

# **Subtraction as a measure to Preserve and Insulate historic Developments by Electric Robots**

SPIDER

B. Sommer, U. Pont

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

**42/2024**

## **Impressum**

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie  
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:

Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien

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

Autoren: Bernhard Sommer, Universität für Angewandte Kunst / Abteilung Energie Design, Ulrich Pont, TU Wien, Forschungsbereich Bauphysik und Bauökologie, Institut für Architekturwissenschaften

Wien, 2024

# Subtraction as a measure to Preserve and Insulate historic Developments by Electric Robots

SPIDER

Bernhard Sommer

Universität für Angewandte Kunst / Abteilung Energie Design

Ulrich Pont

TU Wien, Forschungsbereich Bauphysik und Bauökologie, Institut für Architekturwissenschaften

unter Mitwirkung von und aufbauend auf den Arbeiten des SPIDER-Teams:

Klaus Bollinger, Jakob Braun, Malgorzata Sommer-Nawara, Irene Prieler,

Galo Patricio Moncayo-Asan

Universität für Angewandte Kunst / Abteilung Energie Design

Peter Bauer, Ardeshir Mahdavi, Matthias Schuss, Magdalena Wölzl, Lukas Zeilbauer

TU Wien, Forschungsbereich Bauphysik und Bauökologie, Institut für Architekturwissenschaften

Wien, April 2022

Ein Projektbericht gefördert im Rahmen von





## **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 aller betroffener Bereiche wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

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



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kurzfassung</b> .....	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Abstract</b> .....	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>Ausgangslage</b> .....	<b>12</b>
	3.1. Städtischer Kontext und Relevanz .....	13
	3.2. Energetischer Kontext.....	15
	3.3. Konstruktiver Kontext.....	16
	3.4. Technologie Kontext .....	16
	3.4.1. Internationaler Kontext .....	16
	3.4.2. Eigene Expertise.....	17
<b>4</b>	<b>Projekthalt</b> .....	<b>24</b>
	4.1. Statisch-konstruktives Verhalten von historischem Mauerwerk.....	24
	4.2. Verbesserungspotentiale (Energie, CO <sub>2</sub> , etc.) im Vergleich zu herkömmlichen Methoden der Sanierung.....	26
	4.3. Thermisches Verhalten von historischem Mauerwerk.....	30
	4.4. Untersuchung des subtraktiven Verfahrens zur thermischen Verbesserung von historischem Mauerwerk.....	33
	4.4.1. Untersuchung mittels 3-dimensionaler thermischer Simulation .....	33
	4.4.2. Weitere Materialkennwerte.....	34
	4.4.3. Neue Maßnahmen zur Verringerung der Wärmeverluste .....	38
	4.4.4. In-Situ Versuchsreihen: Anordnung.....	41
	4.4.5. In-Situ Versuchsreihen: U-Wert-Messung.....	43
	4.5. Entwurf autonomer Roboter zur Durchführung der Sanierungen .....	59
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>67</b>
	5.1. Bohrloch-Studie .....	67
	5.2. Gesamtenergieausweis.....	71
	5.3. Programmziele und baukulturelle Attraktivität.....	71
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerungen</b> .....	<b>73</b>
<b>7</b>	<b>Ausblick und Empfehlungen</b> .....	<b>75</b>
	7.1. Empfehlungen für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.....	75
	7.2. Potenzial für Demonstrationsvorhaben.....	75
<b>8</b>	<b>Anhänge</b> .....	<b>76</b>
	8.1. FFG873475-Anhang-III-Simulationen.pdf .....	76
	8.2. FFG873475-Anhang-I-Gruenderzeit.pdf .....	76
	8.3. FFG873475-Anhang-II-historischesMWK-Statik.pdf .....	76
<b>9</b>	<b>Verzeichnisse</b> .....	<b>77</b>





# 1 Kurzfassung

## a. Motivation und Forschungsfrage

Die ambitionierten Ziele des Klimaschutzes (vergleiche Pariser Klimaschutzziele von 2015) müssen sich in veränderten Herangehensweisen in vielen Bereichen des Lebens niederschlagen, so auch dem Bauwesen. Mittlerweile, bei Abschluss dieses Projektes wurden diese Ziele weiter nachgeschärft. Die Taxonomieverordnung der EU berücksichtigt die Klimaziele bei der Finanzierung von Bauprojekten und der Überfall Russlands macht den Ausstieg aus dem Erdgas, um das es bei diesem Projekt bereits zum Zeitpunkt des Antrags ging, dringlicher denn je.

Dabei ist es weitestgehend anerkannt, dass das Ausgestalten von Neubauten in energieeffizienter Weise nur ein Tropfen auf den heißen Stein ist, betrachtet man die niedrigen Neubauraten. Der Bestand muss also mitgedacht und mitbehandelt werden. Auch hier gab es eine bemerkenswerte Rede durch Ursula van der Leyen im Oktober 2020, die als Kommissionspräsidentin eine Europäische Renovierungswelle auslösen will. Bei der thermischen Sanierung des baukulturell bedeutsamen Gebäudebestands stößt man allerdings bald auf Grenzen in der Anwendung herkömmlicher, also addierender Prinzipien (Anbringen von Wärmedämmpaneelen auf der Außenfassade).

Vor diesem Hintergrund ist es bedeutsam, dass ca. 30% der Mauerwerkstiefe des historischen Vollziegelmauerwerks statisch nicht relevant sind.

## b. Ausgangssituation/Status Quo

Ausgehend von den dramatisch schlechten Wärmedurchgangswiderständen der Außenwände historischer Bestandsbauten bei gleichzeitig einem hohen gesellschaftlichen und baukulturellen Bedürfnis des Erhalts ornamentierter historischer Fassaden, scheint in der Subtraktion von Material der Schlüssel zu einer gewaltigen energetischen Verbesserung zu liegen, ohne dass dabei das Äußere dieser stadtbildprägenden Gebäude zerstört wird. Moderne Methoden der Analyse des Kraftverlaufs und der Schalleinwirkung einerseits, moderne und einfach verfügbare Möglichkeiten der Robotik und die mittlerweile hohe Effizienz von Photovoltaik und Batterietechnik andererseits erlauben ein Konzept zu sondieren, das eine vollautomatische, rein solar betriebene Sanierung untersucht.

## c. Projekt-Inhalte und Zielsetzungen

Ziel ist, ein Sanierungssystem für gründerzeitliche, ornamentierte Fassaden zu entwickeln das nicht nur im Ergebnis, sondern bereits der in der Bauphase hochökologisch und hochökonomisch ist. Gleichzeitig soll die prägende kulturelle Identität, die durch die reiche Ornamentierung der historischen Gebäude gegeben ist, respektiert werden.

## d. Methodische Vorgehensweise

Die Fragestellung, bzw. das Projektziel geht von der gründerzeitlichen Bausubstanz und der begründeten Vermutung einer konstruktiven Redundanz des zum Teil tragenden Mauerwerks aus. In einem ersten Schritt ist daher eine gründliche Recherche zur Bauweise, Materialität und Gebäudestruktur erforderlich. In der Folge soll untersucht werden, wie die konstruktive Redundanz des Mauerwerks genutzt werden kann, um durch Prosifizierung die Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks zu verringern. Dazu sind einerseits Studien über die technisch möglichen Bohrmuster und Bohrrichtungen erforderlich, andererseits ist eine Recherche hinsichtlich der tatsächlich vorhandenen thermischen Eigenschaften historischen Mauerwerks ein notwendiger Startpunkt.

Davon ausgehend werden eine Vielzahl möglicher Varianten thermisch simuliert und auf diese Weise Verbesserungen der thermischen Eigenschaften ermittelt. Um das Verbesserungspotential, also die mögliche Energieeinsparung durch die Maßnahmen großmaßstäblich beurteilen zu können, werden die Gebäudedaten für sämtliche Gründerzeithäuser Wiens statistisch erfasst und in einem Energiebilanzmodell abgebildet, sodass die zuvor durch Simulation ermittelten Veränderungen der Wärmeleitfähigkeit eingespielt werden können. Nach Ermittlung geeigneter Maßnahmen erfolgt in einem letzten Schritt die Entwicklung von Konzepten und Technologien zur technischen Umsetzung.

#### e. Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Im Zuge der Projektrecherche konnte eine Einschätzung des gründerzeitlichen Baubestands hinsichtlich der thermischen Performance und der Auswirkung möglicher Sanierungsmaßnahmen getroffen werden. Dabei hat sich gezeigt, dass ein klimaneutraler Betrieb dieser Gebäude hinsichtlich ihres Heizwärmebedarfs möglich ist, sobald diese Gebäude auch Energie produzieren. Im Zuge der Ideenentwicklung für mögliche Sanierungsstrategien auf Basis der Porosifizierung des Mauerwerks, wurde auch die Möglichkeit untersucht, das Mauerwerk durch Photovoltaik-betriebene Stäbe zu beheizen. Für die Sanierung kann so ein Vorgehen von Interesse sein, da es auch eine Komfort-Erhöhung und ein Austrocknen der Mauern bewirkt, auf jeden Fall auch die Wärmeverluste der Raumheizung reduziert und damit diese Gebäude erst für den Einsatz von alternativen Systemen wie Wärmepumpen bereit macht. Dabei würde bereits die winterliche Einstrahlung hinreichend Leistung bieten. Das Gros dieser Strahlungsleistung könnte hingegen dem Betrieb der Wärmepumpen angerechnet werden, womit eine klimaneutrale Bilanz möglich wird, zumal die Dächer für die Produktion von Haushaltsstrom und Beleuchtungsenergie frei blieben.

#### f. Ausblick

Wie immer erfolgreich die Europäische Sanierungswelle verlaufen wird, so bleibt die Wärmezufuhr und immer öfter auch das Kühlen ein notwendiger Faktor. Neben der Fernwärme und Biomasse, die durchaus Emissionen in Form von Feinstaub und Abgasen freisetzt und deren CO<sub>2</sub>-Neutralität allenfalls in der Bilanz liegt, bleiben die Wärmepumpen die sauberste Möglichkeit eines Heizsystems, das sich noch dazu gut mit Kühlung kombinieren lässt. So wie in der Mobilität spielt also die Elektrizität eine entscheidende Rolle. Aus dem Gründerzeit-Energieausweis-Tool, das wir im Rahmen dieser Sondierung entwickelt haben, wissen wir, dass an den Gründerzeithäusern ca. 31 km<sup>2</sup> opake Fassadenflächen brach liegen. Wenn davon ein Viertel für die Stromproduktion aktiviert werden kann, kann man bei einer durchschnittlichen Strahlung von 750 kWh/m<sup>2</sup>a jenen fünften Anteil Strom produzieren, den diese Gebäude nach Sanierung zum Betrieb von Wärmepumpen benötigen. Auf diese Weise wären sie hinsichtlich des Wärmebedarfs tatsächlich CO<sub>2</sub>-neutral.

Die mittlerweile auch durch die politische Situation (Unabhängigkeit von russischem Erdgas) erforderliche Geschwindigkeit beim Sanieren wird eine Unterstützung der bisherigen, konventionellen Bautätigkeit durch automatisierte Systeme erforderlich machen.

## 2 Abstract

### a. Motivation and research question

The ambitious goals of climate protection (compare the Paris climate protection goals of 2015) must be reflected in changed approaches in many areas of life, including construction. In the meantime, upon completion of this project, these goals have been further sharpened. The EU taxonomy regulation takes climate targets into account when financing construction projects and the invasion of Russia makes the phase-out of natural gas, which this project was about at the time of the application, more urgent than ever.

At the same time, it is widely recognized that designing new buildings in an energy efficient manner is just a drop in the ocean given the low rates of new construction. The inventory must therefore be considered and treated as well. Here, too, there was a remarkable speech by Ursula van der Leyen in October 2020, who, as Commission President, wants to trigger a wave of European renovations. However, when it comes to thermal renovation of the architecturally significant building stock, limits are soon encountered in the application of conventional, i.e. additive principles (attachment of thermal insulation panels to the outer facade).

Against this background, it is significant that approx. 30% of the masonry depth of the historic solid brick masonry is not statically relevant.

