

Evaluierung Visionärer Architekturkonzepte (EVA)

Prüfung bauphysikalisch und energetisch innovativer Gebäudekonzepte auf ihre Machbarkeit unter Monitoring und Evaluierung eines Mock-Ups

B. Sommer, U. Pont

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

29/2020

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe
unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Auszugsweise Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in
dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik
Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

Evaluierung Visionärer Architekturkonzepte (EVA)

Prüfung bauphysikalisch und energetisch innovativer Gebäudekonzepte
auf ihre Machbarkeit unter Monitoring und Evaluierung eines Mock-Ups

Arch. DI. Bernhard Sommer
o.Univ.Prof. DI Dr.techn. Klaus Bollinger; Afshin Koupaie, BSc.
Mag. Arch. Galo Moncayo Asan MFA BFA; M.Arch. Viktoria Sandor
DI. Malgorzata Sommer-Nawara
Universität für Angewandte Kunst, Abt, Energie Design

DI. Dr.techn. Ulrich Pont
DI. Anna Engedy, Univ.Prof.DI. Dr.techn. Ardeshir Mahdavi
DDI. Dr. Matthias Schuss, Bsc. David Wolosiuk
TU Wien, Abteilung Bauphysik und Bauökologie

Wien, März 2019

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). 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 von allen betroffenen Bereichen 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 BMK publiziert und elektronisch über die Plattform www.NachhaltigWirtschaften.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und AnwenderInnen eine interessante Lektüre.

DI Michael Paula
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	8
Abstract	9
1. Ausgangslage	10
1.1. Motivation	10
1.2. Stand der Technik	10
2. Projektinhalt	16
2.1. Auswahl eines Ansatzes zur Umsetzung: Problemstellung Sanierung	16
2.2. Impact-Analyse	20
2.3. Umsetzungsplanung	22
2.4. Site-Analysis, Data-Visualisation, Interaction-Design	25
2.5. Konzeptionelle Grundlagen der Umsetzungsplanung	28
2.6. Umsetzungsplanung der Mock-Ups	31
2.6.1. <i>MU1 Architecture Counters Heat (ACH!)</i>	31
2.6.2. <i>MU2 Strategic Window</i>	32
2.7. Errichtung der Mock-Ups (1:1)	32
2.7.1. <i>Einrichten des Monitorings</i>	32
2.7.2. <i>Erste „Kalibrierung“ der Räume ohne Mock-Up</i>	36
2.7.3. <i>Entwicklung und Ausführung MU1</i>	37
2.7.4. <i>Entwicklung und Ausführung MU2</i>	45
2.7.5. <i>Fertig eingerichteter Raum</i>	49
3. Ergebnisse	50
3.1. Durchführen von Testreihen zum klimatischen Verhalten	50
3.2. Testreihe mit inaktiven Elementen (MU1) 17.8. bis 19.8.2018	51
3.3. Testreihe mit aktiven Elementen (MU1) 20.8. bis 22.8.2018	53
3.4. Durchführen von Testreihen zur Interaktivität	59
3.5. Einpassung in das Programm „Stadt der Zukunft“	60
4. Schlussfolgerungen	62
4.1. Lessons Learned	62
4.2. Verbreitungsaktivitäten und Potential	63
5. Ausblick und Empfehlungen	65

6. Verzeichnisse	66
6.1. Abbildungsverzeichnis	66
6.2. Tabellenverzeichnis	68
6.3. Literaturverzeichnis	69
7. Anhang.....	70

Kurzfassung

Ausgangssituation/Motivation

Die Stadt, wie auch das (Einzel-)Gebäude des 21. Jahrhunderts stehen vor zahlreichen, komplexen und anspruchsvollen Herausforderungen, dazu zählen rapide Veränderungen hinsichtlich Nutzungen und Nutzern, sowie Umwelt- und Klima-Rahmenbedingungen, Resilienz bei gleichzeitiger Flexibilität, Nachhaltigkeit bei gleichzeitigem Komfort, Bewegung und Dynamik bei gleichzeitiger Ruhe und Bezugspunktkontrolle. In diesem Kontext stoßen „herkömmliche“ Lösungsansätze, die einer linearen Denkweise folgen, immer öfter an ihre Grenzen. Der beschriebene laufende Wandel kann aber auch als Chance verstanden werden, nämlich Herausforderungen mit anderen, ungewöhnlichen und nicht-alltäglichen Lösungsansätzen zu begegnen. In diesem Kontext will das Projekt EVA sich mittels des Studiums von bereits modellhaft realisierten, sensorisch und mechanisch voll funktionstüchtigen, interaktiven Strukturen einer solchen Herangehensweise bedienen.

Inhalte und Zielsetzungen

Zielsetzung dieses Projektes ist es zu zeigen, dass auch auf den ersten Blick unrealistische und wenig machbar erscheinende Lösungen durchaus zur Bewältigung stärker werdender, globaler Probleme beitragen können. Die Stichwörter „Smart City“, „Smart Home“ und weitere verlangen geradezu nach Lösungen, die etwas fern vom Offensichtlichen liegen. Von größter Wichtigkeit in diesem Projekt ist es auch, den „Impact“, also die Wirkung der durchgeführten Realisierung und die Skalierbarkeit auf verschiedene Maßstäbe zu untersuchen, bzw. auch mit dem Zusammenwirken unterschiedlicher Disziplinen und Herangehensweisen ein möglichst wertvolles Leuchtturmprojekt hinsichtlich Innovation in der baubezogenen Nachhaltigkeitsdebatte zu schaffen, das fernab von einfachen Schlagwörtern wie „hochgedämmte Gebäudehülle“ Möglichkeiten aufzeigt.

Methodische Vorgehensweise

Nach einer extensiven Studie inklusive SWOT-Analyse (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) sollen aus einem Set von solchen modellhaften Lösungen die wirtschaftlich und systemisch am sinnvollsten zur 1:1 Umsetzung skalierbaren selektiert werden. Aus dieser Vorselektion bzw. Machbarkeitsstudie (mit Hilfe von Simulationen, virtuellen und physischen, interaktiven Modellen, Berechnungen, empirischer Analyse) soll die Umsetzung eines Ansatzes in eine lebensgroße Realumsetzung durchgeführt werden. Mit Hilfe von innovativen Materialien, modernen Produktionstechniken, Aktuatoren und Sensortechnik wird ein Mock-Up konstruiert, welches zum „Proof of Concept“ mit State-of-the-Art Monitoring Technik ausgestattet wird.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Wirksamkeit interaktiver Systeme konnte gezeigt werden. Insbesondere für die nachträgliche Verbesserung bestehender Strukturen konnten Lösungsansätze demonstriert werden, die allerdings nur unter der Voraussetzung sorgfältiger Gestaltung umsetzbar sind.

Ausblick

Das Projekt EVA zeigt das Potential räumlich und zeitlich differenzierter und präziser eingesetzter Maßnahmen. Energie wird nur dann bereitgestellt/abgeführt, wenn notwendig und sinnvoll (*just in time*) und nur dort, wo erforderlich (*just in location*). Ermöglicht wird dies durch den vermehrten Einsatz von Sensoren und die Integration von thermisch aktiven Elementen in die Gestaltung von Umschließungsflächen.

Abstract

Starting point/Motivation

The city, as well as the (single) building of the 21st century faces numerous, complex and demanding challenges, including rapid changes in uses and users, as well as environmental and climate conditions, resilience with simultaneous flexibility, sustainability with simultaneous comfort, movement and dynamics demanding at the same time silence and control. In this context, "conventional" approaches that follow a linear way of thinking are increasingly reaching their limits. However, the described ongoing change can also be understood as an opportunity to meet challenges with other, unusual and non-everyday solutions. In this context, the project EVA wants to use such an approach by studying already modelled, sensory and mechanical fully functional, interactive structures.

Contents and Objectives

The aim of this project is to show that even at first glance unrealistic and seemingly unworkable solutions can contribute to overcome or mitigate increasingly global problems. The keywords "smart city", "smart home" (and similar ones) require solutions that are envisioned on free roads, as off-the-shelf solution often do not deliver the required output. It is also of utmost importance in this project to examine the "impact", i.e. the effect of the implementation and the scalability to different levels. The challenge is to create the interaction of different disciplines and approaches in a lighthouse project with regard to innovation in the building-related sustainability debate, which shows possibilities far away from simple keywords like "highly insulated building envelope".

Methods

After an extensive study including a SWOT analysis (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) from a set of such model solutions, the economically and systemically most reasonable for a 1:1 conversion should be selected. From this preselection or feasibility study (with the help of simulations, virtual and physical, interactive models, calculations, empirical analysis), the implementation of an approach into a life-size real-world implementation should be carried out. With the help of innovative materials, modern production techniques, actuators and sensor technology, a mock-up is designed, which is equipped to the "proof-of-concept" with state-of-the-art monitoring technology.

Results

The effectiveness of interactive systems could be demonstrated. In particular, for the subsequent improvement of existing structures, solutions could be demonstrated, which, however, can only be implemented under the precondition of careful design.

Prospects/Suggestions for future research

The EVA project demonstrates that resource-efficiency and the more precise use of resources can be achieved not only in time, but also by local precision.

1. Ausgangslage

1.1. Motivation

Die Stadt, wie auch das (Einzel-)Gebäude des 21. Jahrhunderts stehen vor zahlreichen, komplexen und anspruchsvollen Herausforderungen, dazu zählen rapide Veränderungen hinsichtlich Nutzungen und Nutzern, sowie Umwelt- und Klima-Rahmenbedingungen, Resilienz bei gleichzeitiger Flexibilität, Nachhaltigkeit bei gleichzeitigem Komfort, Bewegung und Dynamik bei gleichzeitiger Ruhe und Bezugspunktkontrolle. In diesem Kontext stoßen „herkömmliche“ Lösungsansätze, die einer linearen Denkweise folgen, immer öfter an ihre Grenzen. Der beschriebene laufende Wandel kann aber auch als Chance verstanden werden, nämlich Herausforderungen mit anderen, ungewöhnlichen und nicht-alltäglichen Lösungsansätzen zu begegnen.

Ein wesentlicher Aspekt ist die umfassende Digitalisierung und „Sensibilisierung“ der menschlichen Umgebung. Sei es das Internet der Dinge, autonome Fahrzeuge oder all die Technologien, die als „smart“ bezeichnet werden. Neben unbestreitbaren Gefahren, die vor allem die Vernetzung und der mögliche Missbrauch von Sensoren zu unerwünschter Überwachung mit sich bringt, bestehen doch genauso unbestreitbar große Chancen in der Nutzbarmachung solcher Technologien. In diesem Kontext will das Projekt EVA sich mittels des Studiums von bereits modellhaft realisierten, sensorisch und mechanisch voll funktionstüchtigen, interaktiven Strukturen diese Chancen ausloten, wobei sämtliche Überlegungen zur Interaktivität und zum Informations- und Datenaustausch in diesem Projekt lokaler Natur sind, also keine Verbindung zum Internet benötigen und auch verdrahtet (wired) funktionieren würden.

1.2. Stand der Technik

Um sich in dem durchaus weiten Feld innovativer Ansätze zu orientieren, die mit den Begriffen *Smart*, *Intelligent*, *Interactive* und *Responsive* arbeiten, musste die Terminologie erarbeitet und definiert werden (siehe Abbildung 1).

In der Folge wurde eine Klassifizierung vorgenommen. Sortiert wurden die Projekte nach der Zielsetzung (WHY-category) und nach der beschriebenen Funktionsweise (HOW-category). Die Hauptkategorien der Zielsetzung waren *energy savers*, *energy producers*, *comfort providers* mit weiteren Subkategorien. Bei der Frage nach der Funktionsweise wurden mehr Hauptkategorien festgelegt. So konnten die gefundenen Projekte nach *mechanical*, *intelligent material-based*, nach der Reichweite ihrer Sensoren (*resolution of sensing range*), der Reichweite ihrer Reaktionen (*resolution of acting range*), dem Ziel ihrer Sensoren (*object of sensing*), der Vielfalt ihrer Sensoren (*sensing diversity*) und der Vielfalt ihrer Reaktionen (*acting diversity*) beurteilt werden. Diese Kategorien wurden bei der Eingabe eines Projekts festgelegt. Dazu wurde eine Eingabemaske in Excel entwickelt (siehe Abbildung 2), die die Daten direkt in ein Skript (Abbildung 3) spielt. Das Skript ermöglicht die statistische Auswertung nach den verschiedenen Gesichtspunkten oder die Suche von Projekten verschiedener Kategorien, siehe Abbildung 4.

Es zeigte sich, dass das Anliegen der meisten untersuchten Projekte *comfort* und *energy saving* war. Darüber hinaus waren zwei Drittel der Projekte akademischer Natur, in dem Sinne, dass sie kaum auf

ihre Funktionsweise geprüft wurden. Ein Drittel hingegen konnte man als *professional* bezeichnen und diese wurden entweder einmalig realisiert oder sogar vermarktet, siehe Abbildung 5 und Abbildung 6.

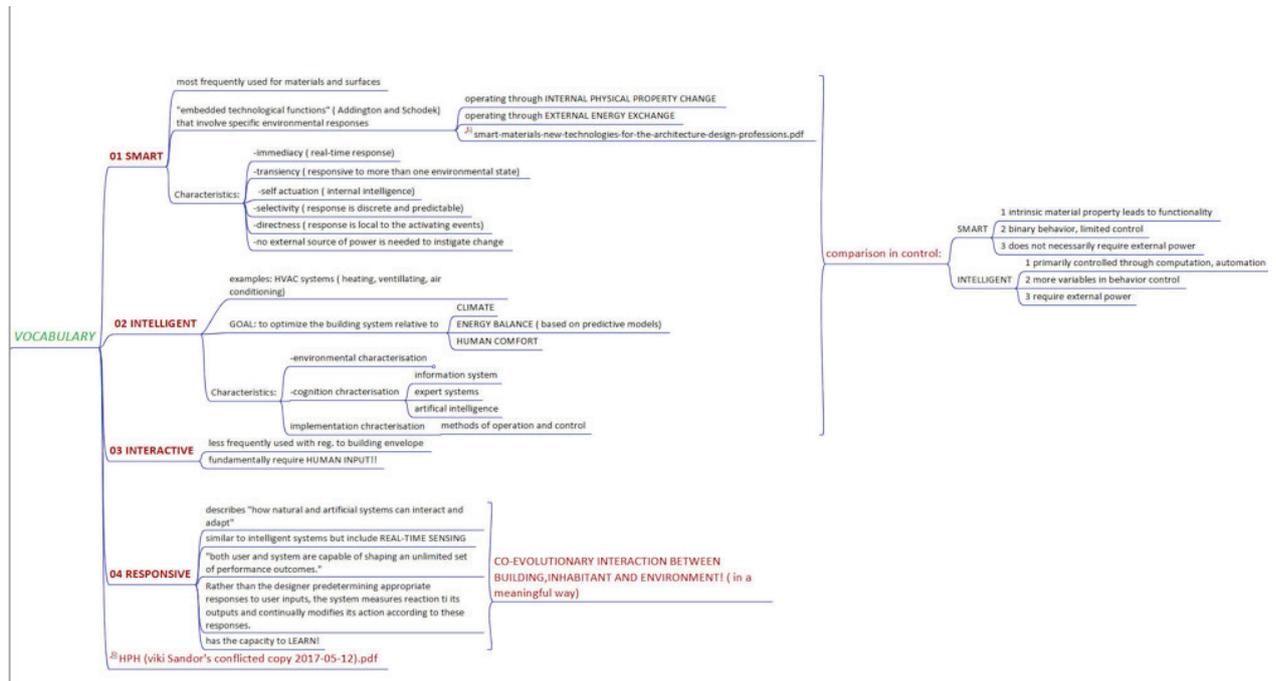


Abbildung 1: terminology map, Übersicht und Definition von für die Katalogisierung verwendeten Begriffen.

project TITLE	#MATERIAL INTELLIGENCE	material	#MECHANICAL	#folding	#rotating	#static	#flashing
BLOOM, smart bimetal	#MATERIAL INTELLIGENCE	#thermobimetal					
prosolve370e	#MATERIAL INTELLIGENCE	#other					
al bahar towers	#MATERIAL INTELLIGENCE		#MECHANICAL	#folding	#rotating		
RMIT Design Hub			#MECHANICAL		#rotating		
responsive skin			#MECHANICAL	#folding			
lighting responsive blind			#MECHANICAL		#rotating		
solar-leaf bioreactor facade	#MATERIAL INTELLIGENCE	#algae					
algae folly	#MATERIAL INTELLIGENCE	#algae					
INTERACTIVE KINETIC FAÇADE			#MECHANICAL		#rotating		
"Shape Shift"	#MATERIAL INTELLIGENCE	#other					
Adaptive Solar Envelope			#MECHANICAL		#rotating		
Hydro-Active Pillow Structures	#MATERIAL INTELLIGENCE	#other					
Self-Adaptive Membrane	#MATERIAL INTELLIGENCE	#other		#folding			
chromatic skins	#MATERIAL INTELLIGENCE	#other					
Weather Sensible Structure	#MATERIAL INTELLIGENCE	#other		#folding			
Living Glass	#MATERIAL INTELLIGENCE	#other					
Amphibious Envelope	#MATERIAL INTELLIGENCE	#other					
Living Light			#MECHANICAL				#flashing
North House			#MECHANICAL		#rotating	#static	
project TITLE	#expanding	resolution of SENSING range	resolution of ACTING range	OBJECT of sensing	sensing DIVERSITY	acting DIVERSITY	
BLOOM, smart bimetal		#RSR-high	#RAR-high		#OOS-environment	#SD-mono	
prosolve370e		#RSR-high	#RAR-high		#OOS-environment	#AD-mono	
al bahar towers		#RSR-high	#RAR-high	#OOS-user	#OOS-environment	#AD-mono	
RMIT Design Hub		#RSR-high	#RAR-high	#OOS-user	#OOS-environment	#AD-mono	
responsive skin		#RSR-high	#RAR-high		#OOS-environment	#AD-mono	
lighting responsive blind		#RSR-high	#RAR-high		#OOS-environment	#AD-mono	
solar-leaf bioreactor facade		#RSR-high	#RAR-high		#OOS-environment	#AD-mono	
algae folly		#RSR-high	#RAR-high		#OOS-environment	#AD-mono	
INTERACTIVE KINETIC FAÇADE		#RSR-high	#RAR-high	#OOS-user	#OOS-environment	#AD-mono	
"Shape Shift"	#expanding	#RSR-high	#RAR-high		#OOS-environment	#AD-mono	
Adaptive Solar Envelope		#RSR-high	#RAR-high		#OOS-environment	#AD-mono	

Abbildung 2: Eingabemaske zur Erfassung beispielhafter Projekte

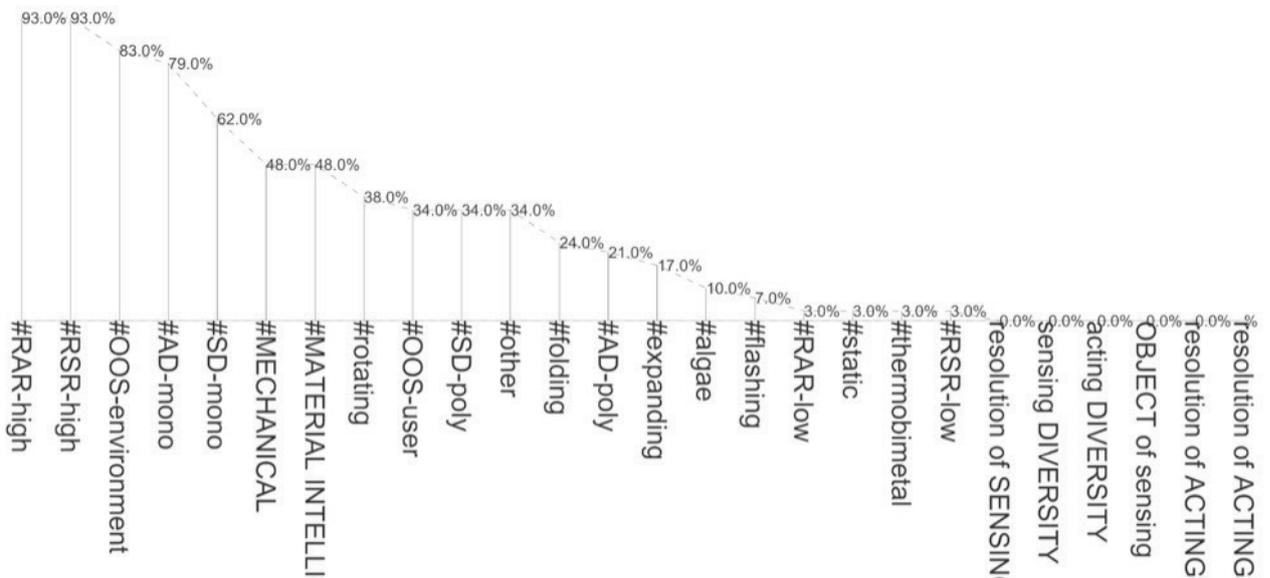


Abbildung 6: HOW-category, Zuordnung der eingegebenen Projekte (Mehrfachnennungen waren möglich)

Um einen tieferen Einblick in die einzelnen Referenzprodukte zu bekommen, wurden die Projekte der Datenbank in einen Katalog übertragen, um die technischen und wirkungsbezogenen Überlegungen genau nachvollziehen zu können – ein beispielhaftes Katalogblatt siehe Abbildung 7. Ein Katalog der wichtigsten Ergebnisse findet sich in **Anhang I**.

PROJECT TITLE :	KALEIDOSKIN
PROJECT AUTHOR :	B. Chompff and C. Wunderlich/University of Applied Arts, Vienna; Supervisor: Bernhard Sommer, Galo Moncayo
PROJECT YEAR :	2013
PROJECT TYPE :	ACADEMIC
PROJECT LINKS :	HTTP://ENERGY-DESIGN.TUMBLR.COM
PROJECT KEYWORDS :	ORIGAMI, ADAPTIVE BUILDING ENVELOPE, AIRFLOW, EFFICIENT, SOLAR GAINS, NATURAL VENTILATION

INPUT/
KEYWORDS

PROJECT

OUTPUT 1

OUTPUT 2

ORIGAMI, ADAPTIVE BUILDING ENVELOPE, AIRFLOW, EFFICIENT, SOLAR GAINS, NATURAL VENTILATION

This project is about efficient use of passive energy resources such as solar gains and natural ventilation. The skin performs according to the user requirements and preferences during occupancy.

For instance, during occupancy a maximum of daylight penetration could be set as a user defined target. Whenever no user is present within a certain distance, the performance goal of the structure is to maintain a constant indoor climate.

The building's envelope is designed to remember user preferences and towards learning and adjusting its behavior to specific users. This project was realized as a technical 1:1 mock-up of the real design, thus it works exactly as intended for real world.

Abbildung 7: Katalog visionärer Konzepte, beispielhaftes Katalogblatt

Obwohl eine überwiegende Mehrheit der untersuchten Projekte *comfort* als Ziel angab, arbeitete keines der in AP2 untersuchten Projekte mit Speichermasse. Das ist insofern nicht verwunderlich, als Speichermasse generell als statisch und daher ungeeignet für reaktive, dynamische Ansätze wahrgenommen wird. Für eine Wanderausstellung entwickelte aber Prof. Brian Cody das Energie Design für einen Ausstellungspavillon¹ (siehe Abbildung 8), dessen Speichermasse aus Wasser bestand und das zu Transportzwecken abgelassen werden konnte. Darüber hinaus arbeitete das Konzept damit, dass die Masse nachts nach draußen gepumpt wird, um dadurch Kälte für den Tag zu gewinnen. Allerdings wies es keine interaktiven Elemente bezüglich seiner Funktionsweise auf.

