietransfer zur Fassadenfunktion:

Der Materialanteil, aus dem die Zellwände bestehen, ist der Wärmeleiter. Deshalb spielt das Verhältnis von Volumen und Oberflächen eine entscheidende Rolle. Um die Geometrie zu optimieren, wird das beste A/V-Verhältnis einer Kugel genutzt. Um eine freie Luftzirkulation zwischen den Kugeln zu verhindern, werden kleine dreieckige Flächen zwischen

jeder Kugel hinzugefügt. Dadurch erhält man die Grundgeometrie einer hocheffizienten Dämmung. Um eine Konvektion im Inneren der Zellen zu vermeiden, ist der Durchmesser auf 3 cm begrenzt. [11] (Mungenast 2016 : 49)



[Abb. 8.3_U3_3]

Oben: Zellstruktur der Geometrieentwicklung
 Oben links: Aerogel (Schlechtes A/V-Verhältnis, keine Luftzirkulation)
 Oben rechts: Wabenzellstruktur (Besseres A/V-Verhältnis, keine Luftzirkulation)

[Abb. 8.3_U3_4]

Unten links: Kugelgeometrie (Bestes A/V-Verhältnis, Luftzirkulation)
 Unten rechts: Kugelgeometrie mit Dreieckflächen und den Kugelzwischenräumen (Bestes A/V-Verhältnis, keine Luftzirkulation)

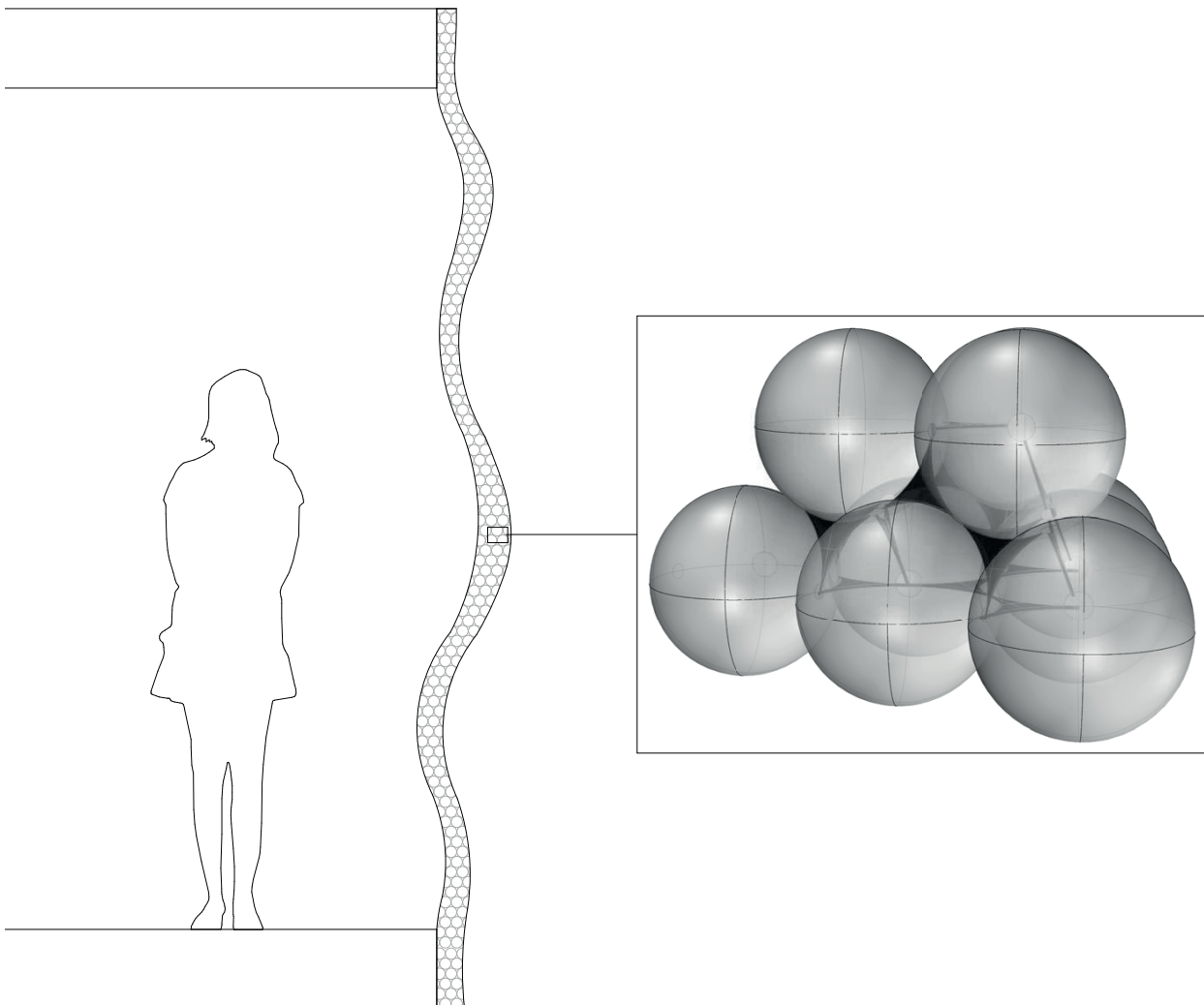
Ergebnis

Vorteile:

1. Hohe Materialeffizienz
2. Freie Materialwahl
3. Anpassbarkeit an Freiformen
4. Dämmung mit hoher Festigkeit

Nachteile:

1. Einschränkung bei 3-D-Druck-Verfahren – um Lufteinschlüsse in den Zellen herzustellen, sind Pulver-Prozesse nicht einsetzbar.



[Abb. 8.3_U3_5]

Fasadenschnitt:

Anwendung der Dämmgeometrie

Bewertung

Bewertungskriterien für die Matrix der Funktionsgeometrie zur Weiterentwicklung und Einsatzfähigkeit als funktionsintegrierte Fassade

- | | |
|---|---|
| 1. Materialoptimierung | + |
| 2. Materialfreiheit | + |
| 3. Prozessfreiheit | - |
| 4. Anpassbar an Freiform | + |
| 5. Kombinierbarkeit mit anderen Funktionen | + |
| 6. Einsatz von autoreaktiven Aktivatoren integrierbar | o |



[Abb. 8.3_U3_6]

3-D-gedrucktes Modell (FDM).
Auschnitt der Dämmgeometrie mit Dreiecksflächen
zur Vermeidung der Luftzirkulation

Untersuchung 4 / Öffnungen (U4)

Studierender: Dominik Baumann

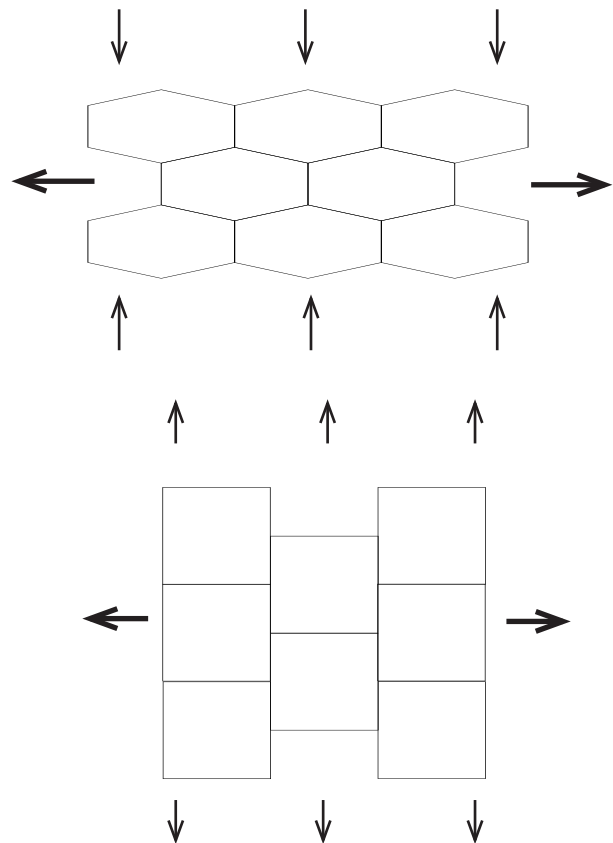
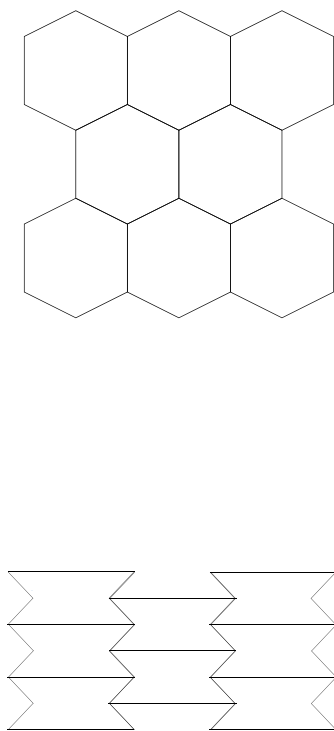
- Kategorie
Öffnung/dynamisch
- Funktion
Natürliche Belüftung
- Referenz
Künstliche Geometrie:
Auxetische Struktur



Beschreibung der Ausgangsgeometrien:

Normale Geometrien verhalten sich wie in Abb. 8.3_U4_1 dargestellt. Wenn horizontale Zugkräfte auf sie einwirken wird die Durchmesserfläche geringer. Auxetische Geometrien haben

die Eigenschaft, sich bei der Einwirkung von Zugkräften in der Durchmesserfläche zu vergrößern. Dies ist auf die Geometrie zurückzuführen, die eine Expansion bei Zugbelastung zulässt.



[Abb. 8.3_U4_1]

Mitte: Normale Geometrie.

Links: Ausgangsgeometrie ohne Kräfteinwirkung

Rechts: Zusammenziehen der Geometrie bei Zugbelastung

[Abb. 8.3_U4_2]

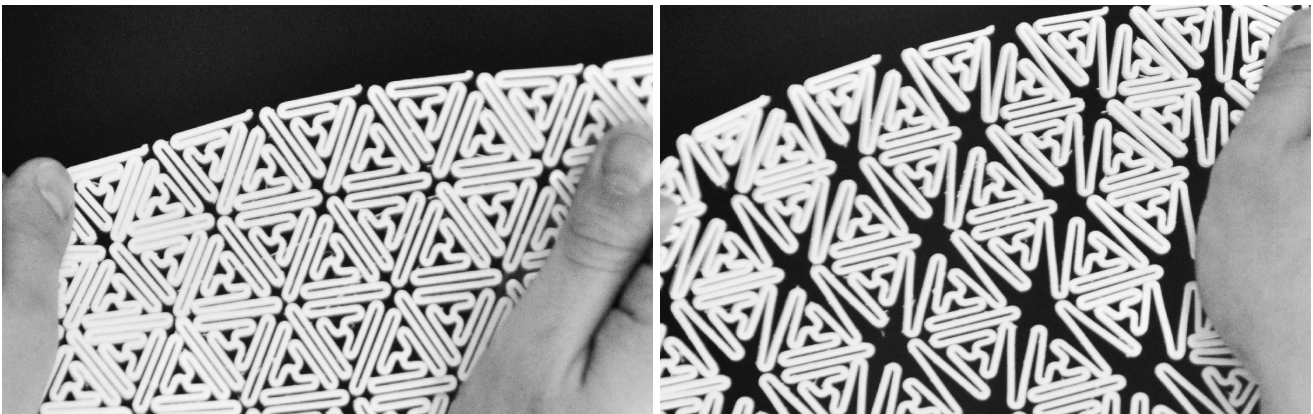
Unten: Auxetische Geometrie.

Links: Ausgangsgeometrie ohne Kräfteinwirkung

Rechts: Ausdehnung der Geometrie bei Zugbelastung

[Abb. 8.3_U4_0]

Oben: Auxetische Faltgeometrie



Inhalt der Geometrieanalyse:

Eine auxetische Geometrie war die Grundlage für die Entwicklung einer beweglichen Geometrie, die sich durch Zugkräfte ausdehnt. Dieser Bewegungsmechanismus hat das Potenzial, im Fassadenbereich als Bewegungsmechanismus für autoreaktive Fassadenkomponenten eingesetzt zu werden. Dies kann über den Materialausdehnungskoeffizienten in Abhängigkeit von Temperatur oder Feuchtigkeit oder zusätzliche externe Aktuatoren geschehen.

Geometrietransfer zur Fassadenfunktion:

Diese auxetische Geometrie wird für die Entwicklung einer autoreaktiven Geometrie für eine „atmende Fassade“ genutzt, die sich durch Expansions- oder Kontraktionsbewegung des Materials an verschiedene Witterungsverhältnisse anpasst. Eine zweidimensionale auxetische Geometrie dient als Grundlage, da die Bewegung in zwei Achsen erfolgt, um eine Öffnungsrichtung der Fassade zu gewährleisten. An den jeweiligen Ursprungspunkten der Ein-

zelgeometrien wird ein weiteres Bauteil, die Schindelgeometrie, angefügt, um einen Wetterschutz zu integrieren – um die Fassade im Winter komplett zu schließen und bei wärmerer Witterung und der dadurch resultierenden Ausdehnung der Gesamtgeometrie Fugen zwischen den Schindeln zur Belüftung zu schaffen. Dadurch wird einer Überhitzung entgegengewirkt. Die Schindeln haben eine optimierte Oberflächenform, die zwei



[Abb. 8.3_U4_4]

Oben: 3D-gedrucktes Modell (FDM).
 Modell zur Analyse der auxetischen Geometrie und deren Weiterentwicklung
 Links: Ausgangsgeometrie ohne Kräfteinwirkung
 Rechts: Ausdehnung der Geometrie bei Zugbelastung

[Abb. 8.3_U3_5]

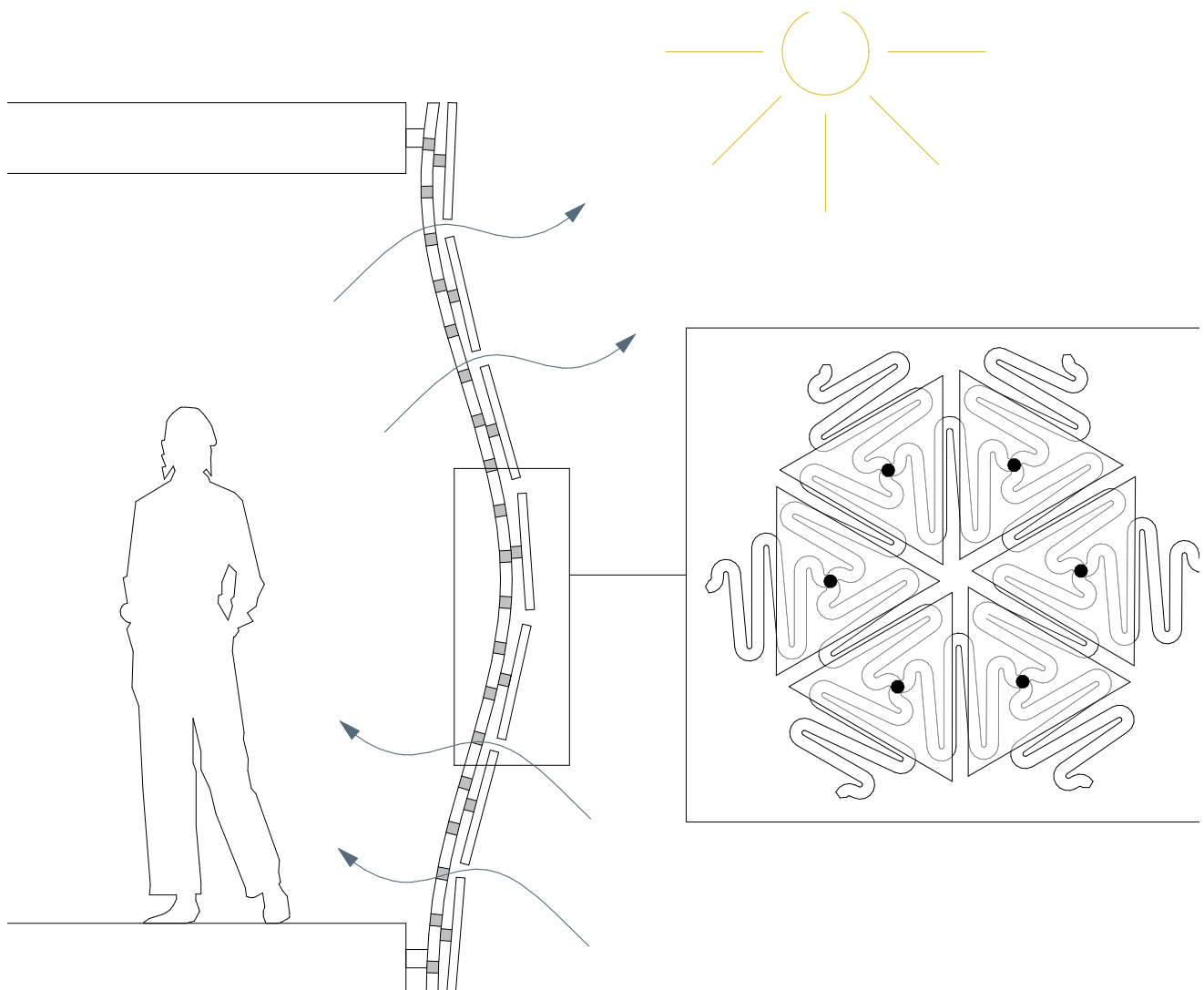
Unten: 3D Modell
 Ansicht der Gebäudehülle mit Schindeln und der auxetischen Bewegungsgeometrie

Funktionen übernehmen: erstens die regulierte (geführte) Entwässerung und zweitens eine optimierte Geometrie zur Materialeinsparung; dies erfolgt über eine Verstärkung der Schindelkanten. Die Profile der auxetischen Geometrie sind ebenfalls materialeffizient optimiert. Die auxethische Geometrie dient als Wetterschutz und dynamische, autarke Regelung von Belüftung und Sonnen-

einstrahlung. Diese regulativen Funktionen werden in einer zusammenhängenden Expansions- oder Kontraktionsbewegung realisiert, die auf externe Parameter wie Temperatur und Feuchtigkeit reagiert.

Idealerweise würde das Material selbst auf Feuchtigkeits- oder Temperaturänderungen reagieren.

[11] (Mungenast 2016 : 43)

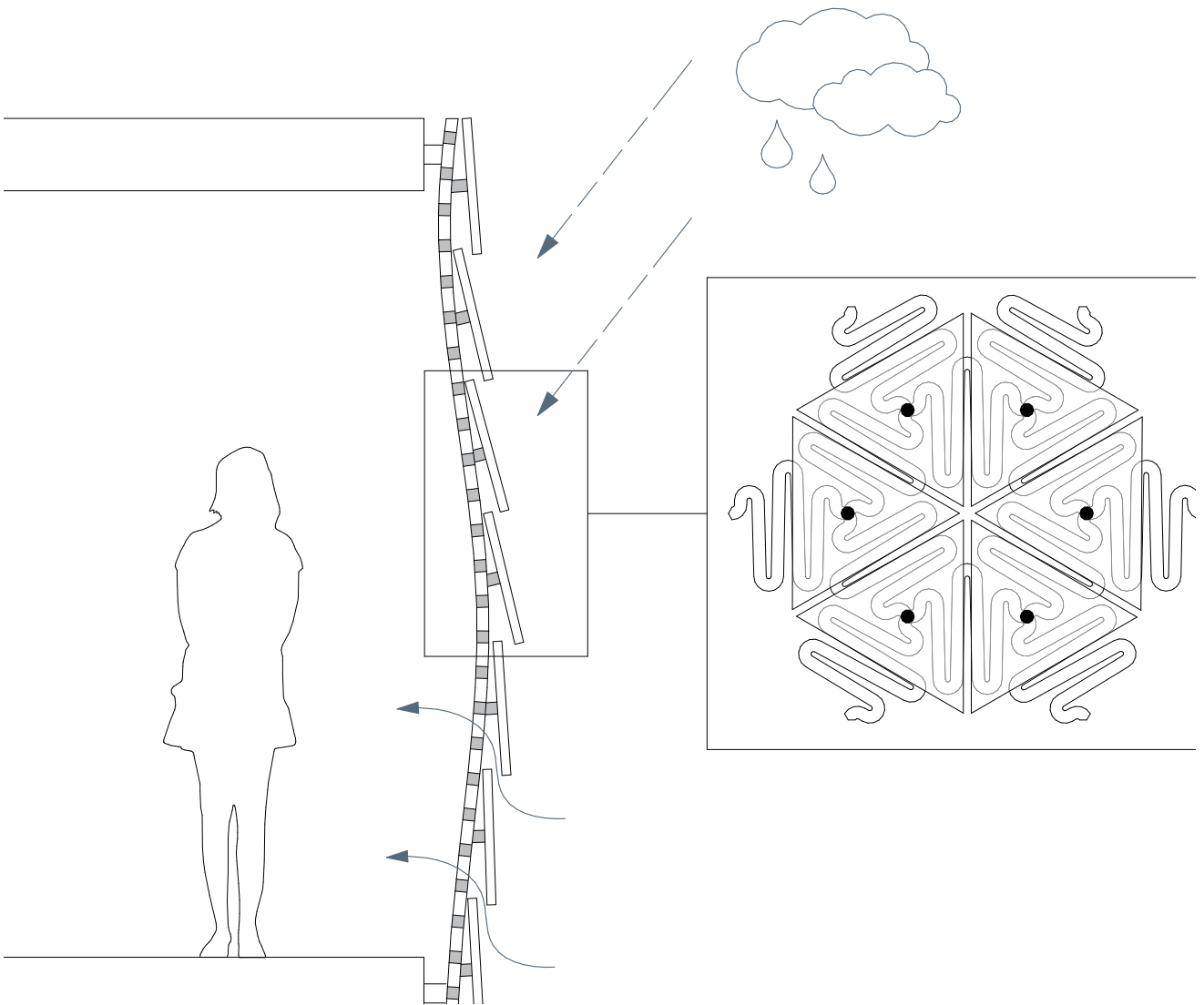


[Abb. 8.3_U4_6]

Fassadenschnitt:

Anwendung der auxethischen Geometrie als selbstregulierende Fassade

Sommer / warm: Expansion der Gebäudehülle zur natürlichen Befüftung



[Abb. 8.3_U4_7]

Fassadenschnitt:

Anwendung der auxethischen Geometrie als selbstregulierende Fassade
Sommer / kühl: geringe Expansion der Gebäudehülle zur natürlichen Befügung

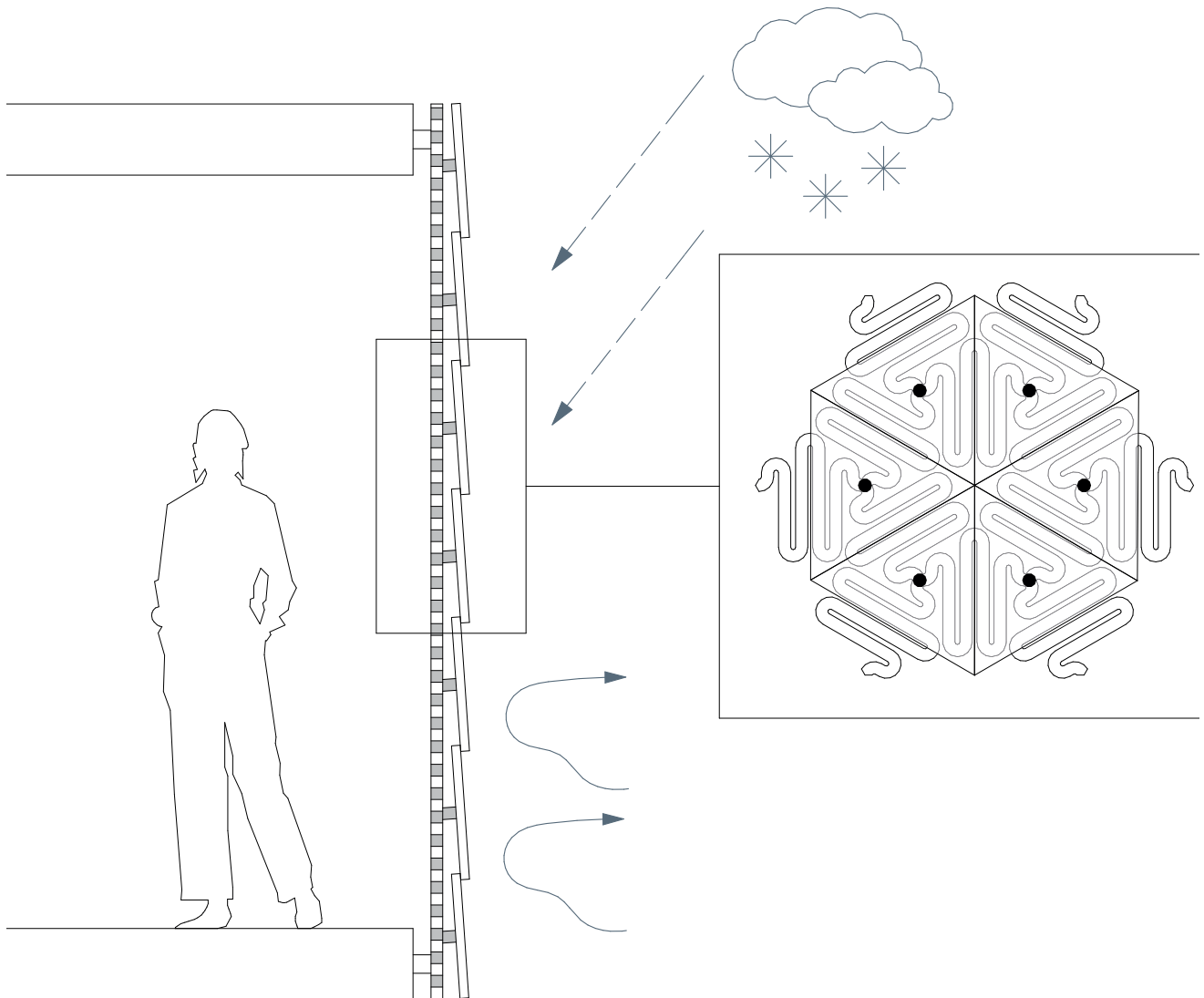
Ergebnis/Bewertung

Vorteile:

1. Bewegungsmechanismus mit einem Material
2. Anpassbarkeit an Freiformen
3. Geometrie zur autoreaktiven adaptiven Anwendung
4. Freie Prozesswahl

Nachteile:

1. Hinsichtlich der Ausführung der Bewegung ist diese vom Material abhängig (Materialbindung)



[Abb. 8.3_U4_8]

Fassadenschnitt:

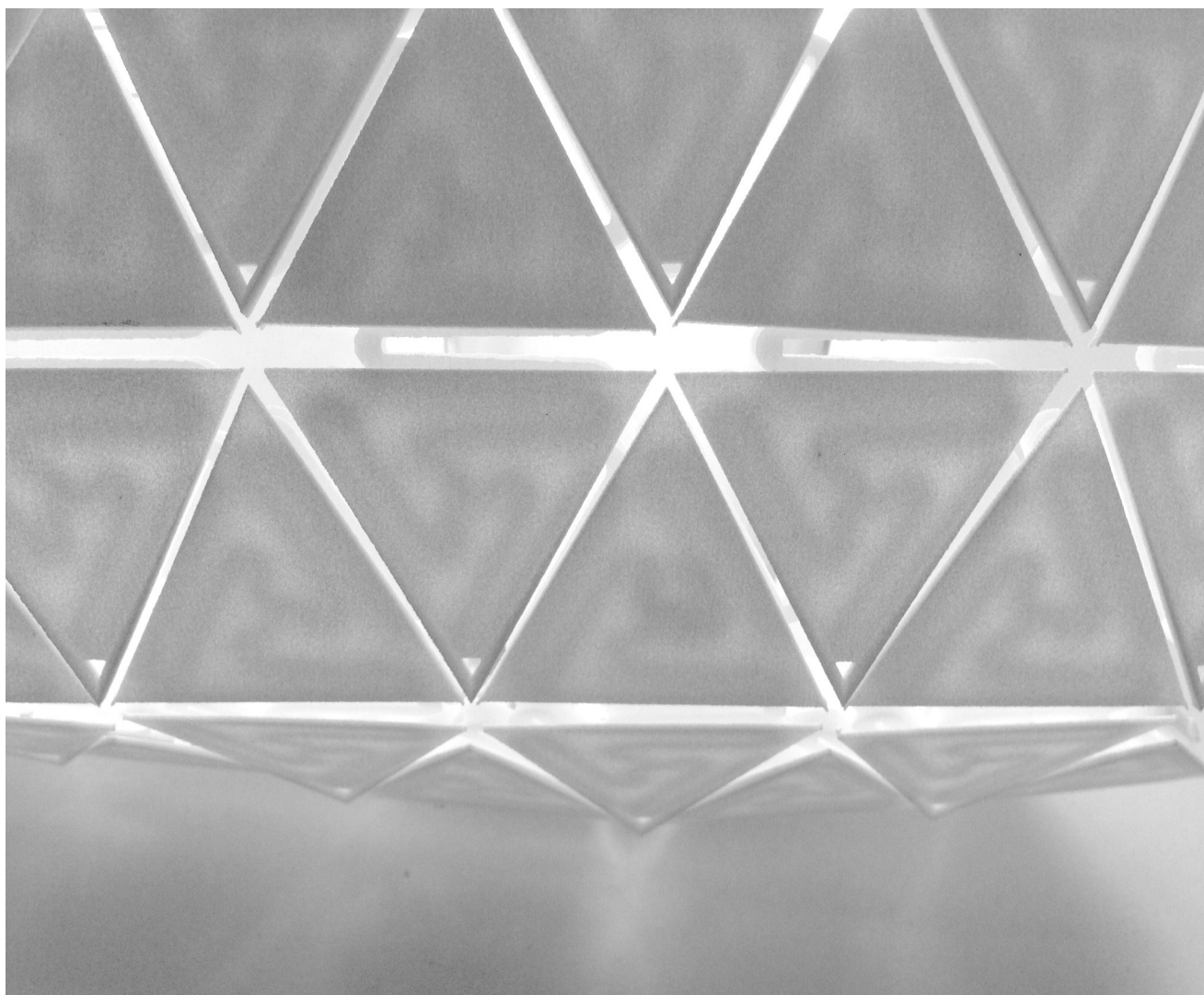
Anwendung der auxethischen Geometrie als selbstregulierende Fassade

Winter / kalt: geschlossene Gebäudehülle

Bewertung

Bewertungskriterien für die Matrix der Funktionsgeometrie zur Weiterentwicklung und Einsatzfähigkeit als funktionsintegrierte Fassade

- | | |
|---|---|
| 1. Materialoptimierung | + |
| 2. Materialfreiheit | - |
| 3. Prozessfreiheit | + |
| 4. Anpassbar an Freiform | + |
| 5. Kombinierbarkeit mit anderen Funktionen | - |
| 6. Einsatz von autoreaktiven Aktivatoren integrierbar | + |



[Abb. 8.3_U3_9]

3-D-gedrucktes Modell (3DP).

Ausschnitt der auxetischen Geometrie in Kombination mit Schindeln als Wetterschutz und offenen Fugen zur Luftzirkulation

Untersuchung 5 / Öffnungen (U5)

Studierender: Iv Terezof

- Kategorie
Öffnung/dynamisch
- Funktion
Natürliche Belichtung
- Referenz
Biologische Geometrie:
Bewegungsmechanismus
Venusfalle



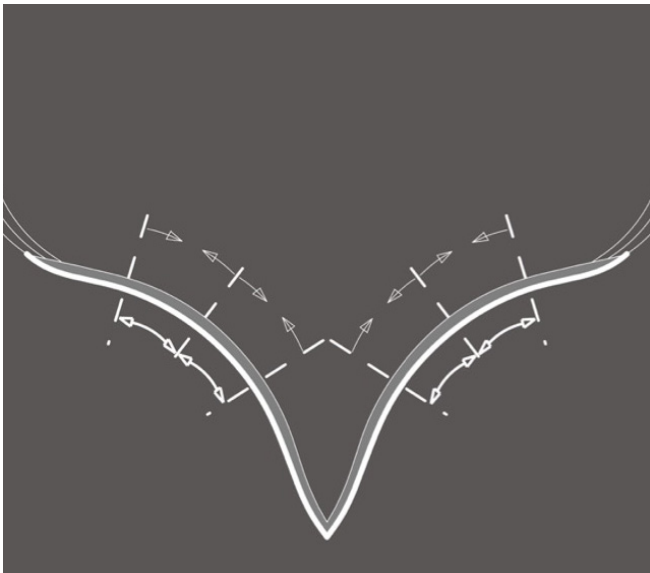
Beschreibung der Ausgangsgeometrien:

Hygroskopische Bewegungsmechanismen finden sich im biologischen Vorbild der Pinienzapfen: Durch die Aufnahme von Luftfeuchtigkeit in einer Faserrichtung wird das Volumen einseitig vergrößert. Somit wird eine Bewegung aktiviert, die reversibel ist – bei abnehmender Feuchte, wenn sich das Volumen wieder verringert. Diese Volumenänderung findet bei der Venusfal-

le durch einen biochemischen Prozess statt, welcher eine Volumenänderung herbeiführt: Die Vorspannung der Ausgangsgeometrie wird durch den Abbruch mehrerer Sensorhaare und die damit eingeleitete Freisetzung von chemischen Stoffen in eine schnelle Bewegung umgesetzt, diese ist nicht reversibel.

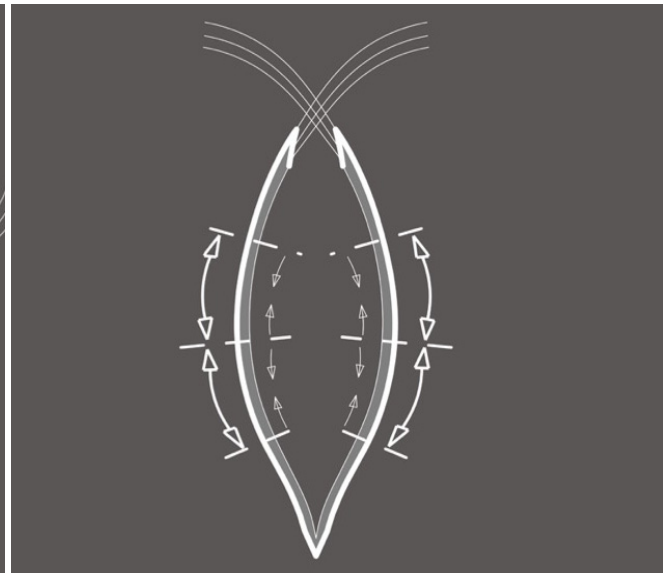
Inhalt der Geometrieanalyse:

Die Kombination von Vorspannung und Volumenänderung sind Aktivatoren, durch die eine Bewegung mehrmals durchgeführt werden kann, weshalb das Potenzial zum Einsatz in der Fassade als 3D-druckbares Bewegungselement hoch ist. Ein beweglicher Sonnenschutz oder Lüftungsklappen sind als Anwendung denkbar. Elektroantriebe und herkömmliche Scharniere wären nicht nötig.



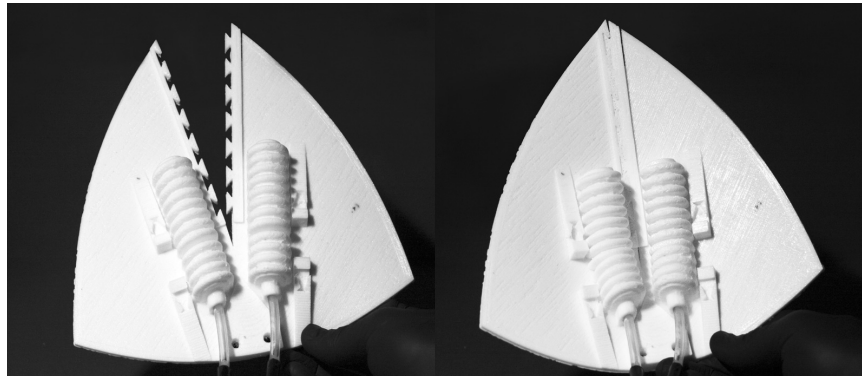
[Abb. 8.3_U5_1]

Oben: Hygroskopischer Bewegungsablauf eines Pinienzapfens
Links: Bei Feuchtigkeit geschlossen
Rechts: Bei Trockenheit geöffnet



[Abb. 8.3_U5_2]

Unten: Biochemischer Bewegungsablauf der Venusfalle
Links: geöffneter Zustand, Längenausdehnung auf der Innenseite
Rechts: geschlossener Zustand nach Aktivierung des biochemischen Prozesses ist die Längenausdehnung der Außenseite höher, dadurch schließt sich die Geometrie

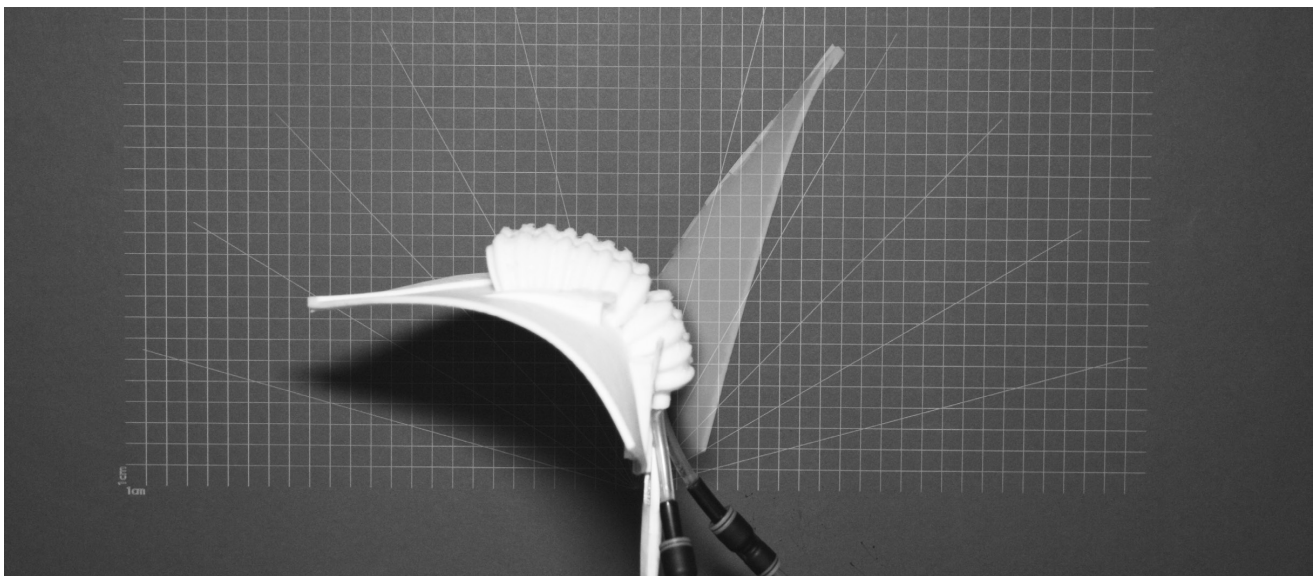


Geometrietransfer zur Fassadenfunktion:

Der Aktivator, die Geometrie zum Aktivieren der Bewegung, wird durch ein Volumen hergestellt, welches sich ausdehnen kann (Falt- bzw. Ziehharmonika-geometrie) und durch die lineare Verbindung zum Blattelement (vorgespannte Fläche) eine kontrollierte Bewegungsrichtung sicherstellt. Dieser Aktivator kann durch verschiedene Techniken eine Volumenänderung erfah-

ren, zum Beispiel durch Paraffinwachs oder durch Druckluft. Ein weiterer wichtiger Aspekt von Bewegungsmechanismen ist die Rückwärtsbewegung. Das Paraffinwachs oder die Luft sollte wieder in die Ursprungsposition des Aktivators geleitet werden, um einen zirkulären Bewegungsablauf zu gewährleisten. Bei dieser Untersuchung wird die Vorspannung eingesetzt, da diese geometrisch herstellbar ist. Die Geometrie des Blattelements wird zweidi-

mensional mit einer V-Fuge und Schwalbenschwanz-Zargen gedruckt und danach verbunden; daraus ergibt sich eine Vorspannung (Wölbung) des Blattelements. Diese Vorspannung wird durch die Volumenausdehnung im Aktivator überwunden, dadurch ist eine schnelle Bewegung möglich. Wenn die Volumenausdehnung abnimmt, springt die Blattgeometrie wieder in die Ursprungsposition zurück.



[Abb. 8.3_U5_3]

3-D-gedrucktes Modell (FDM).

Modell zur Analyse der Vorspannungs-Geometrie und der Aktuatorenkammer
Links: V-Fuge mit Schwalbenschwanz-Verbindung wird offen gedruckt
Rechts: Durch das Zusammenstecken wird die Vorspannung aufgebaut

[Abb. 8.3_U5_4]

3-D-gedrucktes Modell (FDM).

Mit Druckluft wird die Bewegung reguliert
Bewegungswinkel beträgt über 90°

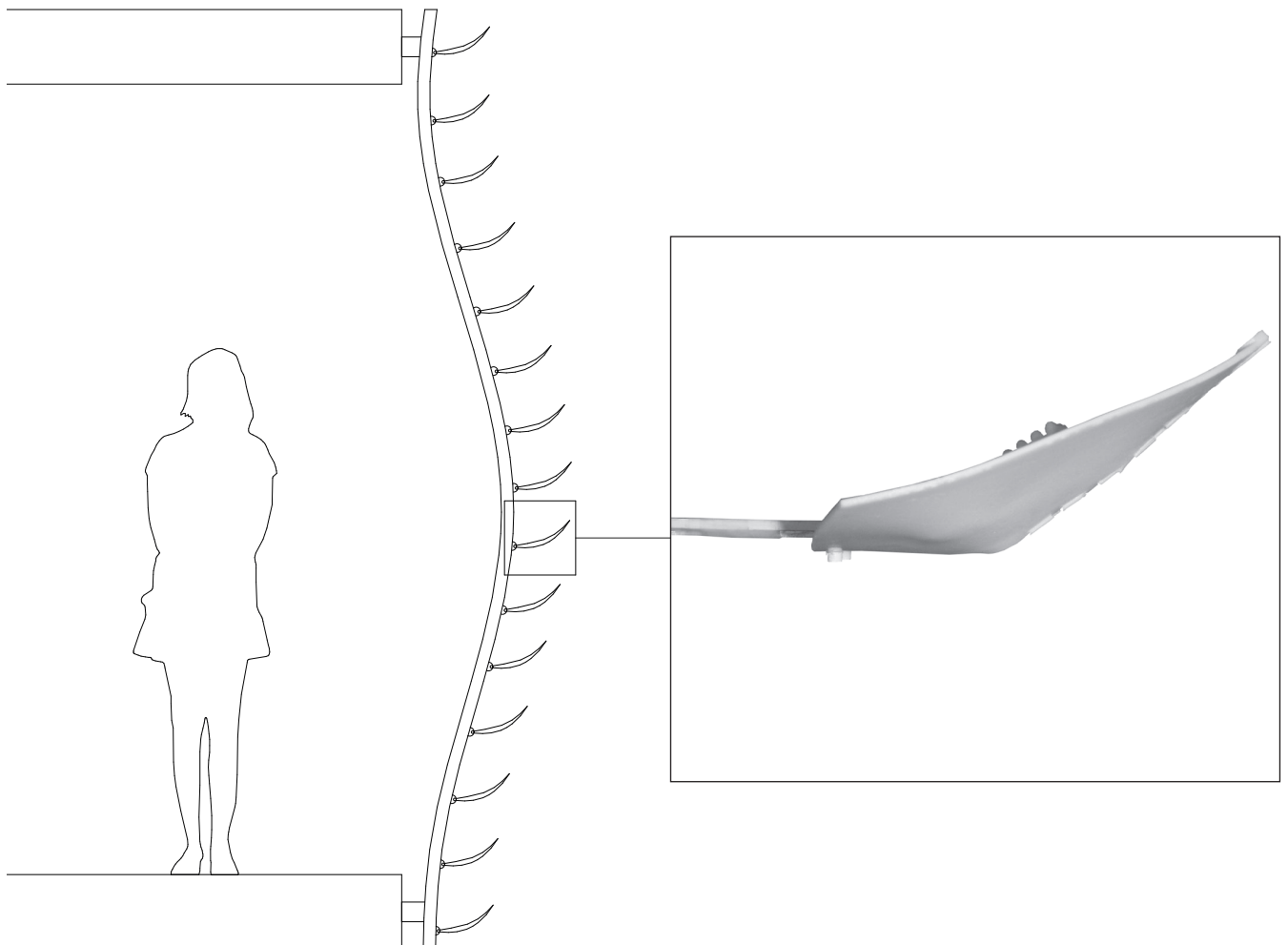
Ergebnis

Vorteile:

1. Bewegungsmechanismus mit einem Material
2. Anpassbarkeit der ‚Blattflächen‘ an verschiedene Anforderungen
3. Anpassbarkeit der Aktuatoren an verschiedene Lastfälle
4. Geometrie zur autoreaktiven adaptiven Anwendung
5. Freie Prozesswahl
6. Einsatz von verschiedenen Medien als Aktuator (Paraffinwachs/ Luftdruck)

Nachteile:

1. Materialabhängigkeit, um die Bewegung auszuführen (Materialbindung) > flexibles Material



[Abb. 8.3_U5_5]

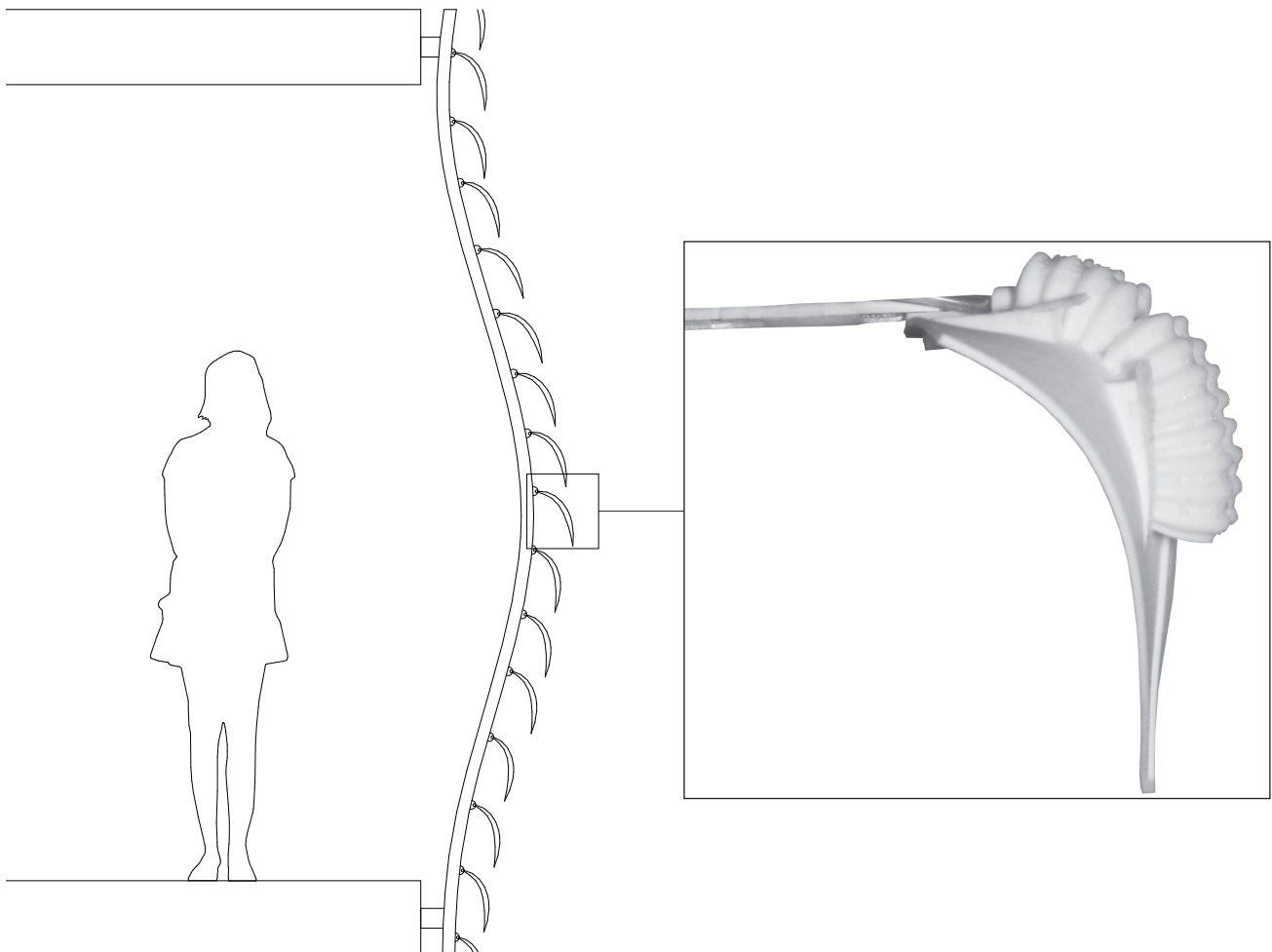
Fassadenschnitt:

Anwendung Ost/West-Orientierung als selbstregulierender Sonnenschutz / Tageslichtlenkung
Winter / kalt: geöffnet

Bewertung

Bewertungskriterien für die Matrix der Funktionsgeometrie zur Weiterentwicklung und Einsatzfähigkeit als funktionsintegrierte Fassade

1. Materialoptimierung	+
2. Materialfreiheit	-
3. Prozessfreiheit	+
4. Anpassbar an Freiform	+
5. Kombinierbarkeit mit anderen Funktionen	-
6. Einsatz von autoreaktiven Aktivatoren integrierbar	+



[Abb. 8.3_U5_6]

Fassadenschnitt:
Anwendung Ost/West-Orientierung als
selbstregulierender Sonnenschutz / Tageslichtlenkung
Sommer / warm: geschlossen

Untersuchung 6 / Öffnungen (U6)

Studierende: Moritz Rieke / Maximilian Peter

- Kategorie
Öffnung/dynamisch

- Funktion
Natürliche Belüftung

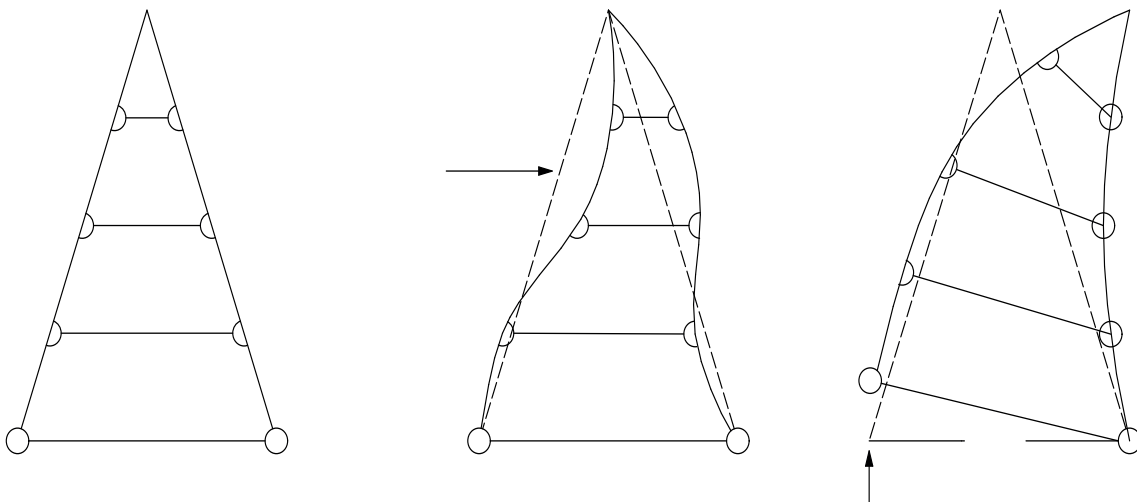
- Referenz
Biologische Geometrie:
Bewegungsmechanismus Fisch-
flosse

Beschreibung der Ausgangs- geometrien:

Die Grundgeometrie des „Fin-Ray-Effekts“ erlaubt es, Bewegung zu erzeugen. In der Anatomie von Fischen sind die Flossenstrahlen für die Bewegung der Flossen verantwortlich. Ihr vereinfachter Abschnitt basiert auf einem Dreieckssystem. Die beiden längeren Schenkel des Dreiecks haben Verbindungen, die das Dreieck in trapezförmige



Kammern teilen. Diese Trapezformen bewahren die Flexibilität des Systems. Eine wellenartige Bewegung der Lochgeometrie wird durch Verschieben der Basispunkte ausgelöst.



[Abb. 8.3_U6_3]

Bewegungsmechanismus der Flosse:

Links: Dreieckige Grundstruktur. Die Schenkel des Dreiecks sind flexibel, die horizontalen Verbindungen sind steif
Mitte: Auf seitlichen Druck reagiert die Struktur flexibel
Rechts: Auf die Verschiebung der Basispunkte reagiert die Struktur mit einer Richtungsänderung

[Abb. 8.3_U6_1]

Fischflosse Lachs

Inhalt der Geometrieanalyse:

Diese bewegliche Geometrie kann sehr fein gesteuert werden und vermeidet den Einsatz von herkömmlichen Scharnieren.

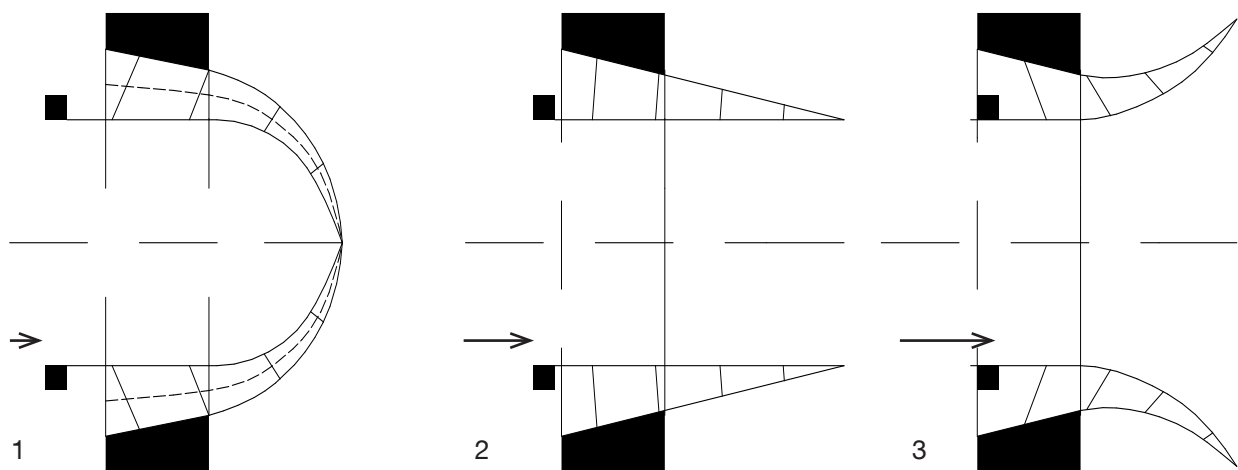
Geometrietransfer zur Fassadenfunktion:

Mit dieser Geometrie wurde ein flaches, dreieckiges Element entwickelt, das entlang der Seiten eines Dreiecks angeordnet ist, um ein dreidimensionales Modul zu bilden.

In seinem geschlossenen Zustand ähnelt das Modul einer Pyramide mit gekrümmten Flächen,

die sich dann – ähnlich wie eine Blume – öffnet. Diese Bewegung wird mit einem einfachen Push-pull-Mechanismus gesteuert; dies wird durch die Anbringung eines Rahmens erreicht, der alle Basispunkte verbindet. So kann man die Öffnungsparameter der drei Schließelemente auch unterschiedlich über ein Bedienelement (Rahmen) steuern.

[11] (Mungenast 2016 : 31)



[Abb. 8.3_U6_4]

Schema des Öffnungsmechanismus.

Von Schritt 1 bis 3 wird die Bewegung durch die Verschiebung der Basispunkte erreicht. So kann man als Nutzer den Öffnungsgrad steuern.

