

Bio-inspirierte Oberflächen zur Verdunstungskühlung von Gebäudehüllen (BIOCOOL)

Berichte aus Energie- und Umweltforschung 75/2025

Wien, 2025

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur,
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination: Abteilung III/3 - Energie und Umwelttechnologien

Leitung: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

Autorinnen und Autoren:

Arch. Dipl.-Ing. B. Sommer, Mag. arch. Damjan Minovski, Dipl.-Ing. Małgorzata Sommer-Nawara, Sen.Art. Univ. Prof. Mag.art Sascha Zaitseva (Univ. f. Angewandte Kunst Wien)

Dr. Dipl.-Ing. Ulrich Pont, Dr. Dipl.-Ing. Matthias Schuss (TU Wien)

Unter Mitwirkung von / aufbauend auf den Arbeiten von:

M. Balzar, P. Gruber, D. Koschitz, G. Moncayo Asan, C. Yönetim-Rabl (Energie Design, Universität für Angewandte Kunst Wien)

H. Teufl (Abteilung Bauphysik und Bauökologie, TU Wien)

M. Martens-Wiala, G. Pfaffl, H. Rachbauer (Keramik Studio, Universität für Angewandte Kunst Wien)

Wien 2025. Stand: Jänner 2024

Ein Projektbericht gefördert im Rahmen von



Rückmeldungen:

Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an iii3@bmimi.gv.at.

Rechtlicher Hinweis

Dieser Ergebnisbericht wurde von die/der Projektnehmer:in erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit, Aktualität sowie die barrierefreie Gestaltung der Inhalte übernimmt das Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) keine Haftung.

Mit der Übermittlung der Projektbeschreibung bestätigt die/der Projektnehmer:in ausdrücklich, über sämtliche für die Nutzung erforderlichen Rechte – insbesondere Urheberrechte, Leistungsschutzrechte sowie etwaige Persönlichkeitsrechte abgebildeter Personen – am bereitgestellten Bildmaterial zu verfügen.

Die/der Projektnehmer:in räumt dem BMIMI ein unentgeltliches, nicht ausschließliches, zeitlich und örtlich unbeschränktes sowie unwiderrufliches Nutzungsrecht ein, das übermittelte Bildmaterial in allen derzeit bekannten sowie künftig bekannt werdenden Nutzungsarten für Zwecke der Berichterstattung, Dokumentation und Öffentlichkeitsarbeit im Zusammenhang mit der geförderten Maßnahme zu verwenden, insbesondere zur Veröffentlichung in Printmedien, digitalen Medien, Präsentationen und sozialen Netzwerken.

Für den Fall, dass Dritte Ansprüche wegen einer Verletzung von Rechten am übermittelten Bildmaterial gegen das BMIMI geltend machen, verpflichtet sich die/der Projektnehmer:in, das BMIMI vollständig schad- und klaglos zu halten. Dies umfasst insbesondere auch die Kosten einer angemessenen rechtlichen Vertretung sowie etwaige gerichtliche und außergerichtliche Aufwendungen.

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Stadt der Zukunft“ des Bundesministeriums für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm „Haus der Zukunft“ auf und hat die Intention, Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung aller betroffener Bereiche wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen, sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMIMI publiziert und elektronisch über die Plattform www.NachhaltigWirtschaften.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und Anwender:innen eine interessante Lektüre.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	9
Abstract	10
Motivation und Stand der Technik.....	11
1. Projektmanagement.....	12
1.1. Organisation.....	12
1.2. Überwachung.....	14
1.3. Dokumentation	15
2. Grundlagenrecherche Fassadentechnologie und Verdunstungskühlungssysteme	17
2.1. Evaporative Kühlung.....	17
2.2. Biomimetischer Ansatz zur dynamischen Kontrolle passiver Gebäudehüllen.....	17
2.3. Kontext: Systemrelevanter Research.....	18
2.4. Schaffung mikroklimatischer Bedingungen	23
2.4.1. Kontext: Urbaner Raum.....	23
2.4.2. Kontext: Materialeigenschaften	24
2.5. Temperatur – Porosität.....	25
2.5.1. Das Auffrieren.....	26
2.5.2. Porenform.....	26
3. Entwurf Bioinspirierter Morphologien und deren Simulation	27
3.1. Auswahl geeigneter Designprinzipien über Verdunstungseffizienz von Blatt Geometrien	27
3.2. Formoptimierung für Gebäudehüllen mit Verdunstungskühlung	28
3.2.1. Arbeitsmethode und „ClayDisplacer“	28
3.2.2. Entstandene Entwürfe mit ClayDisplacer	31
3.3. Simulation und Visualisierung der Verdunstungseffizienz von den zu testenden Platten ..	39
3.3.1. Grundidee für „ClaySim“	39
3.3.2. Theoretischer Hintergrund	39
3.3.3. Implementierung von ClaySim.....	42
3.4. Erkenntnisse und Ausblick	45
4. Material und Produktion von Proof-of-Concept Prototypen	45
4.1. Generelle Faktoren und Materialwahl.....	45
4.1.1. Auswahl von den Tonarten P1.1 und P2.....	46
4.2. Erstellung von Testelementen mit klassischen Methoden	47

4.3.	Umfassende Sondierung mit additiver Produktionsmethode (Potterbot)	48
4.4.	Testen von drei Arten von Produktionsarten mittels Quetschen	52
4.4.1.	PLA-Formteile und Negativform aus Gips	52
4.4.2.	Versuche mit Silikonformteilen und Gipsnegativformen	53
4.4.3.	Versuche mit CNC gefrästen Gipsformen mit unterschiedlichen Maschinen	54
4.5.	Evaluierung der Oberflächen Geometrie der zu testenden Platten	56
4.6.	Finale Testplatten mit CNC gefrästen Gipsnegativformen	57
4.7.	Entwurf der Versuchsanordnung für Prototypen im Außenbereich.....	60
5.	Evaluierung der Prototypen, vergleichende Bewertung	61
5.1.	Aufbau des Verdunstungsexperiments im Klimaschrank	61
5.1.1.	Verwendete Messtechnik	62
5.2.	Erste Testserie ohne Oberflächenoptimierung im Klimaschrank	62
5.2.1.	Messergebnisse	63
5.2.2.	Schlussfolgerung	65
5.3.	Zweite Testserie mit optimierten Oberflächen und Materialien im Klimaschrank	66
5.3.1.	Messergebnisse	67
5.3.2.	Schlussfolgerung	68
5.4.	Performance Monitoring unter realen Klimabedingungen im Sommer 2022.....	69
5.4.1.	Messergebnisse	70
5.4.2.	Schlussfolgerung	72
5.5.	Neu kalibrierter Versuch zur Messung von Verdunstungseffizienz im Sommer 2023	73
6.	Systemintegration, Konzept und Industrielle Entwicklung	74
6.1.	Konzeption der Systemintegration, Erstellung von Entwürfen für Fassaden- und Dachsysteme, Abschätzung der Systemvariablen	74
6.2.	Auswirkung auf Gebäude und Stadtraum.....	74
7.	Schlussfolgerungen und Dissemination	74
7.1.	Lessons Learned	74
7.2.	Dokumentation für Report	75
7.3.	Präsenz bei Messen und nationalen und internationalen Ausstellungen	75
7.4.	Social Media und Stakeholder Präsentationen.....	76
8.	Ausblick und Empfehlungen.....	76
9.	Verzeichnisse	76
9.1.	Abbildungsverzeichnis	76
9.2.	Tabellenverzeichnis.....	76

9.3.	Literaturverzeichnis.....	77
10.	Anhang	80

Kurzfassung

- Ausgangssituation/Motivation: Durch den Klimawandel und die Notwendigkeit zur Reduzierung des Gesamtenergiebedarfs in Gebäuden und Vermeidung von Urban Heat Islands besteht der dringende Bedarf an der Weiterentwicklung passiver Kühltechniken, die den Energie-verbrauch reduzieren, die Umwelt und das Ökosystem unterstützen und ein zufriedenstellendes Maß an Komfort bieten. Die Verbesserung von Systemen direkter Verdunstungskühlung für Gebäudehüllen zielt auf verbesserte Effektivität zum Einsatz in gemäßigten Klimazonen ab. Bioinspiration hat sich in den letzten Jahrzehnten als Innovationsmethode für die Entwicklung nachhaltiger Lösungen für die gebaute Umwelt etabliert.
- Das Projekt BIOCOOL besteht aus einer Sondierung zur Übertragung von morphologischen Prinzipien aus der Biologie in formoptimierte keramische Ober-flächen zur Klimatisierung von Gebäudehüllen durchgeführt werden.
- In Laubbäumen bestimmen die Formen von Blättern die thermischen Eigenschaften und insbesondere die Effizienz von Verdunstung und somit Kühlung. Eine Ableitung dieses Phänomens bietet einen Anhaltspunkt zur Entwicklung optimierter Formen für Bauteile.
- Die Einbindung in das System Gebäude, im besonderen Wasserkreislauf und Energiemanagement, und die Auswirkungen auf den Stadtraum auf Fußgänger- und Quartierebene werden in Konzepten und Simulationen untersucht. Die Gebäudehülle wird dabei als Energieträger und als aktives Element im Sinn von Eco-system Services interpretiert, und die Auswirkungen auf Stadtraum und Umwelt in mehrere Größen Skalen und Aspekten abgeschätzt.
- Die Studie wird von zwei akademischen Institutionen mit langjähriger Erfahrung im Energy Design und Bauphysik unter Einbindung von Studierenden durchgeführt. Die Marktnähe und Wirtschaftlichkeit der Innovation werden in Workshops mit Stakeholdern aus der Industrie sichergestellt
- BIOCOOL bereitet den Weg für ein industrielles Forschungsprojekt, indem Daten über Proof-of-Concept Prototypen, Experimente und Analysen zur Auswirkung der neuen Technologie aufbereitet werden.
- Inhalte und Zielsetzungen: Zielsetzung dieses Projektes ist es zu zeigen, dass auf der Basis der durchgeführten Grundlagenforschung und neuer Erkenntnisse über Formprinzipien mit Hilfe von parametrischem Design und Simulationen Paneele aus porösen Materialien mit 3-D Oberflächenstrukturen hergestellt werden können. Dieser Form-Funktionszusammenhang sowie der Einsatz von speziell angepassten keramischen Materialien mit definierter Porosität und Mikrostruktur kann die Verdunstungseffizienz der Elemente im Vergleich zu konventionellen Technologien erhöhen. Die Performance der installierten Prototypen hinsichtlich ihrer thermischen Eigenschaften wurde untersucht, vergleichend evaluiert, und nachhaltige Low-Tech Konzepte zur Systemintegration entworfen.
- Methodische Vorgehensweise: Nach einer extensiven Materialstudie wird ein Set von mehreren Platten erstellt, die digital formoptimiert werden. Ein Proof-of-Concept Mockup im Außenraum dient zur Datenerstellung, die analysiert wurde.

- Ergebnisse und Schlussfolgerungen: Es konnte die Wirksamkeit von keramischen Paneelen mit unterschiedlicher Farbgebung und 3-d Oberflächen gezeigt werden. Es konnten Lösungsansätze demonstriert werden, die allerdings nur auf der Basis der Gestaltung von Baumaterialien unter der Voraussetzung sorgfältiger Bewässerung umsetzbar sind.
- Ausblick: Mit dem Projekt BIOCOOL wird aufgezeigt, dass passive Kühlung durch Verdunstung erreicht werden kann. Diese Sondierung ist nicht nur für den Gebäudebereich, sondern auch für andere Technologiebereiche interessant in denen Wärmetauscher eingesetzt werden können.

Abstract

- Background/Motivation: Due to climate change and the need to reduce overall energy demand in buildings and avoid urban heat islands, there is an urgent need for the further development of passive cooling techniques that reduce energy consumption, support the environment and ecosystem, and provide a satisfactory level of comfort. The improvement of direct evaporative cooling systems for building envelopes aims to improve effectiveness for use in temperate climate zones. Bioinspiration has established itself in recent decades as an innovation method for developing sustainable solutions for the built environment.
- The BIOCOOL project consists of an exploration of the transfer of morphological principles from biology to form-optimized ceramic surfaces for conditioning building envelopes.
- In deciduous trees, the shapes of leaves determine the thermal properties and particularly the efficiency of evaporation and thus cooling. Deriving from this phenomenon offers a starting point for the development of optimized shapes for building components.
- Integration into the building system, particularly the water cycle and energy management, and the impact on the urban space at pedestrian and neighborhood levels, are examined in concepts and simulations. The building envelope is interpreted as an energy carrier and an active element in terms of ecosystem services, and the impact on the urban space and environment is estimated at multiple scales and aspects.
- The study is conducted by two academic institutions with long-standing experience in energy design and building physics, involving students. The market proximity and economic viability of the innovation are ensured in workshops with industry stakeholders.
- BIOCOOL paves the way for an industrial research project by preparing data on proof-of-concept prototypes, experiments, and analyses of the impact of the new technology.
- Content and objectives: The aim of this project is to demonstrate that based on the fundamental research and new insights into design principles, panels made of porous materials with 3D surface structures can be produced using parametric design and simulations. This form-function relationship and the use of specially adapted ceramic materials with defined porosity and microstructure can increase the evaporation efficiency of the elements compared to conventional technologies. The performance of the installed

prototypes in terms of their thermal properties was investigated, comparatively evaluated, and sustainable low-tech concepts for system integration were designed.

- Methodological approach: After an extensive material study, a set of several plates is created, which are digitally optimized for shape. A proof-of-concept mockup in outdoor space is used to generate data that is then analyzed.
- Results and conclusions: The effectiveness of ceramic panels with different color and 3D surfaces could be demonstrated. Solution approaches could be demonstrated, but they are only feasible on the basis of the design of building materials, assuming careful irrigation.
- Outlook: The BIOCOOL project demonstrates that passive cooling can be achieved through evaporation. This exploration is not only interesting for the building sector but also for other technology areas in which heat exchangers can be used.

Motivation und Stand der Technik

Im Jahr 2016 betrug die Weltbevölkerung 7,442 Milliarden Menschen und das Wachstum der Bevölkerung war mit einem generellen Anstieg in den Bereichen Industrie, Landwirtschaft, Verkehr und Infrastruktur verbunden. Etwa 30-40% des Gesamtenergiebedarfs stammen aus dem Gebäudesektor, der Wohn- und Geschäftsgebäude, öffentliche Einrichtungen, Landwirtschaft und Fischerei umfasst. Die größten Bestandteile des Energieverbrauchs im Gebäudesektor sind Heizung, Kühlung, Klimatisierung und Lüftung. Es wird geschätzt, dass weltweit 40% der gesamten Gebäudeenergie für die Raumheizung und -kühlung verwendet wird, sowohl im Wohn- als auch im gewerblichen Bereich. Da die atmosphärische Temperatur aufgrund von Kohlenstoffemissionen und der globalen Erwärmung ansteigt, steigt auch die Nachfrage nach Raumkühlung. Es besteht daher ein Bedarf an der Entwicklung passiver Kühltechniken, die den Energieverbrauch reduzieren, die Umwelt und das Ökosystem unterstützen und ein angenehmes Raumklima bieten.

Die passive Kühltechnik nutzt eine Umgebungswärmesenke mit niedrigerer Temperatur, um die überschüssige Wärme des Gebäudes abzuleiten. Verfügbare Umgebungswärmesenken sind Umgebungsluft, Wasser und der Himmel. Basierend auf der verfügbaren Umgebungswärmesenke wird diese Technik weiter in Konvektionskühlung, Verdunstungskühlung und Strahlungskühlung unterteilt. Die Auswahl der geeigneten passiven Kühltechnik ist entscheidend, um die Energie- und Umweltauswirkungen von Gebäudeanwendungen zu gestalten. In den letzten zehn Jahren hat die Verdunstungskühlung aufgrund ihrer einfachen Bauweise, niedrigen Kosten und der Nutzung natürlicher Ressourcen an Popularität gewonnen. Sie ist effizient und kostengünstig und bietet im Vergleich zu konventionellen Klimatisierungssystemen eine attraktive Alternative für heißes und trockenes Klima sowie für gemäßigte Klimazonen.

Die direkte Verdunstungskühlung ist die einfachste und älteste Form der Klimatisierung. Sie nutzt Wind oder Ventilatoren, um heiße Außenluft über ein Verdunstungskissen in das Gebäude zu saugen. Die Kühleffizienz der direkten Verdunstungskühlung hängt vom Feuchtigkeitsgehalt der Ansaugluft ab und typische kommerzielle Verdunstungskühler haben eine Effektivität von 50% bis 80%. Die Effektivität der direkten Verdunstungskühlung beschreibt, wie sehr sich die Zulufttemperatur, die

den Verdunstungskühler verlässt, der wet bulb Temperatur im Freien annähert.

Forschungsbemühungen konzentrieren sich auf die Verbesserung der Effektivität durch verschiedene Konfigurationen, um die Anwendung in feuchteren Klimazonen zu erweitern.

1. Projektmanagement

1.1. Organisation

Das Forschungsprojekt wurde in Einzelteile gegliedert, die von den teilnehmenden Abteilungen, Energie Design an der Universität für Angewandte Kunst Wien (A_ED), Keramik Studio an der Universität für Angewandte Kunst Wien (P1_KS) und Abteilung Bauphysik und Bauökologie and der TU Wien (P2_BPI), bearbeitet wurden. Die einzelnen Arbeitsbereiche wurden zu Beginn genau definiert und in ein Abhängigkeitsdiagramm eingefügt. Die angeführte Übersicht in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** wurde etabliert um die Abhängigkeiten der Meilensteine zu erfassen und kommunizieren. Danach wurden die Einzelbereiche an die teilnehmenden Teams verteilt.

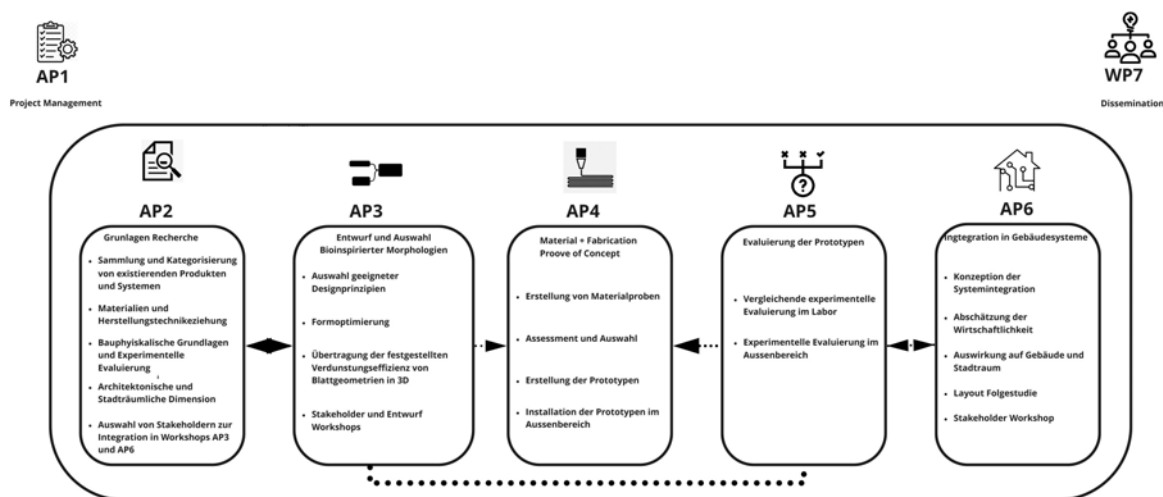


Abbildung 1: Arbeitspakete und ihre Abhängigkeiten. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien, TU Wien.

Das Projekt wurde nach der Methode des kollaborativen Projektmanagement gesteuert und koordiniert:

- Es wurden alle Projektbeteiligten aktiv in den Planungs- und Steuerungsprozess eingebunden, was durch regelmäßige Treffen erzielt wurde.
- Das Management wurde dabei nicht als isoliertes Aufgabenfeld von Managern aufgefasst, sondern als integraler Bestandteil der Projektarbeit aller Teammitglieder.
- Die Planungs- und Steuerungsverantwortung fiel daher mit der inhaltlichen Projektverantwortung zusammen.

- Eine wichtige technische Grundlage ist dabei eine zentrale Datenbasis, die allen ProjektmitarbeiterInnen Zugang zu allen relevanten Projektdokumentationen ermöglicht. Dies wurde durch online Plattformen wie Google-Drive, Dropbox und Miro gewährleistet.
- Potenzielle Störungen und Auswirkungen auf die Arbeitspakete wurden frühzeitig kommuniziert und damit abgefedert.

Die Arbeitsbereiche und Verantwortlichkeiten von A_ED, P1_KS und P2_BPI wurden in der Miro Plattform definiert und entsprechend an die Teams verteilt, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** und **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..** Die einzelnen Bereiche wurden in Absprache mit allen Teams zwei-wöchentlich aktualisiert.

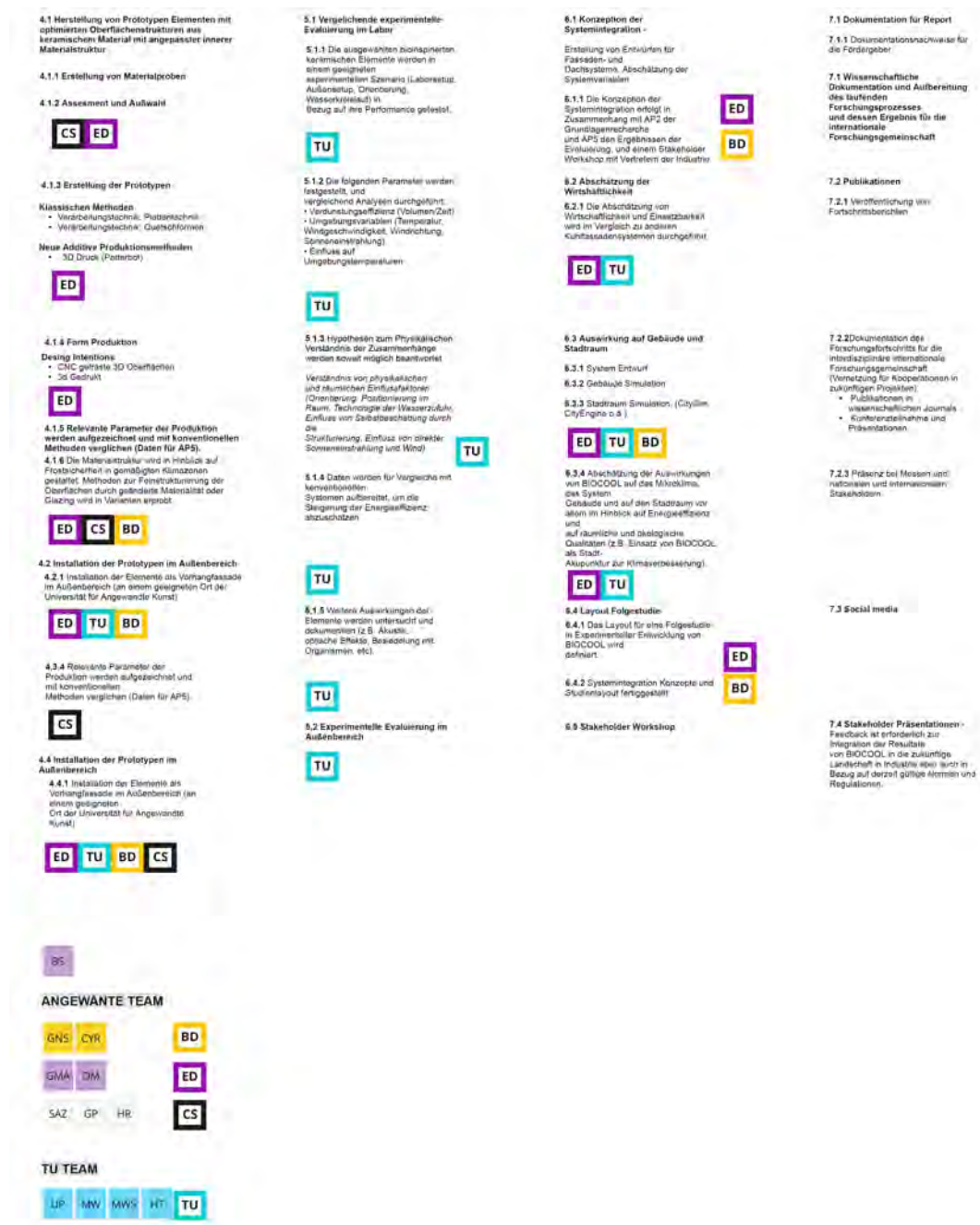


Abbildung 2: Arbeitsbereiche der teilnehmenden Teams (1 von 2). – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien, TU Wien.



Abbildung 3: Arbeitsbereiche der teilnehmenden Teams. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien, TU Wien.

1.2. Überwachung

Die Koordination des Forschungsprojektes wurde von allen Teams nach inhaltlichem Aufwand und Zeitaufwand gegliedert. Die Organisation von Besprechungen, Meetings, und Workshops wurde hauptsächlich von A_ED koordiniert.

Der regelmäßig aktualisierte Zeitplan in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** und die Dokumentation von Fortschritten und Abweichungen dienten als Kontrolldokumente. Die Administration und Abrechnung des Projekts wurden hauptsächlich von A_ED koordiniert. Das Projekt und seine Daten wurden mittels digitaler Plattformen und gemeinnützigen Servern gemanagt.

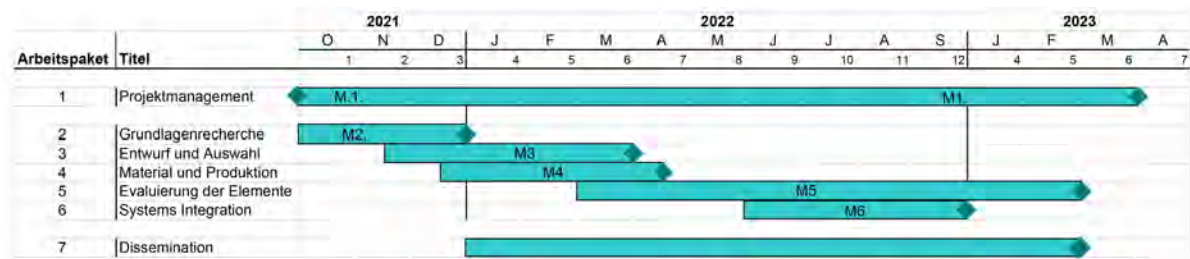


Abbildung 4: Projektzeitplan. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien, TU Wien.

Die generelle Kontrolle und Überwachung haben sich an den im Antrag angeführten Prinzipien gehalten und wurden folgendermaßen eingehalten:

- Sicherstellung einer konsequenten und zielorientierten Durchführung des Projektes bis zum erfolgreichen Projektabschluss.
- Gewährleistung und Schaffung der erforderlichen Rahmenbedingungen, angenehmer und produktiver Arbeitsbedingungen für eine erfolgreiche Projektbearbeitung.
- Durchführung und Unterstützung der Team-internen (Partnerweise und Gesamtprojektteamweise) und externen Kommunikation (Konsulenten, interessierte Stakeholder, Fördergeber, interessierte Öffentlichkeit)
- Organisation der Meetings und Workshops, Abwicklung der Projekte im Sinne der Wahrung der Interessen der wissenschaftlichen Exzellenz und des Fördergebers.
- Zeitgerechtes Erkennen von Problemen im Projektablauf und Identifizieren von Lösungs- und Risikominimierungsstrategien.
- Zur Verfügungstellung der erforderlichen Daten- und Kommunikationslogistik.
- Erkennen von Möglichkeiten das Projekt zu präsentieren, und Herstellen von Verbindungen zu artverwandten internationalen F&E-Projekten

1.3. Dokumentation

Es wurden alle Teilbereiche fortwährend dokumentiert, visualisiert und photographisch festgehalten. Da alle Bereiche unterschiedliche Darstellungen und Formate verwenden, wurden Treffen abgehalten, um diese aufeinander abzugleichen. In den Arbeitspaketen, die sich mit digitalen Versuchen befassen, wurden Visualisierungen aufeinander abgestimmt, um Vergleiche zu erleichtern.

Es haben sich Workshops als ein produktives Format herauskristallisiert, um Sondierungen gemeinsam vorzubereiten und Parameter von Proben zu definieren. Zwei Stakeholder Workshops dienten somit zur detaillierten Definition der zu testenden Proben und Auswahlmöglichkeiten von Tonmaterial.