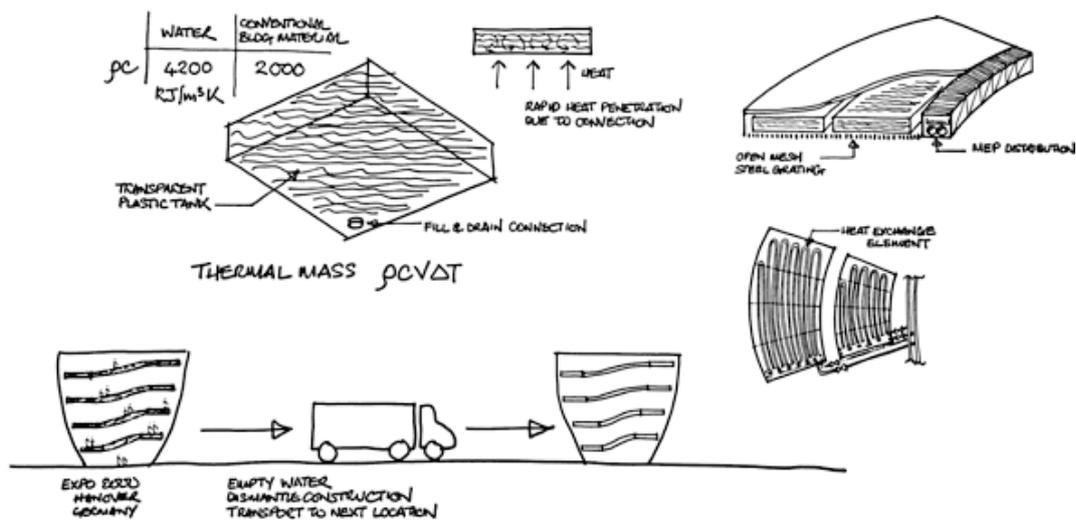


Abbildung 8: Brian Cody, Energiekonzept für einen Pavillon der Duales System Deutschland GmbH für die EXPO 2000 in Hannover, Skizze: Brian Cody

Ebenfalls selten waren Projekte, die klimatische Verbesserungen für einzelne, real anwesende Personen zu erreichen suchten. Ein solches interaktives Konzept fand sich mit *Local Warming* bei Carlo Ratti, Leiter des MIT senseable city lab, auf der Architektur-Biennale in Venedig, siehe Abbildung 9. Dieses Projekt ist Teil von Arbeiten des MIT zu *location-based temperature control systems*. Mittels *Motion Tracking* werden Infrarot-Strahler so angesteuert, dass ein präzises persönliches Klima für jeden Nutzer geschaffen wird. „Thermische Wolken“ folgen den Menschen durch den Raum und sorgen für verbesserten Komfort. Diese „lokale Präzision“ stellt auch den Bezug zur Energieeffizienz her. Die Installation will die Energieverschwendung aufzeigen, die durch das Konditionieren von ungenutzten oder teilgenutzten Räume entsteht. Die Präsenz von Menschen und deren Aufenthaltsort werden mit der Klimakontrolle synchronisiert. Völlig ausgeblendet blieb dabei aber die Energieerzeugung.

¹ DSD Pavillon für die EXPO 2000 in Hannover, beschrieben in Cody, B.: Form Follows Energy, Birkhäuser, Basel 2017, S.200 f.



Abbildung 9: MIT Senseable City Lab, Carlo Ratti: Local Warming, Installation, 14th International Architecture Exhibition Fundamentals, Architektur-Biennale, Venedig 2014, Foto: MIT Senseable City Lab

2. Projektinhalt

2.1. Auswahl eines Ansatzes zur Umsetzung: Problemstellung Sanierung

Nur wenige der innovativen Ansätze, die untersucht wurden, arbeiteten mit bestehenden Gebäuden. In diesem Zusammenhang stellten sich energetisch zwei Themen heraus:

- Geringe thermische Isolierung und
- ab den 50er-Jahren des 20. Jahrhunderts geringe Speichermasse².

Während das Nachrüsten mit thermischer Isolierung die übliche Sanierungsweise ist und eher an kulturelle und wirtschaftliche, als an physikalische Grenzen stößt, ist das Nachrüsten mit Speichermasse unüblich und es konnten keine Überlegungen dazu gefunden werden. Die kulturellen Grenzen beziehen sich vor allem auf die strukturierte Fassadengestaltung des 19. Jahrhunderts und davor, aber durchaus auch auf die stark gegliederten Betonskelette des *Brutalismus*³. Diese Gebäude kann man derzeit, will man ihr äußeres Erscheinungsbild erhalten, nur von innen thermisch sanieren. Dies führt zu Problemen der Zugänglichkeit, da in genutzten Objekten eine solche Sanierung schwer durchzusetzen ist und zu bauphysikalischen Problemen, da es unweigerlich zur Bildung von Wärmebrücken kommt, aber durch die Innendämmung wird dem Gebäude auch Speichermasse entzogen. Die Nachrüstbarkeit von Gebäuden mit Masse ist aber noch aus einem anderen Grund problematisch: Dämmung ist naturgemäß sehr leicht, die statische Belastung des Gebäudes ändert sich kaum. Um die Wärmespeicherkapazität zu erhöhen, muss aber unweigerlich Masse eingebracht werden, die die konstruktiven, tragenden Teile des Gebäudes womöglich überlasten würde.

² Die bauphysikalischen Kenndaten einer größeren Zahl an bestehenden Gebäuden wurden im Rahmen des folgenden FFG Projekts untersucht: ID 5500530, Sommer, B. und Pont, U., Entwicklung einer strukturierten und fehlerminimierten Datenaufbereitung und Dokumentation für Energieausweise (EDEN), Bericht 24/2017, Berichte aus Energie- und Umweltforschung des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien

³ www.azw.at/de/termin/sos-brutalismus/ Ausstellung des Architekturzentrum Wien, 3.5.2018 bis 6.8.2018

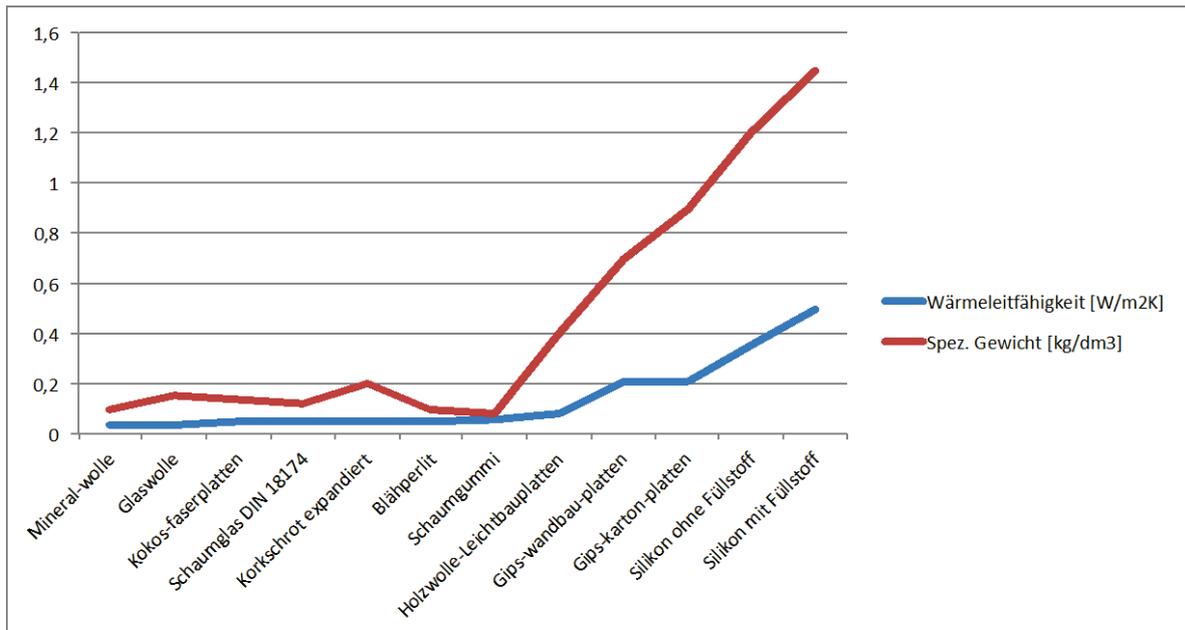


Abbildung 10: Zusammenhang von spez. Gewicht und Wärmeleitfähigkeit⁴

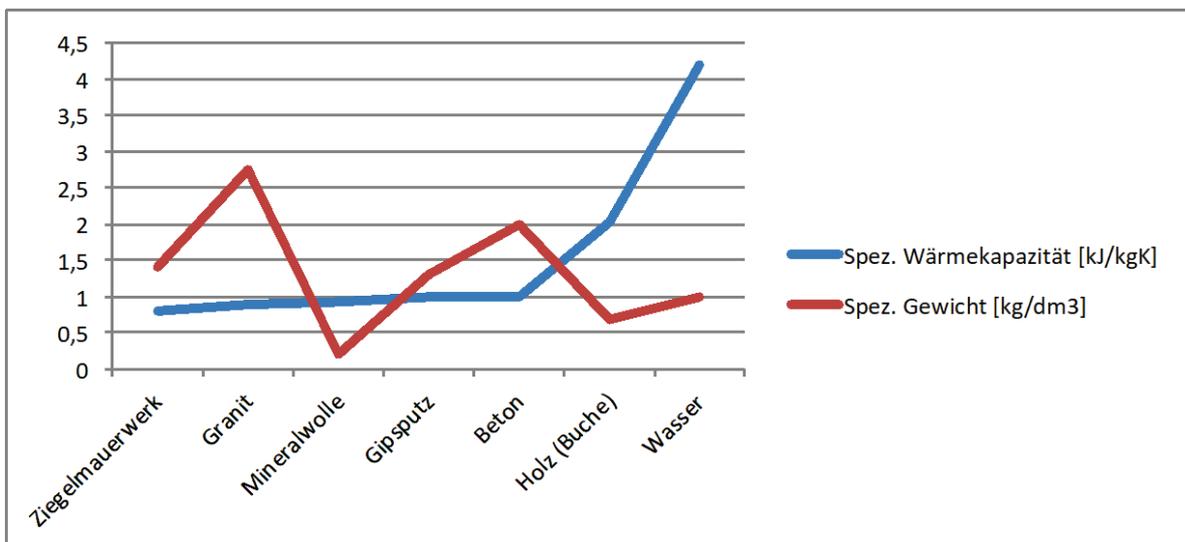


Abbildung 11: Zusammenhang von spez. Gewicht und Speichermasse⁵

Folgt man der Idee von Carlo Ratti, so ist es mitunter gar nicht so wichtig, durchgehend von Flächen hoher Speicherkapazität umgeben zu sein. Wichtig ist ja lediglich, dass sich der menschliche Körper in einem günstigen Verhältnis von Luft- und Strahlungstemperatur befindet. Vereinfacht geht es beim Wohlbefinden eines Menschen um die operative Temperatur, auf die normalerweise auch die Berechnungsmodelle zum Nachweis thermischer Behaglichkeit bezugnehmen.

⁴ www.schweizer-fn.de/stoff/wleit_isolierung/wleit_isolierung.php

⁵ www.schweizer-fn.de/stoff/wkapazitaet/wkapazitaet_baustoff_erde.php

Die operative Temperatur wird wie folgt definiert⁶:

Gleichung 1

$$T_{op} = 0,5 \cdot (T_{air} + T_{rad})$$

darin ist

T_{op}...die operative Temperatur

T_{air}...die Raumlufttemperatur

T_{rad}...die mittlere Strahlungstemperatur aller Oberflächen bezogen auf den betrachteten Ort im Raum

Daraus folgt auch, dass je näher eine Person einer Fläche ist, desto mehr Einfluss hat diese auf die operative Temperatur. Eine „Lokalisierung“ bzw. „Personalisierung“ ist also durchaus sinnvoll und könnte, wenn kühle oder warme Strahlung eine Person „verfolgt“, einen wesentlich geringeren Einsatz eines nötigen Trägermediums nach sich ziehen.

Der Einsatz von Wasser als Trägermedium für Wärme ist in der Gebäudetechnik üblich. Mit Wasser werden entweder Konvektoren erwärmt, die im Wesentlichen über das Erwärmen von Luft und der damit einhergehenden Konvektion wirken, oder es wird großflächig in massive Bauteile wie Estriche oder Decken geleitet, um die dort vorhandene Masse langsam und dauerhaft zu erwärmen. Während der Konvektor in der Lage ist, rasch die Raumluft zu beeinflussen, so sind auf Masse bauende Systeme träge und müssen schon Stunden vorher aktiviert werden, wenn zu einem gewissen Zeitpunkt ein behagliches Raumklima geschaffen werden soll. Die Heizung durch Konvektion gilt aber ebenfalls als klimatisch ungünstig, da Luft ihre Wärme wiederum nur sehr langsam auf die Umschließungsflächen überträgt und so mitunter keine thermische Behaglichkeit (keine ausreichend hohe operative Temperatur) erzielt wird. Das ist vor allem bei schlecht gedämmten Gebäudehüllen problematisch.

Bei unterschiedlich warmen oder kalten Raumumschließungsflächen ist der Abstand entscheidend, in welchem Maß diese sich auf die operative Temperatur auswirken. Auch wenn der Einfachheit halber üblicherweise die mittlere Strahlungstemperatur aus allen Flächen gleichermaßen ermittelt wird, so ist bei einer genaueren Betrachtung der jeweilige Aufenthaltsort einer Person entscheidend. Eine einfache Abschätzung zeigt, wie stark sich die Nähe einer Person auf den Einfluss einer Fläche auswirkt. In Abbildung 12 ist für einen quadratischen Raum mit 5m x 5m und bei der Annahme, dass im Wesentlichen von einem zylindrischen Körper weg abgestrahlt wird, dargestellt, wie sich das Ausmaß der Projektion auf diesen Zylinder hin ändert.

⁶ Diese Definition findet sich beispielsweise in der ÖNORM EN [13779:2004-2017](#), bzw. im [Vorgängerdokument ÖNORM EN ISO 13779](#), Punkt 6.3.3 und ist aus den Überlegungen von P.O.Fanger hergeleitet.

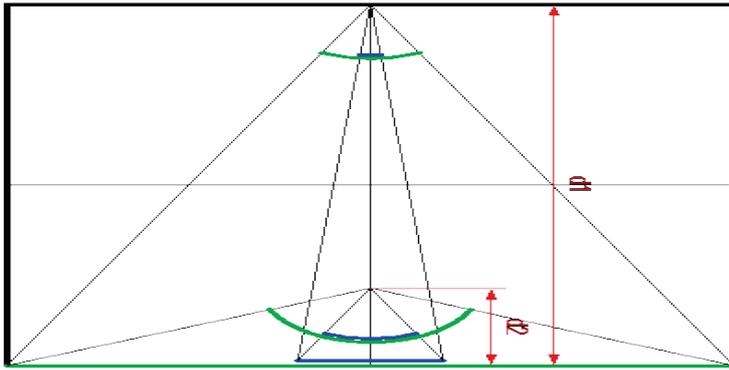


Abbildung 12: Projektion der Raumumschließungsflächen auf einen zylindrischen Körper

Diese Abhängigkeit, die über den Projektionswinkel berechnet werden kann, ist für kleinere Strahlungsflächen viel stärker ausgeprägt als für große, siehe Abbildung 13. Die Berechnung des Zusammenhangs erfolgte mit:

Gleichung 2

$$\alpha = 2 * (\text{ARCTAN}(b_{\text{paneel}} * 0,5 / d)) * 180 / \pi$$

darin ist

$b_{\text{paneel}} * 0,5$...die halbe Paneelbreite

d ...der Abstand zum Paneel

α ...der der Strahlung ausgesetzte Winkel

$\alpha / 360^\circ$...gibt das Verhältnis des Einflusses eines Paneels zum Einfluss der gesamten Umschließungsflächen an.

Die oben angeführten Überlegungen gelten für den Fall, dass die Körpertemperatur höher ist, als die der Umschließungsflächen, da in dem Fall wirklich von einer radialen Wärmeabgabe des Körpers zu seinen Umschließungsflächen hinausgegangen werden kann. Weiters wird der menschliche Körper als zylindrisch betrachtet und es werden nur die Wände berücksichtigt. Exaktere Berechnungen, entsprechend der ÖNORM EN ISO 7730, zum Winkelfaktor finden sich in diesem Bericht weiter unten.

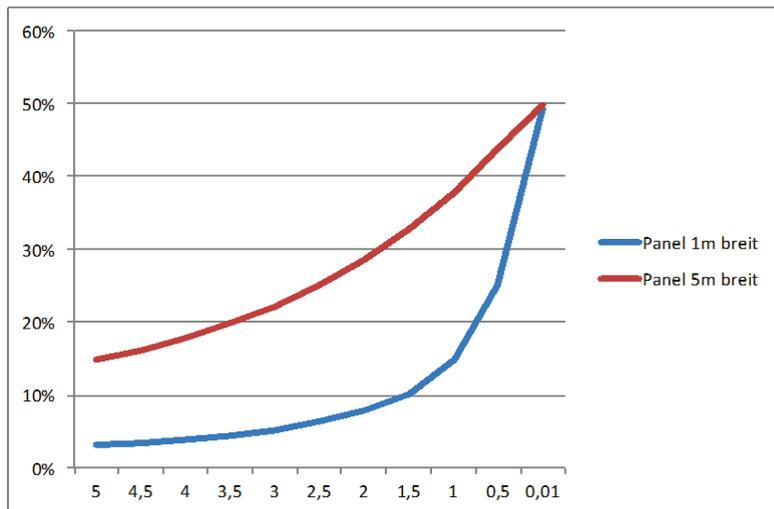


Abbildung 13: Zusammenhang von Distanz, Paneelbreite und daraus folgendem Anteil an der auf einen Zylinder projizierten Raumschließungsfläche

Es erschien daher besonders vielversprechend, eine Installation zu entwickeln, die sparsam und effizient mit dem Speichermedium Wasser umgeht, indem sie es örtlich und zeitlich punktgenau einsetzt. Wasser ist als Flüssigkeit bezüglich des Verhältnisses spezifisches Gewicht bzw. des Volumens zu spezifischer Wärmespeicherkapazität effizienter als feste Stoffe. Während Beton eine Wärmespeicherkapazität von ungefähr 1 kJ/kgK bei einem spezifischen Gewicht von ca. 2 t/m³ aufweist, so hat Wasser ca. 4 kJ/kgK bei einem spezifischen Gewicht von 1 t/m³, siehe Abbildung 11. Bezogen auf das Volumen stellt Wasser ca. die doppelte Speicherkapazität im Vergleich zu Beton zur Verfügung, bezogen auf das Gewicht die vierfache. Auch aus diesem Grund ist Wasser als Speichermedium für den Bereich der Sanierung besonders interessant.

2.2. Impact-Analyse

Der Begriff „Impact-Analyse“ ist den Wirtschaftswissenschaften entlehnt und soll im Zusammenhang mit diesem Projekt eine Abschätzung des Einflusses des gewählten Ansatzes auf Umwelt, auf die Umgebung, sowie auf Menschen/Nutzer untersuchen. Die üblichen Abläufe⁷ einer solchen Analyse von

- A – Scope und Konzeption
- B – Erhebung
- C – Analyse und Entscheidung

wurden für das vorliegende Projekt wie folgt interpretiert

- A – Konzeption und Funktionsweise
- B – mögliche negative Folgen (neg./pos.)
- C – Abschätzung der Abwehr möglicher negativer Folgen und Entscheidungen

⁷ Kochbuch für eine Business Impact Analyse, www.bcm-news.de/wp-content/uploads/kochbuch-fuer-eine-bia.pdf

Die Überlegungen sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Dabei wurde von einfachen Implementierungen ausgegangen, die mit keinem großen technischen Aufwand (abgesehen von der Sensortechnik) einhergehen.

Tabelle 1: Impact-Analyse

A		B		C	
Konzept	Funktionsweise	Folgen positiv	Folgen negativ	Abwehr negativer Folgen	Bewertung
Nutzung der Wärmekapazität von Wasser	Wasser als Speichermasse	doppelte Kapazität bei halbem Gewicht	-	-	für thermische Behaglichkeit wichtig, Umsetzung ok
	Wasser als Trägermedium	effiziente Wärmeübertragung	-	-	große Erfahrung vorhanden, Umsetzung ok
	Nutzen der Verdunstungskälte	Steigerung des Kühleffekts ohne oder mit nur geringem Energieeinsatz	bei Ausführung wie im Beispiel in AP03 (und damit im architektonischen Maßstab gelöst und nicht im haustechnischen): hygienische Probleme; Wasserverlust	geschlossene Systeme; gebäudetechnische Lösungen	für die angestrebte niederschwellige Lösung nicht sinnvoll, Umsetzung im Rahmen des Mock-Ups nicht angestrebt
lokale, personalisierte Präzision	der Aufenthaltsort von Personen wird laufend erfasst und veränderliche Elementen werden darauf abgestimmt	es wird nur die unmittelbar benötigte Energiemenge eingesetzt	die erfassten Daten können missbräuchlich verwendet werden	die Daten werden nur auf lokalen, unvernetzten Systemen genutzt, Abschirmung erforderlich	gut realisierbar, Umsetzung ok
	Vorlieben von Personen werden erfasst und veränderliche Elementen werden laufend darauf abgestimmt	es wird nur die unmittelbar benötigte Energiemenge eingesetzt	die erfassten Daten können missbräuchlich verwendet werden	die Daten werden nur auf lokalen, unvernetzten Systemen genutzt, Abschirmung erforderlich	Umsetzung macht erst Sinn, wenn ein sehr präzises und wirkungsvolles System entwickelt ist, Umsetzung im Rahmen des Mock-Ups nicht angestrebt

2.3. Umsetzungsplanung

Um Aussagen über die geplanten Mock-Ups treffen zu können, ist es vorteilhaft, wenn zwei komplett baugleiche Räume errichtet werden, deren Performance einmal mit und einmal ohne der geplanten Installation verglichen werden können. Erst dann kann sinnvollerweise mit der Umsetzungsplanung begonnen werden, da die geplanten Mock-Ups auf die Räume genau abzustimmen sind.

Nach längerer Recherche und dem Abwägen möglicher Optionen (es war z.B. auch ein Raum in der Vorderen Zollamtsstraße 3 in Betracht gezogen worden, hier hätte aber nur schwer ein Vergleichsraum eingerichtet werden können) konnte durch die Universität für Angewandte Kunst mit Räumlichkeiten im Haus Heumarkt 4, siehe Abbildung 14, ein gut geeignetes Objekt zur Verfügung gestellt werden, ohne dass dafür Raummiete anfallen würde. Dieses Gebäude hatte genau die Schwächen und Charakteristika der Nachkriegsmoderne, die es für ein Nachrüsten mit effizient eingesetzter Wärmekapazität interessant machte. Die Fassade ist durch ein Beton-Außenskelett strukturiert und kaum gedämmt, die Räume haben wenig Speichermasse und im Vergleich zum Innenraum sehr große Verglasungen. Die Fassade ist dabei exakt nach Südosten (SO, Azimut 135°) orientiert.