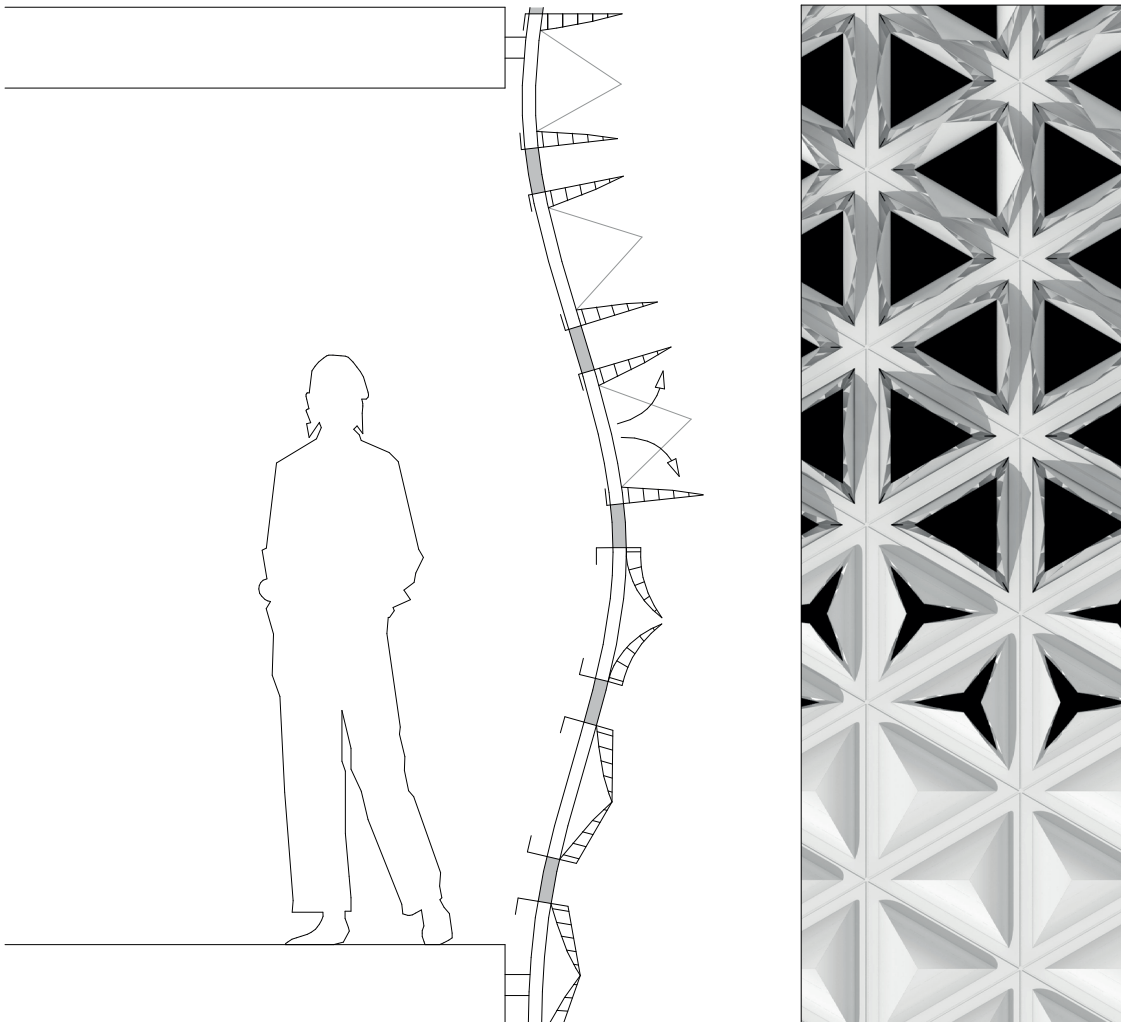
Ergebnis

Vorteile:

1. Bewegungsmechanismus mit einem Material
2. Anpassbarkeit der Schließelemente an verschiedene Anforderungen
3. Geometrie zur autoreaktiven adaptiven Anwendung

Nachteile:

1. Materialabhängigkeit, um die Bewegung auszuführen (Materialbindung). Flexibles Material und festes Material in einem Bauteil
2. Aktuator schwer integrierbar



[Abb. 8.3_U6_6]

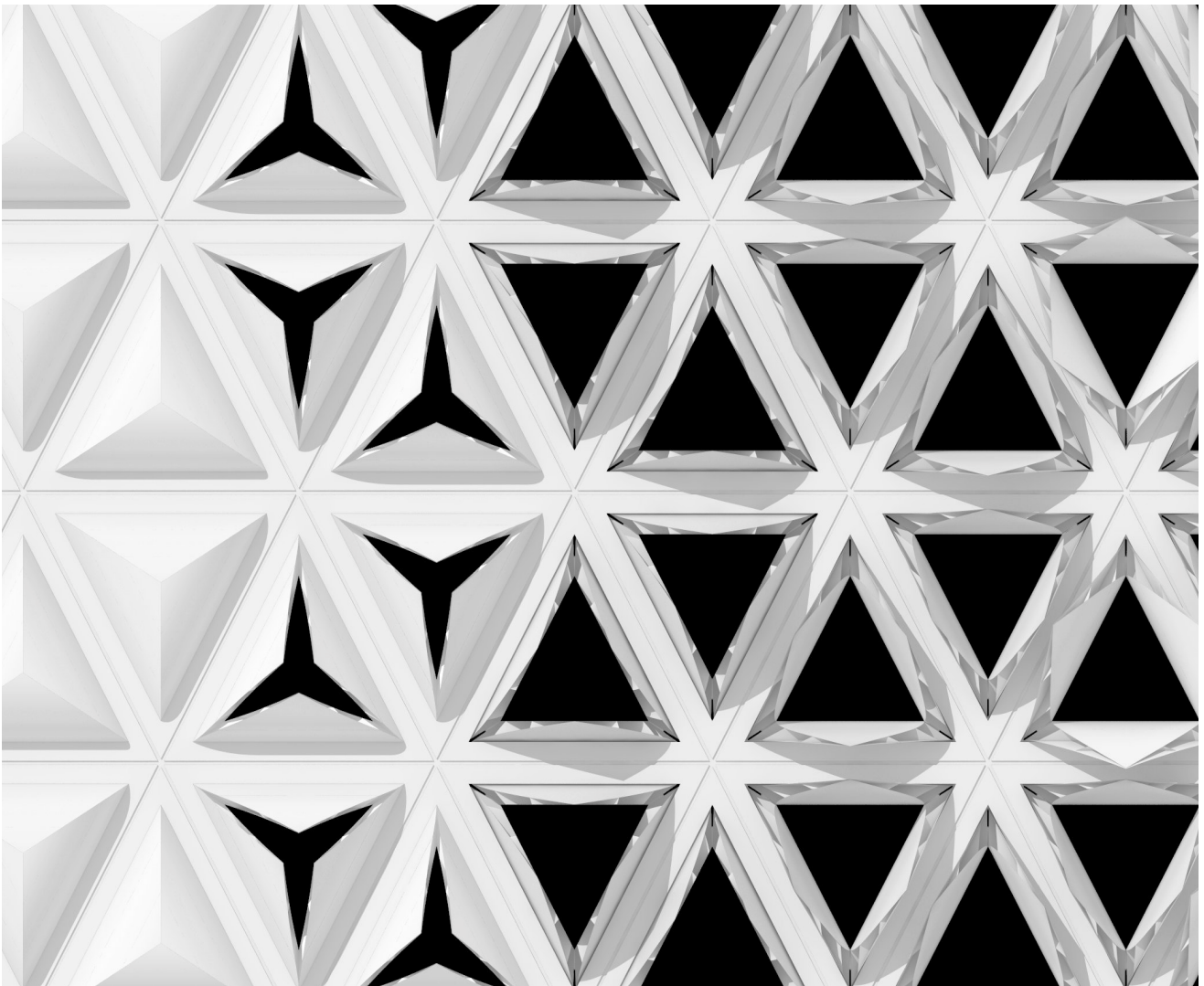
Fassadenschnitt:

Anwendung der Öffnungselemente in der Fassade

Bewertung

Bewertungskriterien für die Matrix der Funktionsgeometrie zur Weiterentwicklung und Einsatzfähigkeit als funktionsintegrierte Fassade

- | | |
|---|---|
| 1. Materialoptimierung | + |
| 2. Materialfreiheit | - |
| 3. Prozessfreiheit | o |
| 4. Anpassbar an Freiform | o |
| 5. Kombinierbarkeit mit anderen Funktionen | - |
| 6. Einsatz von autoreaktiven Aktivatoren integrierbar | o |



[Abb. 8.3_U6_7]

3D-Modell

Ansicht der geschlossenen und geöffneten Elemente

8.4 Evaluierungsmatrix der Funktionsgeometrien zur Potenzialabschätzung

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt anhand einer Matrix, um herauszufinden, welche Funktion und welche Kombination von Funktionen im Detail weiterentwickelt werden können.

Legende Bewertungskriterien

Definition der Bewertungskriterien 1 bis 6 der Funktionsgeometrie zur Weiterentwicklung und Einsatzfähigkeit als funktionsintegrierte Fassade:

1. Materialoptimierung

Die Möglichkeit, Material einzusparen (Topologieoptimierung), birgt gegenüber herkömmlichen Fertigungsmethoden einen wesentlichen Vorteil. Materialeinsparung ist ein wesentliches Potenzial von AM.

2. Materialfreiheit

Lässt sich die Funktionsgeometrie mit verschiedenen Materialeigenschaften herstellen (flexibel/fest) und lässt sie sich auf verschiedene Materialien (Kunst-

stoff, Metall usw.) übertragen?

Dieses Merkmal ist wichtig für die spätere Herstellung von verschiedenen Funktionsgeometrien in einem Bauteil.

3. Prozessfreiheit

Lässt sich die Funktionsgeometrie mit verschiedenen AM-Fertigungsprozessen (Extrusion, z. B. FDM/Bindeverfahren, z. B. Inkjet-Powder-Printing) herstellen?

Dieses Merkmal ist wichtig für die spätere Herstellung von verschiedenen Funktionsgeometrien in einem Bauteil.

4. Anpassbar an Freiform

Kann sich die Funktionsgeometrie in verschiedenen Volumen/Formen (gerade / 1-fach gekrümmt / 2-fach gekrümmt) integrieren?

Dieses Merkmal ist wichtig für die spätere Herstellung von verschiedenen Funktionsgeometrien in einem Bauteil. Die Herstellung von komplexen Formen ist ein wesentliches Potenzial von AM.

5. Kombinierbarkeit mit anderen Funktionen

Lässt sich die Funktionsgeometrie mit anderen Funktionsgeometrien kombinieren? Zur Entwicklung von einer funktionsintegrierten Fassade ist dies ein wichtiges Merkmal, um mehrere Funktionen in einem Bauteil zu vereinen.

6. Einsatz von autoreaktiven Aktivatoren integrierbar

Lässt sich in diese Funktionsgeometrie ein Aktuator integrieren, um eine Regelung der Belüftung, Verschattung, Feuchte und Temperatur als autoreaktiv-adaptierbares (selbstregelndes) Fassadenelement herzustellen?

Ergebnisse Kategorie Schichten	1. Material- optimierung	2. Material- freiheit	3. Prozess- freiheit	4. Anpassbar an Freiform	5. Kombinierbarkeit mit anderen Funktionen	6. Einsatz von autoreaktiven Aktivatoren integrierbar
U1: Voronoi- Tragstruktur	+	+	+	+	+	o
U2: Hyperbolische Tragstruktur	+	+	-	o	o	+
U3: Dämmung	+	+	-	+	+	o
Ergebnisse Kategorie Öffnungen	1. Material- optimierung	2. Material- freiheit	3. Prozess- freiheit	4. Anpassbar an Freiform	5. Kombinierbarkeit mit anderen Funktionen	6. Einsatz von autoreaktiven Aktivatoren integrierbar
U4: Belüftung	+	-	+	+	-	+
U5: Sonnenschutz	+	-	+	+	-	+
U6: Belüftung	+	-	o	o	-	o

Legende Bewertungsgrößen: + = ja, hat das Potenzial o = unter größerem Aufwand möglich, weitere Untersuchungen sind nötig / generell nicht notwendig - = nein, nicht möglich [10] (Mungenast 2017 : 316) [Tab. 8.4_1]

Evaluierungsmatrix

Bewertungskriterien der Funktionsgeometrien zur Weiterentwicklung und Einsatzfähigkeit als funktionsintegrierte Fassade

[(Mungenast, 2017)

8.5 Zwischenfazit zu Teil 1: Funktionsgeometrien

Ergebnis der Evaluierung

Mithilfe der Evaluierungsmatrix erkennt man bezüglich der Kombinationsmöglichkeit (Punkt 5), dass sich eigentlich nur zwei Funktionsgeometrien verwenden lassen: U1 und U3. Die restlichen Untersuchungsergebnisse sind in ihrer Eigenständigkeit sehr stark ausgeprägt.

Die erste Forschungsfrage, „Ist es möglich, Fassadenfunktionen mit 3D-gedruckten Geometrien zu lösen?“, kann man durch die Untersuchungen in Teil 1 mit Positiv beantworten.

Durch verschiedene Analysen von biologischen und künstlichen Geometrien konnten Parallelen zu Anwendungen in der Gebäudehülle hergestellt werden. Diese konnten in eine oder mehrere Fassadenfunktionen transferiert werden. Durch die rasche Umsetzung der Funktionsgeometrien mittels der Fertigungsmethode des 3D-Drucks und der freien Material- und Prozesswahl konnten belastbare Ergebnisse erzielt werden, welche eine Potenzialeinschätzung zulassen.

Methodik

Methodisch wird die bionische Methode mit ‚Research by Design‘ in einem iterativen Prozess kombiniert. Die Ergebnisse zeigen, dass dies eine vielversprechende Methode zur Findung von Gestaltungslösungen von funktionale Geometrien in Kombination mit der Additiven Fertigung ist. Diese angewandte Methodik, 3D-Modelle zu entwickeln und diese direkt als Arbeitsmodelle mit der ‚Additiven Fertigung‘ herzustellen,

erweist sich als zielführend, da die digitale Analyse einer Bestandsgeometrie und deren Transformation und Weiterbearbeitung mittels parametrischer digitaler Werkzeuge (Programme) die Möglichkeiten und die Leistungsfähigkeit der Ausgangsgeometrien deutlich erhöht und anpassbarer macht. Dieser Prozess zeigt mittels iterativer Abläufe für diese relativ kurze Zeitspanne eine effektive Lösungsfindung.

Ausblick

Die Ergebnisse von Teil 1 zur Entwicklung von Funktionsgeometrien für Gebäudehüllen indizieren eine große Chance für das weiterführende Ziel die Gebäudetechnik zu reduzieren.

Die in Teil 1 erzielten Ergebnisse sind in ihrer Eigenbetrachtung vielversprechend, aber für die Kombination in einem Bauteil nicht immer kompatibel. Die Überprüfung muss in einem nächsten Schritt erfolgen. Die Weiterentwicklung funktioneller Geometrien und deren Kombination in funktionalen und hierarchischen Komplexitäten wird wesentlich sein, wenn es darum geht die Additive Fertigung ganzheitlich zu nutzen.

[10] (Mungenast 2017 : 315 - 316)



9. Teil 2: Funktionsintegration

- Kombination von Fassadenfunktionen in einem Element
- Festlegung von Materialität und additiven Fertigungsverfahren

teilw. veröffentlicht:
[12] (Sigmund 2017 : 79)

9. Teil 2: Funktionsintegration - Entwicklung eines funktionsintegrierten Fassadenelements

Vorbemerkung

Nachdem in Teil 1 die Entwicklung von zahlreichen Funktionsgeometrien erreicht und dadurch das Potenzial aufgezeigt wurde, hat sich gezeigt, dass eine weitere Vertiefung der einzelnen Untersuchungen nicht zu einem erfolgversprechenden Resultat führen würde. Dies zeigt die Evaluierung der Ergebnisse. Hier zeigt sich, dass eine Kombination von nur zwei Funktionsgeometrien Aussicht auf Erfolg haben. Die anderen Ergebnisse bieten keine Funktionskombinationen, die sich zu einem eigenständigen Fassadenelement zusammenführen lassen können, welches lichtdurchlässig ist und den thermischen Abschluss des Gebäudes bilden kann. Grund dafür sind die unterschiedlichen Druckprozesse und Materialien der unterschiedlichen Funktionen. Deshalb werden die anderen Untersuchungen in dieser Dissertation nicht weiterverfolgt.

Das Resultat aus dieser Erkenntnis führte zu der Fokussierung der Untersuchung in Teil 2 auf einen Druckprozess und ein Material, um einen weiteren Entwicklungsschritt in Richtung einer 3d-gedruckten, lichtdurchlässigen und multifunktionalen Fassade zu erreichen.

Eine weitere wichtige Schlussfolgerung aus den Ergebnissen von Teil 1 ist die Materialfrage. In diesem Zusammenhang ist es wichtig die Entscheidung zu erläutern, sich auf ein einziges Material festzulegen. Das Thema des Multimaterialdrucks, d. h. die Verwendung mehrerer Materialien oder verschiedener Materialeigenschaften (opak/transparent oder fest/elastisch) in einem Bau-

teil ist nicht sinnvoll. Hier sind folgende Aspekte aufzuführen:

1. Recycling

Bei der Verarbeitung von verschiedenen Materialien, wie beispielsweise die Kombination von Kunststoff mit metallischen Materialien oder Karbonfasern in einem Bauteil, ist die Wiederverwertbarkeit bei der Erstellung des gleichen Bauteils nicht möglich, da die Materialien nicht mehr trennbar sind.

2. Komplizierter Druckprozess

Die Verarbeitung von unterschiedlichen Materialien in einem Prozess bewegt sich immer noch in einem Anfangsstatus in der großmaßstäblichen Anwendung. Deshalb ist es für eine zeitnahe Umsetzung nicht sinnvoll diese Prozesse zu verwenden.

Teil 2 hat somit zum Ziel, die Machbarkeit der Produktion eines 3d-gedruckten und funktionsintegrierten Fassadenelements im Maßstab 1:1 zu beweisen.

Hier sollen zum einen die Anzahl der integrierbaren Fassadenfunktionen und zum anderen die vielfältigen gestalterischen Potenziale entwickelt und aufgezeigt werden.

Die Zusammenführung der verschiedenen Funktionen, die Auswahl des Prozesses und des Materials sind resultierend aus den Ergebnissen von Teil 1. Bei der Herstellung eines Prototyps im Maßstab 1:1 muss man auf bestehende Prozesse und Materialien zurückgreifen, um sich auf die Themenschwerpunkte Funktionsintegration und Gestaltung konzentrieren zu können.

Vergleich mit Referenzprodukt

Um ein belastbares Forschungsergebnis zu generieren ist es notwendig, sich mit einem Referenzprodukt zu vergleichen, welches in der Funktionalität, Materialität und Art des Fassadentyps analoge Eigenschaften aufweist. Das 3D-gedruckte Element erhält die Bezeichnung ‚Tomorrow-Element‘ und die Referenzfassade ‚Today-Element‘. Die Auswahl der zu integrierenden Funktionen orientiert sich einerseits an den Funktionen der Standard-Kunststofffassade des Referenzprodukts und andererseits an der Integration von weiteren Funktionen, die als zusätzliche technische Fassadenprodukte integrierbar und /oder kombinierbar sind (z.B. Fenster, dezentrale Lüftung, Sonnenschutz). Im weiteren Verlauf der Entwicklung wird sich zeigen, welche Funktionen umsetzbar und integrierbar sind und dann auch ihren Weg in die Vergleichsmessungen in Teil 3 finden und sich validieren lassen.

Bei der Umsetzung werden die Erfahrungen von Teil 1 genutzt. Dort die hohe Prozess – und Materialfreiheit, hier die genaue Definition der verschiedenen Parameter.

Diese Festlegung beinhaltet folgende Parameter: den Fassadentypus (konstruktiv), den Druckprozess, das Material, die integrierten Funktionen, die Abmessungen, den Standort und dessen Orientierung.

Das Ziel von Teil 2 ist es, ein Konzept für die erste 3D-gedruckte, lichtdurchlässige und funktionsintegrierte Fassade zu entwickeln und dieses bis zu der Erstellung der 3D-Druckdateien für einen Prototyp im M 1:1 umzusetzen.

Der Einsatz von einem transparenten Material in einem Fassadenelement ist elementar. Glas ist nur in kleinen Mengen druckbar, deshalb ist der Einsatz von transparentem Kunststoff notwendig. Diese Entscheidung hat direkten Einfluss auf die Druckprozesswahl. In diesem Zusammenhang ist das FDM-Schmelzschichtverfahren das einzige zu Verfügung stehende Verfahren für große Bauräume.

Um die Untersuchung der gestalterischen Vielfalt und eine größere Unterstützung bei der Umsetzung (Ausarbeitung) zu generieren, habe ich eine weitere Lehrveranstaltung ‚3D printed envelope‘ für 4 Masterstudierende der Architektur entwickelt. Für den Spezialbereich der parametrischen Programmierung wurde ein Korrekturassistent hinzugezogen. Die Studierenden wurden von mir bis zu zwei mal wöchentlich angeleitet und inhaltlich sowie auch in der Umsetzung genau instruiert. Ich hatte somit maßgeblichen Einfluss auf die Entwicklung des Ergebnisses.

9.1 Methodik

Forschungsfragen von Teil 2:
Ist es möglich verschiedene Fassadenfunktionen für ein 3-D-gedrucktes Fassadenelement im Maßstab 1:1 zu integrieren? Wie sieht die architektonische Gestalt aus?
Um eine Lösung im Maßstab 1:1 zu entwickeln, ist es wichtig ein Fallbeispiel zu wählen, bei dem möglichst viele Einflussparameter festgelegt werden können. Damit

läßt sich ein Fassadenelement generieren, welches erlaubt, dessen Eigenschaften exemplarisch in ihrer Komplexität zu untersuchen.

9.1.1. Gegenüberstellung

Um eigene Ergebnisse zu validieren, wird ein Referenzobjekt benötigt; deshalb ist es notwendig, die Parameter des zu vergleichenden Fassadentyps festzulegen. Im Bauwesen, speziell bei Gebäudehüllen, gibt es unterschiedliche Konstruktionsweisen und eine hohe Anzahl von verschiedenen Materialien.

9.1.2. Auswahl Konstruktion und Material

Konstruktionsweisen

Fassadenkonstruktionen lassen sich vereinfacht in „tragende“ und „vorgehängte“ Fassadensysteme unterteilen:

- Tragend

Die Fassade ist Teil des statischen Primärsystems des Gebäudes.

Beispiel: Lochfassade aus Mauerwerk oder Stahlbeton.

- Vorgehängt

Die Fassade ist nicht Teil des statischen Primärsystems des Gebäudes, sondern trägt die Eigenlast und nimmt Windlasten auf.

Beispiel: Pfosten-Riegel-Fassade oder Elementfassade.

Materialien

Für Fassaden bzw. Gebäudehüllen gibt es viele verschiedene Materialgruppen mit verschiedenen Eigenschaften.

- Materialien für massive und tragende Konstruktionen

Beispiel: Mauerwerk, Beton, Holz

- Materialien für Stab- bzw. Stän-

der-Konstruktionen

Beispiel: Holz, Stahl, Aluminium

- Materialien für transparente und opake Ausfachungen

Beispiel: Glas, Metalle, zementgebundene Platten, Holz, Komposite, Kunststoffe usw.

- Dämmmaterialien auf mineralischer, pflanzlicher und Kunststoff Basis

Beispiel: Mineralwolle, Holzfaserplatten, PUR-Schaum usw.

Um die Auflistung der Vielzahl an unterschiedlichen Parametern einzugrenzen, ist es wichtig, anhand der Konstruktion und des Materials eine Referenz auszuwählen.

Folgende Parameter wurden ausgewählt:

Parameter 1 Konstruktion

Konstruktion: vorgehängte Fassadenkonstruktion (Elementfassade)

Diese ist im Bereich der transparenten Fassaden die am meisten eingesetzte Konstruktionsweise, beispielsweise für Büro-, Sonder-, und Industriebauten.

Vorteil: Ein hoher Grad an Vorfertigung ist möglich.

Parameter 2 Material

Material: transparentes Polycarbonat

Hier handelt es sich um ein transparentes und zugelassenes Fassadenmaterial, das zum großen Teil in Industriebauten eingesetzt wird. Die Verarbeitbarkeit dieses Materials mittels 3D-Drucker und die Transparenz sind ausschlaggebend für die Wahl.

Vorteil: kostengünstig, lichtdurchlässig und wiederverwertbar.

9.1.3. Gegenüberstellung von bestehendem Fassadenprodukt „Today“ und 3D-gedrucktem Fassadenelement „Tomorrow“

Die Gegenüberstellung beinhaltet die Untersuchung von zwei Fassadenelementen, die sich durch die Herstellungsmethode und die integrierten Funktionen unterscheiden.

Element 1 „Today“ besteht aus einem herkömmlichen Fassadenprodukt, Mehrfachstegplatten aus Polycarbonat.

Element 2 „Tomorrow“ ist additiv gefertigt und aus Polycarbonat-Filament.

Ziel der vergleichenden Untersuchung ist es, die Vorteile der Additiven Fertigung bei der Herstellung von komplexen Geometrien – hier: Funktionsgeometrien – aufzuzeigen und in einem Produktionsschritt mehr Funk-

tionen zu integrieren als bei der herkömmlichen Herstellung von Polycarbonatplatten, die mit der Extrusionsmethode gefertigt werden.

Die Konstruktionsweise der Fassadenelemente orientiert sich an der Konstruktionsweise der herkömmlichen Polycarbonatfassade. Die Paneele werden zusammengesteckt und in einen Aluminiumrahmen integriert; dieser dient zur Befestigung an der Teststation.



[Abb. 9.1.3_1]
Solarstation TUM

9.1.4. Ort und Ausrichtung

Der Standort (geografische Höhe und Breite), die Ausrichtung (Orientierung) an der Himmelsrichtung (West/Süd/Nord/Ost) und die Neigung (senkrecht oder geneigt) der Fassade spielen eine entscheidende Rolle bei der Anpassung der Verschattungsgeometrie über parametrische Entwurfswerkzeuge.

Deshalb ist es elementar, einen Standort festzulegen, um diese Parameter bestimmen zu können und die Geometrie darauf abzustimmen.

Für die Untersuchung der Fassadenelemente „Today“ und „Tomorrow“ wird die Solarstation auf dem Dach der TU München als Standort gewählt. Beide Fassadenelemente werden an einem

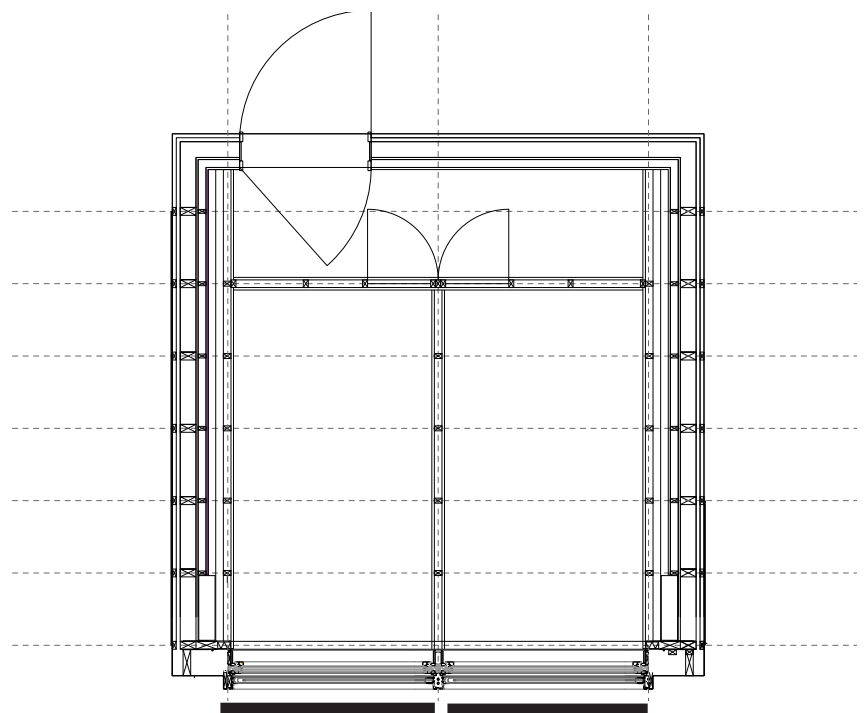
Messcontainer für Fassadenelemente im Maßstab 1:1 installiert. An dem Messcontainer lassen sich zwei Fassadenelemente mit den Abmessungen 280 cm Höhe und 160 cm Breite einbauen.

Der Innenraum ist hochgedämmt, und es sind separate Räume hinter jedem Fassadenelement angeordnet, um unabhängige Vergleichsmessungen durchzuführen. Hier können für den Innenbereich lichttechnische Messungen, U-Wert-Annäherungen gemacht und Innenraumqualitäten bewertet werden. Im Außenbereich lassen sich Langzeiteinwirkungen der Witterung auf die Materialoberfläche und Fertigungsstruktur untersuchen und

den Verlauf der Verschattung dokumentieren.

Die Messergebnisse an dieser Testeinrichtung besitzen Modellcharakter und liefern Annäherungswerte. Dies ist auf den hohen Außenwandanteil, das Verhältnis von Fassadenfläche zu Raumgröße und fehlende Speichermassen zurückzuführen.

Standortkoordinaten:
geogr. Breite $48^{\circ}08'20''$
geogr. Länge $11^{\circ}34'30''$



Element 2 „Tomorrow“ Element 1 „Today“

[Abb. 9.1.4_1]
Grundriss Solarstation TUM Standort

9.2 Today-Element: Rodeca PC-2560, Polycarbonatfassade, d = 60 mm

Das in dieser Untersuchung verwendete Fassadenelement der Firma Rodeca gehört zu der Produktreihe Lichtbauelemente PC 2560-12.

9.2.1 Material

Polycarbonat ist ein glasklarer und hochschlagzäher Thermoplast und weist eine Temperaturbeständigkeit von -40 bis $+115^{\circ}\text{C}$ (kurzfristig bis zu 130°C) mit einer über diesen Temperaturbereich nahezu gleichbleibenden Schlagzähigkeit auf. Dieses Produkt weist ein gutes Langzeitverhalten durch UV-Schutz auf, weshalb es zehn Jahre Garantie gegen Vergilbung, Alterung und Hagel-schlag hat.

Produktkennwerte PC 2560-12:

Brandklasse: B-s1, d0 nach EN 13501

Ucw-Wert: ca. $0,87 \text{ W/m}^2\text{K}$ (nach DIN EN ISO 10077-2)

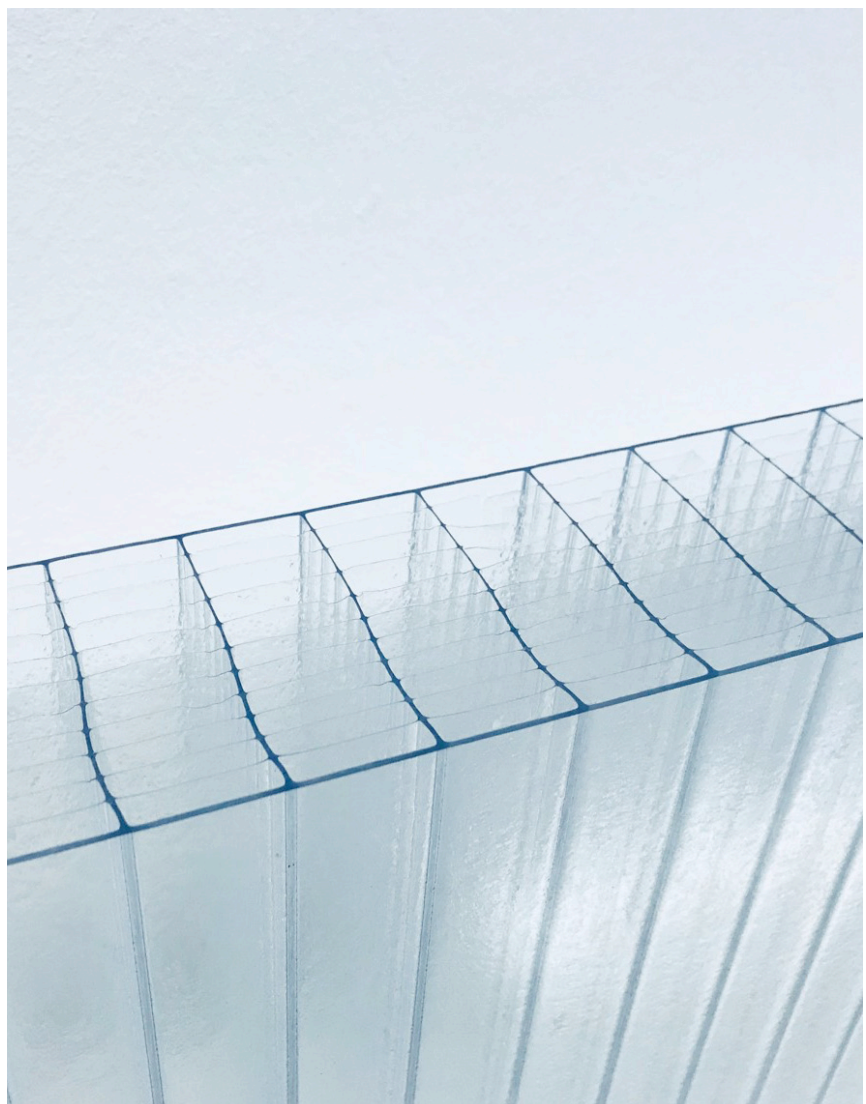
Up-Wert: $0,71-0,77 \text{ W/m}^2\text{K}$

Lichttransmission: klar, ca. 42 % (Angaben des Herstellers)

9.2.2 Funktionen und Anwendungen

Die integrierten Funktionen sind Lichtdurchlässigkeit, Dämmung und die Aufnahme von Druck- und Soglasten (je nach statischen Anforderungen ist eine Unterkonstruktion notwendig).

Herkömmliche Anwendungen dieser Fassadenpaneele reichen von Fassadenverkleidungen für Sport- und Gewerbehallen bis hin zu Innenanwendungen für Mes-senbau und Raumteiler.



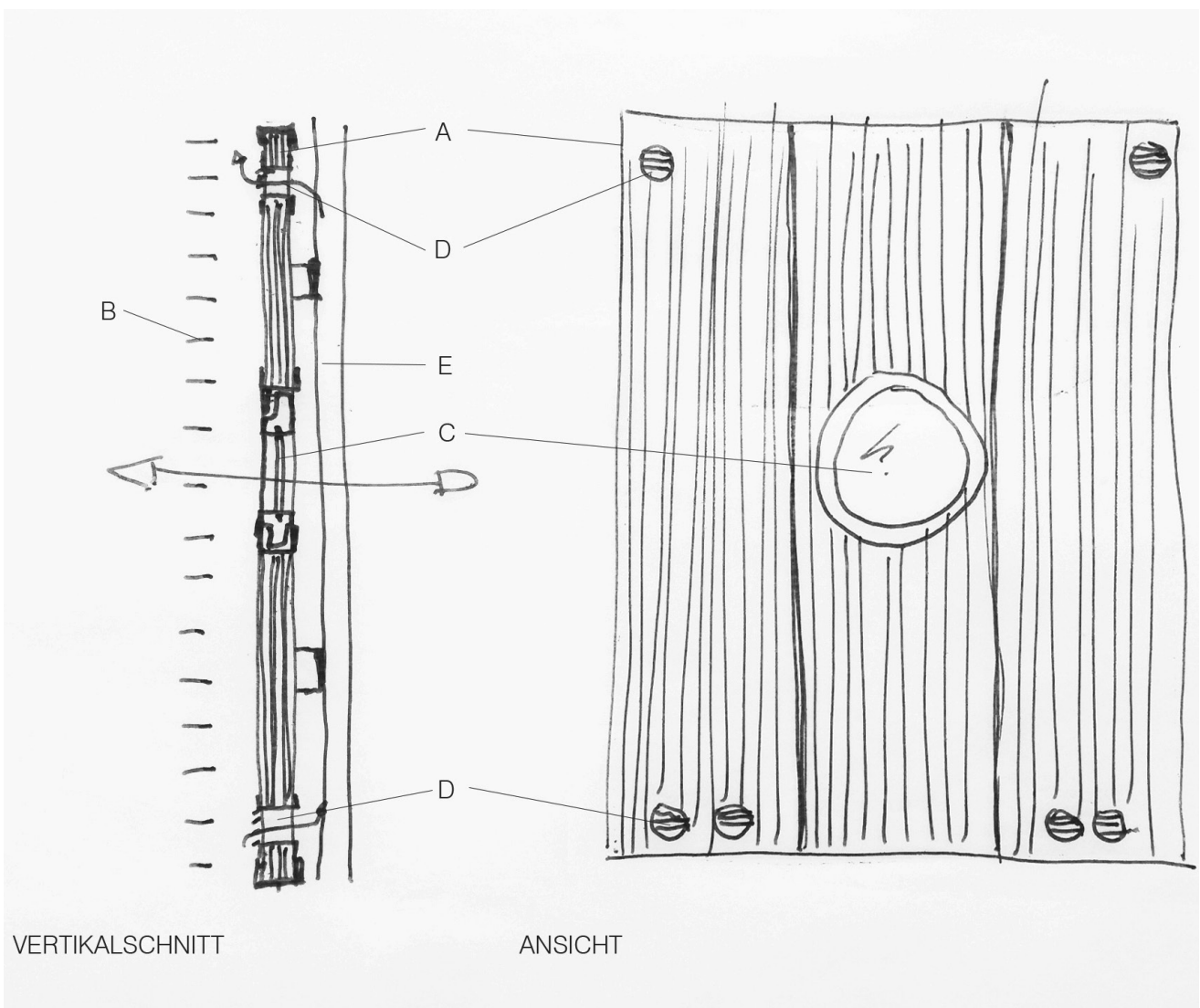
[Abb. 9.2.1_1]

Rodeca Lichtbauelement d=60 mm

Konzeptskizze zum Aufbau des Today-Elements mit möglichen integrierten Funktionen

Legende:

- A) Doppelstegplatte (Lichtbauelement)
- B) Außenliegender Sonnenschutz
- C) Fenster
- D) Lüftungselement
- E) Lastabtragung (Unterkonstruktion)



[Abb. 9.2.1_2]

Skizze Element 1 „Today“

Fassadenelement Doppelstegplatte mit zusätzlichen Bauteilen für die Funktionserweiterung

9.3 Tomorrow-Element: Parameter

9.3.1 Festlegung der Kombination von Fassadenfunktionen als Resultat von Teil 1

Als Ergebnis aus Teil 1 sind folgende Funktionen als Kombination aus der Evaluierungsmatrix hervorgegangen:

- U1: Voronoi Tragstruktur
- U3: Dämmstruktur

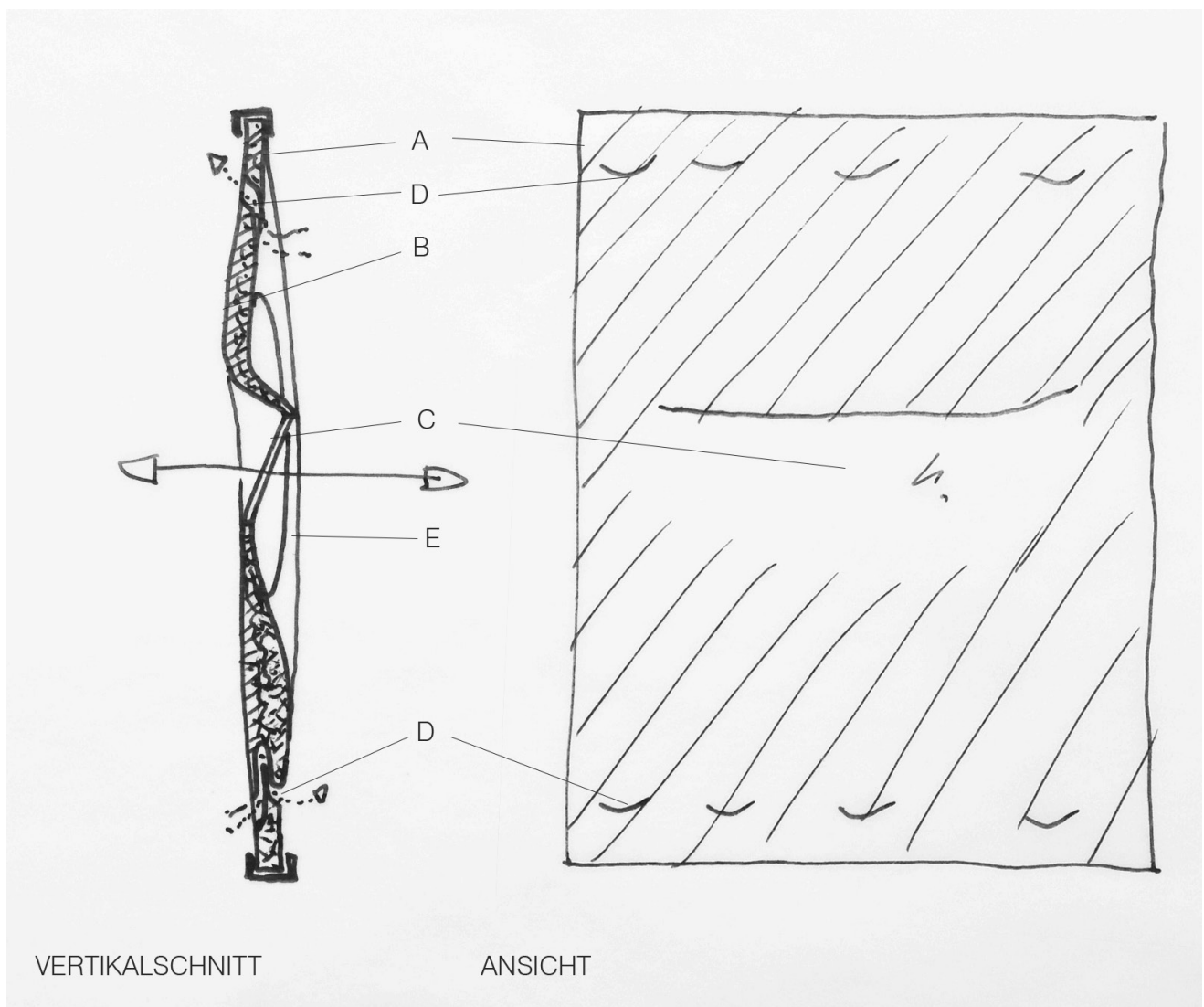
Um die Komplexität und Leistungsfähigkeit der Fassade zu erhöhen, sind diese weiteren Funktionen ergänzt worden:

- Feststehender Sonnenschutz (Eigenverschattung)
- natürliche Belüftung
- akustische Streuung
- visuelle Verbindung (Lichtdurchlässigkeit)

Konzeptskizze zum Aufbau des Tomorrow-Elements mit möglichen integrierten Funktionen

Legende:

- A) lastabtragende, schallstreuende und dämmende Geometrie
- B) integrierter Sonnenschutz
- C) Belichtung und visuelle Verbindung
- D) integrierte Lüftungskanäle
- E) Geometrieänderung zur optimalen Lastabtragung (integrierte Unterkonstruktion)



[Abb. 9.3.1_1]

Skizze Element 2 „Tomorrow“

Additiv gefertigtes Fassadenelement aus transparentem Kunststoff mit integrierten Funktionen

9.3.2. Prozesswahl: Schmelzschichtung / FDM-Prozess

Der FDM-Prozess hat folgende Vorteile für die Umsetzung bei dieser Untersuchung:

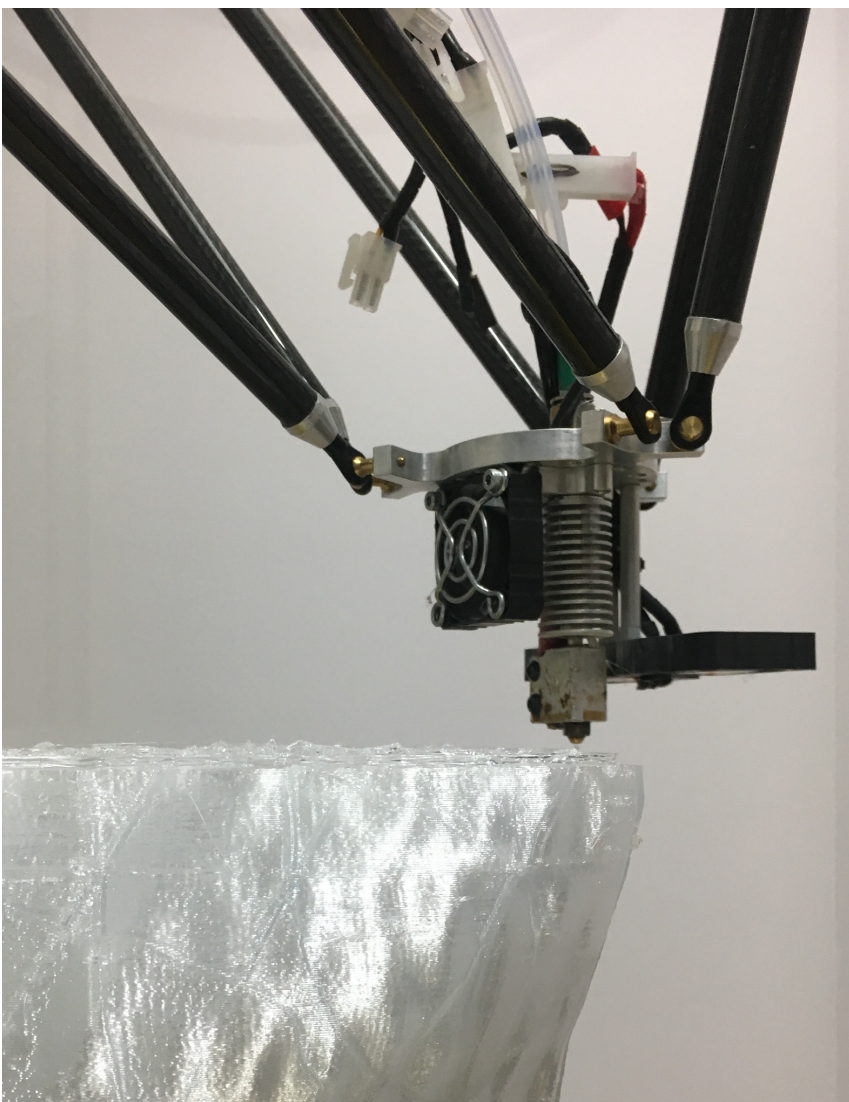
Herstellung von geschlossenen Luftkammern: Da weder Pulver oder Stützgeometrien als Stützmaterial notwendig sind, wenn man keine Auskragungen von mehr als 45° verwendet, ist es möglich, luftgefüllte Hohlräume herzustellen. Dadurch lassen sich beispielsweise, wie in dieser Untersuchung notwendig, geschlossene Luftkammern (Zellen) als effektive Dämmung herstellen.

Materialverfügbarkeit: Transparentes Polycarbonat ist als Filament (Baumaterial) auf dem freien Markt verfügbar.

Hohe Festigkeit: Das Material wird bis zum Schmelzpunkt erhitzt und zähflüssig aufgebracht und verbindet die Schichten dadurch sehr gut miteinander.

Materialreinheit: Es ist kein Binder nötig, dadurch bleibt das Material sortenrein, was einen geschlossenen Materialkreislauf ermöglicht.

Kostengünstig: Der Kaufpreis dieses Standardmaterials für den FDM-Prozess als Filamentrolle ist im Gegensatz zu anderen Verfahren relativ günstig.



[Abb. 9.3.2_1]

Prozess Additive-Fertigung: FDM

9.3.3 Materialwahl: Polycarbonat / PETG

Polycarbonat (PC)

Polycarbonat ist aufgrund der Wetterfestigkeit, Transparenz und Schlagfestigkeit für den Einsatz als Fassadenmaterial gut geeignet und die Nutzung bringt folgende Vorteile:

Zugelassenes Fassadenmaterial: Dadurch, dass es die bauaufsichtliche Zulassung hat, eignet es sich als Material für die Herstellung eines Fassadenelements.

Transparenz: Polycarbonat hat eine hohe Lichtdurchlässigkeit. Da es bei dieser Untersuchung um ein Fassadenelement geht, ist eine maximale Lichtdurchlässigkeit essenziell.

Brandschutz: Eine Klassifizierung in der Baustoffklasse B-s1, d0 nach EN 13501 muss möglich sein, da das Referenzprodukt von Rodeca diese Baustoffklasse erreicht hat.

UV-Beständigkeit: Polycarbonat ist an sich nicht UV-beständig, kann aber durch Zusätze modifiziert werden, die in die äußere Schicht impliziert (Rodeca-Lichtbauelement) oder als Lack appliziert werden (Autoscheinwerfer).

Wiederverwertbarkeit: Polycarbonat ist ein erdölbasierter Kunststoff, der, wenn er nicht verunreinigt ist, wiederverwendbar ist. Man kann dadurch einen

geschlossenen Materialkreislauf erreichen; dies bedeutet kein „Downcyclen“, sondern wirkliches Recyclen.

Kostengünstig: Bei Polycarbonat handelt es sich um ein sehr günstiges lichtdurchlässiges Fassadenmaterial.

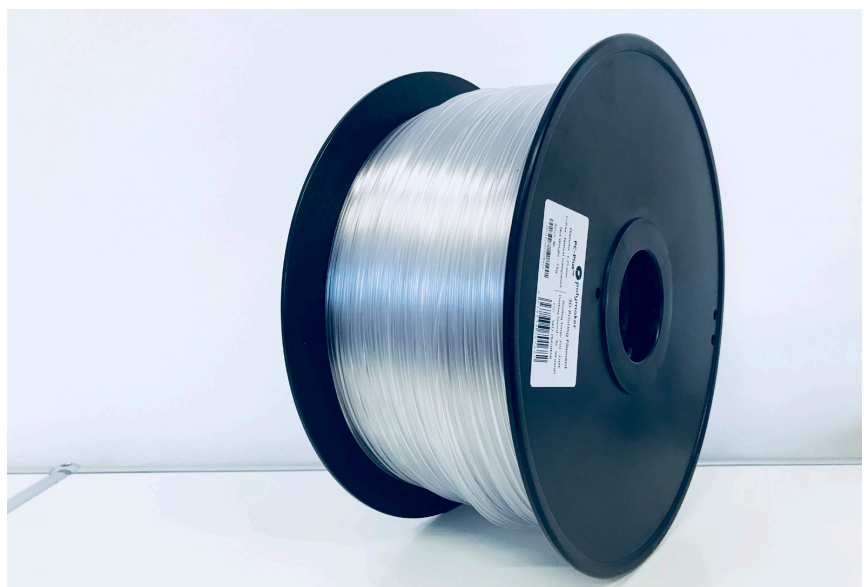
Verarbeitung: Polycarbonat wird über Wärmeeinwirkung in Form gebracht, die klassischen Verfahren sind Extrusion (Strangpressverfahren) oder Spritzguss. Polycarbonat muss bei einer Umgebungstemperatur von 80°C verarbeitet und dann langsam abgekühlt werden, um starke Verformungen oder das Reißen des Materials zu verhindern.

Technische Daten PC Filament (Herstellangaben Stratasys PC-ISO)

Schmelzpunkt: ca. 250 °C

Glasübergantemperatur: 161 °C

Erweichungstemperatur: 139 °C



[Abb. 9.3.3_1]

Material: Polycarbonat transparent Filament

Polyethylenterephthalat Glycol (PETG)

PETG ist ein PET, das mit Glycol modifiziert ist; dies hat zur Folge, dass es eine bessere Viskosität aufweist und sich dadurch gut im FDM-3D-Druck einsetzen lässt.

Zugelassenes Fassadenmaterial: PETG wurde schon vereinzelt als Material für die Herstellung von Fassadenplatten benutzt.

Transparenz: PETG hat eine hohe Lichtdurchlässigkeit. Da es bei dieser Untersuchung um ein Fassadenelement geht, ist eine maximale Lichtdurchlässigkeit essenziell.



Brandschutz: Eine Klassifizierung in der Baustoffklasse B1 wurde für PETG-Platten schon erreicht.

UV-Beständigkeit: PETG ist an sich nicht UV-beständig, kann aber durch Zusätze modifiziert werden.

Wiederverwertbarkeit: PETG ist ein erdölbasierter Kunststoff, der, wenn er nicht verunreinigt ist, wiederverwendbar ist. Man kann dadurch einen geschlossenen Materialkreislauf wie mit Polycarbonat erreichen. Drei bis vier Zyklen werden als realistisch erachtet.

Kostengünstig: Bei PETG handelt es sich um ein sehr günstiges lichtdurchlässiges Fassadenmaterial.

Verarbeitung: PETG ist im FDM-Prozess einfacher zu verarbeiten als Polycarbonat, hat aber ähnliche Eigenschaften in Bezug auf Transparenz und Festigkeiten. Die einfachere Verarbeitung bedeutet zum einen, dass die Umgebungstemperatur auf normalem Niveau (ca. 25°C) ausreicht, und zum anderen gibt es geringere Materialspannungen beim Abkühlen.

Technische Daten (Herstellerangaben EXTRUDR PETG)
Schmelzpunkt: 180-200 °C
Wärmeformbeständigkeit: 80-90 °C

[Abb. 9.3.3_2]
Material: PETG transparent Filament

9.4 Tomorrow-Element: architektonische Gestalt

Die architektonische Gestalt ist ein wichtiger Aspekt beim Einsatz der Additiven Fertigung. Durch die Möglichkeit, komplexe Geometrien herzustellen, eröffnen sich auch in der Gestaltung neue Möglichkeiten, vom Einsatz von Ornamenten bis hin zu neuen, digital entwickelten Strukturen.

Dieses Potenzial wird beispielhaft an dem Fassadenelement „Tomorrow“ gezeigt, indem mehrere Gestaltungskonzepte mit Studierenden entwickelt wurden. Über eine Evaluierungsmatrix wurde ein Gestaltungskonzept ausgewählt, das die Grundlage für die weitere Ausarbeitung bildet.

9.4.1 Einflüsse des FDM-Druckprozesses und der Funktionsintegration auf die Gestaltung

Die Einschränkungen in der Fertigung des FDM-Prozesses und die zu integrierenden Funktionen wurden bei der Gestaltung berücksichtigt.

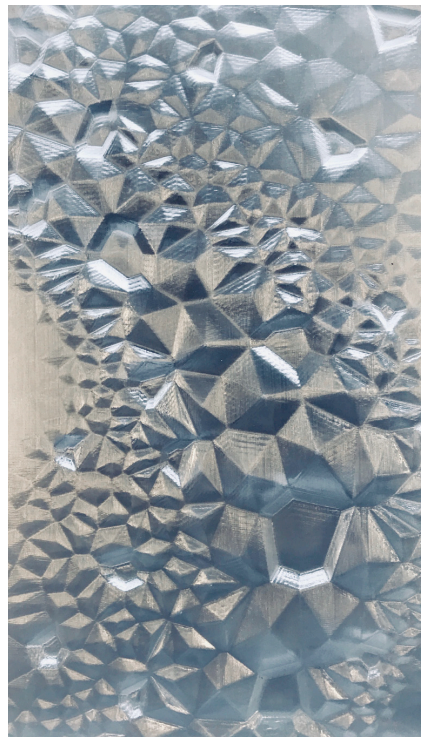
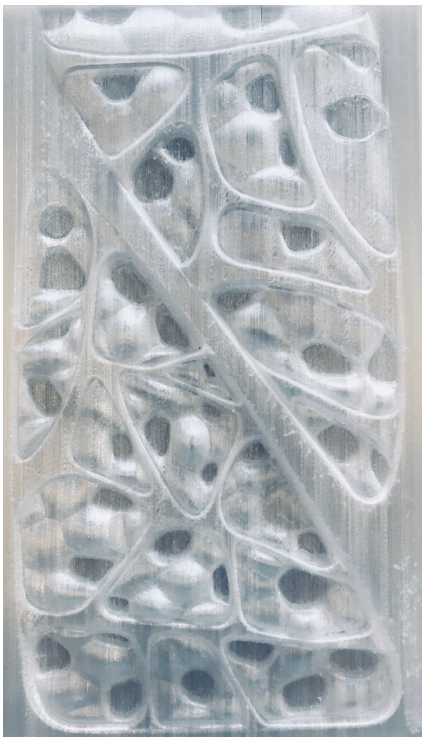
Einschränkung FDM-Prozess

Es sind maximale Auskragungen von 45° möglich (ohne Stützmaterial)

Dies wurde mittels eines 3D-gedruckten Modells im Maßstab 1:10 bewiesen.