Der erste Workshop ist hier als Beispiel angeführt. Die Teilnehmerliste umfasste Ariana Rupp, Petra Gruber, Ceren Yönetim-Rabl, Goga Nawara Sommer, Ulrich Pont, Helene Teufl, Magdalena Wölzl, Sascha Alexandra Zaitseva, Gerald Pfaffl und Maria Weila. Der Workshop begann mit einer Präsentation von Ariana Rupp, die wesentliche Grundlagen vorstellt, siehe **Fehler! Verweisquelle**

konnte nicht gefunden werden.. Eine kurze Präsentation von Biocool-Mitgliedern leitete eine Diskussion über die Eigenschaften von Keramik und Glasurtechniken. Die nächste Sitzung konzentrierte sich auf Morphologien, 3D-Technologien, Materialeigenschaften und Produktionsmethoden sowie Skalierung und Datensätze für maschinelles Lernen. Es wurde diskutiert, wie Wasser in ein Fassadensystem gebracht werden kann, um Verdunstung zu erreichen. Die Kapillarwirkung ist eine Möglichkeit Verdunstung auf Bauteilen zu testen.



Abbildung 5: Grundlagen und Designparameter werden etabliert. – Quelle: Projektteam / Fotograf, Universität für angewandte Kunst Wien.

Einige Mitglieder schlugen vor, Rohre im Fassadenelement zu integrieren, um Wasser zu transportieren und alle Ideen wurden photographisch dokumentiert. Es wurde vereinbart, dass der Zersetzungsgrad und die Aussetzung zu Wind als wichtigste Designparameter untersucht werden sollen. Oberflächendesigns sollten getestet werden, die Selbstbeschattung erzeugen. Eine Fliesengröße von 10 cm x 5 cm x 1 cm wurde für die bevorstehenden Oberflächenstudien festgelegt.

Um die Tönung zu bestimmen, werden Teammitglieder vom Angewandte Ceramic Studio verschiedene Tonarten herstellen. Der Workshop behandelte auch den experimentellen Aufbau, einschließlich der durchzuführenden Experimente, wo sie durchgeführt werden sollen und der notwendigen Ausrüstung wie Umweltkammern. Alle genannten Definitionen wurden notiert, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, und danach in der Miro Plattform festgehalten.

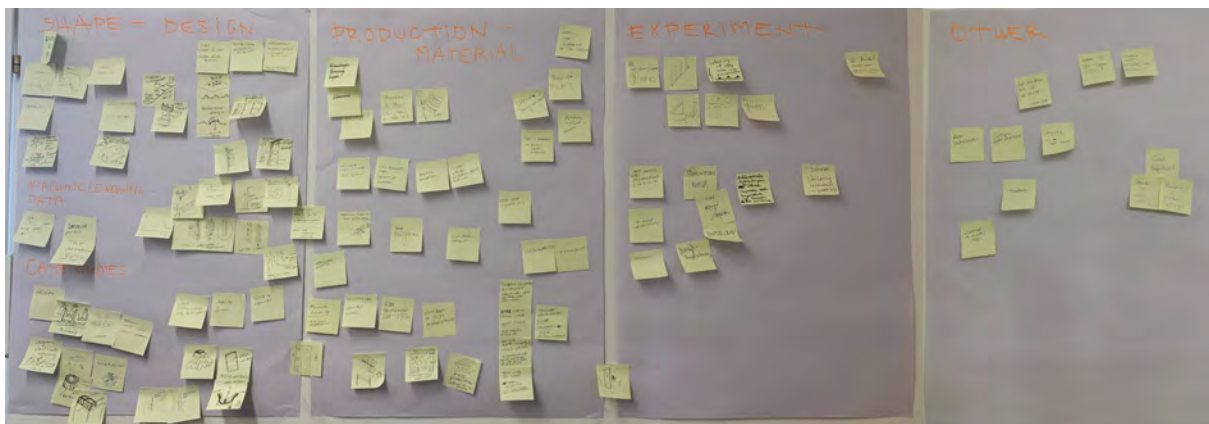


Abbildung 6: Bauteilformen, Herstellungsprozesse und physische Experimente werden definiert. – Quelle: Projektteam / Fotograf, Universität für angewandte Kunst Wien.

Weiters Material über Stakeholder-Workshops und deren Ergebnisse befinden sich in **Anhang I**.

2. Grundlagenrecherche Fassadentechnologie und Verdunstungskühlungssysteme

2.1. Evaporative Kühlung

Nur Nach Berechnungen der Vereinten Nationen (UN) hat die Weltbevölkerung am 15. November 2022 die Schwelle von 8 Milliarden Menschen überschritten. (Bundesamt, 2023) Dies ist mit einem allgemeinen Wachstum in den Bereichen Industrie, Landwirtschaft, Verkehr und Infrastruktur verbunden. Der gesamte Gebäudesektor ist nach statistischer Erfassung für etwa 30-40% des Gesamtenergiebedarfs verantwortlich. weltweit werden dem gemäß etwa 40 % der gesamten Gebäudeenergie für die Raumheizung oder -kühlung sowohl im Wohn- als auch im gewerblichen Bereich verbraucht. (IEA, 2023) Darüber hinaus steigt die Nachfrage nach Raumkühlungsanwendungen aufgrund des Anstiegs der atmosphärischen Temperatur. Die Struktur des städtischen Raums intensiviert sowohl den Effekt der Hitze als auch die Folgen von Starkniederschlägen auf die örtliche Infrastruktur aufgrund des hohen Versiegelungsgrades als auch der ausgeprägten Anwendung falscher Materialität. Damit einhergehende mikroklimatische Veränderungen und Verschlechterungen verstärken dazu nochmals den Effekt und übertragen diesen wiederum in das örtliche Umfeld, ausgedrückt durch den sogenannten Urban Heat Island Effekt (UHI). Um sich an die bereits auftretenden Folgen des Klimawandels anzupassen und Klima-resilienter zu werden, setzen immer mehr Städte auf Natur-basierte Lösungen (NbL) - sogenannter grüner (z. B. Bäume, Sträucher, Wiesen) und blauer (z. B. Bäche, Wasserflächen, Nebelduschen) Infrastruktur. Daher besteht ein Bedarf an der Entwicklung passiver Kühltechniken, die den Gebäude Energieverbrauch als auch die externe Wärmeabstrahlung reduzieren. Damit soll die Umwelt und das Ökosystem unterstützt und ein zufriedenstellendes Maß an Komfort geboten werden. Technisch gesehen wird bei der passiven Kühltechnik die überschüssige Wärme des Gebäudes an eine geeignete Umgebungswärmesenke mit niedrigerer Temperatur abgegeben. Verfügbare Umgebungswärmesenken sind Umgebungsluft, Wasser und der Himmel. Basierend auf der verfügbaren Umgebungswärmesenke wird diese Technik weiter in Konvektionskühlung, Verdunstungskühlung und Strahlungskühlung unterteilt. (Amer, Boukhanouf, & G., 2017) Um die mit Gebäudeanwendungen verbundenen Energie- und Umweltauswirkungen zu gestalten spielt die Auswahl einer geeigneten passiven Kühltechnik eine entscheidende Rolle. (Bhamaer, Rathod, & Banerjee, 2019) Die Verdunstungskühlung hat in den letzten zehn Jahren im Bereich der Klimatisierung aufgrund ihres einfachen Aufbaus, der geringen Kosten und der Nutzung natürlicher Ressourcen an Popularität gewonnen. Außerdem ist sie effizient und kostengünstig, was sie im Vergleich zu konventionellen Klimatisierungssystemen sowohl für heißes und trockenes Klima als auch für gemäßigte Klimazonen zu einer attraktiven Alternative macht. (Costelloe & Finn, 2003)

2.2. Biomimetischer Ansatz zur dynamischen Kontrolle passiver Gebäudehüllen

“Biomimicry“ (Benyus, 1997) (Jan Knippers, 2016) und biologische inspirierte Strategien haben die Geschichte der Architektur und Bautechnologie schon seit Beginn des 20ten Jahrhunderts geprägt und vor allem den Fortlauf der sogenannten Moderne (Corbusier, 1926) antizipiert und beeinflusst.

Nach Vogel sind Bäume Pumpsysteme um Wasser aus dem Boden in die Luft zu befördern. Um diese biologische Funktion optimal auszuführen sind die Proportion und strukturelle Beschaffenheit von

Wurzel, Stamm, und Zweigen sowie Form und Oberflächenbeschaffenheit von Blättern (Vogel, Nature's Swell, But is it worth copying?, 2003) (Vogel, The Life of a Leaf, 2012) nachweisliche integrative Faktoren zu evoprativer Kühlung. Aus dem Wurzelbereich wird Wasser aus dem Boden gefiltert und wenn Geschwindigkeit und Intensität zunehmen, um größere Distanzen zu überwinden entsteht eine organisierte Struktur mit Kanälen unterschiedlicher Größe und Querschnitte um statischen Lasten, Frost (Lukas Eurich, 2016) und dynamischen Windlasten entgegen zu wirken (Stamm und Äste). Wenn der Wasserfluss langsam und kurz ist, ist Diffusion der strategisch optimierte Weg des Wassers (Blätter). (Adrian Bejan).

Dabei geht es um den effektiven Transport von Wasser und damit auch Nährstoffen innerhalb des strukturellen Aufbaus von Pflanzen und Bäumen. Speziell der dadurch mitwirkende Oberflächenwind trägt stark dazu bei, das Wasser Innerhalb von Blättern schneller und effizienter transportiert wird und schlussendlich durch Verdunstung an die Außenluft abgegeben wird. Dies sorgt innerhalb des Systems für unterschiedliche Druckverteilungen zur Unterstützung der Kapillarwirkung, die gegen die Schwerkraft wirkt. Die exterioren mikroklimatischen Bedingungen wie Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, Temperatur und unterschiedliche Windturbulenzen an der Oberfläche haben daher direkten Einfluss auf die Effektivität der interiorene Materialeigenschaften und expressiven Form der untersuchten Blätter. (Vogel, Leaves in the lowest and highest winds: temperature, force and shape, 2009)

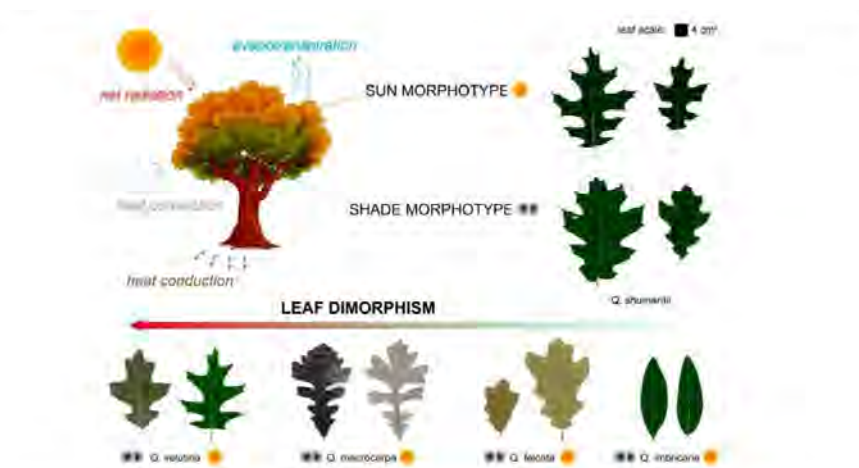


Figure 1. Plant thermal exchange budget and leaf heteromorphism, illustrated with sun and shade leaves from different oak species.

Abbildung 7: Illustration aus „Biomimetic Groundwork for Thermal Exchange Structures Inspired by Plant Leaf Design“. – Quelle: Gruber, P. (2019).

2.3. Kontext: Systemrelevanter Research

Die direkte Verdunstungskühlung ist die einfachste und älteste Form der Klimatisierung. Sie wird mit Hilfe von Wind oder Ventilatoren durchgeführt, der heiße Außenluft über ein Verdunstungskissen in das Gebäude saugt. Die direkte Verdunstungskühlung ist recht einfach und billig und wird häufig im Wohnbereich eingesetzt, um die Luft durch Erhöhung des Feuchtigkeitsgehalts der Luft zu kühlen. Die Kühleffizienz der direkten Verdunstungskühlung hängt also vom Feuchtigkeitsgehalt der Ansaugluft ab. Typische kommerzielle Verdunstungskühler haben eine Effektivität von 50-70 %. Die Effektivität der direkten Verdunstungskühlung beschreibt die Leistung des Systems, indem gemessen wird, wie sehr sich die Zuluft Temperatur, die den Verdunstungskühler verlässt, der Wet bulb

Temperatur im Freien annähert. Da der größte Nachteil von direkter Verdunstungskühlung die Begrenzung der Wet bulb Temperatur ist, konzentrieren sich die Forschungsbemühungen der letzten Jahrzehnte hauptsächlich auf die Verbesserung der Effektivität durch verschiedene Konfigurationen, die darauf abzielen, ihre Anwendung in feuchteren Klimazonen zu erweitern. (Santamouris & Kolokotsa, 2013)

Sogenannte „Zeers Pots“ sind Tonkrugkühler die auf dem Verdunstungsprinzip beruhen. Damit können bei Aussentemperaturen von bis zu 40 Grad Celsius die Innentemperaturen des Tongefäßes rund um die Hälfte reduziert werden, das ganz ohne energetischen Antrieb der auf elektrische oder mechanische Technologien beruht, sondern nach einem passive Kühlungsprinzip (Dnyandip K. Bhamare, 2019; Dnyandip K. Bhamare, 2019) auf dem physikalischen Prinzip der Thermodynamic (Wikipedia, 2022).

Das von Oluwasola (Oluwasola, 2011) wiederentdeckte Prinzip der alten Griechen und Ägypter wurde bei dem Forschungsprojekt “Approximating Climatic Performance with ANNs” (Zeynep Aksöz, 2018) an der IAAC (Institut de Arquitectura Catalunia) als Grundlage herangezogen um mit Hilfe von Machine Learning und neusten digitalen Produktions- und Analysemethoden das System performative zu optimieren, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..** Das eigens entwickelte KI errechnete Lösungs-Modelle nach dem Prinzip der multifaktoriellen Anpassung. Dabei hat sich herausgestellt, dass der Teilfaktor Oberflächengestaltung und Geometrie der äußeren Schale ganz wesentlich zur thermischen Funktion der Zeers Pots beiträgt (Abbildung 2). Systemisch relevant für die Leistung sind natürlich auch die äußeren klimatische Faktoren wie Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, Aussentemperatur, direkter Sonnenlichteintrag als auch Luftzirkulation und Wind (Vogel, Leaves in the lowest and highest winds: temperature, force and shape, 2009). Da diese Bedingungen sich ständig verändern, ist die Leistung solcher Systeme ephemere und systemtheoretisch komplex zu beurteilen. Die Analyse-Ergebnisse unterstützten aber die Forschung von Gruber & Rupp (Gruber A. I., 2019), dass Geometrie ein bestimmender Faktor für die thermische Leistung sowohl in biologischen als auch in technischen Systemen ist.

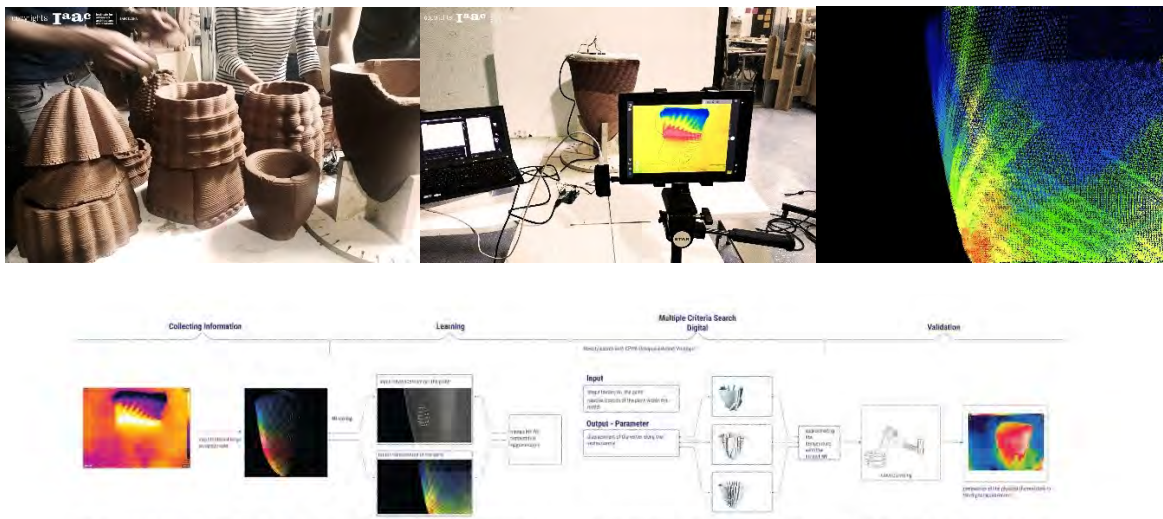


Abbildung 8: Approximierung der klimatischen Leistungsfähigkeit mit künstlichen neuronalen Netzen (ANNs). – Quelle: Zeynep Aksöz, IAAC – Institute for Advanced Architecture of Catalonia, 2018.

Neueste Technologien Nutzen diesen Effekt allerdings auch um Effizienzen von bestehenden Technologie Systemen zu erhöhen. Ein Beispiel dazu haben Forscher der Universität Maryland in Form eines Gels entwickelt, das der "Umgebungsluft in der Nacht Feuchtigkeit entzieht und den gesammelten Wasserdampf untertags wieder kondensieren lässt." Die Idee dahinter nutzt ein Grundprinzip der Thermodynamik und, unter die Solarmodule fixiert, entzieht das Gel so während des Verdampfens der Keramikzelle Hitze. Es wurde eine Kühlleistung von 295 W m² bei 1.000 W m² Sonneneinstrahlung erreicht, die die Temperatur eines PV-Panels im Betrieb unter Laborbedingungen um mindestens 10 °C senkt. Die im Sommer und Winter in Saudi-Arabien durchgeführten Feldtests im Freien zeigten, dass die AWH-Kühlung zu einer Steigerung der Stromerzeugung um etwa 19 bzw. 13 % durch ein kommerzielles PV-Modul führte. (Renyuan Li) Das Gel besteht aus einer Mischung von Kohlenstoff-Nanoröhrchen in einem Polymer und einem wasseranziehenden Kalziumchlorid-Salz, welches durch Kapillarwirkung, ähnlich dem hier vorgeschlagenen System wirkt.

Eine weitere Bio-Inspiration ist die Verdunstung des Schweißes von Säugetieren. Unter dem Konzept „Schwitzhaut zur Gebäudekühlung“ wurde ein spezielles synthetisches thermoresponsives Hydrogel (PNIPAM) entwickelt, das bis zu 90% Wasser in seinem geschwollenen Zustand speichern kann. Bei Erhitzen auf etwa 32°C wird das Gel von einem nassen Zustand in einen trockenen Zustand übergeleitet und gibt dabei das aufgenommene Wasser ab. Es entzieht dabei in diesem Übergangsprozess einen Großteil der Gebäudewärme. Bei dem Forschungsprojekt wurden die Wärmeübertragungseffekte zwischen zwei kleinen Model Häusern - ein unbeschichtetes Haus und ein mit dem Hydrogel beschichtetes Haus – verglichen. Das Ergebnis zeigt, dass die Oberfläche des Modellhauses mit hitzeempfindlicher Hydrogel Beschichtung bis zu 20 C kühler ist als im Vergleich das unbeschichtete Modellhaus. Bei Simulation von tropischer Mittagssonne wird geschätzt, dass dies gleichwertig der Einsparung von 220 kWh Energie pro Jahr für ein Einfamilienhaus ist. (S.C. Fu, 2020). Das entspricht rund 5% des durchschnittlichen Energieverbrauches von 4.450 kWh eines österreichischen Haushaltes. (AUSTRIA, 2017) In Deutschland werden als weiterer Vergleich dazu rund 130kWh Wärmebedarf pro m² Wohnfläche verbraucht. (Umweltbundesamt, 2023)

„Gegenwärtige Strahlungssysteme verfehlen das Potenzial der Konditionierung mit kleinen Temperaturunterschieden. Dünne hydronische Oberflächen mit variabler Morphologie und integriertem mikrofluidem Wasserkreislauf könnten dazu beitragen, einige dieser Einschränkungen zu beseitigen. Eine Studie bei den Hauptautoren Grinham und Bechtold zeigt, wie die Gesamtoberflächenwärmeübertragungsrates von Strahlungssystemen zur Gebäudekühlung erhöht werden kann. Die Strategie besteht darin, faltbare Origami-Oberflächen mit integrierten mikrofluiden Wasserkreisläufen und geprägten gekühlten Segeln aus Gefäßlaminat (VLCs) zu verwenden [79]. Diese neue Dünnschichttechnologie hat das Potenzial, die Energieleistung des ersten und zweiten Hauptsatzes (der Thermodynamik) (Wikipedia, de.wikipedia.org, 2023) von Strahlungssystemen zu verbessern und die verkörpert und betrieblichen Kohlenstoffemissionen von Gebäuden zu reduzieren (Jonathan Grinham, 2020).

Mit der physischen Grundlage hydrodynamischer, thermofluiden nicht-regulierter natürlicher Systeme setzt sich auch die Theorie der „Construal Law“ (Adrian Bejan) auseinander.

„Hohe Temperaturen treiben Wärmeströme zu niedrigen Temperaturen. Dieser natürliche Fluss würde die Wärme zuerst in den kühleren Raum in der Nähe des Umfangs und dann außerhalb des

Systems führen“ (S.59) (Adrian Bejan). Der Aufbau des beispielhaft angeführten Testversuchs (nach den Prinzipien der Constructal Law) eines mikrofluiden Kühlsystems erzeugt einen thermischen Massentransport vom warmen Bereich in den kühleren Bereichen zur Wärmeabfuhr. Je nach abzukühlender Wärmemenge müssen unterschiedliche systemische Ansätze gewählt werden. Diese Techniken werden speziell in der Elektronik Industrie zur Kühlung von Prozessoren bei Höchstleistung angewendet.

Innerhalb der Natur besteht eine solche Beziehung zwischen den verschiedenen systemischen Bereichen in den hierarchischen Strukturen von kleinen Rinnsalen, Bächen, Flüssen und großen Kanäle. Die Verteilung des Wassers in solchen Strömungsnetzwerken erfolgt als Ergebnis von Bejans Forschung nach sogenannten Potenzgesetzen, die durch die energetischen Wirkungsgrade von Geschwindigkeit und Volumen der Wasserströmung in Bezug auf die Querschnittsgröße des Flusses geleitet werden. Wasserströmungen wählen demnach eine baumartige Struktur, um den Durchgangswiderstand durch die Oberfläche des Flussbeckens zu minimieren. Diese Gesetzmäßigkeit des entsprechenden Potenzgesetzes ist skalierbar und daher vom Mikro bis Makrobereich fluider Systeme anwendbar.

Flusseinzugsgebiete spiegeln fest etablierte Regeln wider, die ihre Kanalanzahl und -länge in Beziehung setzen. Dazu gehört die Tatsache, dass Flüsse mäandrieren – das heißt, sie haben ein schlangenartiges Muster, dessen Wellenlänge proportional zur Breite des Kanals ist. Außerdem ist die Breite des Kanals etwa fünf- bis zehnmal größer als seine Tiefe. In diesem Kontext hat Robert Hortons herausgefunden, dass die Anzahl der Tochterströme, die mit einem Mutterstrom verbunden sind, zwischen 3 und 5 liegt und dass die Länge des längsten Tochterstroms ungefähr proportional zu der des Mutterstroms sein sollte. Das entspricht einem Proportionalitätsfaktor zwischen 1,5 und 3,5.(p.73) (Adrian Bejan)

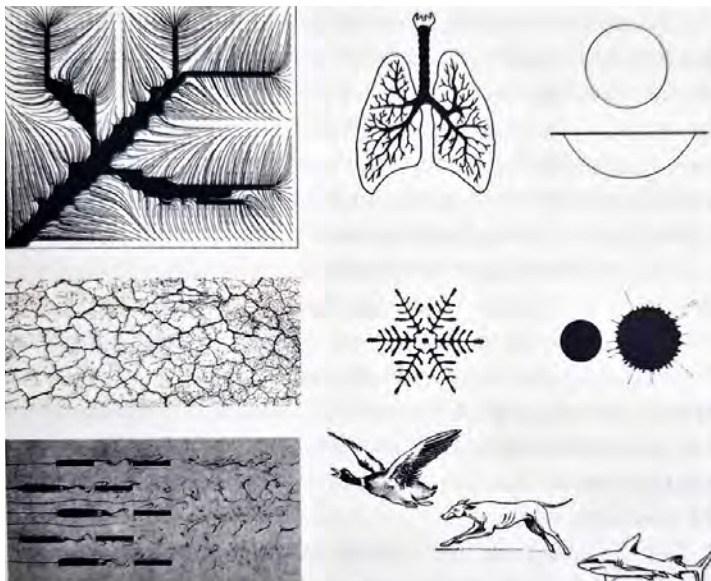


Abbildung 9: Belebte und unbelebte Strömungssysteme nach dem Konstruktionsgesetz. – Quelle: Bejan, A. (2000). Shape and Structure, from Engineering to Nature. Cambridge University Press.

Top row: river drainage basins, bronchial trees, and round-duct and open-channel cross sections.

Middle row: cracks in shrinking solids, snowflake solidification, and splat versus splash when a liquid droplet hits a wall.

Bottom row: laminar versus turbulent flow and animal locomotion (flying, running, and swimming).“

Nach Bejan entwickeln sich alle Strömungssysteme, vom anorganischen System des Flusses bis zum organischen System von Blutgefäßen und Luftwegen, in Richtung der gleichen Designstruktur (S. 74). Murrays Law (Wikipedia, en.wikipedia.org, 2022) gilt hier als Distributionsmodell für fluide dynamische Prozesse und Kreisläufe als auch um Druckverluste zu minimieren. Dies führt „gesetzmäßig“ zur Förderung einer gleichmäßigen Strömungsverteilung.

In Kontext zu dem von uns erforschten Projekt Bio-Cool ist die Wirkung von dem vorgeschlagenen Verdunstungssystem auch von der bestehenden Luftfeuchtigkeit und die bestimmende klimatische Bedingung und der damit verbundenen geographischen Lage der Installation abhängig. Atmosphärische wasserbasierte Kühlung ist ein wichtiger und energieeffizienter Beitrag zur gebäudetechnischen und städtebaulichen Nachhaltigkeit.

Bei Evaporierenden Kühlsystemen sind jedenfalls zwei thermodynamische Eigenschaften relevant. Einerseits sind das die materiellen Eigenschaften der Materialität des Produktes an sich, die die Feuchtigkeit innerhalb des Systems durch Kapillarwirkung transportieren, andererseits sind das Oberflächeneigenschaften des Werkstoffes und dessen Verhältnis zu den Außenbedingungen, welche die Verdunstung begünstigen. Dabei gilt es beide Systeme aufeinander abzustimmen und in einer ausgleichenden Balance zu halten, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**



Abbildung 10: NBF Osaki Building (ehemals Sony City Osaki), Tokio, Japan. – Foto: Kentin, Wikimedia Commons, Lizenz: CC BY-SA 3.0.

Forschung und Entwicklung zu evaporierenden Kühlsystemen für den architektonischen Außenraum lassen sich speziell im Bezug zu grüner Bedachung (Dirk Gijsbert Cirkel, 2018) als auch Biomasse als Fassadenelement finden. Dabei spielen Aerosolemissionen eine Rolle um die Verschlimmerung UHI-Effekte einzudämmen, wenn nicht sogar eine Abschwächung der auch damit verbundenen gesundheitlicher Auswirkung zu erzielen. Dabei zeigt sich, dass eine sorgfältige Auswahl im komplexen System von technologischer Materialität und Biomasse bzw Bepflanzung mit der entsprechenden Substratgrundlage ganz entscheidend Einfluss auf die Energiebalance und Effizienz solcher Anlagen hat. Eine Substanzielle Verringerung der Aerosol Konzentration durch “Austrocknung der Luft” ausgelöst durch den UHI-Effekt bzw. die Veränderung der klimatischen Bedingungen resultiert in manchen Regionen zu einer Erhöhung der Oberflächentemperatur.

2.4. Schaffung mikroklimatischer Bedingungen

Die Befeuchtung über alternative architektonische Systeme mit einer entsprechenden Evaporationsrate beeinflusst das Mikroklima daher nachweislich positiv, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..** Circulare Systeme sind aber eine Grundvoraussetzung, um solche passiven Technologien nachhaltig und Energieeffizienz betreiben zu können. Auch die evaporative Kühlung von Gründächern hat Auswirkungen auf das Mikroklima. (Dirk Gijsbert Cirkel, 2018)



Abbildung 11: Spanischer Pavillon der Expo 2008 in Saragossa, Spanien (Architekten: Mangado Asociados). – Foto: David Abián / Rodelar, Wikimedia Commons, Lizenz: CC BY-SA 4.0.