Abbildung 14: angebotene Räumlichkeiten der Universität für angewandte Kunst Wien, ©Google, aufgenommen Aug.2017

Beim Gebäude Heumarkt 4 handelt es sich um einen zweigeschoßigen, langgestreckten Bau, der ursprünglich für Büro- und Klubräume errichtet wurde. Die dem Projekt EVA zugewiesenen Räumlichkeiten befinden sich im Obergeschoß. Sie sind mit außenliegendem, manuell zu bedienendem Sonnenschutz (Raffstore) ausgestattet. Es gibt keine Vordächer. Die Laibung bis zur Glasscheibe ist 22 cm tief. Da sich die Räume im Sommer stark überhitzen, wie selbst festgestellt wurde (Lufttemperaturen über 30 °C), waren die Räumlichkeiten nachträglich mit Klimageräten ausgerüstet worden. Zur Abfuhr der Abwärme wurden kreisrunde Löcher in die Glasscheiben der Fenster geschnitten, in die die Abluftschläuche der Klimageräte gesteckt wurden. Die Höhe der Räume bis zur Rohdeckenunterkante beträgt in den Räumen 3,58 m. Sie ist durchgehend von einer 66 cm tief abgehängten Decke belegt.

Es wurden zwei baugleiche Räume (Raum A und Raum B) eingebaut, wobei darauf geachtet werden musste, dass sie komplett rückgebaut werden konnten, siehe Abbildung 15. Der Einbau erfolgte innerhalb eines Feldes des konstruktiven Rasters. Jeder Raum war 2,50 m tief und 2,74 m breit und damit jeweils 6,84 m² groß. Sie wurden allseitig, also seitlich, aber auch nach oben zur Decke und nach unten zum Boden hin isoliert und nach innen mit OSB-Platten, 22 mm stark, ausgekleidet. Nach außen hin wurde, um die Dämmung zu schützen, eine PE-Folie aufgebracht. Die Dämmstärke an Wand und Decke betrug 10 cm, Konstruktion von Wand und Decke wurden aus Vollholzstaffel 10/10 cm errichtet. Am Boden wurden die 22 mm OSB-Platten auf einer 3 cm starken Trittschalldämmplatte TDPT 30/30 verlegt. Die U-Werte sind in Tabelle 2 dargestellt. Die Raumhöhe betrug nach Einbau 2,765 m. Die Parapethöhe war nach Einbau 90 cm hoch und die Verglasung jedes der beiden Räume betrug 2,775 m Breite x 1,805 m Höhe.

Tabelle 2: U-Werte der neu eingebauten Bauteile

Bauteil	U-Wert [W/m ² K]	
Boden zu bestehendem Boden		0,85
durch Dämmung	0,705	
durch Vollholz	1,41	
Decke über A und B		0,42
durch Dämmung	0,294	
durch Vollholz	1,045	
Wand zu Seminarraum		0,407
durch Dämmung	0,289	
durch Vollholz	0,978	
Trennwand A-B		0,377
durch Dämmung	0,276	
durch Vollholz	0,843	

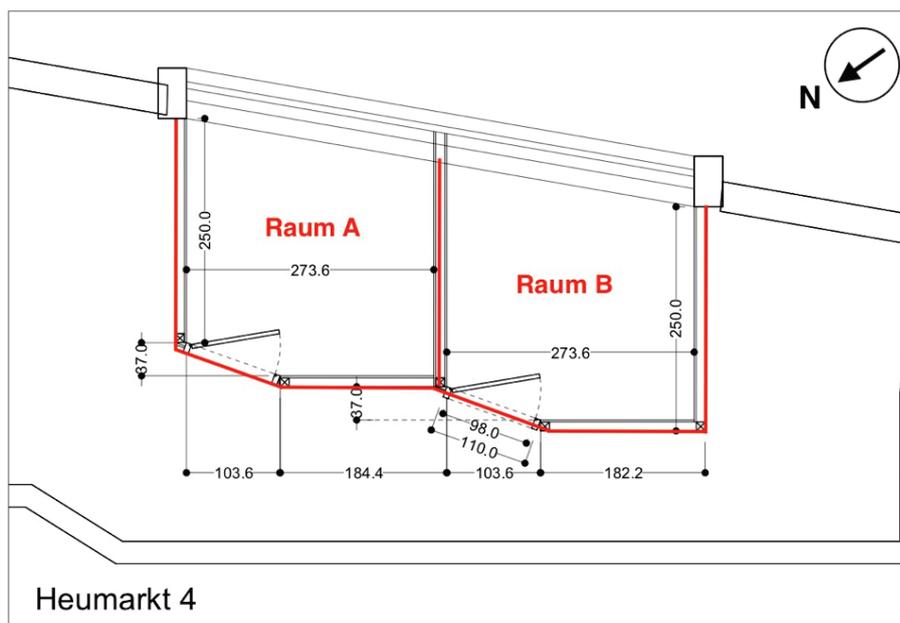


Abbildung 15: Einbau zweier baugleicher Räume, rot markiert

Die Mengen der Holz-Riegel-Konstruktion wurden, wie in Tabelle 3 dargestellt, ermittelt.

Tabelle 3: Mengen für den Einbau der Räume A und B

	Menge [m ²]
Pos1	
Boden:	16,00
22mm OSB3 (Fa. Egger)	
30mm 3/5 Vollholzlatten dazw. 30mm TDPT 30/30 (ISOVER MW)	
0,125 PE-Folie als Schutzabdeckung auf bestehenden Boden	
Pos2	
Wände zum umgebenden Raum	28,50
22mm OSB3 (Fa. Egger)	
100mm Vollholzsteher/-riegel dazw. 100mm ISOVER Klemmfilz	
Vollholzsteher können punktweise in der Rohdecke verankert werden	
0,125 mm PE-Folie URSA SECO Pro 100S als Schutzschicht	
Pos3	
Trennwand zwischen den beiden Räumen:	8,50
22mm OSB3 (Fa. Egger)	
100mm Vollholzsteher/-riegel dazw. 100mm ISOVER Klemmfilz	
22mm OSB3 (Fa. Egger)	
Pos4	
Decke:	16,00
22mm OSB3 (Fa. Egger)	
100mm Vollholzriegel dazw. 100mm ISOVER Klemmfilz	
Vollholzriegel können punktweise in der Rohdecke verankert werden	



Abbildung 16: Außenansicht Heumarkt 4 mit temporärem EVA-Lab und den beiden Zwillingssälen A und B

Die Einflüsse der Räume zueinander und zu den umliegenden, an sich als adiabatisch zu wertenden Räumen, konnten damit als hinreichend gering für die weitere Untersuchung betrachtet werden. In der Folge sollten beide Räume mit Sensoren für ein Monitoring ausgestattet werden. In einem der beiden Räume (Raum B) wird das Mock-Up eingebaut, während der andere, ansonsten komplett baugleiche Raum (Raum A) als Vergleichsraum überwacht werden soll.

2.4. Site-Analysis, Data-Visualisation, Interaction-Design

Nachdem die Räume errichtet worden waren, wurden im Rahmen einer Lehrveranstaltung unterschiedlichste physikalische Einflüsse untersucht, visualisiert und für die jeweiligen Sensoren bzw. deren Gehäuse entsprechende Designs entwickelt. Der Hauptschwerpunkt lag bei der Entwicklung des Interfaces und der Visualisierung der Daten. Ziel war es, möglichst viele Aspekte der Interaktion Raum-Nutzer-Klima zu erkennen und auch ihr jeweiliges gestalterisches Potential zu erfassen. Die Ergebnisse sind in einem Katalog in **Anhang II** dieses Endberichts dargestellt, beispielhaft ein Ausschnitt eines Katalogblatts, Abbildung 17 und Abbildung 18, ein Video, in dem das in Abbildung 18 dargestellte *interaction design „ultrasonic platonic“* dokumentiert ist, kann unter <https://vimeo.com/314561049> abgerufen werden.

Verwendet wurden Ultraschall-Reichweiten-Sensoren, Lichtsensoren, RGB-Lichtsensoren, Schallsensoren, CO₂-Sensoren und Vibrationssensoren.

Light adaptable facade

Alexandra Moisi

Garvin Goepel

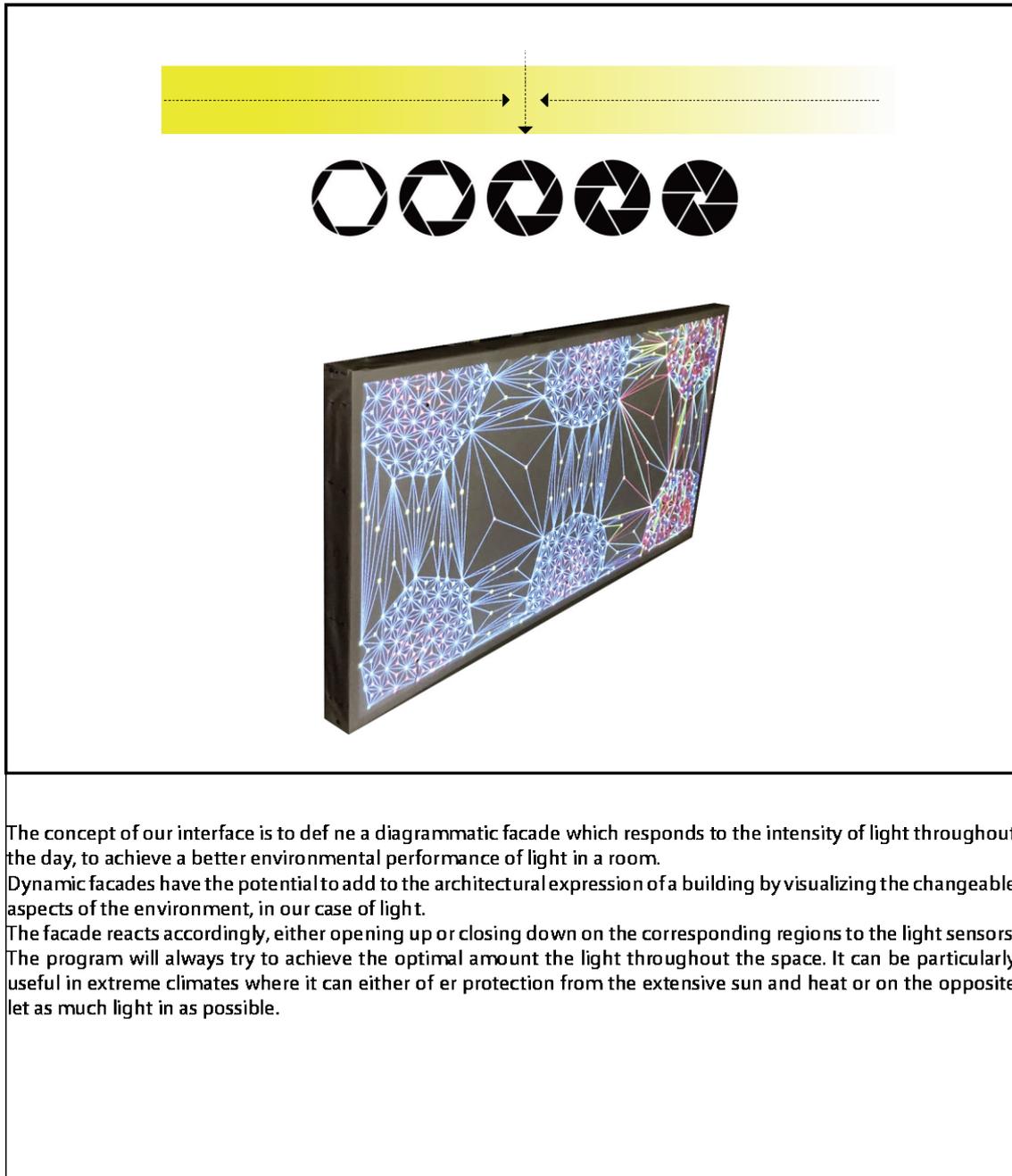


Abbildung 17: Ausschnitt aus einem Katalogblatt des Anhangs II des publizierbaren Endberichts: light adaptable facade

Ultrasonic Platonic
Luca MELCHIORI
Barbara SCHICKERMUELLER

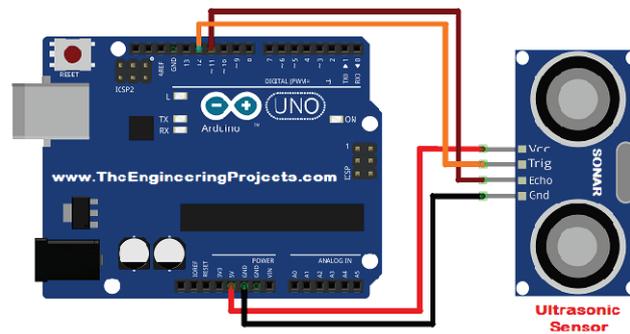
HARDWARE INFORMATION

Ultrasonic Sensor - HC-SR04

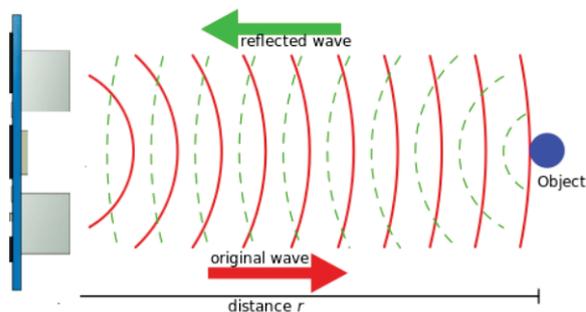
This is the HC-SR04 ultrasonic ranging sensor. This economical sensor provides 2cm to 400cm of non-contact measurement functionality with a ranging accuracy that can reach up to 3mm. Each HC-SR04 module includes an ultrasonic transmitter, a receiver and a control circuit.



Ultrasonic Sensor - HC-SR04



Ultrasonic Sensor Arduino Interfacing



Theory

Speed of sound = $0.334\mu\text{s}$

Time = distance/speed = $294\mu\text{s}$

Distance = (time * 0.034) / 2

Abbildung 18: Ausschnitt aus einem Katalogblatt des Anhangs II des publizierbaren Endberichts: ultrasonic platonic

2.5. Konzeptionelle Grundlagen der Umsetzungsplanung

Es war von Anfang ein Ziel dieses Forschungsprojekts, die Möglichkeiten architektonischer Elemente, also ausdrücklich nicht Elemente der Haustechnik/des Maschinenbaus, zu untersuchen. Ein Konzept, das die Nutzung der Wärmekapazität von Wasser verfolgt, sollte also bis auf Pumpen und Ventile ohne weiteren mechanischen Aufwand, vor allem aber ohne Zufuhr von Energie von außen⁸, errichtet und betrieben werden können. Damit war aber auch von Anfang an klar, dass die eingebrachten Temperaturdifferenzen sehr gering sein werden. Die Wirkung sollte durch den lokal und zeitlich eingegrenzten Einsatz entstehen.

Es war daher abzuschätzen, welche (negative) Leistung überhaupt eingebracht werden kann und ob diese wahrnehmbar sein würde:

Aus dem Stefan-Boltzmann-Gesetz:

Gleichung 3

$$\dot{q} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4$$

darin ist

\dot{q} ... flächenspezifische Gesamtstrahlungsleistung [W/m²]

T ... die Temperatur eines Strahlers in [K]

ε ... der Emissionsgrad

σ ... die Stefan-Boltzmann-Konstante $\sim 5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/m²K⁴]

... folgt für den Strahlungswärmefluss von einem wärmeren Körper zu einem kälteren Körper:

Gleichung 4

$$\dot{q} = \sigma \cdot (\varepsilon_1 \cdot T_1^4 - \varepsilon_2 \cdot T_2^4)$$

darin ist

T_1 ... die Temperatur des wärmeren Körpers in [K]

T_2 ... die Temperatur des kälteren Körpers in [K]

ε_1 ... der Emissionsgrad des wärmeren Körpers

ε_2 ... der Emissionsgrad des kälteren Körpers

Berücksichtigt man zusätzlich die Konvektion und differenziert man zwischen den einigermaßen gleichen opaken Umschließungsflächen und den Energieeinträgen durch Fenster, so erfährt ein warmer Körper im Raum folgenden Wärmestrom:

⁸ Als System wird hier der isolierte Raum, die darin befindlichen Nutzer und der dem Raum zugeordnete Anteil der Fassade betrachtet. Über die Fassade steht der Raum im energetischen Austausch mit der Umwelt außerhalb des Raumes. Mit Energie von außen ist also jegliche Energiezufuhr oder -ableitung gemeint, die nicht über die natürlichen Differenzen an der Fassade entsteht.

Gleichung 5

$$\dot{q} = f_{op} * \sigma * (\epsilon_K * T_K^4 - \epsilon_{Uop} * T_{Uop}^4) + (1 - f_{op}) * \sigma * (\epsilon_K * T_K^4 - \epsilon_{Utrans} * T_{Utrans}^4) + \alpha * (T_K - T_L)$$

darin ist

\dot{q} ... flächenspezifische Gesamtstrahlungsleistung [W/m²]

T_K ... die Oberflächentemperatur eines Körpers im Raum in [K]

T_{Uop} ... die mittlere Strahlungstemperatur der opaken Umschließungsflächen in [K]

T_{Utrans} ... die mittlere Strahlungstemperatur der transparenten Umschließungsflächen (Fenster) in [K]

α ... der konvektive Wärmeübergangskoeffizient, für Luft im windstillen Raum ca. 2 W/m²K⁹

f_{op} ... Anteil des Körpers, der in Strahlungsaustausch mit den opaken Flächen steht, [-], siehe dazu auch die Überlegungen in Abbildung 12 und Abbildung 13

Ein negatives Vorzeichen bedeutet beim Ergebnis dieser Gleichung, dass sich der Wärmestrom umkehrt. Das ist der Fall, wenn die Temperatur des Körpers kühler ist.

Laut den statistischen Untersuchungen von P.O. Fanger ist die Empfindlichkeitsschwelle des menschlichen Körpers bezüglich Strahlungstemperatur 25 W/m², siehe Tabelle 4¹⁰.

Tabelle 4: Empfindlichkeitsschwellen des Menschen

Parameter	Empfindlichkeitsschwelle	Beurteilung
Lufttemperatur	± 0,5 K	sehr empfindlich
Differenz Luft- zu Oberflächentemperatur	2 K	sehr empfindlich
Luftbewegung an der Hautoberfläche	0,1 m/s	sehr empfindlich
Strahlungswärme	25 W/m ²	empfindlich
relative Luftfeuchtigkeit	±15%	wenig empfindlich

Die Oberflächentemperatur der menschlichen Haut beträgt zwischen 32 °C bis 33 °C¹¹.

Geht man davon aus, dass bei hinreichend großen Flächen nicht nur die mittlere Strahlungstemperatur, sondern auch ein Teilbereich des Körpers die Empfindlichkeitsschwelle wahrnimmt (was der Erfahrung entspricht), dann berechnet sich die gerade noch wahrnehmbare Temperaturdifferenz lt. Gleichung 4 gegen einen Körper mit 33 °C Oberflächentemperatur (306,15 K) mit

Gleichung 6

$$(306,15^4 + 25 / (\sigma * \epsilon))^{0,25} = \sim 310K \text{ daraus folgt für die Temperaturdifferenz: ca. } 4K$$

⁹ der konvektive Wärmeübergangskoeffizient beträgt $\alpha = 12 * v^{0,5} + 2$ (v ... Strömungsgeschwindigkeit).

lt. de.wikipedia.org/wiki/Wärmeübergangskoeffizient#Freie_Konvektion

¹⁰ Tabelle 1.8 in. Zürcher, Chr. und Frank, T., Bau & Energie: Bauphysik, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich 2018

¹¹ Tabelle 1.9 in. Zürcher, Chr. und Frank, T., Bau & Energie: Bauphysik, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich 2018

bzw. für den Fall der kälteren Umgebung:

Gleichung 7

$$(306,15^4 - 25 / (\sigma^* \epsilon))^{\frac{1}{4}} = \sim 302K \text{ daraus folgt für die Temperaturdifferenz: ca. } 4K$$

Dabei kann mit einem einheitlichen Emissionsgrad von 0,95 gerechnet werden. Emissionsgrade der wichtigsten, in diesem Projekt behandelten Materialien, finden sich in nachfolgender Tabelle 5. Das Ergebnis sind ca. 4 K Temperaturdifferenz, was den einschlägigen Normenwerken zur thermischen Behaglichkeit entspricht¹². Für das Experiment wäre also bereits eine Temperaturdifferenz von 4 K ein Erfolg, da dadurch eine wahrnehmbare Veränderung im Raum herbeigeführt werden würde.

Tabelle 5: Emissionsgrade

Material	Bezeichnung, original	Spektrum	Emissionsgrad	Quelle
Innendispersion	Paint, oil-based, average of 16 colours	total spectrum	0,94	FLIR systems: User's manual FLIR Cx series, Wilsonville 2015
SIKA Block	Plastic, polyurethan isolation board	8 – 14 µm	0,55	
Hautoberfläche	Skin, human	total spectrum	0,98	
Wasser	Water, distilled	total spectrum	0,96	
Fensterglas	Glass: polished plate	total spectrum	0,94	www.thermoworks.com/emissivity_table
PVC	P.V.C.	k.A.	0,91-0,93	

Aus den oben gewonnenen Erkenntnissen und Erfahrungen erschien es angemessen, die Entwicklung des Mock-Up-Designs und der Bau- und Montageplanung vor Ort und „hands-on“ zu großen Teilen in Eigenleistung zu erbringen. Zunächst wurde mit der „Auflösung“ (im Sinne von „Resolution“) möglicher Interaktionen experimentiert.

Die kleinen Räume erlauben nur einen geringen Effekt der (nur gering von den vorhandenen Umschließungsflächen unterschiedlichen) Strahlungstemperatur des Wassers. Elemente, die die Größe eines Menschen unterschreiten, sind für den Menschen kaum wahrnehmbar, denn die Temperaturempfindung des Menschen ist bezüglich Strahlung nicht „hoch-aufgelöst“, nicht „sehr empfindlich“, siehe Tabelle 4, kann also keine kleinen Änderungen wahrnehmen.

Hingegen nimmt das Auge kleinste Details wahr. Die Idee des lokal präzisen Einsatzes wurde in zwei unterschiedlich ausgeprägten Detaillierungsgraden weiterverfolgt: Einmal mit einem groben räumlichen Raster und relativ langsamen Veränderungen und einmal als hochaufgelöste Variante in Form eines interaktiven Blendschutzes, der genau dann einen Sichtbezug ins Freie gewährt, wenn es für den Nutzer erforderlich ist.