Integrierte Funktionen

Die Integration der festgelegten Funktionen werden in ihren Grundzügen konzeptionell ablesbar integriert.



[Abb. 9.4.2_1]

3-D-gedruckte Modelle M 1:10

Gestaltungskonzepte:

Links: Leaf, Mitte: Voronoi, Rechts: Triangular Cells

9.4.2 Ergebnisse der Gestaltungsansätze

Studierende: Viktoria Blum, Tobias Gutheil, Olga Kuraskina, Luc Morroni

Es gibt mehrere Gestaltungsansätze, die sich in zwei Kategorien einteilen lassen:

1. Zellulare Strukturen

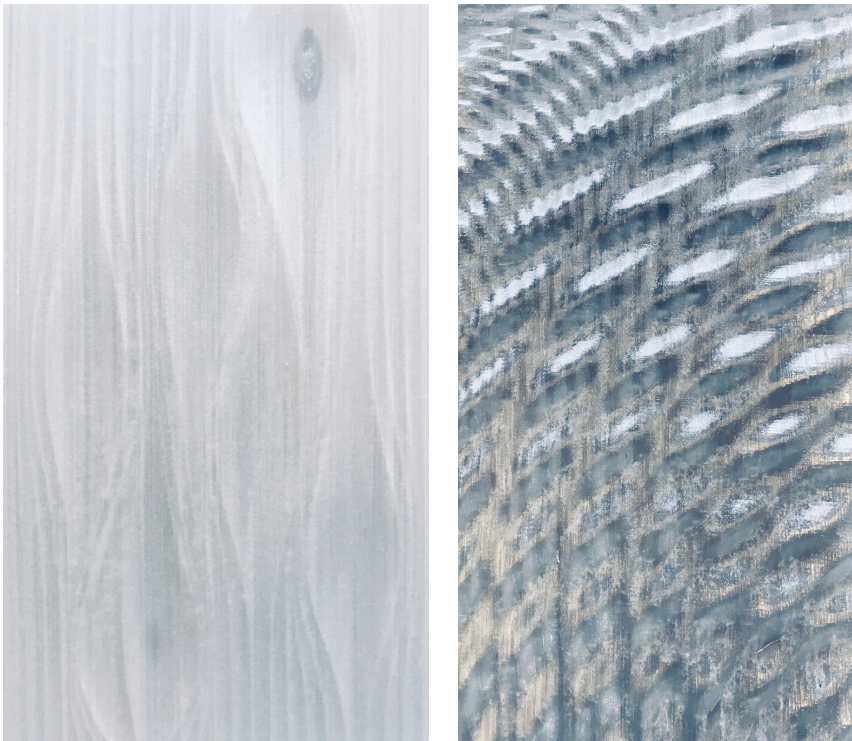
Dieser Ansatz orientiert sich an biologischen Vorbildern wie Voronoi, Knochen- bzw. Blattgeometrien. Topologieoptimierung und die Verknüpfung der einzelnen Zellen mit einer Funktion sind gestaltungsformend. Eine hierarchische Unterscheidung von Haupt- und Unterstrukturen ist möglich.

3 Ergebnisse mit Konzeptnamen: ‚Leaf‘, ‚Voronoi‘ und ‚Triangular Cells‘

2. Lineare Strukturen

Dieser Ansatz orientiert sich an linearen Faserstrukturen, flüssigen Oberflächen sowie deren partieller Verdichtung.

2 Ergebnisse mit Konzeptnamen: ‚The Curtain‘ und ‚The Wave‘



[Abb. 9.4.2_2]

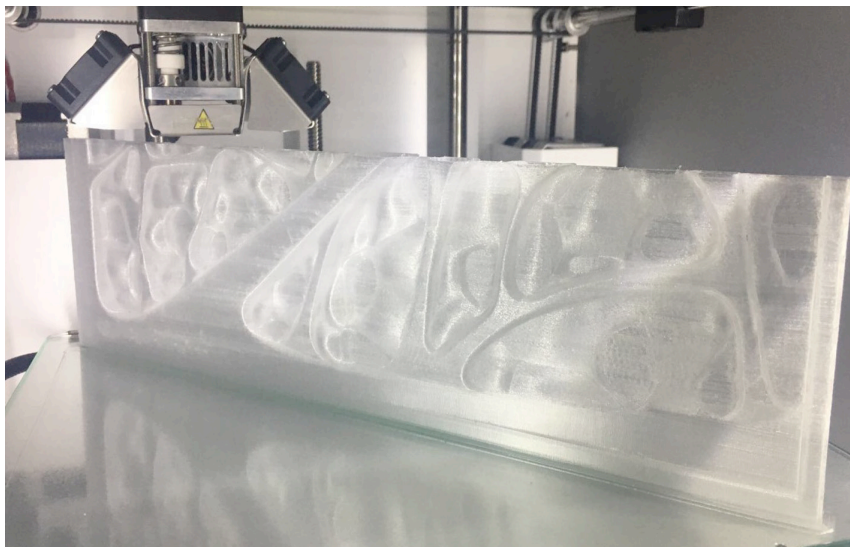
3-D-gedruckte Modelle M 1:10

Gestaltungskonzepte:

Links: The Curtain, Rechts: The Wave

9.4.3 Herstellung von Konzeptmodellen

Um die Ergebnisse direkt vergleichen und auch die Herstellung validieren zu können, sind alle Gestaltungskonzepte im gleichen Maßstab (1:10) und im gleichen Material als Modelle erstellt worden. Dadurch lässt sich die Druckbarkeit ohne Stützmaterial und die Gestaltung überprüfen. Dieser Schritt zeigt die Leistungsfähigkeit des 3D-Drucks, indem komplexe digitale Geometrien maßstabsgetreu in ein physisches Modell übertragen werden, um Gestaltungskonzepte zeitnah bearbeiten und entwickeln zu können.



9.4.4 Evaluierung und Auswahl

Über eine Evaluierungsmatrix werden die verschiedenen Gestaltungskonzepte unter verschiedenen Kriterien auf ihre Eignung zur Weiterentwicklung als funktionsintegriertes Fassadenelement überprüft. Die Kriterien beziehen sich auf die Herstellung, Segmentierungsmöglichkeit und Integrationsfähigkeit der einzelnen Funktionen, die Reinigung und die Neuheit des architektonischen Ausdrucks.

Legende (Bewertungsgrößen der Eigenschaften):

- + = gut
- o = mittel
- = schlecht/gering

Designkonzepte	Leaf	Voronoi	Triangular Cells	The Curtain	The Wave
Gesamtdesign	-	-	-	+	++
Detaillierung	++	+	-	-	-
Neuheitswert	-	-	o	+	++
3-D-Druck-Herstellung ohne Stützmaterial	+	o	+	+	+
Segmentierung	+	+	+	-	-
Integration von Funktionen					
Fenster	++	+	-	+	-
Natürliche Belüftung	+	+	+	-	-
Sonnenschutz	+	+	o	-	+
Dämmstruktur	+	+	+	-	-
Topologieoptimierung	+	-	+	-	-
Wartung/Reinigung	-	-	-	+	+

[Abb. 9.4.3_1]

Fertigung der gedruckten Modelle M 1:10
FDM-Drucker: Ultimaker
Gestaltungskonzept Leaf

[Tab. 9.4.4_1]

Evaluierungsmatrix der verschiedenen Designkonzepte

Ergebnis

Die Evaluierung zeigt die höchsten Potenziale für die Konzepte „Leaf“ und „The Wave“.

Das Konzept „Leaf“ punktet mit der Integrationsfreundlichkeit der Funktionen, der einfachen Segmentierung der Zellstruktur und der Anpassung an die Kraftverläufe.

Nachteil ist die architektonische Gestalt, da Zellstrukturen in vielen Projekten im Bezug zum 3-D-Druck schon entwickelt wurden.

Das Konzept „The Wave“ punktet vor allem mit der Neuheit in der architektonischen Form – die Überlappung von verschiedenen Wellenformen ergibt eine starke identitätsstiftende Formensprache, die so noch nicht umgesetzt wurde.

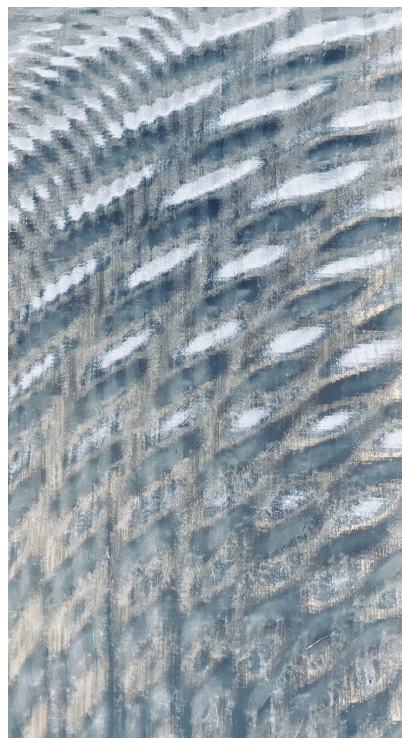
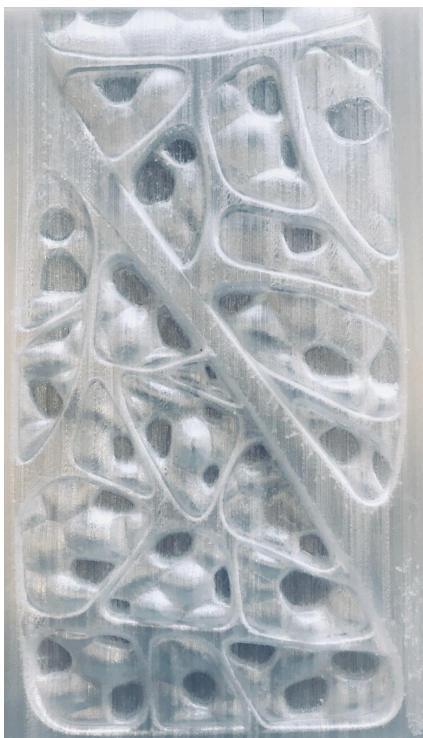
Nachteilig ist die komplizierte Integration der Funktionen und der Segmentierung.

Diese Verschiedenheit in der Gewichtung der Vor- und Nachteile macht eine weitere Entscheidung notwendig.

Fazit

Um einen neuen Weg in der Gestaltung einzuschlagen und die größere Herausforderung bei der Integration von Fassadenfunktionen anzunehmen, wird „The Wave“ favorisiert.

Die Umsetzung der Zellstruktur von „Leaf“ wäre hinsichtlich der Funktionsintegration einfacher, ist jedoch gestalterisch nicht überzeugend.



[Abb. 9.4.4_1]

3-D-gedruckte Modelle M 1:10

Gestaltungskonzepte:

Links: Leaf, Rechts: The Wave

9.5 Tomorrow-Element: Zusammenführung von festgelegten Parametern und architektonischer Gestalt

Das Gestaltungskonzept von „The Wave“ orientiert sich an der Wasseroberfläche mit verschiedenen Wellenstrukturen in verschiedenen Maßstäben. Um nun dieses Gestaltungskonzept in die Fassadenanwendung mit integrierten Funktionen zu übertragen, wird als Referenz die Meeresoberfläche anhand von Filmaufnahmen analysiert. Was ergibt diese Vielfalt an Formen, wie wird diese Oberfläche generiert? Lässt sich das künstlich herstellen bzw. nachahmen?

Klassifikation der Wasserwellen

„Bei Wasserwellen handelt es sich um Oberflächenwellen an der Grenzfläche zwischen Wasser und Luft oder um eine interne Welle an der Grenzfläche zwischen zwei unterschiedlich dichten Wasserschichten im isopyknischen (geschichteten) Ozean.

Ins Wasser geworfene Steine und Strömungshindernisse erzeugen Wellen, fahrende Schiffe begleitet eine Bugwelle.

Wasserwellen weichen in ihrer Gestalt von der regelmäßigen Sinusform ab. Ihre Form ist sowohl horizontal als auch vertikal asymmetrisch. Der Teil der Welle, der oberhalb des Ruhewasserspiegels liegt, wird als Wellenberg bezeichnet; die Position der höchsten Auslenkung ist der Wellenkamm. Der Teil der Welle, der unterhalb des Ruhewasserspiegels liegt, ist das Wellental. Die Wellenhöhe ist die Summe der Beträge beider benachbarter Maximalauslenkungen.



[Abb. 9.5_1]

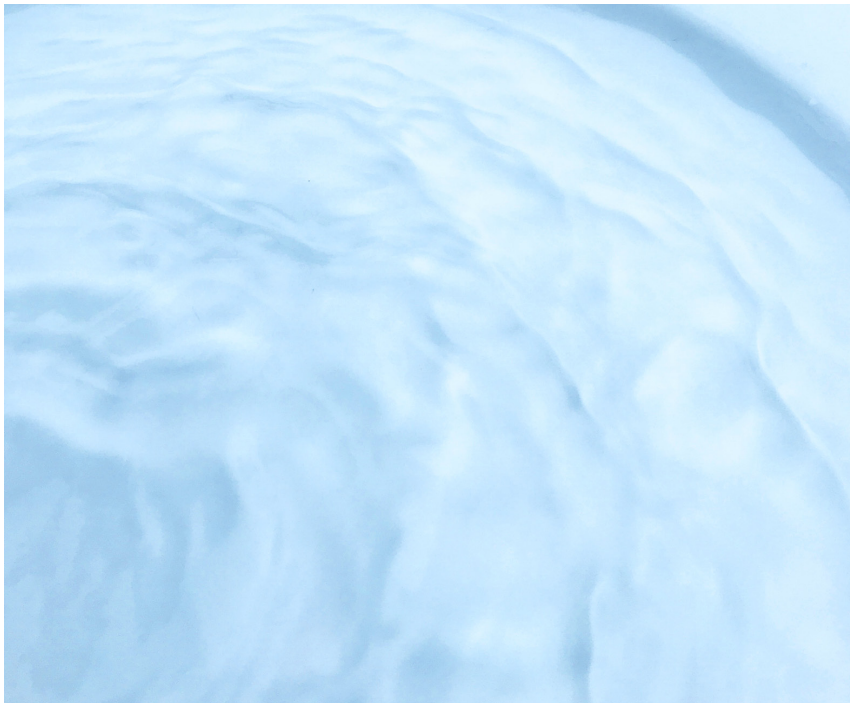
Oberflächenwellen

Dünung, Infrashwerewellen (Wind)

[Abb. 9.5_2]

Oberflächenwellen

Schwerewellen (Wind und Strömung)



Ergebnis dieser Analyse ist, dass es verschiedene Arten von Wellen in verschiedenen Maßstäben gibt:

- Tsunamis und Gezeitenwellen
 - Dünung, Infrarotwellen
- Ursache: Wind, gewöhnliche Schwerewellen
Periode: 0,5–5 Min.
- Schwerewellen
- Ursache: Wind, Strömungshindernis (feststehend/beweglich)
Periode: 1–12 Sek.
- Kapillarwellen
- Ursache: Wind, Schall
Periode: bis 1 Sek.

Diese verschiedenen Wellenarten auf einer Wasseroberfläche haben auch verschiedene Größen (Amplituden).

Die kleinsten sind die Kapillarwellen, gefolgt von den Schwerewellen und der Dünung [6] (Wikipedia, Wasserwelle, Klassifikation nach Munk).“

SIN



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

$$p = 2\pi; [-1, 1]$$



$$f(x) = \sin^2(x)$$

$$p = 2\pi; [0, 1]$$



$$f(x) = \sin^3(x)$$

$$p = 2\pi; [-1, 1]$$



$$f(x) = \sin^4(x)$$

$$p = 2\pi; [0, 1]$$

COS



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

$$p = 2\pi; [-1, 1]$$



$$f(x) = \cos^2(x)$$

$$p = 2\pi; [0, 1]$$



$$f(x) = \cos^3(x)$$

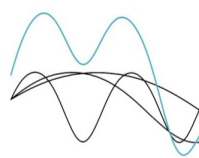
$$p = 2\pi; [-1, 1]$$



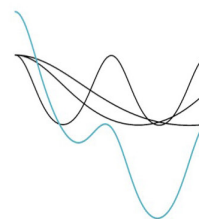
$$f(x) = \cos^4(x)$$

$$p = 2\pi; [0, 1]$$

XXY



$$f(x) = \sin(w \cdot x + k \cdot \cos(w \cdot x))$$



$$f(x) = \cos(w \cdot x + k \cdot \sin(w \cdot x))$$

[Abb. 9.5_3]

Oberflächenwellen
Kapillarwellen (Wind und Schall)

[Abb. 9.5_4]

Sinus- und Cosinusfunktionen zur Generierung der Wellengeometrie im 3D-Modell

Um Wellengeometrien vereinfacht im digitalen Modell zu erzeugen, lassen sich Sinus- und Cosinusfunktionen heranziehen; diese werden mit verschiedenen Höhen und Längen überlappt.

Die Gestaltung wird in zwei Bereiche aufgeteilt, in „Design-Ebenen“ und „Funktions-Ebenen“.

Diese Differenzierung beschreibt unterschiedliche Eigenschaften bei der Gestaltung. Die ‚Design-Ebenen‘ haben unmittelbare Auswirkung auf die architektonische Gestalt, sie definieren die Oberflächegeometrie innen und außen. Die ‚Funktions-Ebenen‘ erzeugen die Geometrie des Innenlebens des Fassadenelements und haben einen indirekten Einfluss auf die Gestalt, da die innere Struktur nur zum Vorschein kommt, wenn diese hinterleuchtet ist und somit die Lichtdurchlässigkeit beeinflusst.

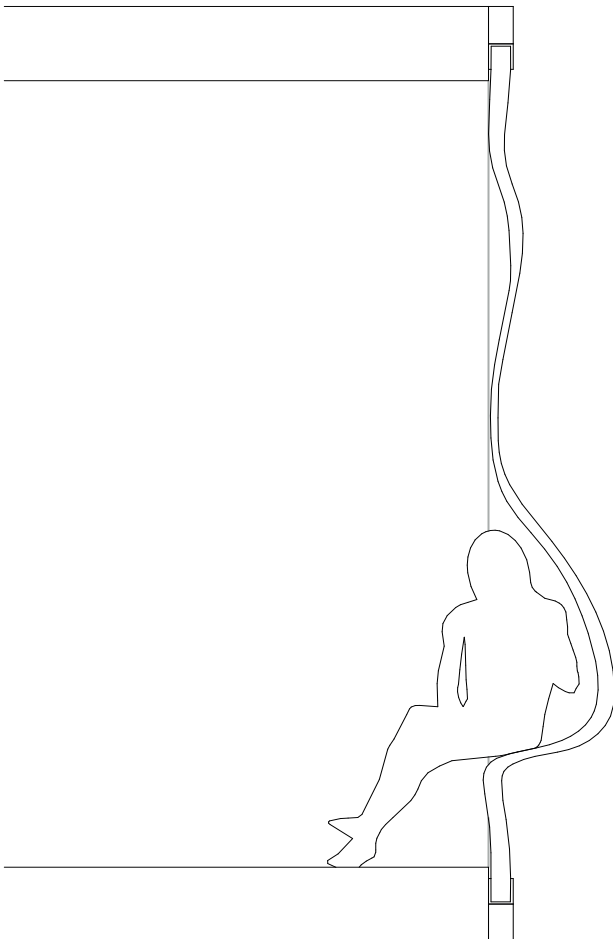
9.5.1 Design-Ebenen

Die Design-Ebenen werden in verschiedene Maßstäbe, den Wellen auf der Wasseroberfläche entsprechend, unterteilt. Funktionen werden über Makro-, Meso- und Mikro-Ebenen umgesetzt.

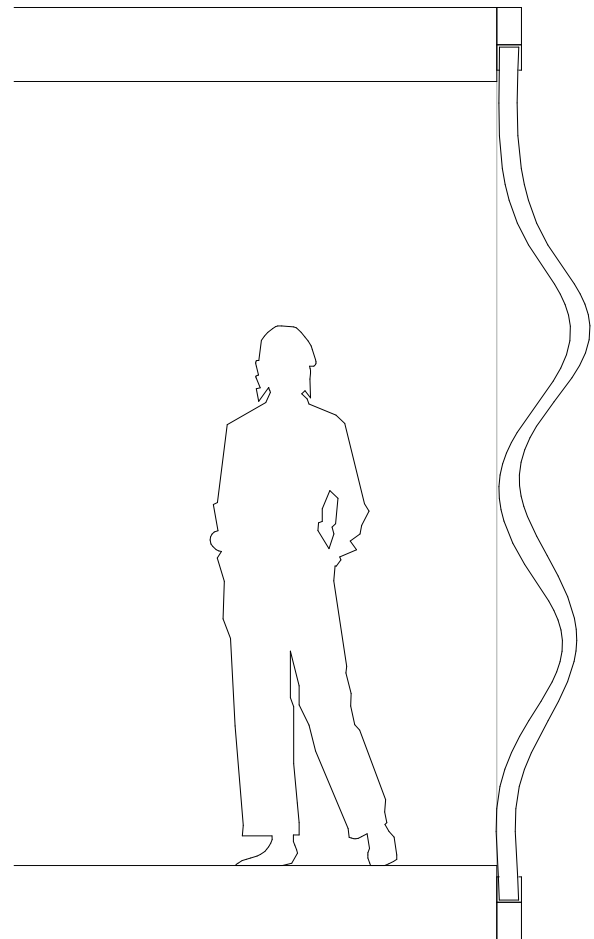
• Makro-Ebene

Diese Ebene übernimmt die Funktion der Anpassbarkeit der übergeordneten Struktur des Gebäudes. Sie wird an die Nutzung des Innenraums und die äußere architektonische Gestalt angepasst und definiert somit das Erscheinungsbild des Gebäudekorpus. Für den Innenraum ergibt

sich dadurch die Möglichkeit, spezielle Nutzungen, wie beispielweise Sitzgelegenheiten, Pflanzenbehälter oder Arbeitsflächen, in die Fassade zu integrieren. Die Außenfläche definiert die Kubatur des Gebäudes und lässt sich durch die äußere Fassadenform an städtebauliche Anforderungen und den individuellen Gestaltungswillen anpassen.



[Abb. 9.5.1_1]
Fassadenschnitt
Design Ebene: Makro
Funktion: Anpassung an die innere Raumnutzung



[Abb. 9.5.1_2]
Fassadenschnitt
Design Ebene: Makro
Funktion: Anpassung an äußere Einflüsse
(Städtebau / Gestaltung)

**Tomorrow Fassadenelement
Design-Ebene
Makro**



[Abb. 9.5.1_3]
Tomorrow Fassadenelement
Design Ebene: Makro
Funktion: Anpassung an die innere Raumnutzung
und äußere städtebauliche Gestalt

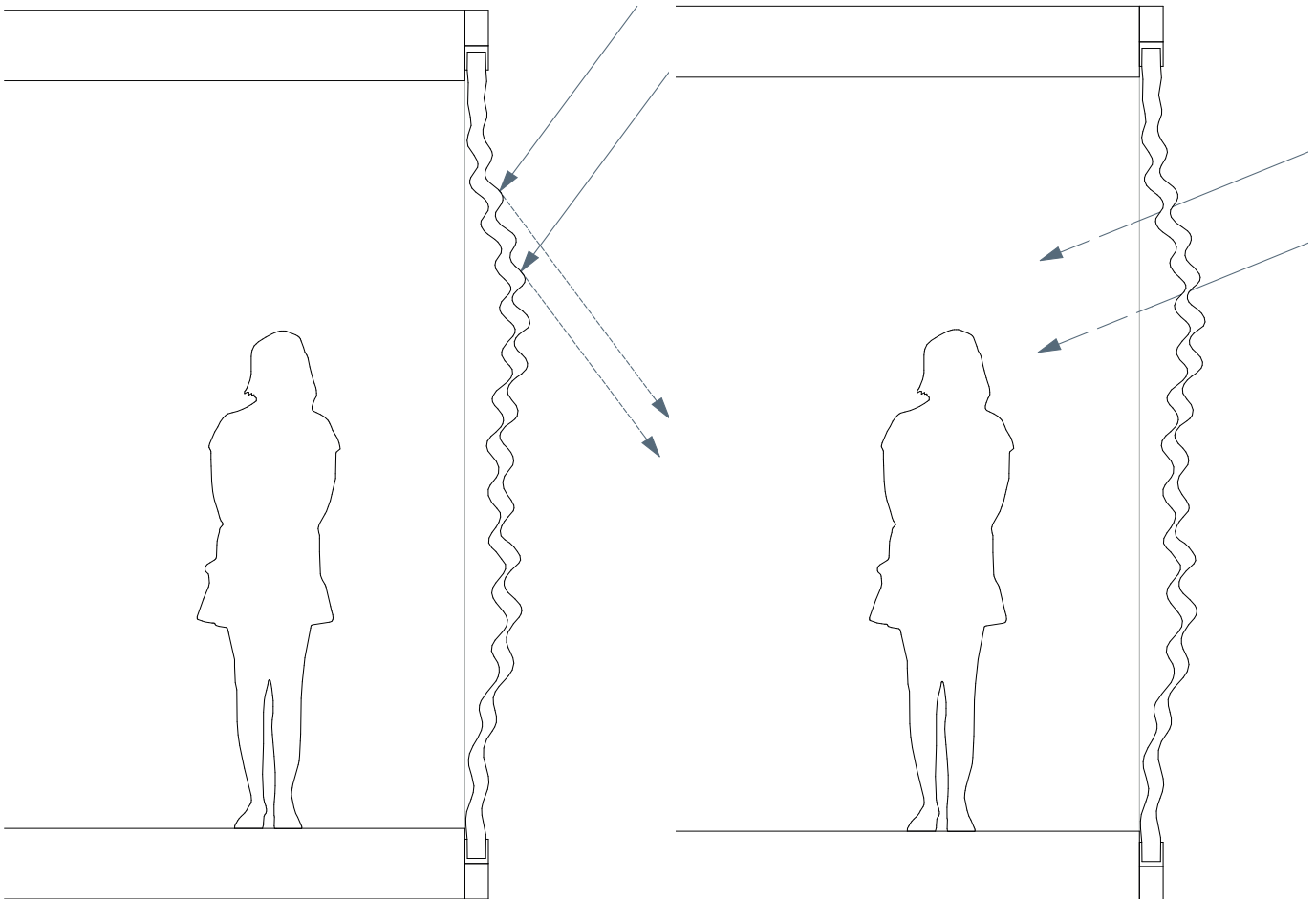
• Meso-Ebene

Diese Ebene übernimmt die Funktion des Sonnenschutzes und wird durch eine selbstverschattende Geometrie definiert, welche aus dem Standort und der Himmelsrichtung generiert wird. Der Meso-Maßstab ist hierfür geeignet, da der Sonnenschutz die Makro-Ebene schützen muss; er kann je nach Nutzung in seiner

Ausführung in der Größe angepasst werden.

Die im Sommer der Sonne zugewandten Wellengeometrien haben einen größeren Durchmesser und dadurch mehr innere Zellgeometrien, d. h. mehr Material, welches die Lichtdurchlässigkeit reduziert und dadurch verschattet.

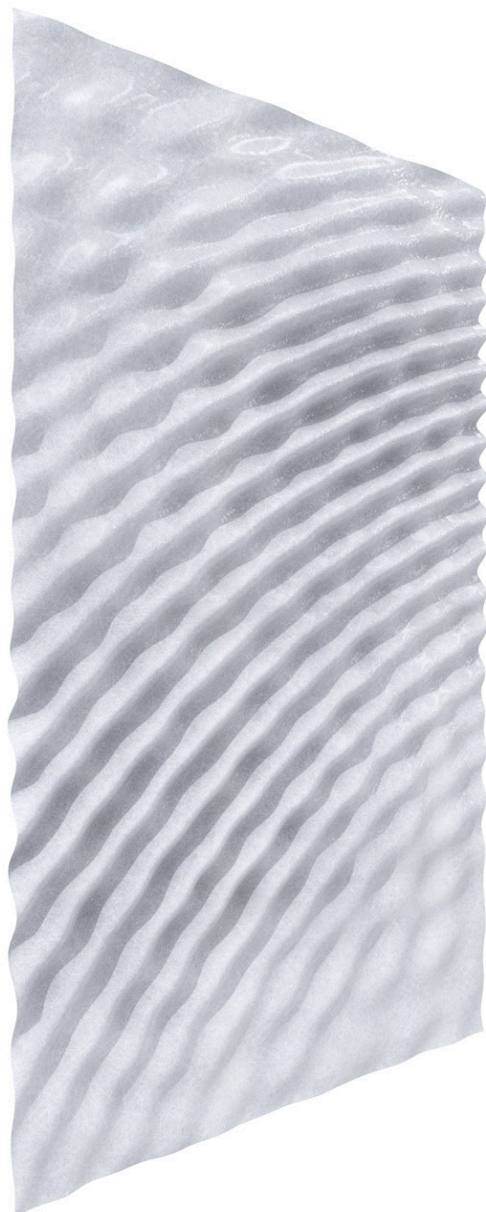
Im Gegensatz dazu wird im unteren Bereich der Wellengeometrie der Durchmesser geringer; dadurch wird die Lichtdurchlässigkeit erhöht, sodass indirektes Tageslicht in das Gebäudeinnere geführt wird.



[Abb. 9.5.1_4]
Fassadenschnitt
Design Ebene: Meso
Funktion: Sonnenschutz - Eigenverschattung im Sommer

[Abb. 9.5.1_5]
Fassadenschnitt
Design Ebene: Meso
Funktion: Ertrag von solarer Strahlung im Winter

Tomorrow Fassadenelement
Design-Ebene
Meso



[Abb. 9.5.1_9]
Tomorrow Fassadenelement
Design Ebene: Meso
Funktion: Geometrie zur Eigenverschattung

Auslegung der Eigenverschattung für den gewählten Standort, TUM-Solarstation

Die Wellengeometrie verschattet von Mai bis September die Unterseite der Welle. Dies ist notwendig, um die in diesem Bereich der Fassade geringeren Durchmesser vor Überhitzung zu schützen. In den Monaten von Oktober bis April sollen diese Bereiche nicht verschattet werden.

Dies wird über eine Sonnenstandssimulation untersucht (RhinoModell Grasshopper + Heliotope) um die Eigenverschattungsgeometrie zu finden und zu überprüfen.



[Abb. 9.5.1_6]

Sonnenstandssimulation

Auszug 01.05. 13:00 Uhr

Standort: Solarstation TUM

Funktion: Sonnenschutz - Eigenverschattung im Mai



[Abb. 9.5.1_7]
Sonnenstandssimulation
Auszug 21.06. 13:00 Uhr
Standort: Solarstation TUM
Funktion: Sonnenschutz - Eigenverschattung im Sommer

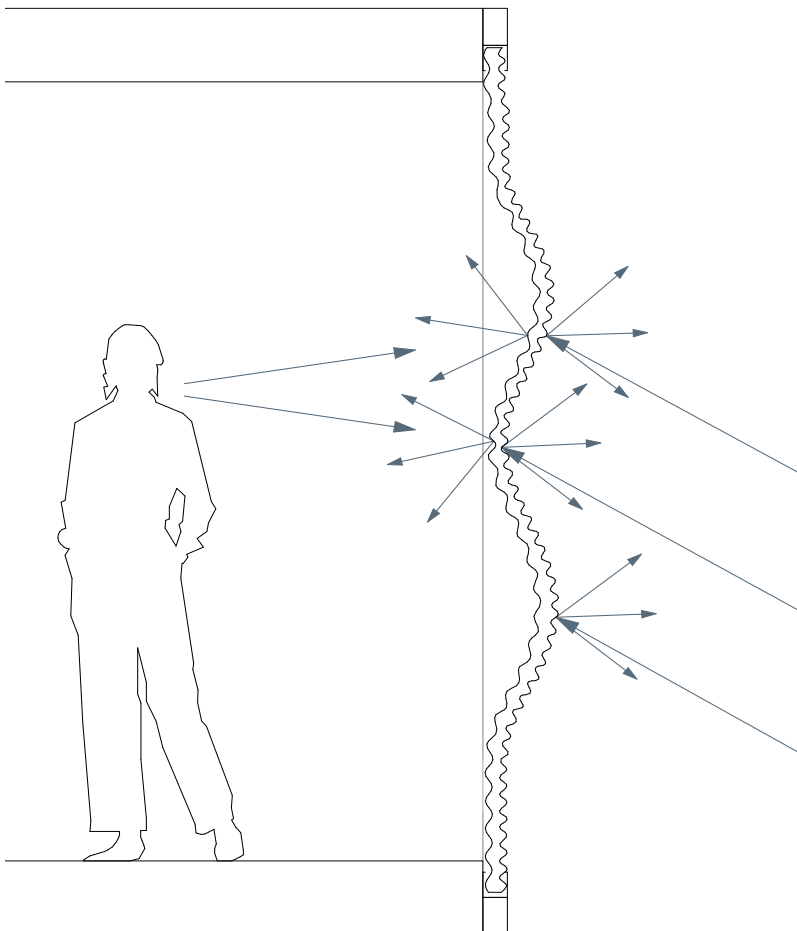


[Abb. 9.5.1_8]
Sonnenstandssimulation
Auszug 21.12. 13:00 Uhr
Standort: Solarstation TUM
Funktion: Ertrag von solarer Strahlung im Winter

• Mikro-Ebene

Diese Ebene wird durch die akustischen Anforderungen sowohl für den Innenraum als auch für den Außenraum definiert. Die Wellengeometrie wird genutzt, um die Schallwellen zu streuen – also nicht direkt zu reflektieren wie bei einer geraden Fläche. Diese Anwendung lässt sich an verschiedene Anforderungen (Schallin-

tensitäten) anpassen, indem die Höhe (Amplitude) der Wellengeometrie auf die nötige Oberflächegeometrie übertragen wird. Die Auslegung der akustischen Oberflächegeometrie lässt sich für den Innen- und Außenraum individuell erstellen, um somit den verschiedenen Anforderungen Rechnung zu tragen.



[Abb. 9.5.1_10]

Fassadenschnitt

Design Ebene: Mikro

Funktion: Unterschiedliche akustische Geometrie zur Schallsteuerung innen und außen

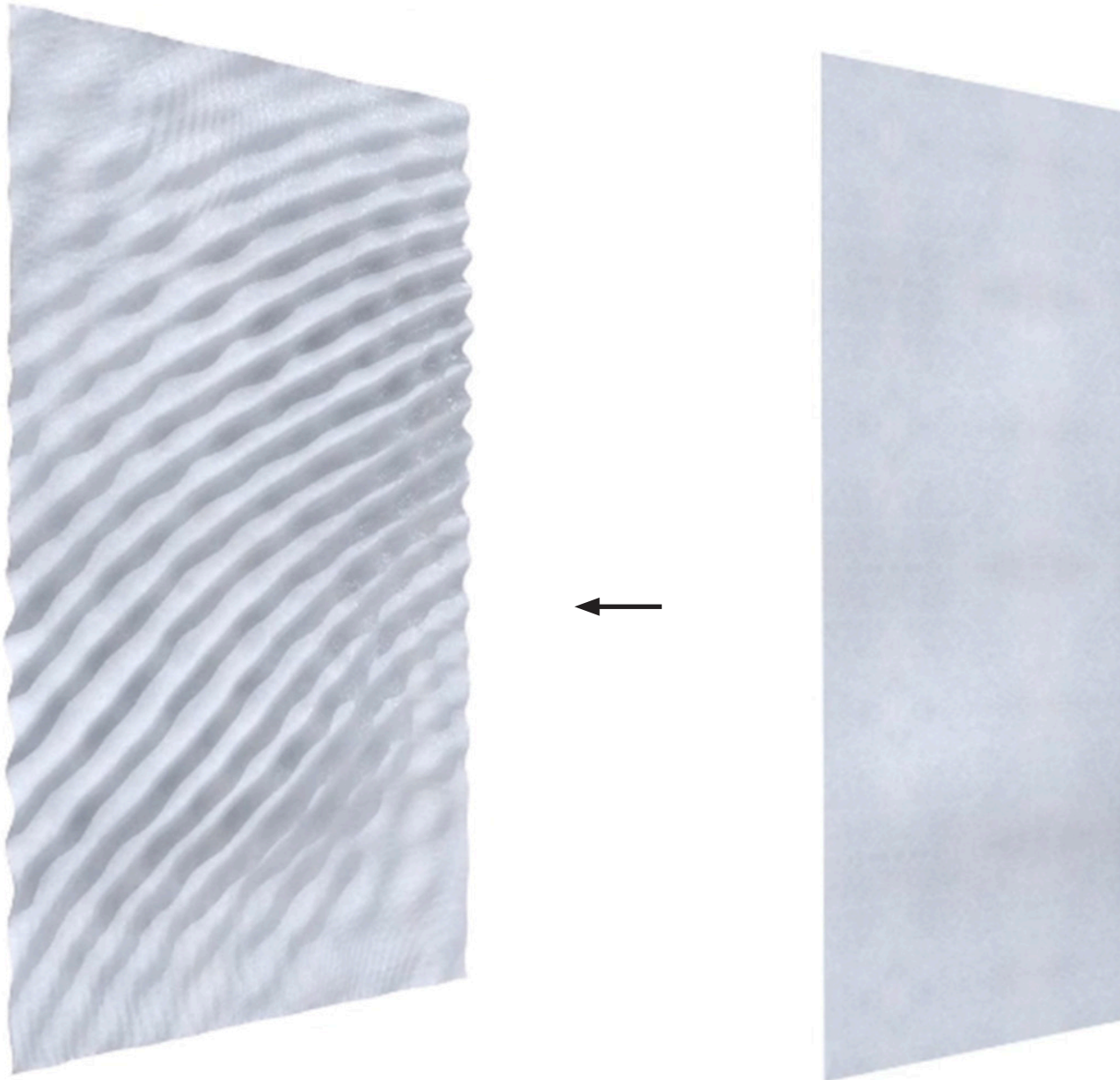
**Tomorrow Fassadenelement
Design-Ebene
Mikro**



[Abb. 9.5.1_11]
Tomorrow Fassadenelement
Design Ebene: Mikro
Funktion: Geometrie zur Schallsteuerung

Tomorrow Fassadenelement Design-Ebenen

Die drei Design-Ebenen Makro, Meso und Mikro werden zu einer Ebene verschmolzen und ergeben somit das finale Oberflächendesign des Fassadenelements.



Finales Design der Design-Ebenen

[Abb. 9.5.1_12]

Tomorrow Fassadenelement

Design Ebenen:

v. r. n. l. Mikro, Meso, Makro, finales Design alle Layer kombiniert



Makro-Ebene



Meso-Ebene



Mikro-Ebene

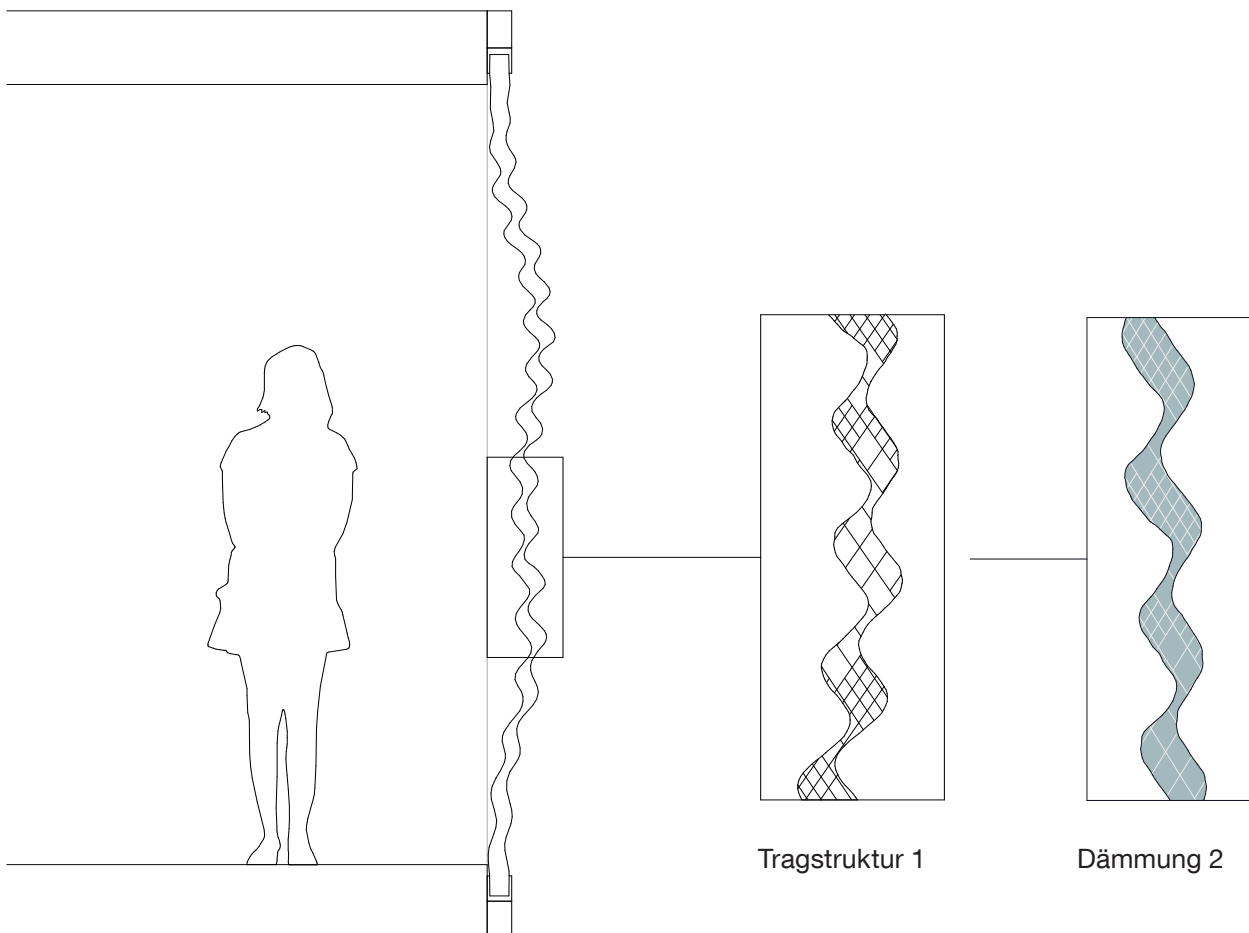
9.5.2 Funktions-Ebenen

Die Funktions-Ebenen bilden das Innenleben mit weiteren Funktionen ab: im ersten Schritt die Dämmung/Tragstruktur (Strukturoptimierung) und im zweiten die natürliche Belüftung.

• Funktions-Ebene: Dämmung/Tragstruktur

Die Dämmung und Tragstruktur werden simultan in einer Funktions-Ebene umgesetzt.

Um effiziente Dämmeigenschaften zu erreichen, werden geschlossene Zellgeometrien untersucht, aufbauend auf der Voruntersuchung der Funktionsgeometrie U3 aus Teil 1.



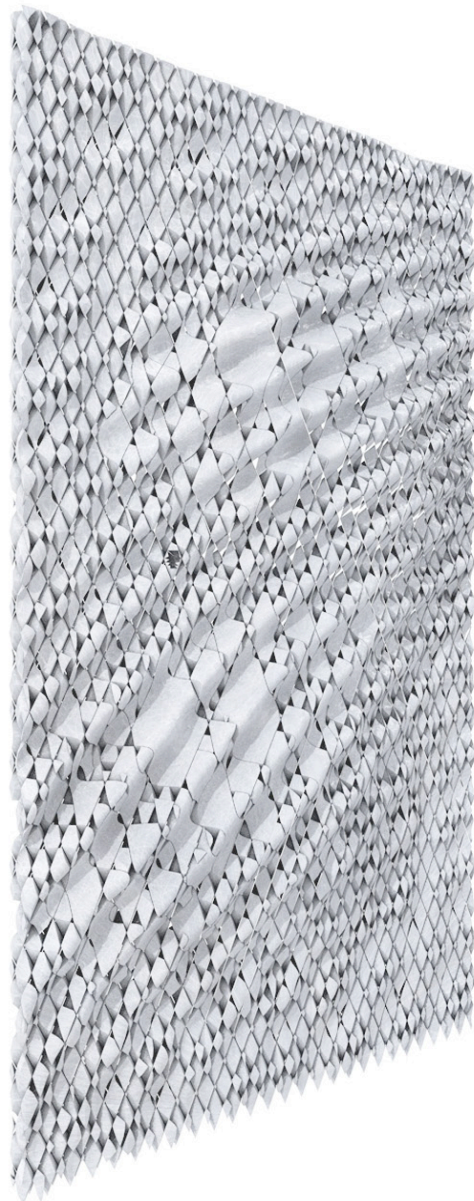
[Abb. 9.5.2_1]

Fasadenschnitt

Funktions-Ebene: Tragstruktur/ Dämmung

Funktion: Tragstruktur 1 / Dämmung 2

**Tomorrow Fassadenelement
Funktions-Ebene
Dämmung / Tragstruktur**



[Abb. 9.5.2_2]
Tomorrow Fassadenelement
Funktions-Ebene
Funktion: Dämmung / Tragstruktur

Untersuchung der verschiedenen Zellgeometrien zur Anwendung als Dämm- und Tragstruktur

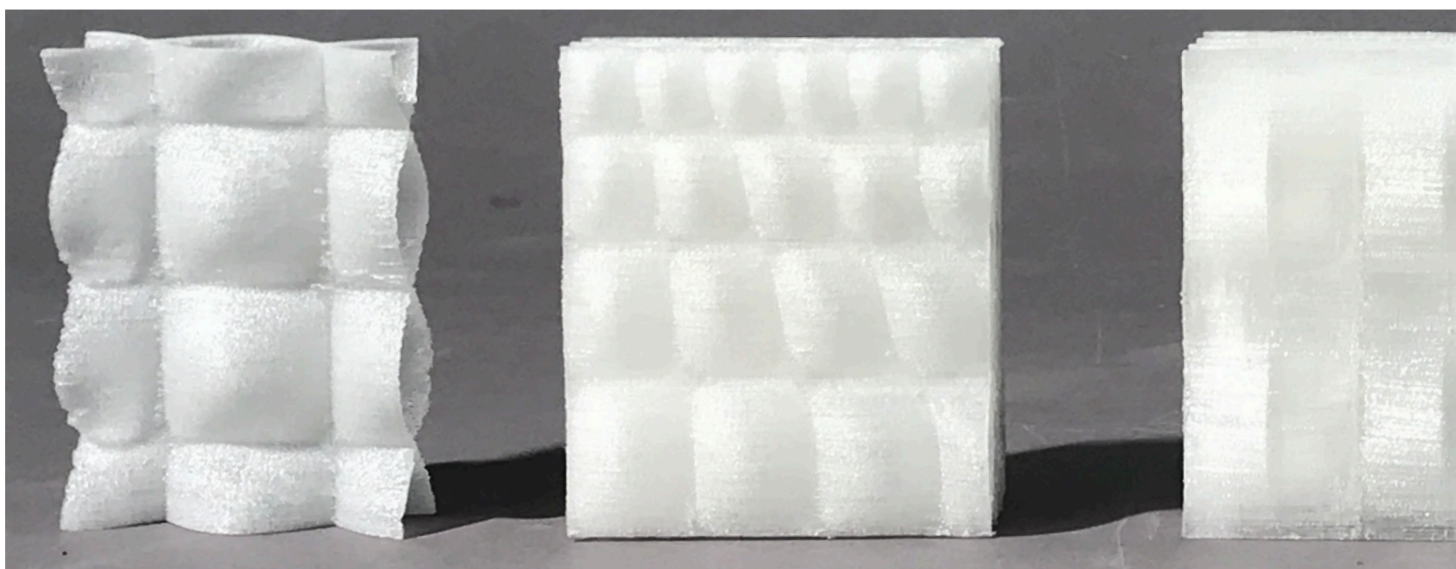
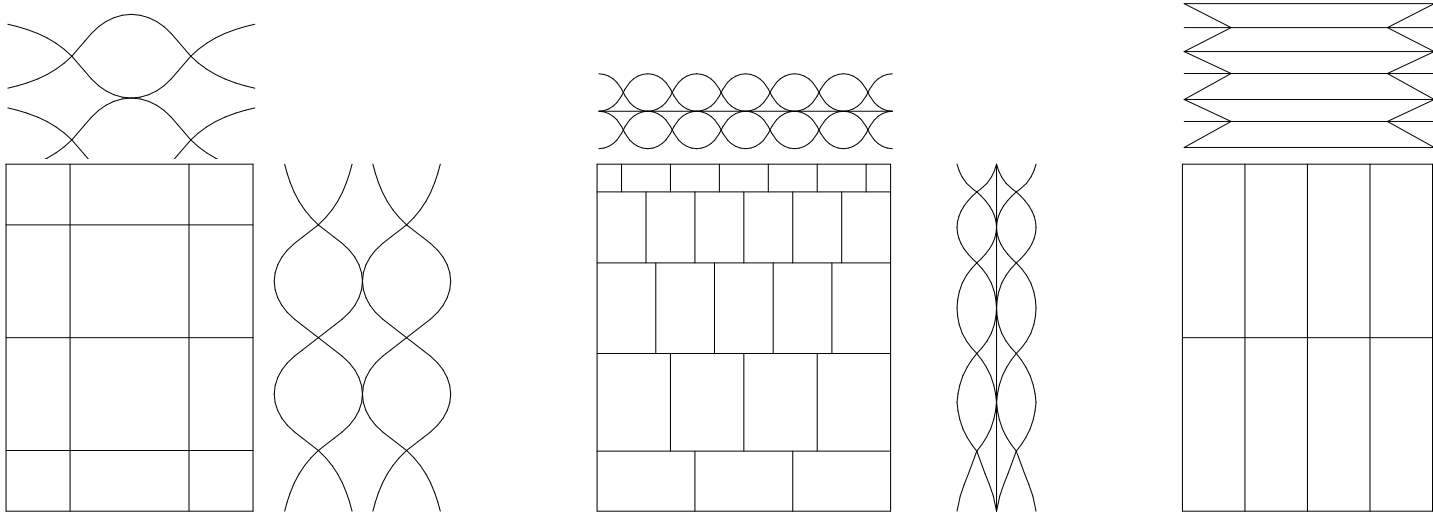
Verschiedene Zellgeometrien wurden entwickelt und mit dem 3D-Drucker hergestellt. In der folgenden Abbildung werden verschiedene Entwicklungen gezeigt und anhand der folgenden Einflussparameter verglichen. Einflussparameter für die Geometrieentwicklung:

1. FDM-prozessfreundlich

Welche Geometrie ist ohne zusätzliches Stützmaterial druckbar? Stützmaterial kann nicht verwendet werden, da die Zellen luftdicht geschlossen sind, um die besten Dämmeigenschaften zu erreichen.

2. Festigkeit

Da es sich gleichzeitig um die Geometrie der Tragstruktur handelt, liegt der Fokus zur Auswahl auf der Festigkeit/Steifigkeit. Daraus ergibt sich die Untersuchung von zweifach gekrümmten und dreieckigen Zellstrukturen.



U2 Zweifach gekrümmt hoch

U3 Zweifach gekrümmt flach mit Verlauf

U3 Zweifach gekrümmt flach mit Steg

[Abb. 9.5.2_3]

Oben: Zeichnungen der Ansicht und Schnitte der Zellgeometrien

3. Konvektion

Damit Luft als Dämmschicht genutzt werden kann, ist die Luftbewegung zu unterbinden. Konvektion tritt auch bei geschlossenen Zellen ab einer Breite von 5 cm und/oder ab einem Volumen von 25 cm³ auf. Daher sind Zellen mit Größen bzw. Grenzwerten unter

den oben genannten untersucht worden.

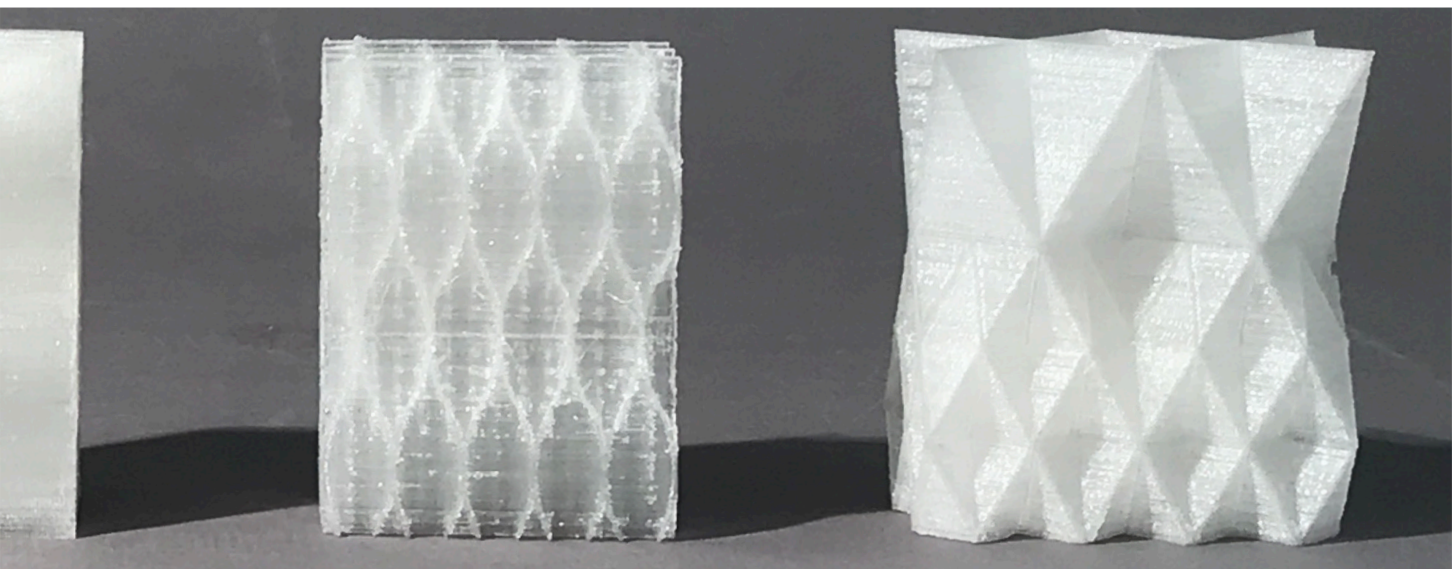
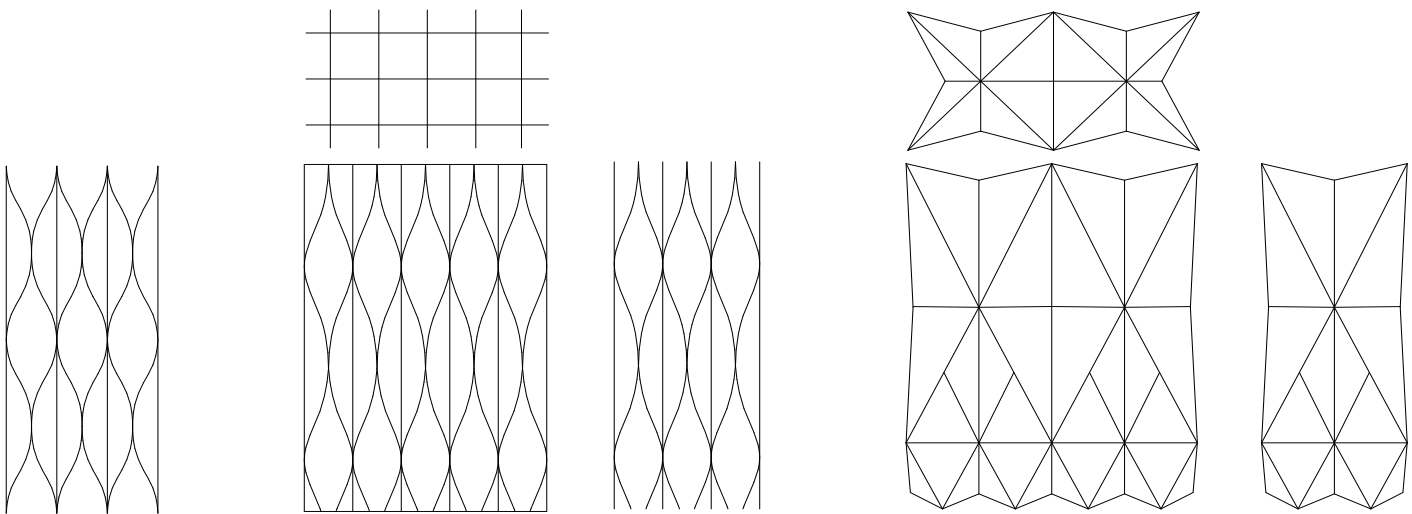
4. Datenvolumen

Die Dämm- und Traggeometrie haben erheblichen Anteil an der gesamten Datenmenge. Dies ist ein wichtiger Aspekt, wenn es darum geht, das Handling der

digitalen Modelle in einem angemessenen Zeitraum sicherstellen zu können.