2.4.1. Kontext: Urbaner Raum

Der “Urban Heat Island Effect” stellt durch die klimatischen Veränderungen eines der größten Grundprobleme im städtebaulichen Raum dar. “Die Landbedeckung und Morphologie von Städten führen ferner zu erheblichen innerstädtischen Schwankungen von Luft und Luft

Oberflächentemperaturen“ (Nazarian, 2022) Weiters wird in diesem detailliert weiter ausgeführt wie der UHI-Effekt weitgehend von separaten Mechanismen in Bezug auf die damit verbundenen größeren Temperaturänderungen von regionale und globale Klimaveränderungen angetrieben wird. Diese Veränderungen lassen sich bereits seit den 1950iger Jahren weitgehend weltweit beobachten und resultiert global seit den 1980er Jahren zu bereits messbaren Unterschieden an ansteigenden Hitzetagen. Die Autoren argumentieren, dass diese ansteigenden Hitzewellen Folgen der Gesundheit bei Menschen und Ökologie haben und diese multiplen Stressfaktoren nicht allein durch lokale Anpassung reduziert werden können. Tatsächlich lässt sich der UHIE auf Grund von limitierten lokalen Datensätzen unterschiedlichster Skalierung nicht eindeutig simulieren und die Folgen sind daher nur sehr schwer messbar. (Nazarian, 2022) Katalysatoren sind jedoch zumeist die falsche Anwendung von Hitze speichernden Materialien an Fassaden und an städtebaulicher Infrastruktur, welche unter Tags Wärme durch Solareintrag speichern und bei Nacht über Abstrahlwärme wieder abgeben. Der dadurch wirkende Temperaturunterschied verursacht gravierende thermische Turbulenzen, sodass das Mikroklima der Stadt in manchen Ökosystemen wie Phoenix Arizona nachweislich bereits das Makroklima entscheidend verändert hat.

2.4.2. Kontext: Materialeigenschaften

Mikrofluide Systeme (Jonathan Grinham, 2020) spielen im Außenraum nur eine kleine Rolle da im Zentraleuropäischen Raum die Möglichkeit der Gefrierung einerseits und andererseits Verschmutzung durch Verstopfung der Kanäle diesem Effekt entgegenwirken. Die Materialität von Ton als Basis dieses Research hat für sich schon ausreichend performative Wirkung durch Ansaugung und Evaporation, sodass Microfluide Systeme nur eine bedingte Leistungsverbesserung bringen.

Anders verhält es sich zu fraktalen Geometrien, die in Atmungssystemen und Gefäßsystemen von Pflanzen und Tieren weit verbreitet sind. Diese wurden aufgrund ihres intrinsischen Vorteils eines minimierten Strömungswiderstands und einer starken Wärmeübertragungsfähigkeit in den Wärmeübertragungsbereich in die Forschung integriert. (Zhiwei Huang, 2017) Im speziellen Fall der Forschung an Bio-Cool wurden fraktale Geometrien erforscht um das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen zu maximieren und damit den Verdunstungsprozess zu fördern. Grundlegende Studien zu fraktalen Theorien in der Natur wurden schon in einigen Vorgängerstudien erforscht [(Bejan A. L., 2008) (Bejan A. , 2003) (Sherman, 1981)], siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**

Die wasseraufnahmefähigsten Materialien in den grobkeramischen Erzeugnissen sind Irdenware und Steingut. Auch Ziegel weisen eine poröse Scherbenstruktur auf. Die gewöhnlichen Anforderungen an die Ziegelerzeugnisse (Dachziegel, Maurerziegel, Deckenziegel, etc.) sind üblicherweise hinreichende Festigkeit, Farbe, Form, Schall- und Wärmedämmeigenschaften, Unzerfrierbarkeit und Wasserundurchlässigkeit. Für unser Vorhaben sind die kapillaren Eigenschaften des Materials von größter Bedeutung. Ein Forschungsfokus in der Baukeramik und auch in unserem Forschungsvorhaben ist die Klimawirksamkeit des Baumaterials.

Einen interessanten Beitrag auf diesem Gebiet leistete das Forschungsteam der TU München unter Leitung von Philipp Molter, Associate Professor am Lehrstuhl für Entwerfen und Gebäudehülle. Der Fokus des Forschungsvorhabens *Adaptive Bricks* lag an der Entwicklung von klimatisch wirksamen Fassaden, die den Urbanen Hitzeinseln entgegenwirken sollen. Die beste Gebäudehülle gegen Überhitzung der Fassade ist nach wie vor eine mit biologischer Substanz begrünte Fassade – dies

aufgrund der Verdunstungskühlung der Pflanzenblätter. Dieses Prinzip wurde nun auf anorganische poröse Ziegel übertragen.

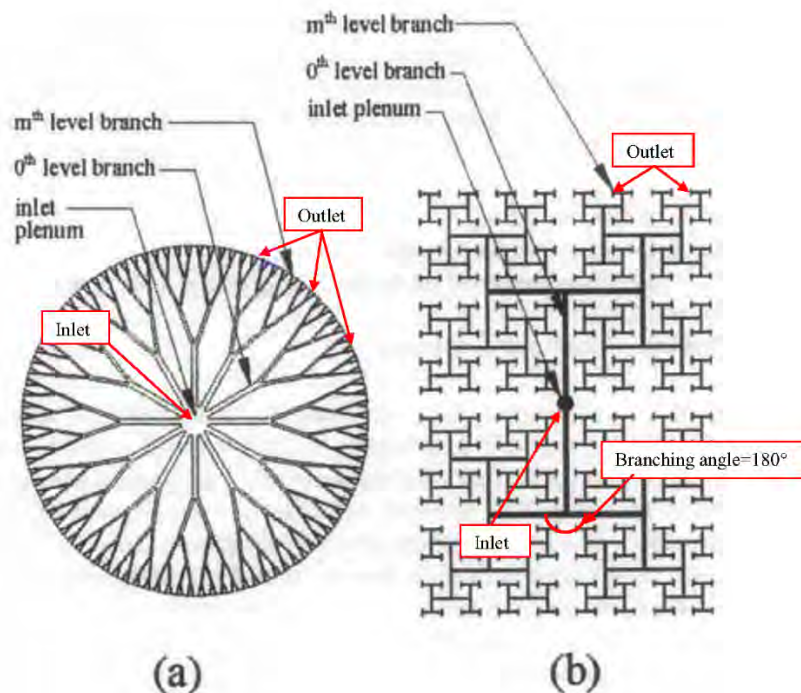


Fig. 1 – Two main shapes of fractal heat sinks: disk shape (a) and rectangular shape (b) (Pence, 2002).

Abbildung 12: Zwei Hauptformen fraktaler Wärmetauscher. – Quelle: Pence, D. (2002); Huang, S. (2017).

In einem Versuchsaufbau zu klimatischen Ziegelfassaden wurden die hygrothermischen Zusammenhänge (gekoppelte Wärme- und Feuchtetransport in den Steinen) ermittelt und die Oberflächentemperaturen sowie die Intensität der Verdunstungskühlung bei Ziegel unterschiedlicher Dichte und Farbe gemessen. Im Durchschnitt zeigte sich, dass die Oberflächentemperaturen von nassen Ziegeln durch die Verdunstungskühlung rund 7°C niedriger liegen als die von trockenen Ziegeln. Auch die Farbe der Ziegelsteine beeinflusste nachweislich die Temperaturkurve zwischen hellen und dunklen Steinen und die Oberflächentemperatur der verschiedenen Ziegelsorten zeigte unterschiedliche Aufheizpotentiale sowie variierendes Verdunstungsverhalten auf. (Sigmund, 2019) Aus dieser Studie geht auch hervor, dass die Farbe des Scherbens die Verdunstungsfähigkeit wesentlich beeinflusst. Durch die Einfärbung der lederharten Keramik mit Engoben kann die Farbe in unterschiedliche Richtungen beeinflusst werden. Es können aber auch Sinterengoben eingesetzt werden (diese besitzen die Eigenschaft Poren zu verschließen) um einzelne Bereiche des keramischen Moduls zu verschließen. Diese wasserundurchlässigen Bereiche können potentiell als Wasserspeicher verwendet werden

2.5. Temperatur – Porosität

Die Materialeigenschaften (Porosität, Festigkeit, Saugfähigkeit, usw.) von Keramik sind sehr komplex und wirken im Zusammenspiel der Tonbestandteile und der Endtemperatur und Zeitspanne des Brandes -je niedriger die Endtemperatur des Brandes, desto poröser das Endmaterial. Allerdings verringert sich die mechanische Festigkeit des Scherbens und die Gefahr des Auffrierens wird erhöht.

Um diesen Eigenschaften entgegenzuwirken können Zuschlagstoffe für bessere Porenbildung wie zum Beispiel Mackedanz, Sägemehl oder Papierschlamm verwendet werden.

2.5.1. Das Auffrieren

Ein in unseren Breitegraden ernstzunehmendes Problem der porösen Keramik stellt das Auffrieren dar. Beim Einfrieren vergrößert sich das Volumen des Wassers um 9%. Dabei kommt es zu einem Druck in den Porenwänden welcher Gefügeschädigung, Festigkeitsminderung und zum unerwünschten Abplatzen des Materials an der Fassade führen kann.

Als wichtigste Parameter für die Frostepfindlichkeit gelten der Sättigungsgrad, die Wassertränkung der Ziegel, der Grad der Unterkühlung des Wassers bis zum Gefrieren, die Porenstruktur und die Porenradialverteilung. Eine Frostschädigung ist theoretisch dann zu erwarten, wenn die Poren zu mehr als 91% mit Wasser gefüllt sind und bei Ausdehnung des Wassers im Ziegel dieses nicht in leere Porenräume ausweichen kann. Die praktische Erfahrung lehrt allerdings, daß schon bei Sättigungsgraden unter 70% Frostschäden entstehen können. (Scholze, 1983)

Die Frostwiderstandsfähigkeit kann durch höheren Brand und durch homogene Aufbereitung der Masse vermindert werden. Die Verwendung saugfähiger hochgebrannter schamotierter Steinzeugtone ermöglicht die Herstellung hochwertiger teilglasierter Module. Dadurch wird eine fragmentarische Versiegelung des Scherbens ermöglicht und die versiegelten Flächen können als Wasserreservoirs genutzt werden.

Bei einem systemischen Ansatz ist es bei der formalen Umsetzung der evaporativen keramischen Hülle sinnvoll auf austauschbare Elemente zu setzen, die im Falle eines Frostschadens unkompliziert ausgetauscht werden können.

2.5.2. Porenform

Unterschiedliche Porengrößen und Porenverteilungen weisen unterschiedliche Frostanfälligkeiten auf. Die sogenannten Sackporen, weisen mehr Volumen auf wodurch diese nicht vollständig mit Wasser getränkt werden. Das Eis kann sich daher besser ausbreiten und weniger Druck innerhalb der Porenwand erzeugen. Allerdings haben die Sackporen schlechtere kapillare Wirkung.

Wasseraufnahmefähigkeit und Verdunstungseigenschaften der Poren:

Entscheidend für die Wasseraufnahmefähigkeit und die Verdunstungseigenschaften der Poren sind ihre geometrische Beschaffenheit, die Verteilung im Scherben und die Größe des Porenvolumens im Verhältnis zu dem Gesamtvolumen des Baustoffes.

Bei der Porengeometrie unterscheidet man durchgehende Poren, Sackporen, geschlossene Poren, Verzweigungen, Verbindungs- und Flaschenhalsporen. In Bezug auf kapillare Aufnahme sind Sackporen nur bedingt möglich, da sich in diesen Poren ein Gegendruck aufbaut, der dem Wasserfluss durch die Kanäle entgegenwirkt. Unter Beachtung der systemisch relevanten Bezugsgrößen (*Constructural Law*) sind durchgehende Poren dagegen am besten wirksam, um kapillar gefüllt zu werden.

Bei der Porengröße und Porenverteilung werden sogenannte Mikroporen $r < 10^{-7}$ m, Makro- und Kapillarporen $r > 10^{-7}$ m und Luftporen $r > 10^{-4}$ m unterschieden. Kapillar leitfähig sind aber nur die Makro- oder Kapillarporen im Größenbereich von 10^{-7} m bis 10^{-4} m.

Die kleineren Mikroporen und größeren Luftporen können nur unter Druck und nicht kapillar gefüllt werden. Für die kapillare Leitfähigkeit des Baustoffs spielt deshalb der Anteil an Kapillarporen am Gesamtporenvolumen eine große Rolle.

3. Entwurf Bioinspirierter Morphologien und deren Simulation

Dieses Kapitel demonstriert wie man die Formoptimierung von Platten strukturieren kann und wie Visualisierungen und Simulationen angesetzt werden können, um die Verdunstungseffizienz zu eruieren.

3.1. Auswahl geeigneter Designprinzipien über Verdunstungseffizienz von Blatt Geometrien

Das Projekt BIOCOOL stellt eine Analogie zur Funktionsweise von Bäumen und Blättern her. In Laubbäumen bestimmen die Formen von Blättern auch die thermischen Eigenschaften und insbesondere die Effizienz von Verdunstung und somit Kühlung. So sind z.B. Blätter an der Spitze von Laubbäumen, die der direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind, anders geformt als Blätter im unteren, schattigeren Bereich der Baumkrone ("Sun and shade leaves") um eine Überhitzung des Gewebes zu verhindern. Gleichzeitig wirkt die Verdunstungsleistung von Bäumen kühlend auf ihre direkte Umgebung.

in Ariana Rupp's Dissertation (Rupp, 2020) werden erste Versuche mit Tonelementen untersucht. Experimente in 2D und 3D mit verschiedenen porösen Materialien wurden durchgeführt, um den Effekt besser zu verstehen und die Grundlagen für eine Übertragung in Kühlungstechnologien zu erstellen. Basierend auf der Interpretation von Blättern als Verdunstungsschnittstellen und auf der Hypothese, dass ausgestülpte Blattränder den Wärme- und Stofftransport erleichtern, wurde die Wirkung von zwei- und dreidimensionalen Protrusionen auf die Verdunstung mit Modellen getestet. Durch die Erkundung über verschiedene Strukturen, Größen und Materialien, sowohl unter kontrollierten Bedingungen als auch im Freien, wurde die Anwendbarkeit und das technologische Potenzial von blattinspiriertem Verdunstungsdesign demonstriert.

Die Übersicht über die untersuchten Verdunstungsstrukturen mit blattinspirierten Protrusionen, die mit unterschiedlichen, nicht ebenen Profilen, Dimensionen und wasserabsorbierenden Materialien ausgeführt wurden: Papierstreifen-, Zelluloseschwamm- und Keramikmodelle.

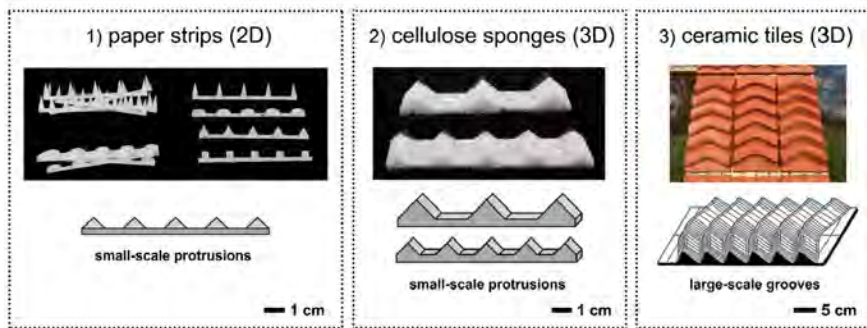


Abbildung 13: Papierstreifen-, Zelluloseschwamm- und Keramikmodelle. – Quelle: Rupp, J. (2020).

Was die Darstellung im Schnitt betrifft können wir folgende Beobachtungen zusammenfassen. Die Variable " $s_{0.5}$ " bewertet den Abstand zwischen den Rillen auf halber Höhe der maximalen Querschnittslänge der Rille. Die Darstellungen der Grenzschicht (abgekürzt BL) über dem dreieckigen Vorsprung und den Rillen dienen lediglich der Veranschaulichung. Vorsprünge und Rillen sind nicht maßstabsgetreu dargestellt.

$$l_{avg} = \frac{1}{w_{max}} \int_w l(x) dx, \quad w_{avg} = \frac{2}{l_{max}} \int_{l/2} w(y) dy \quad (1)$$

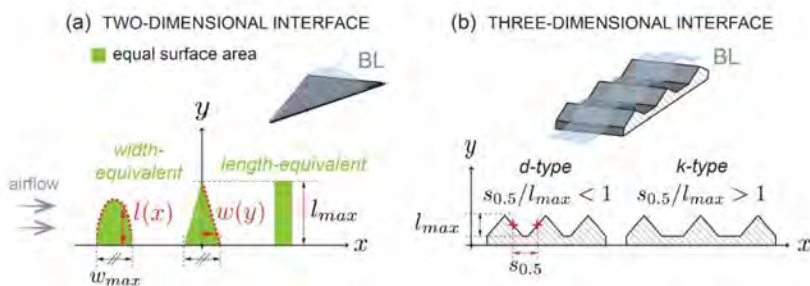


Abbildung 14: Geometrische Abstraktionen für Vorsprünge und Rillen. Gezeigt werden Vorsprünge mit unterschiedlicher Länge sowie eine dreidimensionale Rille mit variierenden Abständen. – Quelle: Rupp, J. (2020).

3.2. Formoptimierung für Gebäudehüllen mit Verdunstungskühlung

Das Ziel dieser Optimierung war es, die Formen der Platten so zu gestalten, dass eine stabile und hinreichend schnelle Verdunstung über die Vorderseite möglich wird. Hierbei wurde auf frühere Untersuchungen der Blattgeometrien zurückgegriffen und die geometrischen Rahmenbedingungen unter Berücksichtigung der limitierenden Faktoren der verfügbaren Produktionsmethoden definiert.

3.2.1. Arbeitsmethode und „ClayDisplacer“

Um verschiedene Designs schnell zu entwerfen, wurde ein parametrisches Design-Tool, genannt „ClayDisplacer“, entwickelt, das in der CAD-Software Rhinoceros 3D und dem parametrischen Werkzeug Grasshopper implementiert wurde. Dieses Tool ermöglicht es, verschiedene Designs zu erstellen und Variationen zu generieren, die den Anforderungen für die Produktion mittels 3D-Druck oder CNC-Fräsen gerecht werden.

ClayDisplacer ermöglicht es, organische und fließende Formen schnell und einfach zu erzeugen. Die Hauptanforderung besteht darin, dass die erstellten Formen keine Unterschnitte aufweisen, da diese weder mittels 3-Achsen-CNC Fräsen noch mittels 3D-Druck produziert werden können. Des Weiteren würden Unterschnitte, sofern druckbar, das Abdrücken bzw. Entschalten unmöglich machen. Weiters gilt es, steile Sprünge in der Form zu vermeiden, da diese auch eine Abformung erschweren.

Das entwickelte Tool ClayDisplacer arbeitet auf der Grundlage von Linien. Diese werden in 2D auf die Grundfläche gezeichnet. Das Tool nimmt dieses Set an Linien als Eingabe und erzeugt ein 'Distance Field' zu den Linien auf der Definierten Grundfläche. Dieses Feld wird verwendet, um die einzelnen Flächenpunkte in der Höhe zu verschieben. Mittels verschiedener Parameter kann man in Echtzeit den Einflussbereich (Radius), sowie die Form des Verlaufes (Profil) bestimmen, siehe **Fehler!**

Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..

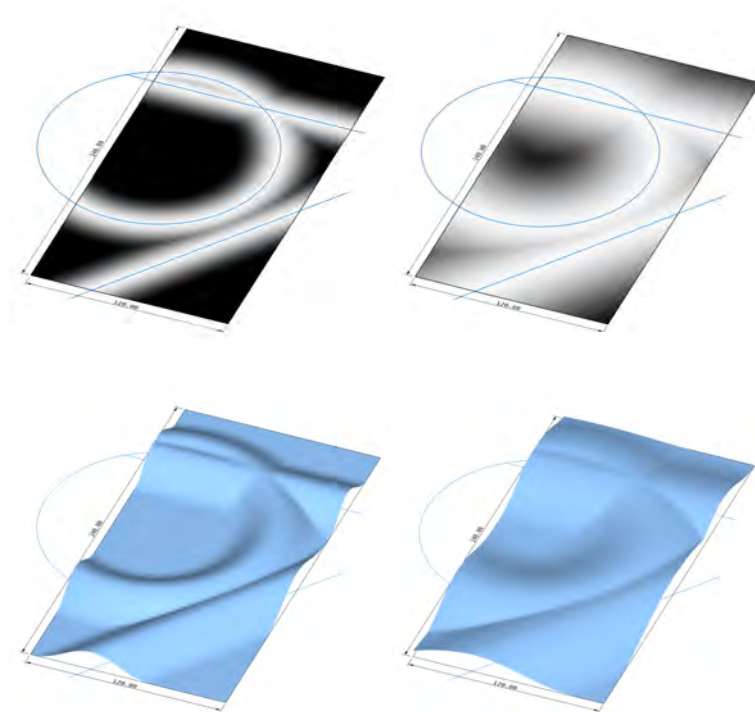


Abbildung 15: Visualisierung der Distance Fields und deren Anwendung. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

Mittels verschiedener Parameter steuert man das Höhenprofil. Die Implementierung ist eine Mischung aus Easing-Funktionen (EaseInOut) und einer Funktion erster Ordnung mit einstellbarer Steigung. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sieht man ein paar Beispiele mit unterschiedlichen Schnitten.

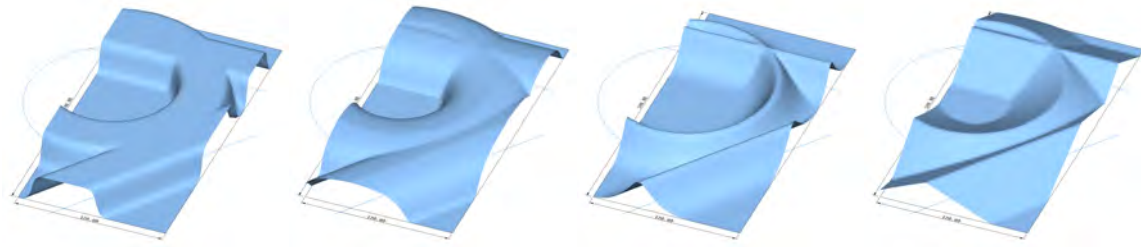


Abbildung 16: Beispiele mit unterschiedlichen Übergängen. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

Auf den Graphen bei **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sieht man verschiedene Konfigurationen der Parameter. Auf allen Bildern ist der Parameter A von 0.0 bis 1.0 in 15 Schritten überlagert. Die Serie zeigt, wie andere Parameter B, C, K und W das Profil beeinflussen. Während die Parameter A und B einen weichen Übergang erzeugen, kann man mit C, K und W (zweite Zeile) scharfe Kanten erzeugen.

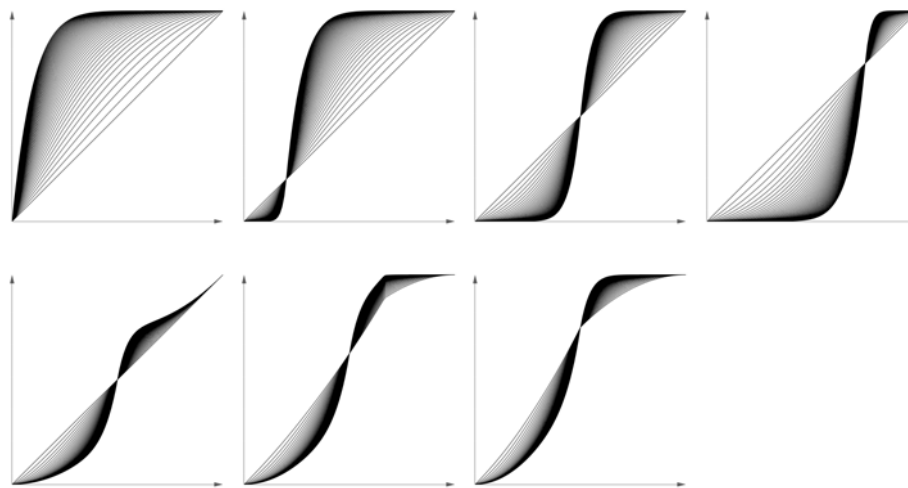


Abbildung 17: Graphen mit den Parametern A und B (obere Reihe) sowie C, K und W (untere Reihe). – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

ClayDisplacer wurde als Komponente in Grasshopper mittels C# implementiert. Dadurch kann man mehrere dieser Komponenten hintereinanderschalten, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, um einerseits Linien-Sets mit unterschiedlichen Parametern zu versehen und andererseits die Art der Überlagerung zu steuern. Es ermöglicht sowohl additive als auch subtraktive Überlagerungen, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**.

Geometrien zu verwenden. Insbesondere schien sich ein "H-Baum", siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dafür gut zu eignen. Dabei handelt es sich um ein flächenfüllendes Fraktal mit einer Hausdorff-Dimension von 2. Ausgehend von einer Linie werden an den Knoten neue Linien in Form des Buchstabens "H" hinzugefügt. Bei jeder Iteration werden weitere "H"-Elemente an die Knoten der vorherigen Iteration angehängt und die Größe der neuen Elemente skaliert. Diese Hierarchie aus Linien und Maßstäben ermöglicht es, verschiedene Hierarchieebenen in Gruppen in das oben beschriebene Tool einzugeben. Jede Gruppe erhält ihr eigenes Set an Parametern, wie beispielsweise Radius, Stärke oder additiv/subtraktiv, um so mit einem Set an Kurven verschiedene Designs zu erzeugen. Es entstand so Version 1 des H-Baumes, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**

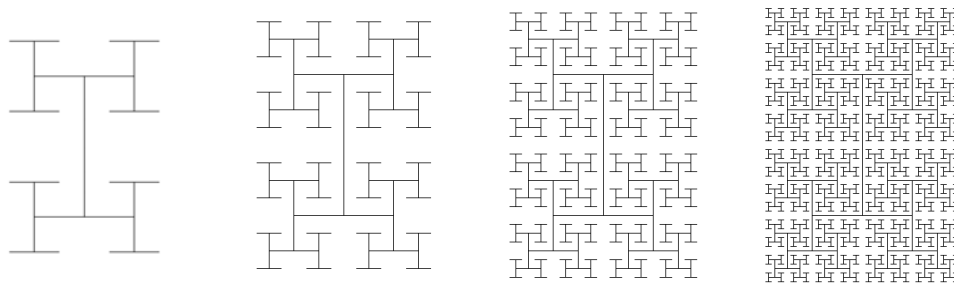


Abbildung 20: H-Baum mit 2 bis 5 Iterationen. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

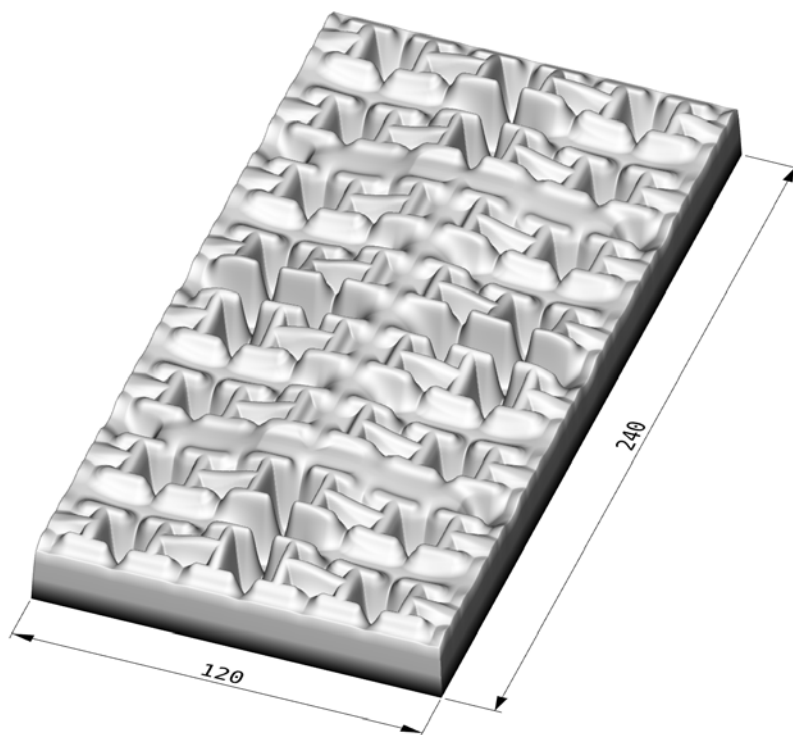


Abbildung 21: Version 1 des H-Baumes (physisch produziert). – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

Eigenschaften

Volumen	517 cm ³
Fläche	890 cm ²
Fläche/Volumen	1.72 (sa/vol)

Die Visualisierung der Zwischenschritte, die mittels ClayDisplacer erzeugt wurden und überlagert wurden, um das finale Design zu generieren kann man in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sehen. Das erste Bild zeigt die Linien, die als Ausgangspunkt genommen wurden. Da bei einem H-Baum die einzelnen Iterationen separat gruppiert werden können, werden in den darauffolgenden Schritten immer nur bestimmte Iterationen verwendet. Beim zweiten Bild Iteration 1 und 2, beim dritten Bild 3 und 4, und beim letzten dann 5,6,7 und 8.