### b. Initial situation/status quo

Based on the dramatically poor heat transfer resistance of the outer walls of historical existing buildings and at the same time a high social and building culture need to preserve ornamented historical facades, the key to a huge energetic improvement seems to lie in the subtraction of material without destroying the exterior of these buildings that shape the cityscape. Modern methods of analyzing the course of force and the effects of noise on the one hand, modern and easily available possibilities of robotics and the now high efficiency of photovoltaics and battery technology on the other hand allow a concept to be explored that examines a fully automatic, purely solar-powered renovation.

### c. Project content and objectives

The aim is to develop a renovation system for ornamented 19<sup>th</sup> century façades that is not only highly ecological and highly economical as a result, but also as early as the construction phase. At the same time, the formative cultural identity, which is given by the rich ornamentation of the historical buildings, should be respected.

### d. Methodical approach

The question, or rather the project goal, is based on the 19<sup>th</sup> century building fabric and the justified assumption of a constructive redundancy of the partially load-bearing masonry. As a first step, thorough research into the construction method, materiality and building structure is therefore required. The next step is to investigate how the constructive redundancy of the masonry can be used to reduce the thermal conductivity of the masonry through porosification. This requires, on the one hand, studies of the technically possible drilling patterns and drilling directions, and, on the other hand, research into the actual thermal properties of historical masonry is a necessary starting point. On this basis, a large number of possible variants are thermally simulated and improvements

in the thermal properties are determined in this way. In order to be able to assess the potential for improvement, i.e., the possible energy savings through the measures, on a large scale, the building data for all 19<sup>th</sup> century houses in Vienna are statistically recorded and mapped into an energy balance model so that the changes in thermal conductivity previously determined by simulation can be incorporated. After identifying suitable measures, the final step is to develop concepts and technologies for technical implementation.

#### e. Results and Conclusions

In the course of the project research, an assessment of the Gründerzeit building stock in terms of thermal performance and the effects of possible renovation measures could be made. It has been shown that climate-neutral operation of these buildings in terms of their heating requirements is possible as soon as these buildings also produce energy. In the course of developing ideas for possible renovation strategies based on porosification of the masonry, the possibility of heating the masonry using photovoltaic-powered rods was also examined. Such a procedure can be of interest for the renovation, as it also increases comfort and dries out the walls, in any case also reduces the heat losses of the room heating and thus makes these buildings ready for the use of alternative systems such as heat pumps. The winter sunshine would already provide sufficient power. On the other hand, the majority of this radiation output could be offset against the operation of the heat pumps, which makes a climate-neutral balance possible, especially since the roofs remain free for the production of household electricity and lighting energy.

#### f. Outlook

No matter how successful the European refurbishment wave is, the supply of heat and, increasingly, cooling will remain a necessary factor. In addition to district heating and biomass, the latter releasing emissions in the form of dust and exhaust gases, heat pumps remain the cleanest option for a heating system. Moreover, it can also be easily combined with cooling. As in mobility, electricity thus plays a crucial role. From the Gründerzeit energy certificate tool that we developed in the course of this project we know that around 31 km<sup>2</sup> of opaque facade areas lie fallow on the Gründerzeit houses. If a quarter of this can be activated for electricity production, with an average radiation of 750 kWh/m<sup>2</sup>a, the fifth share of electricity can be produced these buildings need after renovation to operate heat pumps. In this way, they would be CO<sub>2</sub>-neutral in terms of heating requirements.

The speed of remediation now also required by the political situation (independence from Russian natural gas) will make it necessary to support the previous, conventional construction activity with automated systems.

### 3 Ausgangslage

Derzeit wächst Wien ähnlich schnell wie im letzten Drittel des 19. Jahrhunderts. Eine Zeit, die in Wien als Gründerzeit bezeichnet wird.

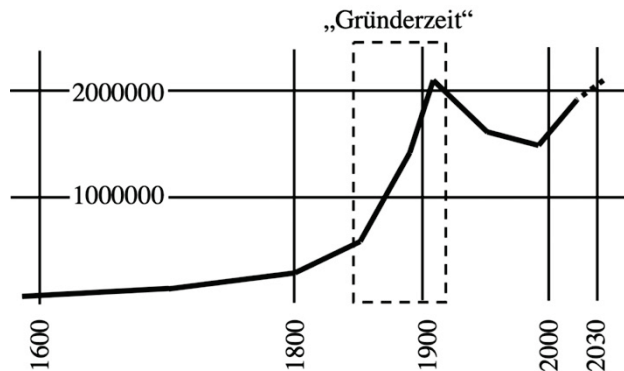


Abbildung 1: Bevölkerung Wiens, Grafik nach STATISTIK AUSTRIA und [1]

Nach dem Fall des Eisernen Vorhangs 1989 und dem Beitritt Österreichs zur Europäischen Union 1994 erlebte das Land und insbesondere Wien eine neue Blütezeit und einen deutlichen Bevölkerungszuwachs. Wien wird nicht nur bald wieder die 2.000.000-Einwohner-Grenze überschreiten, es wächst auch im gleichen Tempo wie zu Zeiten der Gründerzeit, siehe Abbildung 1. Fehlende Grünflächen für Neubauten einerseits und andererseits wird diesem Wachstum durch die Bereitstellung von vielen Wohnungen in der alten Bausubstanz des 19. Jahrhunderts teilweise durch die vertikale Expansion dieser Altbauten entgegengewirkt. Attika- und Aufstockungsgeschosse bieten attraktive neue Wohnräume mit tollen Ausblicken, Terrassen und modernstem Standard an Energieeffizienz und thermischem Komfort. Von diesen Erweiterungen profitieren in der Regel auch die darunter liegenden Wohnungen, sei es durch den Einbau von Aufzügen oder durch die Instandsetzung von Steigleitungen oder der Fassade. Einen Teil des Charmes dieser mittlerweile weitgehend unter Denkmalschutz stehenden Altstadt machen jedoch die verzierten Fassaden aus. Diese Fassaden können nicht auf herkömmliche Weise thermisch saniert werden, ohne sie zu zerstören. Herkömmlicherweise würde ein Außendämmungs- und Abschlussystem (VWS) auf eine Ziegelwand aufgebracht werden. Dies ist nur möglich, wenn die Ornamente der Fassaden entfernt werden. Die Fassade würde abgeflacht und in der Regel kein Geld für eine gleich- oder höherwertige Gestaltung ausgegeben. Ein architektonisch hochwertiger Ansatz wurde in einem Haus im 6. Bezirk gezeigt, siehe Abbildung 2 [2].



Abbildung 2: Peter Sandbichler, Fassadengestaltung, Mariahilfer Straße / Getreidemarkt, Wien 6. Bezirk, 2017, Foto Copyright: Günter Richard Wett, online veröffentlicht [2]

### **3.1. Städtischer Kontext und Relevanz**

Die Stadt Wien schätzt die Zahl der Wohnungen aus der Gründerzeit auf 351.000, bewohnt von durchschnittlich zwei Personen [1]. Diese Wohnungen weisen typischerweise einen Heizwärmebedarf von  $150 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  [3] auf und verursachen  $\text{CO}_2$ -Emissionen von etwa  $247 \text{ g/kWh}$ , resultierend aus ihrem Energiebedarf [4]. Bei einer typischen Wohnungsgröße von rund  $100 \text{ m}^2$  Bruttogeschossfläche ergibt sich daraus ein jährlicher Heizenergiegesamtbedarf von  $5,27 \text{ TWh}$  und eine  $\text{CO}_2$ -Emission von insgesamt  $1,3 \text{ Mt}$ .



Abbildung 3: überwiegend gründerzeitliche Wohngebiete, MA 18; Referat Stadtforschung und Raumanalyse (Zahlen: Stand 1.1.2017) farbige oder dunkle Bereiche [1]

Der Heizwärmebedarf dieser Gebäude wurde historisch durch Kohle und Holz gedeckt und wird mittlerweile im Wesentlichen durch Erdgas gedeckt. Laut OIB, dem Österreichischen Institut für Bautechnik, beträgt der gesamte Erdgasbedarf für Heizung und Warmwasser 16,5 TWh pro Jahr. Ab dieser ca. 13,7 TWh werden zum Heizen verwendet, der Rest ist für Warmwasser [5]. Die Wiener Gründerzeitwohnungen verbrauchen damit 38 % des gasgedeckten Wohnwärmebedarfs Österreichs. Angesichts der jüngsten Bemühungen zur Verbesserung und Renovierung von Gebäuden in ganz Österreich wird dieser Prozentsatz steigen, wenn keine Maßnahmen ergriffen werden. Am effektivsten wäre natürlich eine Reduktion des Heizwärmebedarfs auf zeitgemäße Standards und alternative Energiequellen kämen in Reichweite, um einen Bedarf von geschätzt 4 TWh/a zu decken. Angesichts des erheblichen Anteils des Heizenergiebedarfs im nationalen Kontext und im Bewusstsein der Schwierigkeiten und der langfristigen Perspektive, die Energieversorgung dieser Gebäude weg von fossilen Brennstoffen zu bringen, sollte jedoch jede wirtschaftlich umsetzbare Verbesserung untersucht werden ohne größere organisatorische Schwierigkeiten. Bei Maßnahmen im Inneren der Wohnungen und bei kostenintensiven Maßnahmen treten organisatorische Schwierigkeiten auf, da viele dieser Gebäude im Miteigentum verschiedener, oft privater Eigentümer stehen.

## 3.2. Energetischer Kontext

Die Bauten der Gründerzeit finden sich meist im städtebaulichen Kontext der Blockrandgestaltung wieder. Die charakteristischste Blocktypologie weist laut Stadt Wien eine Straßenbreite von ca. 15 m und einer Blockgröße von 90 x 90 m mit 4 bis 5 Stockwerken [1].

Der Heizwärmebedarf sinkt mit dem Wärmedurchgangskoeffizienten der umschließenden Flächen einer klimatisierten Zone. Diese Beziehung ist in einem direkten linearen Verhältnis.

Durch die Blocktypologie werden die Wärmeverluste überwiegend durch die Fassaden zur Straße und zum Hof bestimmt. Die Fassaden zu den Nachbarn sind in der Regel als adiabatisch anzunehmen. Die oberste Decke und die Kellerdecke haben weniger Einfluss, einerseits aufgrund der Geometrie dieser Gebäude, andererseits stehen sie entweder einem unbeheizten Dachboden oder einem unbeheizten Keller gegenüber. Nach ÖNORM B 8110-6 ist der Wärmeverlust zu einem unbeheizten Dachgeschoss um 10 % und zu einem unbeheizten Keller um 30 % geringer als nach außen anzusetzen.

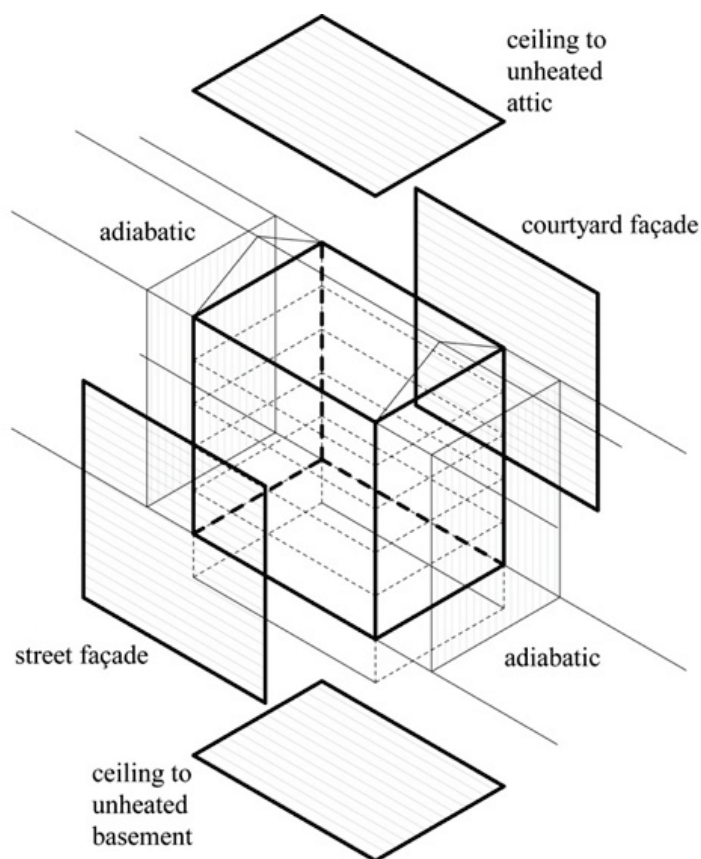


Abbildung 4: Wärmeverlust eines Blockrandgebäudes

Für eine überschlägige Abschätzung bedeutet das für ein (typisches) Gebäude, 17 m lang, 12 m breit, 17,5 m hoch:



Tabelle 1: Einfluss der verschiedenen Gebäudehüllenelemente

Element	Area x temperature correction factor	Percentage
Street Façade	297,5 x 1,0 297,5	32,3
Courtyard Façade	297,5 x 1,0 297,5	32,3
Topmost ceiling	204,0 x 0,9 183,6	20,0
Basement ceiling	204,0 x 0,7 142,8	15,4
Total corrected heat loss area	921,4	100,0

Die beiden Fassaden sind für fast zwei Drittel des gesamten Wärmeverlusts verantwortlich. Diese Betrachtung ist stark schematisiert. An den Ecken eines solchen Blocks ist die Straßenfassade deutlich größer als die zum Innenhof. Während die Hoffassade problemlos durch ein klassisches WDVS-System verbessert werden kann, verlangen die stark und skulptural verzierten Straßenfassaden nach alternativen Lösungen.