Es wurde mit der Planung zweier Mock-Ups begonnen:

- **MU1 Architecture Counters Heat (ACH!) und**
- **MU2 Strategic Window**

¹² P.O. Fanger gibt die „lokale Unbehaglichkeit“ bei einer asymmetrischen Strahlung von 5 K an; siehe z.B. ÖNORM EN ISO 7730:2006

2.6.2. MU2 Strategic Window

Während MU1 auf Hydraulik basiert, ist das Grundprinzip von MU2 pneumatisch. Wieder kommt ein Tiefensensor zum Einsatz. Ein Kompressor (1) pumpt Luft in transparente Polster (2). Durch deren Ausdehnung öffnen sich Abdeckungen und ermöglichen dort, wo sich eine Person befindet, den Sichtbezug ins Freie. Die Steuerung erfolgt wieder durch die Positionserfassung durch den Tiefensensor (3) und einen Micro-Controller (4), siehe Abbildung 20. Das endgültige Design der Elemente und deren Optimierung wurde in AP5 entwickelt.

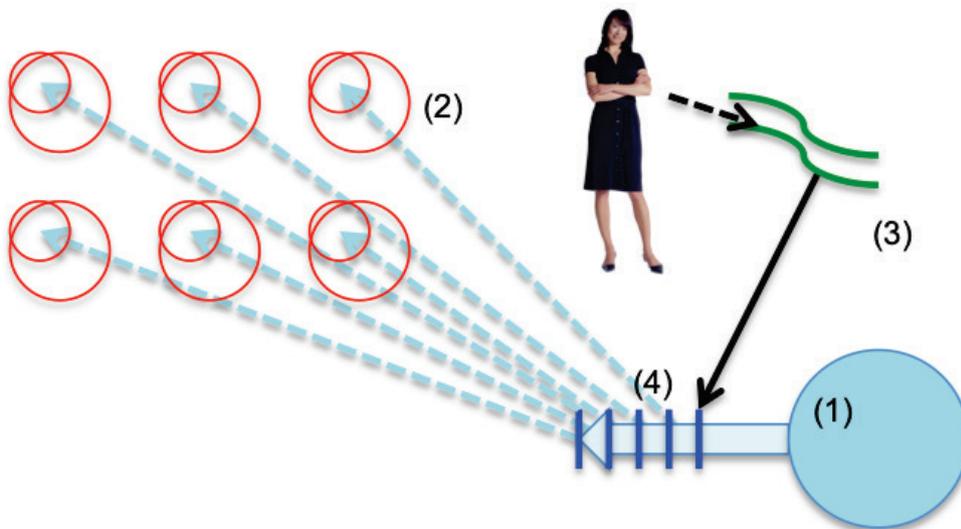


Abbildung 20: MU2, Schema

2.7. Errichtung der Mock-Ups (1:1)

2.7.1. Einrichten des Monitorings

Zunächst wurden die Räume A und B (Abbildung 15) mit Sensoren zum Zwecke des Monitorings ausgestattet. Dabei wurde auf die Erfahrung mit dem Projekt MOST des Projektpartners P1_BPI zurückgegriffen¹³. Datenlogger und Sensoren für die Komfortmessung waren von der Firma Ahlborn (Thermal Comfort Station), siehe Abbildung 21. Diese waren frei im Raum auf einem Stativ montiert. Diese Daten wurden mit Daten der TU Wetterstation des Projektpartners P1_BPI am Dach der TU Wien synchronisiert, sowie mit weiteren Daten lokaler Sensoren der Fa. Thermokon (ENOCEAN), die wiederum an der Steuerung der Micro-Controller beteiligt waren. Weiters waren in beiden Räumen an den Wandoberflächen Temperaturfühler zur Erfassung der Oberflächentemperatur verteilt, siehe Abbildung 22. Folgende Parameter wurden im Zuge des Monitorings gemessen:

¹³ Schuss, M., Glawischnig, St. und Mahdavi Ard.: A flexible and scalable approach to building monitoring and diagnostics in: eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction: Proceedings of the 11th European Conference on Product and Process Modelling (ECPPM 2016), Limassol, Cyprus, 7-9 September 2016

Tabelle 6: Messgrößen des Monitorings

Ort	Messwertgeber	Messgrößen	Zweck
Raum A und Raum B	Ahlborn Globethermometer	Wet Bulb Globe Temperatur	Monitoring
	Ahlborn Digitaler Fühler	Luftfeuchte Lufttemperatur Luftdruck	Monitoring
	Ahlborn Thermoanemometer	Luftgeschwindigkeit	Monitoring
	Thermokon-SR04CO2-Funkfühler	CO2-Gehalt Lufttemperatur Relative Luftfeuchte	Monitoring
	Maxim Integrated DS18B20 Digitales Thermometer	Oberflächennahe Temperatur	Monitoring / Steuerung
Ort	Messwertgeber	Messgrößen	Zweck
TU Turm	Davis Weatherstation	Lufttemperatur (Dry Bulb)	Monitoring
		Relative Luftfeuchtigkeit	Monitoring
		Globalstrahlung	Monitoring
		Diffuse Strahlung	Monitoring
		CO2-Gehalt	Monitoring
		Niederschlagsrate	Monitoring
		Lichtintensität (Beleuchtungsstärke)	Monitoring



Abbildung 21: Thermal Comfort Station der Fa. Ahlborn



Abbildung 22: Eigens entworfenes Gehäuse der Sensoren zur Erfassung der Oberflächentemperatur, Verteilung im Raum

Zur Lokalisierung von anwesenden Personen war ein Tiefensensor der Type *Kinect Xbox 360* der Firma *Microsoft* montiert. Um die Strahlungswärme und ihre Verteilung im Raum zu erfassen, wurde eine Wärmebildkamera der Type *FLIR C2* der Firma *FLIR Systems* montiert. Diese Kamera machte minütlich Wärmebildfotos in Richtung der Innenpaneele.

Weiters wurde eine Digitalkamera montiert, die den Raum Richtung Fenster in minütlichen Abständen fotografierte.



Abbildung 23: Tiefensensor und Wärmebildkamera



Abbildung 24: Digitalkamera

Die Daten des reinen Klima-Monitoring Systems wurden mittels eines *Arduino YUN microcontrollers* gesammelt, synchronisiert und aufgezeichnet, siehe Abbildung 25.

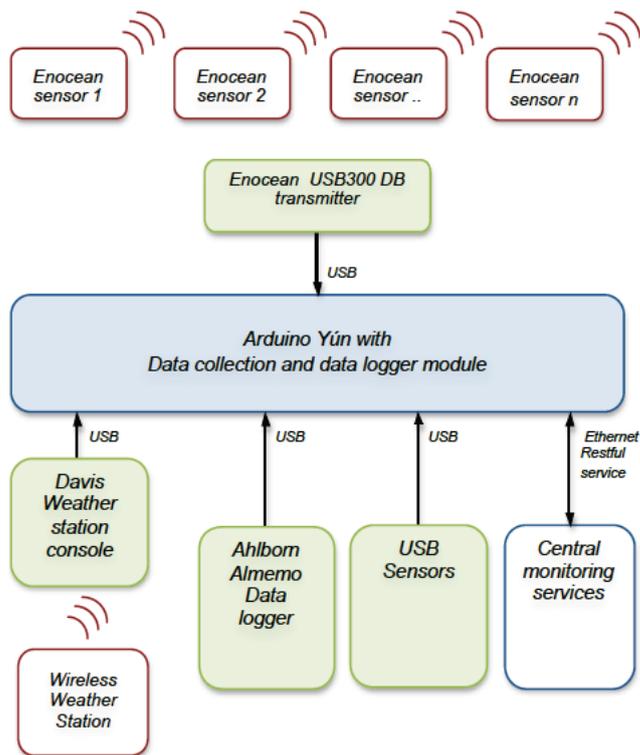


Abbildung 25: Set-Up Schema für Data Collection and Data Logging mittels eines *Arduino Yun microcontrollers*¹⁴

¹⁴ Schuss, M., Glawischnig, St. und Mahdavi Ard.: A flexible and scalable approach to building monitoring and diagnostics in: eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction: Proceedings of the 11th European Conference on Product and Process Modelling (ECPPM 2016), Limassol, Cyprus, 7-9 September 2016, Figure 3

2.7.2. Erste „Kalibrierung“ der Räume ohne Mock-Up

Nach Abschluss der Einrichtung des Monitorings und in zeitlicher Nähe der Montage wurden die Räume gleich eingestellt und leer verschlossen. Sie waren nicht verschattet, beide Fenster waren gekippt, keine elektronischen Geräte waren in den Räumen. Sodann wurden die Kenndaten Raumlufttemperatur und Oberflächentemperatur verglichen. In der Zeit von 27/7/2018 0:00 bis 30/7/2018 09:00 wurden die Räume verschlossen. In der Abbildung 26 werden die Abweichungen der Temperaturdifferenz der Räume für diesen Zeitraum dargestellt, wobei negative Werte bedeuten, dass Raum A kühler als Raum B war und umgekehrt. Dabei zeigt sich, dass Raum B, in dem später die interaktiven Elemente installiert werden, etwas stärker überhitzt als Raum A. Im Wesentlichen verhalten sich die Räume gleich. Deutlich ist der sommerliche Sonnenaufgang zu sehen, bereits mit der Dämmerung um ca. 4:45 steigt die Temperatur in Raum B deutlich schneller an als in Raum A, da offenbar Raum B stärker beeinflusst wird als Raum A. Erst etwas später gegen 8:30 heizt sich dann Raum A stärker auf. Bis ca. Mittag sind die Raumtemperaturen wieder annähernd gleich. Der Sonnenstand für diesen Zeitraum ist in Tabelle 7 dargestellt. In Abbildung 26 ist auch deutlich zu sehen, dass eine „wahrnehmbare“ Differenz von mehr als 4 K, siehe 2.5, nicht auftritt. Bei der für die Behaglichkeit wichtigen globalen Temperatur ist der Unterschied in beide Richtungen noch etwas ausgeprägter.

Tabelle 7: Sonnengang 27. bis 30. Juli 2018¹⁵

	27.Juli 2018			28.Juli 2018			29.Juli 2018			30.Juli 2018		
	Uhrzeit	Azimut	Höhe									
Morgendämmerung	04:45			04:47			04:48			04:50		
Sonnenaufgang	05:22	59,05	0,00	05:24	59,56	0,00	05:25	59,89	0,00	05:26	60,23	0,00
Sonnenhöchststand	13:01	179,99	60,97	13:01	180,00	60,74	13:00	179,53	60,50	13:00	179,55	60,26
Sonnenuntergang	20:38	300,49	0,00	20:36	299,97	0,00	20:35	299,65	0,00	20:34	299,32	0,00
Abenddämmerung	21:15			21:13			21:12			21:10		
Tageslichtdauer	15h15			15h12			15h10			15h07		

¹⁵ abgerufen unter www.sonnenverlauf.de/#/48.2011,16.3788,19/2018.07.27/05:26/16/0 für Höhe 169 m, Breite 48,20106°, Länge 16,37882°



Abbildung 26: Temperaturdifferenz [K] zwischen Raum A und Raum B (A-B), 27.-30.7.2018

2.7.3. Entwicklung und Ausführung MU1

Es waren nun die Paneele (1) und (2) lt. Abbildung 19 zu dimensionieren. Für das Außenpaneel (2) wurde eine möglichst große, konstruktiv noch machbare Größe gewählt, die die gesamte Fensterfläche bis auf das Oberlichtband überdeckte. Das Oberlichtband wurde in beiden Räumen mit dem vorhanden außenliegenden Raffstore abgeschattet. Es wurde ein Formrohrrahmen 40 x 40 x 2 mm mit 1227 mm Höhe und 2810 mm Breite errichtet, der in vier Felder unterteilt war. Am Rahmen waren sechs Klemmen befestigt, mit denen dieser im öffnaren Fenster befestigt werden sollte. Mit ca. 30 kg Gesamtgewicht konnte dieser gut temporär im Fenster montiert werden, siehe Abbildung 27.

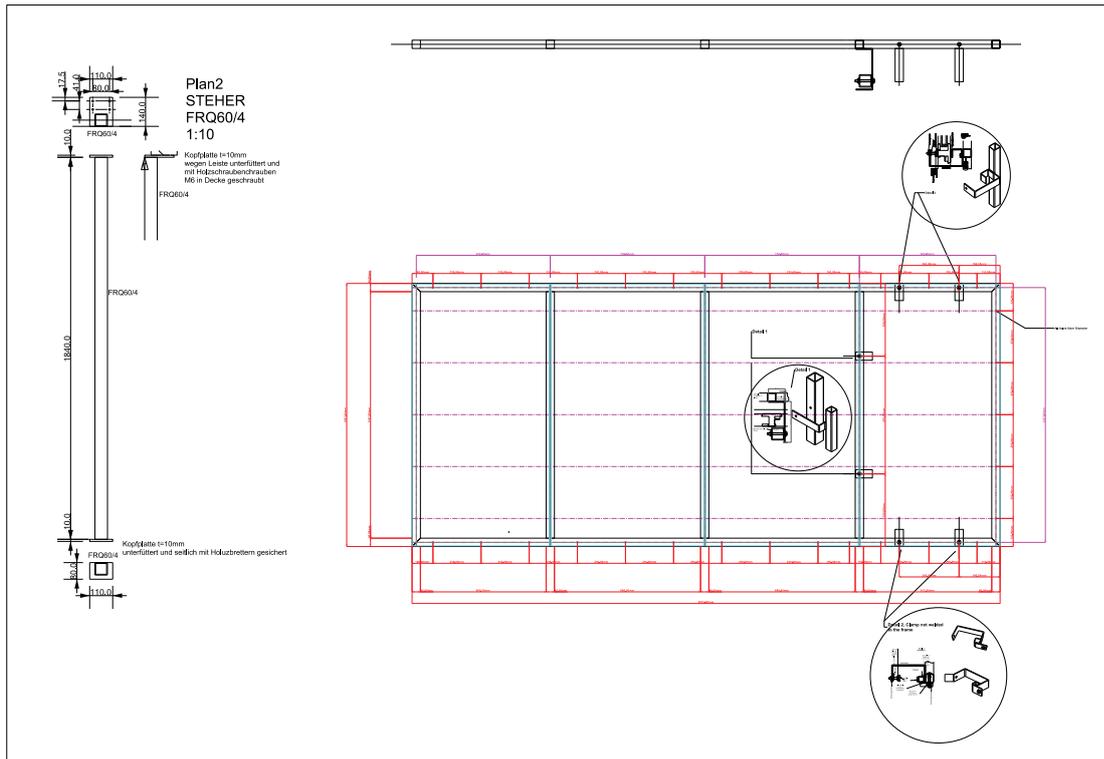


Abbildung 27: Übersichtsplan Grundgerüst Außenpaneel

Für die Innenpaneele wurde als Trägermaterial für die Wasserschläuche Polyurethan (PUR) gewählt. Dieses Material zeichnet sich durch eine geringe Masse, gute Bearbeitbarkeit durch Fräsen und eine geringe Emissivität aus. Auch die Wärmeleitfähigkeit ist mit 0,025 bis 0,030 W/mK sehr gering. Dadurch sollten die Schläuche möglichst vom Träger abgeschirmt werden. Demgegenüber hat Wasser bzw. die transparenten PVC Schläuche eine hohe Emissivität. Die Messungen sollten damit stärker auf die Wasserschläuche beschränkt werden und im Sinne einer „unmittelbaren“ Wirkung sollten träge Prozesse des Auf- oder Entladens von Speichermasse oder der Wärmeverluste durch den Wärmedurchgang hinter den Rohren so gering wie möglich gehalten werden.

Tabelle 8: Materialien der Innenpaneele

Material	Masse [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Wärmespeicherkapazität [kJ/kgK]	Emissionsgrad ¹⁶ [-]
Polyurethan ¹⁷	80	0,028	1,40	0,55
PVC weich ¹⁸	1.200	0,140	1,00	0,92
Wasser ¹⁹	990	0,630	4,19	0,96

Die Panelgröße wurde mit einer Höhe von 100 cm und einer Breite von 50 cm festgelegt. Es wurden fünf Paneele hergestellt. Damit konnte in einer Ecke des Raumes ca. ein Drittel der Wandfläche belegt

¹⁶ Siehe Tabelle 5

¹⁷ Siehe Tabelle 33 der ÖNORM B 8110-7:2013 (Dichte, Wärmeleitfähigkeit und Wärmespeicherkapazität)

¹⁸ Siehe Tabelle 90 der ÖNORM B 8110-7:2013 (Dichte, Wärmeleitfähigkeit und Wärmespeicherkapazität)

¹⁹ Siehe Tabelle 89 der ÖNORM B 8110-7:2013 (Dichte, Wärmeleitfähigkeit und Wärmespeicherkapazität)

werden. Für die Wirksamkeit der Flächen ist deren Anteil an der mittleren Strahlungstemperatur entscheidend. Die mittlere Strahlungstemperatur (MRT) einer Umgebung wird als die gleichmäßige Temperatur einer imaginären schwarzen Hülle definiert, die zum gleichen Wärmeverlust einer Person durch Strahlung führen würde, wie die tatsächliche nicht-gleichmäßige Hülle. Dabei wird nicht nur die Verteilung der Umschließungsflächen selbst, sondern auch die Flächenverteilung der Person berücksichtigt. Die Person selbst kann durch ein „graues Ellipsoid, 160 mm lang, mit 54 mm Durchmesser“ angenähert werden²⁰. Die mittlere Strahlungstemperatur kann so von der Globe- und Lufttemperatur oder wahlweise von den einzelnen Umschließungsflächentemperaturen berechnet werden. Die Flächentemperatur (PRT) berechnet sich selbst als Mittelwert der Umschließungsflächen mit dem jeweils selben Winkelfaktoren, wird aber auch oft mit der mittleren Strahlungstemperatur gleichgesetzt, da die Unterschiede gering sind. Sie unterscheidet sich von der mittleren Strahlungstemperatur durch die Winkelfaktoren, die sich im Falle der PRT auf eine „sehr kleine“ Fläche, anstatt auf die Oberfläche einer Person, beziehen. Die Berechnung kann mit folgenden Gleichungen²¹ erfolgen:

Gleichung 8

$$T_{MPRT} = (\sum f_i * (T_i)^4)^{0,25}$$

darin ist

T_{MPRT} ... die mittlere Flächentemperatur (MPRT) der Umgebungsflächen in [K]

T_i ... die Temperatur der Fläche i [K]

f_i ... Winkelfaktor der jeweiligen Fläche i

Der Winkelfaktor berechnet sich mit:

Gleichung 9

$$f_{i0} = 1/(2 * \pi) * (x/(1+x^2)^{0,5} * \arctan(y/(1+x^2)^{0,5} + y/(1+y^2)^{0,5} * \arctan(x/(1+y^2)^{0,5}))$$

und

Gleichung 10

$$f_{i90} = 1/(2 * \pi) * (\arctan(1/y) - y/(x^2+y^2)^{0,5} * \arctan(1/(x^2+y^2)^{0,5}))$$

darin ist

f_{i0} ... Winkelfaktor der jeweiligen Fläche A_{i0} parallel zur sehr kleinen Fläche δA

f_{i90} ... Winkelfaktor der jeweiligen Fläche A_{i90} orthogonal zur sehr kleinen Fläche δA

die Werte für x und y errechnen sich gem. Abbildung 28

²⁰ Thermal Comfort, Innova Air Tech Instruments, Bellerup, Dänemark 2002, S.10-12

²¹ Thermal Comfort, Innova Air Tech Instruments, Bellerup, Dänemark 2002, Appendix F

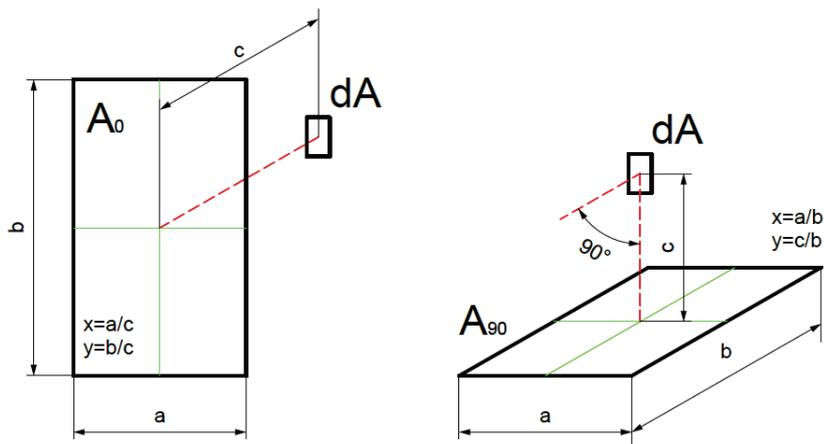


Abbildung 28: trigonometrische Faktoren zur Berechnung des Winkelfaktors für PRT

Für die vorliegende Untersuchung interessiert dabei, welchen Anteil die jeweiligen Paneele in Bezug auf die Position einer anwesenden Person am Strahlungsaustausch entwickeln können. Der Winkelfaktor ist dabei ein guter Indikator. Für eine stehende Person ist dabei der Austausch mit den vertikalen Flächen wesentlich bedeutender als mit den horizontalen Flächen, wie aus folgender Gleichung²² abgeleitet werden kann:

Gleichung 11

$$T_{MRT} = (0,08 \cdot (T_{P-up} + T_{P-down}) + 0,23 \cdot (T_{P-left} + T_{P-right}) + 0,35 \cdot (T_{P-front} + T_{P-back})) / (2 \cdot (0,08 + 0,23 + 0,35))$$

darin ist

T_{MRT} ... die mittlere Strahlungstemperatur

T_{P-up} ... die mittlere Umschließungsflächentemperatur oben

T_{P-down} ... die mittlere Umschließungsflächentemperatur unten

T_{P-left} ... die mittlere Umschließungsflächentemperatur links

$T_{P-right}$... die mittlere Umschließungsflächentemperatur rechts

$T_{P-front}$... die mittlere Umschließungsflächentemperatur vorne

T_{P-back} ... die mittlere Umschließungsflächentemperatur hinten

Im Folgenden wird daher nur mit den Ergebnissen der Gleichung 9 und 10 gerechnet. Mithilfe eines *Grasshopper*-Skripts²³ wurden Werte von einem Winkelfaktor von bis zu 0,2 ermittelt. Das heißt, dass durch die Nähe bis zu einem Fünftel des Strahlungsaustauschs über ein Paneel mit so einem Wert stattfindet. Umgekehrt zeigt sich, dass vor allem die Paneele, denen der Körper abgewandt ist, vor allem mit zunehmender Distanz eine sehr geringe Rolle spielen.