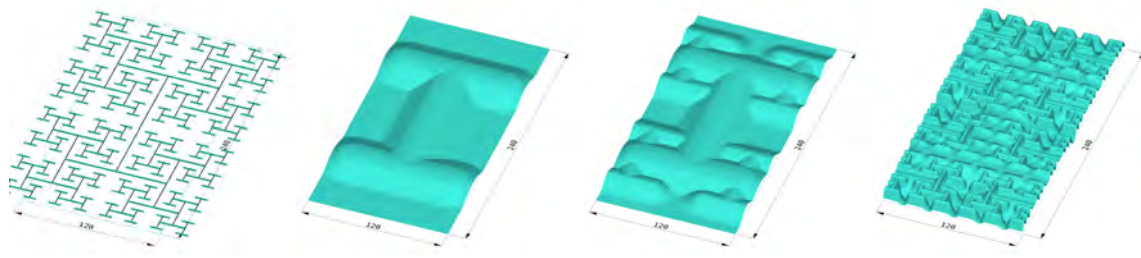


Abbildung 22: Visualisierung der Zwischenschritte mittels ClayDisplacer. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

Eine weitere Auswahl von Entwürfen mit additiven und subtraktiven Parametern sieht man in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**

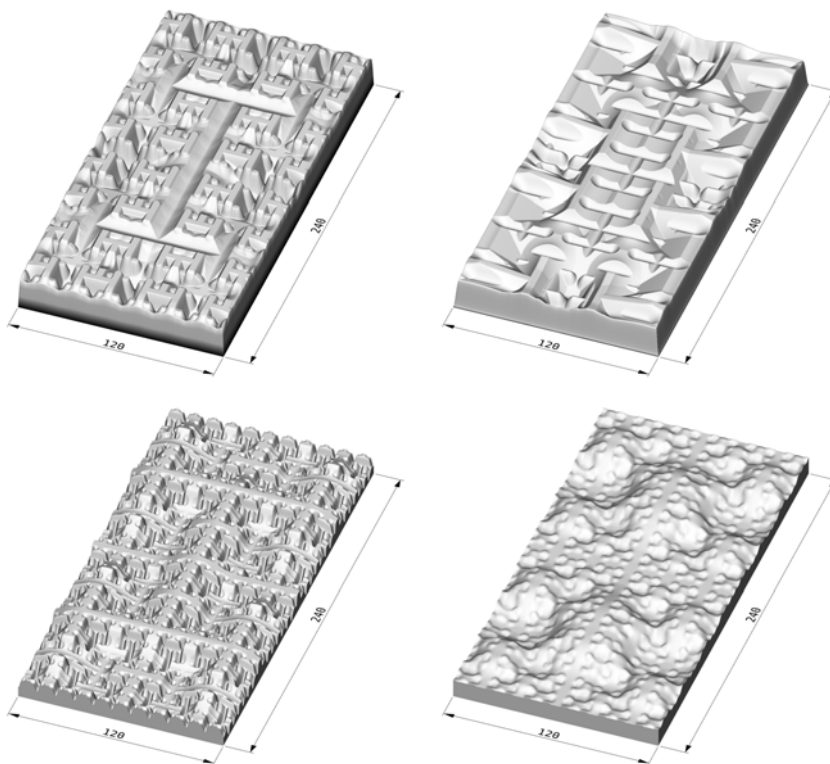


Abbildung 23: Verschiedene Versionen des H-Baums. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

Im Zuge dieser Untersuchung wurden noch viele weitere Designs erzeugt, aber nicht weiterverfolgt, da diese im Hinblick auf die Produktion und dem Verhältnis von Fläche zu Volumen nicht vielversprechend schienen.



Abbildung 24: Visualisierung verschiedener Entwürfe. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

Ein anderer Ansatz, der verfolgt wurde, war Linien bzw. Kurven als Eingabe für ClayDisplacer zu verwenden. Verschiedene Sets von Linien wurden additiv bzw. subtraktiv mittels Claydisplacer überlagert, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..** Von den 6 Versionen wurde letztlich eine Produziert, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**

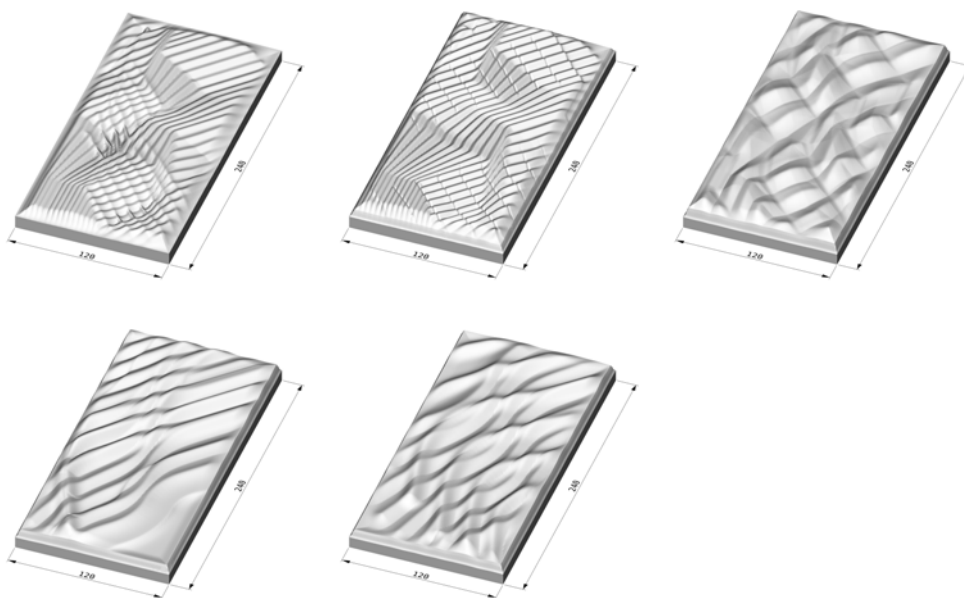


Abbildung 25: Überlagerungen mittels ClayDisplacer. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

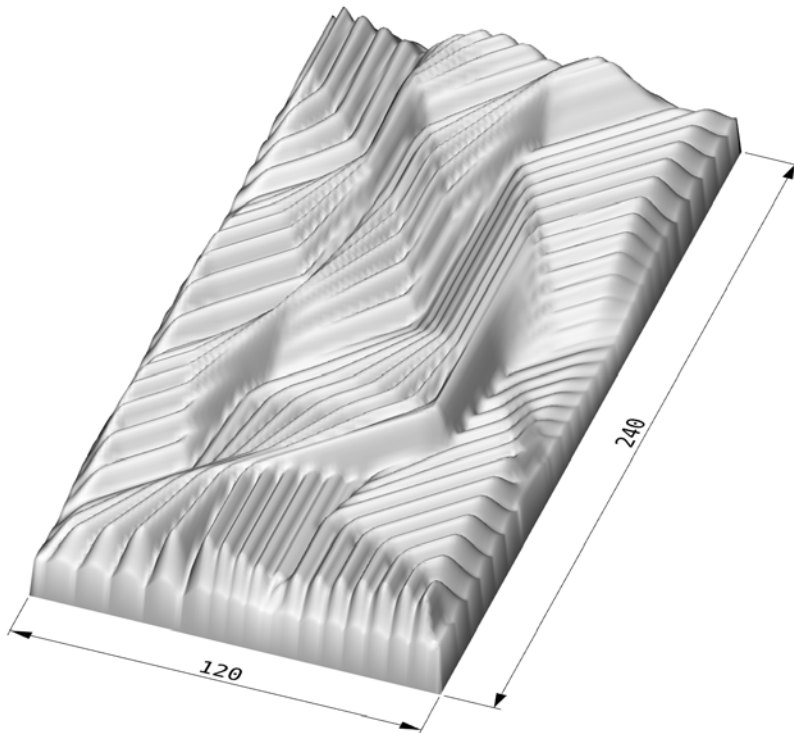


Abbildung 26: Produzierte Variante der Serie „Lines“. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

Eigenschaften

Volumen	615 cm ³
Fläche	911 cm ²
Fläche/Volumen	1.48 (sa/vol)

Die letzte erzeugte Serie, genannt 'Tilings', war der Versuch mehr Oberfläche und lokal kompakte Volumen zu schaffen. Da die Verdunstung nur an der Oberfläche stattfindet, muss das Wasser im Inneren des Materials 'nachrücken', um zur Oberfläche zu gelangen. Das ist der Grund, warum ein Optimieren hin zu einer großen Oberfläche alleine nicht genug ist. Bei den Tilings wurde versucht, das zu berücksichtigen. Es wurden drei Varianten entworfen. Alle haben dieselben Linien als Quell-Geometrie, die in ClayDisplacer verwendet wurden. Die drei Varianten unterscheiden sich daher nur durch die Einstellungen der Parameter von ClayDisplacer.

In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sieht man die Linien Geometrie, die für alle drei Varianten verwendet wurde. Rechts ist ein Zwischenschritt, der manche Linien durch Flächen ergänzt. Dies war nötig, um mehr Kontrolle über die Generierten Flächen zu erlangen. Das beschriebene Arbeitsprinzip mittels des Distance Fields ermöglicht sonst keine konstant gefüllten Flächen, da es immer einen Verlauf ausgehend von den Eingabelinien errechnet.

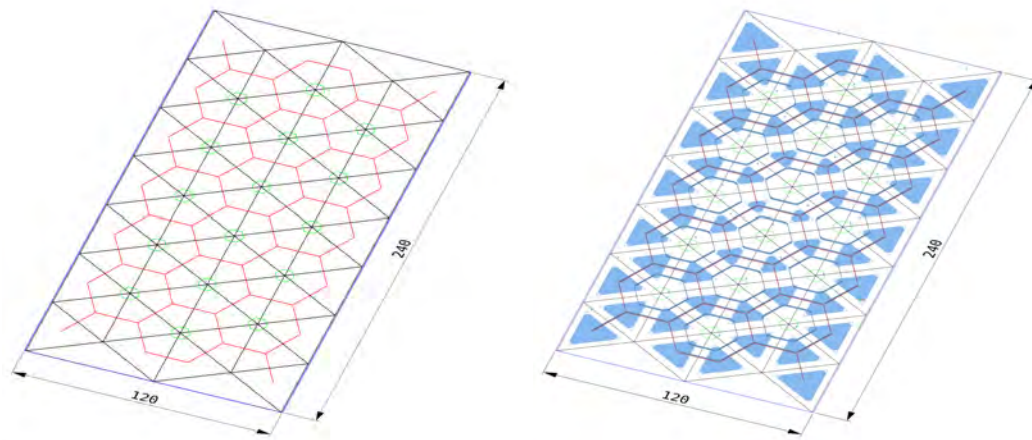
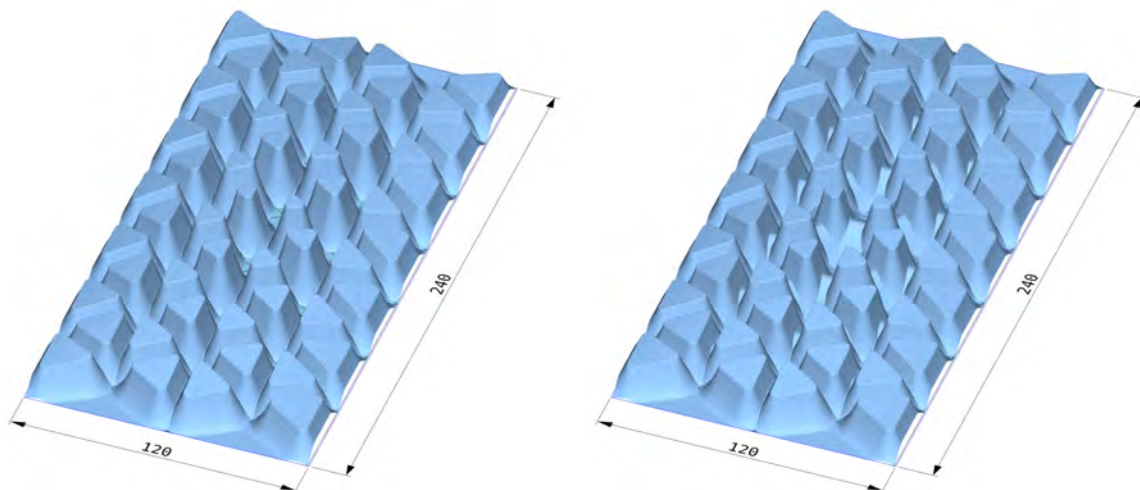


Abbildung 27: Liniengeometrie, die für alle drei Varianten verwendet wurde, sowie ein weiterer Zwischenschritt mit Flächen.
– Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

Es folgt eine visuelle Darstellung von vier Zwischenschritten der Formgenerierung. Zwischen jedem Schritt sind eine oder mehrere Instanzen des ClayDisplacers aktiv. Mittels der beschriebenen Überlagerungen ergibt sich das finale Design in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**



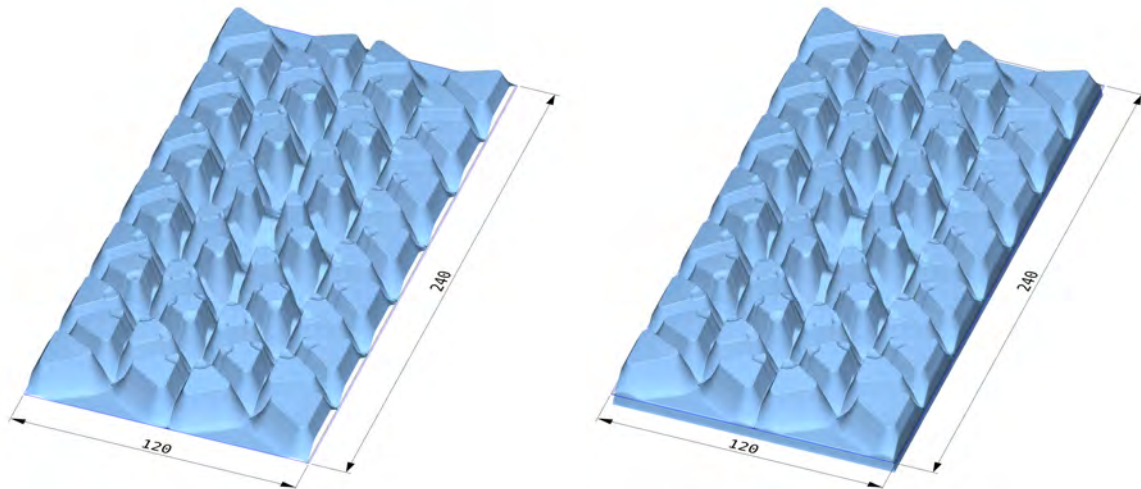


Abbildung 28: Visualisierung verschiedener Zwischenschritte mit ClayDisplacer. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

Die finale und auch physisch erzeugte Variante sieht man in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** bis 31.

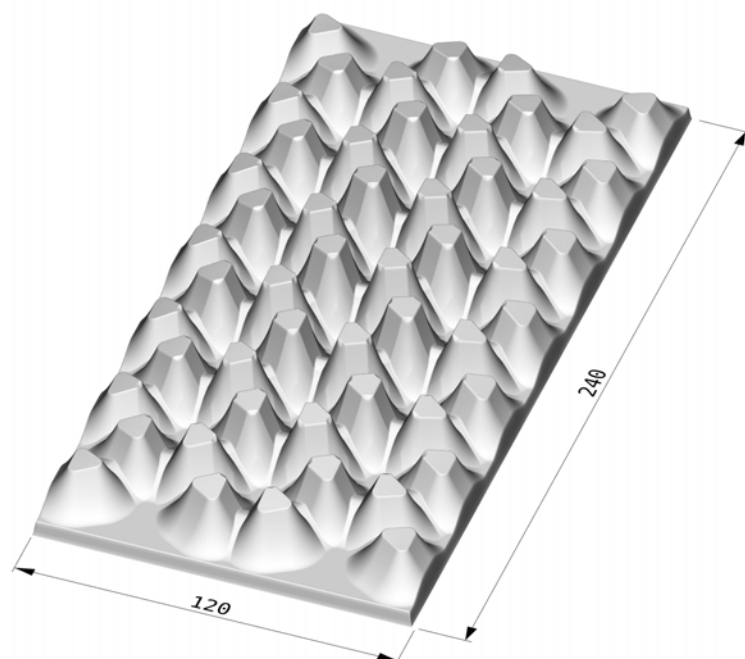


Abbildung 29: Produzierte „Variante 1“ der Serie Tilings. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

Eigenschaften

Volumen	380 cm ³
Fläche	835 cm ²
Fläche/Volumen	2.19 (sa/vol)

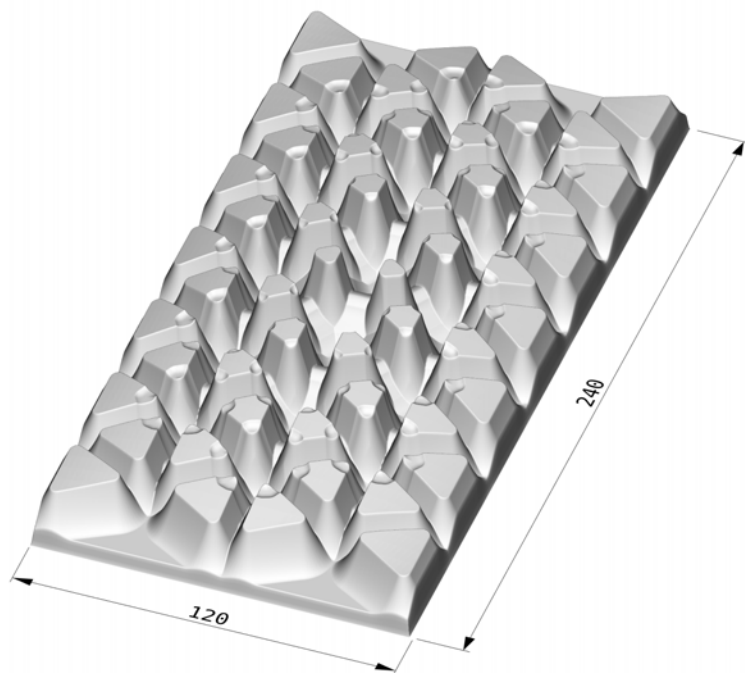


Abbildung 30: Produzierte „Variante 2“ der Serie Tilings. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

Eigenschaften

Volumen	380 cm ³
Fläche	835 cm ²
Fläche/Volumen	2.04 (sa/vol)

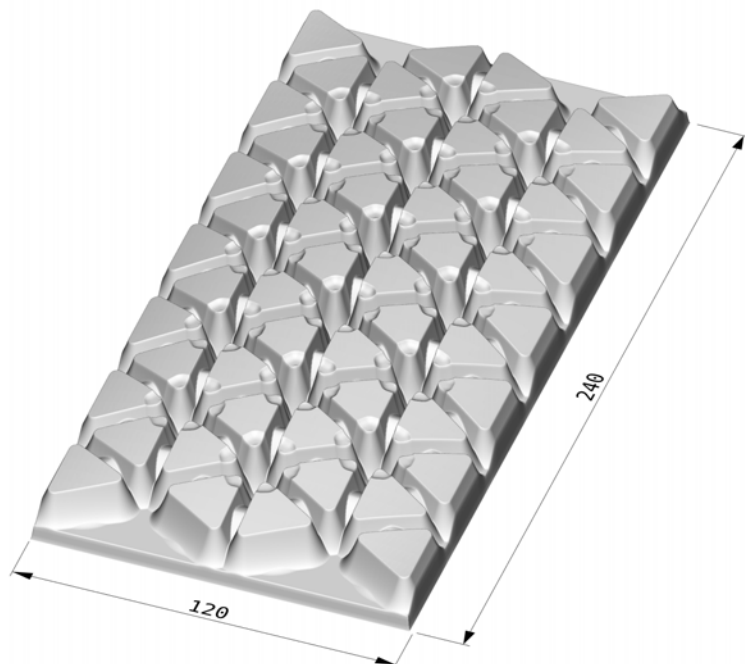


Abbildung 31: Produzierte „Variante 3“ der Serie Tilings. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

Eigenschaften

Volumen	447 cm ³
Fläche	857 cm ²
Fläche/Volumen	1.92 (sa/vol)

3.3. Simulation und Visualisierung der Verdunstungseffizienz von den zu testenden Platten

3.3.1. Grundidee für „ClaySim“

Die zuvor erläuterten Designstrategien (Kapitel 3.2) ermöglichen eine sehr gute Kontrolle der Gestaltung der Formen, allerdings liefern sie während des Designprozesses keine unmittelbare Rückmeldung hinsichtlich der Leistung der Platten. Lediglich geometrische Eigenschaften wie Volumen und Oberfläche, bzw. ihr Verhältnis zueinander, können in Echtzeit visualisiert werden und somit in die Designentscheidungen einfließen.

Um die Leistungsfähigkeit der Entwürfe einschätzen zu können, wurde ein zusätzliches Softwaretool namens 'ClaySim' mittels der Programmiersprache C# in Rhino / Grasshopper entwickelt. Die Aufgabe von 'ClaySim' besteht darin, die Absorption von flüssigem Wasser ins Material, die Verteilung des aufgenommenen Wassers im Inneren des Materials sowie die Verdunstung des Wassers aus dem Material zu simulieren. Dieses Werkzeug lässt sich nahtlos in den Designprozess integrieren und kann innerhalb von Sekunden wichtige Informationen zur Leistungsfähigkeit des Entwurfs liefern.

3.3.2. Theoretischer Hintergrund

Das Softwaretool versucht keine analytische Lösung zu liefern, sondern setzt auf numerische Lösungen, die durch iterative Berechnungen erzielt werden. Hierbei teilt es die Platte in ein dreidimensionales Raster aus Datenpunkten auf (Grid-Based-Simulation). Jede Zelle dieses Rasters repräsentiert einen Teil der Platte und wird dann individuell und schrittweise berechnet.

Die Darstellung des Designs 'Tilings Version 2' in gerasterter Form zeigt die Farben entsprechend ihrer Raumpositionen auf der jeweiligen Raumachse, um die Lesbarkeit zu verbessern. Die Auflösung der einzelnen Zellen ist in diesem Beispiel 1.0 mm³. In den Simulationen wurden 1.0 bis 2.0 mm³ Auflösungen verwendet.

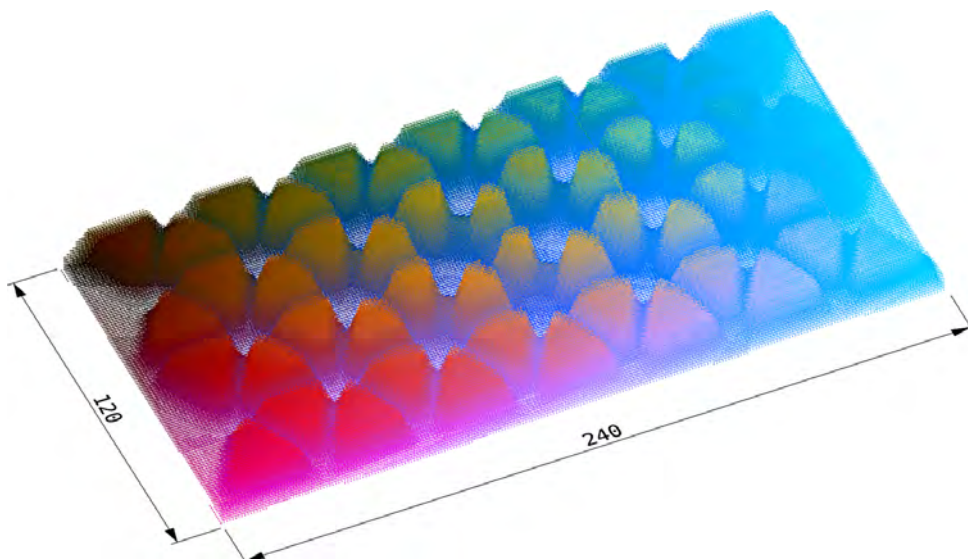


Abbildung 32: Simulierte Darstellung der Serie „Tilings Version 2“. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

Die grundlegende Frage bezieht sich auf die Berechnung der Wasserbewegung innerhalb des Materials. Um die Berechnung zu erleichtern, wurden bestimmte Annahmen getroffen: Eine dieser Annahmen ist, dass sich die Wassermoleküle im Material ohne den Einfluss der Schwerkraft bewegen. Darüber hinaus wird die Bewegung jedes Moleküls im Inneren des Materials durch die Brownsche Bewegung approximiert.

Die Brownsche Bewegung ist die zufällige Bewegung von Partikeln, die in einer Flüssigkeit (oder Gas) suspendiert sind, und resultiert aus ihrer Kollision mit den schnell bewegenden Atomen oder Molekülen in der Flüssigkeit.

Im Wesentlichen bewegen sich Partikel, die die Brownsche Bewegung durchlaufen, in einem zufälligen, unregelmäßigen oder "Zickzack"-Muster, wobei sich die Bewegungsrichtung abrupt ändert als Folge von Kollisionen mit anderen Partikeln. In diesem Kontext bedeutet die Annahme der brownischen Bewegung, dass Wassermoleküle ständig in zufälligen Richtungen im Material bewegen und kollidieren, was die Ausbreitung oder Diffusion der Feuchtigkeit im gesamten Material erleichtert, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..** Es handelt sich dabei um eine Annahme, die einen statistischen, probabilistischen Ansatz zur Modellierung der Wasserbewegung im Material ermöglicht.

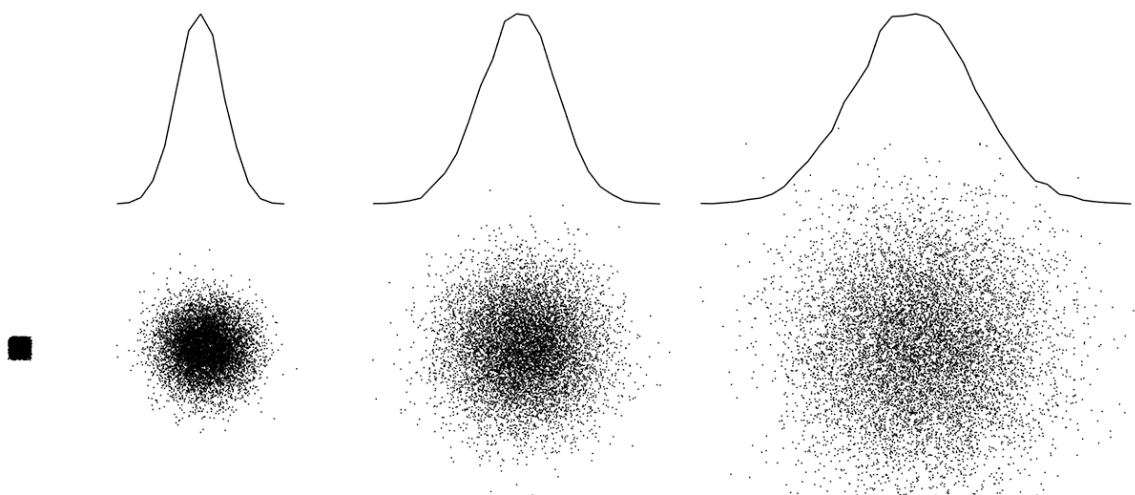


Abbildung 33: Visualisierung der Brownschen Bewegung mit 10.000 Partikeln. Oben ist die Verteilung entlang der X-Achse dargestellt, die einer Normalverteilung entspricht. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

Indem wir all diese individuellen Bewegungen zusammenfassen, erhalten wir ein Modell für die Diffusion. Wenn wir beispielsweise mit einem scharfen Konzentrationsgradienten des Wassergehalts beginnen, diffundiert er mit der Zeit gleichmäßig in alle Richtungen (unter der Annahme, dass die Schwerkraft kein Faktor ist). Das Ergebnis ist, dass die Verteilung der Wasserkonzentration im Material einer Gaußschen Normalverteilung folgt. Es werden somit nicht einzelne Wassermoleküle simuliert, sondern deren zusammengefassten Bewegungen im Material als Grid abgebildet statistisch berechnet.

Der Farbgradient in ClaySim wurde zur besseren Lesbarkeit angepasst. Wie man sieht entspricht die Verteilung der Simulation der einzelnen Partikel mit Braunscher Bewegung siehe **Fehler!**

Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..