### 3.3. Konstruktiver Kontext

Im Wien des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts wurde Mauerwerk meist mit 29 x 14 x 6,5 cm großen Ziegeln errichtet. Ein Kubikmeter Wand bestand in der Regel aus 300 Stück [6].

Mindestens 15 cm eines solchen Mauerwerks mit einer durchschnittlichen Dicke von 45 cm sind überflüssig und können somit zur Verbesserung der Wärmedämmung des Gebäudes verwendet werden. Frühere Berechnungen der Autoren haben ergeben, dass teilweise sogar 50 % des Mauerwerks zur Verfügung stehen würden. Die Statik wurde an einem beispielhaften Gebäude untersucht.

Die Redundanz des Mauerwerks soll nun für die Verbesserung seiner thermischen Leistungsfähigkeit herangezogen werden. Dabei sollen verschiedene Arten der skulpturalen Bearbeitung durch Bohrer auf ihre Wirksamkeit untersucht werden. Die Bearbeitung soll durch hoch-automatisierte, autonome Prozesse möglich sein.

### 3.4. Technologie Kontext

#### 3.4.1. Internationaler Kontext

Sich autonom bewegende und autonom agierende Roboter bekommen eine immer alltäglichere Rolle. Dies zeigt sich an den Erfolgen autonomer Fahrzeuge am deutlichsten:

[Mercedes, Audi, Google, Tesla]<sup>i</sup>

Im Baugeschehen selbst spielen Roboter und autonome Technologien nur eine untergeordnete Rolle. Zum Beispiel ist der Einsatz von Drohnen mittlerweile eine verbreitete Technologie im Vermessungswesen. [[Vermessung Meixner](#)]<sup>ii</sup> [[Vermessung Angst](#)]<sup>iii</sup>

Am ehesten kann das „erste 3D gedruckte Haus“ als Einsatz von hoch-automatisierter Technologie zur Produktion von Gebäuden gesehen werden. [[3D Druck Haus](#)]<sup>iv</sup>

Im Gegensatz zur Baupraxis gibt es im akademischen Bereich eine unüberschaubare Fülle an Experimenten und Konzepten zum Einsatz von Robotern. Zu den spannendsten gehören die Arbeiten von Gramazio Köhler an der ETH Zürich. [[Gramazio Köhler](#)]<sup>v</sup>

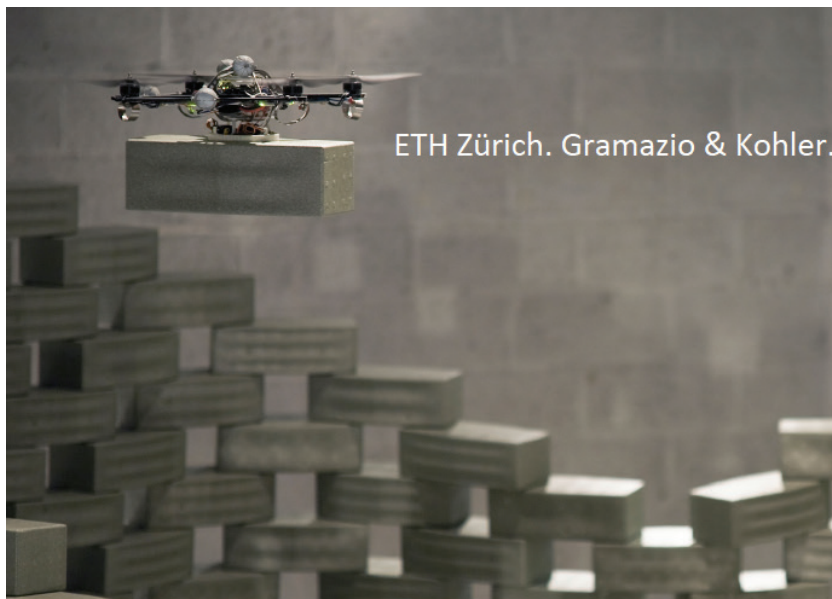


Abbildung 5: Gramazio & Köhler, Flight Assembled Architecture 2011

### 3.4.2. Eigene Expertise

Am Institut für Architektur und im Projektteam findet sich Erfahrung im Einsatz von Robotern am Bauwesen über folgende Projekte: [[robotic woodcraft](#)]<sup>vi</sup>, [[robotic infiltrations](#)]<sup>vii</sup>



Abbildung 6: University of Applied Arts vienna, University of Innsbruck, workshop, published on [suckerpunch](#)

[[bauminator](#)]<sup>viii</sup>

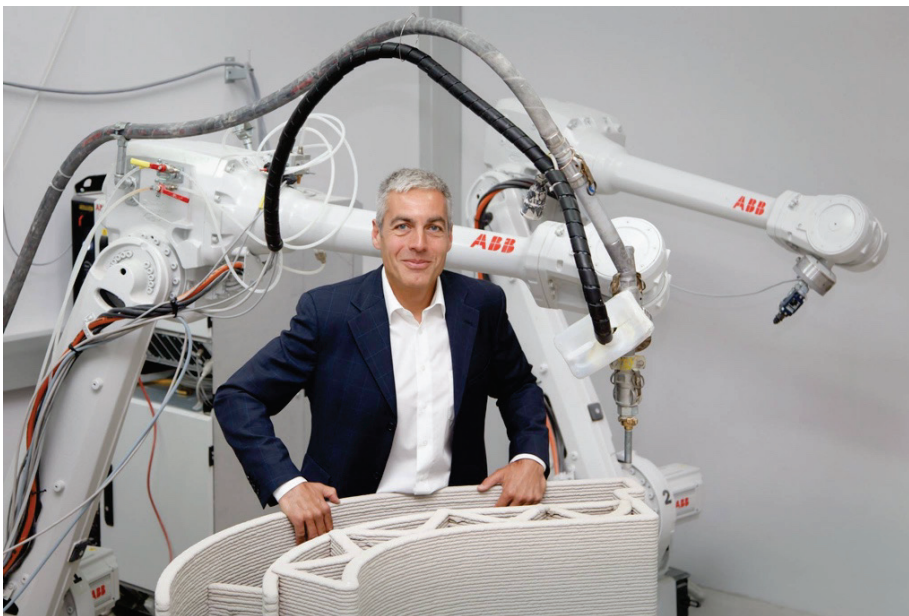


Abbildung 7: 3D-Druck von Beton, [Fa. Baumit](#)

[[the permanentl temporary](#)]<sup>ix</sup>



Abbildung 8: Viktoria Sandor, Studie zu bauphysikalischen Verbesserungen im städtebaulichen Maßstab unter Anwendung von Drohnen.

In einer Zusammenarbeit der Ziviltechnikerbüros von Univ.-Prof. Dipl.-Ing. **Peter Bauer**, P1\_IAW und Arch. Dipl.-Ing. **Bernhard Sommer**, A\_ED wurden zwei Projekte mit automatisierten Produktionsmethoden umgesetzt.

Beim Projekt *Dachkonstruktion Leopoldsdorf* wurde ein Workflow zur statischen und konstruktiven Optimierung verwirklicht, die eine neue Form des Konstruierens und Bauens mit sich brachte. So wurde nicht nach Plänen sondern, nach in die automatisiert hergestellten Bauelemente eingefrästen, bzw. eingebrannten Codes gebaut. Die Produktion der Bauelemente selbst wurde im Wesentlichen durch CNC gesteuerte Fräsen und Laser über zweidimensionale Daten erreicht.



Abbildung 9: Dachkonstruktion File-to-Factory-to-site

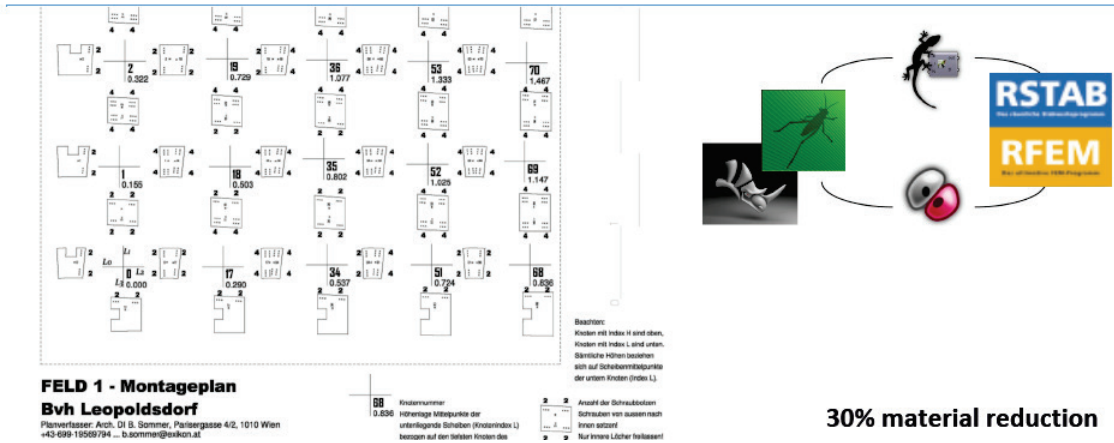
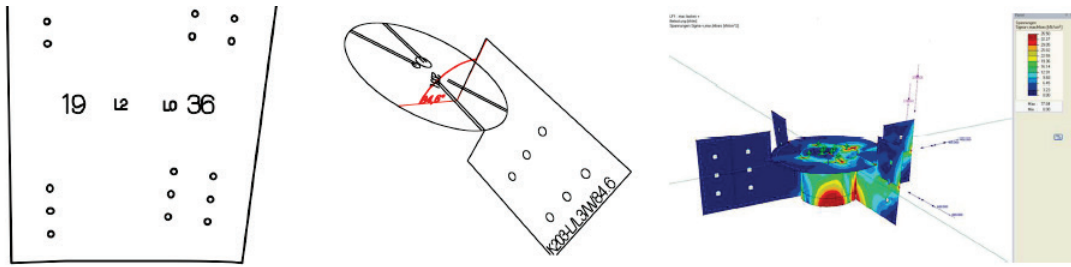


Abbildung 10: Montageplan und automatisierte Planung inkl. Optimierungsschritten<sup>x</sup>

Beim Projekt Betriebsanlage *Sternzeichen Wien Mitte* wurden für eine Deckenkonstruktion auch dreidimensionale Befehle automatisiert über STEP-Files an Produktionsmaschinen weitergegeben.