5. Materialeffizienz

Weniger Material bedeutet gleichzeitig eine geringere Druckdauer bei der Herstellung.



U3 Zweifach gekrümmt
flach

U4 / U5 Tetraeder/ Doppeltetraeder

[Abb. 9.5.2_4]

Unten: 3D-gedruckte Modelle der einzelnen Zellgeometrien um die Druckbarkeit und Druckdauer zu überprüfen
Ansicht

Evaluierungsmatrix zur Auswahl der effizientesten Zellgeometrie

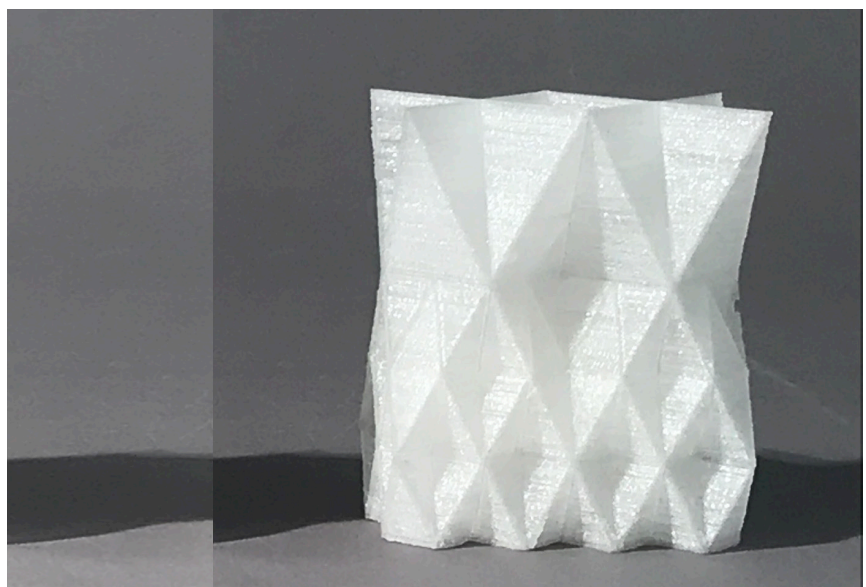
Diese Evaluierungsmatrix dient zur Auswahl der Zellgeometrie unter Berücksichtigung der verschiedenen Einflussparameter wie zuvor beschrieben.

Legende (Bewertungsgrößen der Eigenschaften):
 + = gut 0 = mittel - = schlecht

Ergebnisse Zellgeometrien	FDM-prozess-freundlich	Festigkeit	Keine Konvektion	Handling Datenvolumen	Material-effizienz
U1: Air Cells	0	0	+	-	+
U2: zweifach gekrümmt hoch	-	+	+	-	0
U3: zweifach gekrümmt flach	0	0	+	-	0
U4: Tetraeder	+	+	+	+	+
U5: Doppel-tetraeder	+	+	+	++	++

Ergebnis

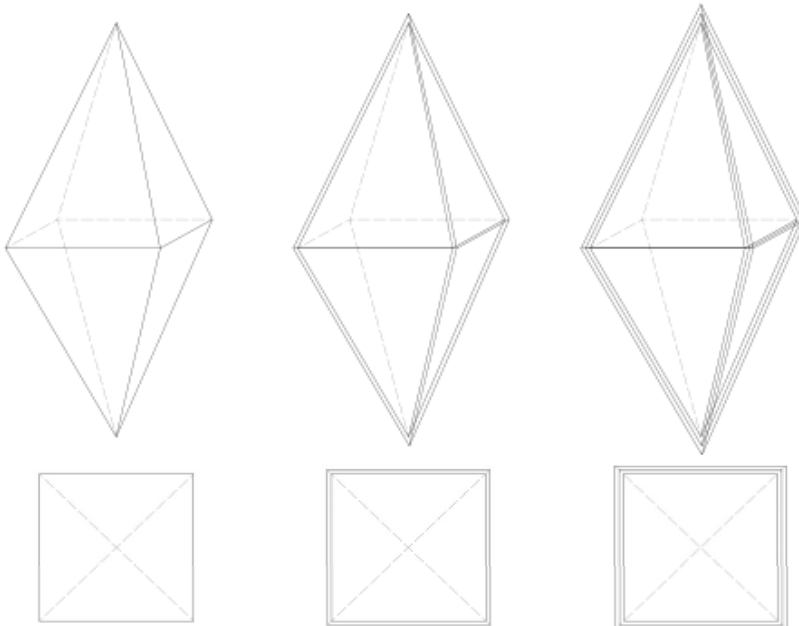
Die Tetraeder-Zellstruktur ist hinsichtlich Herstellung, Festigkeit und Datenvolumen am erfolgversprechendsten. Die Kopplung zweier Zellen macht eine Fläche obsolet und vermindert dadurch die Druckzeit und den Materialeinsatz.



[Tab. 9.5.2_1]
 Evaluierungsmatrix zur Auswahl der Zellgeometrie
 [Abb. 9.5.2_5]
 3D-gedrucktes Modell der Tetraeder- Zellstruktur

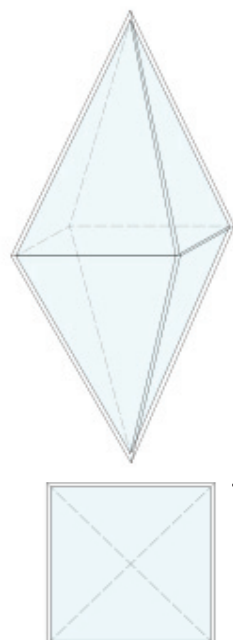
Strukturoptimierung der Tragstruktur

Die Zellwanddicke jeder einzelnen Zelle lässt sich je nach Beanspruchung in ihrem Durchmesser anpassen. Dies ermöglicht eine materialeffiziente Nutzung der Vorteile der Fertigungsmethode im Hinblick auf die Topologieoptimierung.



Geringe Beanspruchung
1-Layer-Zellwand

Hohe Beanspruchung
3-Layer-Zellwand



Luftdichte Zellgeometrie

Dämmeigenschaften der Zellgeometrie

Die Tetraeder-Zellstruktur ist hinsichtlich der Dämmeigenschaften nicht ganz optimal in Vergleich zur Kugelgeometrie, hat aber hinsichtlich der Druckzeit und Verhinderung der Luftzirkulation zwischen den Zellen ohne Zusatzgeometrien einen Vorteil. Die Zellen sind luftdicht verschlossen. Um Konvektion in den Zellen zu vermeiden, sollten diese nicht zu groß ausgebildet werden ($d = \text{max. } 5 \text{ cm}$).

[Abb. 9.5.2_7]

Oben: Schma zur Anpassung der inneren Struktur für verschiedene Lastfälle

[Abb. 9.5.2_8]

Unten: Schma zur Dämmeigenschaft der inneren Struktur

• Funktions-Ebene: Natürliche Belüftung

Um eine natürliche Belüftung zu gewährleisten, wurde diese Ebene entwickelt. Je nach Anforderung werden Lüftungskanäle in die Funktionsebene 1 (Dämmung/Tragstruktur) integriert. Die Kanäle verbinden den Außenraum (Frischlufft) mit dem Innenraum.

Hier ist dies exemplarisch an einem Fall durchgeführt, in Bezug zum Raumvolumen der Solarstation und der Luftwechselrate. Einflussparameter zur zukünftigen

gen Ausbildung des Lüftungskanals

1. Jahreszeiten

Die verschiedenen Jahreszeiten beeinflussen die Form und Länge der Lüftungskanäle. Zum Beispiel wird in den kalten Monaten die Kanallänge größer, um eine längere Vorwärmdauer zu generieren. Außerdem liegt der Kanal an der Fassadeninnenseite, um die Raumwärme zur Vortemperierung zu nutzen (Abb. links).

2. Witterungsschutz

Um das Eindringen von Regenwasser zu vermeiden und Kondensat ableiten zu können, ist der Lüftungskanal mit einem Gefälle von innen nach außen versehen (Abb. links).

3. Insektenschutz

Insektenschutzgitter können in die Kanäle eingesetzt oder mittels FDM-Druck integriert werden.

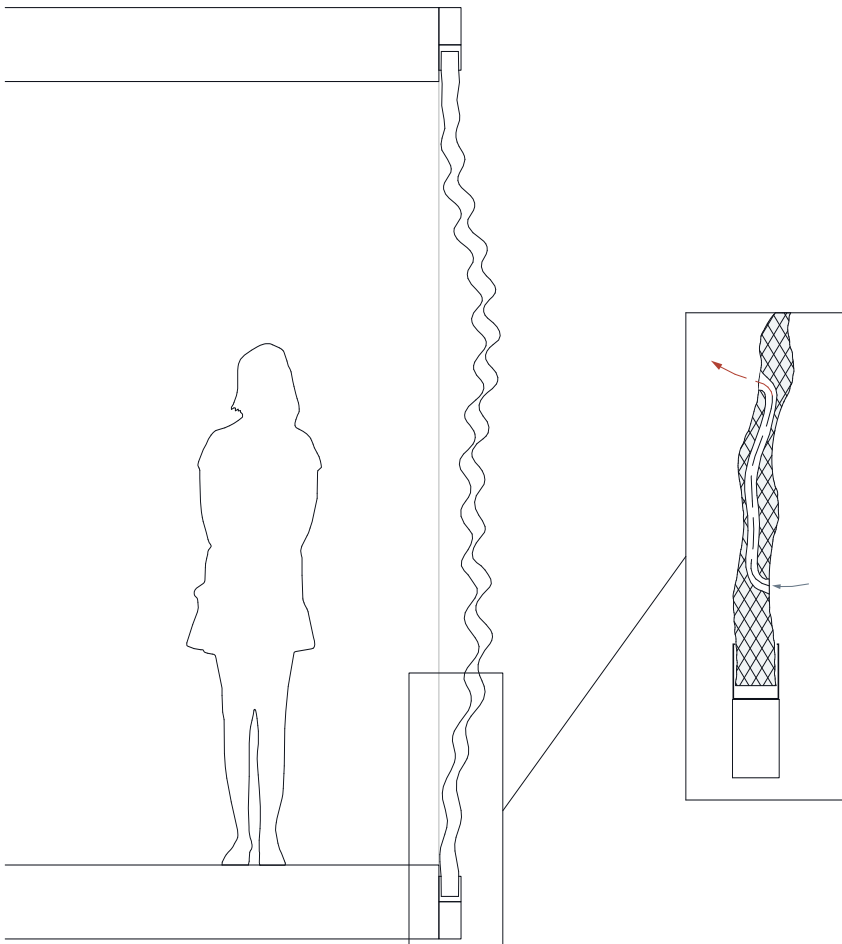
4. FDM-Prozess

Durch den Einsatz des FDM-Druckprozesses ergeben sich bei der Herstellung der Kanalgeometrie Einschränkungen. Auskragungen müssen ohne Stützmaterial realisiert werden.

5. Regelung - Nutzer / autoreaktive Aktivatoren

Die Regelung bzw. das Öffnen oder Schließen der Lüftungskanäle kann händisch über den Nutzer erfolgen oder auch automatisch über autoreaktive Aktuatoren, die beispielsweise mit Paraffinwachs gefüllt sind und sich bei einer bestimmten Temperatur schließen oder öffnen, indem die Aktuatoren den Durchmesser durch eine Aggregatsänderung vergrößern oder verringern.

Um eine sinnvolle Nutzung dieser Lüftungskanäle sicherzustellen und um Lüftungsanlagen zu vermeiden, müssen komplexe Kanalsysteme entwickelt werden. Als Vorbild aus der Natur kann das Lüftungssystem der Termitenhügel genannt werden. Je nach den Anforderungen im Innenraum und äußeren Umwelteinflüssen werden verschiedene Kanäle geöffnet oder verschlossen um ein gleichbleibende Temperatur im Inneren zu gewährleisten.



[Abb. 9.5.2_10]

Fassadenschnitt

Funktions-Layer

Funktion: natürliche Belüftung

Tomorrow Fassadenelement
Funktions-Ebene
Natürliche Belüftung



[Abb. 9.5.2_11]
Tomorrow Fassadenelement
Funktions-Ebene
Funktion: natürliche Belüftung

Tomorrow Fassadenelement
Zusammenführung der Design- und Funktions-Ebenen
Finales Design des Fassadenelements

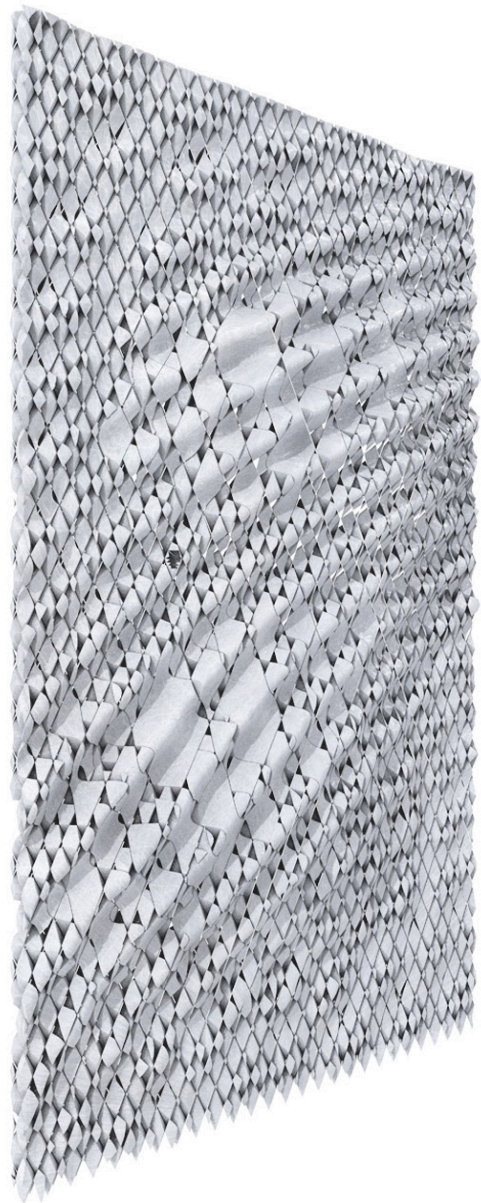


[Abb. 9.5.2_12]

Tomorrow Fassadenelement

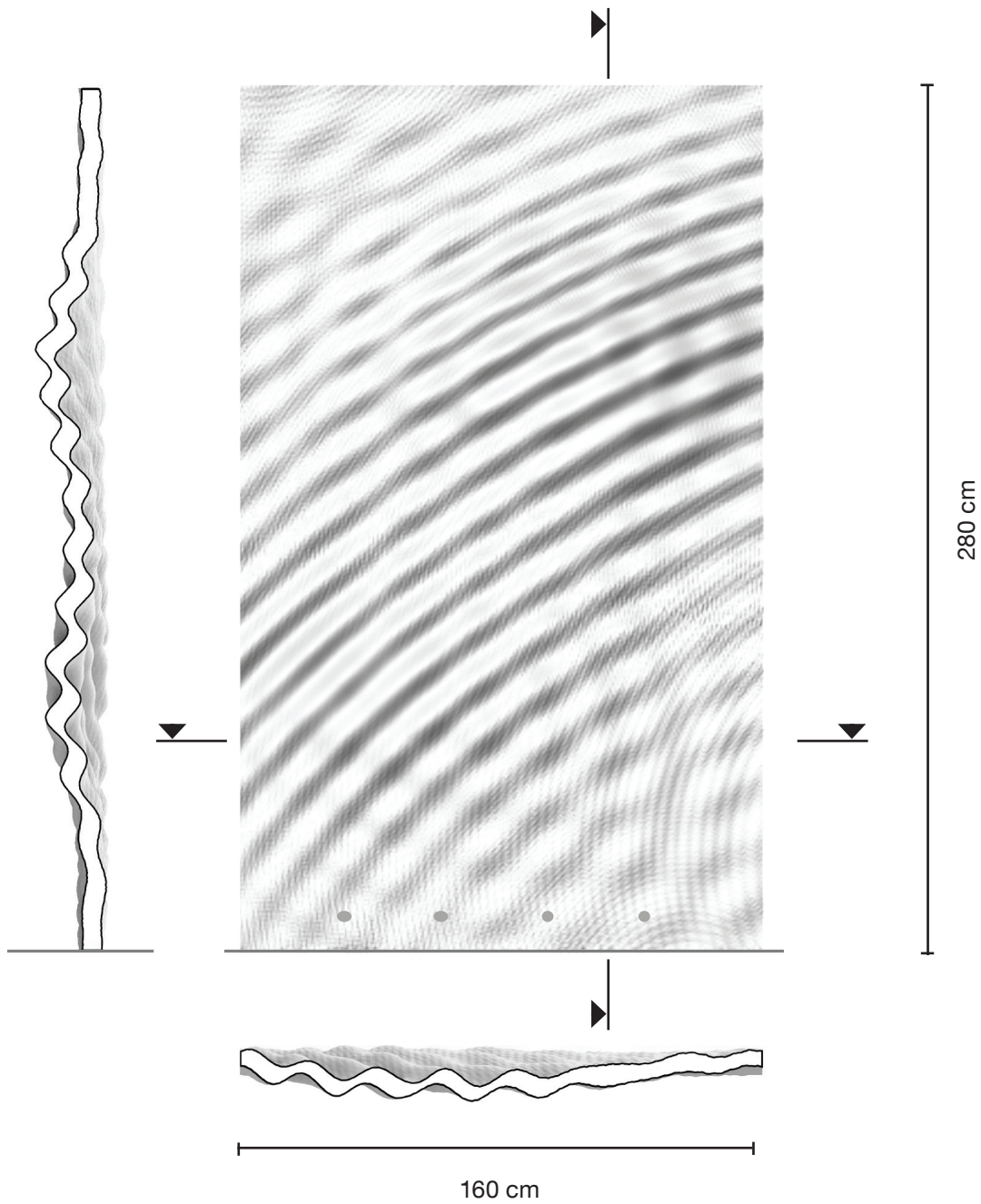
Funktions-Ebene:

v. r. n. l. Dämmung / Tragstruktur, natürliche Belüftung, finales Design (alle Design- und Funktion-Ebenen kombiniert)



9.5.3 Finaler Entwurf des Fassadenelements

Der finale Entwurf ergibt sich aus der Zusammenführung der verschiedenen Design- und Funktionsebenen zu einem Fassadenelement.



[Abb. 9.5.3_1]
Tomorrow Fassadenelement
Finales Design
Links: Vertikalschnitt, Rechts: Ansicht, Unten: Horizontalschnitt

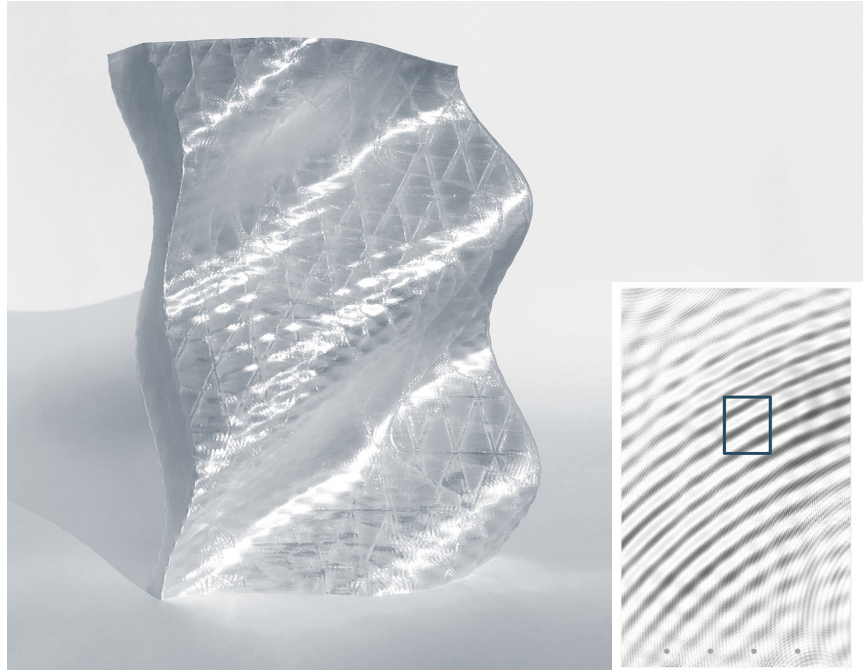


[Abb. 9.5.3_2]
Tomorrow Fassadenelement
Finales Design mit Rahmenkonstruktion

9.6 Tomorrow-Element Ergebnisse: Produktion von prototypischen Modellen

Durch den Einsatz von FDM-Druckern und des transparenten Materials PETG lassen sich innerhalb einiger Stunden Prototypen mit den finalen Eigenschaften herstellen. Verschiedenen Bereiche wurden ausgewählt, um die entwickelten Geometrien mit ihren Funktionen zu überprüfen und zu verbessern. Dies ist ein immenser Vorteil, da man zeitnah ein belastbares Feedback zu den entworfenen Annahmen bekommt und den Herstellungsprozess und die Materialeigenschaften in Kombination mit den Funktionen als ein Element untersuchen kann.

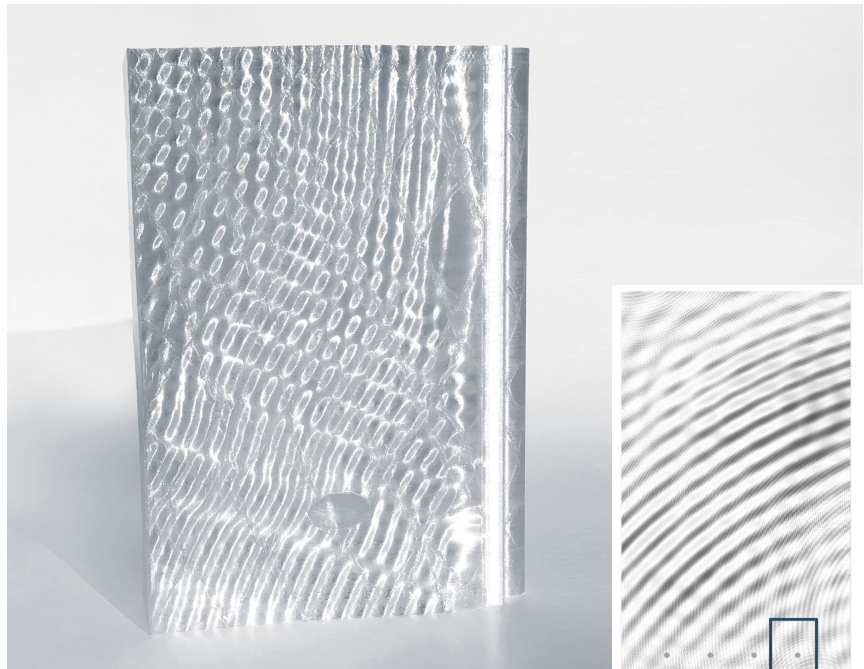
Zur Umsetzung wurden FDM-Drucker der Firma Ultimaker und transparentes PETG Filament XT der Firma Colorfabb genutzt.



9.6.1. Eigenverschattung und Tageslichtnutzung Ausschnittsmodell M 1:1

Dieses Ausschnittsmodell im Maßstab 1:1 ist aus dem Bereich der Eigenverschattung, der Tageslichtnutzung und der Dämm- und Tragstruktur. Die Eigenschaften wie Eigenverschattung und Tageslichtnutzung wurden durch Tests im Außenbereich verifiziert und die Herstellbarkeit sichergestellt.

Die Bereiche zur Verschattung und zur Tageslichtnutzung lassen sich klar ablesen und zeigen die gewünschten Eigenschaften, wie in 9.5.1 beschrieben.



[Abb. 9.6.1_1]

Oben: 3D-gedrucktes Ausschnitts-Modell M 1:1 (FDM)

Test der inneren Struktur und der Eigenverschattungsgeometrie

[Abb. 9.6.2_1]

Unten: 3D-gedrucktes Ausschnitts-Modell M 1:1 (FDM)

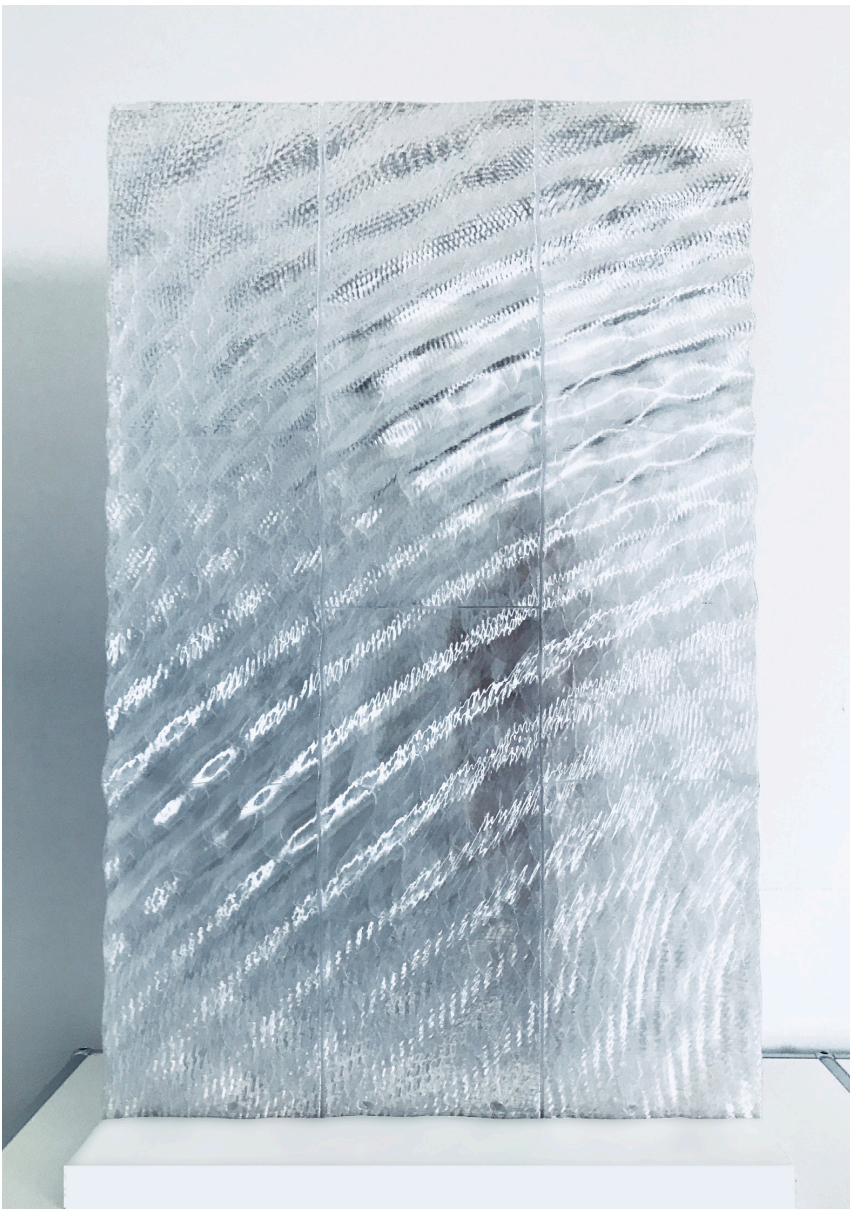
Test der inneren Struktur und die Integration der Lüftungskanäle

9.6.2. Belüftung, Akustik, Dämm- und Tragstruktur Ausschnittsmodell M 1:1

Dieses Ausschnittsmodell im Maßstab 1:1 ist aus dem Bereich der natürlichen Belüftung, Akustik und Dämm- und Tragstruktur. Die Herstellbarkeit dieser komplexen Kombination von sich verschneidenden Geometrien, des elliptischen Lüftungskanals und der Tetraeders-Struktur wird hiermit sichergestellt.

9.6.3 Elementsegmentierung Gesamtmodell M 1:3

Bei diesem Modell liegt der Hauptfokus, neben der kompletten Abbildung der architektonischen Gestalt, auf der Segmentierung des Fassadenelements zur Herstellung eines Prototyps im Maßstab 1:1. Die Segmentierung richtet sich nach der Bauraumgröße des 3D-Druckers und als Verbindungsgeometrie wird eine Nut-und-Feder-Steckverbindung gewählt, um auf Klebstoffe zu verzichten und die Winddichtigkeit zu erreichen. Die gewählte Steckverbindung hat sich in diesem Modell bewährt.



[Abb. 9.6.3_1]

3-D-gedrucktes Ausschnitts-Modell M 1:3 (FDM)
Test der Segmentierung und des Verbindungssystems

9.7 Tomorrow-Element - Mögliche Einsatzbereiche

Welche Einsatzbereiche ergeben sich für ein 3D-gedrucktes und funktionsintegriertes Fassadenelement? Zwei mögliche Szenarien werden hier exemplarisch aufgezeigt.

9.7.1. Einsatz in bestehendem Fassadensystem (Rodeca)

Ein möglicher Einsatzbereich ist die Herstellung von 3-D-gedruckten Sonderbauteilen für ein bestehendes Fassadensystem aus transparentem Kunststoff, wie beispielsweise Rodeca-Lichtbauelemente aus Polycarbonat. Sonderlösungen für Ecken und Neigungsänderungen und die Integration von Fenstern lassen sich für einzelne Einsatzbereiche kostengünstig herstellen.



[Abb. 9.7.1_1]

Oben: 3D-Modell Rodeca Fassade
mit 3-D-gedrucktem Sonderelement mit integriertem Fenster

[Abb. 9.7.1_2]

Unten: 3D-Modell Rodeca Fassade
mit 3-D-gedrucktem Sonderelement zur Neigungsänderung

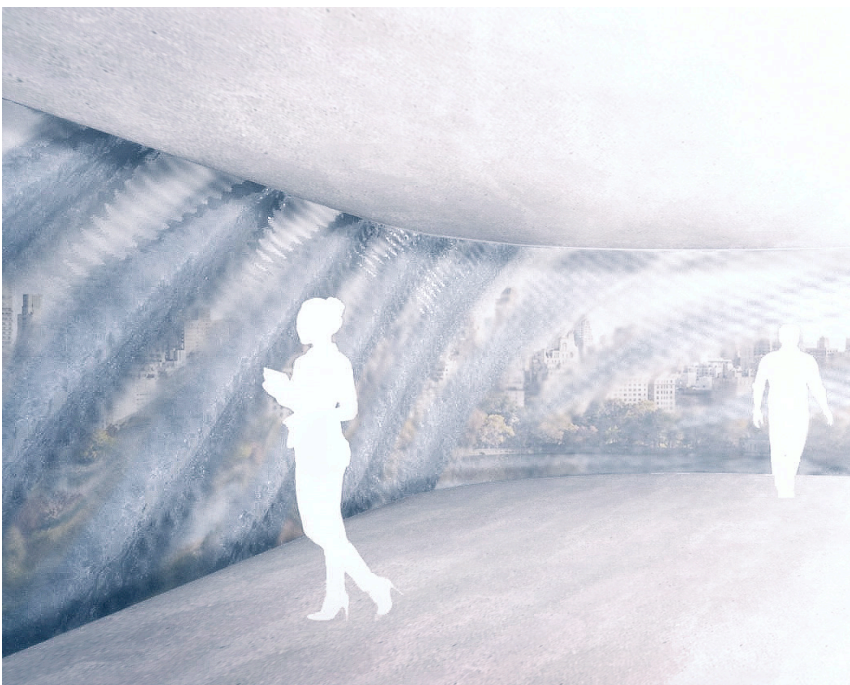
9.7.2 Einsatz als eigenständiges Fassadenelementsystem

Eine komplette Fassade aus 3D-gedruckten Fassadenelementen, die als Vorhang-Fassade geschossweise montiert werden: Zielprojekte sind Sonderbauten wie Bibliotheken, Konzerthäuser, Museen usw. Zukünftig wäre auch der Einsatz als Bürofassade denkbar.



Die integrierten Funktionen lassen sich an die jeweiligen Anforderungen und Standorte anpassen. Beispielsweise wird die Wellenform zur Eigenverschattung der Sonnenschutzebene an die Himmelsrichtungen angepasst, im Osten und Westen vertikal und im Süden horizontal. Die Amplitude der Verschattungswellen kann vergrößert werden, um eine höhere Durchlässigkeit zwischen Innen- und Außenbereich herzustellen oder um transparente Flächen einzusetzen.

[12] (Sigmund 2017 : 79)



[Abb. 9.7.2_1]

Oben: Visualisierung der Einsatzmöglichkeit als komplette Fassadenlösung für Sonderbauten

[Abb. 9.7.2_2]

Unten: Visualisierung der Anpassbarkeit an verschiedene Himmelsrichtungen (links Osten, rechts Süden)



**10. Teil 3: Dokumentation der
Herstellung eines Prototyps und
dessen experimentelle Untersu-
chung der optischen, thermischen
und statischen Eigenschaften**

10. Teil 3: Dokumentation der Herstellung eines Prototyps und dessen experimentelle Untersuchung der optischen, thermischen und statischen Eigenschaften

Vorbemerkungen

Nach der Entwicklung des ‚Tomorrow-Elements‘ in Teil 2 und der Erstellung der digitalen 3D-Modellgrundlagen konzentrieren sich die Untersuchungen in Teil 3 auf folgende Themen:

1. Prototypen Erstellung

Erkenntnisgewinne, die bei der Herstellung des Fassadenprototyps mittels des FDM-Druckprozesses des ‚Tomorrow-Elements‘ gewonnen werden, um bei zukünftigen Untersuchungen ein Grundlagenwissen des Fertigungsprozesses zu generieren. Bislang wurde noch kein Bauteil in dieser Größe und Komplexität mit diesem Prozess und Material umgesetzt.

2. Bauteilrelevante Prüfungen

Verschiedene Untersuchungen der statischen, bauphysikalischen und brandtechnischen Eigenschaften der Geometrieentwicklung des Einzelelements ‚Tomorrow‘ (Druck und Zug und Biegung, U-Wert, g-Wert und Brandverhalten).

3. Experimentelle Vergleichsmessung

Vergleichsmessungen der beiden Elemente ‚Today‘ und ‚Tomorrow‘ auf der Solarstation (Eigenverschattung, Beleuchtungsstärke, Tageslichtquotient und Fassadenoberflächentemperatur).

4. Langzeittest

Beobachtung der Witterungseinflüsse auf die Oberflächenqualität.

Ziel der Vielzahl von Tests in Teil 3 ist es, erste Einschätzungen zu den verschiedenen Anforderungen zu bekommen, um neues Wissen für weitere Entwicklungen zu generieren. Zur Herstellung des ‚Tomorrow-Elements‘ wird ein 3D-Drucker der Professur für Entwerfen und Gebäudehülle an der TUM genutzt.

Als Testeinrichtungen dienen bei diesen Untersuchungen der Fassadenteststand auf der Solarstation der TUM für die Langzeittests der Auswirkungen der Witterungseinflüsse und für die Vergleichsmessungen der Fassadenelemente ‚Today‘ und ‚Tomorrow‘, das Holzforschungslabor der TUM für Druck-, Zug- und Biegeversuche, Brandversuchsanstalt Holzforschung TUM für die Brandversuche zur Ermittlung der Baustoffklasse und das IFT Rosenheim für die U-Wert / g-Wert Bestimmung. Die Untersuchungen auf der Solarstation der TUM sind als Potenzialabschätzungen zu verstehen. Dies hängt mit den begrenzt zur Verfügung stehenden Messeinrichtungen zusammen und führt im Rahmen dieser Promotion zu einer exemplarischen Einschätzung. Die Ergebnisse sollen dazu dienen, Bereiche für weitere wissenschaftliche Untersuchungen aufzuzeigen.

Die Ergebnisse und Auswertungen von Teil 3 werden die Hypothese dieser Dissertation entweder bestätigen oder weitere zu untersuchende Forschungsschwerpunkte aufzeigen.

Abweichungen bei der Erstellung der Testelemente

Nachdem sich bei den Ergebnissen von Teil 2 herausgestellt hatte, dass es nicht möglich ist transparente Flächen zu drucken, wurde auf die Integration des Fensters bei der Herstellung des Today-Elements verzichtet. Ebenfalls wurden die Lüftungsöffnungen im Today-Element nicht umgesetzt, da es bei der Testeinrichtung für die Vergleichsmessungen auf der Solarstation keine Einrichtungen für eine Luftwechseluntersuchung gibt.

Forschungsfragen von Teil 3:

Ist es möglich das 3D-gedruckte Fassadenelement im Maßstab 1:1 herzustellen?

Wie ist die Abweichung zum 3D CAD-Modell?

Wie sind die materialtechnischen Eigenschaften eines 3D-gedruckten Bauteils?

Funktioniert die Eigenverschattung, wie durch die Simulation ermittelt?



Um eine Untersuchung im Maßstab 1:1 von einem in seiner Geometrie sehr komplexen Fassadenelement (Tomorrow-Element) durchzuführen, ist es wichtig, eine Referenzfassade (Today-Element) zu wählen, um Vergleichsmessungen herstellen zu können.

10.1 Herstellung des Today-Elements (Rodeca), M 1:1

Die Herstellung des Today-Elements mit den Maßen 2,80 m Höhe und 1,60 m Breite erfolgte nach der Montageanleitung des Rodeca-Systems.

Die Aluminiumprofile wurden auf Gehrung zugeschnitten und mit Aluminiumwinkeln verschraubt. Rückseitig wurde die Dichtungslippe geklemmt, und die Rodeca-Lichtbauelemente PC-2560, $d = 60\text{mm}$, wurden auf die Länge von 2,70 m gekürzt. Die drei Lichtbauelemente wurden an den Vertikalfugen zusammengesteckt, oben und unten mit einem dampfdurchlässigen Klebeband verschlossen und in den Rahmen gelegt. Aluminiumklemmprofile wurden eingesetzt und die Dichtungslippe aufgesteckt. Mittels Aluminiumwinkel wurde das Element auf der Testeinrichtung befestigt.

Gewicht ohne Rahmen: 33 kg > ca. 7,5 kg/m²

Gesamtgewicht: 39 kg

[Abb. 10.1._2]

Oben: Montage des Today-Fassadenelements auf der TUM-Solarstation

[Abb. 10.1._3]

Unten: Today-Fassadenelement montiert an der Testeinrichtung

10.2 Herstellung des Tomorrow-Elements, M 1:1

Die Herstellung des Elements wurde mit handelsüblichem Material (Filament) und 3D-Drucker umgesetzt.

Um das Fassadenelement mit den Abmessungen 280 x 160 cm zu drucken, ist es notwendig, eine Segmentierung des Formats – in Abhängigkeit vom Bauraum des verwendeten 3D-Druckers – durchzuführen.

Die maximale Breite des Bau-raums für ein Element mit ca. 20 cm Bautiefe beträgt beim Delta Tower ca. 80 cm, dadurch verringert sich auch die Höhe auf ca. 90 cm.

Um den Fugenteil so gering wie möglich zu halten, wurde eine Maximalgröße des Einzelelementes von 74 cm Breite und 90 cm Höhe gewählt.

Daraus ergeben sich sechs Einzelelemente für die Fertigung.

Über eine Nut-und-Feder-Verbindung wurden die Segmente miteinander verbunden und das Verbindungsdetail in das 3D-Modell integriert. Die einzelnen Segmente wurden gesteckt und mittels Silikon miteinander verklebt und abgedichtet.

Das komplette Fassadenelement wurde dann in einen mit dem des Rodeca-Elements baugleichen Aluminiumrahmen eingesetzt, mit den gleichen Klemmleisten befestigt und mit den gleichen Dichtungslippen abgedichtet.

10.2.1 FDM-Drucker

Zum Einsatz kam der Delta Tower 900 mit einem zylindrischen Bauraum Single Extruder, einem Durchmesser von 90 cm und einer maximalen Höhe von 100 cm.

10.2.2 Material

Als transparentes Material wurde PETG verwendet, da sich bei der Herstellung der vorhergehenden Ausschnittsmodelle gezeigt hatte, dass dieses Material einfacher zu verarbeiten ist als Polycarbonat, aber annähernd die gleichen Eigenschaften hat.

Es wurden 10 kg Filamentrollen verwendet, um ein Element mit nur einem Wechsel drucken zu können.

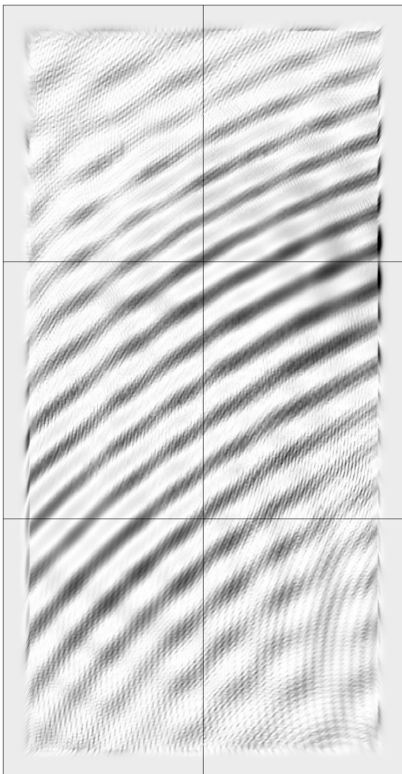


[Abb. 10.2.1_1]

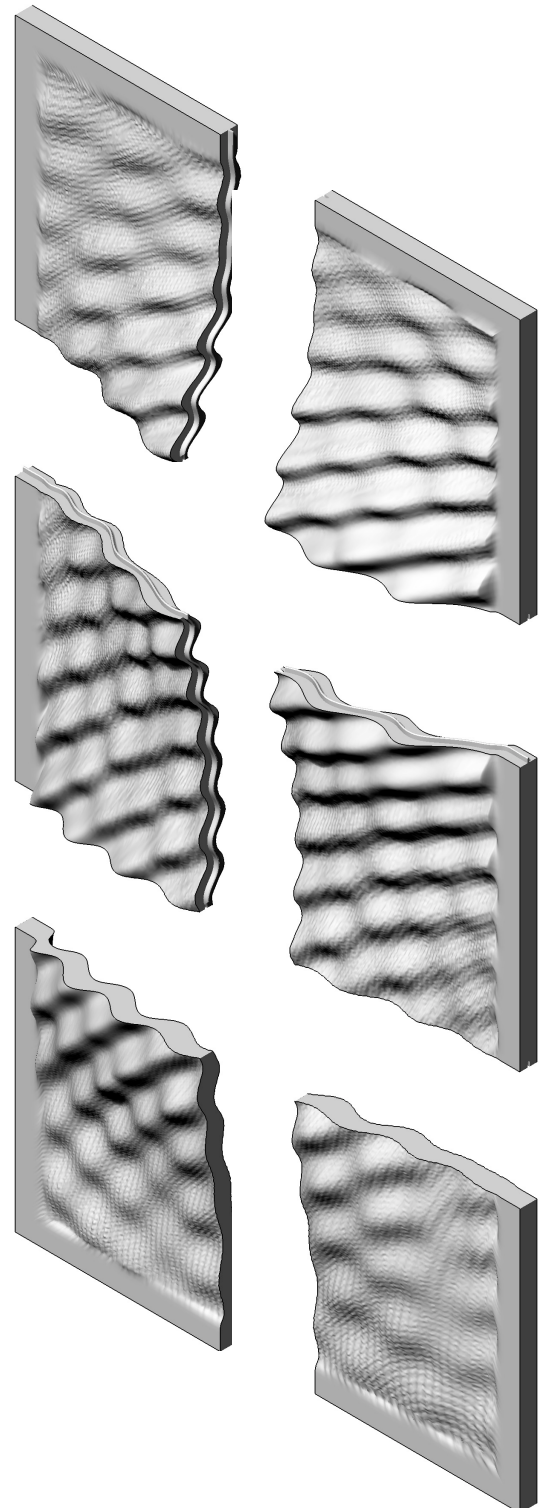
3D-Drucker Delta Tower 900, Standort TUM

10.2.3 Druckdateien der 3D-Modelle – Programm Simplify

Die von Rhino (3D-CAD-Programm) exportierten stl-Dateien wurden über das Slicing-Programm Simplify in einen G-Code, als lesbare Dateiform, für die Steuerung des 3D-Druckers umgewandelt.



[Abb. 10.2.3_1]
Ansicht des 3D-Modells
Segmentierung in 6 Fassadenteilelemente



[Abb. 10.2.3_2]
3D-Modelle der STL-Dateien
des 3D-CAD-Modells der 6 Fassadenteilelemente

10.3 Druckergebnisse

Die Druckergebnisse sind sehr heterogen ausgefallen. Alle sechs Teilelemente haben größere oder kleinere Abweichungen, die unten im Einzelnen aufgeführt werden.

10.3.1 Überprüfung der ausgedruckten Einzelemente

Gegenüberstellung vom endgültigen Elementgewicht mit den Fertigungsdaten durch Simplify und Angabe der Verformungen bei der Herstellung.

Einzelement 1 (unten links)

Druckdauer: 10 Tage 11 Stunden (251 Stunden)

Gewicht: 10,1 kg (Soll: 11,2 kg)

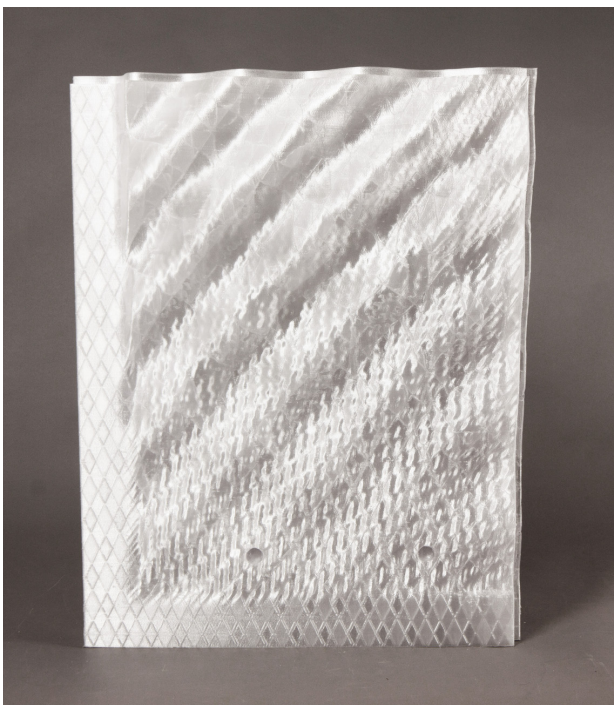
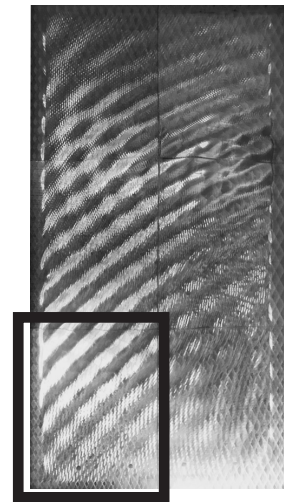
Verformung: Sehr gering, 3–4 mm in Z-Achse an Ecke links unten und rechts unten

Nossel-Durchmesser: 1 mm

Schichthöhe: 0,35 mm

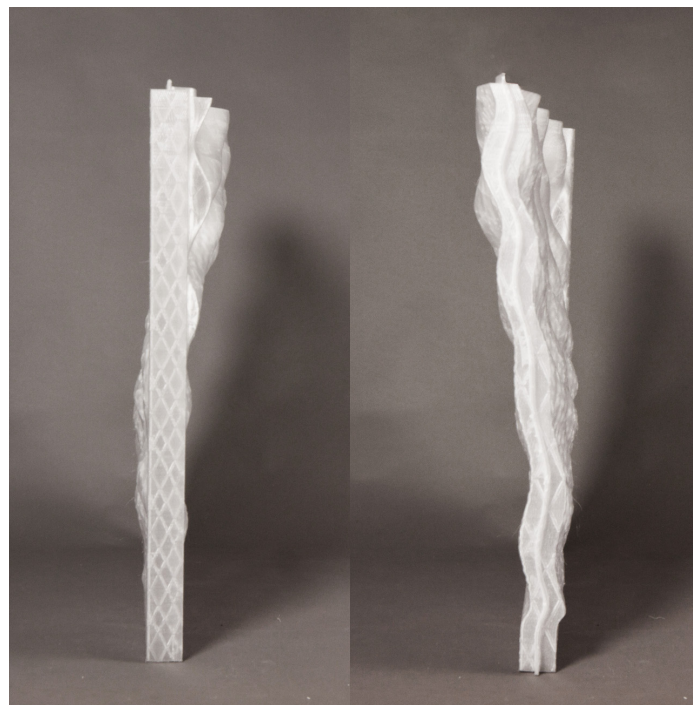
Heatblock: Vulcano

Temperatur: 245 °C



[Abb. 10.3.1_1]

3D-gedrucktes Fassadenelement M 1:1
Frontansicht



[Abb. 10.3.1_2]

3D-gedrucktes Fassadenelement M 1:1
Links: Seitenansicht Rahmen, Rechts: Seitenansicht Mittelachse

Einzelement 2 (mitte links)

Druckdauer: 9 Tage 23 Stunden
(239 Stunden)

Gewicht: 11,1 kg (Soll: 12,5 kg)

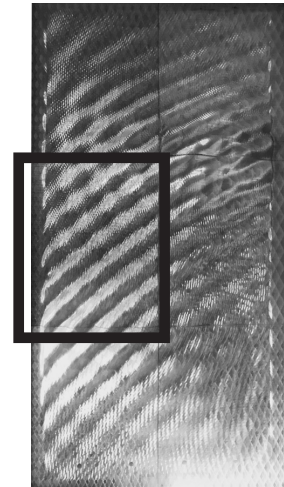
Verformung: Sehr gering, Aufbiegung 3–4mm in Z-Achse an Ecke links unten und rechts unten

Nossel-Durchmesser: 1 mm

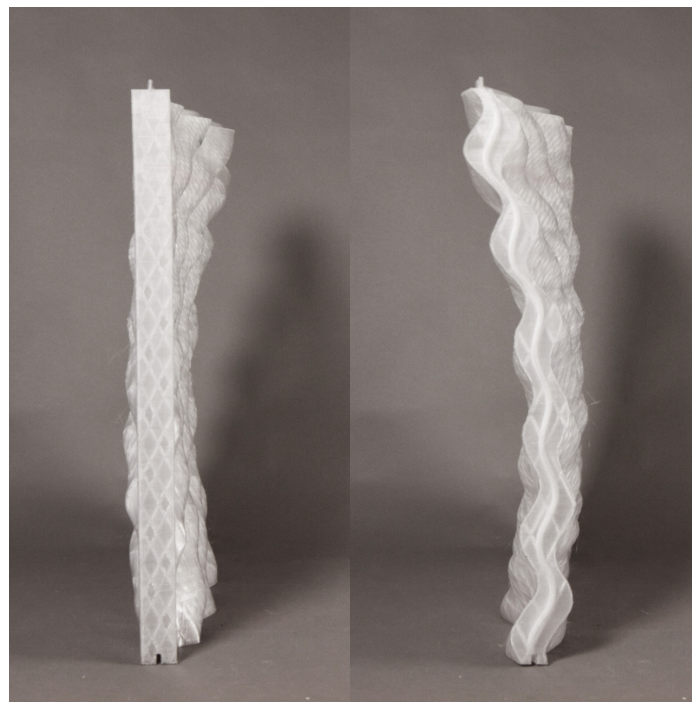
Schichthöhe: 0,35 mm

Heatblock: Vulcano

Temperatur: 245 °C



[Abb. 10.3.1_3]
3D-gedrucktes Fassadenelement M 1:1
Frontansicht



[Abb. 10.3.1_4]
3D-gedrucktes Fassadenelement M 1:1
Links: Seitenansicht Rahmen, Rechts: Seitenansicht Mittelachse

Einzelement 3 (oben links)

Druckdauer: 11 Tage 8 Stunden
(272 Stunden)

Gewicht: 14,4 kg (Soll: 16,1 kg)

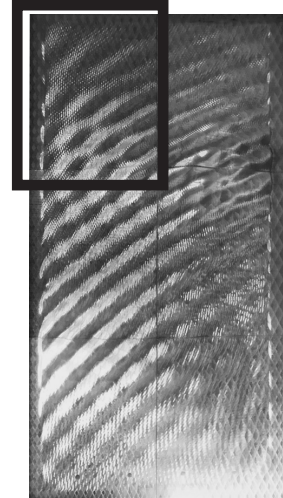
Verformung: Stark, Biegung
10–15mm über die komplette
Z-Achse

Nossel-Durchmesser: 0,95 mm

Schichthöhe: 0,35 mm

Heatblock: Delta

Temperatur: 245 °C



[Abb. 10.3.1_5]

3D-gedrucktes Fassadenelement M 1:1
Frontansicht



[Abb. 10.3.1_6]

3D-gedrucktes Fassadenelement M 1:1
Links: Seitenansicht Rahmen, Rechts: Seitenansicht Mittelachse

Einzelement 4 (oben rechts)

Druckdauer: 10 Tage 16 Stunden
(256 Stunden)

Gewicht: 13,7 kg (Soll: 15,2 kg)

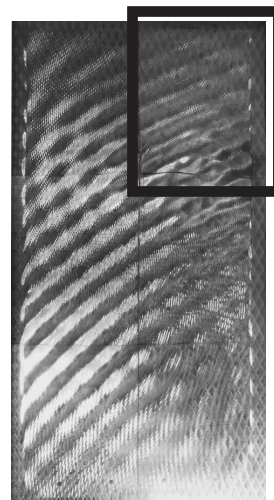
Verformung: Stark, Biegung
10–15 mm über die komplette
Z-Achse

Nossel-Durchmesser: 0,95 mm

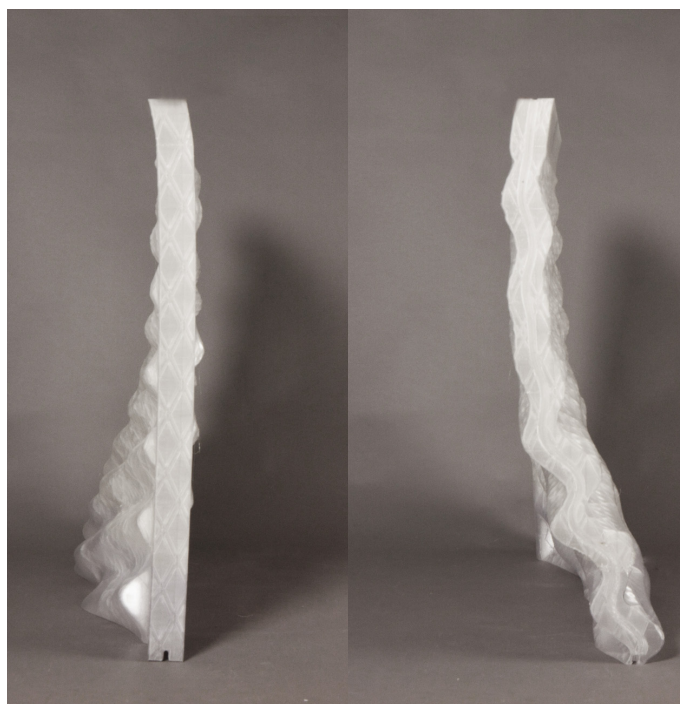
Schichthöhe: 0,35 mm

Heatblock: Delta

Temperatur: 245 °C



[Abb. 10.3.1_7]
3D-gedrucktes Fassadenelement M 1:1
Frontansicht



[Abb. 10.3.1_8]
3D-gedrucktes Fassadenelement M 1:1
Links: Seitenansicht Rahmen, Rechts: Seitenansicht Mittelachse

Einzelement 5 (mitte rechts)

Druckdauer: 10 Tage 0 Stunden
(240 Stunden)

Gewicht: 12,9 kg (Soll: 14,1 kg)

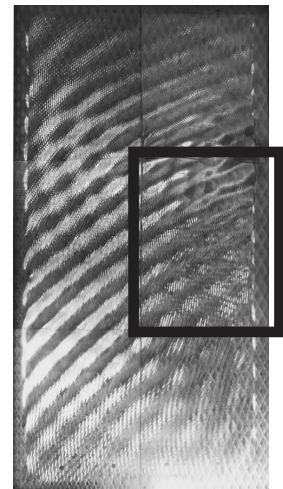
Verformung: Mittel, Biegung 5
mm über die komplette Z-Achse

Nossel-Durchmesser: 0,95 mm

Schichthöhe: 0,35 mm

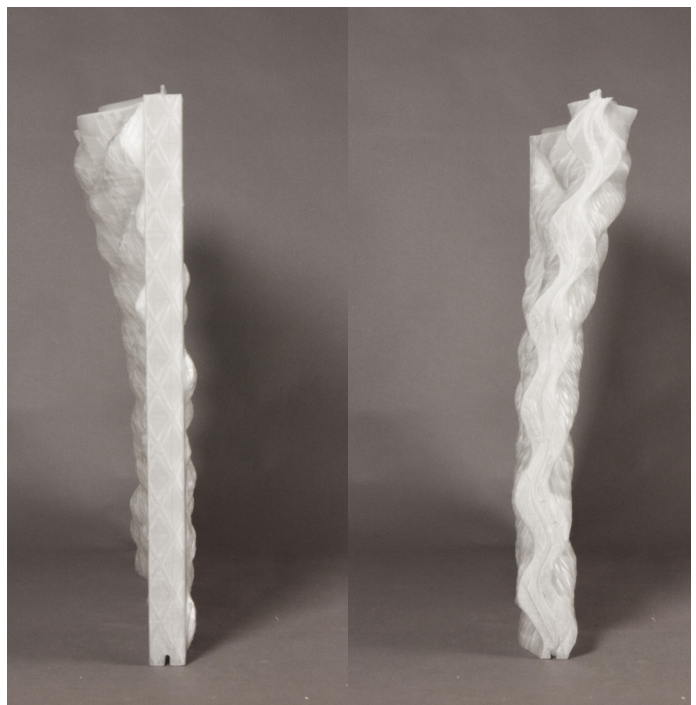
Heatblock: Delta

Temperatur: 245 °C



[Abb. 10.3.1_9]

3D-gedrucktes Fassadenelement M 1:1
Frontansicht



[Abb. 10.3.1_10]

3D-gedrucktes Fassadenelement M 1:1
Links: Seitenansicht Rahmen, Rechts: Seitenansicht Mittelachse

Einzelement 6 (unten rechts)

Druckdauer: 10 Tage 8 Stunden
(248 Stunden)

Gewicht: 10,2 kg (Soll: 11,2 kg)

Verformung: Stark, Z-Achse zu kurz (1 cm)

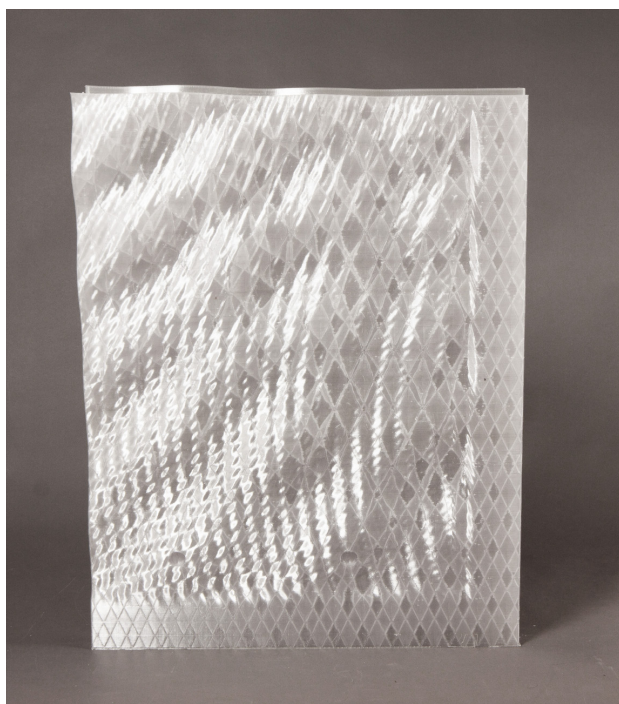
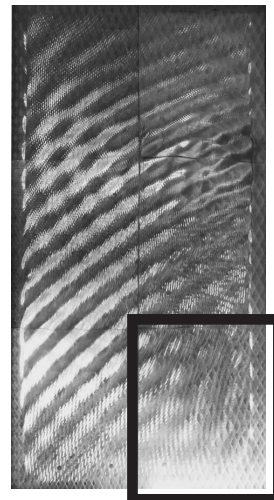
Druck hat extern bei der Firma
Delta Tower stattgefunden.