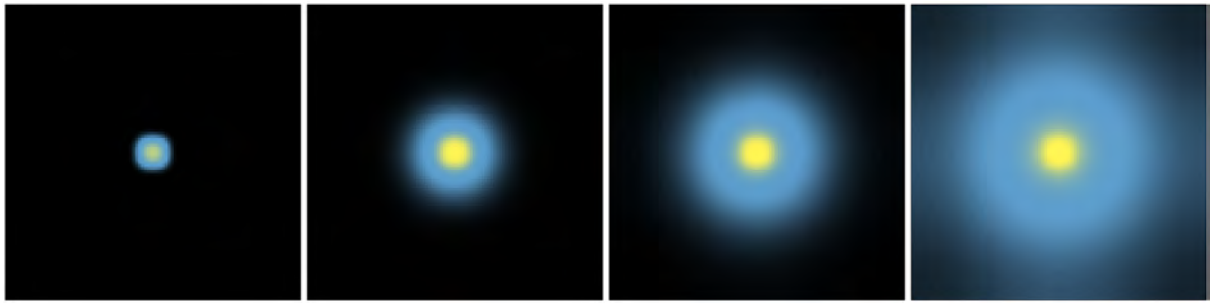


Abbildung 34: Diffusion mittels Simulation in ClaySim. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

Zusammengefasst kann man sich den Prozess am besten vorstellen als einen Gausschen Filter in 3 Dimensionen; vergleichbar mit Gaussian-Blur in Photoshop, dort allerdings nur in zwei Dimensionen.

Für effizientere Berechnungen ist es möglich, den dreidimensionalen Gauß-Filter in drei eindimensionale Filter zu zerlegen. Diese werden jeweils separat auf jede Raumachse angewendet. Durch diese Zerlegung verringert sich die Komplexität der Operation deutlich, und zwar schrumpft der Kernel (Konvolutionsmatrix) von der dritten Potenz (n^3) auf das Dreifache ($3n$).

Mit den durchgeführten Optimierungen tauchen jedoch neue Herausforderungen auf. Da die Diffusion in zeitlichen Schritten berechnet wird, die von der Größe der Konvolutionsmatrix bestimmt sind, besteht bei geringer Auflösung die Gefahr, dass bei der Berechnung der Umverteilung des Wassers im Material, Leerräume übersprungen werden können. Um diesen Effekt zu minimieren, ist es notwendig, den Radius auf 10 mm zu begrenzen.

Der Einfluss dieses Effektes wird durch einen Kernel mit einer Seitenlänge von 11 mm verdeutlicht, dargestellt in rot in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Zwei Materialblöcke werden durch einen Luftraum von 3 mm getrennt. Trotz dieser Trennung ist eine Feuchtigkeitsübertragung feststellbar, wenn auch nur in geringem Maße.

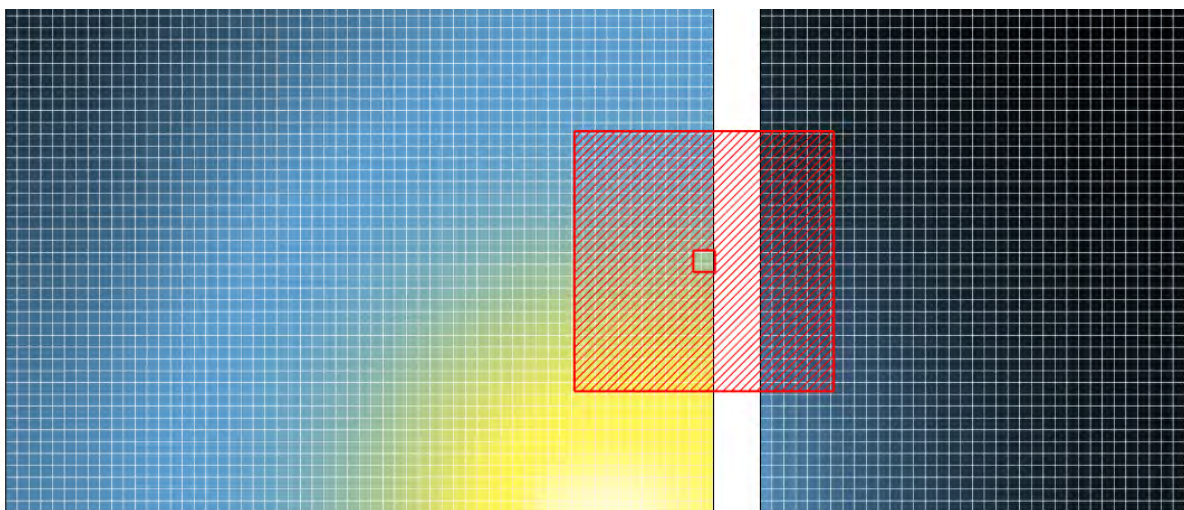


Abbildung 35: Kernel mit einer Seitenlänge von 11 mm, Simulation in ClaySim. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

Ein weiteres Problem entsteht durch den Verlust von Wasser an den Randbereichen. Wie bereits dargestellt, kann der Kernel Wasser in den Luftraum transportieren. Um diesem Umstand entgegenzuwirken, werden die Feuchtigkeitswerte im gesamten Material nach jedem Diffusionsschritt normalisiert, um den Wasserverlust auszugleichen.

3.3.3. Implementierung von ClaySim

ClaySim nimmt als geometrische Eingabe jeweils einen geschlossenen 3D-Körper für das Tonmaterial und einen weiteren für das Wasser, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..** Selbst wenn sich beide Körper überschneiden, erfolgt die Aufnahme des Wassers ausschließlich über die Oberfläche des Tons. Dabei wird in jedem Berechnungsschritt konstant Wasser hinzugefügt, vorausgesetzt die Oberfläche des Tons kann es absorbieren.

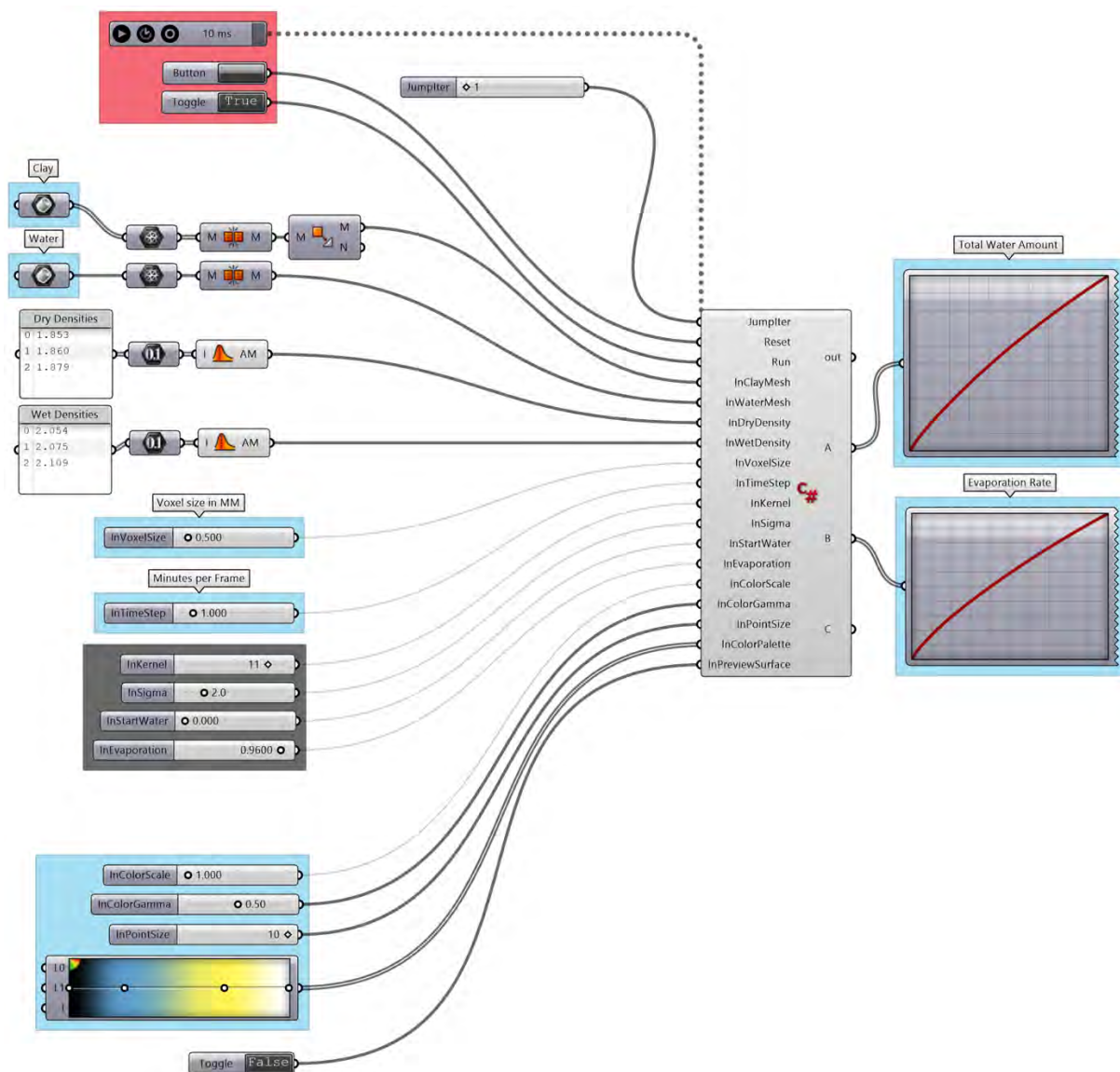


Abbildung 36: Benutzeroberfläche von ClaySim mit allen Eingabeparametern. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

Auch ohne definiertes Wasserobjekt kann die Berechnung durchgeführt werden. Hierfür kann durch den Parameter 'StartWater' die Anfangssättigung des gesamten Objekts bestimmt werden.

Viele der in der Simulation verwendeten Variablen sind dimensionslos und normalisiert, somit im Bereich von 0.0 - 1.0. Durch den Vergleich mit physikalischen Testobjekten ist es möglich, die Parameter zu kalibrieren, um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen.

Übersicht der wichtigsten Parameter:

Die Größe des Kernels sollte an den TimeStep angepasst werden, da die Diffusionsrate pro Iterationsschritt mit einem größeren Kernel ansteigt.

Sigma charakterisiert die Streuung der Normalverteilung. Größere Sigma-Werte resultieren in einer breiteren Verteilung, allerdings ohne die Gesamtfläche der Kurve zu verändern.

Der Faktor 'Evaporation' beschreibt das Verhältnis, in dem die Oberfläche Wasser abgibt.

'VoxelSize' bestimmt die Auflösung des Raumgitters.

'DryDensity' und 'WetDensity' sind Skalierungsfaktoren, die durch Messungen an physischen Testobjekten bestimmt werden. Sie definieren die Dichte oder das Gewicht pro Kubikzentimeter.

'ColorScale' und 'ColorGamma' sind Hilfsparameter zur visuellen Darstellung der Ergebnisse, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..** Insbesondere 'ColorGamma' kann dazu beitragen, numerisch kleinere Werte deutlich darzustellen. Es handelt sich hierbei um eine Gammakorrektur mittels einer Potenzfunktion mit 'ColorGamma' als Exponenten. Dieselbe Eingabe, mit Wassereintrag von unten kann unterschiedliche visuelle Resultate haben.

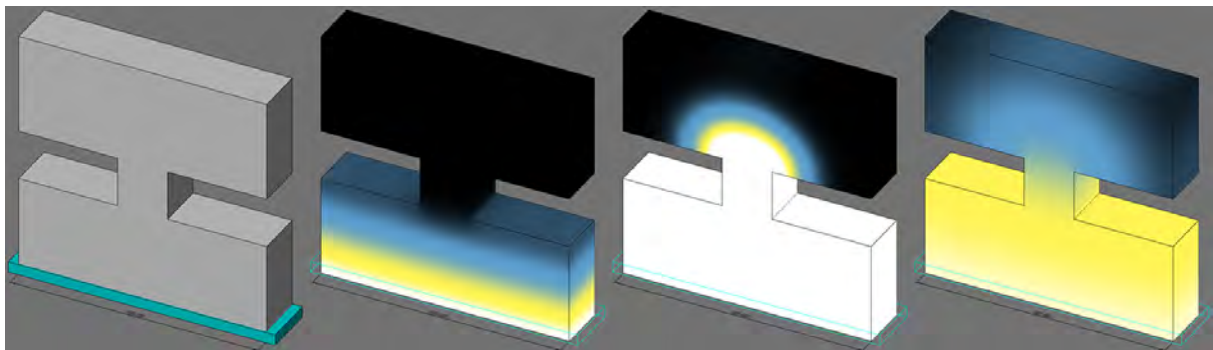


Abbildung 37: Eingabegeometrie mit Wassereintrag von unten. Die folgenden Darstellungen zeigen denselben Zustand mit unterschiedlichen Visualisierungsparametern. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

Darstellungsparameter:

1.	ColorScale	1.0	Gamma	1.0
2.	ColorScale	100.0	Gamma	1.0
3.	ColorScale	0.9	Gamma	0.2

3.3.4. Überprüfung von ClaySim

Für die Überprüfung wurde anhand definierter Proben die Wasseraufnahme und Trocknung gemessen und simuliert.

Die Messung von Austrocknung und Wasseraufnahme erfolgte mit einer Präzisionswaage, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..** Die klimatischen Bedingungen wurden gemessen und in etwa konstant gehalten. Der Versuchsaufbau hat nicht den selben wissenschaftlichen Anspruch, wie jener in Kapitel 5.1, da es hier die Entwicklung eines Tools zur Abschätzung von Tendenzen und Näherungen ging und nicht um die Ermittlung material- bzw. elementbezogener physikalischer Eigenschaften.

Das Probendesign war:

Real Dimensions (after firing)

Volume: 73.246 cm³

Area: 126.99 cm²

Dry Weight: 135.70 g

Wet Weight: 150.50 g

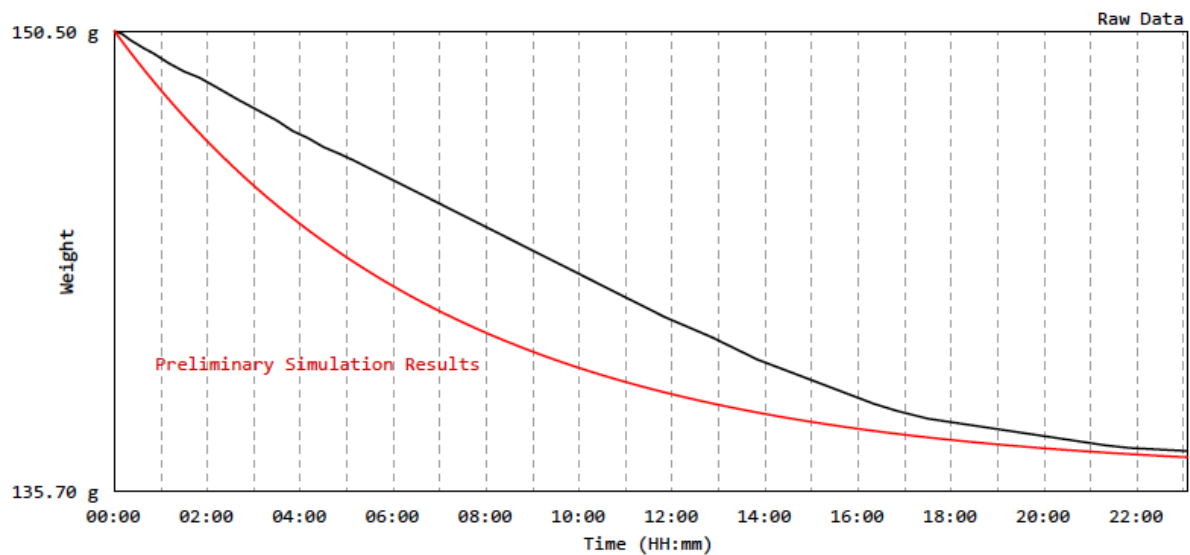


Abbildung 38: Wasseraufnahme der gesamten Probe – Simulation versus Messung. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

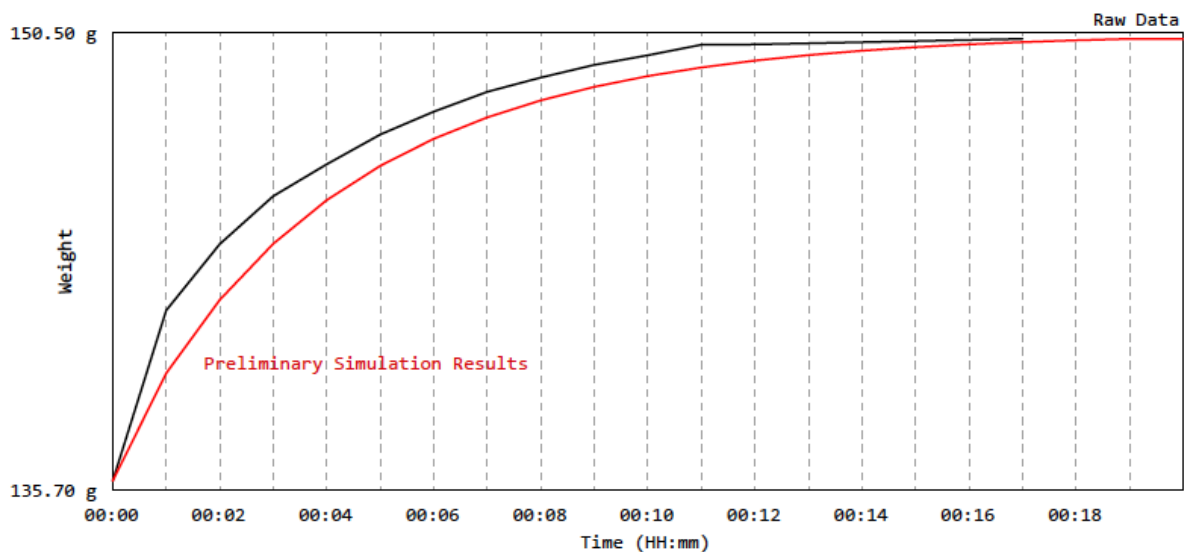


Abbildung 39: Wasseraufnahme einer teil exponierten Probe – Simulation versus Messung. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

3.4. Erkenntnisse und Ausblick

Das Ergebnis des digitalen Zugangs für dieses Projekt hat uns gezeigt wie weit wir mit Optimierung und Simulation Prototypen von Platten beurteilen können. Es wurden Messungen mit physischen Prototypen zu Vergleich unternommen werden. Die entwickelten Softwaretools, die in diesem Kapitel vorgestellt wurden, bilden einen wertvollen Teil des Beitrags diese Forschungsprojekts.

ClaySim zeigt erstaunlich gute Annäherung an die Messergebnisse, siehe Anhang 2 und ist als Unterstützung für das Entwickeln von Formen sicher geeignet.

4. Material und Produktion von Proof-of-Concept Prototypen

In diesem Kapitel demonstrieren wir, wie die Herstellung von Platten Elementen aus keramischen Materialien mit optimierten Oberflächenstrukturen entwickelt wurde. Das Ziel ist es eine angepasste innerer Materialstruktur zu definieren, und dies dann erfolgreich umzusetzen. Ein wesentlicher Leitparameter hier ist das Auffrieren zu vermeiden, somit wird die Materialstruktur in Hinblick auf Frostsicherheit in gemäßigten Klimazonen gestaltet. Die gefundenen Methoden zur Feinstrukturierung der Oberflächen werden mit geänderter Materialität und unterschiedlichen Glazingtechniken getestet. Relevante Parameter der Produktionstechniken werden aufgezeichnet und mit konventionellen Methoden verglichen.

4.1. Generelle Faktoren und Materialwahl

Es wurden mehrere Verarbeitungstechniken untersucht und nur eine kam schlussendlich zur Verwendung. Techniken des Gießens wurde ausgeschlossen, da die Verarbeitung des Materials die Massestruktur verändert. Die wesentlichen herstellungstechnischen Aspekte führen zu konstruktiven Lösungen mittels Quetschen, das mit der Hilfe von Gipsnegativformen zu den entwickelten Keramikelementen führt.

Die Form der Probestücke wird möglichst auf übliche industrielle Herstellungsmethoden abgestimmt. Dabei ist zu achten, dass je nach der Herstellungstechnik eine unterschiedliche Massenhomogenität erzeugt wird. Diese kann sich auf die Struktur des Scherbens und seine evaporativen Eigenschaften auswirken. Das Material kann trocken, feucht und flüssig verwendet werden. Da bei der Trockenverarbeitung der Masse die Homogenität des Materials wesentlich reduziert wird, und seine Zerfrierverbarkeit gesteigert wird, ist es ratsam, auf diese Art von Herstellungstechnik zu verzichten.

Folgende industriellen Herstellungsmethoden kommen in Frage: Extrusion, Feuchtpressverfahren, Schneiden, Slumping oder Schlickerguss. Dementsprechend sollen die Prototypen formal an die Erfordernisse der jeweiligen Herstellungsvoraussetzungen angepasst werden.

Die endgültige Entscheidung war ein Feuchtpressverfahren in Formen zu verwenden. In diesem Fall werden Probestücke mit Hilfe von Gipsnegativformen durch das Quetschen produziert. Die Oberflächenstrukturen können so in das feuchte Material aufgetragen werden.

Für die Oberflächenversiegelung kann im lederharten Zustand entweder die Sinterengobe händisch aufgetragen, oder eine Glasur auf den rohen Scherben mittels Spritzen verteilt. Um die Saugfähigkeit zu optimieren, wurde aber auf diese Methode verzichtet. Weiters wurde, um den Kostenfaktor und den Energieverbrauch möglichst niedrig zu halten, ein einmaliger Brennvorgang angestrebt. Die Auswahl der Tonarten bezieht sich auf Farbe, mögliche Brenntemperaturen und Dicke der Platten bzw. Gipsnegativformen.

Relevante Parameter der Produktion werden aufgezeichnet und zunächst mit konventionellen Methoden verglichen. Als Richtlinie werden 1 cm dicke, 20 cm breite und 40 cm hohe Elemente verwendet, was zum Teil herstellungstechnische Gründe hat, aber auch mit den Größen von Testgerätschaften zusammenhängt, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..** Ein Stakeholder Workshop mit Wienerberger ergibt die zusätzliche Berücksichtigung der Frostsicherheit in gemäßigten Klimazonen. Die Materialstruktur wird in Hinblick auf die Frostsicherheit gestaltet.



Abbildung 40: Sammlung unterschiedlicher keramischer Versuchsplatten. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

Die erste Evaluierung der Proben konzentriert sich auf Parameter wie Farbe, Bruchresistenz und Sinterqualität. Es werden zwei Tonarten ausgesucht mit denen die Prototypen hergestellt werden.

4.1.1. Auswahl von den Tonarten P1.1 und P2

Die Proben P1.1 und P2 zeigen in den ersten Untersuchungen das beste Verhalten. Sie bestehen aus sehr unterschiedlichen Materialien und werden bei unterschiedlichen Temperaturen gebrannt. Diese Materialien stammen aus dem Produktkatalog von Ing. Skokan in Wien. Nach Rücksprache mit dem Keramik Institut wird besonderer Wert auf die Saugfähigkeit und Beständigkeit im Außenraum gelegt. Die Brenntemperaturen werden dementsprechend angepasst

P2 [G&S 480]

G&S Goerg & Schnneider 480 grobschamottiert 40% Anteil Schamott (Schamott- hochgebrannte Masse und wieder zermahlen)
wurde bei 1000°C gebrannt.

P1.1 [SKG 4405]

SKG Steingut Keramik

wurde bei 1100°C gebrannt.

Die beiden Materialien und ihre unterschiedlichen Brenntemperaturen führen zu verschiedenen Qualitäten, darunter auch unterschiedliche Bruchqualitäten, Farben und mechanische Eigenschaften.

4.2. Erstellung von Testelementen mit klassischen Methoden

Die Verarbeitungstechnik des Quetschens erlaubt es nicht schnell Lamellendicken zu testen. In den ersten Versuchen mit 1 cm dicken Tonstücken soll gezeigt werden, wie dünn lamellenartige Details ausgeführt werden können. Die Größe der Platten beträgt 10 x 10 cm. Das Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis wird durch manuelle Oberflächenmanipulation erreicht, wobei Messer und Technikstifte verwendet werden. Die Tiefe der Schnitte variiert von 1 mm bis 8 mm und die Breite reicht von 1 mm bis 1 cm, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**



Abbildung 41: Drei verschiedene Größen von Lamellen. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

Die erste Formherstellungsmethode geschieht mit einer 3D-gedruckten PLA-Form. Es werden 4 unterschiedliche Winkel und Tiefen getestet, aber es ist schwierig den Ton aus der Form zu entfernen und er trocknet nicht gleichmäßig. Diese Ungleichheit führt zum Reißen im Ofen, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**

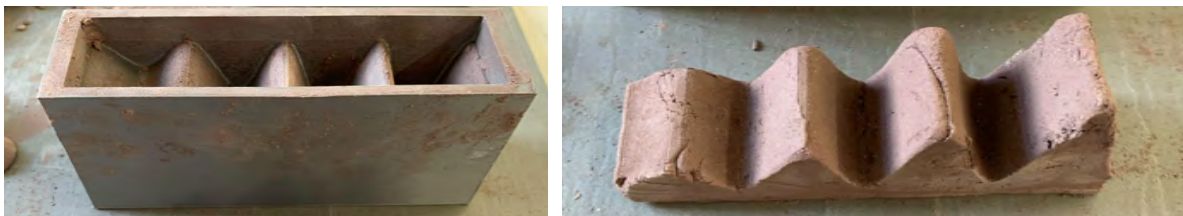


Abbildung 42: 3D-gedruckte Form und Prototyp aus Ton. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

Die Formherstellungsmethode mit einer 3D-gedruckten Negativform wird beibehalten, aber es werden Löcher für die Luftzufuhr hinzugefügt. Der Ton trocknet gleichmäßig, aber es ist schwierig, eine gute Oberflächenqualität zu erreichen, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**

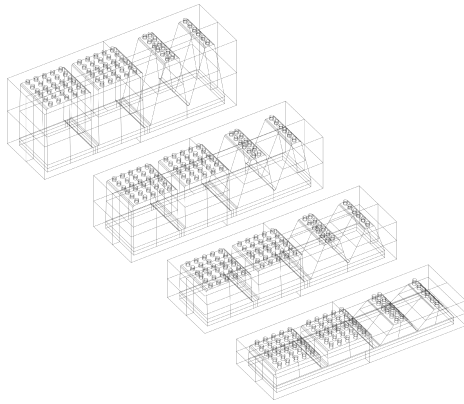


Abbildung 43: Digitales Modell von vier Formen mit unterschiedlichen Winkeln und Tiefen sowie das resultierende Pendant in Ton. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

Es stellt sich heraus, dass eine 1cm dicke Bodenplatte zur Verbindung der extrudierten Elemente ausreicht. Um eine Form mit vergrößerter Oberfläche zu entwickeln, werden unterschiedliche einfache geometrische Formen untersucht. Dazu werden ein Würfel, ein Zylinder, ein abgeschnittener Kegel, eine abgeschnittene Pyramide und ein abgerundeter Kegel ausgewählt. Unterschiedliche Winkel und Höhen werden definiert um Variationen zu definieren. Für jeden Test werden 4 verschiedene Höhen untersucht, nämlich 1 cm bis 4 cm.

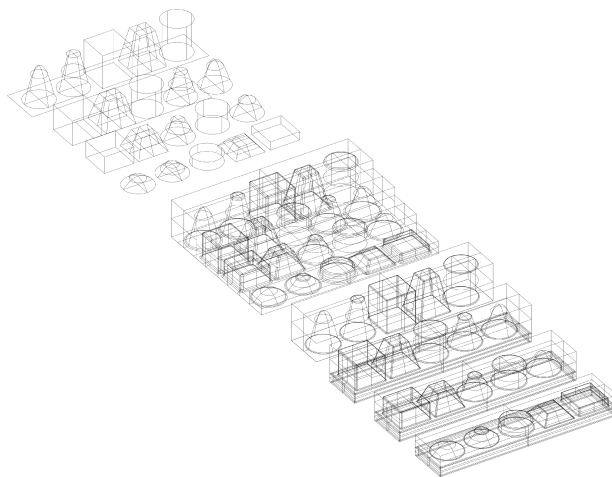


Abbildung 44: Digitales Modell von vier Formen mit unterschiedlichen Winkeln und Tiefen (links) sowie die resultierenden Tonproben mit variierenden Oberflächenmustern (rechts). – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

4.3. Umfassende Sondierung mit additiver Produktionsmethode (Potterbot)

Die Herstellung von strukturierten Oberflächen mittels additiver Technologien wie 3D-Druck ist bereits seit einiger Zeit im architektonischen Maßstab möglich. Ebenso ist bekannt, dass die Feinjustierung von Oberflächenstrukturen durch die Herstellungstechnik und die Anpassung der Porosität durch die Materialmischung von keramischen Materialien erreicht werden kann.