Abbildung 11: File-to-Machine-to-site > automatisiert produzierte Deckengestaltung<sup>xi</sup>

Mit der Abteilung ITI des Projektpartners P1\_IAW, insbesondere mit **Univ. Prof. Dipl.-Ing. Peter Bauer**, steht den Antragstellern eine nahezu einzigartige Expertise im Bereich des konstruktiven Verhaltens historischer Gebäude zur Verfügung:

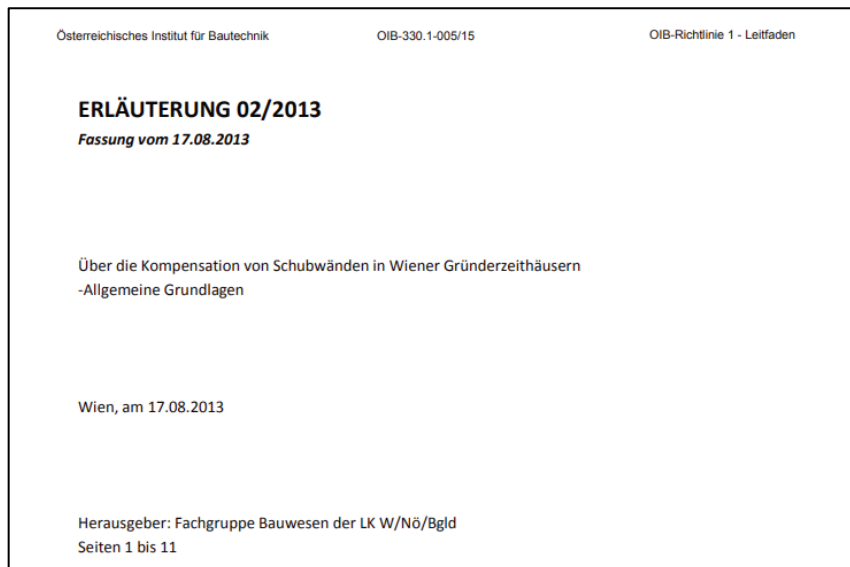


Abbildung 12: Erläuterung 02/2013 zur OIB Richtlinie 1 wurde maßgeblich von Peter Bauer verfasst

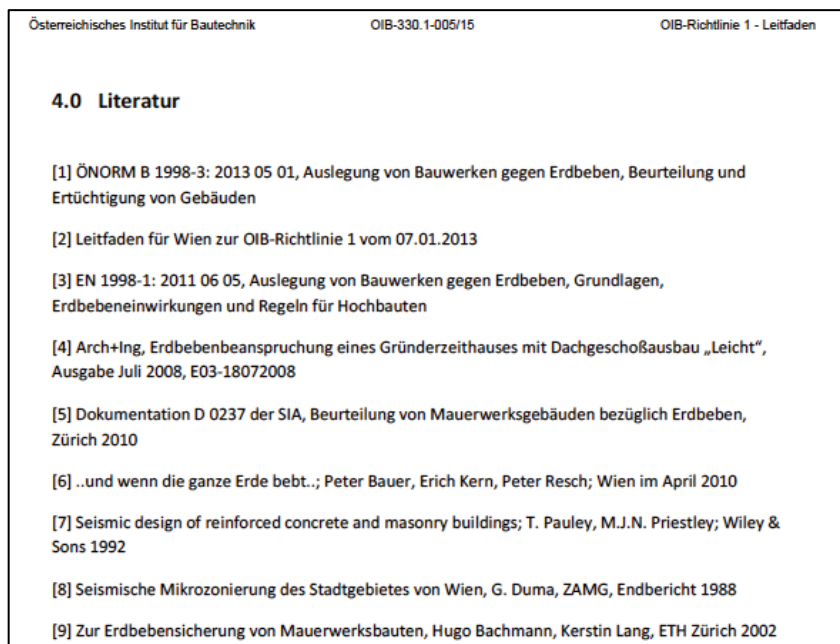


Abbildung 13: in der o.a. Literaturliste zur OIB Richtlinie 1 war Peter Bauer maßgeblicher Autor der Quellen [4] und [6]

Mit der Abteilung BPI des Projektpartners P1\_IAW führte die Antragstellerin A\_ED ein von der FFG gefördertes Projekt zur Untersuchung von Fehlerquellen bei der Erstellung von Energieausweisen. Im Zuge dessen wurde eine große Anzahl bestehender Gebäude und deren Energieperformance untersucht.

[FFG Projekts 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]

Eine tabellarische Zusammenfassung der bereits vorliegenden Ergebnisse und Deliverables aus öffentlich geförderten Projekten, auf die das beantragte Projekt aufbaut, bzw. die in dieses einfließen, findet sich in Tabelle 2.

Tabelle 2: vorliegende Ergebnisse

Förderstelle	Projektnummer	Titel	Beschreibung der bereits vorliegenden Ergebnisse und relevanten Deliverables (überprüfbare Ergebnisse / Produkte der F&E-Arbeiten) in Hinblick auf die Grundlagen für / Abgrenzung zum gegenständlichen Projekt	Ort und Art der Dokumentation (z.B. Link zur Homepage, Publikation, Tagungsband, Zwischenbericht, Endbericht, ...)
FFG	854709	EVA	Nachrüsten bestehender Gebäude für ein verbessertes klimatisches Verhalten  Steuerungstechnik, Automatisierung, Sensortechnik	<a href="https://vimeo.com/energydesign">vimeo.com/energydesign</a>
FFG	850101	EDEN	parametrische Analyse, Überblick über das thermische Verhalten historischer Gebäude	<a href="https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/berichte/endbericht_2017-24_eden.pdf">https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/berichte/endbericht_2017-24_eden.pdf</a>
		VIOLAS	<a href="https://www.tuwien.ac.at/fileadmin/t/transfer/Dokumente/Firmenservice_fuer_Untern/Veranstaltungen-alte_Files/mahdavi.pdf">https://www.tuwien.ac.at/fileadmin/t/transfer/Dokumente/Firmenservice_fuer_Untern/Veranstaltungen-alte_Files/mahdavi.pdf</a>	
FWF	AJS – 316	Sentient Building Technologies	Monitoring /Sensortechnik	

FWF	P – 15998	Sensor-driven models for improved building services	Ausrüsten von Gebäuden für ein verbessertes klimatisches Verhalten  Steuerungstechnik, Automatisierung, Sensortechnik	A. Mahdavi: "Elements of sentient buildings";  in: "Design Computing and Congition '04", J. Gero (Hrg.); Kluwer Academic Publishers, Dordrecht-Boston-Lonon, 2004, ISBN: 1-4020-2392-8, S. 593 - 612.
FWF	I – 545	Ubiquitous Dynamic Building Performance Monitoring	Monitoring /Sensortechnik	
FWF	L – 219	Self-updating models for sentient buildings	Sensortechnik, Programmierung	



# 4 Projektinhalt

Die Methodik blieb im Wesentlichen unverändert, allerdings haben sich die Schwerpunkte verlagert. Schwierigkeiten gab es einen kompletten voll funktionsfähigen Roboter herzustellen. Im Zuge der Durcharbeitung ergab sich auch die Einschätzung, dass es günstiger und sicherer wäre, mit an Gerüsten montierten oder zumindest mit seilgeführten Roboter-Elementen zu arbeiten. Das für den Roboter erforderliche Entwurfswerkzeug selbst, wurde umso mehr in der Tiefe entwickelt, so dass ein vollständig parametrisiertes Planungstool für weitere Entwicklungen zur Verfügung steht. Der methodische Ablauf ist in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: methodischer Ablauf

1.	Genauere Untersuchung der historischen Mauerwerksstruktur und ihrer Funktionen
2.	Ermittlung des Gesamt-Verbesserungspotentials (Energie, CO <sub>2</sub> , etc.) im Vergleich zu herkömmlichen Methoden der Sanierung
3.	Literaturrecherche und Experteninterviews
4.	thermische und statische Simulation basierend auf 1., 2. und 3.
5.	Ermittlung von Strategien der Bewegungen von Fassadenrobotern anhand von 4.
6.	Testbohrungen und Testläufe
7.	Auswertung und Analyse

## 4.1. Statisch-konstruktives Verhalten von historischem Mauerwerk

Im Kontext dieses Forschungsvorhabens wird als Gründerzeit der Zeitraum zwischen 1840 und 1918 betrachtet. In diesem Arbeitspaket wurde eine Übersicht über relevante Aspekte erarbeitet, was unter „gründerzeitliche“ Bausubstanz verstanden werden kann und unter welchen Randbedingungen (u.a. einer sozialen Differenzierung) hier eine Epoche seine gebaute Gestalt fand. Der Schwerpunkt liegt - naturgemäß - bei der Behandlung von Wohnhäusern, da diese einerseits die Masse des Stadtkörpers ausmachen, andererseits ist es gerade die Wohnnutzung, die aus wirtschaftlichen Gründen einen besonderen Schutz genießt (Bestandsschutz) und die auf Grund der Kleinteiligkeit der Rechtsverhältnisse nur schwer in radikalen, großflächigen Sanierungsprogrammen erfasst werden kann. Darüber hinaus sind es vor allem Menschen in ihren Wohnbehauungen die von thermischer Sanierung profitieren (höherer Komfort, niedrigere Energiekosten, etc.)

Quellen und Recherche für die Zeitleiste ist im Anhang 8.2 dargestellt.

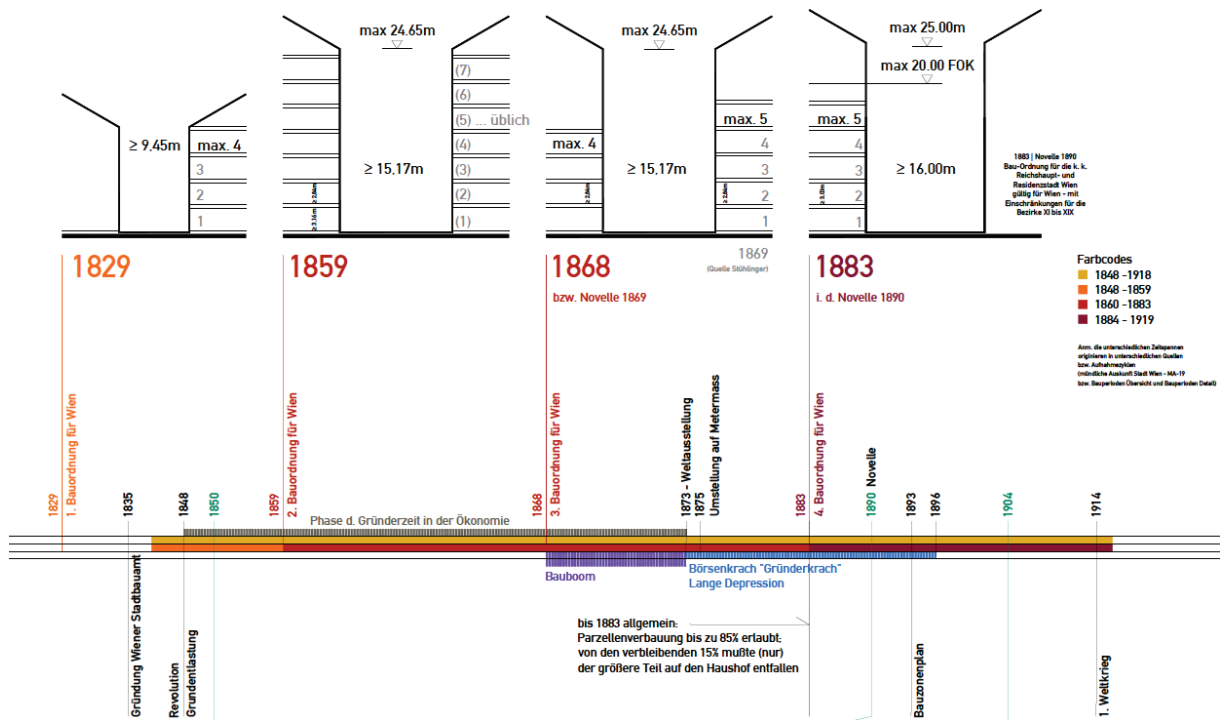


Abbildung 14: Zeitleiste typischer Geschoß- und Gebäudehöhen in Zusammenhang mit der baurechtlichen Entwicklung

Die statisch-konstruktiven und auch weitere Untersuchungen erfolgten anhand eines Referenzgebäudes: Eckhaus Fichtegasse/Kantgasse, Wien, siehe Abbildung 15.