Nossel-Durchmesser: 0,95 mm

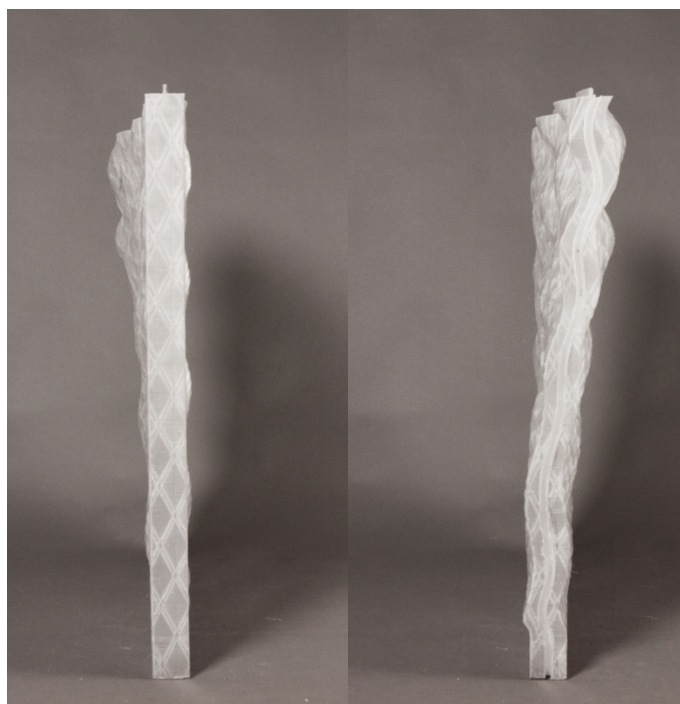
Schichthöhe: 0,35 mm

Heatblock: Delta

Temperatur: 245 °C



[Abb. 10.3.1_11]
3D-gedrucktes Fassadenelement M 1:1
Frontansicht



[Abb. 10.3.1_12]
3D-gedrucktes Fassadenelement M 1:1
Links: Seitenansicht Rahmen, Rechts: Seitenansicht Mittelachse

Fazit:

Oberflächen

Die Qualität der Oberfläche hinsichtlich Geschlossenheit (Verbindung) der einzelnen Schichten und der Reflektionsgrad sind sehr gut.

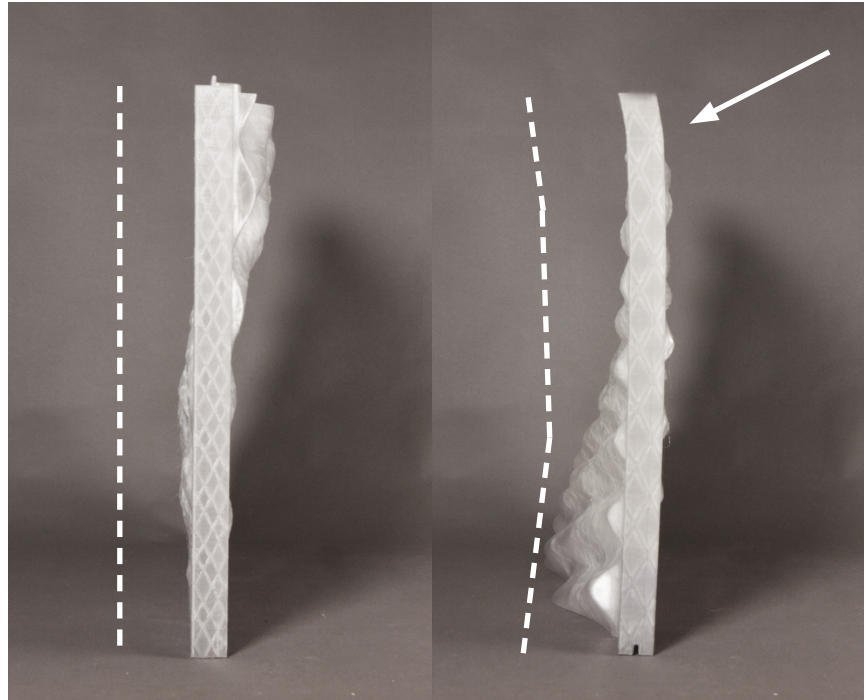
Verformung

Das Hauptproblem sind Verformungen des Kunststoffes beim Abkühlen der gedruckten Schichten. Diese Verformungen sind in diesem Falle stärker, wenn mehr Material gedruckt wird und die Form des Elementes höhere Differenzen (Auskragungen) aufweist. Prozesstechnisch ist dies auch auf die fehlende Einhausung und die unkontrollierte Umgebungstemperatur zurückzuführen. Geringe Veränderungen der Umgebungstemperatur und Luftbewegungen haben einen hohen Einfluss auf die Verformung.

Elemente, die eine geringe Verformung aufweisen, konnten direkt zusammengesetzt werden. Bei stärkeren Verformungen war eine Nachbearbeitung mittels einer Handfräse notwendig.

Farbeigenschaften

Materialdifferenzen in der Farbigkeit von verschiedenen Chargen haben zu einer ungleichen Erscheinung der Einzelelemente geführt. Dies ist unter ästhetischen Gesichtspunkten ein großes Problem, da das Farbspektrum bei einer lichtdurchlässigen Fassade ein sehr wichtiges Thema ist, das unbedingt kontrolliert werden muss.

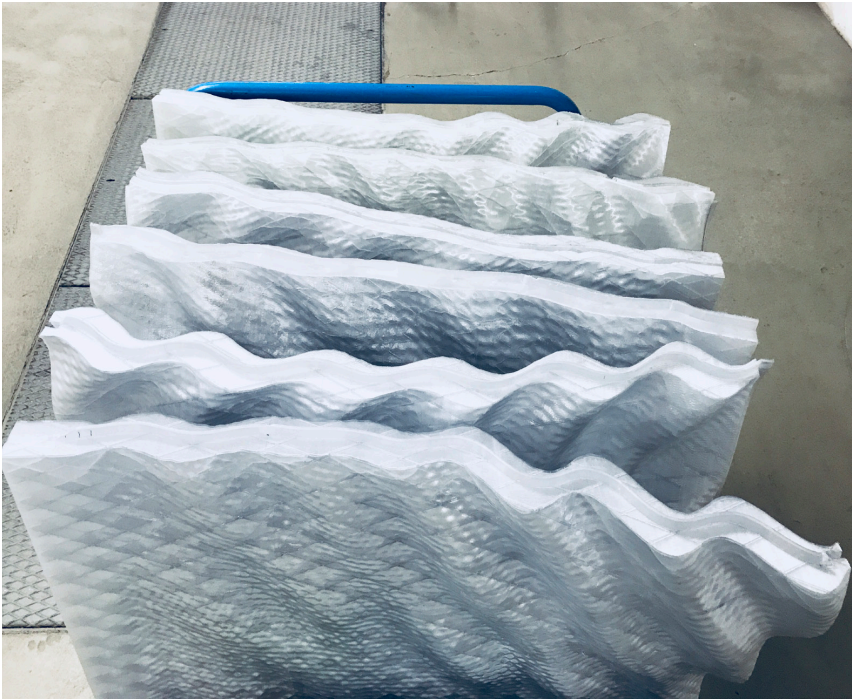


[Abb. 10.3.1_19]

Oben: 3D-gedrucktes Fassadenelement M 1:1 Verformung
Links: Gerades Element, Rechts: Stark verformtes Element

[Abb. 10.3.1_20]

Unten: 3D-gedruckte Fassadenelemente M 1:1 im Farbvergleich
Das Element links oben hat einen Gelbstich im Vergleich zu den anderen Elementen



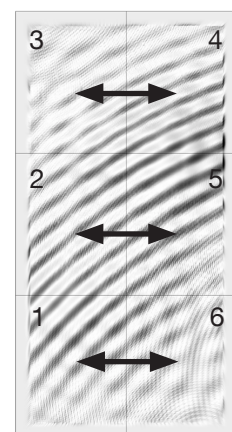
10.3.2 Montage des Tomorrow-Elements

Die Einzelteile des Tomorrow-Elements wurden in zwei Montageschritten zusammengebaut. Die Nut und Feder Verbindung macht dies notwendig.

Gewicht aller Einzelelemente (ohne Aluminiumrahmen): 72 kg; entspricht im Mittel 16 kg/m² Gesamtgewicht: 78 kg



Schritt 1: Die Einzelelemente 1 + 6, 2 + 5 und 3 + 4 wurden mit Silikon verklebt und zusammengefügt.



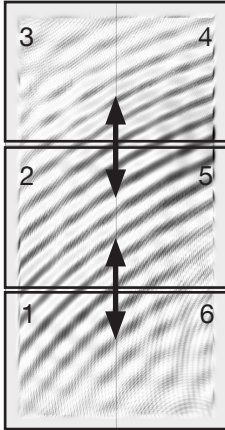
[Abb. 10.3.2_1]

Oben: 3D-gedruckte Fassadenelemente
M 1:1
Einzelelemente

[Abb. 10.3.2_2]

Unten: 3D-gedruckte Fassadenelemente
M 1:1
paarweise verklebt an der Vertikalfuge

Schritt 2: Die Paarelemente wurden dann an der Horizontalfuge verklebt und zusammengefügt.



[Abb. 10.3.2_3]
3D-gedruckte Fassadenelemente M 1:1
Element 1+6 werden paarweise in den
Aluminiumrahmen gesetzt

[Abb. 10.3.2_4]
3D-gedruckte Fassadenelemente M 1:1
Element 2+5 werden paarweise in den
Aluminiumrahmen gesetzt

[Abb. 10.3.2_5]
3D-gedruckte Fassadenelemente M 1:1
Element 3+4 werden paarweise in den
Aluminiumrahmen gesetzt

Ferigstellung des Tomorrow Fassadenelements



[Abb. 10.3.2_6]
Tomorrow-Fassadenelemente M 1:1

Fugenbreite

Nach Fertigstellung des Tomorrow-Fassadenelements wurde eine hohe Diskrepanz bezüglich der Fugenbreite sichtbar.

Dies ist auf die teilweise starke Verformung der einzelnen Teile zurückzuführen. Die Fugenbreite reicht von 1 bis 2mm bei Teilstücken mit nur geringer Verformung und bis hin zu 10 bis 12mm bei Teilstücken mit hoher Verformung.

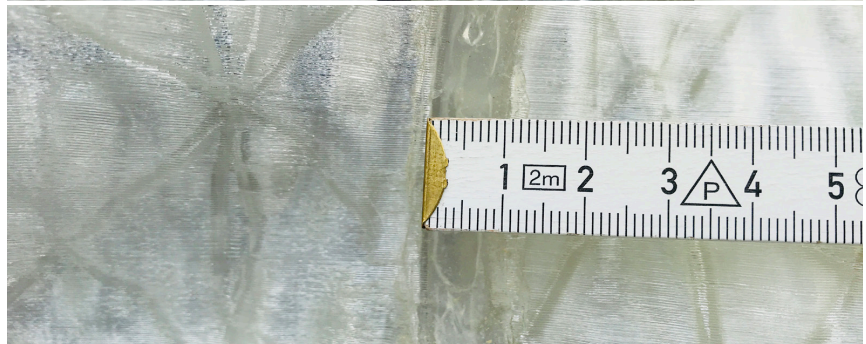
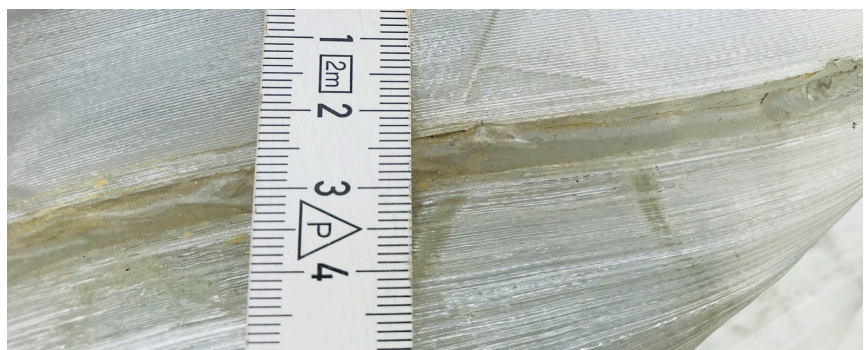
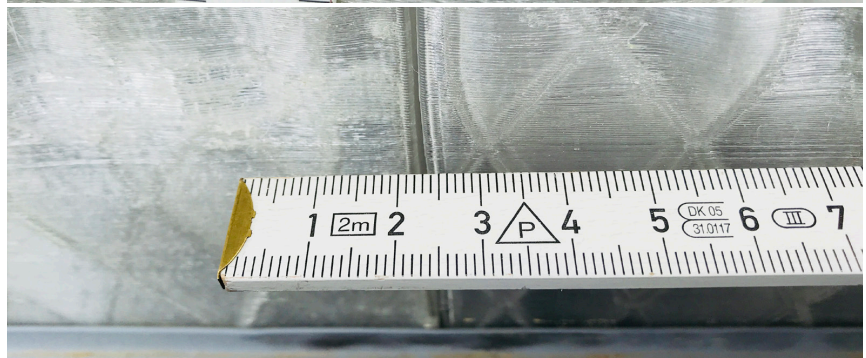


Abb. 10.3.2_7]

Tomorrow Fassadenelement M 1:1

Oben: Fugenbreite Horizontalfuge zwischen Element 1 + 2

Unten: Fugenbreite Vertikalfuge zwischen Element 1 + 6

[Abb. 10.3.2_8]

Tomorrow Fassadenelement M 1:1

Oben: Fugenbreite Horizontalfuge zwischen Element 4 + 5

Unten: Fugenbreite Vertikalfuge zwischen Element 3 + 4

**Montage auf der Solarstation
TUM**



[Abb. 10.3.2_11]
Oben: Montage des
Tomorrow -Fassadenelements M 1:1
Solarstation TUM

[Abb. 10.3.2_12]
Unten: Montage des
Tomorrow -Fassadenelements M 1:1
Solarstation TUM



[Abb. 10.3.2_13]

Montierte Fassadenelemente M 1:1

Links: Tomorrow-Element, Rechts: Today-Element



[Abb. 10.3.2_14]
Solarstation TUM mit montierten Fassadenelementen M 1:1
Links: Tomorrow-Element, Rechts: Today-Element



[Abb. 10.3.2_15]

Montierte Fassadenelemente M 1:1



[Abb. 10.3.2_16]
Tomorrow Fassadenelement M 1:1
Innenraum Messeinrichtung
Transluzente Lichtführung, innere Struktur und Wellengeometrie zur Verschattung sind sichtbar

10.4 Materialtests: Zug- und Druckversuch, Transparenz

Zugversuche und Druckversuche wurden zur Untersuchung des Materialverhaltens von 3D-gedrucktem PETG-Kunststoff durchgeführt, um einen Anhaltspunkt zu den Festigkeiten zu erhalten.

Folgende Fragen galt es zu beantworten:

Welchen Einfluss hat die schichtweise Aufbringung der additiven Fertigungsmethode auf die Zugfestigkeit parallel oder orthogonal zur Zugrichtung?

Welche Druckkräfte können aufgenommen werden? Orientieren sich die Bruchstellen an den Schichten der additiven Fertigungsmethode?

10.4.1 Material, Abmessungen und Herstellung der Testkörper

Zur Herstellung der Testkörper wurden die gleichen Druckereinstellungen verwendet wie bei der Herstellung der Fassadenelemente.

Materialdaten

Filament:

COLORFABB_XT CLAER

Material:

ColorFabb_XT

Durchmessertoleranz: ± 0.05 mm

Dichte: 1.27 g/cm³

Glasübergangstemp.: 75 °C

Testkörper Zugversuch

Nach DIN 527 (Abb. oben)

Abmessungen: 20–10 mm x 6 mm x 150 mm (b x h x l)

Querschnitt: 10 x 6 mm = 60 mm²

Gewicht: 15 g

Testkörper Druckversuch

(Abb. unten)

Abmessungen: 60 mm x 60 mm x 100 mm (b x l x h)

Gewicht: 161 g

Druckereinstellungen

3-D-Drucker: Ultimaker2

Layer height: 0,3 mm

Shell thickness: 2 mm (2 Lagen mit 1-mm-Nozzle)

Top thickness: 1,8 mm

Bottom thickness: 1,2 mm

Nozzle: 1 mm

Dual extrusion overlap: 0,15 mm

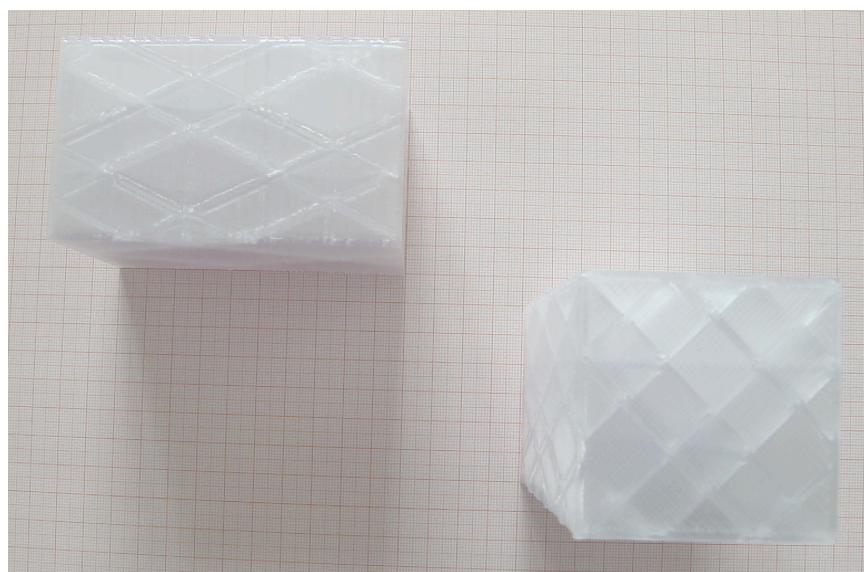
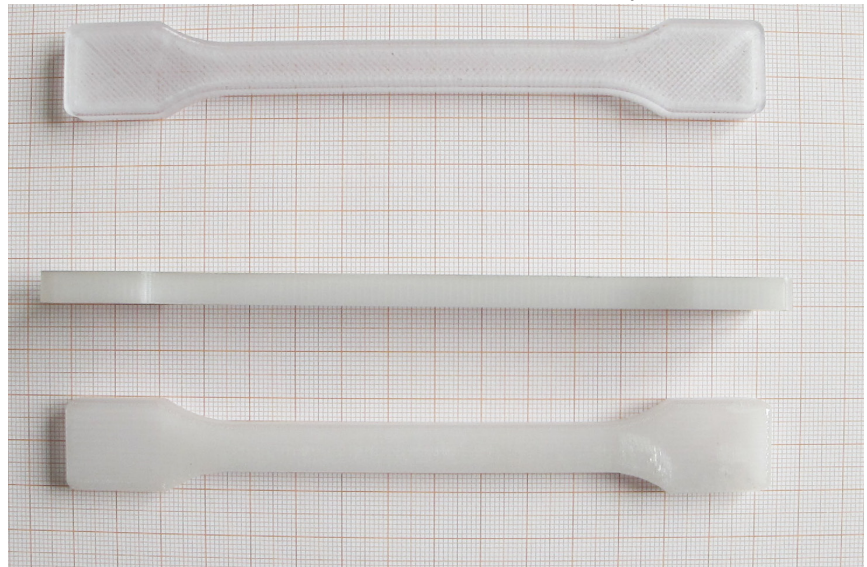
Initial layer width: 125 %

Fan: 100 %

Combing: on

Print temp.: 250 °C

Print-Bed temp.: 70 °C



[Abb. 10.4.1_1]

Oben: 3D-gedruckte Testkörper
Zugversuch

[Abb. 10.4.1_2]

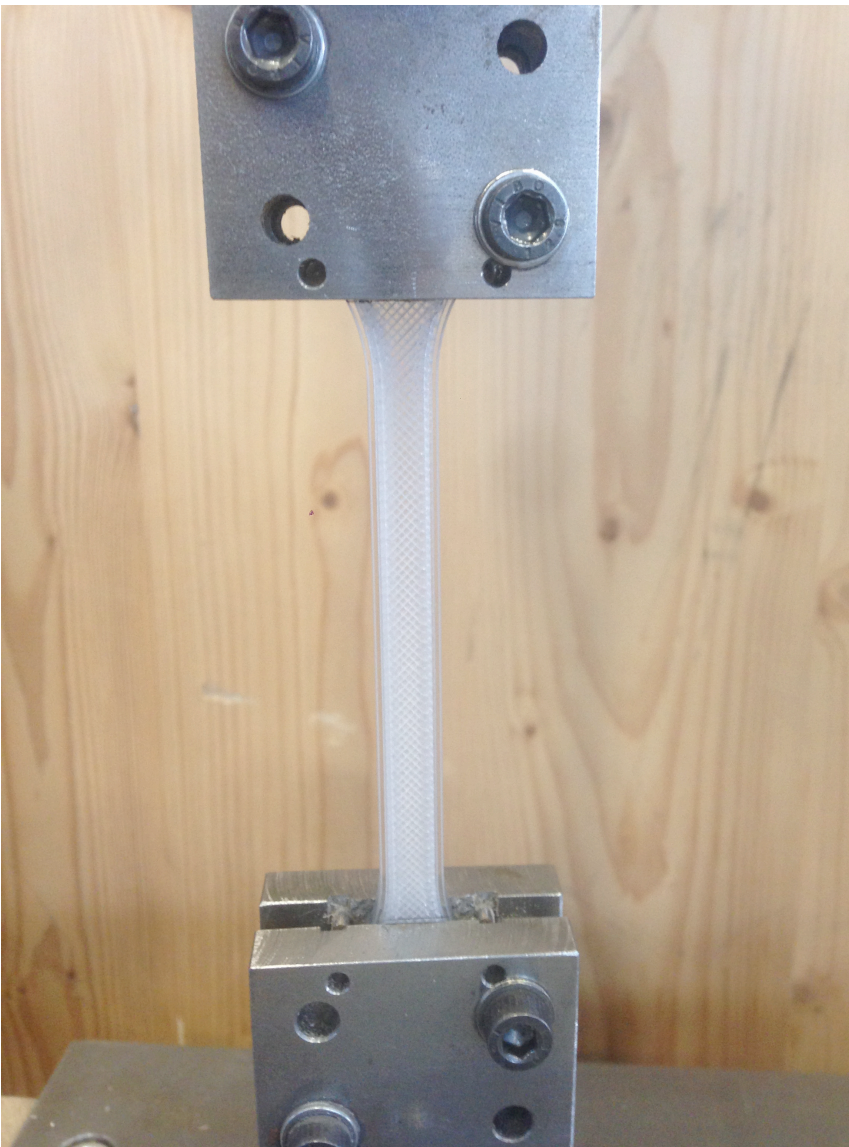
Unten: 3D-gedruckte Testkörper
Druckversuch

10.4.2 Zugversuch

Der Zugversuch gehört zu den quasistatischen, zerstörenden Prüfverfahren und ist ein genormtes Standardverfahren der Werkstoffprüfung zur Bestimmung der Streckgrenze, der Zugfestigkeit, der Bruchdehnung und weiterer Werkstoffkennwerte.

Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm ist das Ergebnis des Zugversuchs. An diesem können die technischen Werkstoffkenngrößen, wie die Zugfestigkeit (N/mm^2), abgelesen werden.

Um die Zugfestigkeit zu testen, wurden Testknochen für Zugversuche (ISO 527) mit Schichten, die parallel und orthogonal zur Zugrichtung verlaufen, gedruckt. Diese wurden dann eingespannt und getestet.

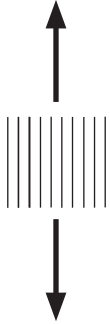


[Abb. 10.4.2_1]

3-D-gedruckte Testkörper
Zugversuch 1: Druckschichten parallel zur Zugrichtung

Zugversuch 1

Testkörper Nr. 3
Druckschichten parallel zur
Zugrichtung

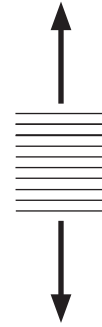
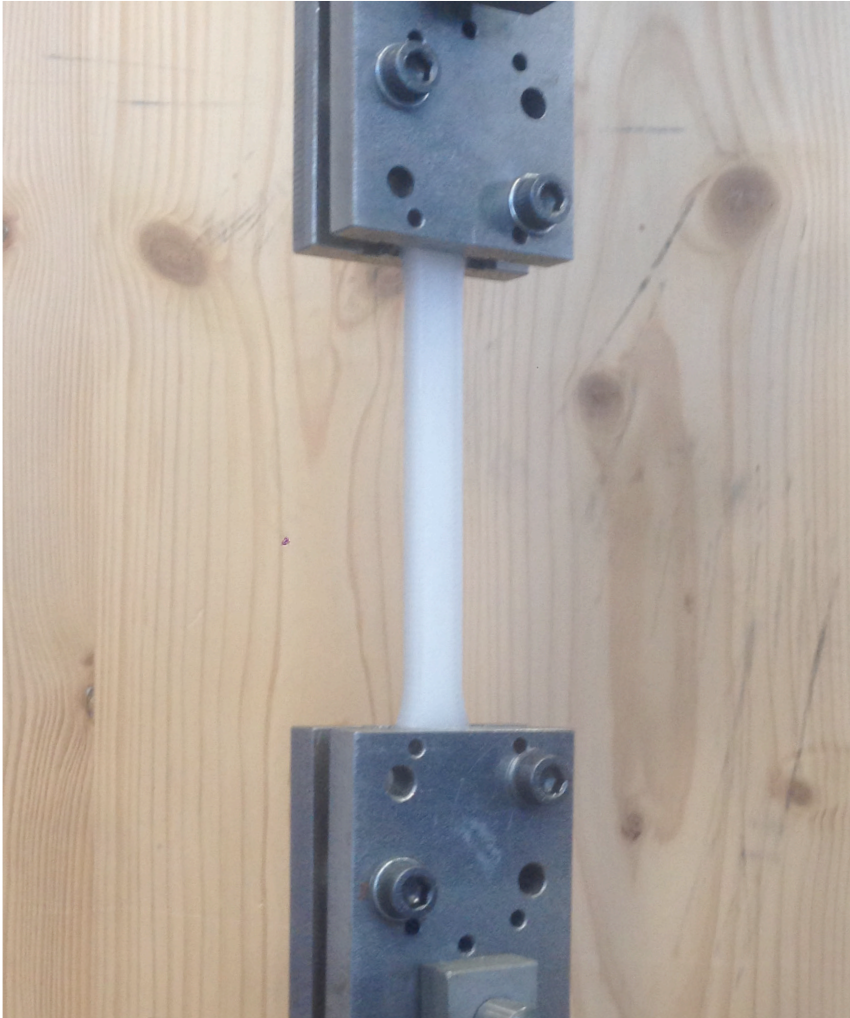


[Abb. 10.4.2_2]
Oben: 3D-gedruckte Testkörper 3
Zugversuch 1: Druckschichten parallel
zur Zugrichtung

[Abb. 10.4.2_3]
Unten: 3D-gedruckte Testkörper 3
Zugversuch 1: Druckschichten parallel
zur Zugrichtung
Versagen durch Dehnung

Zugversuch 2

Testkörper Nr. 1
Druckschichten orthogonal zur
Zugrichtung



[Abb. 10.4.2_4]
Oben: 3D-gedruckte Testkörper 1
Zugversuch 2: Druckschichten ortho-
gonal zur Zugrichtung

[Abb. 10.4.2_5]
Unten: 3D-gedruckte Testkörper 1
Zugversuch 2: Druckschichten ortho-
gonal zur Zugrichtung
Versagen durch Bruch

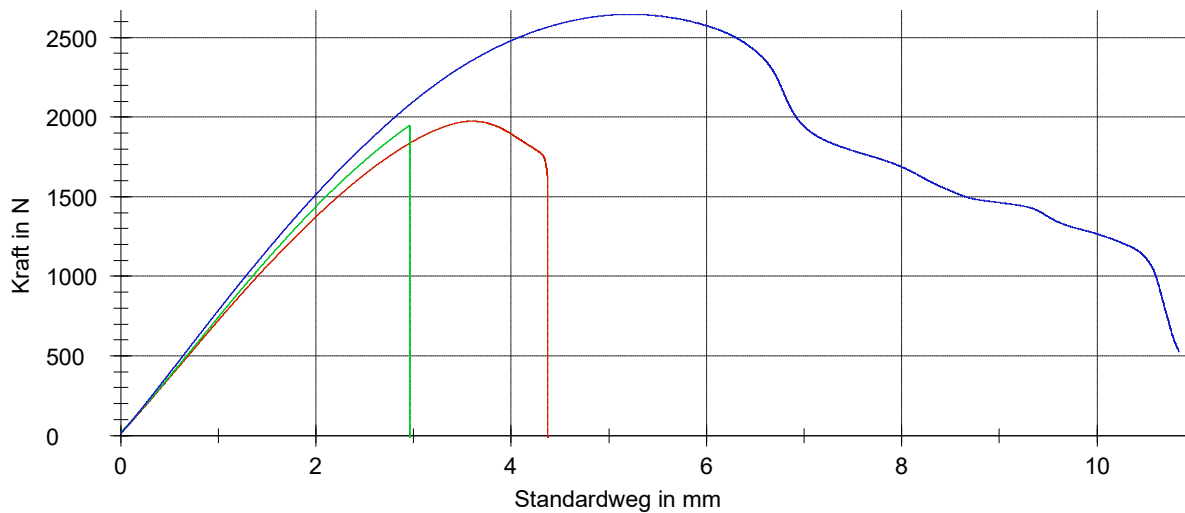
Prüfprotokoll

Vorkraft : 5 N
 Prüfgeschwindigkeit : 0,6 mm/min

Prüfergebnisse:

Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
1	1970	3,6	1560	4,4
2	1950	3,0	1950	3,0
3	2650	5,2	529	10,8

Seriengrafik:



Statistik:

Serie n = 3	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
\bar{x}	2190	3,9	1340	6,1
s	396	1,2	733	4,2
v [%]	18,06	29,79	54,52	69,29

[Fig. 10.4.2_1]
 Prüfprotokoll des Zugversuchs

Prüfergebnis Zugfestigkeit:

Orthogonal zur Zugrichtung:
Maximale Kraft F_{max} : 1950 N
(195 kg)
Querschnitt: 60 mm²
Zugfestigkeit R: 32,67 N/mm²

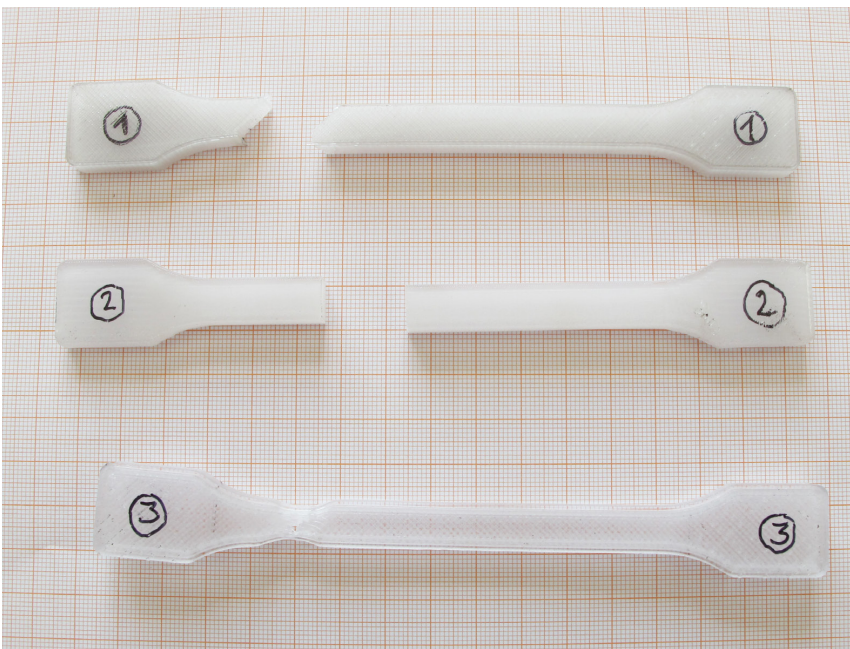
Parallel zur Zugrichtung:
Maximale Kraft F_{max} : 2650 N
(265 kg)
Querschnitt: 60 mm²
Zugfestigkeit R: 44,17 N/mm²
= 36 % Mehrbelastung

Fazit Zugfestigkeit:

Ein wichtiges Ergebnis war, dass die Ausrichtung der Schichten einen geringeren Einfluss auf die Festigkeit hatte als erwartet. Die Verbindung der einzelnen Schichten ist durch das Schmelzschichtenverfahren sehr gut vor allem unter Betrachtung des Vorteils der Materialreinheit bei der Wiederverwertung.

Die orthogonal zu Zugrichtung verlaufenden Schichten können nur 36 % weniger Last aufnehmen.

Schichtweiser Aufbau
Die Ausrichtung der Schichten hat Einfluss auf die Versagensart. Bei orthogonaler Ausrichtung zur Zugrichtung gab es ein Bruchversagen (Testkörper 1 + 2) und bei paralleler Ausrichtung ein Dehnungsversagen (Testkörper 3).



[Abb. 10.4.2_6]

3D-gedruckte Testkörper
Ergebnis des Zugversuchs

Testkörper 1 + 2: Bruchversagen, Testkörper 3: Dehnungsversagen

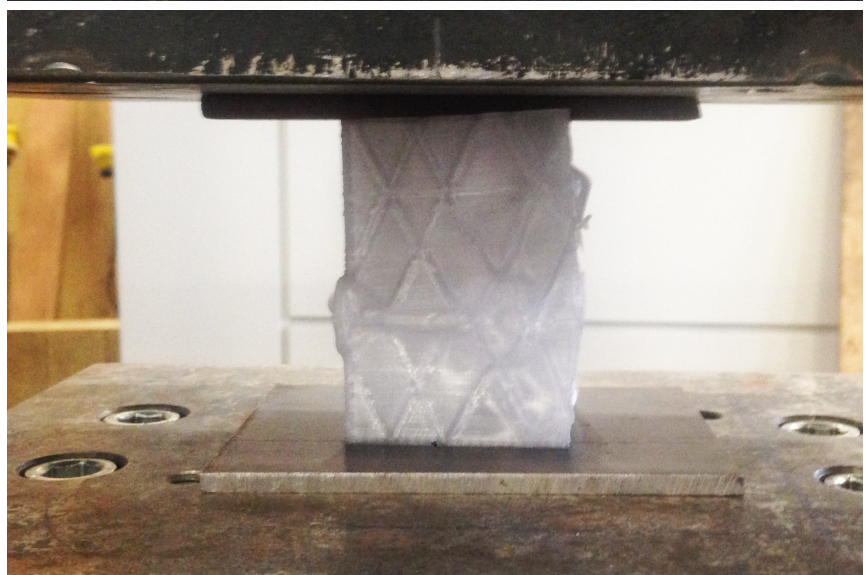
10.4.3 Druckversuch

Der Druckversuch ist von der Krafrichtung her gesehen die Umkehrung des Zugversuchs.

Zum Testen von Baustoffen wird der Kraftversuch angewendet. Bei diesem Versuch werden die rechteckigen Proben (Querschnittsfläche 60 x 60 mm) mit stetig ansteigender Kraft zwischen zwei parallelen Druckplatten belastet. Die Belastung wird so lange erhöht, bis es bei spröden Werkstoffen zum Bruch kommt.

Die dabei aufgebrachte Kraft wird ermittelt und daraus die Druckfestigkeit in N/mm² bestimmt. Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm ist das Ergebnis des Druckversuchs. An diesem können die technischen Werkstoffkenngrößen wie die Druckfestigkeit N/mm² abgelesen werden.

Um die Druckfestigkeit der 3D-gedruckten Fassadenstruktur abbilden zu können, wurde das Volumen der Testkörper mit der inneren Zellstruktur des Tomorrow-Elements gedruckt.



[Abb. 10.4.3_1]
Oben: 3D-gedruckte Testkörper
Druckversuch: vor Krafteinleitung

[Abb. 10.4.3_2]
Unten: 3D-gedruckte Testkörper
Druckversuch: Versagen

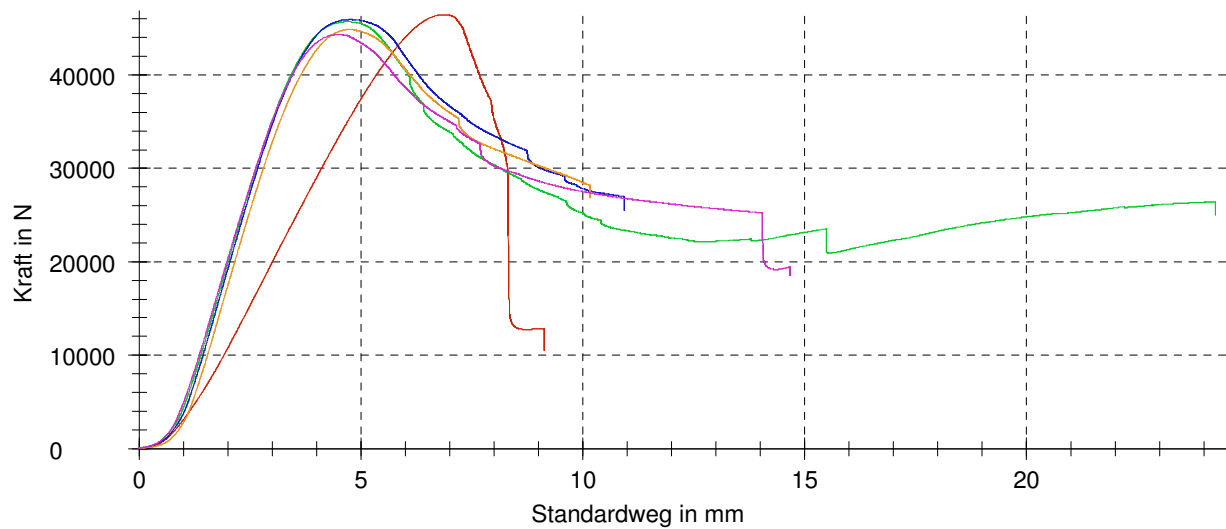
Prüfprotokoll

Vorkraft : 20 N
 Prüfgeschwindigkeit : 5 mm/min

Prüfergebnisse:

Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm
1	46500	6,9
2	45700	4,7
3	45900	4,8
4	44900	4,8
5	44300	4,5

Seriengrafik:



Statistik:

Serie n = 5	F _{max} N	dL bei F _{max} mm
\bar{x}	45500	5,1
s	854	1,0
v [%]	1,88	19,34

Prüfergebnis Druckfestigkeit:

Die Testkörper hielten durchschnittlich einer Kraft (F_{max}) von 45.500 N (4.550 kg) stand, bevor sie brachen. Die Abweichung liegt bei 1,8 %.

Fazit Druckfestigkeit:

Trotz der innen liegenden Zellstruktur, die den Testkörper auf ein Gewicht von nur 161 g reduziert, ist dieser sehr belastbar.

Schichtweiser Aufbau

Das Bruchbild beim Versagen zeigt einzelne Splitter, die sich herauslösen. Deren Geometrie ist unabhängig vom Schichtbild der additiven Fertigungsmethode des Testkörpers, dies lässt auf anisotrope Materialeigenschaften schließen.

Aus diesen beiden Resultaten des Zug- und Druckversuchs ergibt sich die folgende Feststellung: Trotz der isotropen Anordnung der Schichten lassen sich anisotrope Materialeigenschaften erkennen.

Das wäre ein Vorteil des FDM-Prozesses gegenüber anderen Abscheidungsprozessen wie Pastenextrusionen und Bindeverfahren wie Pulver-Binder-Verfahren, da sich hier isotrope Materialeigenschaften einstellen.



[Abb. 10.4.3_3]

3D-gedruckter Testkörper

Ergebnis des Druckversuchs

Exemplarischer Testkörper 1: Bruchversagen nicht in Abhängigkeit der Druckschichten

10.4.4 Transparenz

Um eine Sichtverbindung zwischen Innen- und Außenraum herzustellen sind transparente Flächen nötig. Durch das Aufbringen von transparentem Material (PETG) in geringen Schichthöhen von 0,35 mm wird das Licht gebrochen und man erhält aus der transparenten Materialeigenschaft in der Masse ein transluzentes (lichtdurchlässiges) Ergebnis. Dies ist im Bereich der

visuellen Verbindung nicht erwünscht, da man, wie bei einer transparenten Glasscheibe, einen unverfälschten Innen- und Außenbezug haben möchte.

Da der Herstellungsprozess ein unzureichendes Ergebnis liefert, wird hier untersucht, wie die Oberflächenstruktur der Schichten in einem zweiten Arbeitsschritt modifiziert werden kann, damit ein

höherer Grad an Transparenz erreicht wird.

Testkörper

Maße: 5 cm x 5 cm; d = 1 cm
Material: PETG / Copolymer XT
Schichthöhe: 0,35 mm

Strategie 1

Durch die nachträgliche Erwärmung der Muster mittels einer Heißluftpistole sollen die Schichten miteinander verschmolzen werden, um eine homogene Oberfläche zu erreichen.

Ergebnis:

Die einzelnen Schichten verbinden sich nicht miteinander, auch nicht bei kurzzeitigen sehr hohen Temperaturen bis 1.000 °C.

Strategie 2

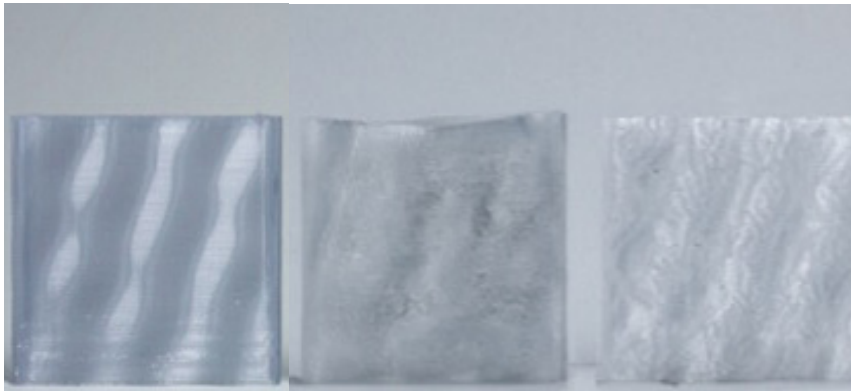
Durch den Einsatz von Chemikalien (Tetrahydrofuran C₄H₈O und Dichlormethan CH₂Cl₂) soll die Oberflächenstruktur der Schichten angelöst werden, um eine homogene Oberfläche zu erreichen.

Ergebnis:

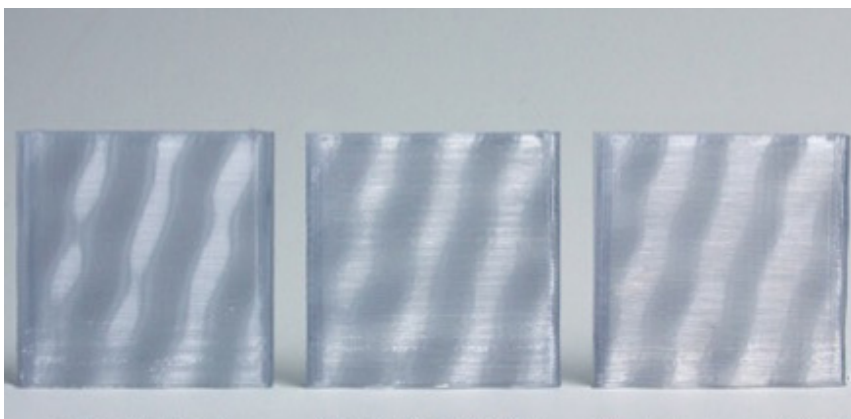
Die Anlösung der einzelnen Schichten verschlechtert die Transparenz.

Fazit:

Die Erhöhung der Transparenz durch einen zweiten Arbeitsschritt mittels Wärmeeintrag oder chemisches Anlösen hat zu keinem befriedigendem Ergebnis geführt, sondern im Gegenteil zu einer Verschlechterung.



ohne Nachbehandlung 1000 °C erhitzt ohne innere Struktur



ohne Nachbehandlung Dichlormethan Tetrahydrofuran

[Abb. 10.4.4_1]

Oben: 3D-gedruckte Testkörper Strategie 1

Links: ohne Nachbehandlung, Mitte: 1000°C erhitzt, Rechts: ohne innere Struktur

[Abb. 10.4.4_2]

Unten: 3D-gedruckte Testkörper Strategie 2

Links: Ohne Nachbehandlung, Mitte: Dichlormethan, Rechts: Tetrahydrofuran

10.5 Bauteiluntersuchungen

Es werden verschiedene Bauteiltests durchgeführt, da durch die komplexe Geometrie der Fassadenelemente Berechnungen zu kompliziert bzw. mit den heutigen Verfahren nicht möglich sind. Reale Tests haben auch den Vorteil, dass der Ablauf beobachtet werden kann und daraus neue Erkenntnisse gewonnen werden können.

10.5.1 Biegeversuch

Der Biegeversuch ist eine Methode der zerstörenden Werkstoffprüfung.

Es gibt verschiedene Arten des Biegeversuchs, deren Ablauf ähnlich ist und die sich durch die Art der Probenlagerung und die Anzahl der Lasteinleitungen unterscheiden. Aus den aufgezeichneten Biegekraft- und Durchbiegungswerten lassen sich verschiedene Materialkennwerte sowie die Spannungs-Dehnungs-Linie der Biegebeanspruchung ermitteln.

Hier wird der 3-Punkt-Biegeversuch angewendet. Die Prüfprobe wird auf zwei Auflagen positioniert und in der Mitte mit einem Prüfstempel belastet.

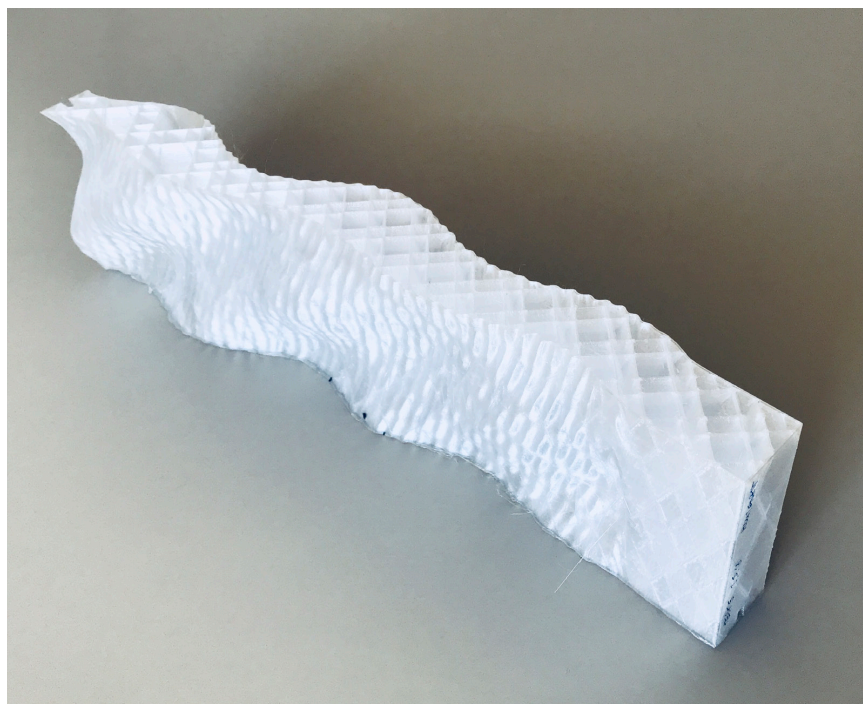
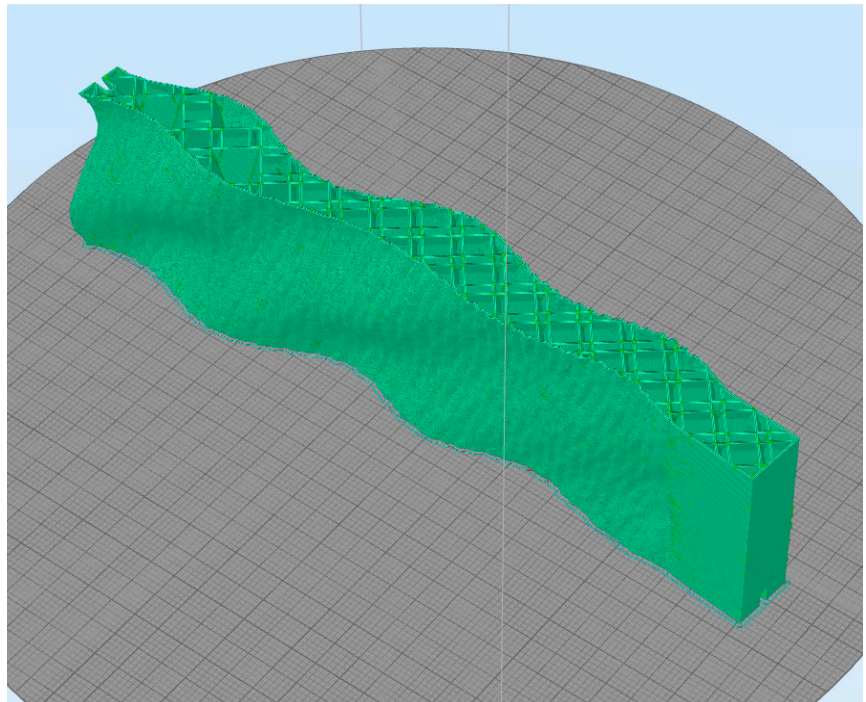
Im Biegeversuch wird das Bauteil auf Druck-, Zug- und Scherkräfte untersucht.

Diese Anordnung der Prüfprobe soll die Windlast oder Anpralllast auf die Fassade simulieren.

Fünf Testkörper werden geprüft um einen belastbaren Mittelwert zu bekommen.

[Abb. 10.5.1_1]

Oben: 3D-Modell von Testkörper für 3-Punkt-Biegeversuch
Druckdatei Symplicity (Screenshot)



[Abb. 10.5.1_2]

Unten: 3D-gedruckter Testkörper M 1:1
Biegeversuch

Material, Abmessungen und Herstellung der Testkörper

Zur Herstellung der Testkörper wurden die gleichen Druckeinstellungen verwendet wie bei der Herstellung der Fassadenelemente.