Jedoch stellt die Herstellung eines bioinspirierten Elements mit funktionaler Oberfläche und potenzieller Integration von Hohlräumen zur Wasserführung in Verbindung mit einem keramischen Material, das eine optimierte innere Struktur für den Wassertransport aufweist, einen neuartigen Ansatz in der Architekturtechnologie dar.

3D-Keramikdrucktechnologien

Die Universität für angewandte Kunst begann im Jahr 2021 mit Experimenten mit keramischen Druckern. Bis September 2021 war 3D Potter eines der wenigen Unternehmen, das sich auf keramische 3D-Drucker spezialisierte. 3D Potter wurde für BIOCOOL-Experimente eingesetzt. Es gibt jedoch neuere Modelle und Wettbewerber auf dem Markt. Um einen allgemeinen Vergleich zu geben, hier sind einige der anderen keramischen 3D-Drucker, die im September 2021 auf dem Markt erhältlich waren.

3D Potter (3DPotterBot Serie):

3D Potter bietet eine Reihe von keramischen 3D-Druckern, bekannt als die 3DPotterBot-Serie, die für verschiedene Anwendungen entwickelt wurde - von Bildungseinrichtungen und kleinen Studios bis hin zu professionellen Keramik Künstlern und industrieller Produktion. Einige Merkmale der 3DPotterBot-Drucker sind:

- Direkte Extrusion von Ton, um Luftkompressionssysteme zu vermeiden.
- Hochwertige lineare Schienen und von Lead-Screw angetriebene Bewegungssysteme.
- Edelstahl- und Aluminiumkonstruktion für Haltbarkeit.
- Anpassbare Düsendrößen für verschiedene Extrusionsanforderungen.

WASP (Delta WASPclay Serie):

WASP ist ein italienisches Unternehmen, bekannt für seine Delta-Serie von 3D-Druckern, und sie haben eine Linie von keramischen 3D-Druckern namens Delta WASPclay entwickelt. Einige Merkmale der Delta WASPclay-Drucker sind:

- Delta-Stil-Drucker mit kreisförmiger Bauplatte.
- LDM (Liquid Deposition Modeling) Extrusionssystem mit einem Ton-Kit.
- Edelstahl- und Aluminiumkonstruktion.
- Austauschbares Extrudersystem zum Wechseln zwischen Filamentmaterialien.

VormVrij (LUTUM Serie):

VormVrij, ein niederländisches Unternehmen, bietet eine Linie von keramischen 3D-Druckern namens LUTUM-Serie an. Diese Drucker sind sowohl für den professionellen als auch den Bildungsbereich konzipiert. Einige Merkmale der LUTUM-Serie sind:

- Hybrid-Druckdesign mit direkter Extrusion von Ton und FDM-Druck (separaten Extruder).
- Luftdruckgesteuertes Extrusionssystem.
- Modulares Design mit Aluminiumkonstruktion.
- Eine Reihe von Düsendrößen für verschiedene Extrusionsanforderungen.

Beim Vergleich dieser keramischen 3D-Drucker wurden Faktoren wie Größe, Extrusionssystem, Benutzerfreundlichkeit und Materialkompatibilität berücksichtigt und der 3D Potter ausgewählt.

Erste Tests zeigen, dass die Trocknungszeit des Tons die gewünschte Druckform beeinflusst. Eine Düse mit einem Durchmesser von 1 cm wird verwendet. Die Düse druckt gleichmäßig und in Bezug auf die Heterogenität des Tons funktionierte es überraschend gut. Es wurden keine Verstopfungen in der Düse beobachtet. Um die entworfene Form drucken zu können, sollte jede Schicht antrocknen, bevor die nächste Schicht darüber gedruckt wird. Deshalb wurde eine 0,5cm Düse ausgewählt. Da das Verhältnis von Oberfläche zu Umfang erhöht werden soll wurde mit verschiedenen Wellenlängen und unterschiedlichen Amplitudenhöhen gearbeitet.



Abbildung 45: Potterbot und gedruckte Platte. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

Um die Oberfläche zu vergrößern, kann die Amplitudenhöhe manipuliert werden, siehe **Fehler!**
Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. Es können auch Amplituden miteinander kombiniert werden.

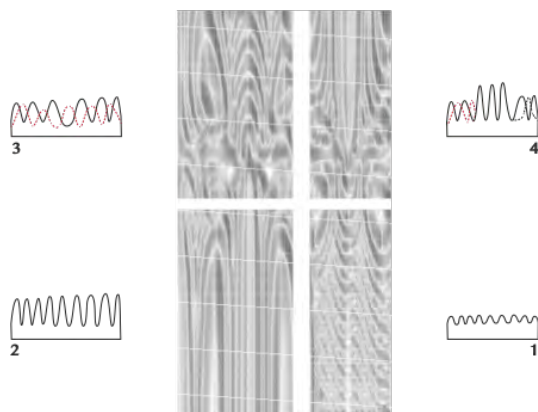


Abbildung 46: Darstellung in Oberansicht und Schnitt. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

- 1) 0,5 Amplitudenhöhe
- 2) 1 cm Amplitudenhöhe
- 3) zwei verschobene Abschnitte
- 4) Kombination von zwei Amplitudenhöhen (1 cm und 1,5 cm)

Da die Form in Druckerpfade umgewandelt werden muss, die den Umriss im Schnitt ohne Unterbrechungen beschreiben, wurde die Software „Simplify 3D“ eingesetzt, siehe **Fehler!**
Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. und 46.

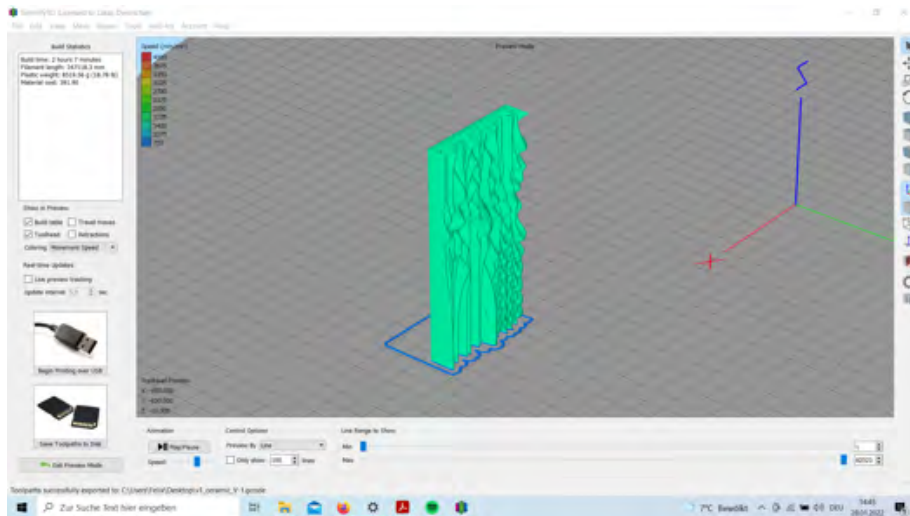


Abbildung 47: Screenshot der Software Simplify3D zur Vorbereitung der Druckdaten. – Quelle: Screenshot Simplify3D / Projektteam, Universität für angewandte Kunst Wien.



Abbildung 48: Ansicht der 3D-gedruckten keramischen Platte von unten. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

Um die Absorption zu untersuchen wird die in Wasser Platte getränkt und gewogen. Diese ersten Erfahrungswerte helfen beim Kalibrieren der Simulationen im vorherigen Kapitel.

In den **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** und 48 sieht man die 3D-gedruckte keramische Platte während des Tränkens und auf der Waage. Das Trockengewicht beträgt 1418,05 g. Nach dem Wasserversuch erhöht sich das Gewicht der Platte auf 1618,05 g. Somit wurden 200 g Wasser absorbiert, was 7 % des Trockengewichts entspricht.

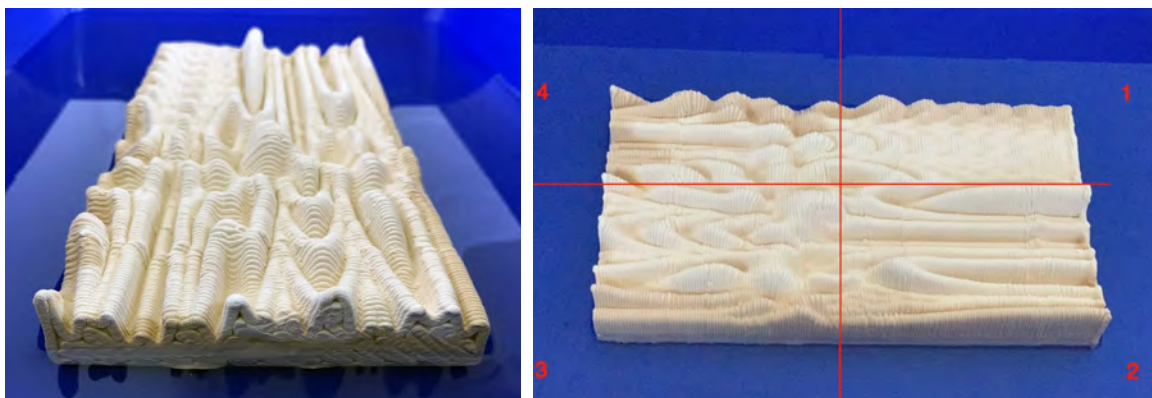


Abbildung 49: Tränken der Platte mit Wasser. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.



Abbildung 50: Wiegen der trockenen und getränkten Keramikplatte. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

4.4. Testen von drei Arten von Produktionsarten mittels Quetschen

In diesem Kapitel werden drei weitere Produktionsmethoden für Negativformen mit 3D-Oberflächen untersucht. Das Ziel besteht darin, die bestmögliche Variante zu ermitteln, um testbare Prototypen von keramischen Platten herzustellen.

Die erste Methode basiert auf der Verwendung von PLA-Formteilen und Gipsformen. Der Prozess beginnt mit dem 3D-Druck eines positiven PLA-Formteils, welches anschließend zur Erstellung der negativen Gipsform verwendet wird. Die zweite Methode verwendet Silikon und Gipsformen. Hierbei wird die Silikon-Positivform mithilfe einer PLA-Negativform hergestellt. Anschließend wird diese in Gips gegossen, um die Negativform zu erhalten. Die dritte und erfolgreichste Version basiert auf der Produktion von CNC-gefrästen Negativformen.

4.4.1. PLA-Formteile und Negativform aus Gips

Die Bildreihe zeigt den angewendeten Prozess: zuerst den 3D-Druckprozess, bei dem ein positives PLA-Formteil erstellt wird. Das zweite Bild präsentiert das fertige positive PLA-Formteil, das verwendet wird, um eine negative Gipsform zu erstellen. Schließlich wird im dritten Bild Luftdruck eingesetzt, um das PLA-Formteil aus der Gipsform zu entfernen.



Abbildung 51: PLA-Formteil und Gipsabdruck. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

Es wird Babypuder als Trennmittel verwendet, aber es nicht möglich, den 3D-Druck erfolgreich vom Gips zu lösen, da die ungleichmäßigen Materialdicke und die Struktur der Druckschichten zu stark mit dem Gips verzahnt sind. Das Formteil klebt an der Gipsform und bricht beim Ablösen ab. Ein Versuch das Plastik mit einem Dörrapparat und einer Heißluftpistole aufzuweichen ist nicht erfolgreich. Auch das Anwenden von Luftdruck hilft nicht, um das Formteil aus dem Gips zu entfernen, siehe **Fehler!** **Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**

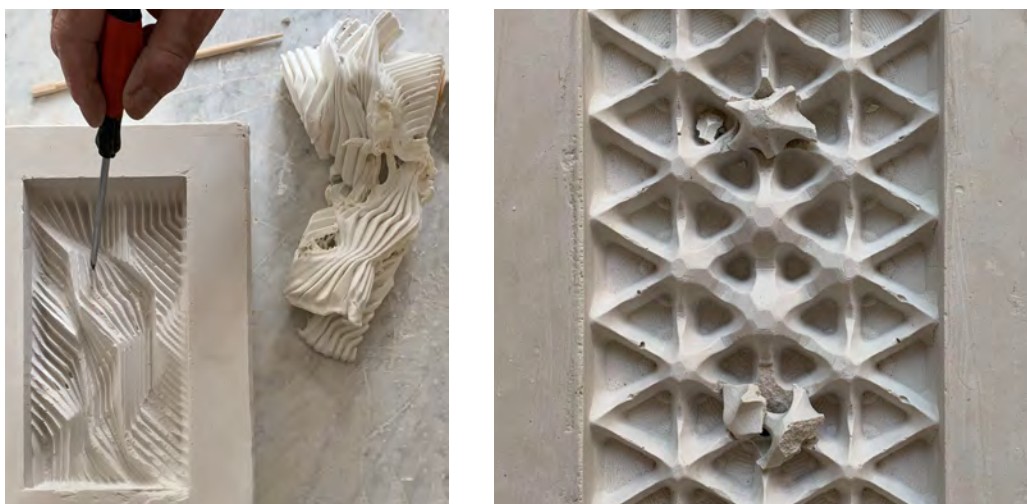


Abbildung 52: Fehlgeschlagene Versuche, das PLA-Formteil zu entfernen. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

Schlussfolgerungen:

Die Lamellen dürfen im Schnitt nicht mehr als 80 Grad betragen. Es ist wichtig, scharfe Ecken zu vermeiden. Es ist besser, die Kanten der Lamellen zu glätten, um Brüche und Risse zu verhindern.

4.4.2. Versuche mit Silikonformteilen und Gipsnegativformen

Die nächste Methode verwendet Silikonformteile, die flexibel sind. Die notwendigen Schritte zur Erstellung einer Silikon-Positivform kann man in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sehen. Diese wird dann verwendet, um eine Gips-Negativform zu erstellen.



Abbildung 53: PLA-Negativform, Silikonguss und resultierendes Silikonformteil. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

Das Silikon lässt sich gut in eine Form gießen und behält eine hohe Auflösung von Oberflächendetails. Das Abdrücken in Gips ist allerdings problematisch, da sich Luftblasen bilden und es sehr schwierig diese an die Oberfläche des nassen Gipses zu bekommen.



Abbildung 54: Luftblasen und ausgebrochene Details. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

Schlussfolgerungen:

Da es schwierig ist Lufteinschlüsse zu entfernen, bleiben diese nach dem Gießen sichtbar. Die Auflösung der Oberflächendetails ist zu hoch und kleine Lamellen brechen leicht ab.

4.4.3. Versuche mit CNC gefrästen Gipsformen mit unterschiedlichen Maschinen

Die letzte Technik, die untersucht wurde, stellt sich als die erfolgreichste aus. Die Gipsnegativformen werden direkt mit einer Fräse produziert. Kommerziell erhältliche Fräsen sind getestet worden wie das 1200 Modell von Wabeco, aber schlussendlich war es notwendig eine Fräse im Eigenbau zu

verwenden, da die Einstellungsparameter für nicht ganz ausgehärteten Gips unüblich sind, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**

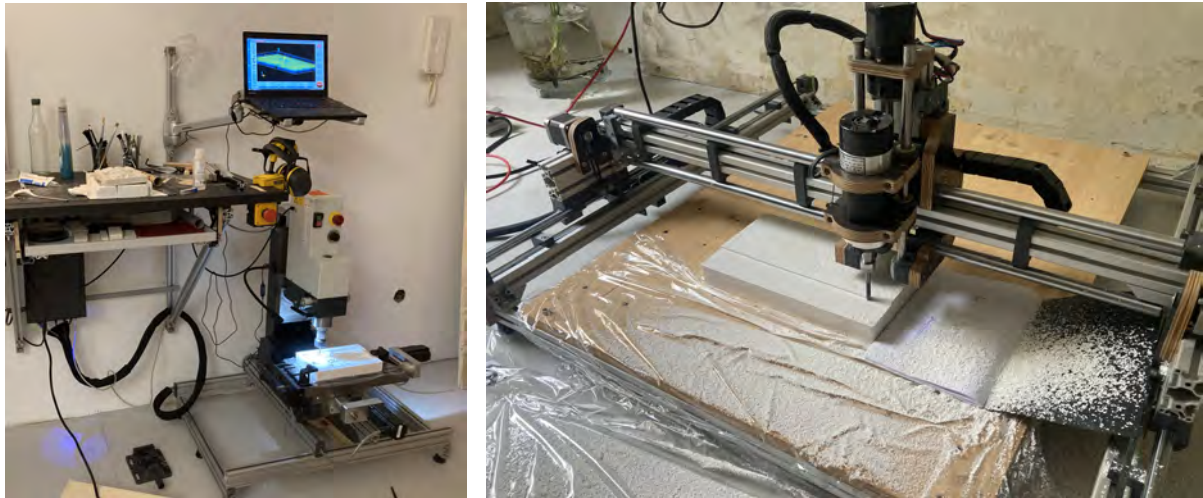


Abbildung 55: Wabeco 1200 und selbstgebaute CNC-Fräse. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

Der Fräser muss mit den richtigen Geschwindigkeiten in eine Gipsplatte geführt werden, um Drehspuren zu vermeiden.

Damjan kann das hier ein wenig ausführen (Fräserart, Geschwindigkeiten, Vorschub, Größe vom Gerät, nehme an G-Code als Format.....).



Abbildung 56: Detail des Fräasers und erste Fräsversuche. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.



Abbildung 57: Frässpuren auf einer Gipsform mit korrekter Auflösung. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

Die ausgeführten Tests sind erfolgreich und die neu entstehenden Gipsnegativformen werden für alle Tonabdrücke verwendet, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Die Formen werden mehrmals für beide Farben verwendet und zeigen wenig Abnützungerscheinungen.



Abbildung 58: Die vier finalen Gips-Negativformen. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

Die Negativformen im oberen Bild sind für Lines, Tilings 3, Tilings 2 und Tilings 1. Die Verschmutzungen haben keine Konsequenzen für die Genauigkeit der Oberflächenbeschaffenheit.

4.5. Evaluierung der Oberflächen Geometrie der zu testenden Platten

Da das endgültige Produktionsverfahren die Verwendung von Gipsfräsen beinhaltete, wurden die 4 potenziellen Designs ein letztes Mal überprüft. Die endgültige Gruppe besteht aus vier strukturierten Designs, davon drei mit lokalen Extrusionen (Tilings) und eines mit einer Wellenform (Lines). Die extrudierten Formen konnten unverändert bleiben, jedoch musste die Form für Lines angepasst werden, da der Gips bei bestimmten Konfigurationen nicht aus der Form entnommen werden konnte. Es wurden mehrere Varianten getestet, manche mit hohen kantigen Wellen, andere mit

geglätteten Wellen oder weniger Wellen, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**

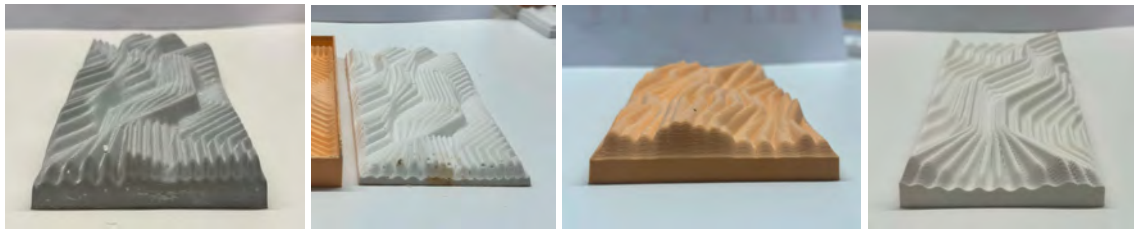


Abbildung 59: Unterschiedliche Versionen der Serie „Lines“. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

4.6. Finale Testplatten mit CNC gefrästen Gipsnegativformen

Die ausgewählten Designs wurden in schwarz und weiß hergestellt, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** bis 67. Die Oberflächenstruktur der zwei Farben ist nicht exakt dieselbe, da der schwarze Ton höher gebrannt wurde und somit mehr gesintert wurde. Alle Platten kommen zum Einsatz und liefern die gewünschten Daten, siehe Tabelle 1: Beschreibung und Kategorisierung der TestplattenTabelle 1.



Abbildung 60: Testplatte P3B (schwarz, flach). – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.



Abbildung 61: Ton-Testplatte P3W (weiß, flach). – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

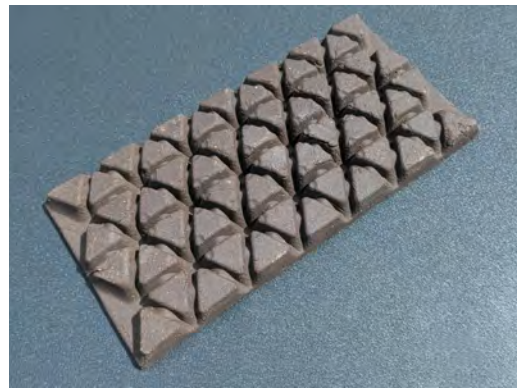


Abbildung 62: Ton-Testplatte P4B (schwarz, Tilings 3). – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

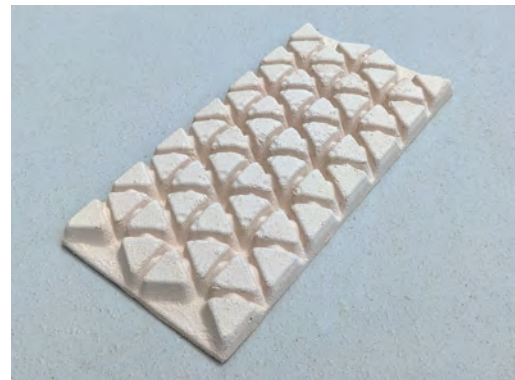


Abbildung 63: Ton-Testplatte P4W (weiß, Tilings 3). – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.



Abbildung 64: Ton-Testplatte P2B (schwarz, Tilings 1). – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

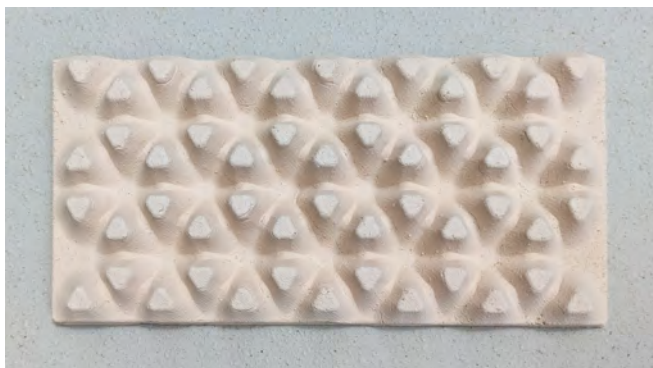


Abbildung 65: Ton-Testplatte P2W (weiß, Tilings 1). – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

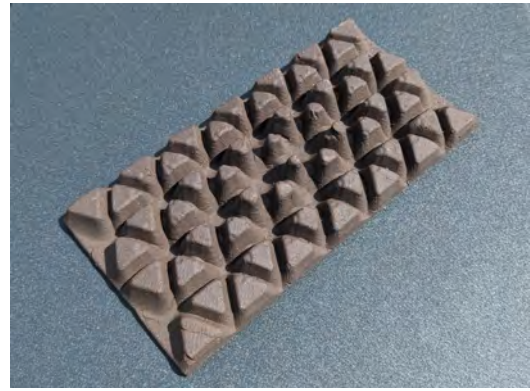


Abbildung 66: Ton-Testplatte P5B (schwarz, Tilings 2). – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.



Abbildung 67: Ton-Testplatte P5W (weiß, Tilings 2). – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

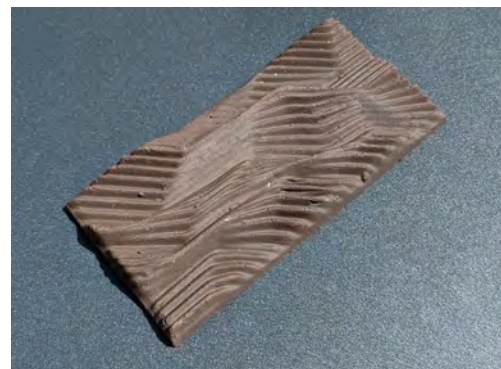


Abbildung 68: Ton-Testplatte P1B (schwarz, Lines). – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.



Abbildung 69: Ton-Testplatte P1W (weiß, Lines). – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

Tabelle 1: Beschreibung und Kategorisierung der Testplatten

Name der Platte	Name der Platte	Design	Beschreibung
P1B (black)	P1W (white)	Lines	wellige Struktur
P2B (black)	P2W (white)	Tilings 1	schmale Extrusionen
P3B (black)	P3W (white)	Flach	flache Platte
P4B (black)	P4W (white)	Tilings 3	breite Extrusionen
P5B (black)	P5W (white)	Tilings 2	Überlagerung aus Tilings 1 und 3

4.7. Entwurf der Versuchsanordnung für Prototypen im Außenbereich

Da die finalen Prototypen im Außenbereich getestet werden, muss die Versuchsanordnung alle Platten ähnlich der Sonne aussetzen und die Wasserzufuhr für alle Platten konstant sein. Die Installation der Platten ist als Vorhangfassade im Außenbereich gestaltet und an einem geeigneten Ort der Universität für Angewandte Kunst vorgesehen. Die weißen Platten werden den schwarzen gegenübergestellt und mittels einer Pumpe in einem Tank bewässert. Die Sensoren sind an der Hinterseite angebracht. Eine Rinne sammelt überschüssiges Wasser und führt es zum Tank zurück. Von dort wird es wieder auf den Platten verteilt.

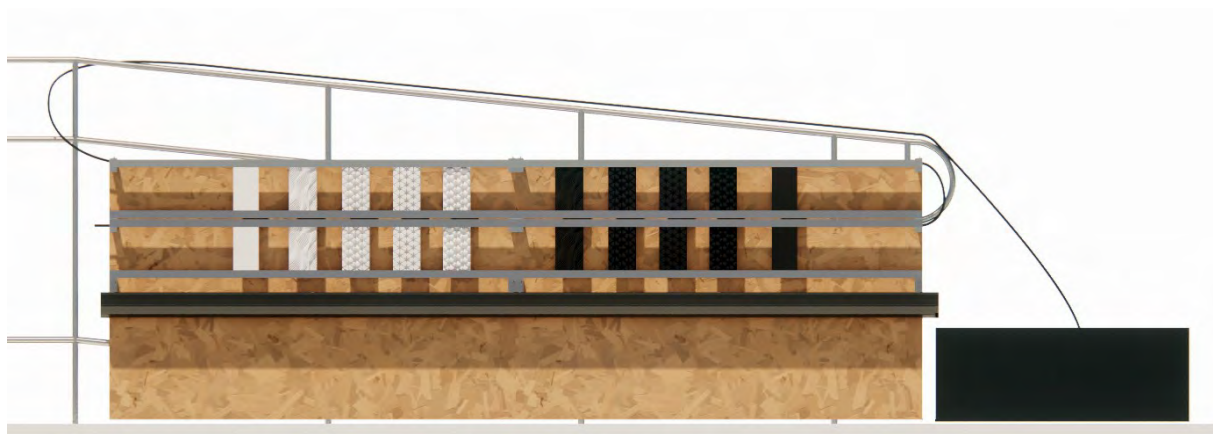


Abbildung 70: Versuchsaufbau in der Seitenansicht. Ein Aluminiumrahmen mit eingespannten Keramikplatten, rechts ein Wassertank und darunter eine Rinne zur Sammlung und Rückführung von Wasser. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien..