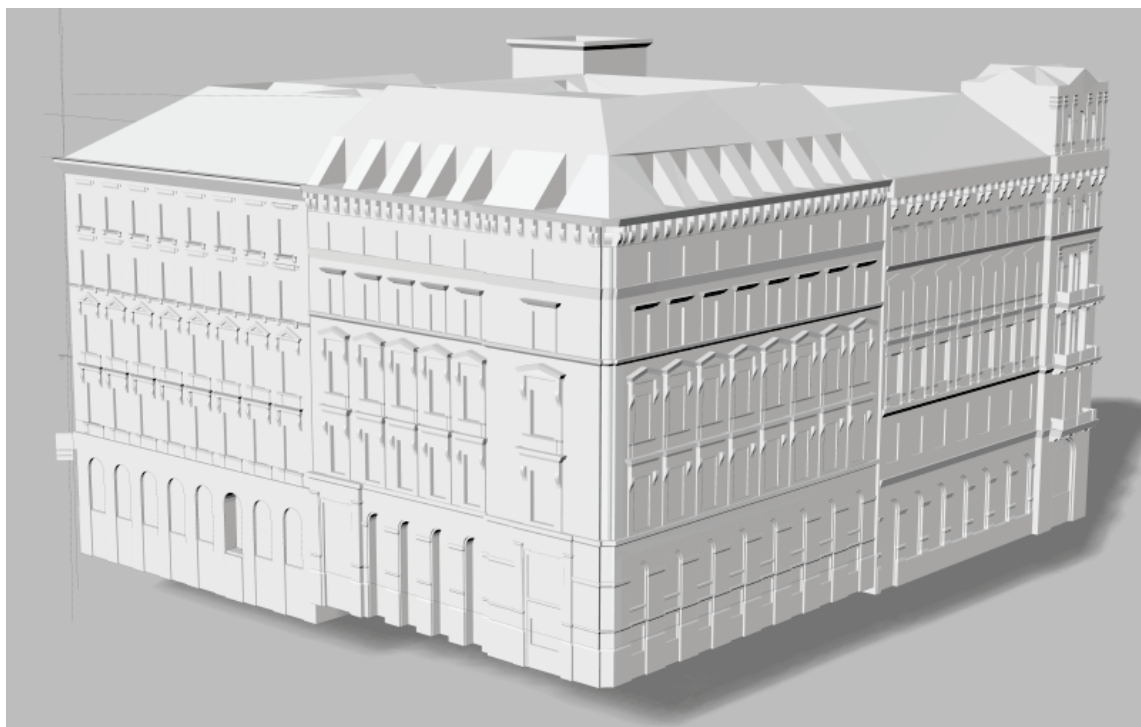


Abbildung 15: Gründerzeitgebäude Datenmodell der Fassade, 1010 Wien, Fichtegasse/Kantgasse

Um die statische Auslastung von Wänden (Außenwänden zur Straße und zum Hof) richtig einzuschätzen - insbesondere in welche Tiefe und wie häufig gebohrt werden kann - wurde die historisch zulässige Bauweise anhand einer ausführlichen Literaturrecherche detailliert untersucht.

Mit dem Haus Fichtegasse/Kantgasse im ersten Wiener Gemeindebezirk, konnten präzise Daten zur Fassadenstruktur gefunden werden. Anhand dieses Gebäudes wurden konstruktive Untersuchungen vorgenommen. Die entsprechenden Ausführungen zur statischen Reserve und den entsprechenden Implikationen hinsichtlich unterschiedlicher statischer (und dynamischer) Lastfälle sind in der eigenen dazu verfassten Aufstellung zu sehen, diese sind im Anhang 8.3 dargestellt.

## **4.2. Verbesserungspotentiale (Energie, CO<sub>2</sub>, etc.) im Vergleich zu herkömmlichen Methoden der Sanierung**

Um die konstruktiven Möglichkeiten gut einzuschätzen, vor allem aber, um aus den open government Datensätzen zur Kubatur der Gebäude auf eine Bruttogrundfläche schließen zu können, war die Entwicklung der Raumhöhen, bzw. der Anzahl der Geschoße von Interesse. Anhand der Ergebnisse der Recherche in Anhang 8.2 und des Zeitstrahls zeigen sich die typischen Geschoss- und Gebäudehöhen in Zusammenhang mit der baulichen Entwicklung.

Darauf aufbauend wurde zunächst ein generisches Simulationsmodell entwickelt, wie auch in einem weiteren Schritt ein konkretes Simulationsmodell eines spezifischen Gebäudes, nämlich für das bereits gewählte Referenzgebäude (Fichtegasse/Kantgasse). Nachstehende Abbildung 16 und Abbildung 17 zeigen zwei für die Bewertung der statischen Performance der Bauwerke erforderliche Literaturentnahmen. Abbildung 16 zeigt den üblichen Aufbau von Fensternischen in gründerzeitlichen Wänden mit entsprechender Sturzkonstruktion und Mauerwerksdicken.

Abbildung 17 zeigt die in den damaligen Bauordnungen vorgegeben (überdimensionierten) Wandstärken von Gründerzeitbauwerken abhängig vom jeweiligen Geschoss. Nach den ins Projekt eingebrachten Expertisen sind bis zu 15 cm „statische Reserve“ für andere Zwecke verwendbar.

Über den Open Government Katalog „Baublöcke Wien“<sup>xii</sup> der Stadt Wien wurde mittels *spatial join* aus der Flächenmehrzweckkarte (FMZK) jedem Baublock Grundrissgeometrie, Gebäudehöhe und Bauperiode zugeordnet. Durch die Bauperiode wurde eine typische Geschoßhöhe und damit in der Folge die Bruttogrundfläche pro Gebäude ermittelt. Sodann wurden über einen speziellen Algorithmus adiabate Flächen gesucht und abgezogen, dabei handelt es sich um Hüllflächen, die durch ihren unmittelbaren Kontakt zu Nachbargebäuden weder für eine Sanierung zugänglich sind noch üblicherweise einen großen Beitrag an den Wärmeverlusten der Gebäudehülle haben („Warm zu Warm“). Der Fensteranteil der Straßen und Hoffassaden folgte den Erkenntnissen der Strukturuntersuchungen in Anhang 8.3.

Mithilfe dieses selbstgenerierten Werkzeugs konnten die Datensätze in eine Tabellenkalkulationssoftware exportiert werden und eine grobe Abschätzung der thermischen Performance des Altbestands durchgeführt werden. Bezüglich der U-Werte der Bauteile wurde von den Default-Werten des Leitfadens zur OIB Richtlinie 6 :2019 ausgegangen. Die Berechnung erfolgte gem. ÖNORM B 8110-6-1:2019.

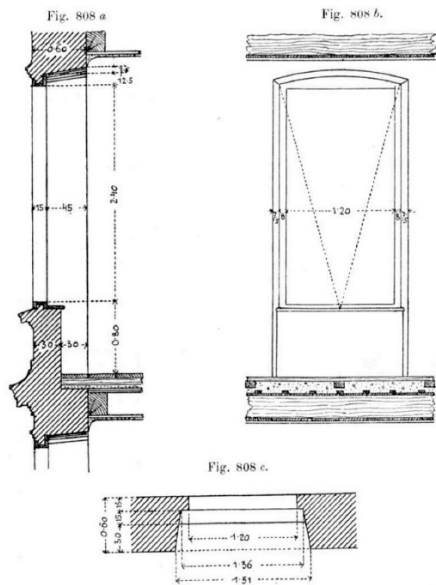


Abbildung 16: Rechteckige Fensteröffnung (Friedel, 1900; Fig. 808)

BERLIN		WIEN	
ZIEGELMASSE (± NF)			
25/12/6.5 cm (REICHIFORMAT)		29/14/6.5 cm (NORMALFORMAT)	
DAMIT MAUERSTÄRKEN (UNVERPUTZT)			
STEINE	cm		cm
1/2	12.5		15
1	25		30
1 1/2	38		45
2	51		60
2 1/2	64		75
3	77		90
3 1/2	90		105

WANDSTÄRKEN F. WOHNBAUTEN F. - 4STÖCKIGE GEBÄUDE (* BO. F. BERLIN 1897 *)															
TRAMDECKEN TRAKTTIEFE ≤ 6.5 m															
STUFEN															
IV. St.	38	38	25	25	38	25	25	45	45	45	30	45	30	60	45
III. St.	38	38	25	25	38	25	25	45	45	45	30	45	30	60	45
II. St.	51	38	25	38	38	25	25	45	45	45	30	45	30	60	60
I. St.	51	38	38	38	51	25	38	45	45	45	30	45	30	60	60
EG.	64	51	38	51	51	38	38	45	45	45	30	45	45	75	75
KG.	77	51	51	51	64	38	51	60	60	60	45	60	60	90	90

ANDERE DECKENSYSTEME TRAKTTIEFE ≤ 6.5 m			
HAUPTMAUERN			
1)	2)	3)	
		a)	b)
IV	45	45	45
III	60	45	45
II	75	45	45
I	90	45	45
EG	105	45	60
KG	120	45	75

1) GESCHOSS  
2) DIPPELBAUMDECKEN  
3) TRAVERSEDECKEN  
a) HÖHE DES ERDGESCHOSSES ≤ 5 m  
b) HÖHE DES ERDGESCHOSSES > 5 m

Abbildung 17: Gegenüberstellung Wiener und Berliner Bauordnung 1890 (Kolbitsch, 1989; Abb. 1.5)

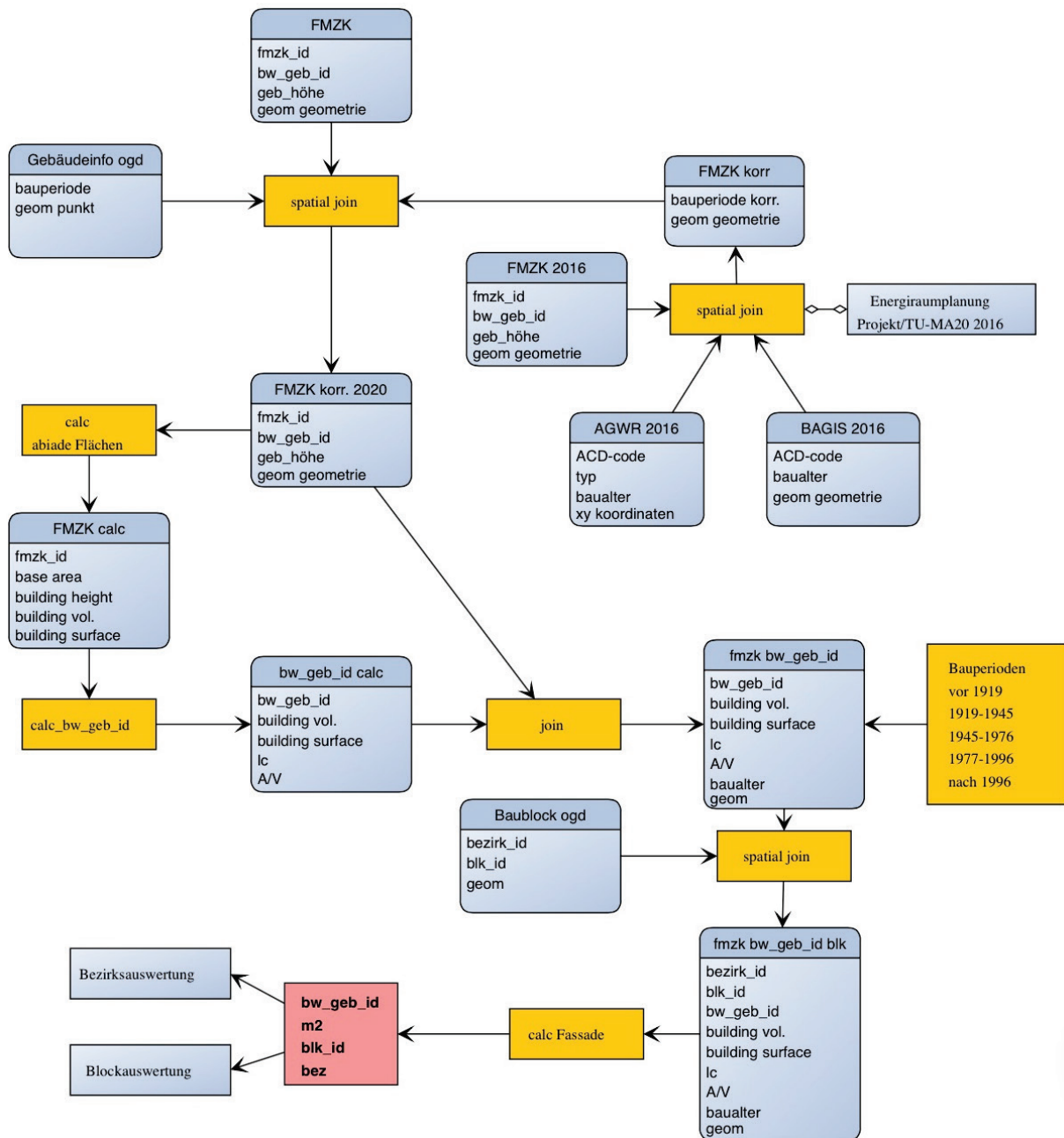


Abbildung 18: Flussdiagramm zur Auswertung der Open Government Daten

Abbildung 18 zeigt den „Workflow“ der zur Berechnung anhand der Open Government-Daten verwendet wurde. Abbildung 19 einen Auszug aus den solcherart berechneten Energiekennzahlen pro Gebäude mittels Tabellenkalkulation. Abbildung 20 zeigt exemplarische, aggregierte Energiekennzahlen unter der Annahme bestimmter Bauteilqualitäten des Bestandes. Abbildung 21 zeigt, mit welchen Sanierungsmaßnahmen Verbrauch und Emissionen halbiert werden können.