Material

Filament: Extrudr, completely transparent

Material: PETG

Durchmessertoleranz: ± 0.05 mm

Dichte: 1.27 g/cm³

Glasübergangstemp.: 75 °C

Testkörper Biegeversuch

Abmessungen: 180 mm x 60 – 80 mm x 700 mm (h x b x l)

Gewicht: 2340 g

Druckereinstellungen

3-D-Drucker: Delta Tower 900

Layer height: $0,35$ mm

Shell thickness: 2 mm (2 Lagen mit 1 -mm-Nozzle)

Top thickness: $1,8$ mm

Bottom thickness: $1,2$ mm

Nozzle: 1 mm

Dual extrusion overlap: $0,15$ mm

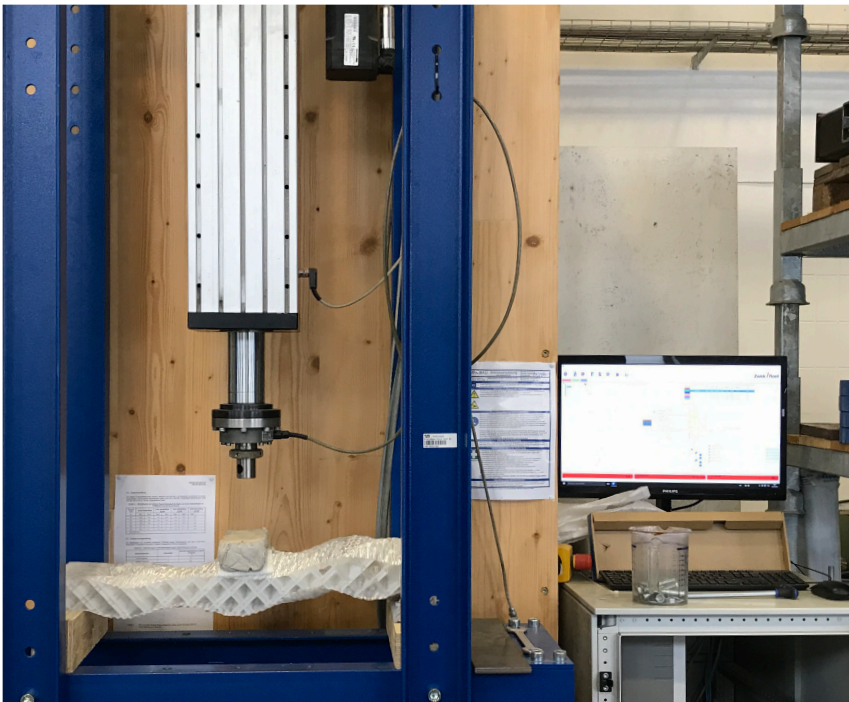
Initial layer width: 125 %

Fan: 100 %

Combing: on

Print temp.: 245 °C

Bed temp.: 77 °C



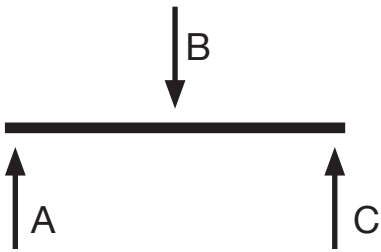
[Abb. 10.5.2_1]

Oben: Aufbau der Versuchseinheit
vertikalverfahrbarer Stempel

[Abb. 10.5.2_2]

Unten: Aufbau der Versuchseinheit
mit Testkörper, Verteilerplatte und Auflagerformen

Auflagersituationen

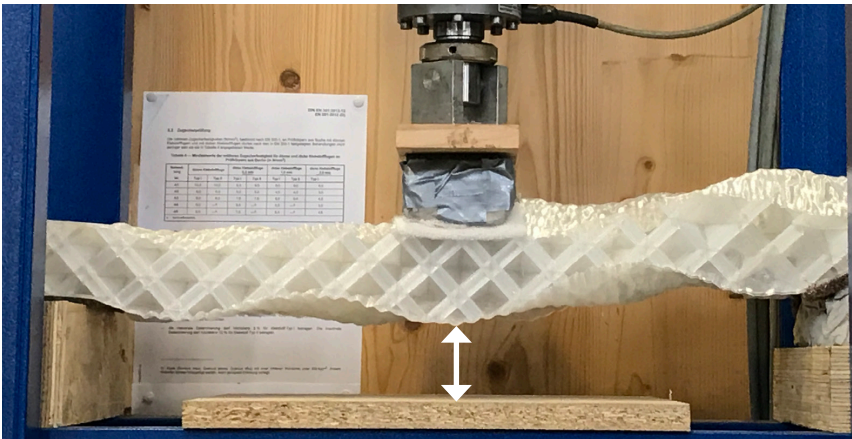


[Abb. 10.5.2_3]
Oben: Aufbau der Versuchseinheit
Linkes Auflager A

[Abb. 10.5.2_4]
Mitte: Aufbau der Versuchseinheit
Mittleres Auflager B: mit Ausgleichsform
zur gleichmäßigen Lasteinleitung

[Abb. 10.5.2_5]
Unten: Aufbau der Versuchseinheit
Rechtes Auflager C: mit Ausgleichsform
zur gleichmäßigen Lastverteilung

Testablauf



[Abb. 10.5.2_6]
Oben: Testablauf 1
geringe Verformung des Testkörpers

[Abb. 10.5.2_7]
Mitte: Testablauf 2
hohe Durchbiegung des Testkörpers

[Abb. 10.5.2_8]
Unten: Testablauf 3
Bruchversagen des Testkörpers

Prüfprotokoll

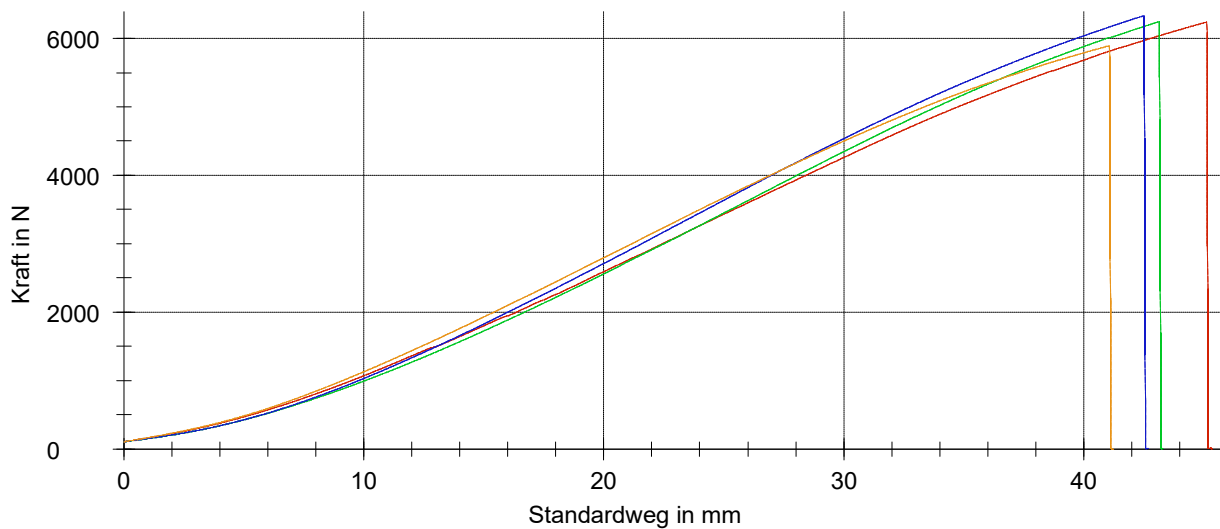
Kunde : Probentyp :
 Auftrags-Nr. : Vorbehandlung :
 Prüfnorm : Prüfer :
 Art und Bezeichnung : Bemerkung :
 Werkstoff : Maschinendaten :
 Probenentnahme :

Vorkraft : 100 N
 Prüfgeschwindigkeit : 0,5 mm/s

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F bei Bruch N	dL bei Bruch mm
■	1	6240	45,1	6080	45,1
■	2	6250	43,1	6060	43,2
■	3	6330	42,5	6330	42,5
■	4	5890	41,1	5730	41,1
	† 5	4560	41,8	-	-

Seriengrafik:



Statistik:

Serie n = 4	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F bei Bruch N	dL bei Bruch mm
\bar{x}	6180	43,0	6050	43,0
s	195	1,7	246	1,7
v [%]	3,16	3,92	4,06	3,92

[Fig. 10.5.2_1]

Prüfprotokoll des Biegeversuchs

Prüfergebnis Biegeversuch:

Die Testkörper hielten durchschnittlich einer Kraft (F_{max}) von 6180 N (618 kg) stand, bevor sie brachen. Die Abweichung liegt bei 3,2 %.

Nach vier Versuchen wurde der Versuch beendet, da sich alle vier Testkörper annähernd gleich verhielten.

Fazit Biegeversuch:

Druckfestigkeit

Durch die innen liegende Zellstruktur ist das Bauteil sehr belastbar, bei einem Gewicht von nur 2340 g.

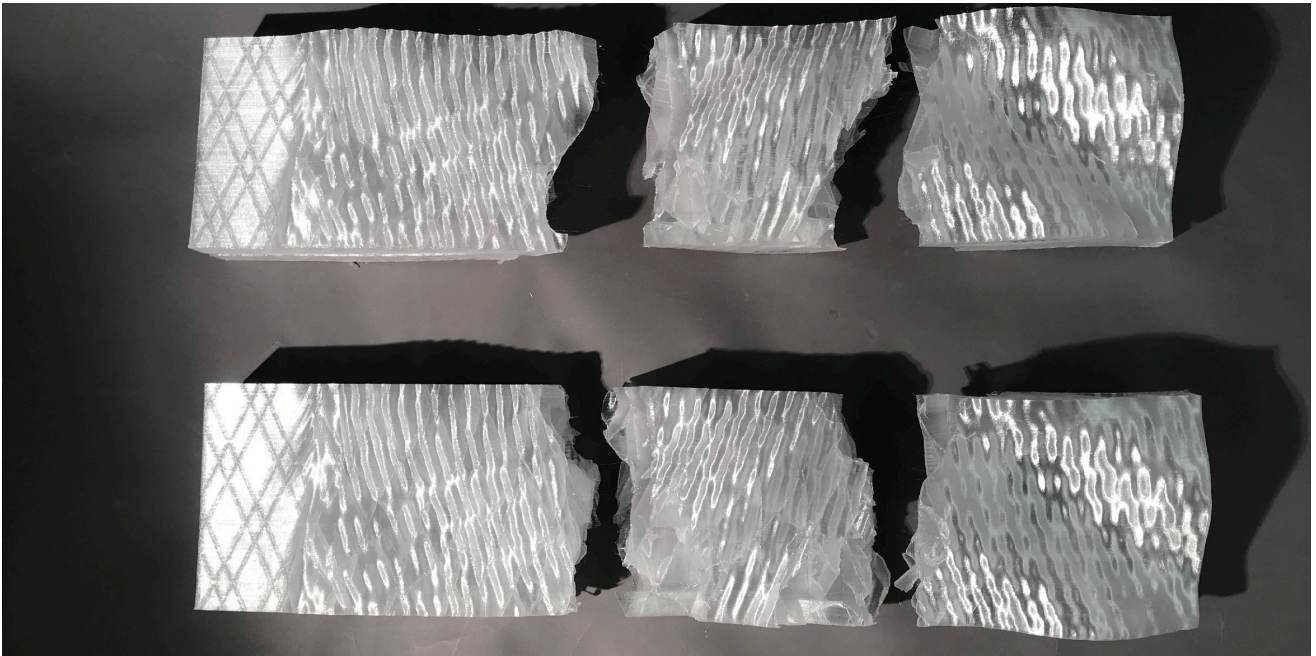
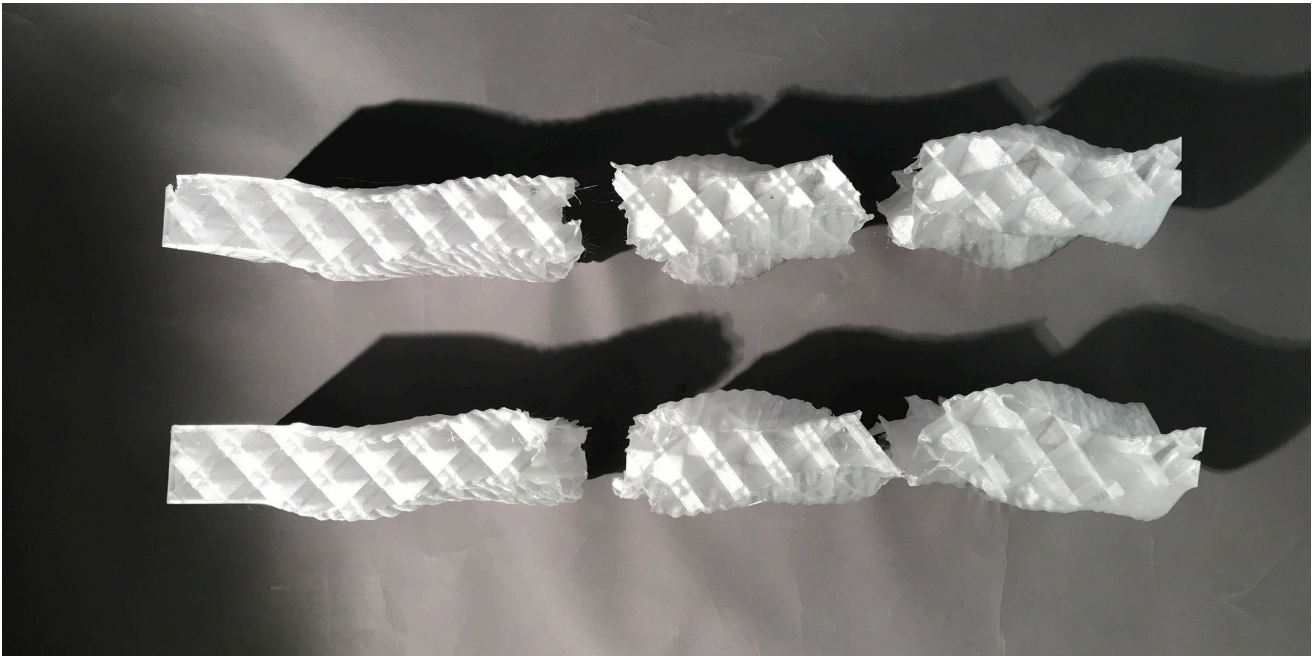
Schichtweiser Aufbau

Das Bruchbild beim Versagen zeigt einzelne Splitter, die sich herauslösen. Deren Geometrie ist unabhängig vom Schichtbild des Testkörpers, dies lässt auf anisotrope Materialeigenschaften schließen.



[Abb. 10.5.2_10]
Testkörper nach dem Biegeversuch

Testkörper 1-4 Bruchbild nach Versuch



[Abb. 10.5.2_6]

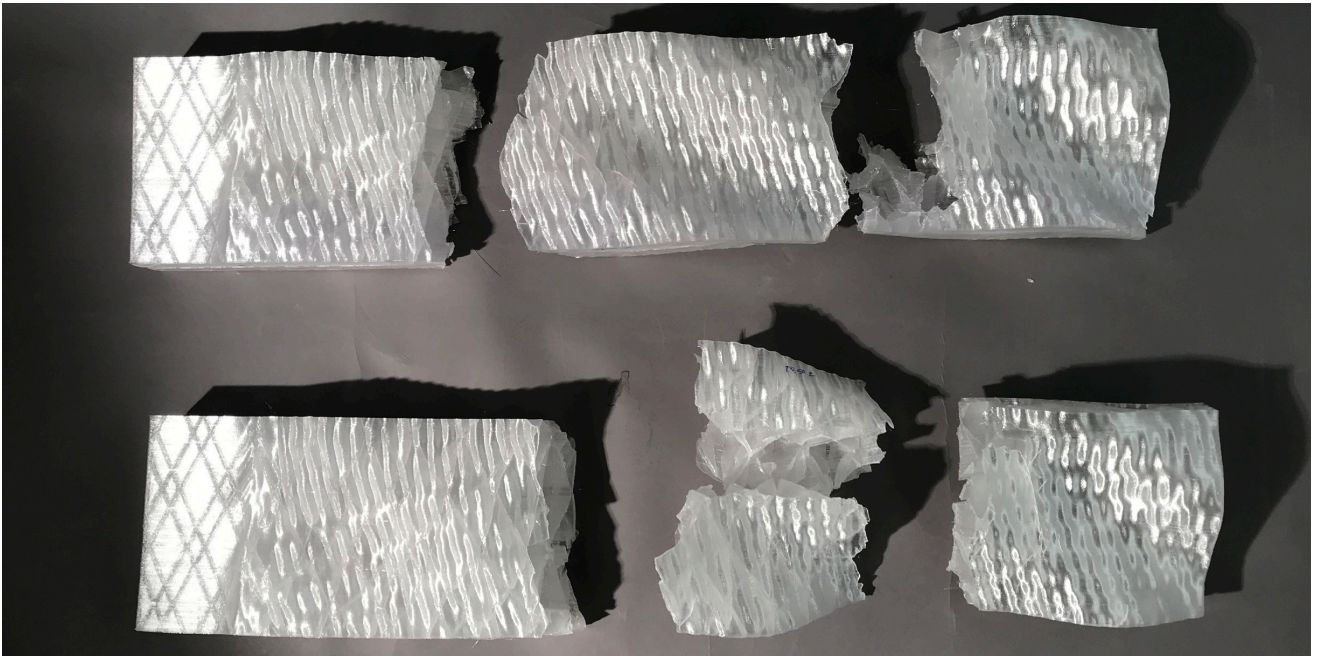
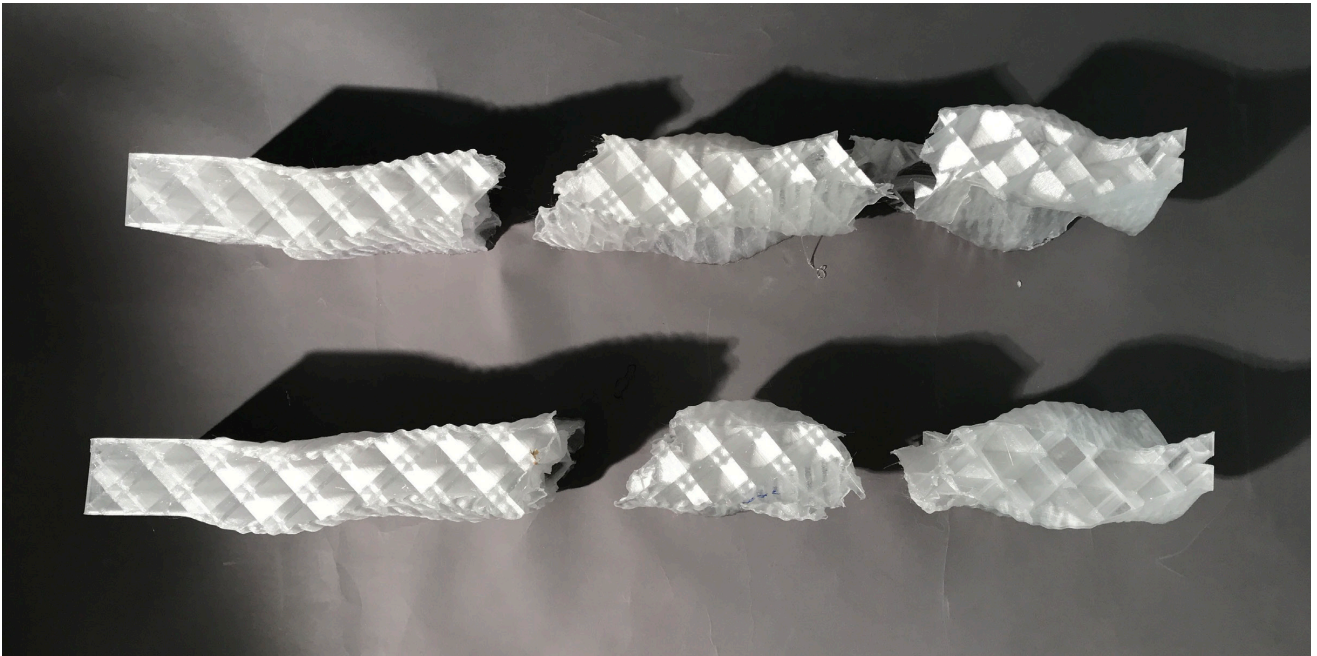
Testkörper 1 + 2

Aufsicht Bruchbild

[Abb. 10.5.2_7]

Testkörper 1 + 2

seitliches Bruchbild



[Abb. 10.5.2_8]
Testkörper 3 + 4
Aufsicht Bruchbild

[Abb. 10.5.2_9]
Testkörper 3 + 4
seitliches Bruchbild

10.5.2 Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) und Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert)

Durch rechnerische Verfahren konnten vorab keine Ergebnisse zum U-Wert und g-Wert ermittelt werden, da die Unregelmäßigkeit der Geometrie und die Größe des Testelements von 90 x 74cm (HxB) nicht über digitale Methoden abbildbar waren. Um dennoch eine Einschätzung über das Dämmverhalten und den Energiedurchlass der heterogenen Geometrie des ‚Tomorrow‘-Elements zu erhalten, wurde beim IFT-Rosenheim eine U-Wert und g-Wert Ermittlung in Auftrag gegeben.

Testelement

Das Testelement für die Ermittlung des U-Werts und des g-Werts ist das Element E4 (oben rechts) mit den Außenabmessungen von 74 cm Breite und 90 cm Höhe. Diese Element hat verschiedene Zellgrößen der inneren Dämmstruktur, was beispielhaft für die Ermittlung eines Mittelwerts als Ergebnis für den U-Wert ist. Des weiteren hat dieses Element eine

ausgeprägte Wellengeometrie zur Eigenverschattung, woraus sich verschiedene Werte für den g-Wert ermitteln lassen.

Wärmedurchgangskoeffizient U-Wert

Definition

Der U-Wert (Wärmedurchgangskoeffizient) gibt den Wärmedurchgang von Außenwandkonstruktionen in W/m^2K an.

Der U-Wert ist ein spezifischer Kennwert eines Bauteils. Er wird im Wesentlichen durch die Wärmeleitfähigkeit und Dicke der verwendeten Materialien bestimmt, aber auch durch die Wärmestrahlung und Konvektion an den Oberflächen. Der Wärmedurchgangskoeffizient ist abhängig von den Wärmeübergangskoeffizienten zwischen dem festen Körper und den Fluiden sowie der Wärmeleitfähigkeit und Geometrie des festen Körpers.

[7] (Wikipedia, Wärmedurchgangskoeffizient)

Testergebnis:

Das Testelement erreichte einen U-Wert von: $1,6 W/(m^2K)$
(Prüfung siehe Anlagen Nachweis IFT Rosenheim)

Einordnung des Ergebnisses: U-Werte von transparenten Bauteilen

Acrylglas (Plexiglas) $d=5$ mm:

$5,3 W/m^2K$

Einfachfenster $d=4$ mm:

$5,9 W/m^2K$

Isolierverglasung $d=2,4$ cm:

$2,8-3,0 W/m^2K$

Wärmeschutzverglasung $d=2,4$ cm: ca. $1,3 W/m^2K$

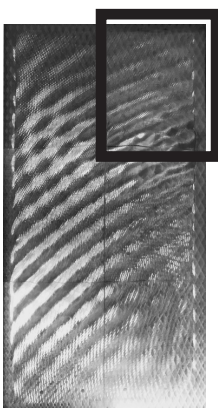
Dreifach-Wärmeschutzverglasung: $1,1 W/m^2K$

Lichtbauelement Polycarbonat klar $d=6$ cm:

ca. $0,83 W/m^2K$

Fenster im Passivhausstandard: $0,5-0,8 W/m^2K$

[7] (Wikipedia, Wärmedurchgangskoeffizient)



[Abb. 10.5.2_1]

Bereich des Testelements für die U/g- Wert Ermittlung am IFT Rosenheim

[Abb. 10.5.2_2]

Testkörper (Abmessungen: 90 x 70 cm, $d = 4-6$ cm) für U/g- Wert Ermittlung am IFT Rosenheim



Nachweis Wärmedurchgangskoeffizient

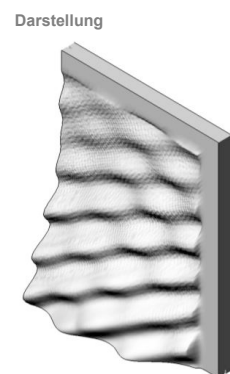
Prüfbericht
Nr. 18-002496-PR07
(PB 01-H07-06-de-01)



Auftraggeber Technische Universität München
Fakultät für Architektur
Professur für Entwerfen und Gebäudehülle
Arcisstr. 21
80333 München
Deutschland

Grundlagen *)
EN ISO 12567-1:2010-07
*) und entsprechende nationale Fassungen
(z.B. DIN EN)

Produkt Paneel



Leistungsrelevante Produktdetails **Abmessungen;** Breite in mm **704**; Länge in mm **896**; Gesamtdicke in mm **ca. 60** am Paneelrand (2 Kanten); Aufbau **Dreidimensional geformtes Paneel mit strukturierter Deckschicht und Hohlkammern** (weitere Informationen siehe Anlage 1); **Material Polyethylene - Terephthalate - Glycol „extrudr PETG“**; Flächengewicht in kg/m² **22,0** (Messwert)

Besonderheiten --

Weitere Darstellungen siehe Anlage 1.

Ergebnis

Wärmedurchgangskoeffizient in Anlehnung an
EN ISO 12567-1:2010-07



$$U = 1,6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Verwendungshinweise

Die ermittelten Ergebnisse können für den Nachweis entsprechend den oben angegebenen Grundlagen verwendet werden.

Gültigkeit

Die genannten Daten und Einzelergebnisse beziehen sich ausschließlich auf den geprüften beschriebenen Probekörper. Diese Prüfung/Bewertung ermöglicht keine Aussage über weitere leistungs- /qualitätsbestimmende Eigenschaften des Produkts; insbesondere Witterungs- und Alterungseinflüsse wurden nicht berücksichtigt.

Veröffentlichungshinweise

Es gilt das "Merkblatt zur Benutzung von ift-Prüfdokumentationen". Das Deckblatt kann als Kurzfassung verwendet werden.

ift Rosenheim
20.08.2019

Konrad Huber, Dipl.-Ing. (FH)
Prüfstellenleiter
Bauphysik

Stefan Junker, Dipl.-Ing. (FH)
Prüfingenieur
Bauphysik

Inhalt

Der Nachweis umfasst insgesamt 5 Seiten und Anlagen (3 Seiten).

Gesamtenergiedurchlassgrad g-Wert

Definition

Der g-Wert (Energiedurchlassgrad) ist ein Maß für die Durchlässigkeit von transparenten Bauteilen für Energie. Dieser gibt an, welcher prozentuale Anteil der Energie durch z. B. Sonneneinstrahlung nach innen gelangen kann und dort zur Erwärmung beiträgt. Der g-Wert als Gesamtenergiedurchlassgrad ist die Summe aus der direkten Transmission solarer Strahlung, sowie der sekundären Wärmeabgabe nach innen durch Strahlung und Konvektion. Verlust entsteht durch Reflexion oder Absorption vom oder am transparenten Bauteil. Der g-Wert nimmt Werte zwischen 0 und 1 ein. Ein g-Wert von 0,7 gibt an, dass 70 % der einstrahlenden Energie durchgelassen wird.

[8] (Wikipedia, Energiedurchlassgrad)

Testergebnis:

Das Testelement erreichte einen g-Wert von:

Einstrahlungswinkel $0^\circ = 0,29$

Einstrahlungswinkel $60^\circ = 0,26$

(Prüfung siehe Anlagen Nachweis IFT Rosenheim)

Einordnung des Ergebnisses: g-Werte von Verglasungen

übliche Einfachverglasung:

$g = 0,75 - 0,87$

3-Scheiben-Verbundfenster oder 2-Scheiben-Isolierverglasung mit Beschichtung:

$g = 0,60$

Glasbausteine oder Drahtglas:

$g = 0,60$

3-Scheiben-Isolierverglasung mit Beschichtung: $g = 0,5 - 0,55$

spezielles Sonnenschutzglas:

$g = 0,3 - 0,5$

Lichtbauelement Polycarbonat klar: $g = 0,42$

[8] (Wikipedia, Energiedurchlassgrad)

Ergebnis

Das Ergebnis der Untersuchung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) verfehlt mit $1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ knapp die Anforderungen aus der EnEV 2014/2016. Dort sind ab 2016 für Nichtwohngebäude gemittelte U-Werte für transparente Außenbauteile und Vorhangfassaden von $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ gefordert.

Das Ergebnis des Gesamtenergiedurchlassgrads (g-Wert) von 0,29 bei einem Einstrahlwinkel von 0° und 0,26 bei einem Einstrahlwinkel von 60° zeigt die Abhängigkeit des g-Werts vom Sonnenstand und der verwendeten Geometrie.

Fazit:

Diese Ergebnisse zeigen erste wichtige Basiswerte, die auf Grund der Untersuchung an einem Prototypen im Maßstab 1:1 ermittelt wurden und bilden somit die Grundlage für Weiterentwicklungen der Geometrie im Hinblick auf notwendige Dämm- und Sonnenschutzanforderungen.

Nachweis

Gesamtenergiedurchlassgrad

Prüfbericht

Nr. 18-002496-PR07

(PB02-H07-07-de-01)

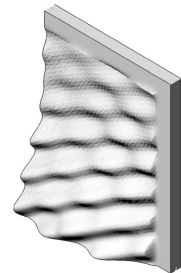


Auftraggeber **Technische Universität München
Fakultät für Architektur
Professur für Entwerfen und Gebäudehülle
Arcisstr. 21
80333 München
Deutschland**

Grundlagen

Hausverfahren „Kalorimetrische Bestimmung des Gesamtenergiedurchlassgrades g“ 2002-06

Darstellung



Verwendungshinweise

Dieser Prüfbericht dient zum Nachweis des Gesamtenergiedurchlassgrades g bzw. g_{total} des Probekörpers. Hierbei handelt es sich um den „center-of-glazing“-Wert. Einflüsse des Randverbundes wurden nicht berücksichtigt. Die Werte beziehen sich auf direkten Strahlungseinfall, diffuse Strahlung ist gesondert zu berücksichtigen.

Produkt	Panel
Leistungsrelevante Produktdetails	Abmessungen; Breite in mm 704; Länge in mm 896; Gesamtdicke in mm ca. 60 am Panelrand (2 Kanten); Aufbau Dreidimensional geformtes Panel mit strukturierter Deckschicht und Hohlkammern (weitere Informationen siehe Anlage 1); Material Polyethylene - Terephthalate - Glycol „extrudr PETG“; Flächengewicht in kg/m² 20,0 (Messwert)
Besonderheiten	--

Gesamtenergiedurchlassgrad g



Einstrahlwinkel	0°	60°
g	0,29 ± 0,05	0,26 ± 0,05

ift Rosenheim
20.08.2019

Manuel Demel, M.BP, Dipl.-Ing. (FH)
Stv. Prüfstellenleiter
Bauphysik

Konrad Huber, Dipl.-Ing. (FH)
Prüfingenieur
Bauphysik

Gültigkeit

Die genannten Daten und Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf den geprüften und beschriebenen Gegenstand.

Die Prüfung der strahlungsphysikalischen Kenngrößen ermöglicht keine Aussage über weitere Leistungs- und qualitätsbestimmenden Eigenschaften der vorliegenden Konstruktion.

Veröffentlichungshinweise

Es gilt das ift-Merkblatt „Bedingungen und Hinweise zur Benutzung von ift-Prüfdokumentationen“. Das Dokument kann nur vollständig verwendet werden.

Inhalt

Der Nachweis umfasst insgesamt 8 Seiten

- 1 Gegenstand
- 2 Durchführung
- 3 Einzelergebnisse

Ve-Prüf: 479-de / 06-08 / 439

ift Rosenheim GmbH
Theodor-Gietl-Str. 7-9
D-83026 Rosenheim
Kontakt
Tel. +49 8031 281-0
Fax +49 8031 281-290
www.ift-rosenheim.de

Prüfung und Kalibrierung – EN ISO/IEC 17025
Inspektion – EN ISO/IEC 17020
Zertifizierung Produkte – EN ISO/IEC 17065
Zertifizierung Managementsysteme – EN ISO/IEC 17021



[Abb. 10.5.2_4]

Deckblatt des Nachweises IFT Rosenheim
Gesamtenergiedurchlassgrad

10.5.3 Brandverhalten

Um eine Einschätzung über das Brandverhalten des verwendeten Kunststoffes PETG, des Tomorrow-Elements, im Vergleich zum Referenzprodukt Rodeca-Lichtbauelemente PC-2560, d = 60mm mit einer Brandklasse: um B-s1, d0 nach EN 13501 zu erhalten, wurde ein exemplarischer Brandtest an einem Testkörper mittels eines Löt-/Schweißgerätes durchgeführt.



Jedes Bauteil wird mittels des Schweißgerätes zum Brennen gebracht, bei Flammenentstehung wird die Feuerquelle entfernt und es wird überprüft, ob die Flamme erlöscht oder allein weiterbrennt.

Dieser Versuch dient nur zu einer modellhaften Einschätzung und ist nicht mit einer Brandprüfung zu vergleichen.

[Abb. 10.5.3_1]

Oben links: Mikro- Löt /Schweißgerät (Kager GB-2001)

[Abb. 10.5.3_2]

Oben rechts: Testkörper Rodeca wird entzündet bis zur Flammenbildung

[Abb. 10.5.3_3]

Unten: Nach Entfernung der Feuerquelle erlöscht die Flamme

Versuch 1

Rodeca-Lichtbauelemente PC-2560, d = 60mm

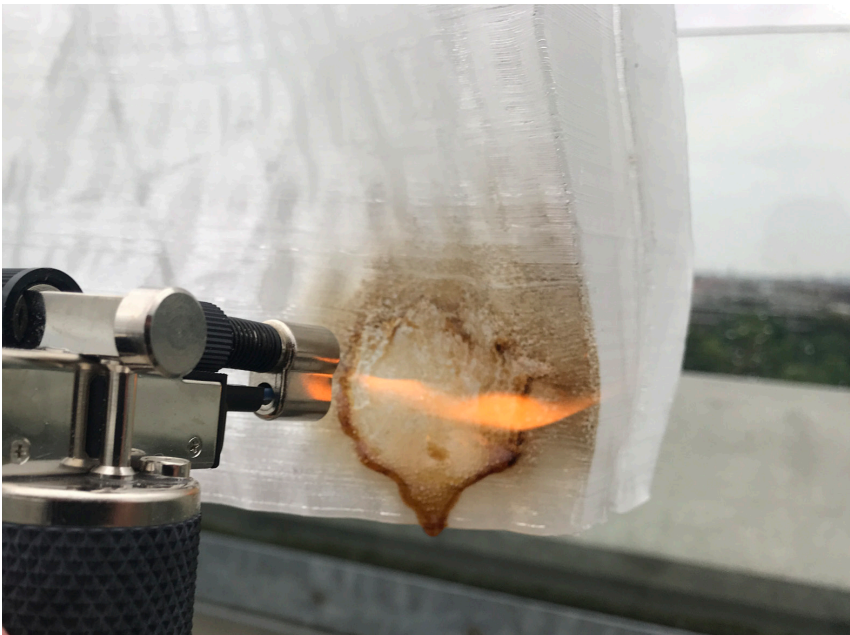
Nach der Flammenbildung erlöscht die Flamme nach Entfernung der Feuerquelle. Abtropfen und brennendes Abtropfen findet nicht statt.



Versuch 2

3-D-gedrucktes PETG-Bauteil

Nach der Flammenbildung erlöscht die Flamme nach Entfernung der Feuerquelle. Abtropfen findet statt und brennendes Abtropfen findet nicht statt.



Ergebnis:

Beide Bauteile fangen an zu brennen und nach der Entfernung der Feuerquelle erlöscht die Flamme von selbst.

Unterschiedlich ist die Dauer bis zu Entzündung. Das Rodeca-Bauteil hat eine 3-fach längere Entzündungsdauer im Gegensatz zum PETG-Bauteil.

Im Gegensatz zum Rodeca-Bauteil, welches nicht abtropft, ist bei dem PETG-Bauteil ein Abtropfen nach kurzer Dauer gegeben.

Fazit:

Durch den Vergleich lassen sich Schlüsse auf eine mögliche Erreichung des PETG-Bauteils der Baustoffklasse B1 ziehen. Dies lässt sich nur über eine ordentliche Brandprüfung erreichen.

[Abb. 10.5.3_4]

Oben: Testkörper PETG wird entzündet bis zur Flammenbildung, es kommt zum Abtropfen

[Abb. 10.5.3_5]

Unten: Nach Entfernung der Feuerquelle erlöscht die Flamme

10.5.4 Brandprüfung

Nach den ersten Tests zum Brandverhalten in 10.5.3 wurde ein Nachweis des Brandverhaltens nach DIN 4102-1:1998 des Baustoffklasse B1 am Prüf- und Zertifizierungsbereich Brand der Holzforschung der TUM durchgeführt. Bei dieser Prüfung ist neben dem Material auch die Geometrie ein wichtiger Parameter für die Prüfung. Hierfür wurden Proben aus PETG und der zugrunde liegenden innerern Struktur des ‚Tomorrow‘-Fassadenelements hergestellt. Bei dieser Prüfung soll herausgefunden werden, welchen Einfluss die innere Geometrie auf das Brandverhalten hat und somit auch auf die Baustoffklasse.

Im Zuge der Brandschachtprüfung werden vier Prüfproben mit den Abmessungen 100cm x 19cm x 6cm für 10 Minuten direkt einer Feuerquelle ausgesetzt. Nach dem Brandversuch werden die Restlänge der Proben gemessen, das Abtropfverhalten (brennend/nicht brennend), die entstandene Rauchdichte und Rauchgastemperatur analysiert.



[Abb. 10.5.4_1]

Oben: Hängende Anordnung der 4 Probekörper für den Brandschachtversuch

[Abb. 10.5.4_2]

Unten: Probekörper werden in den Brandschachtprüfstand eingesetzt

Prüfergebnis Brandschachtprüfung:

Die Prüfproben haben eine Restlänge von 100%, es fand kein brennendes Abtropfen statt, die Rauchdichte war mit 12% sehr gering wie ebenfalls die Rauchgastemperatur mit maximal 111°C.

Fazit Brandprüfung:

Die geprüften Elemente erfüllen die Anforderungen nach DIN 4102-1, Baustoffklasse B1. Die hohe Restlänge, die geringe Rauchdichte und Rauchgastemperatur sind positiv bei diesem Test aufgefallen. Als nachteilig ist noch das Abtropfen des geschmolzenen Kunststoffes zu sehen, obwohl nicht brennend abtropfend, sind doch konstruktiv Vorkehrungen beim Einsatz dieses Materials zu treffen, damit im Brandfall keine Personen zu Schaden kommen können.



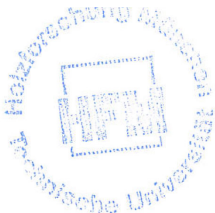
[Abb. 10.5.4_3]

Oben: Probekörper werden 10 Min. beflammt

[Abb. 10.5.4_4]

Unten: Probekörper aufgereiht nach der Prüfung zur Restlängenermittlung

Prüfzeugnis der Brandprüfung



Prüfzeugnis

zum Nachweis des Brandverhaltens nach DIN 4102-1:1998,
Baustoffklasse B1

B19001



Technische Universität München



Wissenschaftszentrum
Weihenstephan



Holzforschung München

Prüfmaterial	Fluid Morphology V002 3D-gedrucktes Fassadenpaneel (siehe Anlage 2)
Verwendung	Baustoff zur Verwendung im Innenbereich. Im Abstand > 40 mm zu gleichen oder anderen flächigen Materialien
Datum der Erstellung	09.01.2019
Geltungsdauer	09.01.2024

notifizierte Stelle / *notified body*
No. 0797
BAY06

Prüf- und Zertifizierungsbereich
Brand

Winzererstraße 45
80797 München
Germany

Tel. +49.89.2180.6480
Zentrale 6420
Fax 6487

brand@hfm.tum.de
www.hfm.tum.de

Das Prüfzeugnis hat **5** Seiten und **2** Anlagen

Das geprüfte Material erfüllt bei der genannten Verwendung die Anforderungen nach DIN 4102-1, Baustoffklasse B1.

Dieses Prüfzeugnis gilt nur für die oben angegebene Verwendung.

Hinweise:

Dieses Prüfzeugnis ist kein bauaufsichtlicher Verwendbarkeitsnachweis!

Das Prüfzeugnis darf in Form und Inhalt unverändert veröffentlicht oder vervielfältigt werden, andernfalls muss die Zustimmung der HFM eingeholt werden.

Auftrag zur Erstellung des Prüfzeugnisses: 29.11.2018



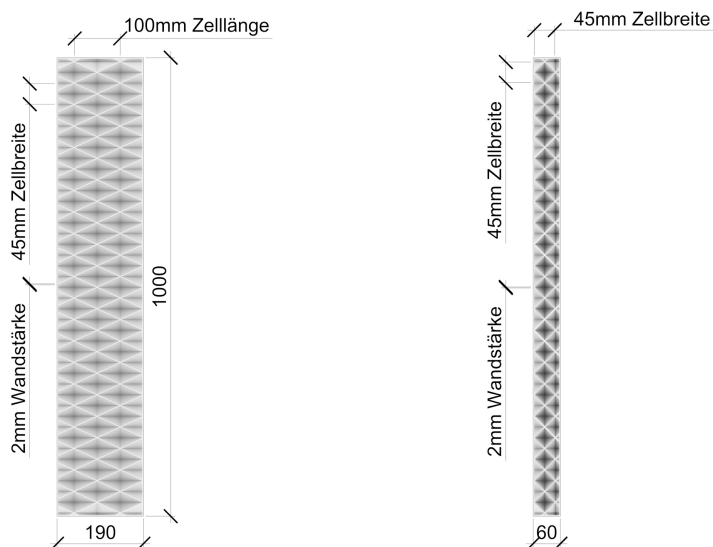
P06-01-03-FB02 Rev04

Durch die DAkkS nach DIN EN ISO 17025 akkreditiertes Prüflabor. Die Akkreditierung gilt nur für den in der Urkundenanlage D-PL-14063-04-00 aufgeführten Akkreditierungsumfang.



[Abb. 10.5.4_5]
Deckblatt des Prüfzeugnisses

Anlagen aus dem Prüfzeugnis der Brandprüfung

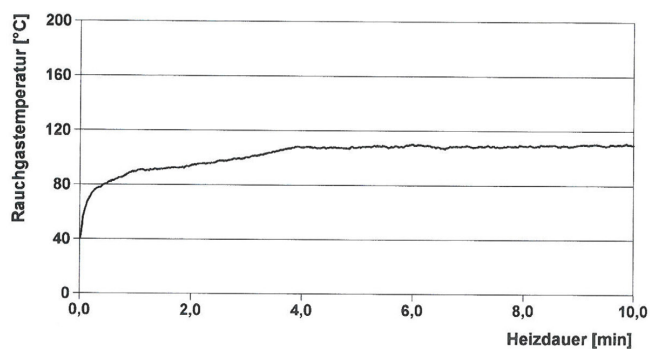


TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

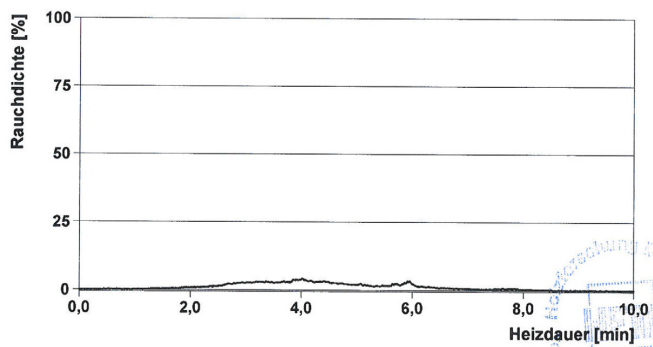
ANLAGE 1

Versuchsergebnisse Brandschacht

Projekt: TUM
 Versuchsdatum: 17.12.2018 Versuchsnummer: 5077



max. Rauchgastemperatur: 111 [°C]
 Zeitpunkt der max. Rauchgastemperatur: 09 [min] 51 [s]



Integral Rauchdichte: 12 [%*min]

[Abb. 10.5.4_6]

Oben: Probekörper Ansicht und Schnitt

[Abb. 10.5.4_7]

Unten: Diagramme aus dem Prüfbericht
 oben: Rauchgastemperaturverlauf
 unten: Rauchdichteverlauf

10.6 Vergleichstest Today- und Tomorrow-Element auf der Solarstation

Um Messungen durchzuführen, wurden beide Fassadenelemente, „Today“ und „Tomorrow“, wie geplant auf der Solarstation der TU München montiert. Der Innenraum ist hochgedämmt, und es sind separate Räume hinter jedem Fassadenelement angeordnet, um unabhängige Vergleichsmessungen durchzuführen. Das Today-Element diente als Referenzobjekt für die Messungen am Tomorrow-Element.

Diese Messungen sollen als Indikator zur Potenzialabschätzung weiterer Entwicklungen dienen und besitzen Modellcharakter.

10.6.1 Eigenverschattung

Thermischer Komfort

Die Verschattung der Fassade ist ein wichtiger Baustein der Funktionsintegration, um einen Schutz vor Überhitzung von lichtdurchlässigen Fassaden in den Sommermonaten zu gewährleisten und ist somit ein Teilaspekt des thermischen Komforts.

Die Eigenverschattung im Sommer soll den Vorteil der Geometrie gegenüber der Referenzfassade zeigen.

Ziel ist es, die simulierten Ergebnisse der Eigenverschattung zur Funktionsgeometrieeerstellung unter Realbedingungen zu überprüfen.



[Abb. 10.6_1]

Oben: Vergleichstest Today- und Tomorrow-Element Solarstation TU München

[Abb. 10.6.1_1]

Unten: Tomorrow-Element
Eigenverschattung



Nachweise werden durch zwei Untersuchungen geführt:

1. Über eine Wärmebildkamera wird von der Innenseite der Wärmeintag verglichen.

Wärmebildkamera: SEEK (Abb.)

2. Eine fotografische Dokumentation des Sonnenverlaufs an einem Sommertag zeigt die Eigenverschattung exemplarisch auf.

Untersuchung 1

Vergleich der solaren Strahlung im Innenraum der beiden Fassadenelemente mittels einer Wärmebildkamera.

Diese Untersuchung dient der exemplarischen Überprüfung der verschiedenen Geometrien hinsichtlich der Reduzierung der solaren Strahlung im Innenraum.

Der Temperaturverlauf an der Innenseite der Fassadenelemente wird an einem sonnigen Sommertag (11. Juni 2018) untersucht.

Das ‚Tomorrow‘-Fassadenelement hat einen heterogenen Aufbau der inneren Zellstruktur und die Eigenverschattungsgeometrie ist ebenfalls in Teilbereichen unterschiedlich ausgeformt, wodurch verschiedene Qualitäten der unterschiedlichen Geometrie-kombinationen sichtbar werden.

Diese lassen sich in vier Gruppen aufteilen:

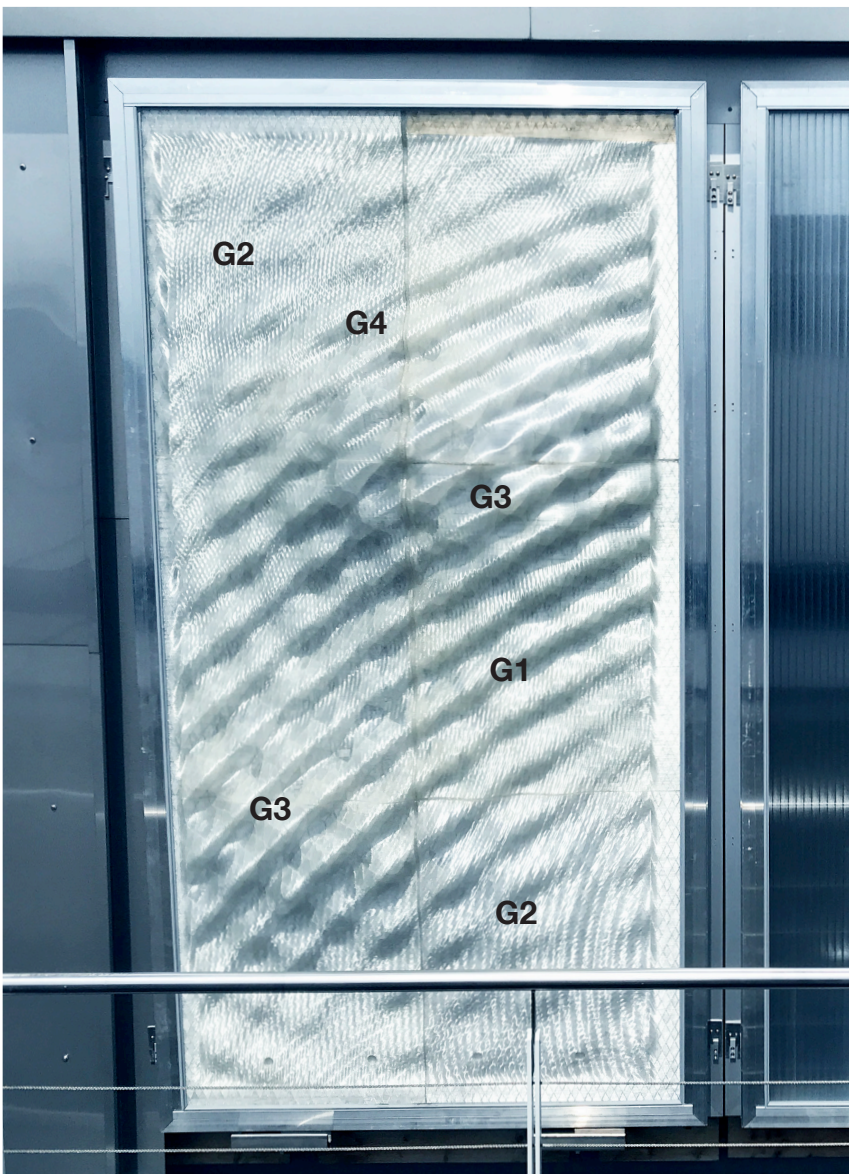
G1 - Kleine Zellstrukturen mit Eigenverschattung

G2 - Kleine Zellstrukturen ohne Eigenverschattung

G3 - Große Zellstrukturen mit Eigenverschattung

G4 - Große Zellstrukturen ohne Eigenverschattung

Das ‚Today‘- Fassadenelement ist homogen in seiner Geometrie.



[Abb. 10.6.1_2]

Oben: Wärmebildkamera SEEK thermal

[Abb. 10.6.1_3]

Unten: Tomorrow-Element

Darstellung der verschiedenen Teilbereiche mit unterschiedlichen Geometrie-kombinationen

Ergebnis:

Die Aufnahmen der Wärmebildkamera zeigen den maximalen Wärmeeintrag im Bereich G4 (große Zellstrukturen ohne Eigenverschattung) gefolgt von G2 (kleine Zellstrukturen ohne Eigenverschattung).

G1 und G3 (große und kleine Zellstrukturen mit Eigenverschattung) haben den geringsten Wärmeeintrag.

Durch die Auskragungen der Wellengeometrie wird eine Verschattung erreicht und durch die höhere Anzahl von Zellen in der inneren Struktur kann durch die erhöhte Masse die solare Strahlung besser absorbiert werden. Dadurch ist die Oberflächentemperatur in diesen Bereichen geringer als in den anderen Bereichen.

Die Wärmebilder zeigen eine Temperaturdifferenz von 2 bis 5°C zwischen verschatteten und unverschatteten Bereichen an.