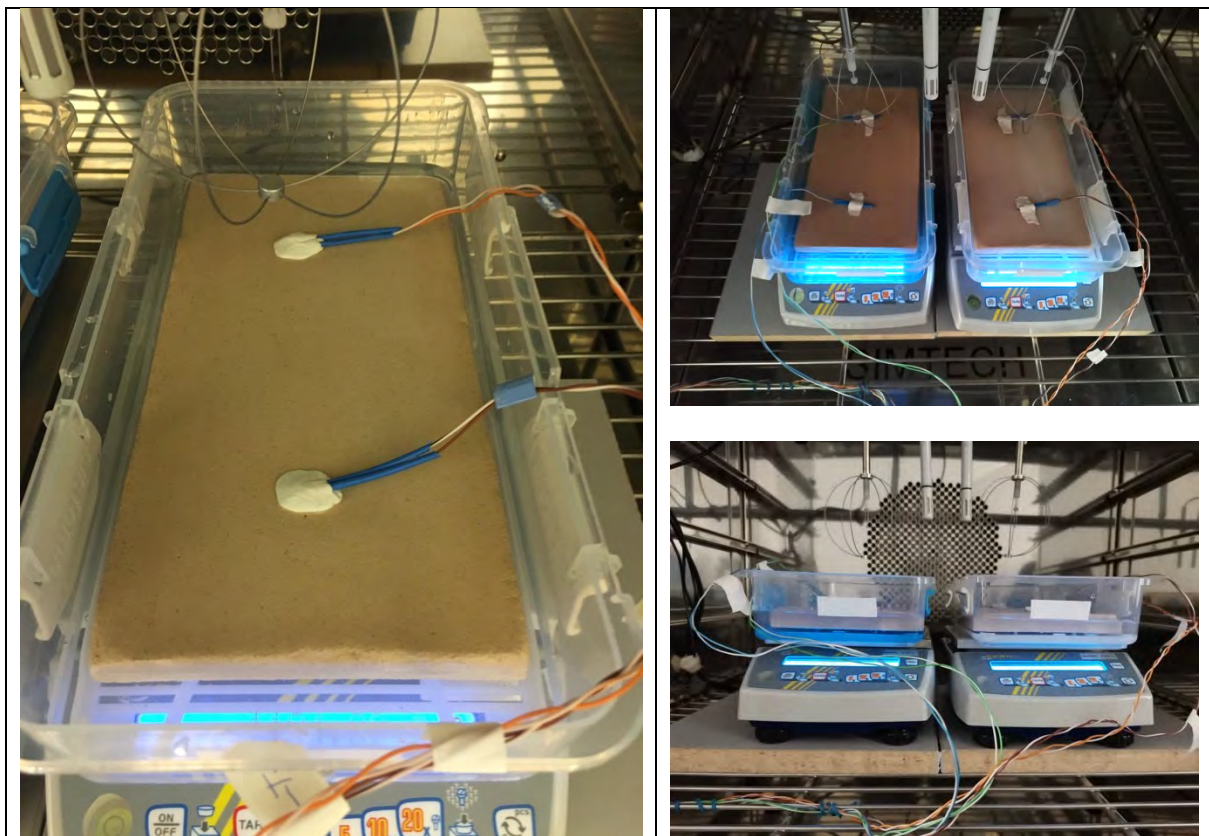
Abbildung 71: Perspektivische Ansicht der Versuchsanordnung. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

5. Evaluierung der Prototypen, vergleichende Bewertung

Die im vorherigen Kapitel beschriebenen Prototypen keramischer Elemente wurden unter unterschiedlichen Bedingungen getestet. Die ersten Testserien fanden in einem kontrollierten Environment statt, die zweite Serie im Außenraum im Sommer 2022 und 2023. Das Ziel bestand aus Untersuchungen der Oberflächentemperaturen sowie des Verdunstungspotenzials im Klimaschrank und unter realen Klimabedingungen.

5.1. Aufbau des Verdunstungsexperiments im Klimaschrank

Um eine quantitative Einstufung des Verdunstungspotential zu ermöglichen wurde eine Verdunstungsexperiment im Klimaschrank unter möglichst fixiertem Umgebungsklima geplant und in zwei Messserien durchgeführt. Konkret wurde die Messung der verdunsteten Wassermenge mittels einer Präzisionswaage realisiert. Um im Experiment eine möglichst gute Wasserversorgung der Proben zu garantieren wurden diese bis zur Hälfte ihrer Dicke in ein Wasserbad eingelegt. Das Experiment wurde in einen für Materialtests üblichen Klimaschrank unter möglichst konstantem Umgebungsklima von etwa 35°C Lufttemperatur und einer relativen Luftfeuchte von 30 % durchgeführt. Dieses Klima entspricht mehr einem eher sehr trockenem Außenklima welches bei den Tests zu höheren Verdunstungsmengen führt und somit die Unsicherheiten durch Ungenauigkeiten der Gewichtsmessung reduziert werden. Des Weiteren wird hierdurch auch der kapillare Wassertransport der unter annähernd maximaler Verdunstung getestet.



Experimentaufbau mit Präzisionswaagen und Sensoren zur Erfassung der Verdunstungsleistung unterschiedlicher Testproben. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

5.1.1. Verwendete Messtechnik

Geräte:

- SimTech SK40240s Klimaschrank
- Ahlborn ALMEMO® 2890-9
 - Kombifühler Luftfeuchte, -temperatur, -druck (FHAD46C41)
 - NTC-Temperatursensoren (ZA9040FS2)
- Swema 03 Anemometer

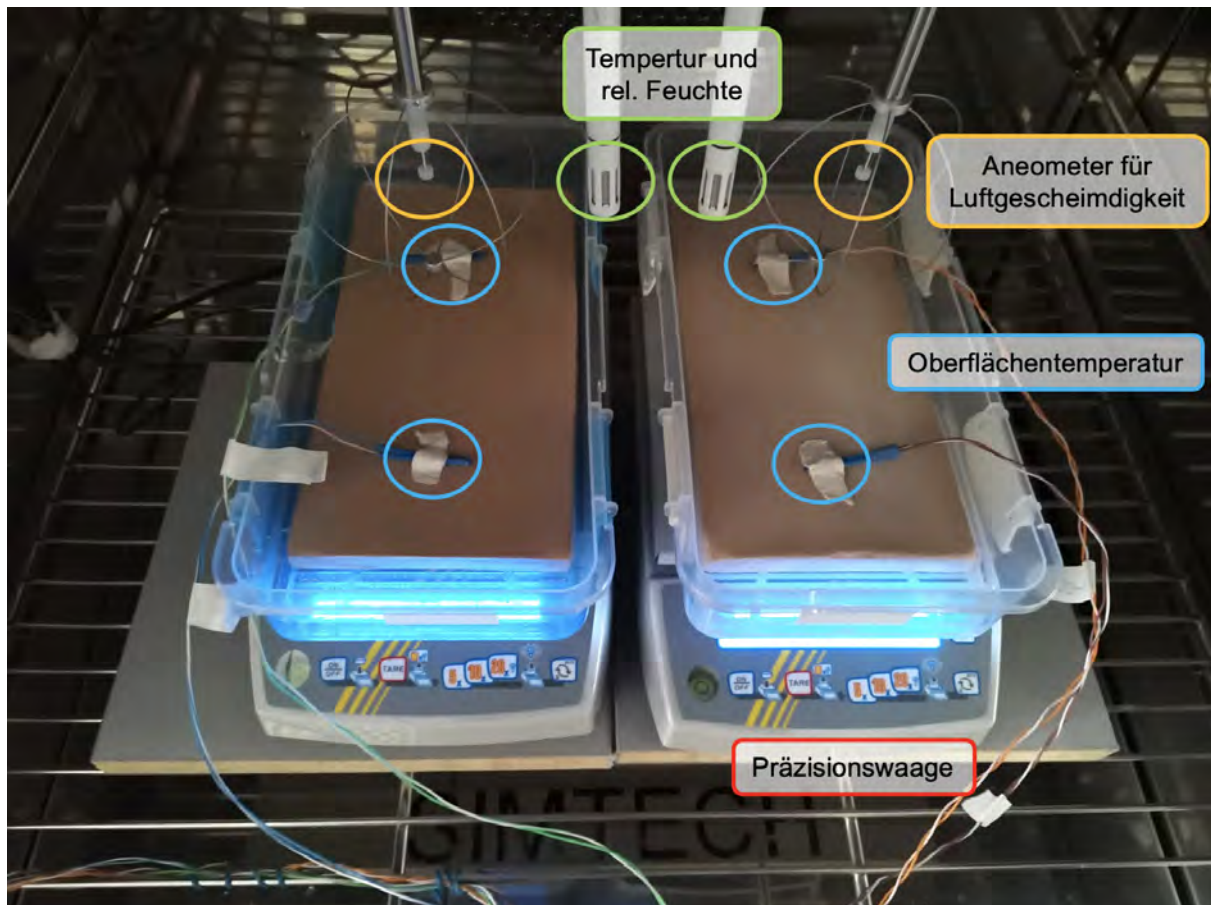


Abbildung 73: Detailansicht des Experimentaufbaus mit Präzisionswaagen und Sensoren zur Messung der Lufttemperatur, Luftfeuchte und Luftgeschwindigkeit sowie der Oberflächentemperatur. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

5.2. Erste Testserie ohne Oberflächenoptimierung im Klimaschrank

Anfang 2022 wurde eine erste Testserie mit unterschiedlichen Materialien, welche bei zwei Brenntemperaturen gebrannt wurden, einer Messung der Verdunstungsleistung im Klimaschrank unterzogen.

Tabelle 2: Übersicht der Testproben mit Informationen über das Probenkürzel, Material die Brenntemperatur.

Probe	Material	Brenntemperatur
P1	SKG 4405	1000°C
P1.1	SKG 4405	1100°C

P2	G&S 480	1000°C
P2.1	G&S 480	1100°C
P3	SG 20	1000°C
P3.1	SG 20	1100°C
P4	G&S 554	1000°C
P4.1	G&S 554	1100°C
P6	PRGM 4015	1000°C
P6.1	PRGM 4015	1100°C
P6.2	PRGM 4015	1200°C
P7	PRGF 4005	1000°C
P7.1	PRGF 4005	1100°C
P8	WITGERT 116s40	1000°C
P8.1	WITGERT 116s40	1100°C
P9	PRNF4005	1000°C
P9.1	PRNF4005	1100°C
P9.2	PRNF4005	1200°C

5.2.1. Messergebnisse

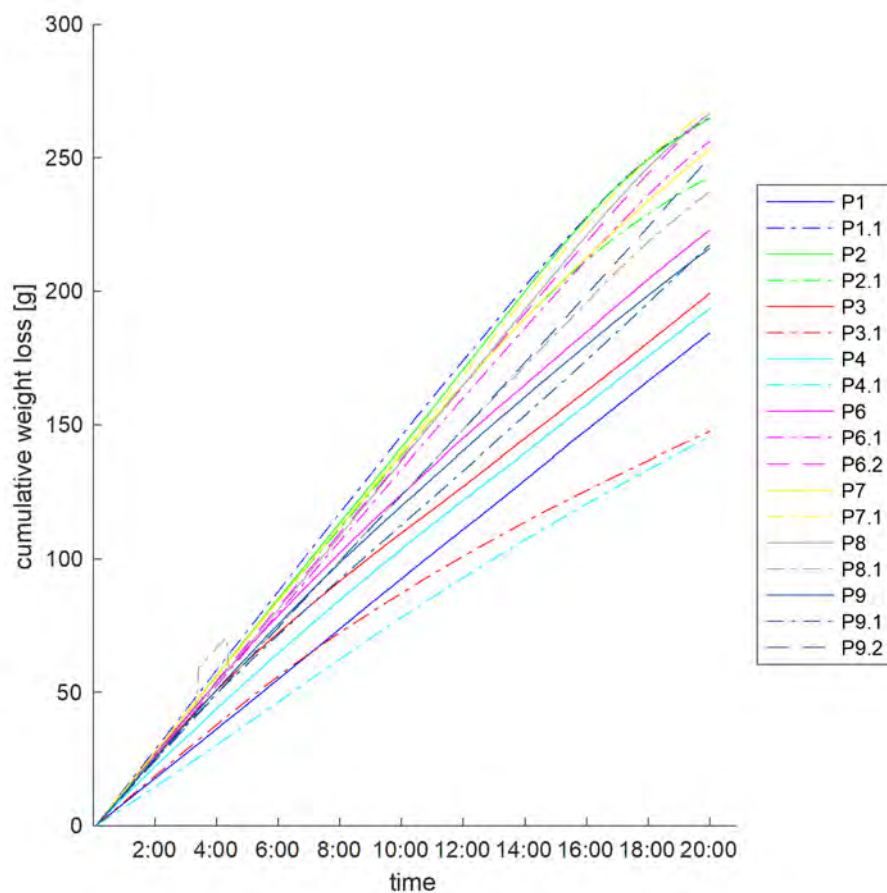


Abbildung 74: Vergleich der kumulierten Gewichtsreduktion der Proben über 18 Stunden im Klimaschrank. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

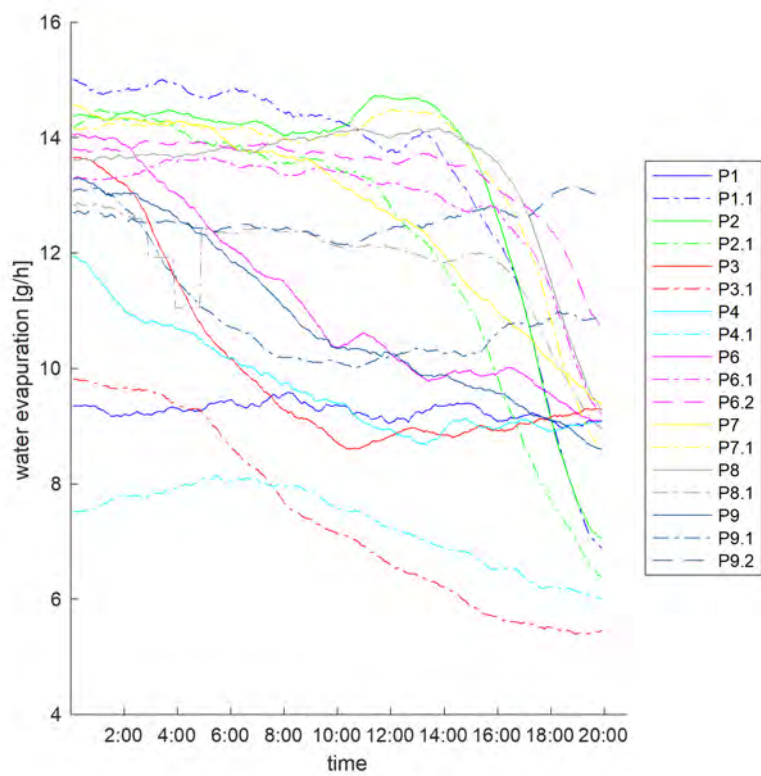


Abbildung 75: Vergleich der Verdunstungsleistung der Proben über 18 Stunden im Klimaschrank. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

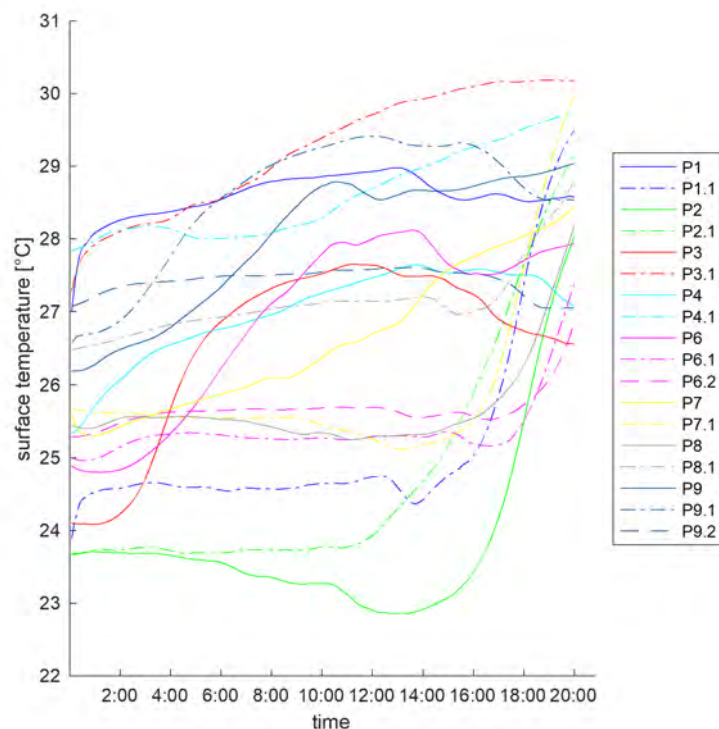


Abbildung 76: Vergleich der Oberflächentemperaturen der Proben über 18 Stunden im Klimaschrank. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

5.2.2. Schlussfolgerung

Eine sehr gute Performance mit hoher Verdunstungsleistung konnte für die in der Tabelle 3 dargestellten Proben in den Messungen dokumentiert werden. Aus den Ergebnissen war ersichtlich, dass nicht identen Materialien bei unterschiedlichen Brenntemperaturen ähnliches Verhalten hinsichtlich der Verdunstung zeigen. Auch hinsichtlich der Brenntemperatur war bei den verwendeten Materialien kein eindeutiger Trend zu bestimmten Brenntemperaturen ersichtlich.

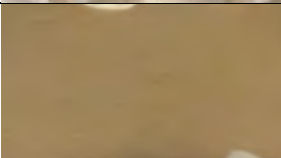
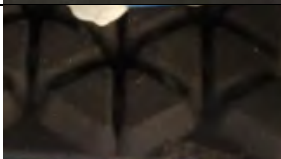
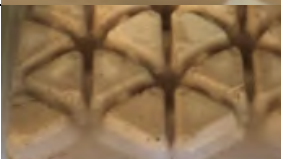
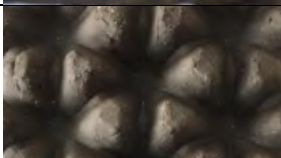
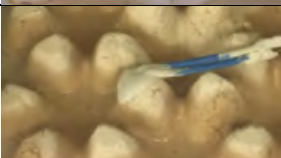
Tabelle 3: Übersicht der Testproben mit Informationen über das Probenkürzel, Material die Brenntemperatur sowie der erfassten Verdunstungsleistung.

Probe	Material	Brenntemperatur	Verdunstungsleistung
P2	G&S 480	1000°C	
P7.1	PRGF 4005	1100°C	
P1.1	SKG 4405	1100°C	
P8	WITGERT 116s40	1000°C	
P6.2	PRGM 4015	1200°C	
P6.1	PRGM 4015	1100°C	

5.3. Zweite Testserie mit optimierten Oberflächen und Materialien im Klimaschrank

In einer zweiten Testserie wurden unterschiedliche Probekörper mit für die Verdunstung optimierten Oberflächen aus schwarzem und weißem Ton unter ident Klimabedingungen getestet.

Tabelle 4: Übersicht der Testproben mit Informationen über das Probenkürzel, Material die Brenntemperatur und einer Detailansicht.

P1B		P1W	
P2B		P2W	
P3B		P3W	
P4B		P4W	
P5B		P5W	

5.3.1. Messergebnisse

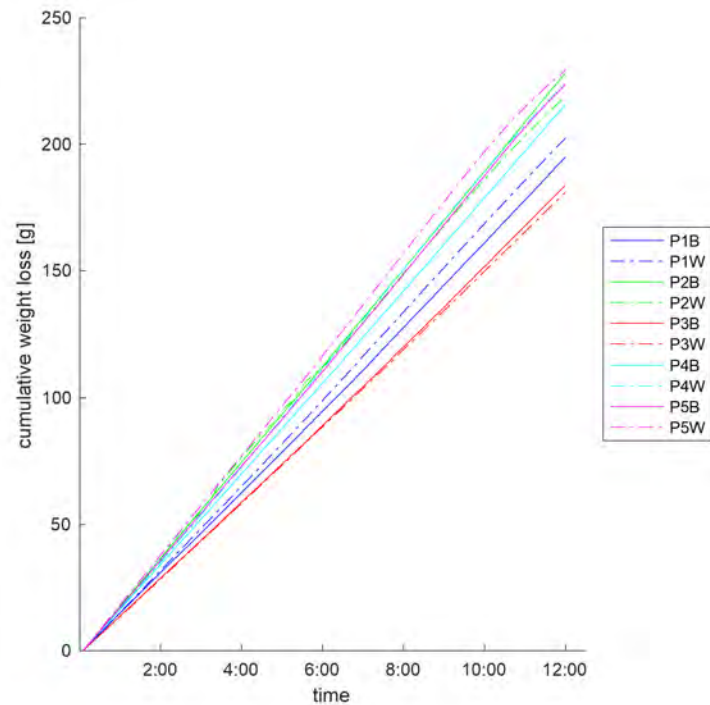


Abbildung 77: Vergleich der kumulierten Gewichtsreduktion der Proben über 10 Stunden im Klimaschrank. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

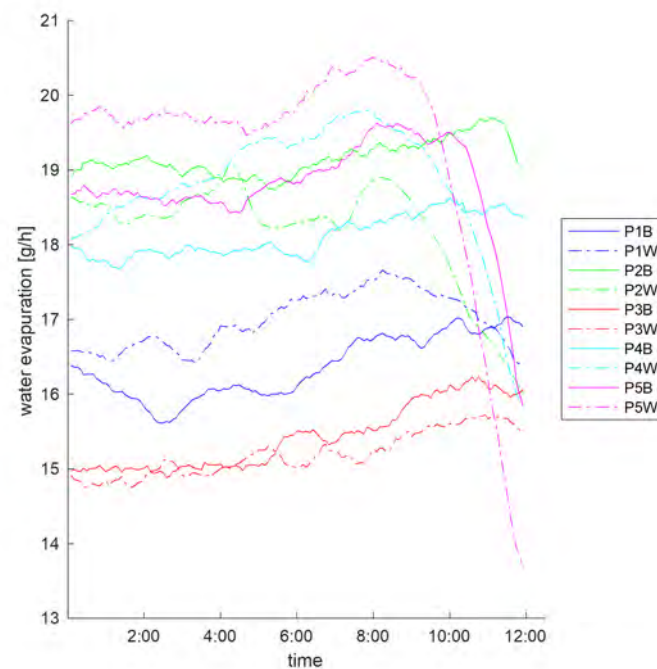


Abbildung 78: Vergleich der Verdunstungsleistung der Proben über 10 Stunden im Klimaschrank. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

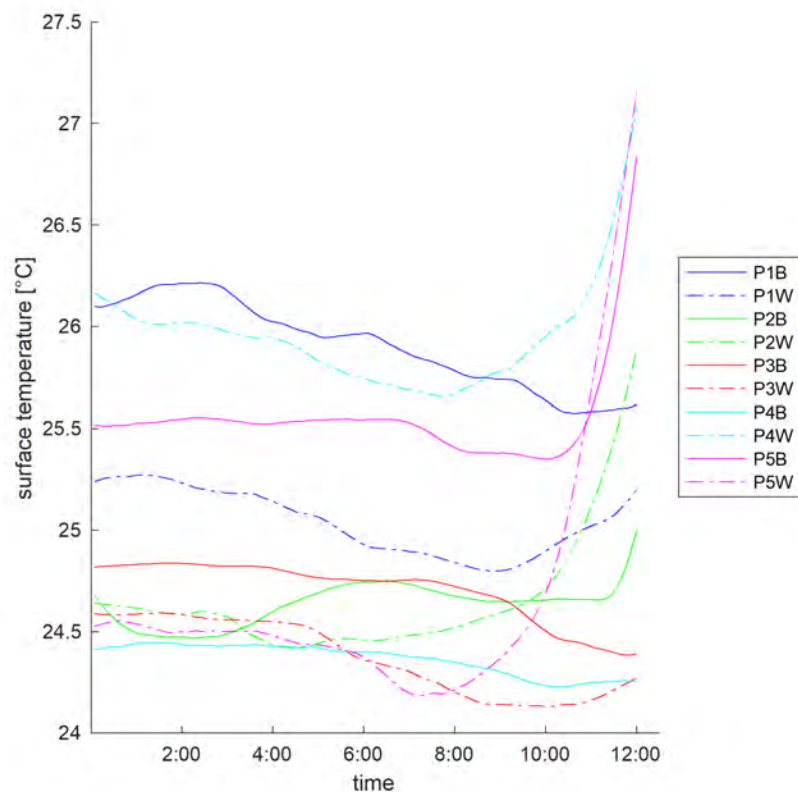


Abbildung 79: Vergleich der Oberflächentemperaturen der Proben über 12 Stunden im Klimaschrank. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

5.3.2. Schlussfolgerung

Betrachtet man den Gewichtsverlust, so zeigt sich auf Grund der Farbe kaum ein Unterschied, wobei die hellen Proben etwas mehr Gewichtsverlust zeigen. Wobei die tiefer gefurchte Oberflächen mehr Gewichtsverlust, als die glatte Oberfläche von P3 zeigen. P3 ist auch die einzige Probe, wo schwarz etwas höheren Gewichtsverlust aufweist. Bei der Verdunstungsleistung performen die stark geklüfteten Proben P2, P4 und P5 deutlich stärker und fallen dann nachvollziehbarer Weise am Ende der Testperiode mangels zu verdunstenden Wassers deutlich ab. Die deutlich stärkste Leistung zeigt die Probe P5W. Diese Probe hat dann auch über die ersten 8h eine sehr niedrige Oberflächentemperatur, die mit dem Ende der Verdunstungsleistung rasant ansteigt. Bei der Oberflächentemperatur zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen dunkel und hell, erwartungsgemäß liegen die hellen Platten deutlich unter den dunklen, mit der Ausnahme P4B. Auffallend ist, dass die glatte, weiße Oberfläche von P3W aber auch P3B sehr niedrige Temperaturen zeigen - ohne dass es am Ende der Testperiode zu einem nennenswerten Anstieg kommt.

Die Porosität des Materials selbst sorgt möglicherweise für eine ausreichende Rückhaltung des Wassers, was zu einer kontinuierlicheren Verdunstung und einer länger andauernden Kühlung führt. Die Eigenschaften stärker geklüfteter Platten könnte bei aktiver Besprühung schnellere und stärkere Effekte bringen, während bei passiven Konzepten glatte Oberflächen im Vorteil wären. Allerdings ist bei diesen Daten die Raumlage (horizontal) zu berücksichtigen.

Ein weiterer Schluss: Formen überlagern mitunter Farbeffekte.

5.4. Performance Monitoring unter realen Klimabedingungen im Sommer 2022

Die Einflüsse von Selbstbeschattung, Strahlungsenergie, Strömungseffekte durch die Strukturierung, Schwerkraft (Wasserströmung im Kontext mit der Positionierung) werden der angestrebten Effizienzsteigerung gegenübergestellt, um den Einsatzbereich der Elemente zu prognostizieren.



Abbildung 80: Oberansicht der Versuchsanordnung mit weißen Platten. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.



Abbildung 81: Versuchsanordnung mit schwarzen Platten im Vordergrund. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.



Abbildung 82: Wasserzufuhr mit Wassertank in der Seitenansicht der Versuchsanordnung. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

5.4.1. Messergebnisse

Die Versuchsanordnung hat folgende Messergebnisse produziert.

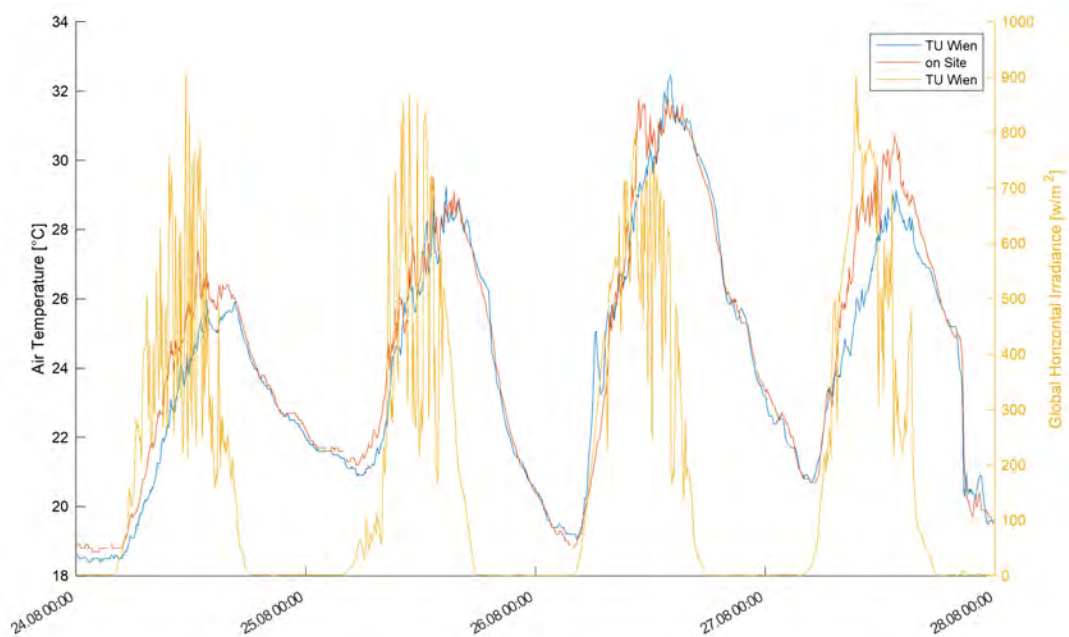


Abbildung 83: Verlauf der Lufttemperatur und der globalen horizontalen Solarstrahlung an heißen Sommertagen im August 2022. – Quelle: Projektteam / TU Wien.