### 4.3. Thermisches Verhalten von historischem Mauerwerk

Um Wirksamkeit und Möglichkeiten der Verringerung des Wärmedurchgangs (vereinfacht eindimensional ausgedrückt als der nach EN6946 berechnete U-Wert) von Mauerwerk durch Bohrungen zu untersuchen, war es zuerst notwendig eine plausible Ausgangsbasis für die Wärmeleitfähigkeit von Mauerwerk zu erarbeiten. Dazu wurde einschlägige Literatur herangezogen, auf Basis der recherchierten Daten wurde der Mauerwerksverband aufgebaut und mittels *Antherm*<sup>xiii</sup>, einer Software zur dreidimensionalen Simulation von Wärmebrücken, die entsprechenden Leitwerte (vergleiche einschlägige Normen wie die EN ISO 10211) ermittelt. Abbildung 22 zeigt den Zugang mittels der Wärmebrückensimulationssoftware. Die in der Gründerzeit eingesetzten Materialien erlauben allerdings keine gesicherten Annahmen über die exakte Höhe der Wärmeleitzahl  $\lambda$ , da durch unterschiedliche Dichte, aber auch durch unterschiedliche Brenndauer und Brenntemperatur unterschiedliche thermische Eigenschaften entstanden sind.

Abbildung 23 zeigt die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Mauerwerk anhand der vorhandenen Trockendichten des Materials.

Mit dem 1858 erstmals patentierten und bei der Pariser Weltausstellung 1867 prämierten Hoffmannschen Ringofen wurde die Temperatur gleichmäßiger, da diese Erfindung einen kontinuierlichen Brand erlaubte, siehe Abbildung 24. Erstmals konnte eine gleichbleibende Qualität der Ziegel gewährleistet werden. Ein Ringofen besteht aus mehreren ringförmig angeordneten Kammern. Das Hauptfeuer wandert von Kammer zu Kammer. Die Abgase wärmen die ungebrannten Ziegel vor, während die Zuluft über die bereits gebrannten Ziegel strömt und diese langsam und gleichmäßig abkühlt. Das Hauptfeuer wandert ungefähr um eine Kammer pro Tag, ein bis zwei Wochen braucht es, um den Ringofen einmal zu durchwandern.<sup>xiv</sup>

Dadurch konnte zwar pro Ziegelwerk eine gleichbleibende Qualität geliefert werden – solange derselbe Rohstoff verwendet wurde, aber es gab noch keine nationalen, schon gar keine internationalen Normen, die einheitliche physikalische Werte sichergestellt hätten.

Die Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit von Ziegelmauerwerk sind seit Bestehen der DIN 4108 normativ geregelt.<sup>xv</sup> Die DIN 4108 wurde im Juli 1952 erstmals veröffentlicht.

Die Wirkung der Bohrungen wurde daher im Zusammenhang mit unterschiedlichen Wärmeleitzahlen in einer Serie von Simulationen untersucht. Abbildung 25 zeigt die Ergebnisse der Leitwertberechnung für verschiedene Ziegel-Wärmeleitzahlen, die durch Einbringung von Bohrkavernen deutlich reduziert werden konnten. Zu beachten ist, dass hier zwischen der Wärmeleitzahl des Ziegels und des Mörtels einerseits und der Wärmeleitzahl für das Gesamt-Mauerwerk andererseits zu unterscheiden war.

In Österreich hatte das alte Ziegelnormalformat eine Länge von 29 cm, eine Breite von 14 cm und eine Dicke von 7 cm. Die Lagerfugen betragen in der Regel 12 mm und die Quer- und Langfugen 10 mm. Die Mauerstärken aus alten österreichischen Normalformatziegeln ergaben sich somit zu 14, 29, 44, 59 cm etc. In der Praxis wurden auf 5 cm gerundete Werte für die Wandstärkenbezeichnung herangezogen.<sup>xvi</sup>

Während für Putz und Mörtel der Wert der ÖNORM B 8110-7 für Kalkmörtel von 0,78 W/mK herangezogen wurde, wurde für weitere Studien für den Ziegel (den Scherben) selbst eine

Wärmeleitfähigkeit von 0,55 W/mK herangezogen. In der ÖNORM B 3200 entspricht das einem Gewicht von 1.950 kg/m<sup>3</sup> und einem U-Wert von ca. 1,0 W/m<sup>2</sup>K für Mauerwerk von 50cm Stärke (3cm Putz innen, 2cm Putz außen). Grundsätzlich finden sich wie oben erwähnt keine verlässlichen Aussagen über die Wärmeleitfähigkeit des Scherbens und auch das Raumgewicht historischer Backsteine lässt sich nicht ohne weiteres ermitteln. Es würde also von einem Mittelwert des Gewichts zwischen modernem Vollziegel und Klinker ausgegangen. Für den Mörtel wurde wieder Kalkmörtel lt. ÖNORM B 8110-7 angenommen. Die ÖNORM B 8110-7 gibt Werte für Mauerwerk inkl. Mörtelfugen, aber ohne Verputz an. Bei den Angaben ist von einem modernen Verband auszugehen. Ein moderner Mauerziegel hat eine Steinlänge von 25 cm, eine Steinbreite von 12 cm und eine Steinhöhe von 6,5 cm. Die Fugen werden mit ca. 1cm angegeben. Die Überlegungen finden sich in Tabelle 4.

Tabelle 4: Mögliches Raumgewicht historischer Ziegelsteine

	B	C	D	E		Quelle
2	Abmessung	Ziegel	Fuge	Gesamt		
3	h	0,065000	0,012000	0,077000	m	Pech 2015
4	b	0,120000	0,010000	0,130000	m	Pech 2015
5	l	0,250000	0,010000	0,260000	m	Pech 2015
6	Vol.	0,001950	0,000653	0,002603	m <sup>3</sup>	
	Raumgw.			1.850	kg/m <sup>3</sup>	Mittelwert Klinker/Mauerziegel
	Raumgw.		1.600		kg/m <sup>3</sup>	"Kalkmauermörtel"
	Raumgw.	1.934			kg/m <sup>3</sup>	=(E7*E6-D8*D6)/C6
				2.100	kg/m <sup>3</sup>	"Klinker voll + Normalmörtel"
				1.600	kg/m <sup>3</sup>	"Mauerziegel voll + Normalmörtel"

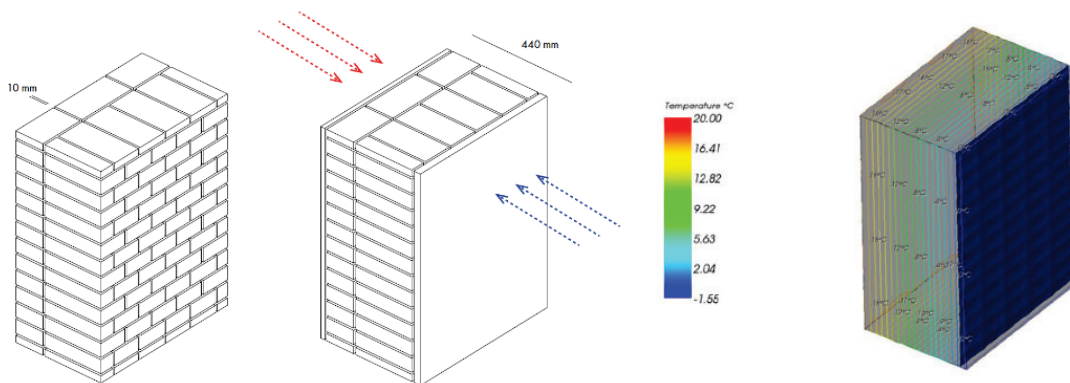


Abbildung 22: Simulation 11, detaillierter Aufbau einer Ziegelwand mit Lagerfugen



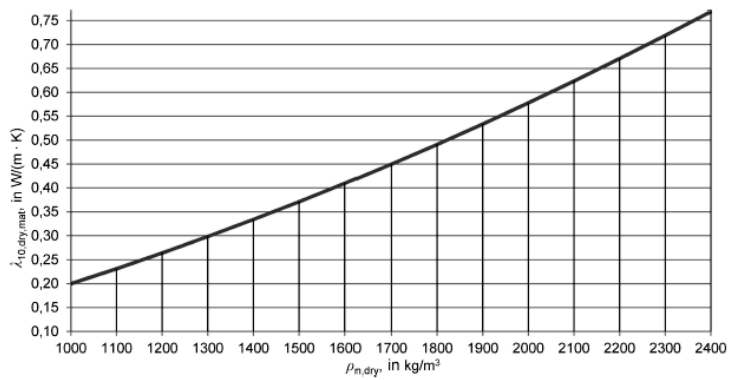


Abbildung 23: Bild 1 der ÖNORM B 3200:2016, Datenreihe der Tab. A.1 der ÖNORM EN 1745, Wärmeleitfähigkeit von Mauerziegeln

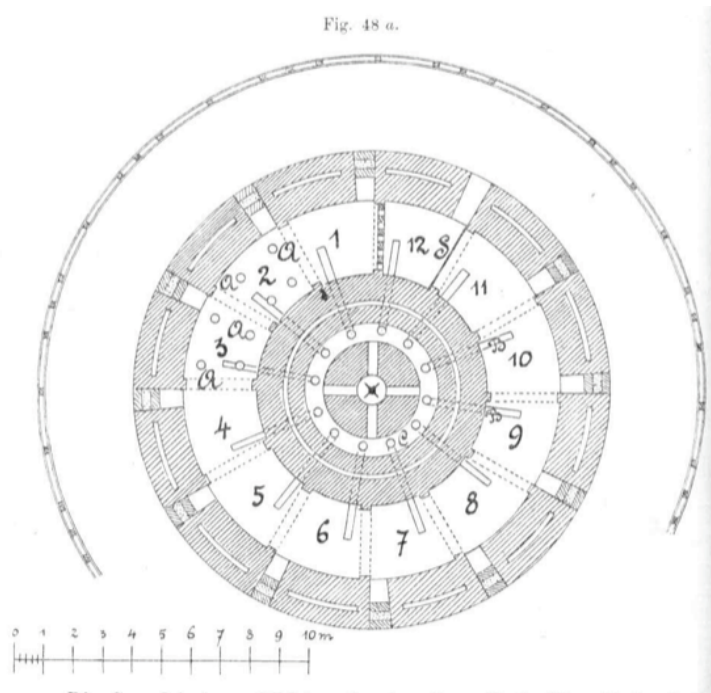


Abbildung 24: Der Hoffmansche Ringofen ermöglichte eine sehr gleichmäßige Temperatur des Brandes (Friedel, 1900; Fig. 48a)