²² Thermal Comfort, Innova Air Tech Instruments, Bellerup, Dänemark 2002, Appendix E

²³ *Grasshopper* ist ein graphischer Algorithmus-Editor, entwickelt von David Rutten, der eng in die CAM-Software *Rhino* integriert ist, siehe auch: www.grasshopper3d.com

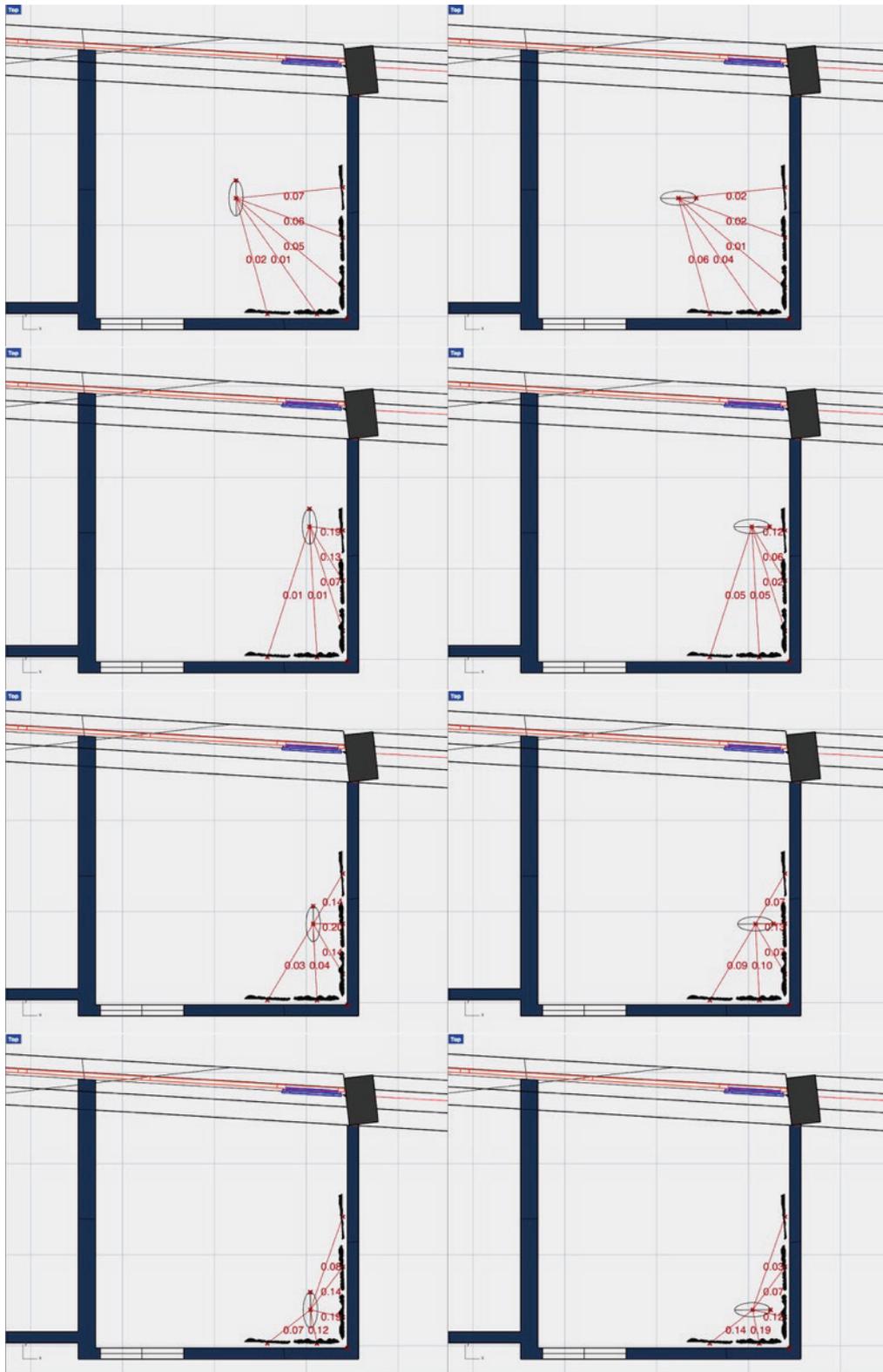


Abbildung 29: Position und Orientierung eines virtuellen Dummies und zugehörige Panel-bezogene Winkelfaktoren

Nach mehreren Entwurfsstudien wurden die Innenpaneele aus Sika-Blöcken gefräst und mit Schläuchen versehen. Dabei wurde immer auf Aspekte der Erschließung der Künste geachtet. Die nur im Infrarot-Bereich sichtbare „negative“ Strahlung führt zu reizvollen Figuren, deren Wahrnehmung in einem anderen Rahmen noch zu untersuchen wäre, Abbildung 30.

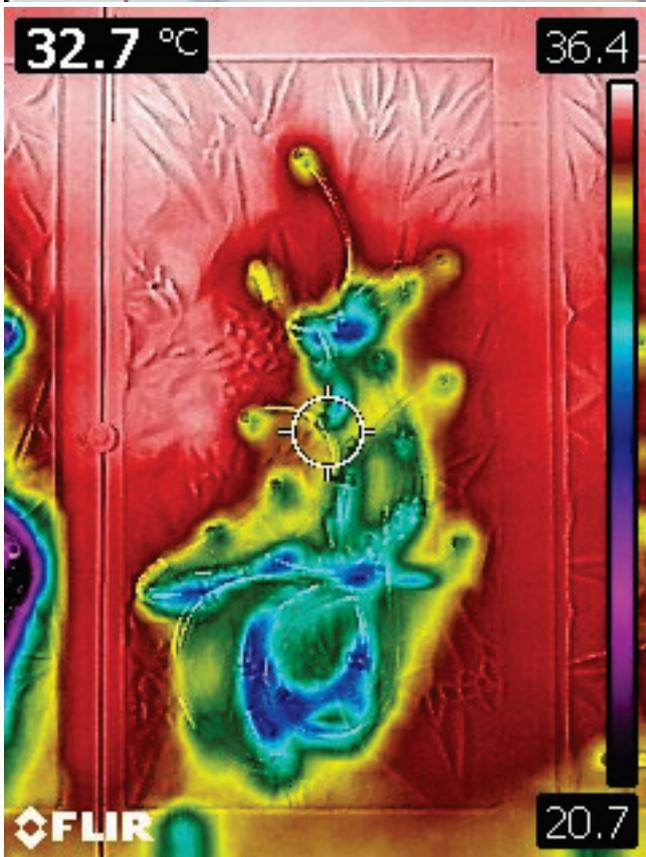


Abbildung 30: Panel #2 im sichtbaren und im Infrarotbereich des Lichts

Für das Außenpaneel wurde eine 6 mm Plexiglasplatte mit Löchern und einem Muster zur Fixierung der Schlauchschlaufen so versehen, dass ein möglichst langes, sich nicht überlappendes Muster entsteht. Die Entscheidung für die Plexiglasplatte sollte auch eine vergleichbare Situation mit Raum A schaffen. Während das Fenster in Raum B zu Montagezwecken geöffnet bleiben muss, bleibt das Fenster in Raum A gekippt. Die sehr knapp mit nur 7 cm Abstand montierte Plexiglasplatte verringert den Luftwechsel vergleichbar. Am Außenpaneel sollte es zwei Kreisläufe geben. Ein Kreislauf, der größere, dient dem Auskühlen des Wassers nachts, das kühle Wasser wird dann in isolierten Tanks für den Tag gespeichert, und in den Innenraum gepumpt. Der andere, kleinere Kreislauf dient nur dem Sonnenschutz, kann aber auch Strahlungswärme aus dem Inneren absorbieren und soll so über die Wirkung eines reflektierenden Sonnenschutzes hinausgehen, indem aktiv Wärme aus dem Raum abtransportiert wird. Beide Kreisläufe zum Außenpaneel hin werden nur aktiviert, wenn die Temperatur des zurückfließenden Wassers kühler ist als jene, die im Tank vorherrscht. Für die Wassertanks wurden zwei Coleman Extreme Camping Kühler mit je 49 l Fassungsvermögen angeschafft. Als Pumpe wurde je eine Tauchpumpe der Firma Gardena 7000/D angeschafft. Diese Pumpen haben 300 W Leistung und werden daher immer nur wenige Sekunden betrieben, um die Wassertemperatur nicht zu erhöhen. Diese Schwäche müsste in einem professionellen Setting mittels für Heizungen üblicher Installationen gelöst werden. Im Falle der Nutzung des Systems für Heizzwecke wäre es aber eine Möglichkeit, die Abwärme dem Raum zukommen zu lassen. Um das Steuerungskonzept umzusetzen, mussten zusätzliche Sensoren im Wasserkreislauf und an der Fassade montiert werden, siehe Tabelle 9.

Tabelle 9: Temperatursensoren zur Steuerung von MU1

Ort	Messwertgeber	Messgrößen	Zweck
nur Raum A	Maxim Integrated DS18B20 Digitales Thermometer	Wassertemperatur, Rücklauf Paneele innen, Rücklauf Paneel außen, Wassertanktemperatur	Steuerung
	Thermokon-SR04-Funkfühler solarbetrieben	Lufttemperatur, lokal an Fassade	Monitoring / Steuerung

Nach einigen Entwurfsstudien wurde ein Skript erstellt, das eine beliebige Fläche mit einer möglichst langen, sich nicht überschneidenden Linie belegt, siehe Abbildung 31.



Abbildung 31: Grundmuster für die Belegung des Außenpaneels

Aus diesem Grundmuster heraus wurde ein Zuschnitt entwickelt, der es ermöglicht, die Schläuche mittels vor Ort gedruckter Klemmen zu befestigen und eine Differenzierung zwischen klaren und transluzenten Flächen zur Ornamentierung herzustellen.

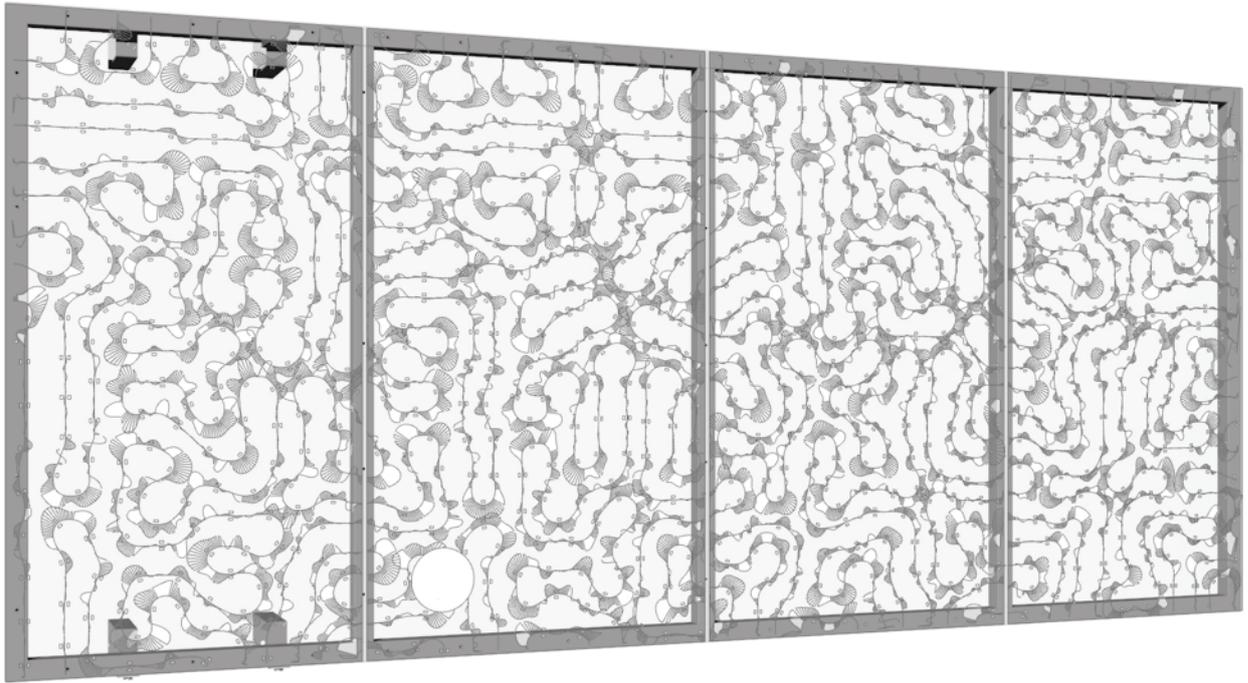


Abbildung 32: Design des Außenpaneels

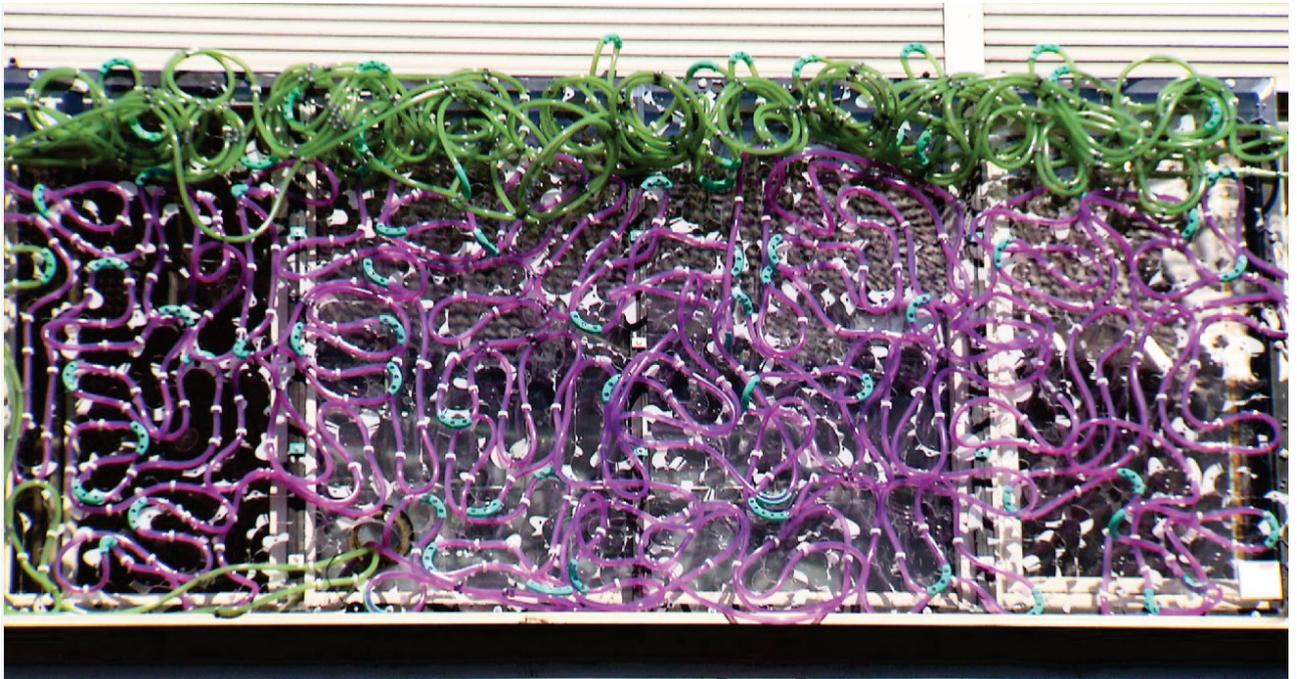


Abbildung 33: Das fertig montierte Außenmodul mit viel Speichermasse für den Sonnenschutzkreislauf (grüne Schläuche) und einer großen Abstrahlfläche für das Entladen der Hitze im Inneren über Nacht (lila Schläuche), Foto: Raumfilm.

Das endgültige Setting ist in Abbildung 34 dargestellt.

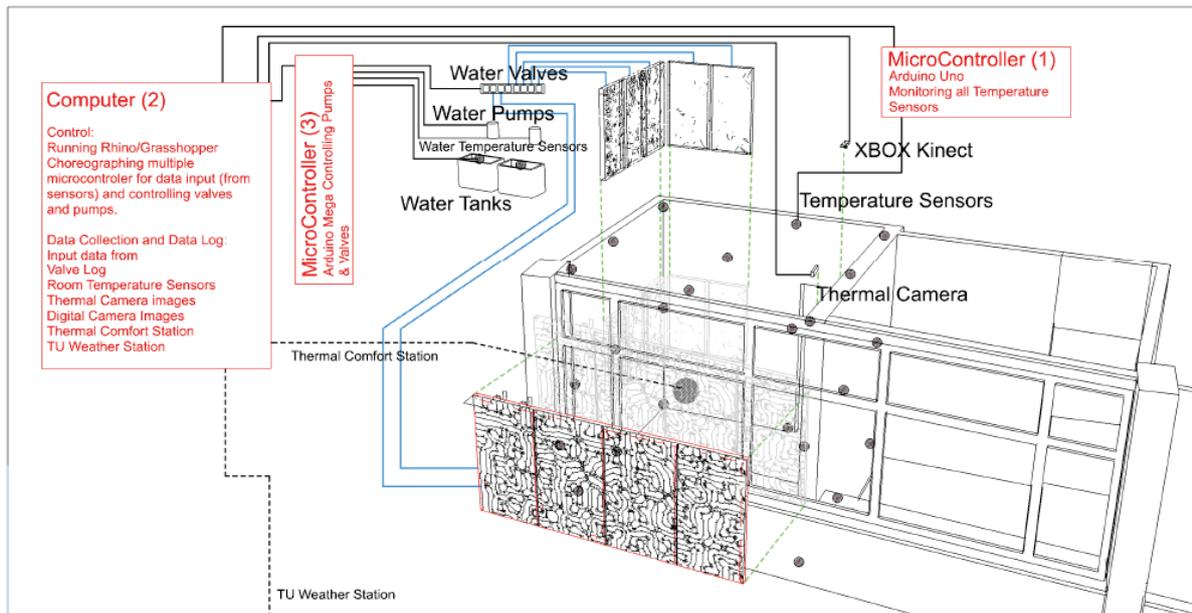


Abbildung 34: Schema MU1



Abbildung 35: Blick auf das Außenmodul von innen am frühen Morgen

Innen und außen wurden ca. 100 m Schlauch verbaut und es waren auf diese Weise lediglich 7,85 l Wasser aktiviert. Die beiden Wassertanks fassten je 49 l. Die Pumpen leisteten ca. 116 l/min, womit in ca. 35 Sekunden der gesamte Paneel-Inhalt ausgetauscht werden konnte.

2.7.4. Entwicklung und Ausführung MU2

Auf Basis des Konzepts eines optimierten Arbeitsplatzes, Abbildung 36, wurde eine pneumatische Konstruktion entwickelt. Durch das Aufblasen transparenter Elemente sollen opake Elemente schnell und ohne mechanische Teile (zur Vermeidung von Wartungsaufwand) beiseite geschoben werden. Diese aufblasbaren Elemente sind in einer elastischen Membran aus Silikon eingebettet. Um hinreichend steif zu sein, wird der Silikonmembran eine rippenartige Struktur gegeben.

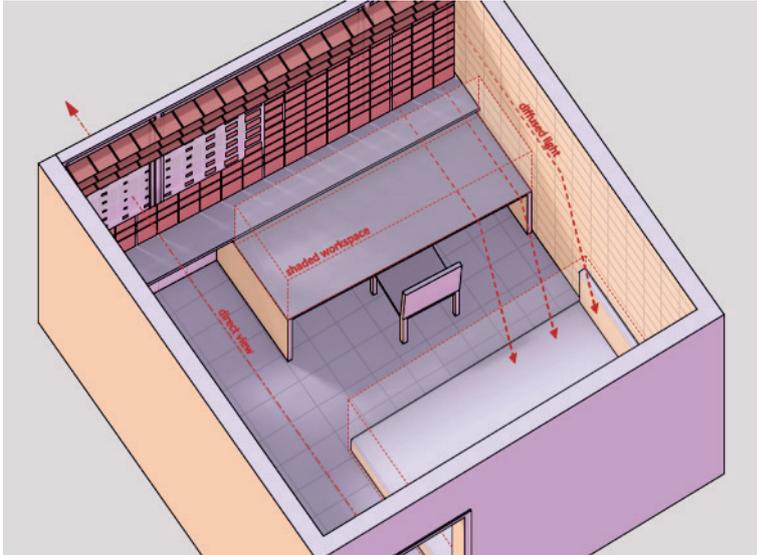


Abbildung 36: Ein optimierter Arbeitsplatz – wenn sich die Qualitäten der Verschattung und der Transparenz dynamisch an die Bedürfnisse des Nutzers anpassen können.

Während elastische Materialien im Außenbereich kritisch zu sehen sind, da sie Windbelastungen nicht aushalten können, spricht nichts gegen eine Anwendung im Innenraum. Silikon kann gut verarbeitet und auch gegossen werden. Die Gussform wurde aus einem Sika-Block gefräst, siehe Abbildung 37. Die pneumatischen Pölster werden aus PVC weich zugeschnitten und verschweißt.

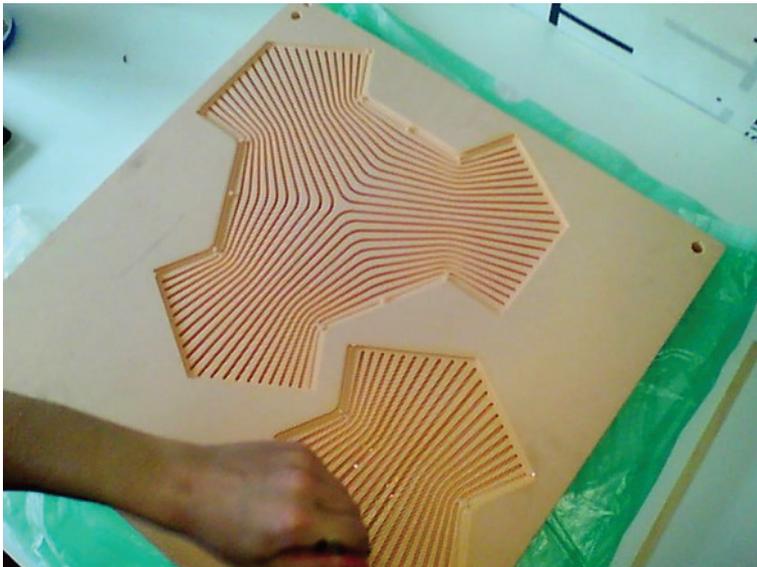


Abbildung 37: Form für die Silikonmembran

In der Folge wurden Membran und pneumatische Elemente durch Schrauben miteinander verbunden, siehe Abbildung 38. Die fertig zusammengestellte Membran wurde in einem Stahlrahmen im Testraum aufgebaut. Die einzelnen Kammern wurden gruppiert und mit Luftschläuchen verbunden, die wiederum über Ventile von einem Micro-Controller angesteuert wurden. Der Micro-Controller selbst war wiederum mit dem Tiefensensor verbunden. Da ein Tiefensensor auch wahrnehmen kann, wo sich bei einer Person der Kopf befindet, wäre es technisch auch möglich, den Prototyp an die Blickrichtung anzupassen, zum Beispiel immer dann einen Sichtbezug zu gewährleisten, wenn der Blick nach draußen gerichtet wird. Sonnenschutz könnte auf diese Weise effizienter werden und Strahlung

wirklich nur bei Bedarf in den Raum lassen. Im Falle des vorliegenden Projekts wurde die Installation nur an die Nähe eines Nutzers gekoppelt. Je näher, desto mehr öffneten sich die transparenten Elemente.

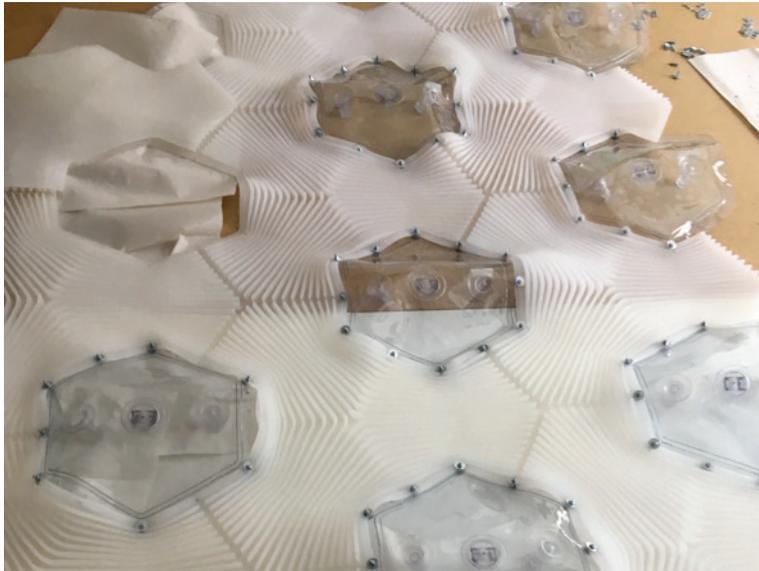


Abbildung 38: MU2, Fertigung der Membran

Der Stahlrahmen wurde H-förmig konzipiert, siehe Abbildung 39.