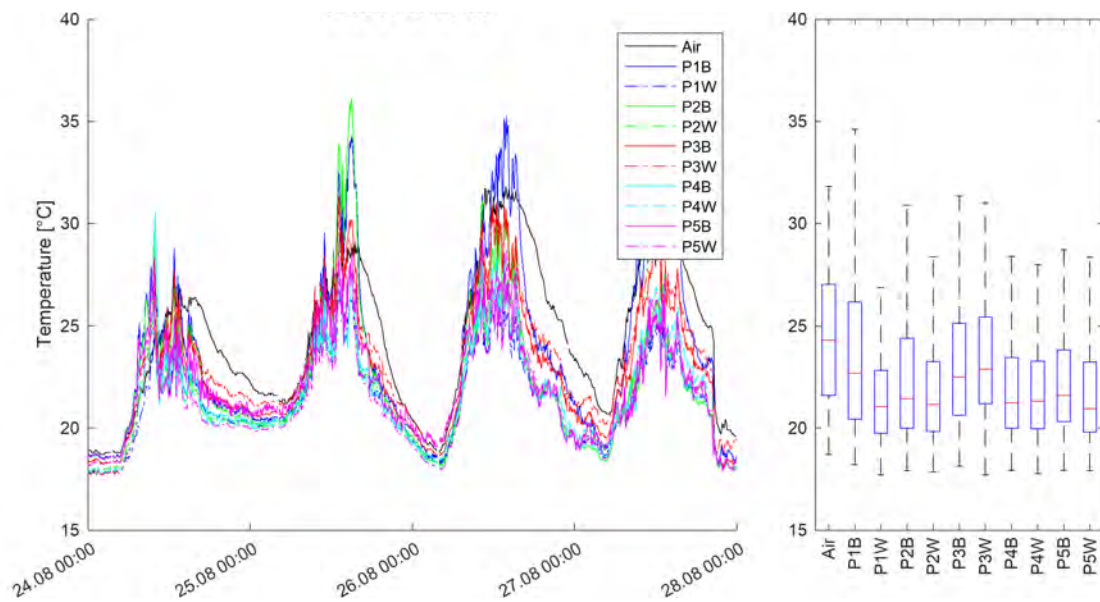


Abbildung 84: Verlauf und Verteilung der Lufttemperatur sowie der Rückseitentemperatur der Keramikplatten an heißen Sommertagen im August 2022. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

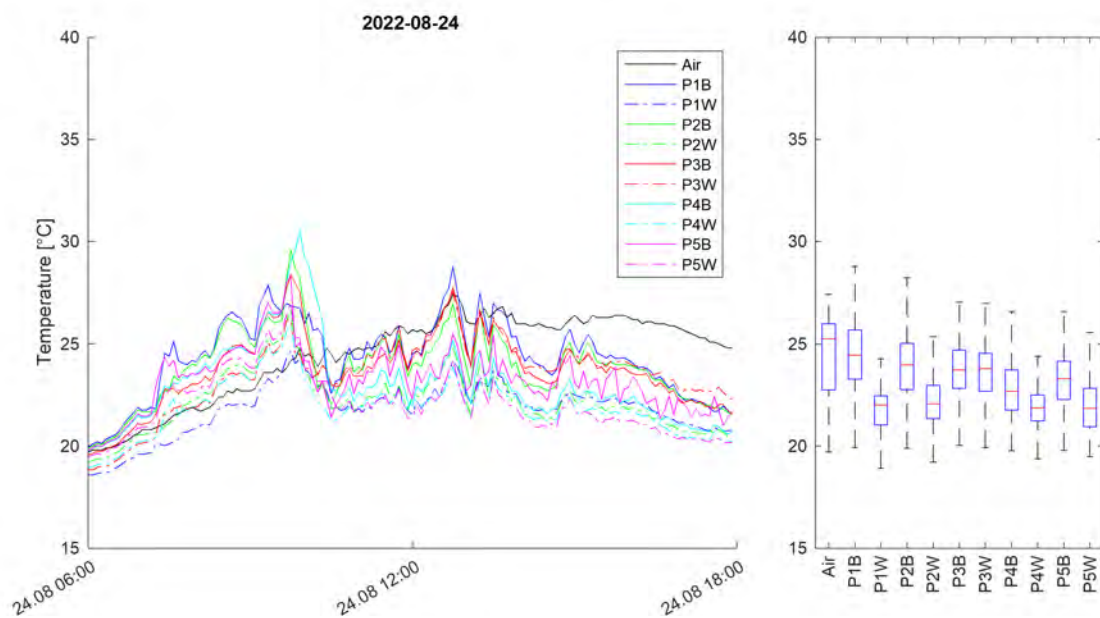


Abbildung 85: Verlauf und Verteilung der Lufttemperatur sowie der Rückseitentemperatur der Keramikplatten am 24. August 2022. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

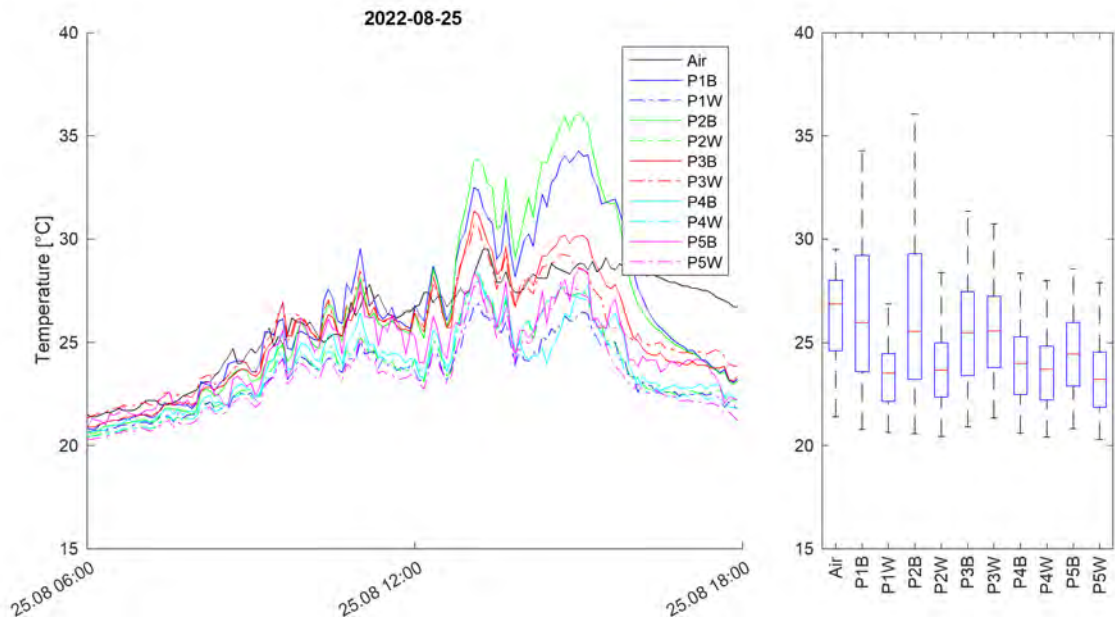


Abbildung 86: Verlauf und Verteilung der Lufttemperatur sowie der Rückseitentemperatur der Keramikplatten am 25. August 2022. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

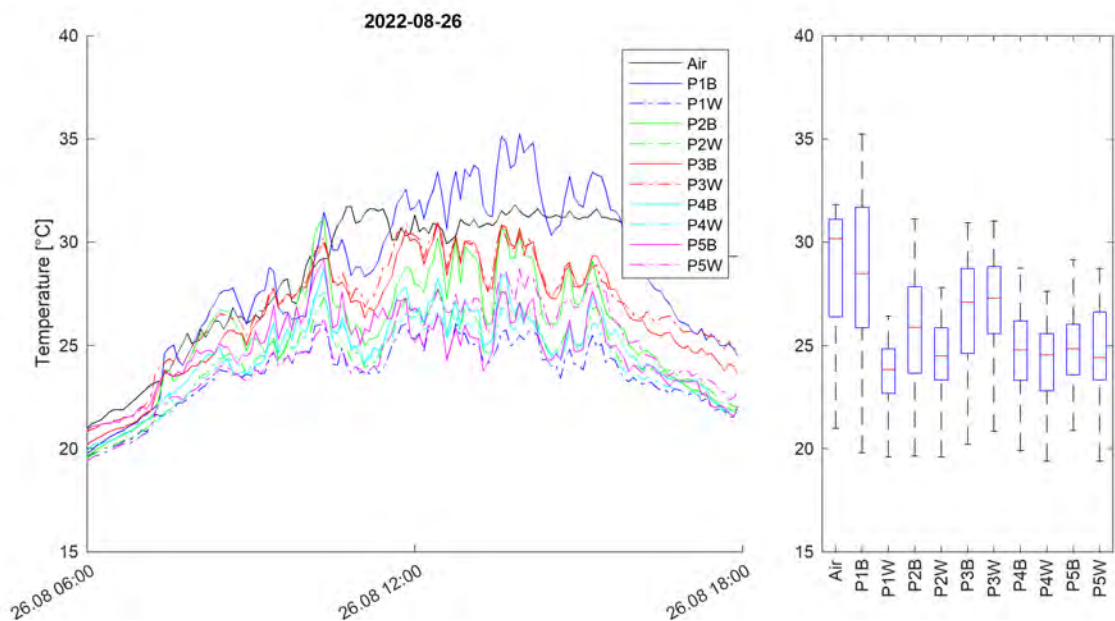


Abbildung 87: Verlauf und Verteilung der Lufttemperatur sowie der Rückseitentemperatur der Keramikplatten am 26. August 2022. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

5.4.2. Schlussfolgerung

In situ und in vertikaler Position zeigt sich dass die glatte Oberfläche von P3 die „Bestperformance“ hinsichtlich kühler Oberfläche nicht halten kann. Während alle anderen, gefurchten Oberflächen bis auf die dunkle Version von P1 kühler bleiben. P5W zeigt diesmal fast durchgehend die niedrigste Temperatur im Prüfzeitraum, und war neben P3 schon im Klimaschrank „Bestperformer“. Hier dürfte also For und Farbgebung günstig zusammenspielen.



Abbildung 88: Moosbildung auf weißen Keramikplatten. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

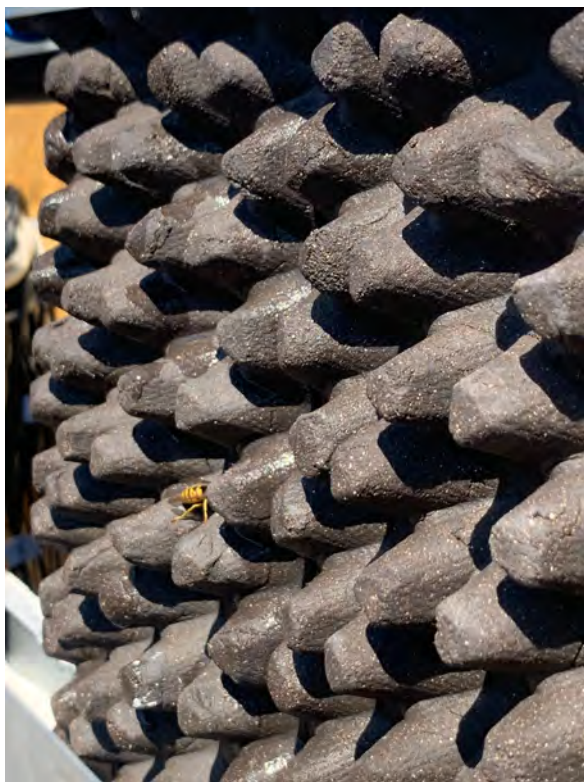


Abbildung 89: Nutzung der Keramikplatten durch Insekten. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

Frühe Moosbildung und Insektenbesuch zeigen, dass die geklüfteten Platten auch für die Biosphäre Vorteile bieten. Die Moosbildung fand nur auf den weißen Platten statt, Insekten wurden nur auf den schwarzen Platten beobachtet!

5.5. Neu kalibrierter Versuch zur Messung von Verdunstungseffizienz im Sommer 2023

Die folgende Sondierung wurde etabliert, um einige Aspekte besser zu verstehen. Folgende Parameter werden definiert, um in vergleichende Analysen verwendet zu werden:

- Verdunstungseffizienz (Volumen/Zeit)
- Umgebungsvariablen (Temperatur, Sonneneinstrahlung)

möglichen kleinen und kurzfristigen Experimente zeigen deutliche Zusammenhänge zwischen Formgebung, Verdunstung, Oberflächentemperatur und Ökologie.

Die Bedeutung von Gebäudeoberflächen hinsichtlich Ökologie und Stadtklima ist noch wenig beforscht. Mit dieser Sondierung wurde dazu ein Beitrag geleistet, der zeigt, dass eine weiterführende Beschäftigung lohnend ist.

Ein nicht direkt erwartetes Ergebnis sind die beiden Software-Komponenten ClayDisplacer und ClaySim. Beide Komponenten sind kraftvolle Werkzeuge für die Entwicklung und Performance-Abschätzung für keramische Gebäudeverkleidungen.

7.2. Lessons Learned

Die Sondierungen haben auch gezeigt, dass Außenexperimente wesentlich kosten- und vor allem zeitintensiver sind, wenn man Faktoren wie Wind und ein zuverlässiges Bewässerungssystem berücksichtigen möchte. Es ist dafür mehr als ein Jahr zu veranschlagen, um möglichst alle klimatische Situationen zu erfassen.

7.3. Dokumentation für Report

Dieser Bericht besteht aus allen Beiträgen der AutorInnengruppen.

7.4. Präsenz bei Messen und nationalen und internationalen Ausstellungen

Dieses Projekt wurde bei folgenden Gelegenheiten präsentiert:

Die Ausstellung UNDERSTANDING – Art & Research der Angewandten präsentiert im Februar 2022 in Prag ihre Forschungsprojekte. Als Reaktion darauf werden Interviews, ein wesentlicher Bestandteil des Ausstellungsformats, in Video- und Audioformat aufgezeichnet. Diese sind Teil der Ausstellung und auch Inhalt der RESEARCH ANGEWANDTE App.

Das kuratorische Team besteht aus Gerald Bast, Barbara Putz-Plecko und Alexander Damianisch.

Support: Art and Research, Zentrum Fokus Forschung

Ausstellung Angewandte Festival, Wien 27-30 Juni 2023

Wanderlust. Sharing of things resonant Ausstellung des Zentrum Fokus Forschung

Organisiert von Alexander Damianisch, Dr und Marianna Mondelos, MA

Support: Art and Research, Zentrum Fokus Forschung

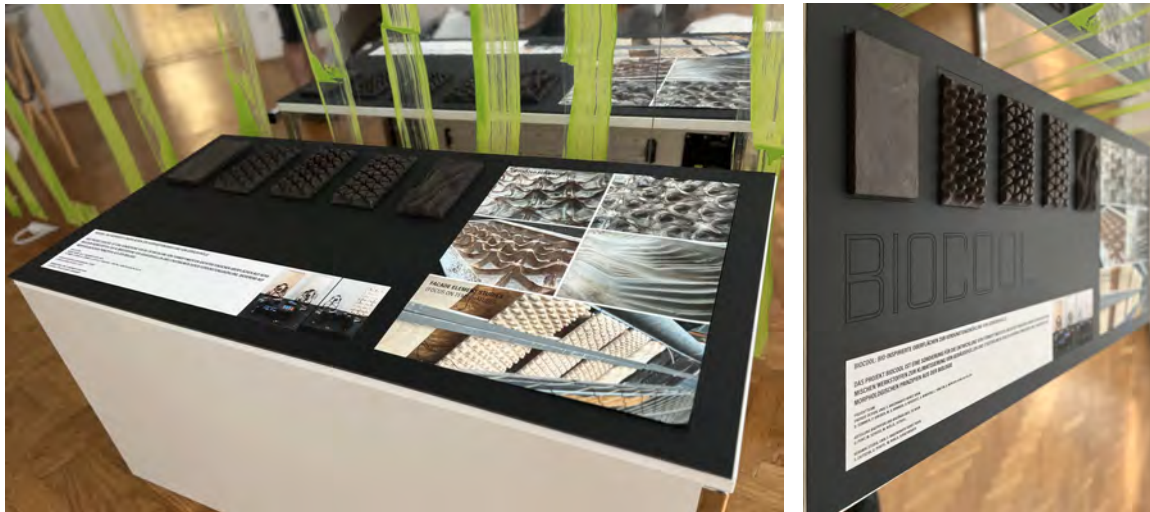


Abbildung 90: Fotografien der ausgestellten Arbeiten. – Quelle: Projektteam / Universität für angewandte Kunst Wien.

7.5. Social Media und Stakeholder Präsentationen

Das Projekt fand auch außerhalb wissenschaftlicher Kreise großes Interesse. Konzepte und Überlegungen zu den Prototypen wurden noch während der Projektlaufzeit im Rahmen interner Ausstellungen und in sozialen Medien besprochen.

8. Ausblick und Empfehlungen

Das Erfassen der Klima-Performance von Gebäudeverkleidungen sollte so selbstverständlich werden, wie das erfassen anderer bauphysikalischer Werte. Architektkonische-städtebauliche Planungen sind aufgerufen Strategien zu gezielter Oberflächenbefeuchtung zu entwickeln.

9. Verzeichnisse

9.1. Abbildungsverzeichnis

[Es konnten keine Einträge für ein Abbildungsverzeichnis gefunden werden.](#)

9.2. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beschreibung und Kategorisierung der Testplatten	60
Tabelle 2: Übersicht der Testproben mit Informationen über das Probenkürzel, Material die Brenntemperatur.....	62
Tabelle 3: Übersicht der Testproben mit Informationen über das Probenkürzel, Material die Brenntemperatur sowie der erfassten Verdunstungsleistung.	65
Tabelle 4: Übersicht der Testproben mit Informationen über das Probenkürzel, Material die Brenntemperatur und einer Detailansicht.....	66

9.3. Literaturverzeichnis

- Adrian Bejan, J. Z. (n.d.). *Design in Nature: How the Constructal Law governs evolution in biology, physics, technology, and social organization* (First Edition ed.). New York: Doubleday, Random House Inc.
- Amer, O., Boukhanouf, R., & G., I. H. (2017). A review of evaporative cooling technologies. *International journal of 2017*, Amer, O.; Boukhanouf, R.; Ibrahim H. G. A review of evaporative cooling technologies. *International journal of 2017*; Executive: 13. doi: 10.1016/0301-4215(73)90024-4 2 IEA Online Data Services. Available at, <http://data.iea.org/ieastore/statslisting>. a. doi:10.1016/0301-4215(73)90024-4
- Ariana I.K.S. Rupp, a. P. (2022). A CASE STUDY IN BIOMIMETIC ROOFING: MOISTURE DISSIPATION FROM LEAF-SHAPED SHINGLES. 19.
- AUSTRIA, S. (2017). *www.e-control.at*. Abgerufen am 10. 03 2023 von https://www.e-control.at/documents/1785851/1811582/Endbericht_Energieverbrauch_Energiearmut.pdf/
- Avcioğlu, B. Ç. (2020). Increasing efficiency with biomimetic approach in thermoregulative building envelope strategies supporting internal thermal comfort. *World Journal of Environmental Research, Volume 10*(Issue 2), 75-83. doi:10.18844/wjer.v10i2.5347
- B. Costelloea, D. F. (2003). Indirect evaporative cooling potential in air–water. *Energy and Buildings* , 35, 573-591.
- Barbara Imhof, P. G. (2012). *Built to Grow – Blending Architecture and Biology*. (B. S. Vienna, Hrsg.) Basel: Birkhäuser.
- Bejan, A. (2003). Constructal tree-shaped paths for conduction and convection. *Int. J. Energy Res.* 27 (4), 283–299. *International Journal of Energy Research*, 27, 283–299. Von <http://doi.org/10.1002/er.875>. abgerufen
- Bejan, A. L. (2008). Constructal tree-shaped flow structures. *Journal of Theoretical Biology*, 254(3), 755–761. Von <http://doi.org/10.1016/j.jtbi.2008.06.026> abgerufen
- Benyus, J. M. (1997). *Biomimicry*. New York: HarperCollins Publishers Inc.
- Bhamaer, D., Rathod, M., & Banerjee, J. (2019). Passive cooling techniques for building and their applicability in different climatic zones—The state of art. *Energy and Buildings*, 198, 467-490.
- Bundesamt, (. (2023). *www.destatis.de*. Abgerufen am 01. 03 2023 von <https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Internationales/Thema/bevoelkerung-arbeit-soziales/bevoelkerung/Weltbevoelkerung.html>
- Chen Zhang, O. B. (2021). Resilient cooling strategies – A critical review and qualitative assessment. 251, 111312.
- Corbusier, L. (1926). *Kommende Baukunst*. (H. Hildebrandt, Hrsg.) Berlin und Leipzig: Deutsche Verlagsanstalt Stuttgart.

- Costelloe, B., & Finn, D. (2003). Indirect evaporative cooling potential in air–water systems in temperate climates. *Energy and Buildings*, 35(6), 573-591.
- Cristina Sotelo-Salas a, C. E.-d.-L. (2021). Thermal assessment of spray evaporative cooling in opaque double skin. *Journal of Building Engineering*, 38, 11.
- DeKay, R. M. (2012). Climatic urban design: configuring the urban. (WIT Transactions on Ecology and The Environment, Hrsg.) *The Sustainable City VII, Vol. 155*, 619 - 630.
- Dipl.-Ing. (Univ.) Sebastian Haß, P. L. (2019). Adaptive Bricks: Potentials of Evaporative Cooling in Brick Building Envelopes to Enhance Urban Microclimate. *POWERSKIN CONFERENCE* (S. 21-32). Munich: POWERSKIN CONFERENCE.
- Dirk Gijbert Cirkel, B. R. (2018). Evaporation from (Blue-) Green Roofs: Assessing the Benefits of a Storage and Capillary Irrigation System Based on Measurements and Modeling. *Water* 2018, 10, 1253.
- Dnyandip K. Bhamare, M. R. (2019). Passive cooling techniques for building and their applicability in different climatic zones - the state of art . *Energy & Buildings* 198, 467–490.
- Elfatih Ibrahim, L. S. (2003). Performance of porous ceramic evaporators for. *Energy and Buildings*, 35, 941–949.
- Gruber, A. I. (2019). Biomimetic Groundwork for Thermal Exchange Structures Inspired by Plant Leaf Design. *Biomimemtics* 2019, 4, 75. doi:10.3390/biomimetics4040075
- Gruber, P. (2009). Biomimetics in architecture – inspiration from plants. *6th Plant Biomechanics Conference*, (S. 8). Cayenne.
- Gruber, P. (2011). *BIOMIMETICS IN ARCHITECTURE*. Wien: Springer Wien New York.
- IEA. (2023). [www.iea.org](http://data.iea.org/ieastore/statslisting.asp). Abgerufen am 01. 03 2023 von IEA Online Data Services. Available at, <http://data.iea.org/ieastore/statslisting.asp>
- Jan Knippers, K. G. (2016). *Biomimetic Research for Architecture and Building Construction: Biological Design and Integrative Structures* (Bd. 9). Cham, Switzerland: Springer. doi:DOI 10.1007/978-3-319-46374-2
- Jiang He, A. H. (2010). Experimental study of cooling effects of a passive evaporative cooling wall constructed of porous ceramics with high water soaking-up ability. *Building and Environment*, 45(2), 461-472.
- Jianguo Liu, T. D. (2007). Complexity of Coupled Human and Natural Systems. *Science*, 317, 1513-1516. doi:10.1126/science.1144004
- Jonathan Grinham, S. C. (2020). Origami microfluidics for radiant cooling with small temperature differences in buildings. *Applied Energy* 277 (2020) 115610. doi:10.1016/j.apenergy.2020.115610
- Kooijman, B. (2009). *Dynamic Energy Budget Theory for Metabolic Organizations*. Vrije Universiteit, Amsterdam: Cambridge University Press.
- layerSalomé M.S. Shokri Kuehnia, E. B.-Z. (2016). Roof cooling by direct evaporation from a porous layer. *Energy and Buildings*, 127, 521-528.

- Lukas Eurich, R. S.-N. (2016). Fundamentals of Heat and Mass Transport in Frost-Resistant Plant Tissues. In K. G. Jan Knippers, *Biomimetic Research for Architecture and Building Construction* (S. 97-108). Cham: Springer.
- Mattheos Santamouris, D. K. (2013). Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: *Energy and Buildings*, 57, 74–94.
- MCarmen Guerrero Delgado, J. S. (2020). Evaporative Mist Cooling as Heat Dissipation. *Applied Sciences*, 10, 23. doi:10.3390/app10176026
- MICHAEL WHITE, M. H. (2019). PLANTING DESIGN BY SIMULATED COMPETITION: A computational-ecological model for the selection and distribution of plant. *Intelligent & Informed, Proceedings of the 24th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA) 2019*, 2, S. 31-40. Hong Kong: Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA).
- Michalis Gr. Vrachopoulos, A. E. (2007). Incorporated evaporative condenser. *Applied Thermal Engineering*, 27, 823–828.
- Nazarian, N. K. (2022). Integrated assessment of urban overheating impacts on human life. *Earth's Future*, 10, e2022EF002682. doi:10.1029/2022EF002682
- O. Amer, R. B. (2015, February). A Review of Evaporative Cooling Technologies. *International Journal of Environmental Science and Development*, Vol.6(No.2), 111-117.
- Oluwasola, O. (2011). Pot-in-pot Enterprise: Fridge for the Poor. *United Nations Development Programme*.
- Pawlyn, M. (2016). *biomimicry in architecture* (Bd. 2. Edition). Newcastle: Riba Publishing.
- Petra Gruber, a. B. (2017). Patterns of Growth—Biomimetics and. *Buildings*, 7, 17. doi:10.3390/buildings7020032
- Renyuan Li, Y. S. (kein Datum). Photovoltaic panel cooling by atmospheric water sorption–evaporation cycle. *nature sustainability*. doi:doi.org/10.1038/s41893-020-0535-4
- S. Gosztonyi, P. G. (2013). BioSkin – Forschungspotenziale. (I. u. Bundesministerium für Verkehr, Hrsg.) *Berichte aus Energie- und Umweltforschung*, 46, 146.
- S.C. Fu, X. Z. (2020). Bio-inspired cooling technologies and the applications in buildings, S.C. Fu et al. *Energy & Buildings* 225 (2020) 110313.
- Santamouris, M., & Kolokotsa, D. (2013). Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art. *Energy and Buildings*, 57, 74-94.
- Scholze, S. (1983). *Keramik* (Bd. Teil 2: Keramische Werkstoffe). Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer Verlag.
- Sherman, T. F. (1981). On connecting large vessels to small. The meaning of Murray's law. *Journal of General Physiology*, 78, 431–453. doi:https://doi.org/10.1085/jgp.78.4.431
- Sigmund, B. (22. 05 2019). *www.detail.de*. Abgerufen am 02. 03 2023 von <https://www.detail.de/artikel/klimaaktive-ziegelfassaden-34040/>

- Thibaut Houette, B. F. (2020). GROWING MYCELIATED FACADES. (F. T. INSTITUTE, Hrsg.) *2020 WORLD CONGRESS*, 27.
- Umweltbundesamt. (2023). [www.umweltbundesamt.de](https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/energieverbrauch-privater-haushalte#endenergieverbrauch-der-privaten-haushalte). Abgerufen am 10. 03 2023 von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/energieverbrauch-privater-haushalte#endenergieverbrauch-der-privaten-haushalte>
- Vogel, S. (2003). Nature's Swell, But is it worth copying? *Material Matters*, 404 - 407.
- Vogel, S. (2009). Leaves in the lowest and highest winds: temperature, force and shape. *New Phytologist* 183, 13–26. doi:10.1111/j.1469-8137.2009.02854.x
- Vogel, S. (2012). *The Life of a Leaf*. London: The University of Chicago Press.
- Wei Chen, S. L. (2015). Analysis on the passive evaporative cooling wall constructed of porous ceramic pipes with water sucking ability. *Energy and Buildings*, 86, 541-549.
- Wikipedia. (16. 11 2022). Abgerufen am 01. 02 2013 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Tonkrugkühler>
- Wikipedia. (31. 08 2022). [en.wikipedia.org](https://en.wikipedia.org/wiki/Murray%27s_law). Abgerufen am 06. 03 2023 von https://en.wikipedia.org/wiki/Murray%27s_law
- Wikipedia. (01. 03 2023). [de.wikipedia.org](https://de.wikipedia.org/wiki/Thermodynamik). Abgerufen am 17. 02 2023 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Thermodynamik>
- World Energy Outlook 2017. (2017). International Energy Agency.
- Xianming Dai, F. Y.-C. (2013). International Journal of Heat and Mass Transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 64,, 1101-1108. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.05.030>
- Zeynep Aksöz, A. D. (2018). Approximating Climatic Performance with ANNs. *Recalibration: on imprecision and infidelity: Project Catalog of the 38th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture: Anzalone, Philip, Del Signore, Marcella, Wit, Andrew John*. ACADIA.
- Zhiwei Huang, Y. H. (2017). Review of nature-inspired heat exchanger. *international journal of refrigeration*, 78, 17.

10. Anhang

Anhang I: Workshop

Anhang II: Performance von ClaySim