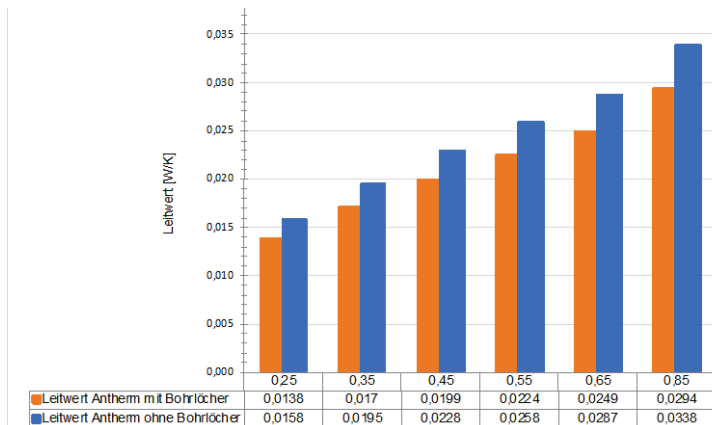


Abbildung 25: bauteilbezogene Leitwerte in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit, Simulation eines Mauerwerksverbands mit *Antherm*

Tabelle 5: bauteilbezogene Leitwerte in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit, Simulation eines Mauerwerksverbands mit *Antherm*, Verbesserung durch Bohrungen

Wärmeleitzahl Scherben	Leitwert Antherm ohne Bohrlöcher	Leitwert Antherm mit Bohrlöcher	Verbesserung durch Bohrlöcher
[W/mK]	[W/K]	[W/K]	%
0,25	0,0158	0,0138	87,34
0,35	0,0195	0,017	87,18
0,45	0,0228	0,0199	87,28
0,55	0,0258	0,0224	86,82
0,65	0,0287	0,0249	86,76
0,85	0,0338	0,0294	86,98

## 4.4. Untersuchung des subtraktiven Verfahrens zur thermischen Verbesserung von historischem Mauerwerk

### 4.4.1. Untersuchung mittels 3-dimensionaler thermischer Simulation

Die Berechnungen erfolgten mit AnTherm. AnTherm® ist ein neuartiges, äußerst leistungsfähiges Programm zur "Analyse des Thermischen Verhaltens von Bauteilen mit Wärmebrücken und Dampfdiffusionsbrücken". Die Software ist geeignet zur Berechnung von Temperaturverteilungen, Wärmeströmen und Wasserdampf-Diffusionsströmen in Baukonstruktionen beliebiger Formen und beliebiger Materialzusammensetzungen. Zudem kann die Verteilung der Grenzfeuchtigkeit für alle Bauteiloberflächen sowie des Wasserdampf-Partialdruckes im Bauteilinneren berechnet und ausgewiesen werden. Das Programm ist für Untersuchungen des dynamischen Verhaltens von Bauwerken (unter periodischen, harmonischen Randbedingungen) ebenfalls geeignet.<sup>xvii</sup>

Die Berechnungen erfolgten dreidimensional, da dies die Geometrie erforderlich macht.

#### 4.4.2. Weitere Materialkennwerte

Tatsächlich zeigten sich in der Messung schlechtere Resultate für den Wärmedurchgang des historischen Mauerwerks. Da aber nur ein Bauteil gemessen wurde, sind diese Ergebnisse keinesfalls repräsentativ. Zum Zeitpunkt des Starts der Untersuchung lagen diese Ergebnisse noch nicht vor. Die Wärmeleitzahl beeinflusst ohnehin nur das absolute Ergebnis und nicht die relative Verbesserung, die für diese Studie entscheidend ist, siehe Tabelle 5. Die Abstände der Bohrungen wurden auf ein (mögliches) konstruktives Minimum gesetzt und statisch überprüft.

Die Hohlräume wurden durchgehend als mit Aerogel-Granulat verfüllt angenommen, da die Konvektion in den Bohrlöchern nur schwer einzuschätzen gewesen wäre, im besten Fall aber ähnliche Werte zeigen.

Aerogele sind hochporöse Festkörper, bei denen bis zu 99,98 % des Volumens aus Poren bestehen. Es gibt verschiedene Arten von Aerogelen, wobei solche auf Silicatbasis am verbreitetsten sind. Andere Materialien, beispielsweise auf Kunststoff- oder Kohlenstoffbasis, kommen in Spezialfällen zur Anwendung. Grundsätzlich können alle Metalloxide, Polymere und einige andere Stoffe als Ausgangsbasis für die Aerogelsynthese mittels eines Sol-Gel-Prozesses verwendet werden.

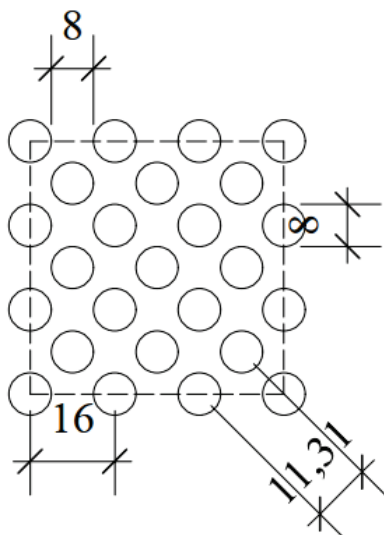


Abbildung 26: enges Bohrbild, mit welchem eine Optimierung der wärmetechnischen Performance zu erwarten ist (Rand-zu-Rand-Abstand 8mm).

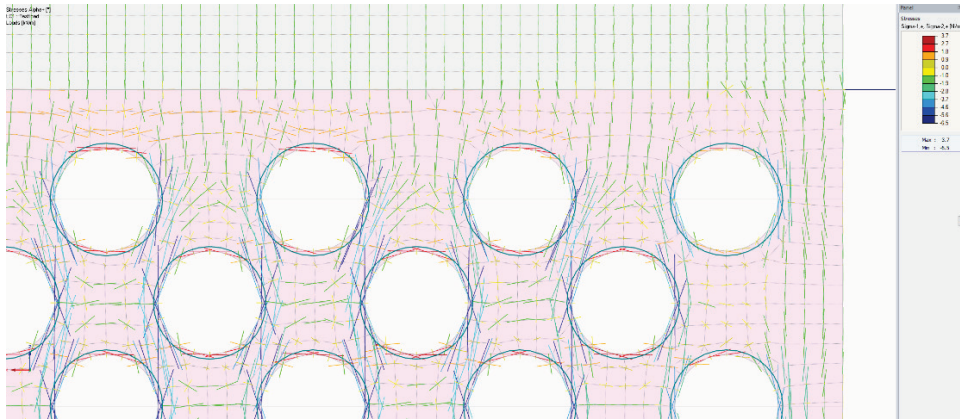


Abbildung 27: zeigt eine statische Simulation dieses Bilds (Querzugspannungen).

Die gewählten Bohrungen, siehe

Abbildung 26 und Abbildung 27, sind theoretisch, also bezüglich der statisch konstruktiven Kennwerte machbar und dienen als Basis für die weiteren rechnerischen Untersuchungen. Ob diese auch technisch durchführbar sind, blieb in diesem Teil der Sondierung noch unberücksichtigt. Die technische Machbarkeit wird gegen Ende des Berichts noch einmal aufgegriffen. Die vergleichsweise geringe Dimension des Durchmessers folgte der Überlegung konvektive Wärmetransportprozesse im Bohrloch gering zu halten (wenn kein Füllmaterial verbaut wird). Da das wesentliche Problem aber die – thermisch nach wie vor gut leitenden, verbleibenden Stege zwischen den Bohrungen sind, wurden auch spezielle Bohrlochgeometrien untersucht, die hinter einer Art Deckschicht größere Hohlräume produzieren würden. Dabei wurden auch Informationen zu neuartigen Bohrern gefunden, wie zum Beispiel Ankersysteme von Estévez Cimadevila et al., siehe Abbildung 28.



Abbildung 28: Bohrer für das Aufweiten im Inneren einer Bohrung<sup>xviii</sup>

Auch wenn diese Bohrer für den Holzbau entwickelt wurden, ist eine Anwendung im Mauerwerk nicht grundsätzlich auszuschließen. Die „Hammerkopf“-Muster wurden also als mögliche Verbesserung ebenfalls thermisch untersucht, weil sie versprechen eine hinreichend labyrinthische Geometrie zu erzielen, siehe Abbildung 29.

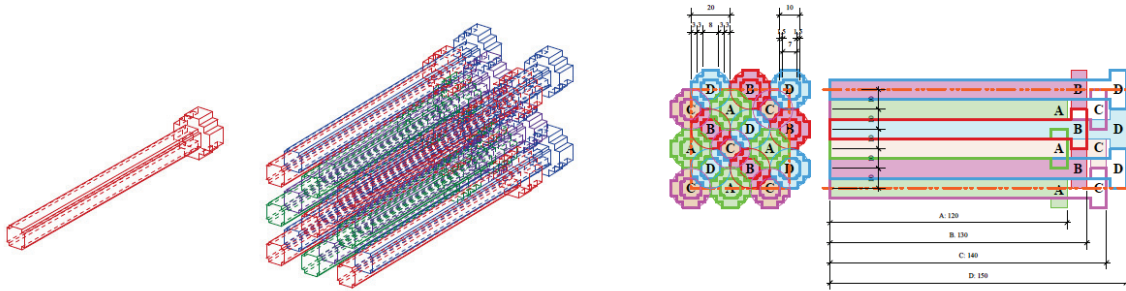


Abbildung 29: „Hammerkopf“-Bohrungen

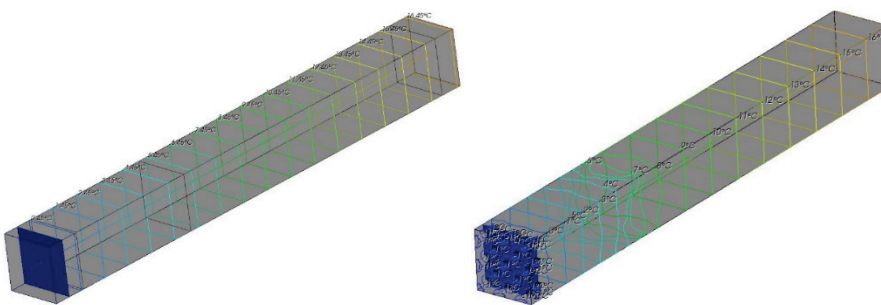


Abbildung 30: Isotherme Darstellung, Vollziegel-MWK, ohne und mit (rechts) Hammerkopf-Bohrung

Tabelle 6: Hammerkopf-Studie mit Normalputz

Studie [#]	Aufbau	Bohrungen	Füllung	U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]
01	MWK mit Standard-Putz	keine	keine	1,23
06	MWK mit Standard-Putz	Abbildung 26	Aerogel	1,03
09	MWK mit Standard-Putz	Abbildung 29	Aerogel	1,00

Die Untersuchung zeigt, dass die wesentliche Verbesserung durch das enge Bohrbild erfolgt und zumindest mit Normalputz durch das Hammerkopf-Labyrinth keine wesentliche Verbesserung mehr erzielt wird.

Tabelle 7: Hammerkopf-Studie mit Aerogel-Putz

Studie [#]	Aufbau	Bohrungen	Füllung	U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]
01	MWK mit Standard-Putz	keine	keine	1,23
02	MWK mit Aerogel-Putz	keine	keine	0,41
05	MWK mit Aerogel-Putz	Abbildung 26	Aerogel	0,39
10	MWK mit Aerogel-Putz	Abbildung 29	Aerogel	0,38

Die Performance verbessert auch durch das Aufbringen von Aerogel-Dämmputz nur noch wenig. Offensichtlich wirken die Stege als Wärmebrücken zu stark.

Die Simulationen wurden schrittweise genauer detailliert, bis hin zum Nachbau eines Mauerwerksverbandes. Es zeichnet sich ab, dass durch das Bohren, das letztlich immer lineare Stege in Richtung des Wärmeflusses zur Folge hat, und das aus konstruktiven Gründen immer weniger Hohlraum als konstruktives Material stehen lassen muss, der Wärmedurchgang um maximal 20 bis 25% verringert werden kann.

Es wurden in weiterer Folge auch konstruktive Varianten entwickelt, die nicht mit einem Füllmaterial thermischer Isolationsfunktion befüllt wurden, sondern mit einem Phasenübergangsmaterial (Phase-Change-Material PCM) befüllt wurden. Bei diesen Varianten wurde davon ausgegangen, dass ein definierter „Bauteil“ bestehend aus einem Energiegewinnungssystem (Photovoltaik) an einer Kanüle, die mit PCM befüllt ist, montiert ist, und die PCMs zu kälteren Zeiten ihre Wärme wieder abgeben.