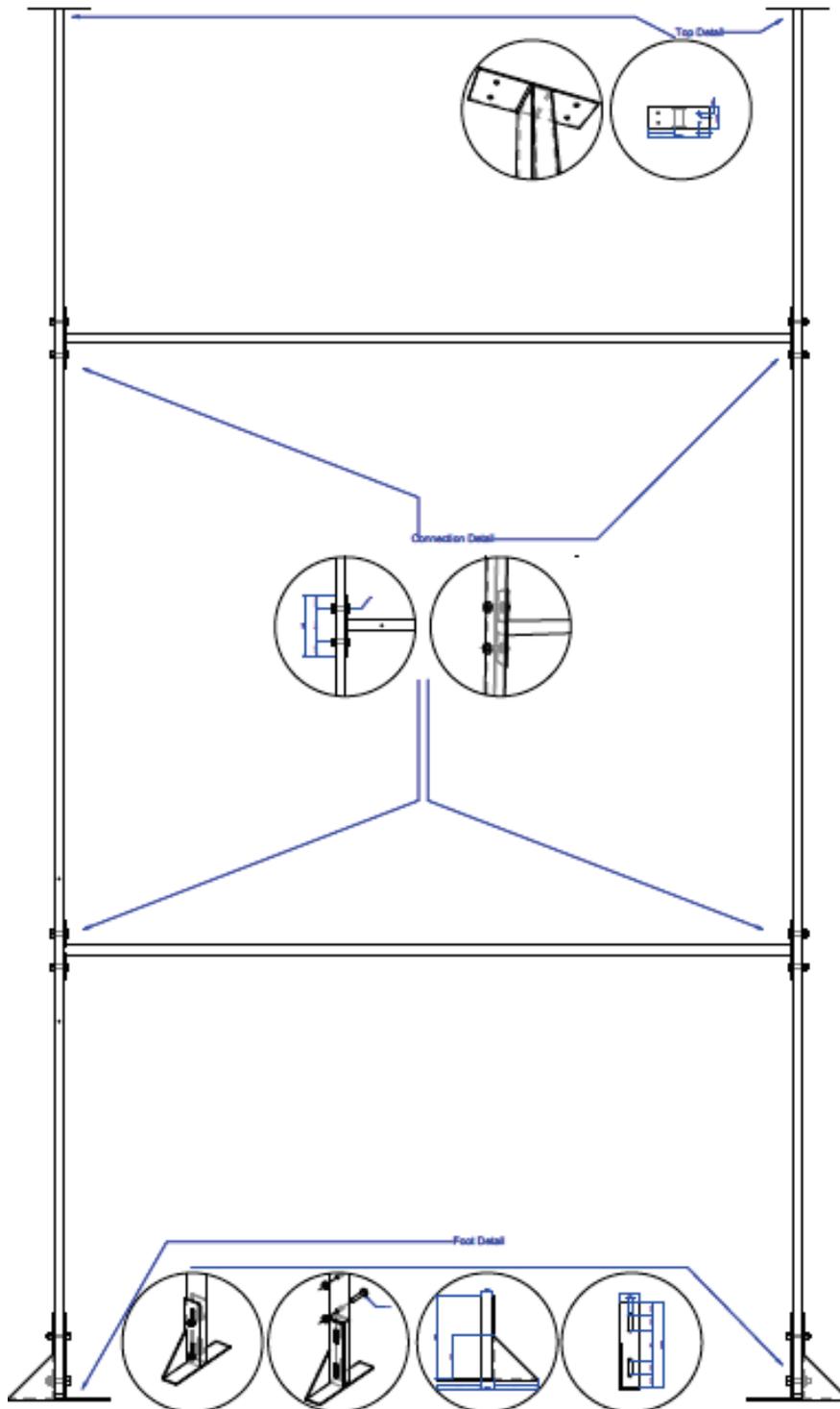


Abbildung 39: H-Rahmen, Schlosserdetails

In Abbildung 40 sieht man MU2 beim Öffnen der Sichtelemente, den pneumatischen Pölstern.

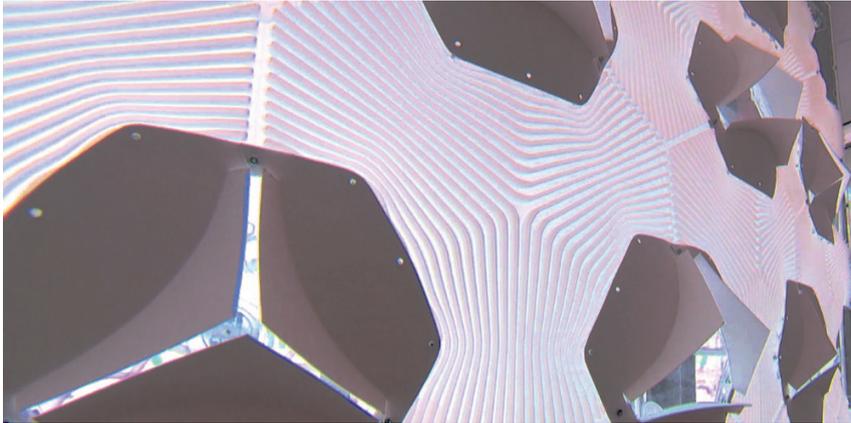


Abbildung 40: MU2 mit sich öffnenden Sichtelementen

2.7.5. Fertig eingerichteter Raum

Nun waren die beiden Räume für das Monitoring vorbereitet und die beiden Mock-Ups in Raum B installiert.

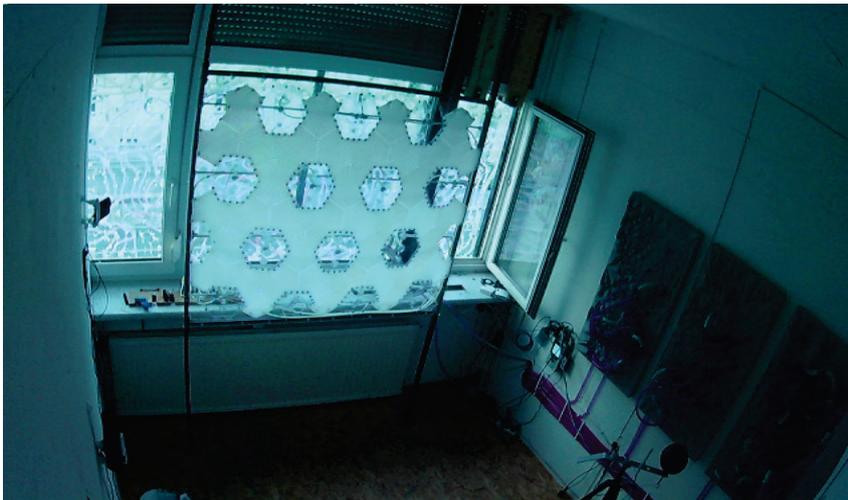


Abbildung 41: Raum B mit beiden Mock-Ups MU1 und MU2, aufgenommen von der Digitalkamera (LiveCam) am 21.8.2018 um 5:47

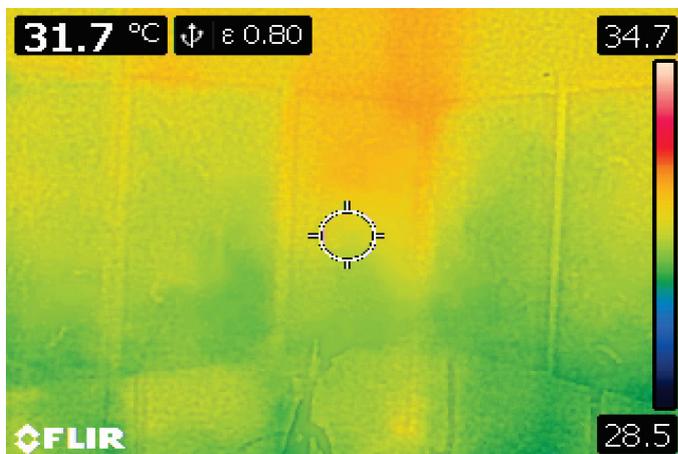


Abbildung 42: Raum B, aufgenommen von der Infrarotkamera (FLIR) am 21.8.2018 um 5:47, die Systeme sind nicht aktiv.

3. Ergebnisse

3.1. Durchführen von Testreihen zum klimatischen Verhalten

Mithilfe des Grasshopper-Interfaces kann das System gestartet werden. Es kommt aber immer wieder zu Störungen und Einfrieren des Datenlogs. Es werden verschiedene Materialien und Geometrien geprüft, Details wie Halterungen oder Elemente zur Verhinderung des Knickens der Schläuche werden entwickelt und vor Ort gedruckt. Die Eckdaten sind in

Tabelle 10 dargestellt.



Abbildung 43: Steuerung und Monitoring für Raum B

Tabelle 10: Ablauf der Einrichtung und Messung der Mock-Ups

Datum	Zuordnung	Aktion	Raum A	Raum B
19.07.2018	AP05	Einrichten des Monitorings		
27.07.2018	AP05	„Kalibrierung 1“	leer	leer
30.07.2018		Aufzeichnung der Klimadaten		
31.07.2018	AP05	Montage der Innenpaneele	leer	MU1-Innenpaneele installiert
05.08.2018				MU2-Membran installiert
06.08.2018	AP05	Montage des Außenpaneels	leer	MU1-Außenpaneel installiert
17.08.2018	AP06	„Kalibrierung 2“	leer	MU1 und MU2 installiert
19.08.2018		Aufzeichnen der Klimadaten		aber inaktiv
20.08.2018	AP06	Aufzeichnen der Klimadaten	leer	MU1 und MU2 installiert
22.08.2018				aktiv

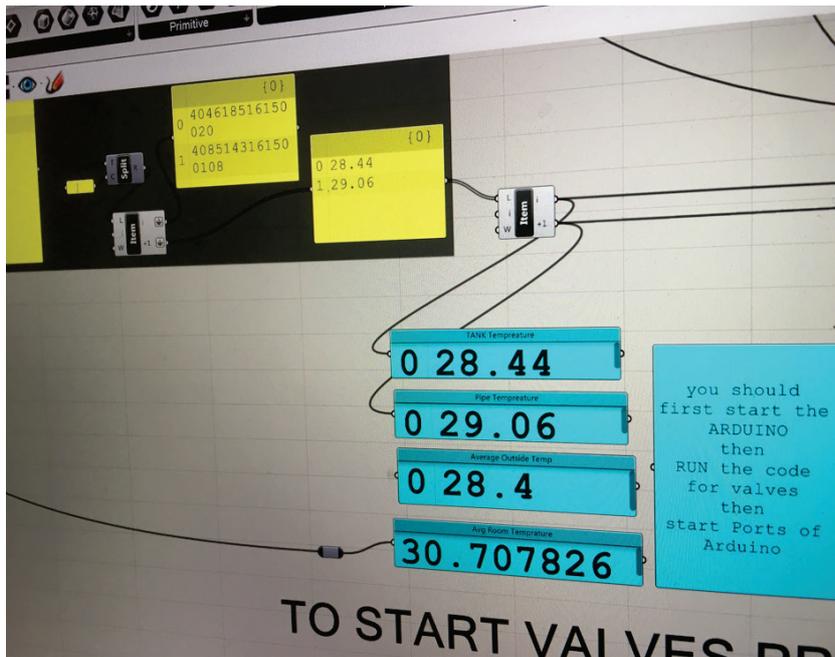


Abbildung 44: Feedback Temperatur im Interface, Screenshot

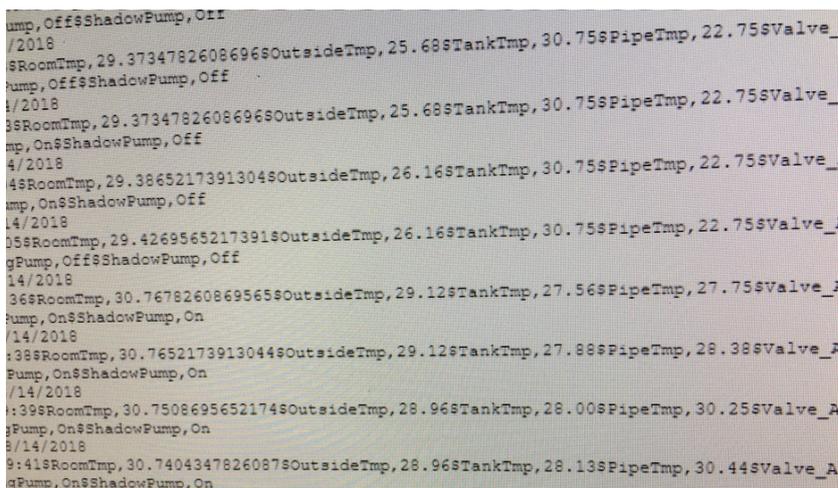


Abbildung 45: Datalog des Systems MU1, Screenshot

3.2. Testreihe mit inaktiven Elementen (MU1) 17.8. bis 19.8.2018

Bei diesem Test ging es darum, die Verschattungswirkung der Installation, aber auch allfällige innere Lasten zu dokumentieren, die das Innenraumklima von Raum B verändern. In beiden Räumen waren die Oberlichte durch die bestehenden Raffstores verschattet. In Raum A war das Fenster gekippt. In Raum B war das offene Fenster durch das Plexiglaspaneel in einem Abstand von 10 cm abgedeckt. Die Werte des Graphen in Abbildung 46 werden mit jenen des Graphen in Abbildung 26 verglichen.

Tabelle 11: Sonnengang 17. bis 19. August 2018²⁴

	17. August 2018			18. August 2018			19. August 2018		
	Uhrzeit	Azimut	Höhe	Uhrzeit	Azimut	Höhe	Uhrzeit	Azimut	Höhe
Morgendämmerung	05:17			05:18			05:20		
Sonnenaufgang	05:50	68,35	0,00	05:52	68,97	0,00	05:53	69,40	0,00
Sonnenhöchststand	12:58	179,75	55,16	12:58	179,85	54,84	12:58	179,94	54,52
Sonnenuntergang	20:05	291,13	0,00	20:03	290,59	0,00	20:01	290,05	0,00
Abenddämmerung	20:38			20:37			20:35		
Tageslichtdauer	14h14			14h11			14h08		

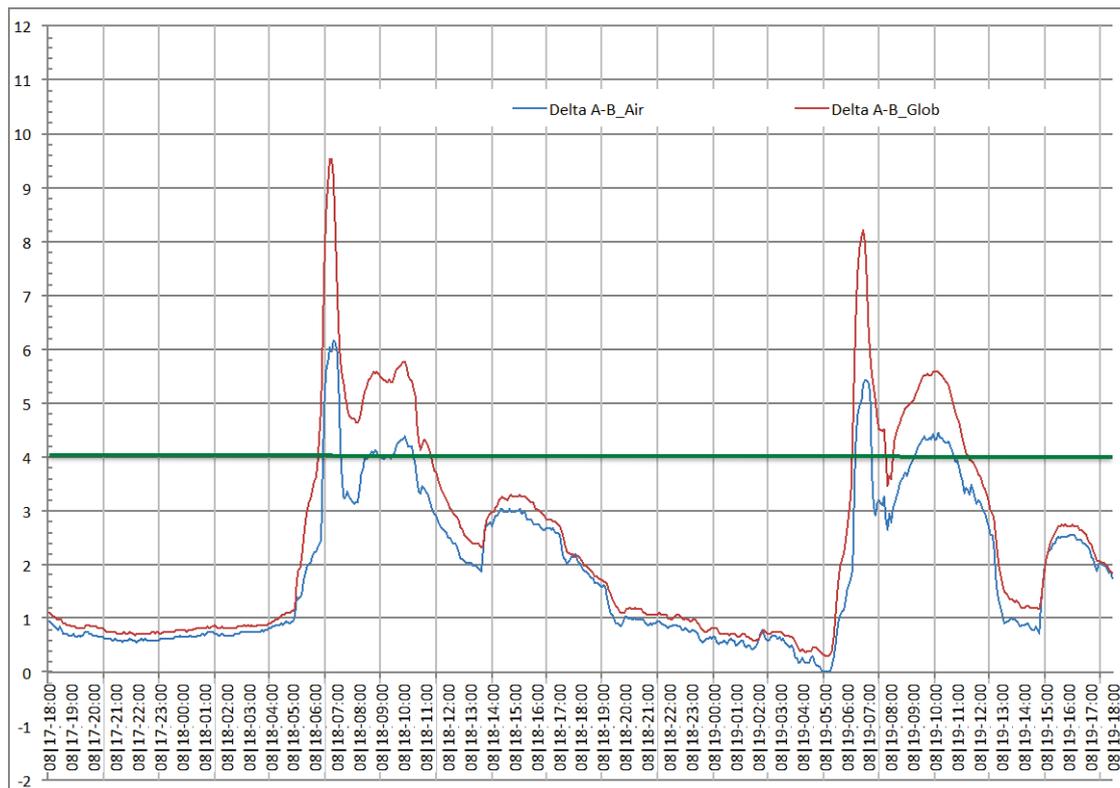


Abbildung 46: Temperaturdifferenz [K] zwischen Raum A und Raum B (A-B), 17.-19.8.2018, die grüne Linie markiert die 4 K Differenz

Allein durch das Anbringen der Installationen, vor allem des Außenpanels, kippt nun die Situation zwischen den beiden Räumen. War zuvor Raum A vor allem morgens zwischen Sonnenaufgang und 8:30 kühler, so gibt es nun überhaupt keine negativen Werte. Das heißt, dass Raum B durchgehend kühler als Raum A ist und es auch die 4 K-Schwelle²⁵ überschritten, siehe 2.5, vor allem bei der globalen

²⁴ abgerufen unter www.sonnenverlauf.de/#/48.2011,16.3788,19/2018.08.17/05:50/16/0 für Höhe 169 m, Breite 48,20106°, Länge 16,37882°

²⁵ Die Grenze von 4 K wurde im Hinblick auf die Strahlungstemperatur festgelegt. Dadurch, dass die Globe-Temperaturdifferenz größer als die Innenlufttemperaturdifferenz ist und sich die Globe-Temperatur in etwa aus dem Mittelwert der Luft- und der Strahlungstemperatur zusammensetzt, kann davon ausgegangen werden, dass bei Überschreiten von 4 K bei der Globe-Temperaturdifferenz auch die Strahlungstemperaturdifferenz über 4 K liegt.

Temperatur. Ein Hinweis, dass auch die geringen Mengen Wasser in den Paneelen als Speichermasse einen zusätzlichen Beitrag leisten. Dass die Abweichungen vor allem tagsüber vorhanden sind, während die Temperaturdifferenzen von 20:00 (Sonnenuntergang) bis 5:15 (Morgendämmerung) mit 1 K gleichsam nicht vorhanden sind, zeigt, dass der Luftwechsel durch die unterschiedliche Öffnung der Fenster (Raum A gekippt, Raum B offen, mit Scheibe in 10 cm Abstand) keine große Rolle spielt. Der wesentliche Unterschied entsteht durch die Verschattung und die vorhandene Speichermasse.

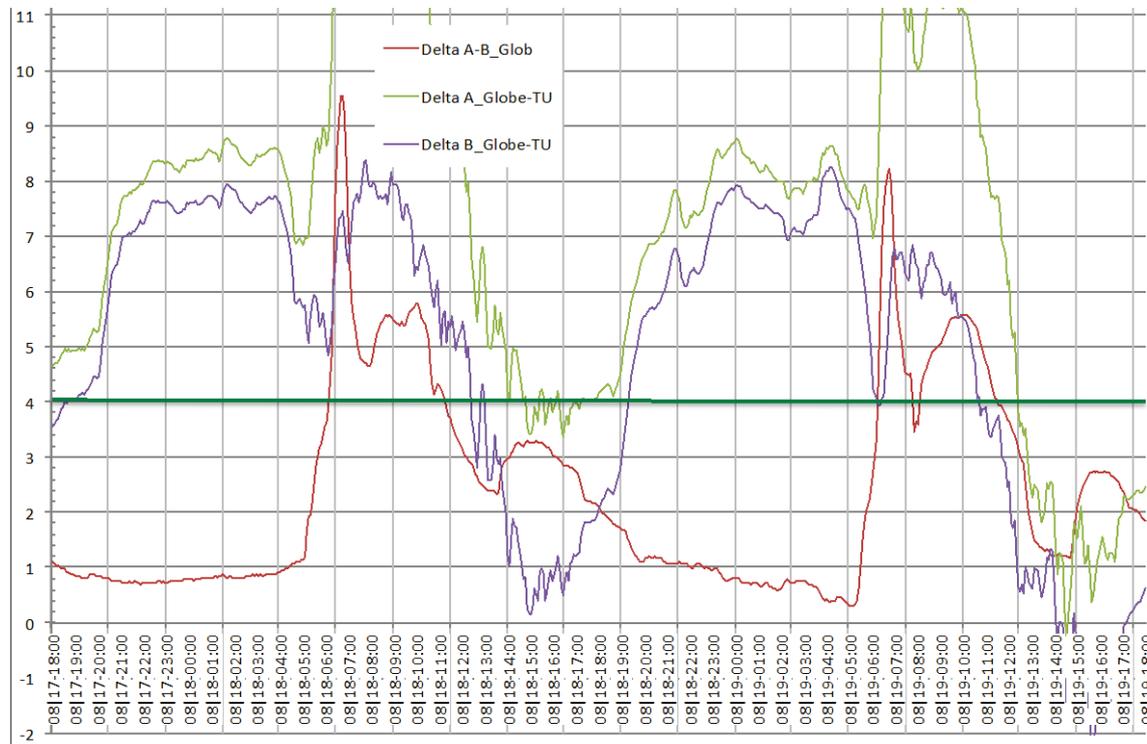


Abbildung 47: Globe-Temperaturdifferenz [K] zwischen Raum A und Raum B (A-B), 17.-19.8.2018, verglichen mit den Differenzen zwischen der Globe-Temperatur von Raum A bzw. Raum B und der Lufttemperatur der TU Wetterstation am Dach der TU Wien

In Abbildung 47 ist deutlich sichtbar, dass beide Räume die Kühle der Nacht nicht zur Auskühlung nützen können. Die Differenz zur Außenluft bleibt bei Raum B deutlich hinter jener von Raum A zurück und schafft sogar kurzfristig eine negative Differenz gegen Ende der Messperiode. Das heißt, dass die Globe-Temperatur in Raum B geringer war, als die Außenlufttemperatur. Dies könnte mit dem Wasser in den Schläuchen des Außenpaneels zusammenhängen, die Effekte sind mit der Verschattung alleine schwer zu erklären.