Legende: Oberflächentemperatur der Wärmebildkamera



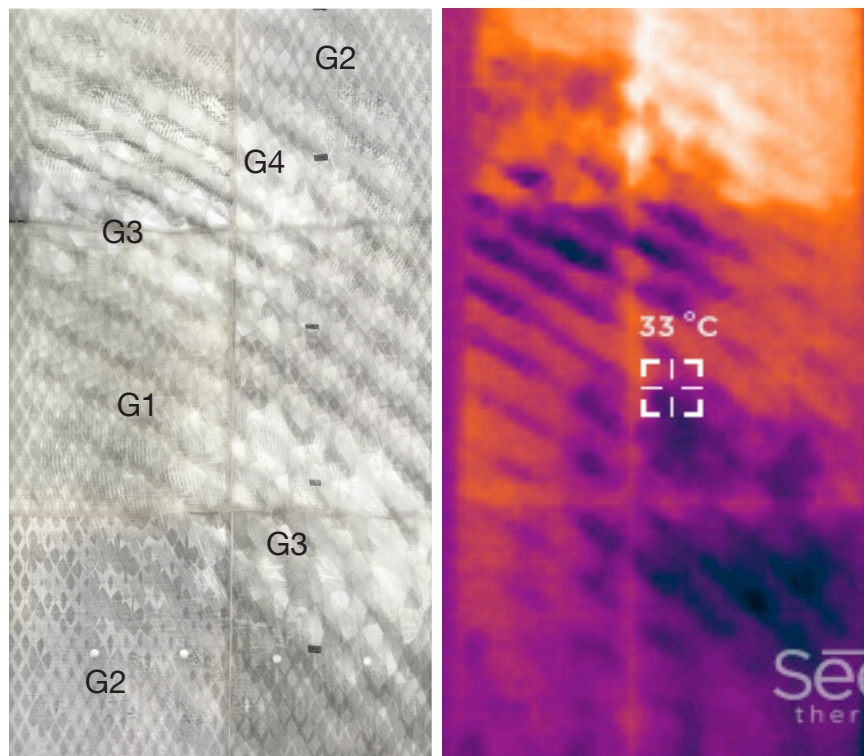
[Abb. 10.6.1_4]

Oben: Tomorrow-Fassadenelement

Heterogene Fassadengeometrie

Links: Foto der Innenansicht mit den verschiedenen Teilbereichen der Geometrikombinationen G1-G4

Rechts: Foto Wärmebildkamera der Oberflächen im Innenbereich



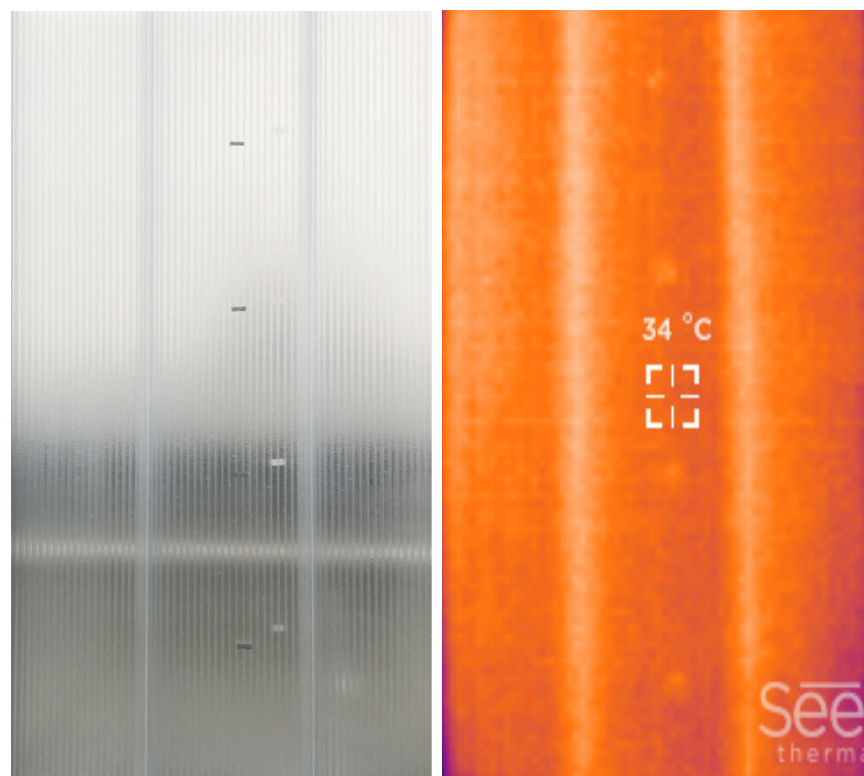
[Abb. 10.6.1_5]

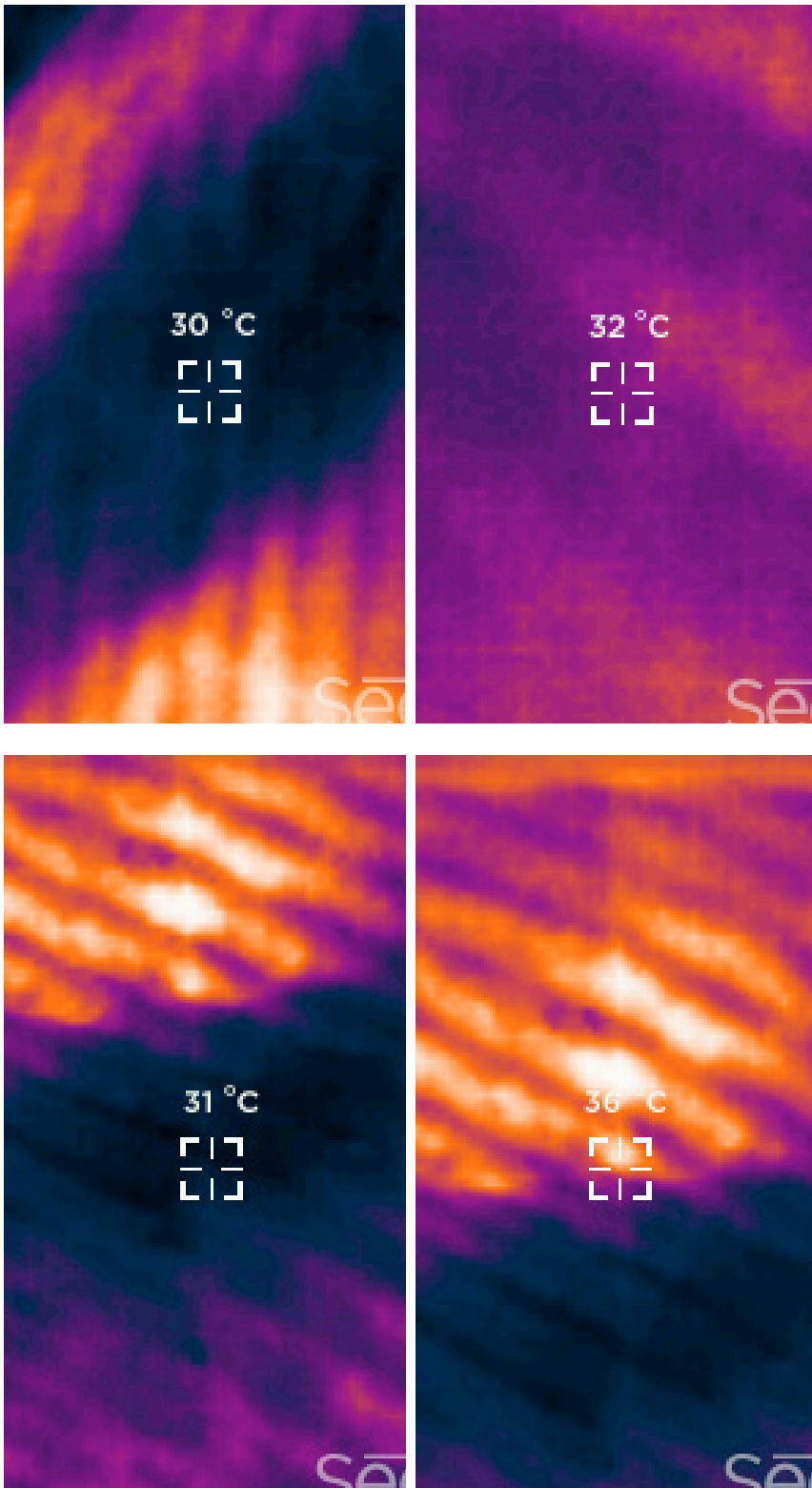
Unten: Today-Fassadenelement

Homogene Fassadengeometrie

Links: Foto der Innenansicht

Rechts: Foto Wärmebildkamera der Oberflächen im Innenbereich





Fazit:

Obwohl die gleiche solare Strahlung auf die gleiche Fläche der Fassade aus transparentem Material trifft, zeigt die entwickelte Geometrie, dass die absorbierte Wärme nicht zu gleichen Teilen an die innenseitige Oberfläche abgegeben wird. Die größere Anzahl von Zellen im Sonnenschutzbereich dämmen besser zum Innenraum hin.

Die lichtdurchlässigeren Bereiche, in die mehr solare Strahlung eindringen kann, haben einen geringeren Zellenanteil um mehr Tageslicht einzulassen. Diese Zellen werden aber durch die Eigenverschattungsgeometrie im Sommer verschattet.

Der gewählte Ansatz zeigt die gewünschten Resultate sowie das Potenzial zur Weiterentwicklung dieser Strategie.

Um eine effektive Verringerung des Wärmeeintrags zu erreichen, müsste die Eigenverschattung in allen Bereichen angewendet werden.

[Abb. 10.6.1_6]

Oben: Nahaufnahme Eigenverschattung Wärmebilder Oberfläche im Innenbereich der Verschattungsgeometrie
 Links: Verschattungsbereich Oberflächentemp. 30°C
 Rechts: Zwischenbereich Oberflächen-temp. 32°C

[Abb. 10.6.1_7]

Unten: Nahaufnahme Eigenverschattung Wärmebilder Oberfläche im Innenbereich der Verschattungsgeometrie
 Links: Verschattungsbereich Oberflächentemp. 31°C
 Rechts: Belichtungsbereich Oberflächen-temp. 36°C

Untersuchung 2:

Sonnenverlauf Sommer (11. Juni)

Eine Dokumentation des Sonnenverlaufs an einem Sommertag zeigt die Eigenverschattung exemplarisch auf.



09:00 Uhr



10:00 Uhr



13:00 Uhr



14:00 Uhr



17:00 Uhr



18:00 Uhr



11:00 Uhr



12:00 Uhr



15:00 Uhr



16:00 Uhr



19:00 Uhr

[Abb. 10.6.1_8]
Eigenverschattung Tagesverlauf
Fotodokumentation im Sommer (11. Juni)
1 Std. Intervall

Ergebnis:

Die durch die Simulation gewählte Geometrie verhält sich wie geplant. Die Verschattung der Unterseiten der Wellen (Meso-Ebene) setzt von von 14:00 Uhr ein und findet bis 19:00 Uhr statt. Um 14:00 Uhr ist die Eigenverschattung wie in der Simulation erreicht.

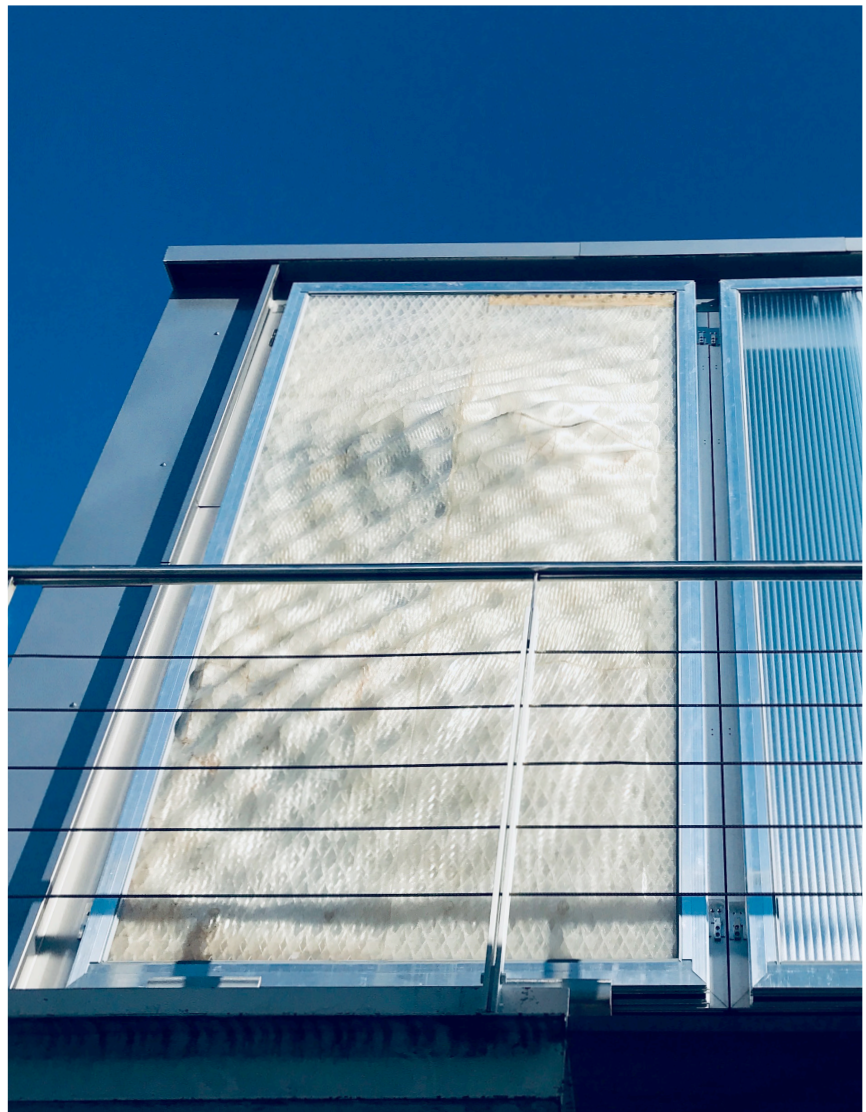
Es hat sich auch gezeigt, dass in den Wintermonaten hingegen die Eigenverschattung nicht wirksam ist. Exemplarisch sieht man dies auf der Abbildung rechts (vom 15.02.2019 12 Uhr). Die Abbildung zeigt die Fassade voll ausgeleuchtet, auch die im Sommer verschatteten Bereiche.

Fazit:

Der gewählte Ansatz zeigt die gewünschten Resultate sowie das Potenzial zur Weiterentwicklung dieser Strategie. Die Wellengeometrie könnte aber noch in größeren Bereichen eingesetzt werden, um eine effektivere Verschattung zu erreichen. Die Wahl eine radiale (gekrümmte) Wellengeometrie einzusetzen erweist sich auch als vorteilhaft, da ein größerer Zeitraum der Eigenverschattung abgedeckt wird als bei einer linearen Geometrie.

Dennoch müsste die Eigenverschattungsgeometrie auch in den Teilbereichen, deren Geometrie abflacht, angewendet werden, um die maximale Verschattung zu erreichen.

Dies wäre individuell abzuwägen und wäre an die Anforderung der jeweiligen Nutzung anzupassen.



[Abb. 10.6.1_9]

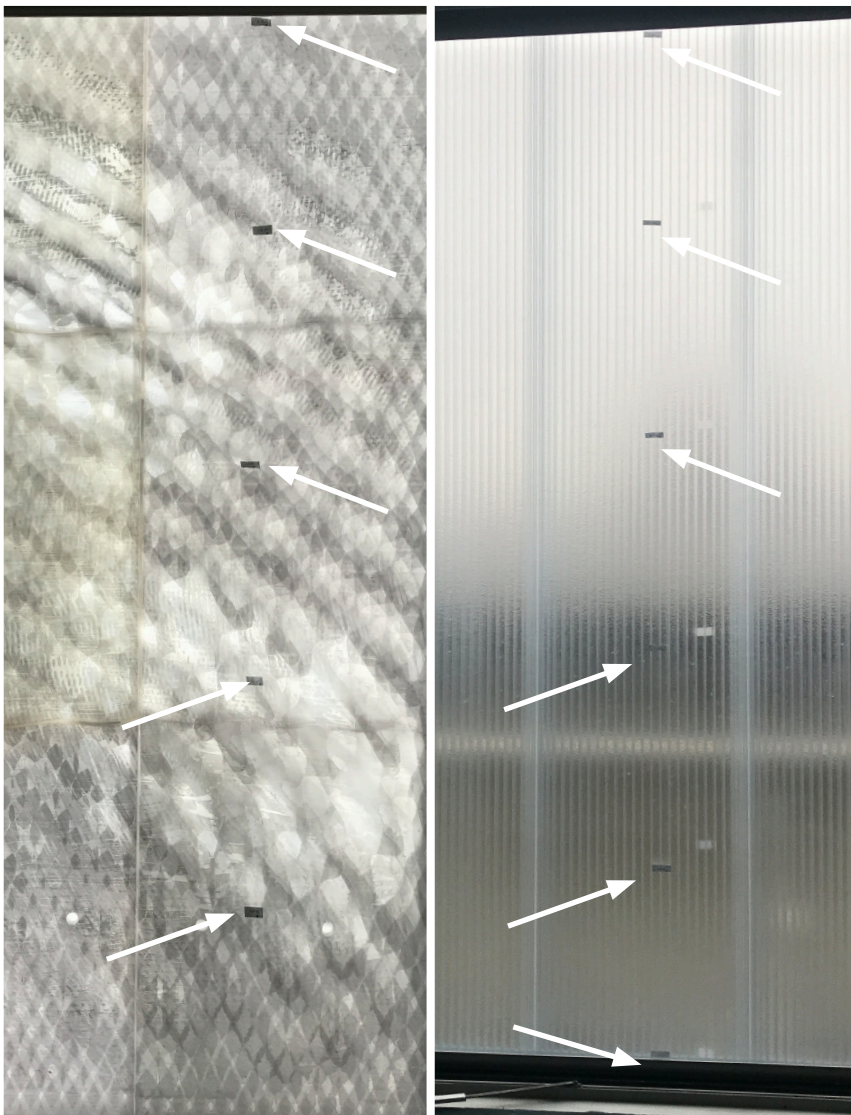
Tomorrow-Element Eigenverschattung
Winter 15.02.2019 12:00 Uhr

10.6.2 Fassadenoberflächentemperatur auf der Innenseite

Thermischer Komfort

Die Oberflächentemperatur der Fassade im Innenbereich ist Teil des thermischen Komforts. Oberflächen, die eine hohe Differenz zur Raumtemperatur haben, werden als störend empfunden, speziell im Sommer tragen sie zu erhöhter Wärmeempfindung bei,

ähnlich einem Heizkörper. Im Winter erzeugen kalte Oberflächen einen Luftabfall und somit Zugerscheinungen. Diese Untersuchung zeigt die Oberflächentemperaturunterschiede der beiden Elemente auf.



Messaufbau

Die Oberflächentemperatur wird 20 cm neben der vertikalen Mittelachse der Fassade von unten nach oben in Abständen von jeweils 50 cm gemessen. Über die Einzelergebnisse wird die Durchschnittstemperatur der Oberfläche errechnet.

Dies ist vor allem deshalb notwendig, da das ‚Tomorrow‘-Element einen heterogenen Aufbau hat und somit Temperaturdifferenzen auftreten.

Die Außenoberflächentemperatur wurde ebenfalls simultan mit der gleichen Methode aufgezeichnet.

Aufzeichnungszeitraum:
16.04. – 04.05.2018

Messgerät für Oberflächentemperaturen:
Votcraft Dual Laser IR-SCAN-350RH/2



[Abb. 10.6.2_1]
Messgerät für Oberflächentemperaturen
Votcraft Dual Laser IR-SCAN-350RH/2

[Abb. 10.6.2_2]
Oberflächentemperatur Vergleichstest
Position der Messpunkte innenseitig
Links: Tomorrow-Element
Rechts: Today-Element

Aufzeichnungszeitraum:
16.04. – 04.05.2018

Die Aufzeichnungen wurden an mehreren sonnigen und bewölkten Tagen aufgezeichnet und dann die Durchschnittswerte errechnet um representative Ergebnisse zu erzielen. Diese Untersuchung ist modellhaft zu verstehen, da nur ein relativ kurzer Zeitraum für die Messungen zu Verfügung stand. Messungen um die operative Temperatur zu ermitteln und diese über einen langen Zeitraum zu sammeln wären der nächste Schritt.

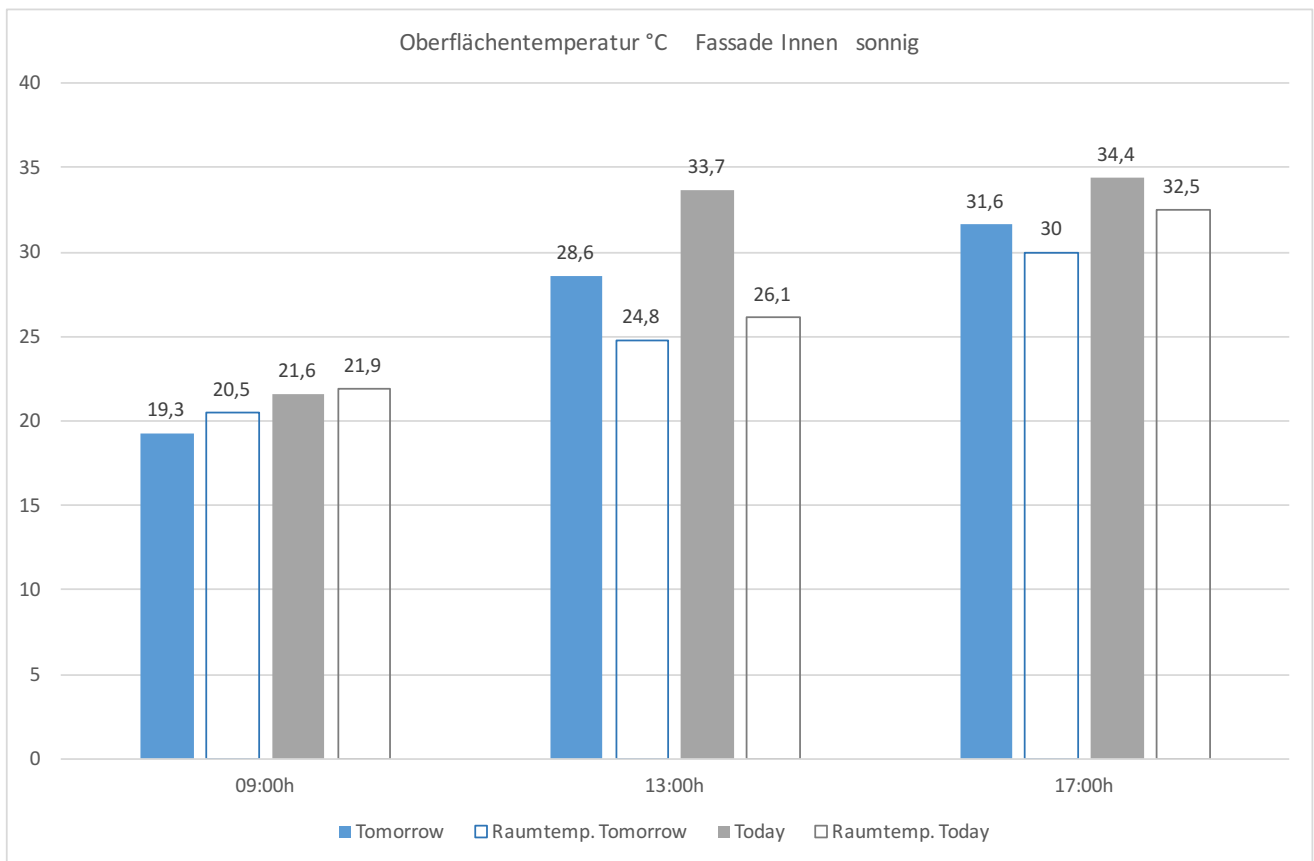
Untersuchung 1: ‚sonnig‘

Die Temperaturdifferenz zu Gunsten der Fassadenoberfläche an der Innenseite beträgt an sonnigen Tagen:

um 09:00 Uhr: 2,3 °C
um 13:00 Uhr: 5,1 °C
um 17:00 Uhr: 2,8 °C

Die Innenraumtemperaturdifferenz beträgt:

um 09:00 Uhr: 1,4 °C
um 13:00 Uhr: 1,3 °C
um 17:00 Uhr: 2,5 °C



[Abb. 10.6.2_4]

Oberflächentemperatur Vergleichstest

Tomorrow- und Today-Element

Temperaturdurchschnittswert Fassadeninnenoberfläche bei Sonnenschein

Untersuchung 2: ‚bewölkt‘

Die Temperaturdifferenz der Fassadenoberfläche an der Innenseite beträgt an bewölkten Tagen:

um 09:00 Uhr: 0,8 °C
um 13:00 Uhr: 1,8 °C
um 17:00 Uhr: 1,8 °C

Die Innenraumtemperaturdifferenz beträgt:

um 09:00 Uhr: 0,4 °C
um 13:00 Uhr: 1,0 °C
um 17:00 Uhr: 0,8 °C

Ergebnis:

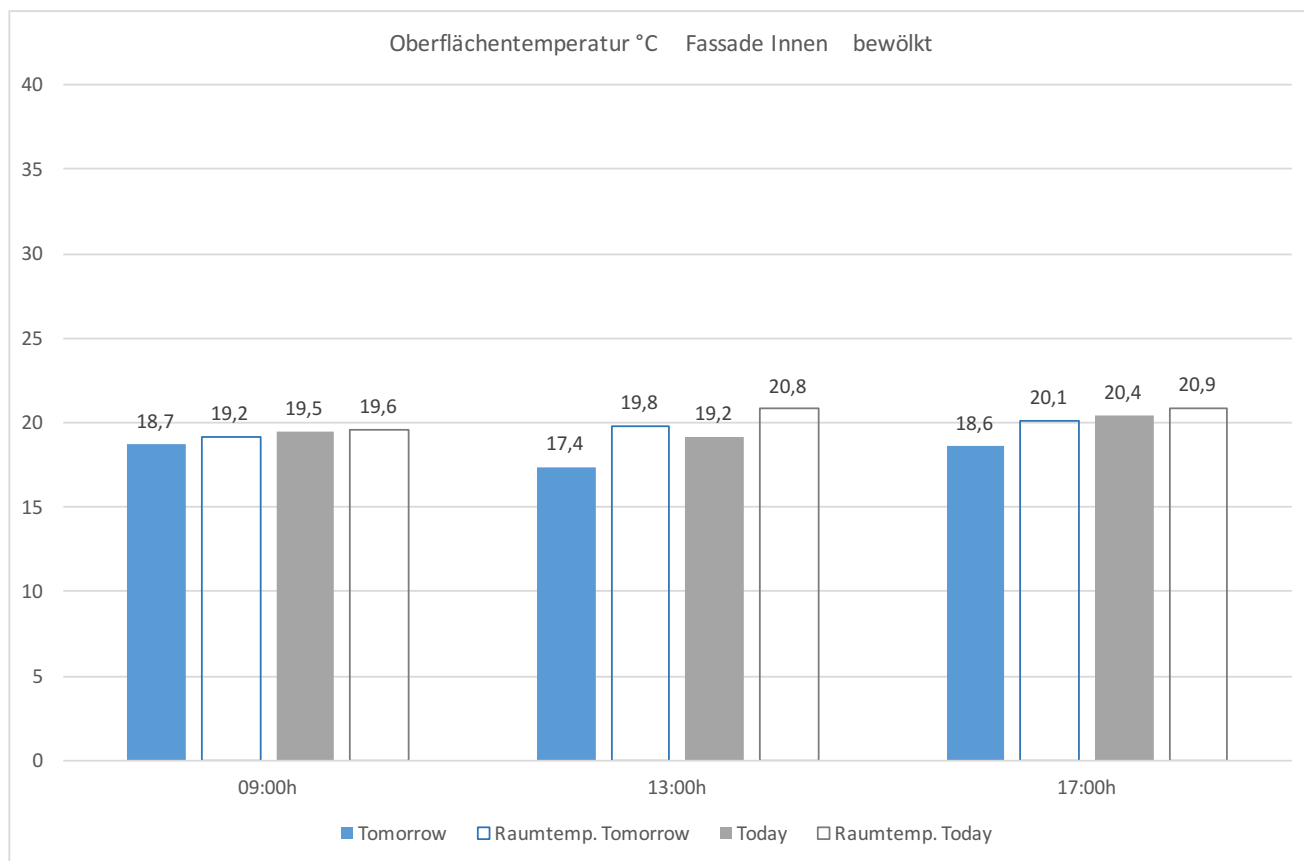
Die Temperatur des Tomorrow-Elements ist im Schnitt der Messungen um 2,8 °C geringer als die des Today-Elements. An sonnigen Tagen ist die Temperaturdifferenz an der Fassadenoberfläche von 5,1°C gemessen worden. Auf die Raumtemperatur gibt es eine signifikante Auswirkung von 2,5°C Differenz um 17:00 Uhr.

An bewölkten Tagen ist diese Temperaturdifferenz geringer und liegt bei 1,8°C am Mittag und Nachmittag.

Fazit:

Diese Temperaturdifferenz zeigt, dass das Tomorrow-Element weniger solare Strahlung an den Innenraum abgibt. Hier darf man jedoch nicht außer Betracht lassen, dass die Masse des Tomorrow-Elements doppelt so hoch ist wie die des Today-Elements.

Die Eigenverschattung des Tomorrow-Elements in der strahlungsintensiven Zeit von 12 bis 15 Uhr lässt hierbei, wie durch die Wärmebildkamera gezeigt, auch auf eine positive Auswirkung schließen.



[Abb. 10.6.2_5]

Oberflächentemperatur Vergleichstest
Tomorrow- und Today-Element
Temperaturdurchschnittswert Fassadeninnenoberfläche bei Bewölkung

10.6.3 Beleuchtungsstärke

Visueller Komfort

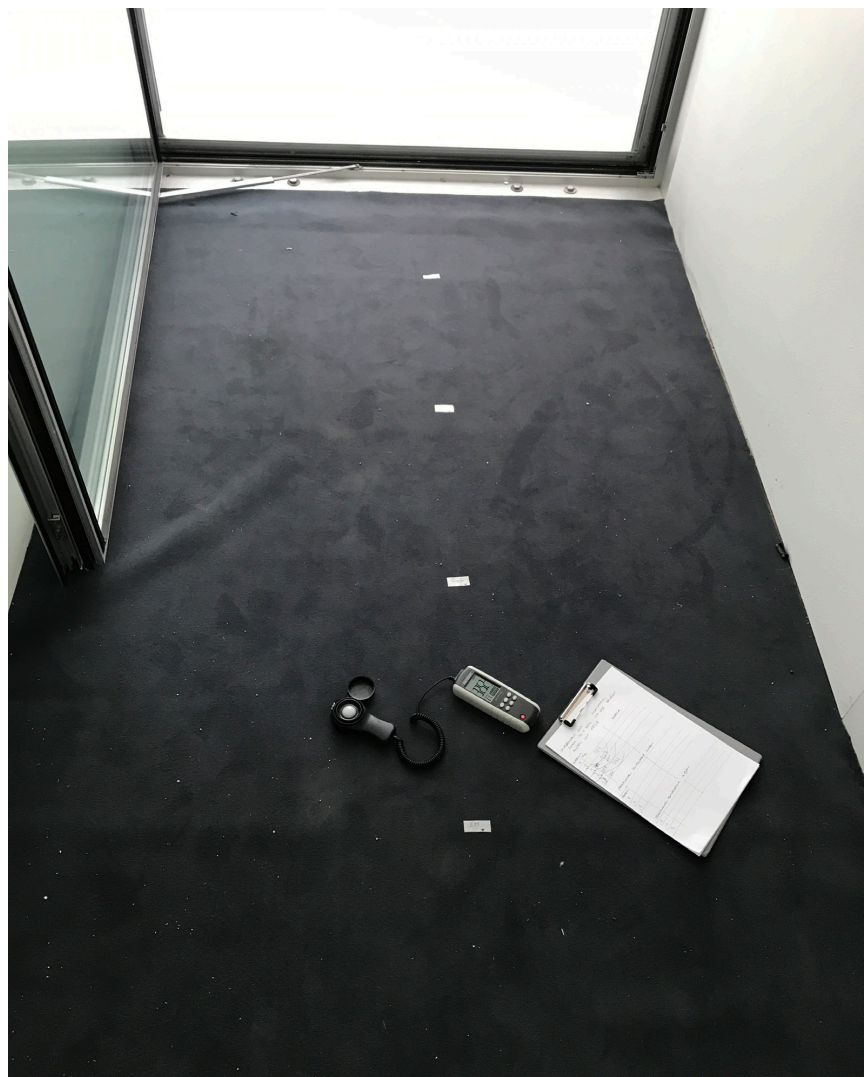
Durch eine gleichmäßige Belichtung des Innenraums soll ein visueller Komfort erreicht werden. Das ‚Tomorrow‘-Element ist trotz der Verwendung eines transparenten Materials transluzent. Dies bedeutet, dass Licht eindringen kann, man aber nicht hinaus schauen kann wie bei einer transparenten Verglasung – es handelt sich charakteristischerweise um eine „Milchglasscheibe“. Kennwerte für visuellen Komfort sind beispielsweise 300 lux Beleuchtungsstärke als Minimum für Computerarbeitsplätze, 500 lux für Arbeitsplätze mit normaler Bürotätigkeit. Obergrenze der Beleuchtungsstärke liegt bei ca. 4000 lux, dann spricht man von Blendung, die zu unterbinden ist. Der visuelle Komfort ist abhängig von vielen Parametern und unterliegt zudem einer subjektiven Wahrnehmung des einzelnen Nutzers.

Das ‚Today‘-Element, obwohl auch aus dem transparenten Material Polycarbonat gefertigt, ist ebenfalls nicht transparent. Es hat nach Herstellerangaben eine Lichttransmission von 41 %. Durch die Homogenität der Rodeca-Fassade ist der Lichttransmissionsgrad über das ganze Element gleichmäßig verteilt. Dies trifft auf das Tomorrow-Element nicht zu, da der Durchmesser und die innere Struktur

heterogen ausgebildet sind. Simulationen für eine solche Geometrie sind derzeit noch zu aufwendig.

Um realistische Ergebnisse zu erhalten, sind Messungen am Fassadenelement notwendig. Es werden an verschiedenen Mess-

punkten die Beleuchtungsstärke gemessen, diese sind in 50cm Schritten orthogonal zur Fassade auf dem Fußboden positioniert (Abb. unten). Die Ergebnisse dieser Untersuchung haben Modellcharakter und sollen das Potenzial für weitere Untersuchungen aufzeigen.



[Abb. 10.6.3_1]

Messpunkte im Innenraum zur Untersuchung der Beleuchtungsstärke

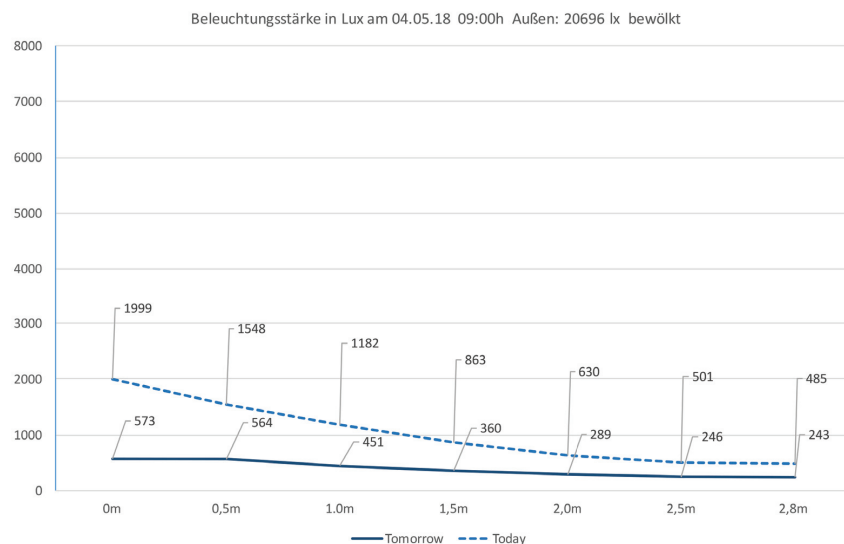
Messungen 9:00 Uhr

Messung 1

04.05.2018 09:00 Uhr

bewölkt

Solarstation TU München

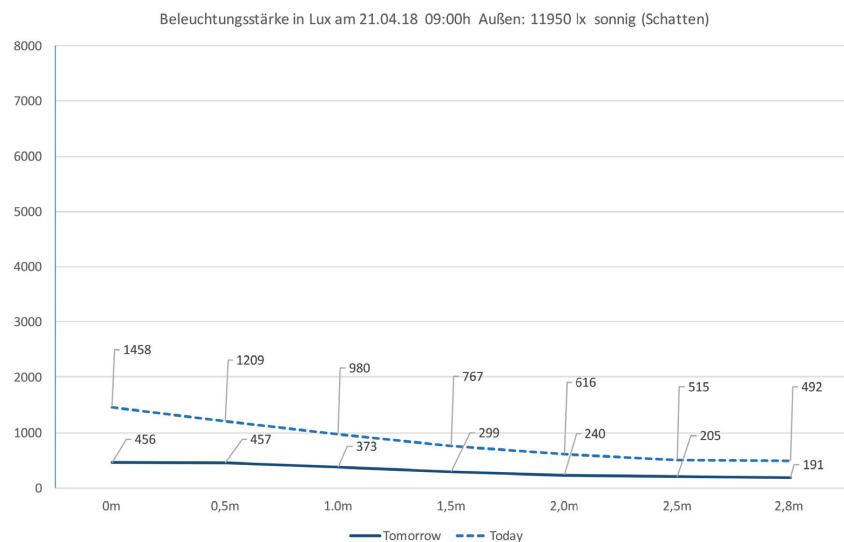


Messung 2

21.04.2018 09:00 Uhr

sonnig (Fassadenfläche liegt im Eigenschatten)

Solarstation TU München



Messaufbau der Untersuchung der Beleuchtungsstärke im Innenraum

Aufzeichnungszeitraum:

16.04. – 04.05.2018

Messungsintervall:

Morgens 9:00 Uhr

Mittags 13:00 Uhr

Abends 17:00 Uhr

Innenmessung:

Die Messpunkte zur Erfassung der Beleuchtungsstärke sind orthogonal in 0,5-m-Abständen mittig zur Fassade auf dem Boden angebracht.

Außenmessung:

Horizontal 1 m Abstand zur Fassade in 1 m Höhe

Messgerät:

Handmessgerät für Beleuchtungsstärke der Firma Voltcraft MS-200LED



[Abb. 10.6.3_2]

Messgerät für Beleuchtungsstärke:
Voltcraft MS-200 LED

[Abb. 10.6.3_3]

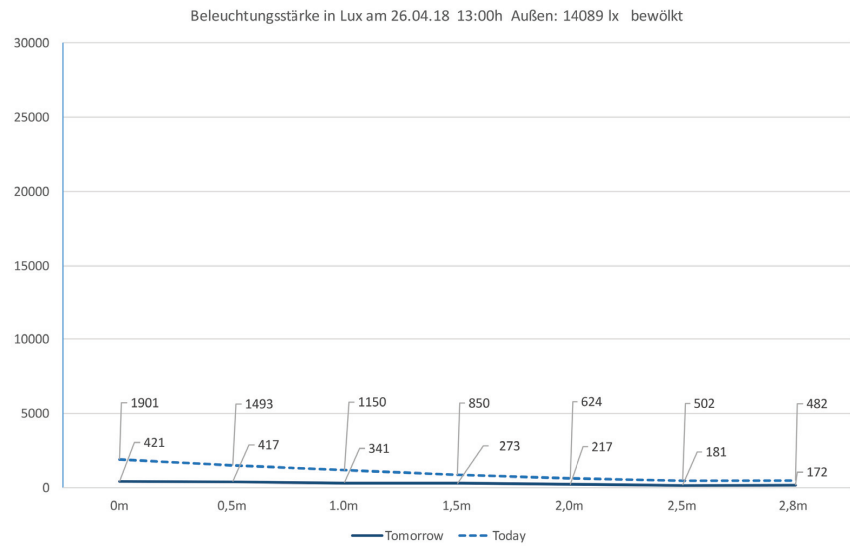
Oben: Beleuchtungsstärke Vergleichstest
Tomorrow- und Today-Element
09:00 Uhr bei Bewölkung

[Abb. 10.6.3_4]

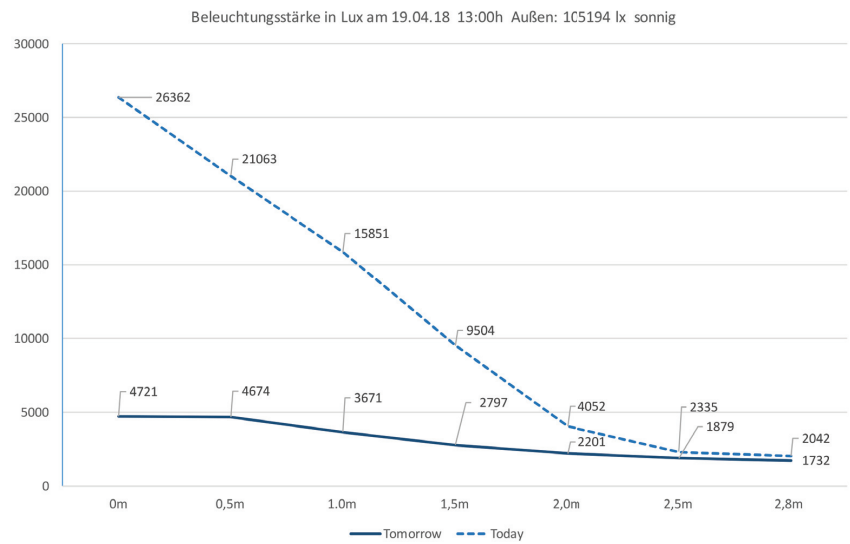
Unten: Beleuchtungsstärke Vergleichstest
Tomorrow- und Today-Element
09:00 Uhr bei Sonnenschein (Fassadenfläche liegt im Eigenschatten)

Messungen 13:00 Uhr

Messung 3
 26.04.2018 13:00 Uhr
 bewölkt
 Solarstation TU München



Messung 4
 19.04.2018 13:00 Uhr
 sonnig
 Solarstation TU München

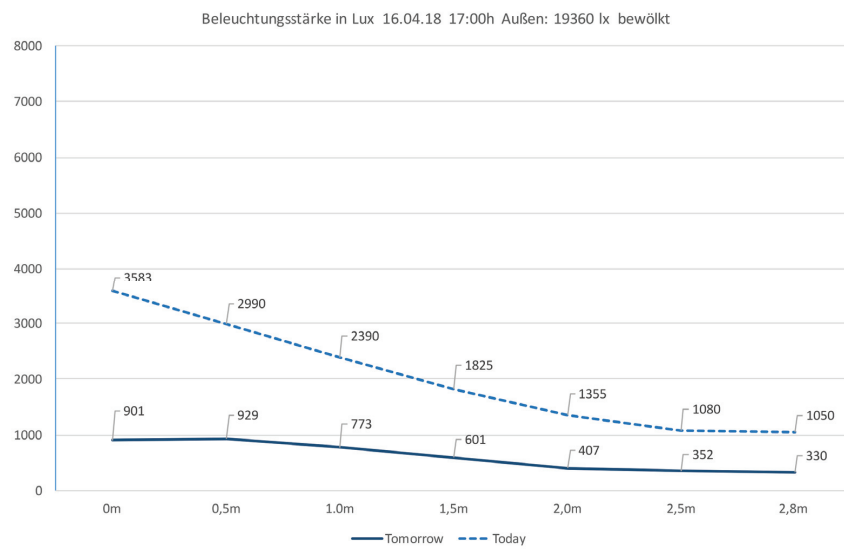


[Abb. 10.6.3_5]
 Oben: Beleuchtungsstärke Vergleichstest
 Tomorrow- und Today-Element
 13:00 Uhr bei Bewölkung

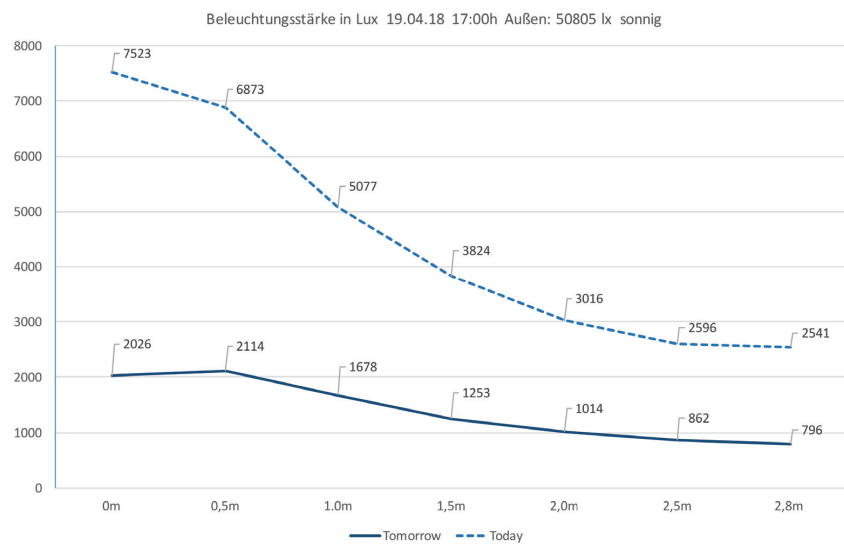
[Abb. 10.6.3_6]
 Unten: Beleuchtungsstärke Vergleichstest
 Tomorrow- und Today-Element
 13:00 Uhr bei Sonnenschein

Messungen 17:00 Uhr

Messung 5
 16.04.2018 17:00 Uhr
 bewölkt
 Solarstation TU München



Messung 6
 19.04.2018 17:00 Uhr
 sonnig
 Solarstation TU München



Ergebnis:

Die Untersuchungen zeigen, dass das Tomorrow-Element im Vergleich zum Today-Element weniger Tageslicht in den Innenraum eindringen lässt. Beim Vergleich des Tageslichtquotienten (10.6.4) ist dies auch deutlich sichtbar.

Fazit:

Das ‚Tomorrow‘-Element puffert extremen Lichteintrag im Vergleich zum Today-Element ab. Man erkennt auch an den Diagrammen, dass das ‚Tomorrow‘-Element den Raum gleichmäßiger ausleuchtet und hohe solare Einträge in den Innenraum verhindert. Bei den Messergebnissen 4 und 6 werden bei Sonnenschein unangenehme Belendungserscheinungen, welche ca. ab 5000 lux auftreten, beim ‚Today‘-Element weit überschritten. Die Werte befinden sich dagegen beim Tomorrow-Element im zulässigen bzw. Komfortbereich. Nachteilig beim ‚Tomorrow‘-Element ist geringe Beleuchtungsstärke bei Bewölkung, die Werte liegen unter 500 lx, ab 2m sogar unter 300 lx. Der Wert von 300 lx ist nach Arbeitsstättenrichtlinien ASR A3.4 für Computerarbeitsplätze zu gering und die Nutzung von Kunstlicht wird notwendig. (siehe Messungen 1, 2 und 3).

[Abb. 10.6.3_7]

Oben: Beleuchtungsstärke Vergleichstest Tomorrow- und Today-Element 17:00 Uhr bei Bewölkung

[Abb. 10.6.3_8]

Unten: Beleuchtungsstärke Vergleichstest Tomorrow- und Today-Element 17:00 Uhr bei Sonnenschein

10.6.4 Tageslichtquotient (TQ)

Definition: Der Tageslichtquotient (TQ) setzt das Niveau der inneren Beleuchtungsstärke in Relation zur äußeren horizontalen Beleuchtungsstärke in unverschatteter Lage.

Der Tageslichtquotient wird in Prozent ohne Einheit angegeben und generiert Werte, die unterschiedliche Systeme vergleichbar machen durch den Bezug auf die äußere Beleuchtungsstärke.

Nach DIN 5034 ist ein Mindest-Tageslichtquotient TQ von 0,75 % bis 1 % in Wohn- und Arbeitsräumen gefordert. [9] DIN 5034

Messeinstellung

Gemessen wird der Tageslichtkoeffizient bei diffuser Strahlung im Außenbereich (M1) und Innenbereich (M2) mit 1 m Abstand orthogonal zur Fassade und einer Höhe von 85 cm über der Oberkante des Fertigfußbodens.

Berechnung:

$$TQ = (E_p / E_a) * 100 (\%)$$

E_a Beleuchtungsstärke außen am 04.05.2018: $E_a = 20696 \text{ lx}$

E_p Beleuchtungsstärke innen:

Tomorrow-Element: $E_p = 370 \text{ lx}$

-> **TQ = 1,8 %**

Today-Element: $E_p = 1277 \text{ lx}$

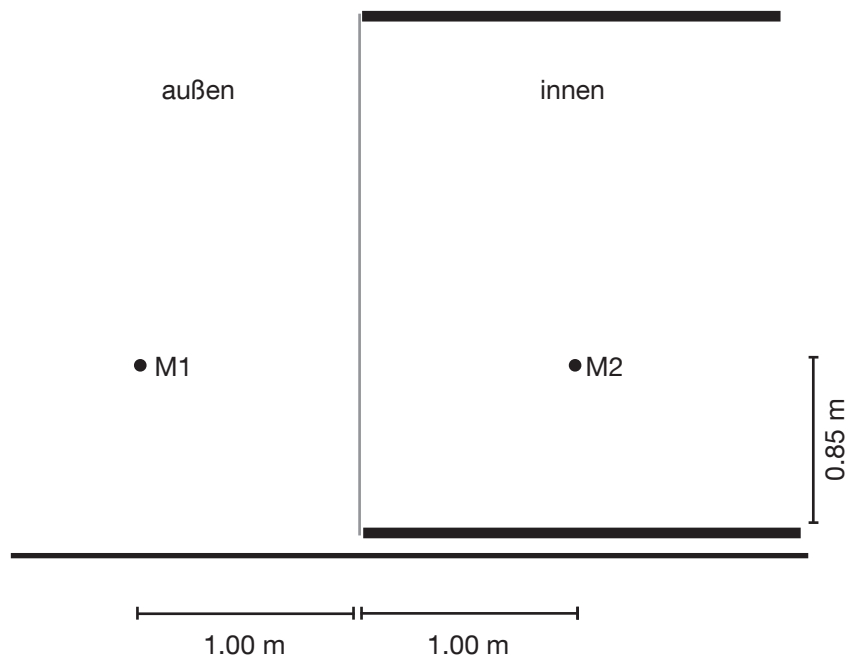
-> **TQ = 6,2 %**

[Abb. 10.6.4_1]

Oben: Tageslichtquotient Vergleichstest Tomorrow- und Today-Element 04.05.2018 Bewölkung außen 20696 lx

[Abb. 10.6.4_2]

Unten: Tageslichtquotient Vergleichstest Tomorrow- und Today-Element Position der Messpunkte innen und außen



Ergebnis:

Das Tomorrow-Element hat einen um zwei Drittel geringeren Tageslichtquotienten im Vergleich zum Today-Element. Das Ergebnis liegt über den Mindestanforderungen der DIN 5034.

Fazit:

Die Additive Fertigung ermöglicht die Herstellung von transluzenten Fassadenelementen mit ausreichendem Tageslichtquotienten. Die genaue Anpassung an die unterschiedlichen Anforderungen lässt sich über die Geometrie, die innere Struktur und den Durchmesser des Fassadenelementes einstellen.



[Abb. 10.6.4_2]

Tageslichtquotient Vergleichstest
Tomorrow- und Today-Element
Innenaufnahme am Tag der Messung 04.05.2018
Links: Tomorrow-Element, Rechts: Today-Element

10.7 Langzeittests auf der Solarstation

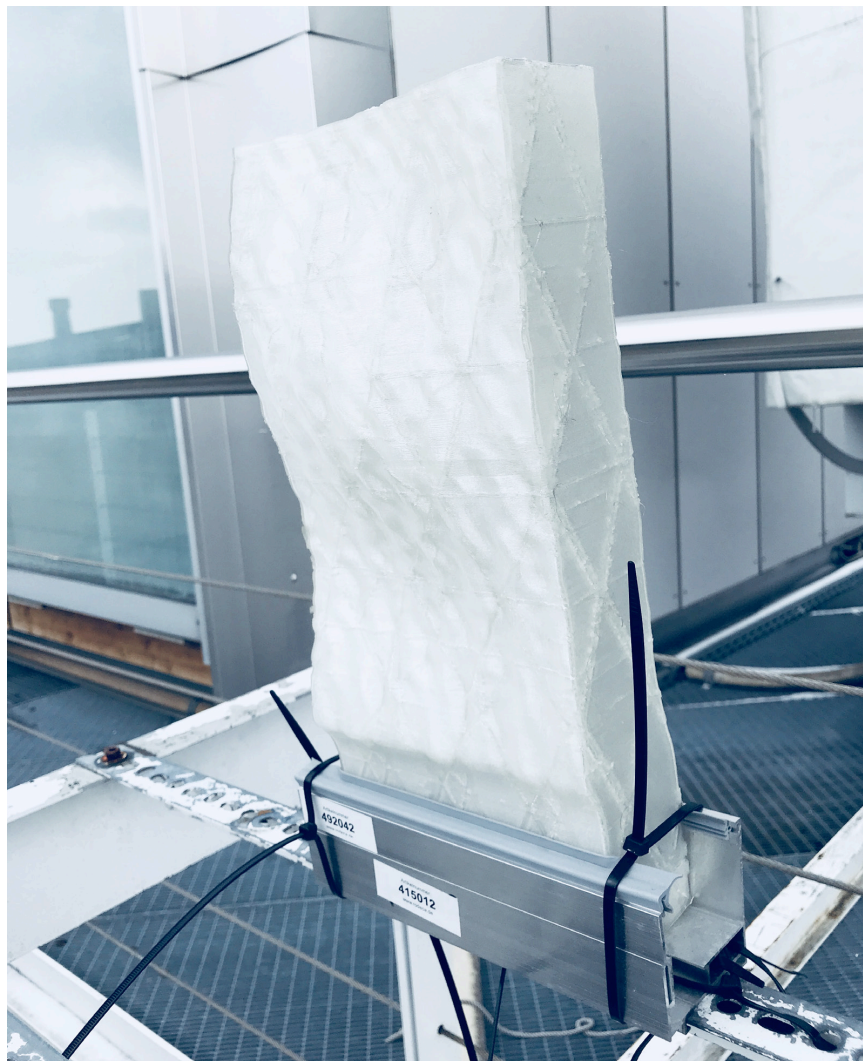
10.7.1 Witterungs- und UV-Beständigkeit PETG-Teststück

Um eine belastbare Einschätzung zur UV-Beständigkeit (Vergilbung) und Verschmutzung der Oberfläche zu bekommen, wurde ein Testkörper neun Monate auf der Solarstation der freien Witterung ausgesetzt.

Es wurden zum Vergleich zwei Testkörper in einem Produktionsprozess hergestellt. Der zweite Testkörper wurde in diesen neun Monaten Versuchszeit keiner UV-Strahlung ausgesetzt.

Messaufbau

Ort: Solarstation TU München,
Südausrichtung, voll bewittert
Dauer: 14.09.2017 - 12.06.2018



[Abb. 10.7.1_1]

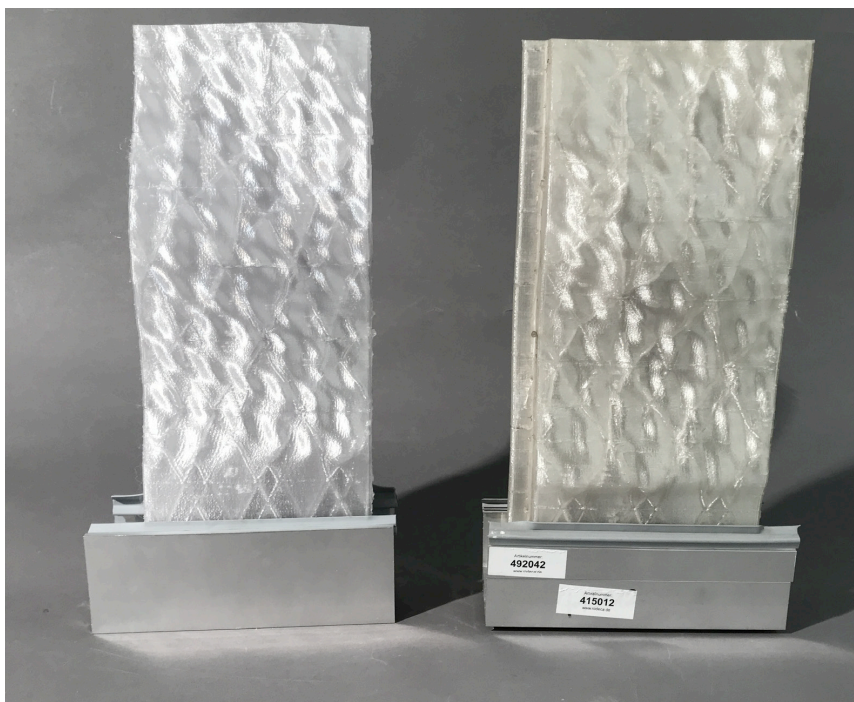
3-D-gedruckte Testkörper für Langzeittest
Installation auf der Solarstation TUM

Ergebnis:

Es ist bei Testkörper 1 auf grund der UV-Starhlung zu einer starken Vergilbung gekommen. Verschmutzungen jeglicher Art, wie Algen oder Flechtenbildung oder Rückstände von Staub sind nicht zu erkennen. Die Oberfläche ist immer noch stark reflektierend.

Fazit:

Um eine befriedigende Langzeitwirkung der 3-D-gedruckten Oberfläche des PETG zu erhalten ist ein UV-Schutz zu integrieren. Eine Untersuchung der Versprödung, die zu statischen Beeinträchtigungen führen kann, wurde mit diesem Test nicht abgedeckt.



[Abb. 10.7.1_2]

Oben: 3D-gedruckte Testkörper für Langzeittest
Vergleich der Vergilbung als Resultat der UV-Strahlung
Links: Testkörper unbewittert, Rechts: Testkörper bewittert

[Abb. 10.7.1_3]

Unten: Detail 3-D-gedruckter Testkörper Langzeittest
Vergleich der Verschmutzung
Links: Testkörper unbewittert, Rechts: Testkörper bewittert

10.7.2 Tauwasserbildung und Verschmutzung Tomorrow-Element

Messaufbau

Ort: Solarstation TU München,
SSW-Ausrichtung, voll bewittert

Dauer: 21.03.2018 - 04.04.2019

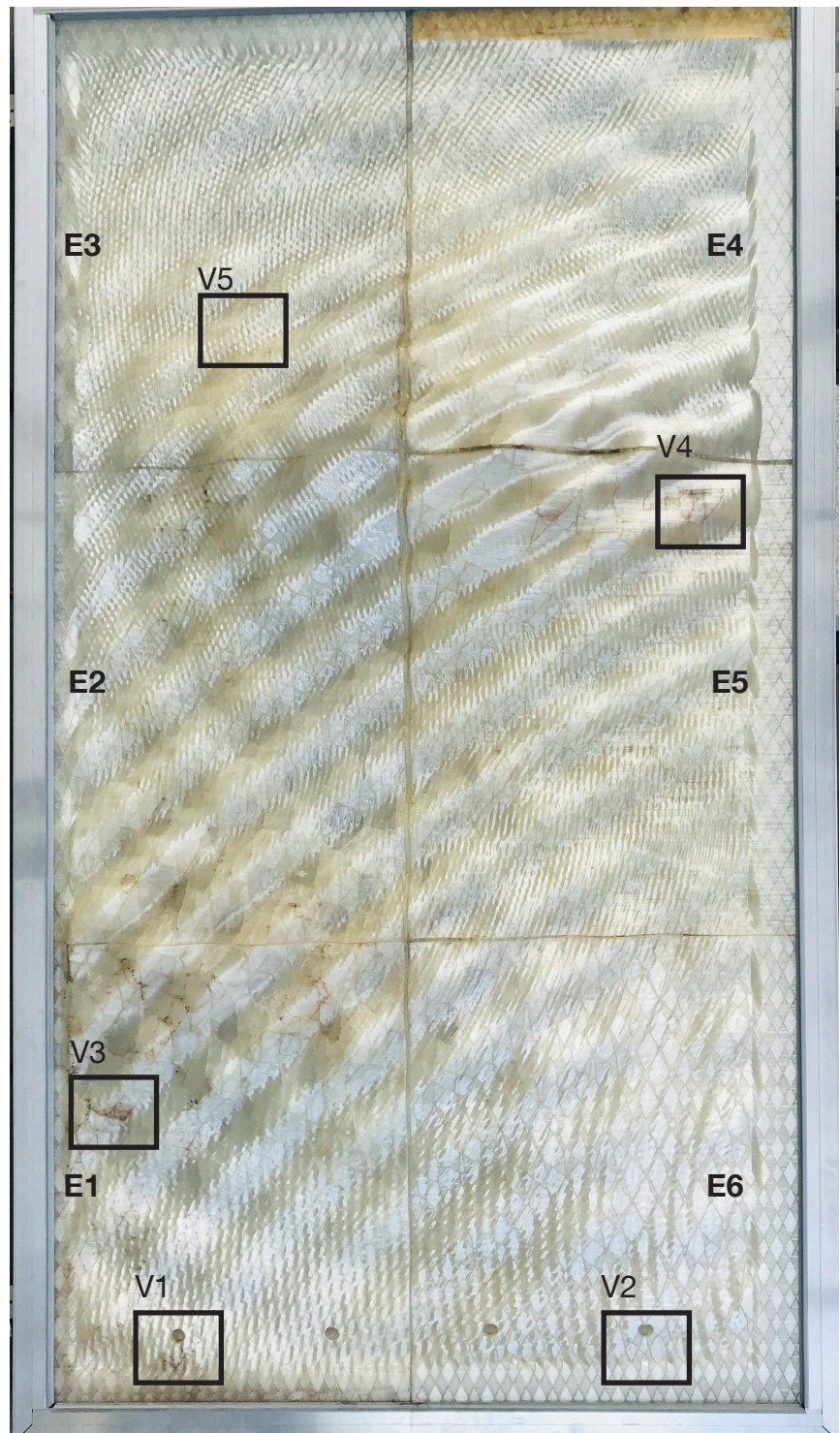
Es wurde bei beiden Testelementen (Today- und Tomorrow-Element) Tauwasserbildung in den frühen Morgenstunden beobachtet (Abb. 10.7.2_2). Polycarbonat und PETG sind beide diffusionsoffene Kunststoffe.