3.3. Testreihe mit aktiven Elementen (MU1) 20.8. bis 22.8.2018

Bei diesem Test ging es darum, die Wirkung der aktiven Installation auf das Innenraumklima von Raum B zu überprüfen. In beiden Räumen waren die Oberlichte durch die bestehenden Raffstores verschattet. In Raum A war das Fenster gekippt. In Raum B war das offene Fenster durch das Plexiglaspaneel in einem Abstand von 10 cm abgedeckt. Die Werte des Graphen in Abbildung 50 werden mit jenen des Graphen in Abbildung 46 verglichen. Die Einstellungen wurden entsprechend

des untenstehenden Flussdiagramms vorgenommen. Die Innenpaneele wurden sequentiell insgesamt 35 Sekunden lang gespült (kompletter Austausch des Wassers).

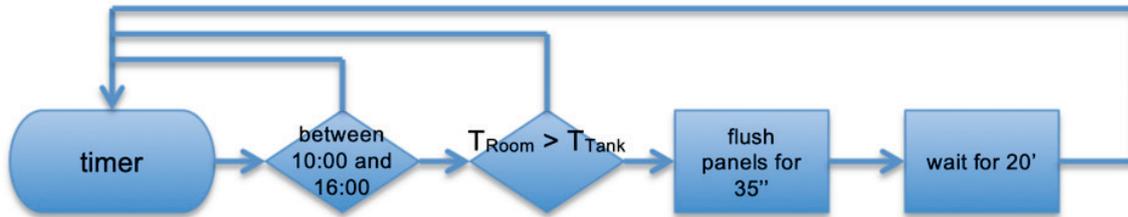


Abbildung 48: Flussdiagramm Innenpaneele

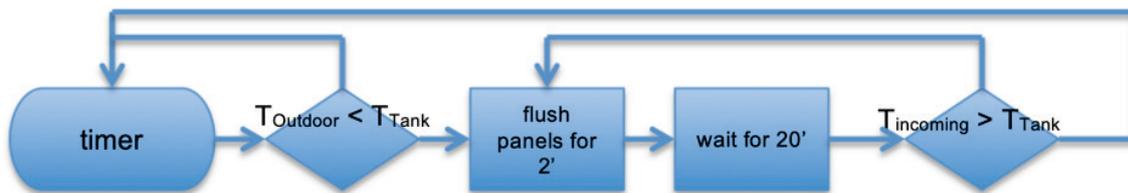


Abbildung 49: Flussdiagramm Außenpaneel

darin ist:

T_{outdoor} ... die an der Fassade gemessene Lufttemperatur

T_{Room} ... die gemittelte Oberflächentemperatur des Innenraums

T_{Tank} ... die Temperatur im isolierten Wassertank

T_{incoming} ... die Rücklauftemperatur des Außenpaneels

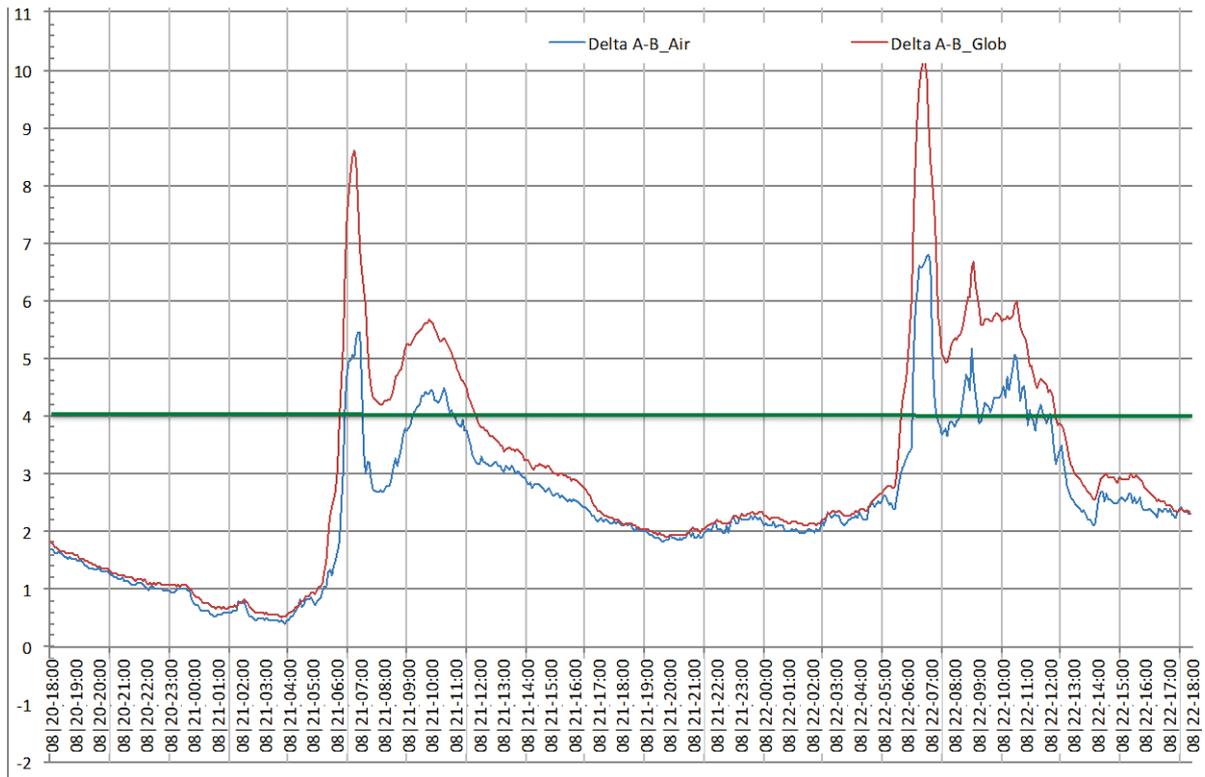


Abbildung 50: Temperaturdifferenz [K] zwischen Raum A und Raum B (A-B), 20.-22.8.2018, die grüne Linie markiert die 4 K Differenz

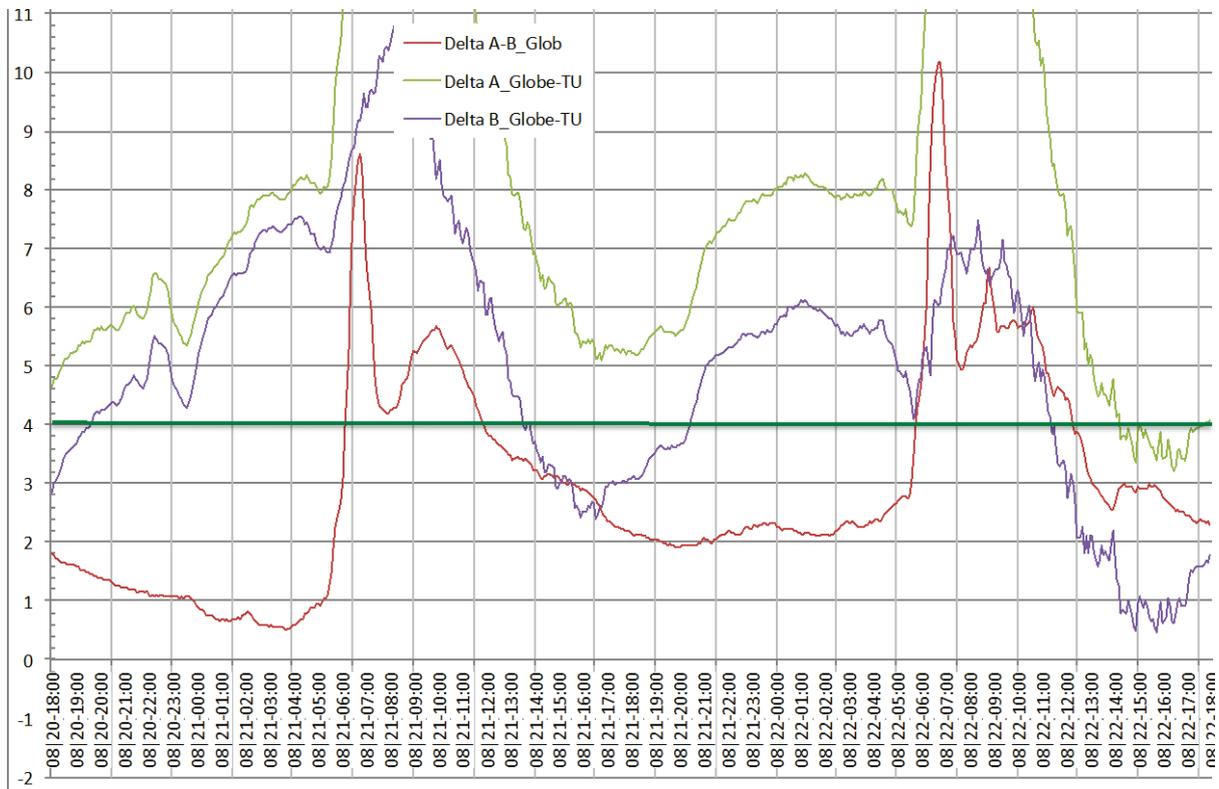


Abbildung 51: Globe-Temperaturdifferenz [K] zwischen Raum A und Raum B (A-B), 20.-22.8.2018, verglichen mit den Differenzen zwischen der Globe-Temperatur von Raum A bzw. Raum B und der Lufttemperatur der TU Wetterstation am Dach der TU Wien

Die Globe-Temperatur liegt nun deutlich über der 4 K-Schwelle. Auffällig ist, dass nun in Raum B auch nachts eine, wenn auch gering, kühlere Temperatur gegenüber Raum A herrscht. Das dürfte mit dem aktiven Außenpaneel zusammenhängen. Damit wird auch die Wärme nach draußen transportiert und die Kühle der Nacht kann, ganz abgesehen von der Speicherung in den Kühltanks, besser genutzt werden. Die Temperaturdifferenz zu der am Dach der TU Wien gemessenen Außentemperatur ist nun deutlich geringer und unterschreitet sogar phasenweise die 4 K-Grenze, während sie beim Raum A über fast die ganze Messperiode deutlich über dieser Grenze liegt.

Die Pumpe selbst war im Innenraum am ersten Tag (21.8.) von 10:20 bis 13:30 aktiv, am 2. Tag (22.8.) von 10:20 bis 14:30. Am 2. Tag blieb die Pumpe mit sehr kurzen Intervallen bis zum Ende der Messperiode um 18:00 aktiv. Dies erklärt die deutlich sichtbaren Differenzen gegenüber dem inaktiven System in diesen Zeiträumen. Vor allem scheinen die Paneele ganz im Sinne einer Speichermasse zu wirken und die „Dellen“, also die Ausschläge der Amplitude auszugleichen. Die Differenz zu Raum A bleibt durch die aktiven Innenpaneele höher.

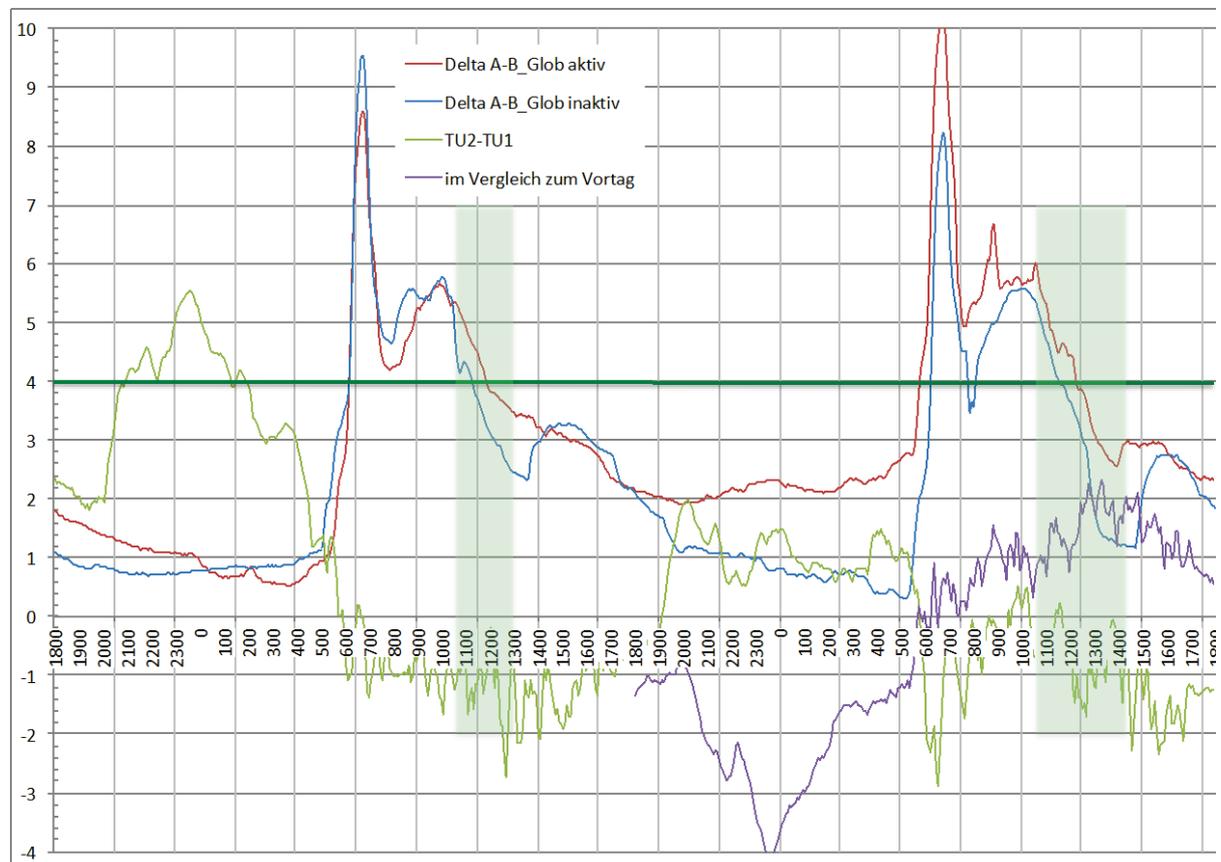


Abbildung 52: Globe-Temperaturdifferenz [K] zwischen Raum A und Raum B (A-B), 20.-22.8.2018, verglichen mit Globe-Temperaturdifferenz [K] zwischen Raum A und Raum B (A-B), 17.-19.8.2018, sowie der Temperaturdifferenz der Außenluft an den jeweiligen Stunden der jeweiligen Periode und die Außenluft im Vergleich zum Vortag. Grün hinterlegt ist der Zeitraum, in dem die Innenpaneele aktiv mit dem gespeicherten, kühleren Wasser gespült wurden.

In Abbildung 52 sieht man, dass es in der ersten Nacht deutlich wärmer war als in der Periode der Kalibrierung 2. Ansonsten waren die Unterschiede gering: Tagsüber war es geringfügig kühler, in der zweiten Nacht geringfügig wärmer als in der Periode der Kalibrierung 2. Auch gegenüber der zweiten Nacht, war die erste Nacht der Messperiode deutlich wärmer. Dadurch musste wärmeres Wasser verwendet werden und es dauerte wesentlich kürzer, bis dieses verbraucht war. Ein

zusammenfassendes Diagramm der wichtigsten Werte in dieser Messperiode findet sich in Abbildung 53. Hier fällt auch auf, dass sich in Raum B Luft- und Globe-Temperatur nahezu angeglichen haben und dass in Raum A die Globe-Temperatur durchwegs höher ist als die Lufttemperatur, was auf eine höhere Strahlungstemperatur der Umschließungsflächen schließen lässt.

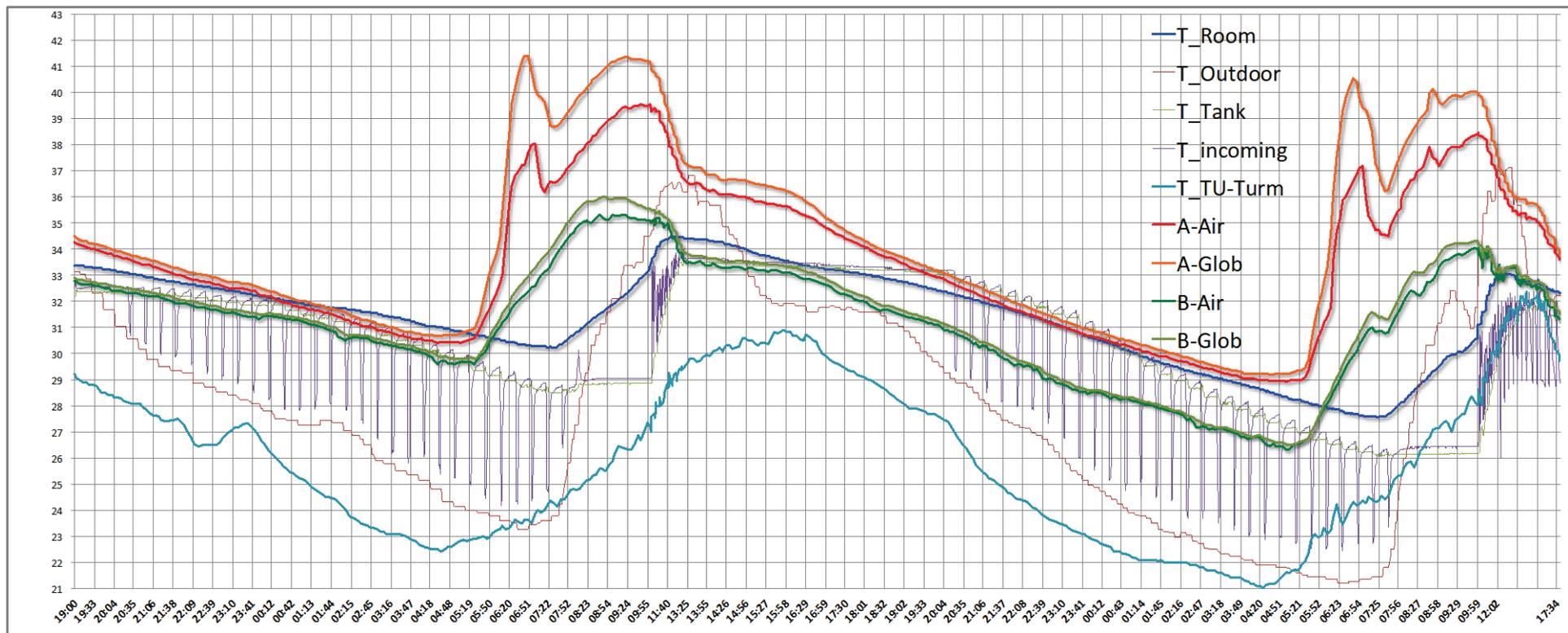


Abbildung 53: Die wichtigsten Werte des Systems MU1

Tabelle 12: Sonnengang 20. bis 22. August 2018²⁶

	20. August 2018			21. August 2018			22. August 2018		
	Uhrzeit	Azimut	Höhe	Uhrzeit	Azimut	Höhe	Uhrzeit	Azimut	Höhe
Morgendämmerung	05:21			05:23			05:24		
Sonnenaufgang	05:54	69,85	0,00	05:56	70,10	0,00	05:57	70,36	0,00
Sonnenhöchststand	12:57	179,63	54,19	12:57	179,735	53,86	12:57	179,84	53,52
Sonnenuntergang	19:59	289,51	0,00	19:57	289,34	0,00	19:56	289,17	0,00
Abenddämmerung	20:33			20:31			20:29		
Tageslichtdauer	14h04			14h01			13h58		

3.4. Durchführen von Testreihen zur Interaktivität

Sowohl MU1 als auch MU2 wurden auch hinsichtlich der geplanten Interaktivität erfolgreich getestet. Zur Dokumentation sei diesbezüglich auf die online verfügbaren Videos verwiesen²⁷. In Abbildung 54 sind die am Monitor durch den Tiefensensor übermittelten Positionsdaten einer Person zu sehen, sowie die dadurch geänderte Aktivierung der Paneele (linke Diagramme). Rechts ist die Anordnung der Paneele, aufgenommen mit der Infrarotkamera, zu sehen.

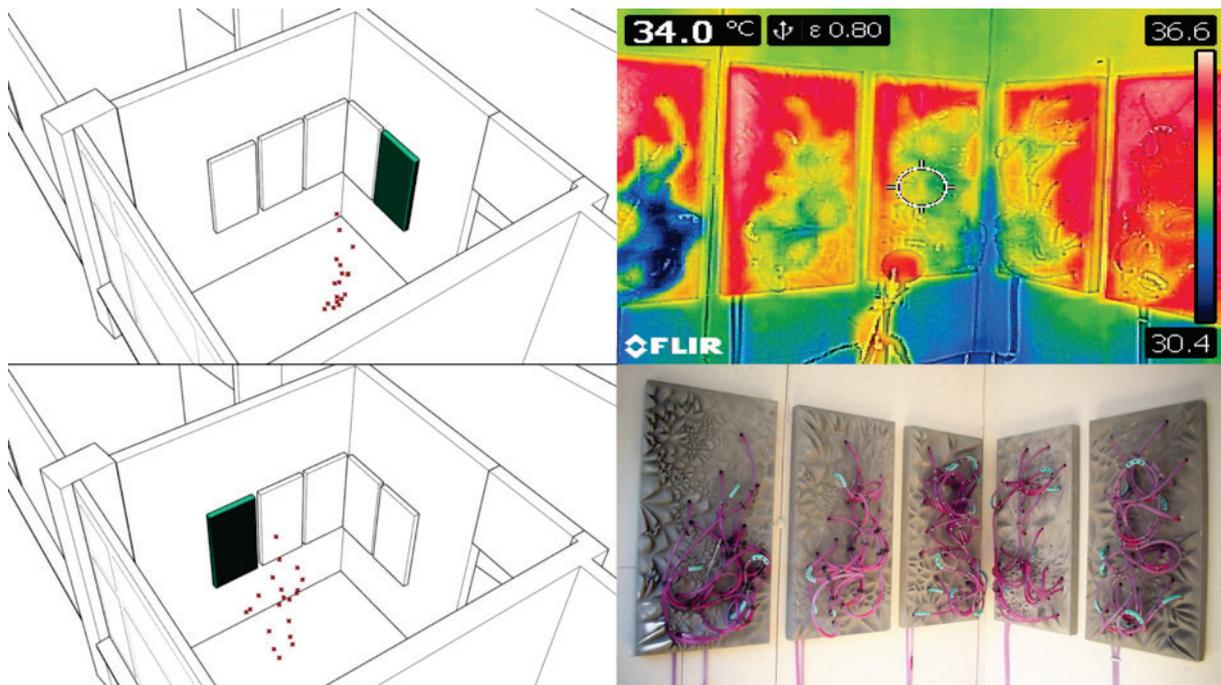


Abbildung 54: Test der Interaktion der Paneele von MU1 mit einer anwesenden Person

²⁶ abgerufen unter www.sonnenverlauf.de/#/48.2011,16.3788,19/2018.08.20/05:54/16/0 für Höhe 169 m, Breite 48,20106°, Länge 16,37882°

²⁷ vimeo.com/energydesign

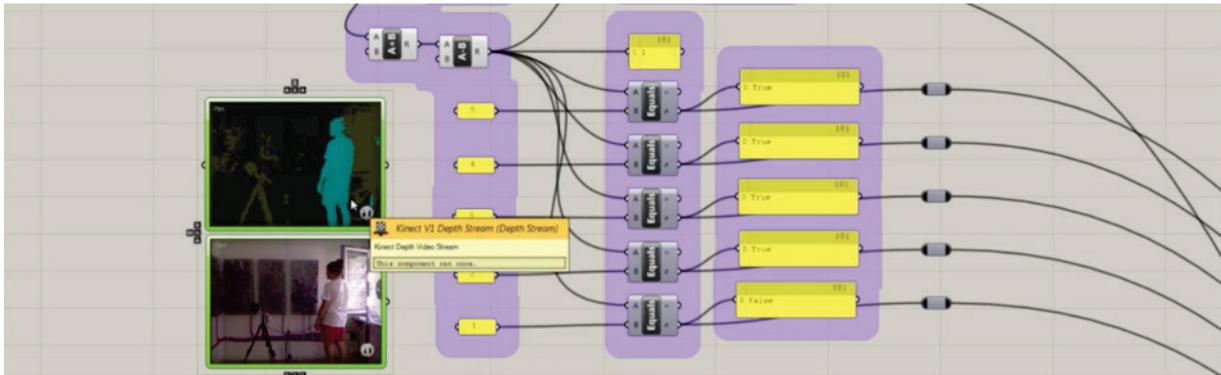


Abbildung 55: Der Blick des Tiefensensors im Interface von MU1



Abbildung 56: MU2 interagiert mit Designer Michal Spolnik

3.5. Einpassung in das Programm „Stadt der Zukunft“

Die Ziele des Programms Stadt der Zukunft werden wie folgt beschrieben²⁸:

1. *Resiliente Städte und Stadtteile mit hoher Ressourcen- und Energieeffizienz, verstärkter Nutzung erneuerbarer Energieträger sowie hoher Lebensqualität*
2. *Optimierung und Anpassung der städtischen Infrastruktur und Erweiterung des städtischen Dienstleistungsangebots vor dem Hintergrund fortschreitender Urbanisierung und erforderlicher Ressourcen- und Energieeffizienz*
3. *Aufbau und Absicherung der Technologieführerschaft bzw. Stärkung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit österreichischer Unternehmen und Forschungsinstitute*

Mit dem Programm sollen nicht nur technologische Entwicklungen angestoßen werden. Wichtig ist auch die Förderung bzw. In-Gang-Setzung von Entwicklungsprozessen in Städten, die zur Erreichung

²⁸ nachhaltigwirtschaften.at/de/sdz/ziele-inhalte/

der Programm-Ziele beitragen. Dabei sollen visionäre Projekte und Use Cases realisiert und dokumentiert werden, die die Nachahmung solcher Prozesse in anderen Städten und Stadtregionen ermöglicht.

Das Projekt EVA sieht sich als Beitrag zur Ermöglichung der Erschließung neuer Energiequellen von niedriger Exergie und von temporären Wärmesenken und damit als Beitrag zu Ziel 1. Eine allfällige Produktentwicklung könnte auch zu Ziel 2. und 3. beitragen. Was mit EVA gezeigt werden sollte und zum Teil auch erfolgreich gelang, ist die Sinnhaftigkeit des Einsatzes moderner Sensortechnik zur effizienteren Nutzung von Energie durch lokale und zeitliche Einschränkung. Darüber hinaus ist das Projekt ein Vorschlag zur Sanierung von Bestandsbauten – nicht nur hinsichtlich ihrer Wärmeverluste, sondern auch hinsichtlich der Wärme- und Kältespeicherung. Ein Problem, das mit dem Klimawandel noch stärker werden wird. Wünschenswert wäre ein Anstoß weiterer Konzepte, welche die Gedanken

- Effizienz durch Bereitstellung von Energie „just-in-time“ und „just-in-location“
- die Nachrüstung von Nachkriegs-Bestandsbauten (1945-1980) auch hinsichtlich Speichermasse

aufnehmen und weiterverfolgen.

4. Schlussfolgerungen

4.1. Lessons Learned

Das 4 K-Ziel, also die Schaffung eines spürbaren Unterschieds zwischen den beiden Räumen durch MU1, wurde zum Teil erreicht. Bei beiden Mock-Ups funktioniert die Interaktivität hervorragend. Eine Weiterentwicklung erscheint vor dem Hintergrund der Klimaerwärmung und der gebotenen Zurückhaltung beim Einsatz energieintensiver Technologien sinnvoll, da viele Bestandsgebäude nur unzureichend zusätzliche Lasten (Gewicht) aufnehmen können und das Nachrüsten von Speichermasse daher keine Alternative zu energieverbrauchenden Kühlsystemen darstellen würde. Durch die dynamische, interaktive Ausrichtung kann die gespeicherte Energie bzw. im konkreten Fall Wärmesenke effizienter genutzt werden. Auch erlaubt der eingeschlagene Weg eine Bearbeitung als Einrichtungsgegenstand oder Designstück, was die Implementierung erleichtern kann. Die gemessene Tendenz ist jedenfalls vielversprechend, da Raum B, der ohne Maßnahmen sogar etwas schlechtere Ergebnisse brachte, mit der Ausstattung MU1 durchgehend bessere Resultate lieferte. Auch der Einsatz von gefärbtem Wasser als Sonnenschutz ist interessant. Für eine Weiterbearbeitung müsste zu allererst die Speichermasse besser dimensioniert und die Wärmeübertragung genau studiert werden.

Dem Charakter einer Sondierung entsprechend ist ein prinzipieller „Proof of Concept“ als erbracht anzusehen. Nichts desto trotz würden wir eine längerfristige, maßstäblich größere Realisierung als nächsten Schritt für die Erhöhung des *Technology-Readiness-Level (TRL)* wählen, bevor über eine Produktentwicklung nachgedacht werden kann.

Bei der gewählten Realisierung handelt es sich um eine singuläre Auswahl aus einem sehr großen Portfolio von verschiedenen Methoden, Vorschlägen, Konzepten und Architekturvisionen. Es wäre durchaus dienlich, deren Potential längerfristig und systematisch – wie im EVA Projekt vorgezeigt – abzuschätzen. Dafür einen Indikator – wie z.B. auch den eben erwähnten *Technology-Readiness-Index* – heranzuziehen, sollte im Kern einer Folge-Forschungsbemühung stehen.

Wesentlichste Erkenntnis ist die mit geringen Mitteln erzielbare Machbarkeit einer örtlichen und zeitlichen Präzisierung der Bereitstellung energetisch wirksamer Elemente. Auch der Versuch der Gestaltung dieser Elemente als Kunstgegenstände²⁹, die leicht nachträglich in Räume oder an der Gebäudehülle eingebracht werden können, würde zu höherer Akzeptanz und einem großflächigen Ausrollen der Technologie führen. Die untersuchten Konzepte sind für viele Gestaltungsansätze offen.

Das Projektteam wird die Möglichkeiten interaktiver Gestaltungsansätze weiterhin verfolgen. Die spezielle sanfte Vor-Ort-Erschließung von Wärmesenken und eine stärkere Nutzung der Nachtkühlung soll weiter beforscht werden.

Die Projektergebnisse zeigen, dass die Ergebnisse mit wesentlich geringeren finanziellen Mitteln erreicht werden konnten als vorhergesehen. Das macht MU1 für weniger wohlhabende und ältere

²⁹ Projektmitarbeiter Galo Moncayo ist ein anerkannter Künstler mit Abschluss (Masters in Architektur, Master of Fine Arts in Sculpture and Extended Media), siehe galomoncayo.net

MitbürgerInnen interessant, die mitunter besonders unter klimatischen Verschlechterungen zu leiden haben und die Gebäude der Nachkriegsmoderne bewohnen.

4.2. Verbreitungsaktivitäten und Potential

Folgende wissenschaftlichen Publikationen wurden veröffentlicht und dazugehörige Vorträge wurden zum Projekt gehalten, bzw. sind in Vorbereitung begriffen:

- B. Sommer, U. Pont, G. Moncayo, V. Sandor, A. Mahdavi:
"Recent progress in the EVA project: Evaluation of visionary architectural concepts - state of the art"; Applied Mechanics and Materials, 12th Envibuild - Buildings and Environment - From Research to Application Proceedings of the 12th International EnviBUILD Conference (7th & 8th September 2017) (2019), 887; S. 227 - 236.



Abbildung 57: Galo Moncayo präsentiert "Recent Progress" des EVA Projektes auf der 12. Internationalen EnviBUILD Konferenz

- B. Sommer, U. Pont, G. Moncayo, M. Schuss, A. Mahdavi:
"A review on the EVA – project: Evaluation of visionary architectural concepts in view of Building Performance"
Abstract angenommen für die SBE (Sustainable Built Environment D-A-CH-Conference 2019)
- B. Sommer & G. Moncayo:
"Overview about the Projects EDEN and EVA"
Lecture Series Current Topics in Building Performance, Winterterm 2017/2018 (TU Wien)
- B. Sommer, U. Pont
"The EVA-Project – Evaluation of visionary architectural concepts."
Beitrag für das Journal Frontiers in Architecture research (ISSN 2095-2635) in Vorbereitung

Das Projekt fand auch außerhalb wissenschaftlicher Kreise großes Interesse. Da es an der Schnittstelle von Wissenschaft und Kunst operiert, konnte auch das internationale künstlerische Fachpublikum

erreicht werden. Konzepte und Überlegungen zu den Prototypen wurden noch während der Projektlaufzeit im Rahmen der Ausstellung

„**Understanding Art & Research**“ kuratiert von Gerald Bast, Alexander Damiansich und Barbara Putz-Plecko

- an der Dunedin School of Art, Neuseeland vom 12. April bis 11. Mai 2018 und
- an der School of Art, Design and Media (ADM) of Nanyang Technological University (NTU), Singapore vom 19. November bis 30. November 2018 in den Räumlichkeiten der ADM Gallery

gezeigt. Zu dieser Ausstellung gab es auch ein veröffentlichtes Fachbuch mit dem EVA-Projekt als Buchbeitrag.

- B. Sommer, G. Moncayo et. al. “EVA-Evaluating Visionary Architecture”
G. Bast, A. Damianisch und B. Putz-Plecko (Hrsg.) in „Understanding Art & Research“
Verlag der Universität für angewandte Kunst, Wien (ISBN 978-3950432350)



Abbildung 58: “Understanding Art and Research”: Ausstellung in der ADM Gallery, Singapur, Foto: Mark Lim

Die beiden Mock-Ups *ACH!EVA* und *Strategic Window* wurden nach Abschluss des Projekts im Rahmen der Jahresausstellung der Angewandten, *The Essence*, im November 2018 gezeigt. *Strategic Window* konnte dabei voll funktionsfähig präsentiert werden. *ACH!EVA* wurde in voller Größe und mit einem Teil der Innenmodule, sowie dem Außenmodul gezeigt.

„**The Essence 2018**“ kuratiert von Edek Bartz

- an der Universität für angewandte Kunst Wien vom 21. bis 25.11.2018

Über diese Ausstellung fand das Forschungsprojekt auch die Aufmerksamkeit des Fachjournalismus. Ein Interview mit Bernhard Sommer erscheint in der Fachzeitschrift *Architektur Aktuell*.

- Marboe:
„Dynamisch Denken – Der Klimawandel fordert auch die Architektur heraus: Ein Gespräch mit Architekt Bernhard Sommer, einem Experten in Energy Design“
Future Talk – *Architektur Aktuell* No 466/467, 1-2, 2019
(Rezension zum Teil über das EVA-Projekt)

5. Ausblick und Empfehlungen

Im Zuge von Bemühungen, den Einsatz fossiler Energie zu reduzieren, könnten Umweltenergie und Prozesswärmequellen und -senken mit raumnahen Temperaturen eine wichtige Rolle spielen. Besonders wirkungsvoll ist die Erschließung solcher Energiequellen, wenn sie ohne oder zumindest mit nur geringen Temperaturänderungen genutzt werden können.

Um das Heizen und Kühlen mit solchen Niedrigexergie-Quellen effektiv umzusetzen, wird die Entwicklung leistungsfähiger Wärmeübertrager gefordert, die *„eine große Wärmeüberträgerfläche sowie einen hohen Wärmedurchgangskoeffizienten aufweisen und somit kleine Grädigkeiten bewirken. Diese Forderungen gelten sowohl für die Wärmeübertragung im Raum als auch für die Aufnahme der Umweltenergie. Da aber Energieangebot und -bedarf zeitlich nicht deckungsgleich sind, muss die Energiespeicherung einbezogen werden. Sind das Angebot und der Bedarf beispielsweise an den Tag-Nacht-Rhythmus gebunden, so bietet sich die Speicherung in den Bauteilen des Gebäudes an. Bei längeren Zyklen empfiehlt sich beispielsweise die Speicherung im Erdreich.“*³⁰

Dem Konzept der großen Fläche und der großen Speichermasse oder -volumina zur Aktivierung niedrigster Exergie-Mengen wird mit dem Projekt EVA ein Konzept der „just-in-time“-Bereitstellung von Energie – bzw. konkret mit MU1 der Ableitung von Energie, sowie mit MU2 der Zur-Verfügung-Stellung von Licht und von Sichtbezügen – zur Seite gestellt.

³⁰ Glück, Bernd, Abschlussbericht des F/E Themas: Innovative Wärmeübertragung und Wärmespeicherung

6. Verzeichnisse

6.1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: terminology map, Übersicht und Definition von für die Katalogisierung verwendeten Begriffen.....	11
Abbildung 2: Eingabemaske zur Erfassung beispielhafter Projekte	11
Abbildung 3: Skript für das User Interface.....	12
Abbildung 4: User Interface zur Suche in oder Auswertung der Datenbank.....	12
Abbildung 5: WHY-category, Zuordnung der eingegebenen Projekte (Mehrfachnennungen waren möglich)	12
Abbildung 6: HOW-category, Zuordnung der eingegebenen Projekte (Mehrfachnennungen waren möglich)	13
Abbildung 7: Katalog visionärer Konzepte, beispielhaftes Katalogblatt	13
Abbildung 8: Brian Cody, Energiekonzept für einen Pavillon der Duales System Deutschland GmbH für die EXPO 2000 in Hannover, Skizze: Brian Cody	14
Abbildung 9: MIT Senseable City Lab, Carlo Ratti: Local Warming, Installation, 14th International Architecture Exhibition Fundamentals, Architektur-Biennale, Venedig 2014, Foto: MIT Senseable City Lab.....	15
Abbildung 10: Zusammenhang von spez. Gewicht und Wärmeleitfähigkeit.....	17
Abbildung 11: Zusammenhang von spez. Gewicht und Speichermasse	17
Abbildung 12: Projektion der Raumumschließungsflächen auf einen zylindrischen Körper	19
Abbildung 13: Zusammenhang von Distanz, Paneelbreite und daraus folgendem Anteil an der auf einen Zylinder projizierten Raumumschließungsfläche	20
Abbildung 14: angemietete Räumlichkeiten der Universität für angewandte Kunst Wien, ©Google, aufgenommen Aug.2017	22
Abbildung 15: Einbau zweier baugleicher Räume, rot markiert.....	23
Abbildung 16: Außenansicht Heumarkt 4 mit temporärem EVA-Lab und den beiden Zwillingräumen A und B.....	24
Abbildung 17: Ausschnitt aus einem Katalogblatt des Anhangs II des publizierbaren Endberichts: light adaptable facade	26
Abbildung 18: Ausschnitt aus einem Katalogblatt des Anhangs II des publizierbaren Endberichts: ultrasonic platonic	27
Abbildung 19: MU1, Schema	31
Abbildung 20: MU2, Schema	32
Abbildung 21: Thermal Comfort Station der Fa. Ahlborn.....	33
Abbildung 22: Eigens entworfenes Gehäuse der Sensoren zur Erfassung der Oberflächentemperatur, Verteilung im Raum	34
Abbildung 23: Tiefensensor und Wärmebildkamera	34
Abbildung 24: Digitalkamera	35

Abbildung 25: Set-Up Schema für Data Collection and Data Logging mittels eines Arduino Yun microcontrollers	35
Abbildung 26: Temperaturdifferenz [K] zwischen Raum A und Raum B (A-B), 27.-30.7.2018	37
Abbildung 27: Übersichtsplan Grundgerüst Außenpaneel	38
Abbildung 28: trigonometrische Faktoren zur Berechnung des Winkelfaktors für PRT	40
Abbildung 29: Position und Orientierung eines virtuellen Dummys und zugehörige Paneel-bezogene Winkelfaktoren.....	41
Abbildung 30: Paneel #2 im sichtbaren und im Infrarotbereich des Lichts.....	42
Abbildung 31: Grundmuster für die Belegung des Außenpaneels.....	43
Abbildung 32: Design des Außenpaneels	44
Abbildung 33: Das fertig montierte Außenmodul mit viel Speichermasse für den Sonnenschutzkreislauf (grüne Schläuche) und einer großen Abstrahlfläche für das Entladen der Hitze im Inneren über Nacht (lila Schläuche), Foto: Raumfilm.....	44
Abbildung 34: Schema MU1	45
Abbildung 35: Blick auf das Außenmodul von innen am frühen Morgen	45
Abbildung 36: Ein optimierter Arbeitsplatz – wenn sich die Qualitäten der Verschattung und der Transparenz dynamisch an die Bedürfnisse des Nutzers anpassen können.	46
Abbildung 37: Form für die Silikonmembran	46
Abbildung 38: MU2, Fertigung der Membran	47
Abbildung 39: H-Rahmen, Schlosserdetails	48
Abbildung 40: MU2 mit sich öffnenden Sichtelementen	49
Abbildung 41: Raum B mit beiden Mock-Ups MU1 und MU2, aufgenommen von der Digitalkamera (LiveCam) am 21.8.2018 um 5:47.....	49
Abbildung 42: Raum B, aufgenommen von der Infrarotkamera (FLIR) am 21.8.2018 um 5:47, die Systeme sind nicht aktiv.	49
Abbildung 43: Steuerung und Monitoring für Raum B	50
Abbildung 44: Feedback Temperatur im Interface, Screenshot.....	51
Abbildung 45: Datalog des Systems MU1, Screenshot	51
Abbildung 46: Temperaturdifferenz [K] zwischen Raum A und Raum B (A-B), 17.-19.8.2018, die grüne Linie markiert die 4 K Differenz.....	52
Abbildung 47: Globe-Temperaturdifferenz [K] zwischen Raum A und Raum B (A-B), 17.-19.8.2018, verglichen mit den Differenzen zwischen der Globe-Temperatur von Raum A bzw. Raum B und der Lufttemperatur der TU Wetterstation am Dach der TU Wien	53
Abbildung 48: Flussdiagramm Innenpaneele	54
Abbildung 49: Flussdiagramm Außenpaneel.....	54
Abbildung 50: Temperaturdifferenz [K] zwischen Raum A und Raum B (A-B), 20.-22.8.2018, die grüne Linie markiert die 4 K Differenz.....	55
Abbildung 51: Globe-Temperaturdifferenz [K] zwischen Raum A und Raum B (A-B), 20.-22.8.2018, verglichen mit den Differenzen zwischen der Globe-Temperatur von Raum A bzw. Raum B und der Lufttemperatur der TU Wetterstation am Dach der TU Wien	55

Abbildung 52: Globe-Temperaturdifferenz [K] zwischen Raum A und Raum B (A-B), 20.-22.8.2018, verglichen mit Globe-Temperaturdifferenz [K] zwischen Raum A und Raum B (A-B), 17.-19.8.2018, sowie der Temperaturdifferenz der Außenluft an den jeweiligen Stunden der jeweiligen Periode und die Außenluft im Vergleich zum Vortag. Grün hinterlegt ist der Zeitraum, in dem die Innenpaneele aktiv mit dem gespeicherten, kühleren Wasser gespült wurden.	56
Abbildung 53: Die wichtigsten Werte des Systems MU1	58
Abbildung 54: Test der Interaktion der Paneele von MU1 mit einer anwesenden Person	59
Abbildung 55: Der Blick des Tiefensensors im Interface von MU1	60
Abbildung 56: MU2 interagiert mit Designer Michal Spolnik	60
Abbildung 57: Galo Moncayo präsentiert "Recent Progress" des EVA Projektes auf der 12. Internationalen EnviBUILD Konferenz.....	63
Abbildung 58: "Understanding Art and Research": Ausstellung in der ADM Gallery, Singapur, Foto: Mark Lim	64

6.2. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Impact-Analyse	21
Tabelle 2: U-Werte der neu eingebauten Bauteile	23
Tabelle 3: Mengen für den Einbau der Räume A und B	24
Tabelle 4: Empfindlichkeitsschwellen des Menschen.....	29
Tabelle 5: Emissionsgrade	30
Tabelle 6: Messgrößen des Monitorings	33
Tabelle 7: Sonnengang 27. bis 30. Juli 2018.....	36
Tabelle 8: Materialien der Innenpaneele	38
Tabelle 9: Temperatursensoren zur Steuerung von MU1	43
Tabelle 10: Ablauf der Einrichtung und Messung der Mock-Ups	50
Tabelle 11: Sonnengang 17. bis 19. August 2018.....	52
Tabelle 12: Sonnengang 20. bis 22. August 2018.....	59

6.3. Literaturverzeichnis

Austrian Standards Institute (ASI): ÖNORM EN 16798-3:2017 12 15 Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden - Teil 3: Lüftung von Nichtwohngebäuden - Leistungsanforderungen an Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlsysteme (Module M5-1, M5-4)

Austrian Standards Institute (ASI): ÖNORM EN ISO 7730:2006 05 01, Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005)

Cody, B.: *Form Follows Energy*, Birkhäuser, Basel 2017

FLIR systems: *User's manual FLIR Cx series*, Wilsonville 2015

Glück, Bernd, *Abschlussbericht des F/E Themas: Innovative Wärmeübertragung und Wärmespeicherung*, Förderzeichen 032 7370, Projektträger Jülich und Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Jöbnitz (Plauen) 2008

Schuss, M., Glawischnig, St. und Mahdavi, Ard.: *A flexible and scalable approach to building monitoring and diagnostics in: eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction: Proceedings of the 11th European Conference on Product and Process Modelling (ECPPM 2016)*, Limassol, Cyprus, 7-9 September 2016

Sommer, B. und Pont, U.: *Entwicklung einer strukturierten und fehlerminimierten Datenaufbereitung und Dokumentation für Energieausweise (EDEN)*, Bericht 24/2017, Berichte aus Energie- und Umweltforschung des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien

Zürcher, Chr. und Frank, T.: *Bau & Energie: Bauphysik*, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich 2018

Internet-Quellen:

www.azw.at/de/termin/sos-brutalismus/ (abgerufen am 20.9.2018; 12:02)

www.schweizer-fn.de/stoff/wleit_isolierung/wleit_isolierung.php (abgerufen am 21.10.2018; 17:20)

http://www.schweizer-fn.de/stoff/wkapazitaet/wkapazitaet_baustoff_erde.php (abgerufen am 21.10.2018; 17:24)

www.bcm-news.de/wp-content/uploads/kochbuch-fuer-eine-bia.pdf (abgerufen am 15.1.2019; 10:11)

de.wikipedia.org/wiki/Wärmeübergangskoeffizient#Freie_Konvektion (abgerufen am 21.1.2019; 15:03)

www.sonnenverlauf.de (abgerufen am 24.2.2019; 11:14)

vimeo.com/energydesign (eigener Blog)

nachhaltigwirtschaften.at/de/sdz/ziele-inhalte/ (abgerufen am 4. März 2019; 22:50)

7. Anhang

Anhang I - Interaction-Design-Concepts



**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)