Das Kondensat kann beim ‚Today‘-Element durch die Anordnung der vertikalen Röhren der inneren Struktur nach unten ablaufen. Ein Abfließen des Kondensats ist durch die Zellstruktur des ‚Tomorrow‘-Elementes nicht möglich.

Zu erkennen ist, dass das Kondensat nur in den Zellen entsteht, die direkten Kontakt zur Außenfläche haben. Bei den innenliegenden Zellen ist kein Kondensat zu erkennen (Abb. 10.7.2_2).

Durch die ständige Feuchteentwicklung in den äußeren Zellen sind in Teilbereichen Verschmutzungen bzw. Algenbildungen zu erkennen von Einzelelement E1, E2 und E5 (Abb. 10.7.2_1).

Unklar ist jedoch, warum in manchen Zellen trotz Tauwasserausfalls keine Algenbildung und auch keine Verschmutzungen auftreten wie in Einzelelement E3, E4 und E6. Eine mögliche Antwort findet sich vielleicht in der Herstellungsqualität und Verarbeitungsumgebung. Eingeschlossene Staubteilchen oder Pollen usw. könnten bei Feuchteeinwirkung zur Algenbildung und Verschmutzung beitragen.

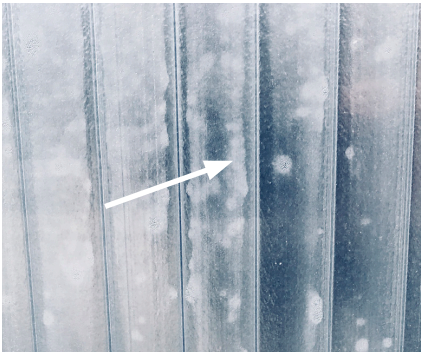


[Abb. 10.7.2_1]

Tomorrow-Element Ansicht außen

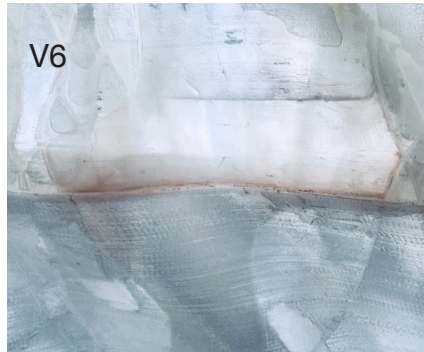
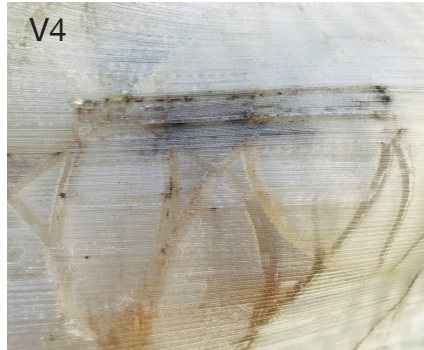
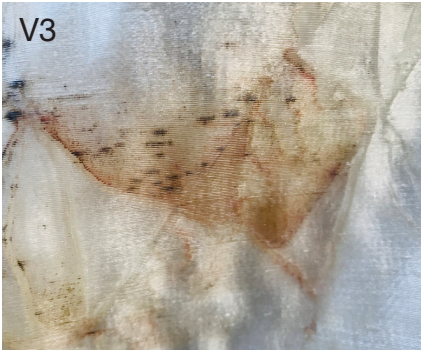
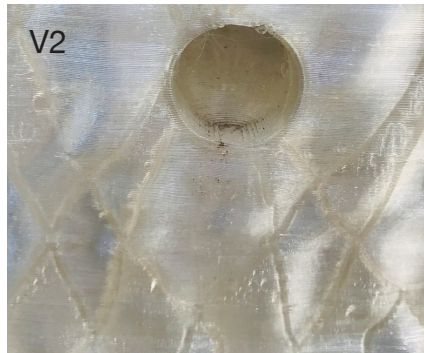
Verschmutzung der inneren Zellstruktur nach einem Jahr

(21.03.2018 - 04.04.2019)



Diese unterschiedlichen Verschmutzungszustände V1 - V6 (Abb. 10.7.2_3) kann man auf den Abbildungen links erkennen.

Die Tauwasserbildung hat jedoch nicht zu sichtbaren Beeinträchtigungen der 3D-gedruckten Oberfläche geführt. Es sind keine Risse oder Abplatzungen aufgetreten, die durch gefrierendes Tauwasser herbeigeführt wurden.



Fazit:

Diese Problematik der Tauwasserbildung kann vor allem in den Wintermonaten zu Problemen führen, wenn das Kondensat gefriert. Generell ist die innenliegende Verschmutzung durch Algenbildung sehr kritisch zu sehen, da eine Reinigung nicht möglich ist.

[Abb. 10.7.2_2]

Oben links: Today-Element Tauwasserbildung
 Oben rechts: Tauwasserbildung in den Zellen mit Kontaktfläche zum Außenbereich

[Abb. 10.7.2_3]

Unten: Tomorrow-Element Oberfläche außen
 V1, V3, V4: Verschmutzungen / Algenbildung durch Tauwasserbildung in den Zellen
 V2, V5: Keine Verschmutzung / Algenbildung trotz Tauwasserbildung
 V6: Innenansicht, sichtbare Algenbildung in der Zellstruktur

Evaluierungsmatrix der exemplarisch getesteten Eigenschaften aus Teil 3

Um einen Überblick der verschiedenen Untersuchungen und eine Evaluierung vornehmen zu können, zeigt diese Matrix die unterschiedlichen Versuchs- und Untersuchungsergebnisse auf.

Untersuchungen	Tomorrow Element	Today Element
Materialtests		
Zugversuch	+	nicht vergleichbar
Druckversuch	+	(-)*
Transparenz	-	(o)*
Bauteiltest		
Biegeversuch	+	(-)*
Up-Wert	-	+
g-Wert	+	-
Brandverhalten	+	++
Vergleichstests		
Eigenverschattung	+	-
Fassadenoberflächentemperatur	+	-
Beleuchtungsstärke	o	o
Tageslichtquotient	o	o
Langzeittests		
Verglibung (UV-Beständigkeit)	-	+
Tauwasserbildung	-	+

Legende (Bewertungsgrößen der Ergebnisse):

- + = gut
- o = befriedigend
- = mangelhaft

* Testkörper des Rodeca Lichtbauelements wurden in die gleiche Versuchseinrichtung eingelegt, die Testkörper erwiesen sich als zu flexibel, um die eingeleiteten Lasten aufzunehmen.

[Tab. 10.8_1]
Evaluierungsmatrix der Versuchs- und Untersuchungsergebnisse

Ergebnis:

1. Materialtests

Mechanische Eigenschaften

Das ‚Tomorrow‘-Element weist im Druckversuch gute statische Eigenschaften im Vergleich zum ‚Today‘-Element auf. Die Nachteile des schichtweisen Aufbaus durch die Additive Fertigung sind gering, denn die Bruchbilder orientieren sich nicht an den Schichten.

Transparenz

Bei beiden Elementen kann man keine transparenten Eigenschaften erkennen, sie sind beide tranluzent, wobei das ‚Today‘-Element eine höhere Lichtdurchlässigkeit aufweist.

2. Bauteiltests

Biegeversuch

Beim Biegeversuch weist das ‚Tomorrow‘-Element überraschend gute Werte auf, die sich durch die innere Zellstruktur und die zweifach gekrümmten Oberflächen erklären lassen.

Up-Wert

Der ermittelte Up-Wert (U-Wert nur für das Paneel) des ‚Tomorrow‘-Elements liegt bei 1,6 W/m²K und ist somit deutlich schlechter als das ‚Today‘-Element mit einem Wert von 0,71 - 0,77 W/m²K (Herstellerangabe). Dies hängt seitens des ‚Tomorrow‘-Elements mit den teilweise verhältnismäßig großen Zellen der inneren Struktur zusammen.

g-Wert

Der g-Wert (Energiedurchlassgrad) ist beim ‚Tomorrow‘-Element deutlich geringer, obwohl es sich bei beiden Ausführungen um einen transparenten Ausgangswerkstoff handelt. Dies

ist das Resultat der verschiedenen Produktionsmethoden, beim ‚Tomorrow‘-Element wird durch den schichtweisen Aufbau das Licht mehrfach gebrochen. Hier liegt der Wert je nach Einfallswinkel von 45 bis 60° bei ca. 20% und beim ‚Today‘-Element bei ca. 42%.

Brandverhalten

Das Brandverhalten beider Materialien ist ähnlich, das verwendete PETG des ‚Tomorrow‘-Elements weist eine leichtere Entflammbarkeit und Abtropfen auf, hat aber dennoch in der Brandprüfung nach DIN 4102 die Baustoffklasse B1 erreicht.

3. Vergleichstest

Eigenverschattung

Die Eigenverschattung des ‚Tomorrow‘-Elements führt zu einer geringeren Fassadenoberflächentemperatur innen und gleichzeitig zu einer geringeren Beleuchtungsstärke. Dies spiegelt sich auch im Tageslichtquotienten wieder.

Beleuchtungsstärke

Die Ergebnisse der Untersuchung der Beleuchtungsstärke im Innenraum haben Vor- und Nachteile bei beiden Elementen hervorgebracht. Das ‚Tomorrow‘-Element führt zu einer gleichmäßigeren Ausleuchtung des Innenraums, weist aber bei geringer Sonneneinstrahlung zu geringe Werte (unter 500 lx) nach ASR im Innenraum auf.

Gegenteilig verhalten sich die Werte des ‚Today‘-Elements, da es hier zu Blendung an sonnigen Tagen kommt, aber bei geringer Sonneneinstrahlung die Mindest-

werte der ASR eingehalten werden.

4. Langzeittests

UV-Beständigkeit / Tauwasserbildung

Das ‚Today‘-Element weist in der UV-Beständigkeit und in der Tauwasserableitung keine Probleme auf, hingegen befinden sich bei diesen beiden Punkten die Schwachstellen des ‚Tomorrow‘-Elementes.

Fazit:

Die exemplarischen Untersuchungen zeigen das Potenzial und die noch zu verbessernden Funktionsbereiche des ‚Tomorrow‘-Elements auf.

Im Bereich der mechanischen Eigenschaften, des Brandverhaltens, kann man zuversichtlich sein, geforderte Eigenschaften zu generieren. Die bauphysikalischen Eigenschaften lassen sich durch weitere Anpassungen in der Geometrie je nach Anforderung verbessern.

Die negativen Ergebnisse im Bereich der Langzeittests dieses ersten Prototyps lassen sich im Bereich der UV-Beständigkeit und der Tauwasserproblematik hinsichtlich der bereits gefunden Lösungen des ‚Today‘-Elements, als lösbar einstufen.

11. Fazit und Ausblick

11. Fazit und Ausblick

Die zentrale Fragestellung dieser Arbeit

„Kann durch den Einsatz der Additiven Fertigung eine funktionsintegrierte Gebäudehülle entwickelt werden?“

kann wie folgt beantwortet werden:

Fazit

Die Integration von verschiedenen Fassadefunktionen wie Sonnenschutz, Dämmung, Wind- und Eigenlastabtragung, Belüftung, Belichtung und akustischer Streuung war möglich und ließ sich sogar durch ein transparentes Material umsetzen.

Die Ergebnisse in der Umsetzung der einzelnen Funktionen sind unterschiedlich zu bewerten.

Positiv

Im Hinblick auf Wind- und Eigenlasten waren die Festigkeiten der additiv gefertigten Bauteile durch den FDM-Druckprozess speziell beim Biegeversuch besser als erwartet.

Die Eigenverschattung hat sich als machbar und effektiv erwiesen. Die Verringerung der Raumtemperatur und der Fassadenoberflächentemperatur innen im Sommer bei Sonnenschein ist darauf zurückzuführen.

Zufriedenstellend

Dämmeigenschaften und Belichtung haben die Annahmen bestätigt, weisen jedoch noch Verbesserungspotenzial auf.

Negativ

Die Herstellung von transparenten Flächen zur visuellen Verbindung zwischen Innen- und Außenbereich ist mit dieser Methode zum jetzigen Zeitpunkt, auch durch

Nachbearbeitungsprozesse, nicht möglich.

Die Bildung von Tauwasser ist bei diesem Fassadentyp nicht zu vermeiden und führt in der Zellvariante über längere Zeiträume zu Verschmutzung und Algenbildung. Hierfür müssen effektive Lösungen gefunden werden.

Die Funktionsbereiche der akustischen Streuung und natürlichen Belüftung konnten integriert aber in dieser Studie noch nicht untersucht werden.

Im allgemeinen zeigen die Untersuchungsergebnisse, dass sich die Erreichung der vier Komfortparameter für eine leistungsfähige Fassade – thermischer Komfort, akustischer Komfort, visueller Komfort und die Versorgung mit Frischluft – durch eine additiv gefertigte Gebäudehülle erreicht werden können.

Herstellung

Bei der Herstellung der Fassadenelemente ist, hinsichtlich Ausführungsqualität und Herstellungsdauer, die Problematik der ungleichmäßigen Materialeigenschaften und geringen Prozesssicherheit noch ein nicht zu unterschätzender Risikofaktor für die Prozesssicherheit.

Material

Der Wechsel von Polycarbonat

zu PETG hat sich als sinnvoll erwiesen, da sich somit die Verarbeitung bei der Herstellung vereinfacht hat. UV-Beständigkeit, Brandverhalten und Dampfdiffusionsoffenheit sind noch zu lösende Problembereiche.

FDM-Drucker

Die Nutzung des FDM-Delta Systems war für die Herstellung eines Prototyps ausreichend, ist aber für die weitere Entwicklung in dieser Ausführung nicht zielführend.

Architektonische Gestalt

Die Freiheit, die die Additive Fertigung bei der Entwicklung von neuen architektonischen Gestaltungsmöglichkeiten mit sich bringt, wurde hier exemplarisch aufgezeigt. Das gestalterische Potenzial ist trotz einiger Limitierungen nicht von der Hand zu weisen.

Methodik

Die eingesetzte Methodik hat sich als zielführend erwiesen und hat zu zufriedenstellenden Resultaten geführt, die als Grundlage für weitere Entwicklungen genutzt werden können.

Die zuvor aufgestellte Hypothese dieser Dissertationsschrift „Additiv gefertigte und funktionsintegrierte Gebäudehüllen machen, bei gleicher Leistungsfähigkeit, die technische Fassadenausrüstung überflüssig“ kann nach dieser Untersuchung noch

nicht für alle Funktionen bestätigt werden. Die Untersuchungsergebnisse legen aber den Schluss nahe, dass es möglich ist, den Einsatz von technischen Fassadenkomponenten zu reduzieren.

Es wurde bewiesen, dass durch die Additive Fertigung komplexe Funktionsgeometrien für die Fassadenanwendung herstellbar sind. Diese sind in einem Fertigungsschritt und mit einem Material umsetzbar. Dies bestätigt das vorhergesehene Potential für die Gebäudehülle.

Ausblick

Durch die Pressemitteilung der TUM wurde eine hohe mediale Sichtbarkeit dieses Forschungsprojekts - der 3D-gedruckten, transluzenten und multifunktionalen Gebäudehülle - erreicht. Es wurden zahlreiche Medienbeiträge u.a. von Fernsehreportagen auf arte xenius, Radiobeiträgen im Deutschlandfunk, in Fachzeitschriften wie Detail, Bauwelt und DBZ, in der Süddeutschen Zeitung und VDI und bekannten internationalen Web-Blogs wie 3D.Druck.com veröffentlicht bis hin zur Verleihung von Preisen, u.a. auf der weltgrößten Fachmesse für Additive Fertigung Formnext 2017 Purmundus Challenge der 2. Preis für innovative Anwendungsbeispiele. Begeistet wurde dies von zahlreichen Vorträgen an Universitäten, vor Verbänden und der Bauindustrie.

Deutsches Museum

Aufgrund der aufgeführten Sichtbarkeit hat sich das erste Anwendungsprojekt am Deutschen Museum in München ergeben: Eine temporäre Fassade für den Interimseingang.

Das Deutsche Museum München ist nach Ausstellungsfläche das größte Wissenschafts- und Technikmuseum der Welt. Jährlich wird das Museum von ca. 1,5 Millionen Menschen besucht und stellt rund 28.000 Objekte aus etwa 50 Bereichen der Naturwissenschaften und der Technik aus. In aktuellen

Wechselausstellungen wird das Zukunftspotenzial von Forschung, Innovation, Design und Technik gezeigt.

Das Museum befindet sich mitten in einer umfassenden Renovierung und sieht das Fassadenprojekt als Möglichkeit, Innovation, Technik, Forschung und Zeitgeist als Sinnbild für das Deutsche Museum zusammenzuführen und eine breite Öffentlichkeit zu erreichen.

Die 3D-gedruckte Fassade soll den Interimseingang zur Isar hin umhüllen. Der Interimseingang ist während der fünfjährigen Umbau-

phase der Haupteingang und liegt mit direkter Anbindung zur Isar an einer sehr attraktiven Stelle und ist weithin sichtbar.

Zahlreiche Sichtbezüge auf die Fassade gibt es bereits von mehreren Isarbrücken und ermöglichen so für eine hohe öffentliche Wahrnehmung. Die Fassade vereint Verschattung, Belichtung, formintegrierte Öffnungen und die Nutzung eines recyclebaren Kunststoffes.

Die Abmessungen der Fassade betragen ca. 55m Länge und 15m Höhe. Daraus ergeben sich 750m² Fassadenfläche mit einer

Masse von ca. 12 Tonnen. Diese Dimension ist eine weitere Herausforderung in der Herstellung und würde zu der derzeit weltgrößten 3D-gedruckten Konstruktion werden.

Im Januar 2019 hat die Stadtgestaltungskommission dem Bauvorhaben einstimmig zugestimmt. Für die Umsetzung ist eine Zustimmung im Einzelfall notwendig. Folgende Prüfungen wurden durchgeführt: Brandverhalten, Standsicherheit, UV-Beständigkeit, bauphysikalische Eigenschaften, Druckqualität, Druckdauer und Verformung.



[Abb. 11_1]

3D-gedruckte Fassade Interimseingang Deutsches Museum München

Blick von Corneliusbrücke

Fassadenentwurf: 3F Studio Visualisierung: nuur

Im April 2019 wurden die Fassadenelemente zur Erstellung des Gutachtens für die Zustimmung im Einzelfall getestet, u.a. wurden der Brandversuch Baustoffklasse B1 und Standsicherheitstest bestanden. Für den Standsicherheitstest wurde ein Fassadenausschnitt mit Unterkonstruktion mit den Maßen 3,80m Höhe und 1,80m Breite hergestellt. Durch dieses Projekt wurde die technische Machbarkeit bewiesen und der Weg für weitere Projekte und Entwicklungen geöffnet. Des Weiteren hat sich aus diesem Forschungsprojekt eine Ausgründung der TU München für zukünftige

Umsetzungen von 3D-gedruckter Architektur ergeben.

3F Studio

3F Studio, gegründet von Moritz Mungenast, Oliver Tessin und Luc Morroni, ist ein Spin-off der TU München und Studio für innovative 3D-gedruckte Architektur und Gestaltung, mit dem Ziel neue Technologien sinnvoll für die zukünftigen Herausforderungen im Bauwesen einzusetzen. Dies beinhaltet den Einsatz von neuen, wiederverwertbaren Materialien und die Schließung der ‚Digitalen Kette‘ vom Design zum Produkt.

Zukünftige Herausforderungen

Um einen Beitrag zur Umsetzung der Agenda 2030 zu leisten, ist die weitere Entwicklung stark von der Material- und Prozessentwicklung abhängig.

Herstellungsdauer und Materialeigenschaften, wie Langlebigkeit und Brandverhalten, sind essentielle Einflussgrößen bei der Entwicklung eines marktfähigen Bauproduktes.

Die Planungswerkzeuge sind ebenfalls weiter zu entwickeln. Die Simulation von komplexen Funktionsgeometrien und deren Einbindung in funktionsintegrierte Fassaden wird sich anfänglich nur über Untersuchungen an wirklichen Modellen umsetzen lassen, um Basisdaten zu generieren, die dann wiederum die zukünftige Simulation der gewünschten Funktionen zulassen.

Dies ist notwendig um diese Art der Fassadenplanung und Ausführung von ‚Design to Product‘ in vollem Umfang und effektiv nutzen zu können.



[Abb. 11_2]

3D-gedruckte Testfassade Interimseingang Deutsches Museum München
Standsicherheitstest IFT Rosenheim
Fassadenentwurf: 3F Studio

**12. Anhang: Literatur- und
Abbildungsverzeichnis**

Literaturverzeichnis / Literaturquellen

Literaturverzeichnis

[1] (UN – United Nations Agenda 2030 for Sustainable Development 2015: Paragraph 28)

Titel: Transforming our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development.

Autor: UN – United Nations 2015

[2] (Henke 2016 : 12)

Titel: Additive Baufertigung durch Extrusion von Holzleichtbeton

Autor: Klaudius Henke

Verlag: TUM, 2016 (Dissertation)

[3] (Dinge Drucken 2014 : 10-14)

Titel: Dinge Drucken: Wie 3D-Drucken das Design verändert

Autoren: Claire Warnier, Dries Verbruggen, Sven Ehmann, Robert Klanten,

Verlag: Gestalten, Berlin 2014

ISBN 978-3-89955-529-5 (Buch)

[4] (Galjaard 2015 : 9)

Titel: Optimizing Structural Building Elements in Metal by Using Additive Manufacturing

Autoren: Salomé Galjaard, Sander Hofman, Neil Perry, S. Ren

Verlag: Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)

Symposium 2015, Amsterdam

Future Visions (Paper)

[5.1] (Müller; Vogel 1984 : 15)

Titel: dtv-Atlas zur Baukunst

Autoren: Müller, Werner; Vogel, Gunther. dtv-Atlas zur Baukunst, Band 1, 4. Auflage München: 1984, S. 15 (Buch)

[5.2] (Lang 2001 : 29 - 30)

Titel: Im Detail Gebäudehüllen.

Konzepte-Schichten-Material.

Hrsg.: Schittich, Christian;

Autor: Lang, Werner

Verlag: Birkhäuser, Edition Detail, 2001

ISBN: 978-3-7643-6464-5 (Buch)

[5.3] (Strauss 2015 : 95 - 96)

Titel: AM Envelope - the potencial of Additive Manufacturing for facade construction

Autor: Holger Strauss

Verlag: TU Delft, 2013 (Dissertation)

[6] (Wikipedia, Wasserwelle, Klassifikation nach Munk)

Titel: Origin and generation of waves

Autor: Walter H. Munk

Proceedings 1st Int. Conference on Coastal Engineering, Long Beach, California, 1950

[7] (Wikipedia, Wärmedurchgangskoeffizient) <https://de.wikipedia.org/wiki/Wärmedurchgangskoeffizient>

[8] (Wikipedia, Energiedurchlassgrad) <https://de.wikipedia.org/wiki/Energiedurchlassgrad>

[9] DIN 5034: „Tageslicht in Innenräumen“

[10] (Mungenast 2017 : 308 - 316)

Titel: 3d-Printed Low-tech Future Facades, PowerSkin 2017 Publication Proceedings

Autor: Mungenast, Moritz

Konferenz: Munich Powerskin Conference 01/2017

Verlag: TU Delft Open TU Delft / Faculty of Architecture and the Built Environment ISBN 978-94-92516-29-9 (Conference paper)

[11] (Mungenast 2016 : 19 - 49)

Titel: 3D Printed Envelope

Hrsg., Autor: Mungenast, Moritz

Verlag: TU München AR

ISBN: 978-3-941370-72-2 (Buch)

[12] (Sigmund 2017 : 79)

Titel: Fluid Morphology - Lowtech-Fassade aus dem 3D Drucker, Detail Research Building the Future 12/2017

Autor: Sigmund, Bettina

Verlag: Detail Business Information GmbH ISSN 0011-9571/B 2772

(Artikel Fachzeitschrift)

Literaturquellen

Titel: AM Envelope - the potencial of Additive Manufacturing for facade construction

Autor: Holger Strauss

Verlag: TU Delft, 2013 (Dissertation)

Titel: Biologisches Design Systematischer Katalog für bionisches Gestalten

Autoren: Nachtigall, Werner

Verlag: Springer, Berlin, 2005

ISBN 354022789X (Buch)

Titel: Das große Buch der Bionik

- Neue Technologien nach dem

Vorbild der Natur

Autoren: Werner Nachtigall, Kurt G.

Blüchel

Verlag: DVA, 2000

ISBN: 3-421-05379-0 (Buch)

Titel: Die dritte industrielle Revolution

Autor: Jeremy Rifkin

Verlag: Campus, Frankfurt am Main, 2011

ISBN: 978-3-593-39452-7 (Buch)

Titel: Dinge Drucken - Wie 3D-Drucken

das Design verändert

Autoren: Claire Warnier, Dries

Verbruggen, Sven Ehmann, Robert

Klanten,

Verlag: Gestalten, Berlin 2014

ISBN 978-3-89955-529-5 (Buch)

Titel: Erfindungen der Natur

Autoren: Cerman, Zdenek; Barthlott,

Wilhelm; Nieder, Jürgen

Verlag: Rowohlt Tb., Oktober 2005

ISBN 3499620243 (Buch)

Titel: Fabricated: The New World of

3D Printing

Autoren: Hod Lipson, Melba Kurman

Verlag: John Wiley & Sons, Indiana-

polis 2013

ISBN-13: 978-1118350638 (Buch)

Titel: Fassaden Atlas

Autoren: Thomas Herzog, Roland Krippner, Werner Lang
 Verlag: Birkhäuser 2004
 ISBN-10: 3764370319 (Buch)
 Titel: form follows nature
 Autoren: Finsterwalder, Rudolf (Hrsg.)
 Verlag: Springer
 ISBN: 978-3-7091-0855-0 (Buch)

Titel: Intelligent Skins
 Autoren: M. Wigginton, J. Harris
 Verlag: Elsevier LTD, Oxford
 ISBN-10: 0750648473 (Buch)

Titel: Manufacturing the Bespoke: Making and Prototyping Architecture
 Herausgeber: Bob Sheil
 Verlag: John Wiley & Sons, Indianapolis 2012
 ISBN-13: 978-0470665824 (Buch)

Titel: Materialrevolution - Nachhaltige und multifunktionale Materialien für Design und Architektur
 Autoren: Peters, Sascha
 Verlag: Birkhäuser Architektur 2011
 ISBN-13: 9783034605755 (Buch)

Titel: Patente der Natur
 Autoren: Greguss, Ferenc
 Verlag: Quelle & Meyer (Buch)

Titel: Print Shift
 Autoren: Marcus Flair, Claire Barrett, Ben Hobson, Emilie Chalcraft, Paul Buck, Rose Etherington, Louise Critchlow, Ellen Himelfarb, Joe Madden
 Verlag: Dezeen, London 2013 (Print-on-demand)

Titel: 3D Printing: The Next Industrial Revolution
 Autor: Christopher Barnatt
 Verlag: ExplainingTheFuture, 2013
 ISBN-10: 1-484-18176-X (Buch)

Titel: Struktur und Funktion biologischer Membranen
 Autoren: W. H. Evans und John M. Graham von Thieme
 Verlag: Broschert, Stuttgart, 1991 (Buch)

Titel: Towards the Living envelope - Biomimetics for building envelope adaptation
 Autor: Lidia Badarnah Kadri
 Verlag: TU Delft, 2012 (Dissertation)

Titel: Von Grashalmen und Hochhäusern - Mechanische Schöpfungen in Natur und Technik
 Autoren: Vogel, Steven
 Verlag: Wiley-VCH Verl. Weinheim, 2000
 ISBN 3-527-40303-5 (Buch)

Titel: Digital Composites: Robotic 3D-Printing of Continuous Carbon Fiber-Reinforced Plastics for Functionally-Graded Building Components
 Autoren: Kwon, Hyunchul; Eichenhofer, Martin; Kyttas, Thodoris; Dillenburg, Benjamin.
 In: Robotic Fabrication in Architecture, Art, and Design (Rob|Arch 2018), edited by Jan Willmann, Philippe Block, Marco Hutter, Kendra Byrne, and Tim Schork,
 Verlag: Springer, Cham. 2018 (Paper)

Titel: Ceramic 3D printing: The future of brick architecture
 Autoren: Cruz, P.J.S.; Knaack, Ulrich; Figueiredo, B.; De Witte, Dennis
 In: ASS Annual Symposium 2017 - Hamburg, Germany, 25 Sep 2017 - 28 Sep 2017, Hamburg, Germany. 2017 (Konferenzveröffentlichung)

Titel: Development and prototyping of an integrated 3D-printed façade for thermal regulation in complex geometries
 Autoren: Sarakinioti, M. V.; Konstantinou, Thaleia; Turrin, Michela; Tenpierik, Martin; Loonen, R. C. G. M.; de Klijn-Chevalerias, M. L.; Knaack, Ulrich

In: Journal of Facade Design and Engineering, 6 (2) S. 29-40. [Artikel], 2018 (Journal)

Titel: Im Detail Gebäudehüllen. Konzepte-Schichten-Material.

Hrsg.: Schittich, Christian;
 Verlag: Birkhäuser, Edition Detail, 2000
 ISBN-13: 978-3-7643-6464-9 (Buch)
 Titel: Energie Atlas. Autoren: Hegger, Manfred; Fuchs, Matthias; Stark, Thomas; Zeumer, Martin;
 Verlag: Birkhäuser, 2007
 ISBN: 978-3-7643-3855 (Buch)

Titel: Atlas Kunststoffe + Membranen.
 Autoren: Knippers, Jan; Cremers, Jan; Gabler, Markus; Lienhard, Julian;
 Verlag: Birkhäuser, Edition Detail, 2010
 ISBN: 978-3-920034-41-6 (Buch)

Titel: 3d-Printed Low-tech Future Facades - Development of 3d-printed Functional-Geometries for Building Envelopes, PowerSkin 2017 Publication Proceedings
 Autor: Moritz Mungenast
 Konferenz: Munich Powerskin Conference 01/2017
 Verlag: TU Delft Open TU Delft / Faculty of Architecture and the Built Environment ISBN 978-94-92516-29-9 (Conference paper)

Abbildungsverzeichnis

Sofern bei den Abbildungen und Tabellen keine anderen Quellen genannt sind, liegen die Urheberschaft und alle Rechte an den Abbildungen beim Autor. Hier werden nur die Abbildungen aufgeführt deren Urheberschaft nicht beim Autor liegen.

[Abb. 2.2_1]
 Fassadenkontenprofil NematoxII-2015, Holger Strauss
 (Foto: Strauss)

[Abb. 2.2_2]
 3D-Drucker-Farm FIT AG
 (Foto: FIT AG)

[Abb. 3.1_1]
 Prinzip der Additiven Fertigung (Abbildung: Henke 2017)

[Abb. 3.1_2]
 Prinzip der Auflösung (Abbildung: Henke 2017)

[Abb. 3.3_4]

Abbildungsverzeichnis

- Großformat Powder-Inkjet Drucker VX4000 Firma Voxeljet (Abb. Voxeljet) [Abb. 4.1_1]
- 2000 Forschungsaktivitäten im Bereich der Additiven Fertigung im Bauwesen (Abbildung: Henke, 2016) [Abb. 4.1_2]
- 2010 Forschungsaktivitäten im Bereich der Additiven Fertigung im Bauwesen (Abbildung: Henke, 2016) [Abb. 4.1_3]
- 2017 Forschungsaktivitäten im Bereich der Additiven Fertigung im Bauwesen
- Karte auf Grundlage von Aderer (2017), neu gezeichnet und ergänzt von K. Henke, Stand April 2017
- Aderer M., (2017): Additive Fertigung im Bauwesen - Aktuelle Projekte. Nicht veröffentlichte Bachelor's Thesis, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion (betreut von Dr. Klaudius Henke und Daniel Talke M.Sc.), TU München (Abbildung: Aderer 2017, Henke 2017) [Abb. 4.1_4]
- Matrix Anzahl der Forschungsaktivitäten Material / AM-Prozess (Henke 2018) [Abb. 4.1.1_1]
- Kräfteverlauf
- Links: Standard-Knoten
- Mitte/Rechts: Topologieoptimierter Knoten, 2015, Arup, Salome Galjaard (Abbildung: Arup, Galjaard) [Abb. 4.1.1_2]
- Topologieoptimierung eines konstruktiven Knotenpunktes
- Links: Standard aus geschweißten Flachstählen
- Mitte/Rechts: Additiv-gefertigt 2015, Arup, Salome Galjaard (Foto: Arup, Davidfotografie) [Abb. 4.1.1_3]
- Additive gefertigter Knoten mit 75% Gewichtsreduzierung 2015, Arup, Salome Galjaard (Foto: Arup, Davidfotografie) [Abb. 4.1.1_6]
- 3D-gedruckte Fertigteile für Betonwände und Dächer der chinesischen Firma Winsun (Foto: WinSun) [Abb. 4.1.1_7]
- Testgebäude aus 3-D-gedruckten Fertigteilen der Firma Winsun (Foto: WinSun) [Abb. 4.1.1_8]
- „5 story building“ in China, (Foto: WinSun) [Abb. 4.1.1_9]
- „3D-Printed House“ in Milan, 2018, Arup (Foto: Arup) [Abb. 4.2_0]
- „3D-printed concrete mansion“ in China, (Foto: WinSun) [Abb. 4.2_1]
- Electrical Skin ETH Zürich (Abb.: Kwon/ ETH Zürich) [Abb. 4.2_2]
- „Chaise Long“ Digital composites, Carbon Fibre-Reinforced Plastics ETH Zürich (Foto: Kwon/ETH Zürich) [Abb. 4.2_3]
- Brick 2.0 ISDM TU Darmstadt (Foto: De Witte) [Abb. 4.2_4]
- „Sponge 3D“ TU Delft (Foto: Sarkinioti) [Abb. 5.2_1]
- Fassadenentwicklung (Abbildung: Strauss 2015) [Abb. 5.3_1]
- Einflussparameter Fassadenfunktionen (Abbildung: Klein 2014) [Abb. 5.4_1]
- Bürogebäude One Airport Square, Accra Ghana, Mario Cucinella Architects, 2015 (Foto: MCA)
- Teil 1: Die aufgeführten Abbildungen sind im Rahmen der Lehrveranstaltung „3D textile“ SS 2015 und „3D envelope“ WS 2015/16 an der TU München, Professur für Entwerfen und Gebäudehülle unter der Leitung von Moritz Mungenast entstanden. Die Lehrveranstaltung wurde von Moritz Mungenast entwickelt und umgesetzt. [Abb. 8.3_U1_3]
- 3D-gedruckte Modelle (FDM) mit gleicher Masse für Vergleichstest der Tragfähigkeit (Foto: Morroni / Giannitsopoulos) [Abb. 8.3_U1_4]
- 3D-gedruckte Modelle (FDM). (Foto: Morroni / Giannitsopoulos) [Abb. 8.3_U2_4]
- 3D-gedrucktes Modell (3DP). Darstellung der einzelnen Kanäle. Gleicher Lichter Durchmesser und gleiche Wandstärke des Kanals (Foto: Kynchalla) [Abb. 8.3_U2_5]
- 3D-gedrucktes Modell (3DP). Darstellung der verschiedenen Parameter der einzelnen Kanäle. (Foto: Kynchalla) [Abb. 8.3_U2_7] + [Abb. S. 56]
- 3D-gedrucktes Modell (3DP). Ausschnitt der Wandgeometrie. Sichtbar sind die unterschiedlichen Ausführungen der Kanalgeometrie. Verschiedene Parameter, Wandstärke und Durchmesser (Foto: Kynchalla) [Abb. 8.3_U4_4]
- 3D-gedrucktes Modell (FDM). Modell zur Analyse der auxetischen Geometrie und deren Weiterentwicklung Links: Ausgangsgeometrie ohne Krafteinwirkung Rechts: Ausdehnung der Geometrie bei Zugbelastung (Foto: Baumann) [Abb. 8.3_U4_5]
- 3D Modell, Ansicht der Gebäudehülle mit Schindlen und der auxetischen Bewegungsgeometrie (Abbildung: Baumann) [Abb. 8.3_U5_2]
- Biochemischer Bewegungsablauf der Venusfalle
- Links: Geöffneter Zustand, Längenausdehnung auf der Innenseite
- Rechts: Geschlossener Zustand nach Aktivierung des biochemischen Prozesses ist die Längenausdehnung der Außenseite höher, dadurch schließt sich die Geometrie (Abbildung: Terezof) [Abb. 8.3_U5_3]
- 3D-gedrucktes Modell (FDM). Modell zur Analyse der Vorspannungs-Geometrie und der Aktuatorenkammer (Foto: Terezof)

[Abb. 8.3_U5_4]

3D-gedrucktes Modell (FDM). Mit Druckluft wird die Bewegung reguliert (Foto: Terezof)

[Abb. 8.3_U6_7]

3D-Modell Ansicht der geschlossen und geöffneten Elemente (Abbildung: Rieke / Peter)

[Abb. 9.1.3_1]

Solarstation TUM

(Foto: TUM, Professur für Entwerfen und Gebäudehülle)

[Abb. 9.1.4_1]

Grundriss Solarstation TUM Standort (Abbildung: TUM, Professur für Entwerfen und Gebäudehülle)

Teil 2: Die aufgeführten Abbildungen sind im Rahmen der Lehrveranstaltung ‚3D-printed envelope‘ WS 2016/17 an der TU München, Professur für Entwerfen und Gebäudehülle unter der Leitung von Moritz Mungenast entstanden.

Die Lehrveranstaltung wurde von Moritz Mungenast entwickelt und umgesetzt.

[Abb. 9.4.3_1]

Fertigung der 3-D-gedruckten Modelle M 1:10 FDM-Drucker: Ultimaker Gestaltungskonzept Leaf

(Foto: Morroni)

[Abb. 9.5_4] - [Abb. 9.5.2_2]

[Abb. 9.5.2_7] - [Abb. 9.8.2_2]

(Abbildungen: Blum / Gutheil / Khuraskina / Morroni, TUM, Professur für Entwerfen und Gebäudehülle)

[Abb. 10.2.3_1]

Ansicht des 3D-Modells. Segmentierung in 6 Fassadenteilelemente (Abbildung: Morroni)

[Abb. 10.2.3_2]

3D-Modelle der STL-Dateien des 3D-CAD-Modells der 6 Fassadenteilelemente

(Abbildung: Morroni)

[Abb. 10.3.1_1] - [Abb. 10.3.1_19]

(Fotos: TUM, Professur für Entwerfen und Gebäudehülle, Muhr / Schneider)

[Abb. 10.3.2_15] - [Abb. 10.3.2_16]

(Fotos: TUM, Heddergott)

[Abb. 10.5.1_1]

3D-Modell von Testkörper für 3-Punkt-Biegeversuch

Druckdatei Symplyfy (Screenshot)

(Abbildung: Morroni)

[Abb. 11_1]

3D-gedruckte Fassade Interimseingang Deutsches Museum München

Fassadenentwurf: 3F Studio

Gebäudeplanung Schmidt Schickentanz und Partner / David Wolfertstätter Architektur

(Visualisierung: nuur)

[Abb. Cover, S. 90 u. S. 134]

Fluid Morphology

(Foto: TUM, Heddergott)

Lehrveranstaltungen

Die in Teil 1 ‚Funktionsgeometrien‘ dieser Dissertationschrift aufgeführten Studien sind im Rahmen der Lehrveranstaltung ‚3D textile‘ SS 2015 und ‚3D envelope‘ WS 2015/16 an der TU München, Professur für Entwerfen und Gebäudehülle unter der Leitung von Moritz Mungenast entstanden.

Die Lehrveranstaltung wurde von Moritz Mungenast entwickelt und hauptverantwortlich umgesetzt.

‚3D textile‘:

Studierende: Kynchalla Bruno, Bauermann Dominik

‚3D envelope‘ WS 2015/16

Korrekturassistent: Max Langwieder
Studierende: Rieke Moritz, Peter Maximilian, Giannitsopoulos Elena, Morroni Luc, Strelchenko Irina, Chebotarenko Maria, Terezof Iv, Buonanno Diego, Pojero Tommaso

Die in Teil 2 ‚Funktionsintegration‘ dieser Dissertationschrift aufgeführten Studien sind im Rahmen der Lehrveranstaltung ‚3D-printed envelope‘ WS 2016/17 an der TU München, Professur für Entwerfen und Gebäudehülle unter der Leitung von Moritz Mungenast entstanden.

Die Lehrveranstaltung wurde von Moritz Mungenast entwickelt und hauptverantwortlich umgesetzt.

Korrekturassistent: Oliver Tessin

Studierende: Blum Viktoria, Gutheil Tobias, Khuraskina Olga, Morroni Luc

Messungen

Die in Teil 3 ‚Dokumentation der Herstellung eines Prototyps und dessen experimentelle Untersuchung der optischen, thermischen und statischen Eigenschaften‘ dieser Dissertationschrift aufgeführten Untersuchungen zu Zug-, Druck-, und Biegefestigkeit sind an der TU München, Professur für Holzbau und Konstruktion durch Herrn Michael Merk durchgeführt worden.

Die U/g-Wert Ermittlung wurde durch das Prüfinstitut IFT Rosenheim erstellt.

Der Nachweis des Brandverhaltens nach DIN 4102-1:1998 des Baustoffklasse B1 wurde am Prüf- und Zertifizierungsbereich Brand der Holzforchung der TUM durchgeführt.

Die restlichen Untersuchungen sind an der TU München, Professur für Entwerfen und Gebäudehülle von Moritz Mungenast durchgeführt worden.

Eigene Veröffentlichungen im Rahmen der Dissertation:

Teil 1 ‚Funktionsgeometrien‘:

Titel: 3d-Printed Low-tech Future Facades - Development of 3d-printed Functional-Geometries for Building Envelopes; Powerskin 2017 Conference Proceedings

Autor: Moritz Mungenast

Konferenz: Munich Powerskin Conference 2017

Verlag: TU Delft Open TU Delft / Faculty of Architecture and the Built Environment ISBN 978-94-92516-29-9 (Conference paper, Proceeding)

Teil 2 ‚Funktionsintegration‘:

Titel: 3d-Printed Low Tech Future Facade - 3d-Printed Functional-Integrated Building Envelope

Autor: Moritz Mungenast

Konferenz: Advanced Building Skins (ABS) Bern, Schweiz, 10/2017

(Conference paper, presentation)

Messprotokoll 10.6.2 Fassadenoberflächentemperatur

Messung Promotion Moritz Mungenast

Vergleichsuntersuchung Fassadenelement Fluid Morphology (3D) und Rodeca Lichtbauelement (RO)

Standort: Solarstation TU München Breite: 48,1493 Länge: 11,5686 Orientierung: SSW 17°

Messung Oberflächentemperatur C°															
Datum	16.04.18		17.04.18		17.04.18		18.04.18		19.04.18		19.04.18		19.04.18		20.04.18
Uhrzeit	17h		12:30h		17:00h		17:00h		09:15h		13:00h		17:00h		9:30h
Außen	19360	bewölkt	110381	sonnig	51740	sonnig	64519	sonnig	8250	sonnig Schat	105194	sonnig	50805	sonnig	
Uhrzeit	17:20h		12:45h		17:15h		17:15h		09:30h		13:15h		17:15h		9:25h
Höhe von UK Fassadenelement															
Außen															
0m	14,9	13,9	30,4	26,9	24	27,3	26,6	23,5	13,7	14,5	31	31	28,1	26,1	
0,5m	14,3	13,3	23,5	24,7	26,3	21,6	26,2	24,1	15,5	14,2	24,6	26,7	25,5	25,3	
1.0m	12,7	14,2	27,7	24,9	26,2	21,1	26,1	24,4	13,4	14,3	27	26,6	27	24,5	
1,5m	13,6	13,6	26,7	25,4	24,9	21,5	25,5	23,8	13,3	13,7	26	26,5	28,1	24,6	
2,0m	13,3	12,3	26,7	24	27,5	19	27,6	22,2	12,3	12,8	28,9	26	27,4	24,4	
Durchschnitt	13,76	13,46	27	25,18	25,78	22,1	26,4	23,6	13,64	13,9	27,5	27,36	27,22	24,98	
Innen															
0m	15,9	18,3	21,3	26,4	26,5	29,7	27,6	30,6	17,5	19,9	28,1	37,4	28,4	31,8	
0,5m	18,8	20,8	20,5	26,8	27,8	31,4	29,2	34,2	19,1	21,9	26,3	33,7	29,3	33,5	
1.0m	19	20,9	22,6	25,1	29	30,9	30,7	34,3	19,3	22	29,4	32	30,8	33,6	
1,5m	19	21,1	20,5	24,9	30,4	31,4	32,5	34,7	19,7	22	26,8	32,1	32	34	
2,0m	19,8	20,7	24	24,9	32,9	31,4	35,4	34,9	20,1	22	30,1	31,2	34,1	34,7	
2,5m	19,1	20,6	25,6	27,9	33,5	36,1	35,3	40,4	20	22	30,9	35,5	34,9	38,7	
Decke UK	20,1	20,9							20,5	21,9	24,8	26,1	30	32,5	
Durchschnitt	22,0	23,9	22,4	26,0	30,0	31,8	31,8	34,9	19,3	21,6	28,6	33,7	31,6	34,4	
Differenz		1,9		3,6		1,8		3,1		2,4		5,0		2,8	

Temperaturdifferenz Fassadenoberfläche Innen Durchschnitt 2,8 C°
 Temperaturdifferenz Fassadenoberfläche Innen Durchschnitt 4,2 C° Sonnig Mittag
 Temperaturdifferenz Fassadenoberfläche Innen Durchschnitt 1,7 C° Bewölkt

Messgerät Oberflächentemperatur: Voltcraft Dual Laser IR - SCAN- 350RH/2
 sonnig

	Tomorrow	Raumtemp. Today	Raumtemp. Today
Innen			
09:00h	19,3	20,5	21,6
13:00h	28,6	24,8	33,7
17:00h	31,6	30	34,4

bewölkt

	Tomorrow	Raumtemp. Today	Raumtemp. Today
09:00h	18,7	19,2	19,5
13:00h	17,4	19,8	19,2
17:00h	18,6	20,1	20,4

04.18		20.04.18		20.04.18		21.04.18		24.04.18		26.04.18		03.05.18		04.05.18	
		12:00h		17:00h		9:00h		13:30h		12:10h		9:30h		9:30h	
7941	sonnig schat	105350	sonnig	64207	sonnig	11950	sonnig schat	119844	sonnig	14089	bewölkt	27445	leicht bewölgt	20696	bewölgt
		12:00h		17:00h											
14,4	15,3	28,6	31,8	34,5	35,4	17,3	17,7	31,1	38,1	10	10,2	14,9	15,3	14,3	13,8
16,4	15,2	23,9	26,3	31	31,8	18,9	17,3	24,5	27,3	10,7	9,8	14,3	14,3	14,2	13,4
13	14,5	24,6	26,2	33,8	31,7	16	17,7	27	26,9	10,2	9,2	13,8	14,5	14,5	13,5
14	14	22,5	26,3	35,3	31,7	16,6	17,3	27,8	26,5	9,5	8,8	14	14,6	13,9	13,5
12,7	13,9	27,7	26,4	34,8	31,5	15	16,6	29,8	26,6	9,4	8,4	14	14,2	14,1	13,4
14,1	14,58	25,46	27,4	33,88	32,42	16,76	17,32	28,04	29,08	9,96	9,28	14,2	14,58	14,2	13,52
17,7	19,8	25,7	31,5	32,6	37,7	19,4	22,3	28,7	41,5	14,1	16	16,2	18,9	17,2	18,1
17,7	21,8	24,3	28	33	38,7	21,9	24,3	28,6	35,7	17,1	19,6	17,7	20,7	18,6	20
19,4	21,8	25,9	27,4	34,7	38,6	22	24,3	31,6	34,3	17,4	19,9	18,1	20,1	18,9	19,8
20,1	21,8	23,9	27,3	36,4	38	22,4	24,7	30,2	34	17,7	20	17,9	20,5	18,9	20
20,1	21,8	25,9	26,4	38,6	38,2	23	24,5	32,4	33,4	18,8	20	18,9	20	19,5	19,4
20,3	21,9	26	26,4	39,9	45,8	22,3	24,6	32,9	38,5	19	19,8	18,4	20,5	19,2	19,9
21	22,3	23	23,6	32,8	35,1	23,4	24,6	27	29,7	19,8	20,8	17,9	19	19,2	19,6
19,2	21,5	25,3	27,8	35,9	39,5	21,8	24,1	30,7	36,2	17,4	19,2	17,9	20,1	18,7	19,5
	2,3		2,6		3,6		2,3		5,5		1,9		2,2		0,8

Messprotokoll 10.6.3 Beleuchtungsstärke

Messung Promotion Moritz Mungenast

Vergleichsuntersuchung Fassadenelement Fluid Morphology (3D) und Rodeca Lichtbauelement (RO)

Standort: Solarstation TU München Geographische Position: Breite: 48,1493 Länge: 11,5686 Orientierung: SSW 17° / 212°

Tageslichtquotient (TQ) D Berechnung für DIN5034:	D= (Ep/Ea) x 100	04.05.18			
Fassadenelement:	3D	Rodeca	3D	Rodeca	
Ea lx (Außen):		23328	23328	20696	20696
Ep lx (Innen: 1m Abstand von Fassade x 0,85m Höhe):		501	1554	370	1277
Gewicht:	78kg	39 kg			
TQ D %		2,15	6,66	1,79	6,17

Beleuchtungsstärke LUX

Oberflächentemperatur C°

Messgerät Lux:

Voltcraft MS-200 LED

Messgerät Oberflächentemperatur:

Voltcraft Dual Laser IR - SCAN- 350RH/2

Messung Beleuchtungsstärke LUX

Datum	16.04.18		17.04.18		17.04.18		18.04.18		19.04.18		19.04.18		19.04.18		20.04.18
Uhrzeit	17h		12:30h		17:00h		17:00h		09:15h		13:00h		17:00h		9:30h
Außen	19360	bewölkt	110381	sonnig	51740	sonnig	64519	sonnig	8250	sonnig Schat	105194	sonnig	50805	sonnig	
Innen	3D	RO	3D	RO	3D	RO	3D	RO	3D	RO	3D	RO	3D	RO	3D
Abstand zu Fassade															
0m	901	3583	3568	25000	2604	11000	2748	11052	426	1302	3809	26362	2026	7523	
0,5m	929	2990	3543	18343	2794	9133	2792	9504	419	1064	3563	21063	2114	6873	
1,0m	773	2390	2711	13046	2083	6238	2145	6795	341	863	2863	15851	1678	5077	
1,5m	601	1825	2102	7863	1602	4504	1629	4984	267	689	2214	9504	1253	3824	
2,0m	407	1355	1694	3773	1268	3701	1281	3934	219	563	1741	4052	1014	3016	
2,5m	352	1080	1469	2331	1090	2992	1109	3341	189	472	1474	2335	862	2596	
2,8m Raume	330	1050	1371	2093	995	2955	1027	3267	174	434	1390	2042	796	2541	
Innen															
0m	3020	5603	6176	25784	2734	14100	2736	11708	642	2369	6439	27058	2342	8080	
0,5m	4148	5619	5758	25816	5928	15882	6114	19179	879	2685	6037	23184	4551	13322	
1,0m	2764	5232	15660	21764	12631	17461	13095	19953	1787	3051	14798	23018	10061	14705	
1,5m	2883	5479	6828	22187	7089	15045	7507	19783	1201	3160	6517	22739	5990	15696	
2,0m	2597	4829	8894	22456	7770	15886	8266	20325	944	3300	8374	24767	6795	15613	
2,5m	1908	4047	7645	24674	4969	14006	5340	20773	911	3451	6904	26362	4489	17198	

0.04.18	20.04.18		20.04.18		21.04.18		24.04.18		26.04.18		03.05.18		04.05.18		
	12:00h		17:00h		9:00h		13:30h		12:10h		9:30h		9:30h		
7941	sonnig schat	105350	sonnig	64207	sonnig	11950	sonnig schat	119844	sonnig	14089	bewölkt	27445	leicht bewölkt	20696	bewölgt
	RO	3D	RO	3D	RO	3D	RO	3D	RO	3D	RO	3D	RO	3D	RO
443	1264	2844	16475	2556	10820	456	1458	4721	41765	421	1901	956	4210	573	1999
430	1083	2672	12193	2602	8637	457	1209	4674	32215	417	1493	926	3102	564	1548
351	893	2105	8250	1976	6052	373	980	3671	25447	341	1150	728	2517	451	1182
276	709	1640	5139	1519	4473	299	767	2797	18151	273	850	584	1798	360	863
226	560	1324	2738	1204	3555	240	616	2201	8006	217	624	451	1319	289	630
187	481	1138	1651	1034	3046	205	515	1879	3359	181	502	394	1004	246	501
175	455	1027	1456	914	2974	191	492	1732	2859	172	482	366	992	2430	485
670	2273	4752	16423	2520	13421	703	2602	7244	40519	623	2213	1485	5402	873	2719
848	2642	4226	15744	6222	16021	906	2880	8900	32910	758	2161	1728	6237	1023	2708
1758	3000	11733	15030	13854	17538	2015	3356	18900	36145	1870	2505	4226	6609	2467	3098
1171	3217	4000	15990	7260	18235	1300	3535	9613	38792	1031	2762	2218	6393	1348	2922
987	3310	6130	15911	8018	17941	1039	3633	11578	32414	1099	2820	2425	6625	1496	3232
984	3541	5773	15123	5201	18993	1050	3975	9164	38715	944	2985	2037	6888	1307	3450

3D Printed Future Facade

Entwicklung, Prototypenerstellung und experimentelle Untersuchung
einer 3D-gedruckten, transluzenten und funktionsintegrierten Gebäudehülle
Technische Universität München | Dissertation Moritz Basil Mungenast © 2019