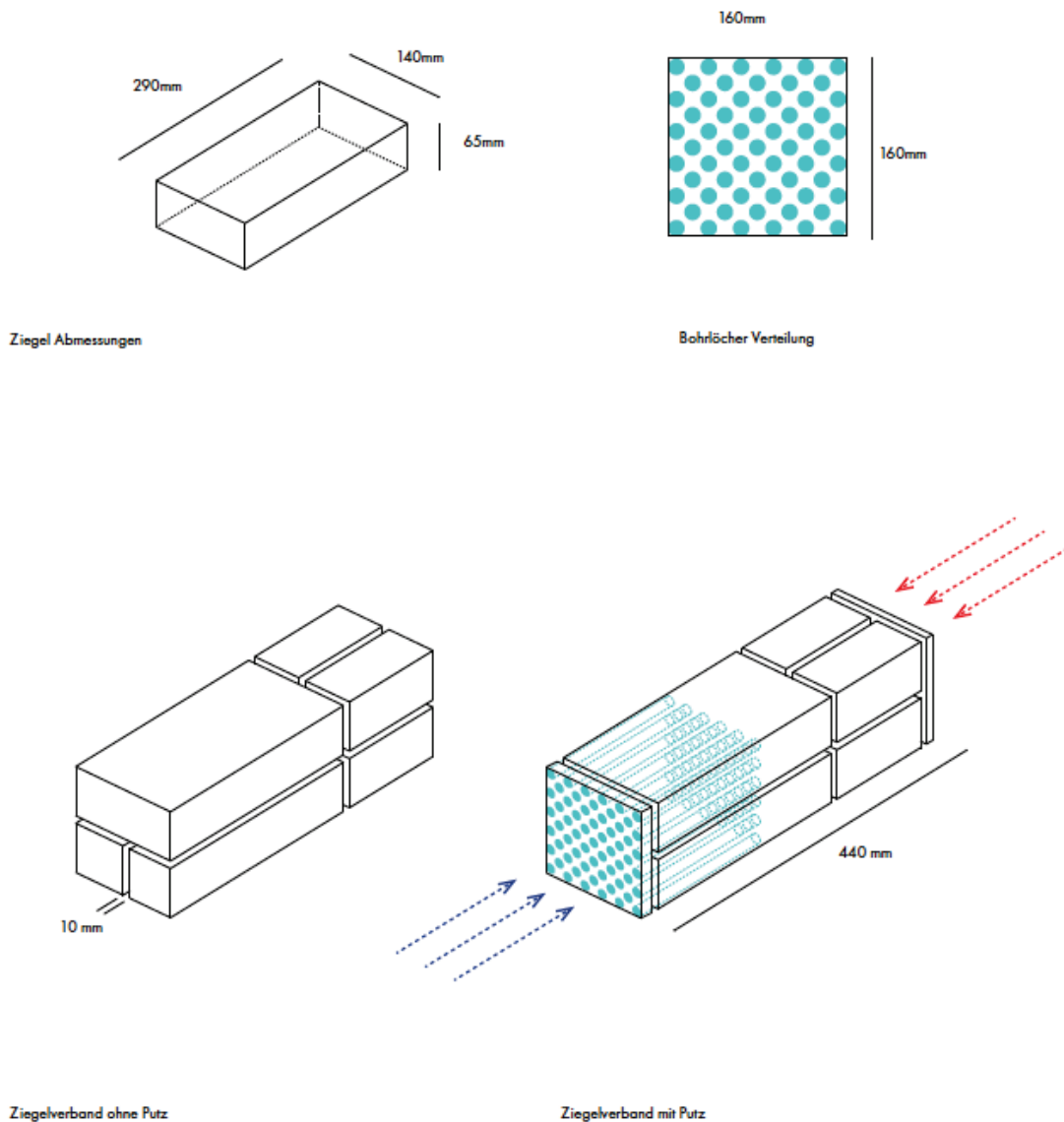


Abbildung 31: Modellierung eines Mauerwerksverbandes mit Bohrungen

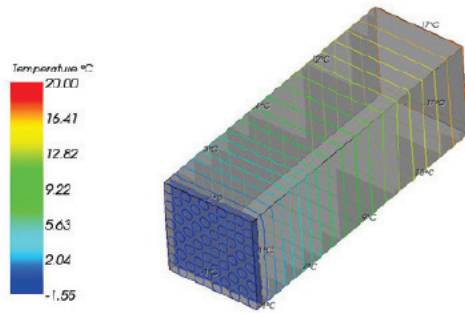


Abbildung 32: Simulation eines Mauerwerksverbandes mit Bohrungen

#### 4.4.3. Neue Maßnahmen zur Verringerung der Wärmeverluste

Um weitere Verbesserungen zu erzielen, wurde durch Simulation untersucht, wie sich das Einbringen von Latentwärmespeicher-Materialien (Phase-Changing-Materials, PCM) in die Öffnungen auswirken würde. Die Auswirkung der Maßnahme bleibt gering.

Doch die Idee die tägliche Sonnenenergie, die auf das Mauerwerk einstrahlt, zu aktivieren, legte eine weitere Variante nahe:

Das Sonnenlicht sollte nicht indirekt, über das Erwärmen der Mauer langsam zu den Latentwärmespeichern vordringen (wenn überhaupt!), sondern soll die Einstrahlung effizient durch kleine Photovoltaik-Module in Strom umgewandelt und für einige Stunden gespeichert werden, um dann zeitversetzt in der Nacht den Latentwärmespeicher zu aktivieren und so die Mauerwerkstemperatur an der Innenoberfläche zu erhöhen. Dies lässt sich schon mit sehr einfachen günstigen Komponenten umsetzen und nutzt die Energie bestmöglich. Die Erhöhung der Oberflächentemperatur im Inneren kommt einer Verringerung des Wärmedurchgangskoeffizienten gleich. Die Verringerung der Wärmeverluste des Gesamtgebäudes können dabei gut als U-Wert dargestellt werden, da dieser mit der Innenoberflächentemperatur in Zusammenhang steht:

Mit:

$q$	Wärmefluss in $W/m^2$
$T_i$	Temperatur der Innenraumluft in $^{\circ}C$
$T_{si}$	Temperatur der inneren Wandoberfläche in $^{\circ}C$
$T_a$	Temperatur der Außenluft in $^{\circ}C$
$\Delta T_{i,a}$	Differenz $T_i - T_a$ in K
$\Delta T_{i,si}$	Differenz $T_i - T_{si}$ in K
$R_{si}$	Wärmeübergangswiderstand an der inneren Wandoberfläche in $m^2K/W$
$U$	U-Wert in $W/m^2K$

dabei ist  $q = U * \Delta T_{i,a}$   
aus  $T_{si} = T_i - q * R_{si}$  folgt:

$$T_i - T_{si} = U * (T_i - T_a) * R_{si}$$

Da zum jeweiligen Betrachtungszeitpunkt die Elemente  $T_i$ ,  $T_a$ ,  $R_{si}$  als konstant betrachtet werden können (oben in Rot geschrieben) folgt dass mit der Vergrößerung von  $T_{si}$  eine Verringerung der

Differenz  $T_i - T_{si}$  und damit des Ausdrucks  $U * (T_i - T_a) * R_{si}$  einhergeht. Das einzig variable Element ist hier aber der U-Wert. Daher verringert sich der U-Wert mit einer Erhöhung der Temperatur der Innenoberfläche des Mauerwerks. Ein solche Erhöhung der Oberflächentemperatur würde sich auch auf den thermischen Komfort positiv auswirken.

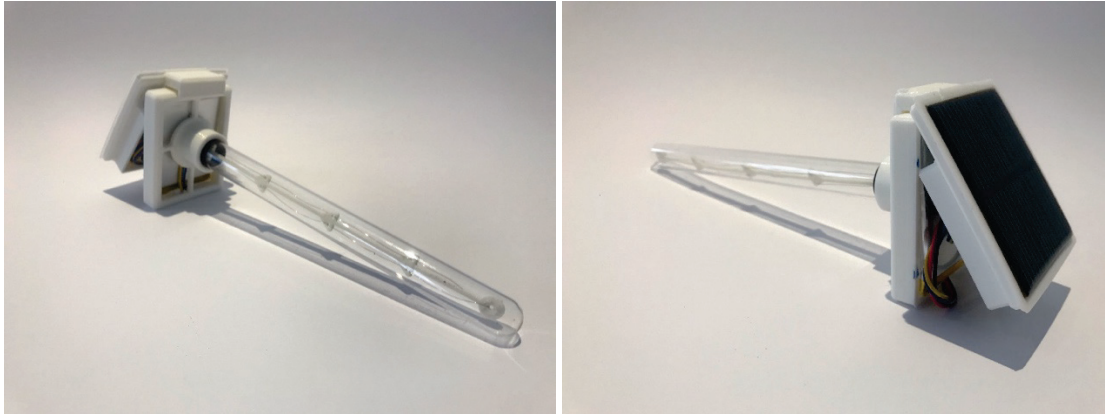


Abbildung 33: Solare Heizstäbe gekoppelt mit einem Mini-PV-Panel

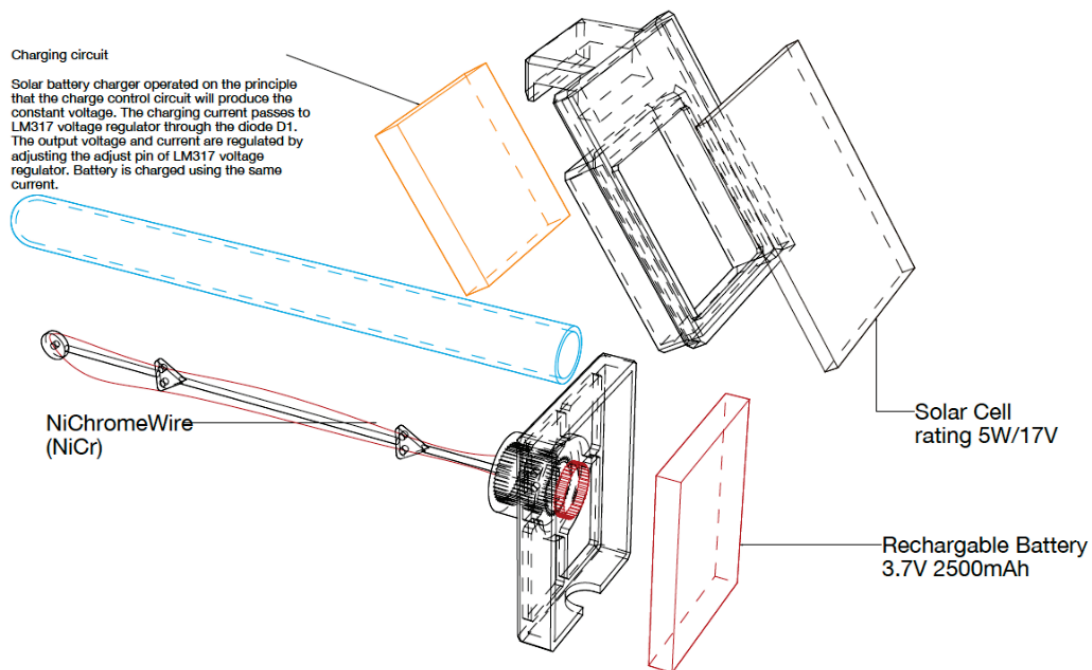


Abbildung 34: Aufbau der Heizstäbe



In Summe wurden im Laufe des Projektes folgende Varianten untersucht:

Tabelle 8: mittels thermischer Simulation berechnete Varianten

Nummer der Studie	Variante
01, 12, 13, 14, 15, 17	Mauerwerk mit historischem Putz
20, 21, 22, 23, 24, 25, 26	Mauerwerk mit historischem Putz, unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit für Ziegel
02, 16	Mauerwerk mit Aerogelputz
03, 04, 06, 18	Mauerwerk mit engem Bohrbild, Löcher mit Aerogel gefüllt mit historischem Putz
27, 28, 29, 30, 31, 32, 33	Mauerwerk mit engem Bohrbild, Löcher mit Aerogel gefüllt mit historischem Putz, unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit für Ziegel
05, 08, 19	Mauerwerk mit engem Bohrbild, Löcher mit Aerogel gefüllt mit Aerogelputz
09	Mauerwerk mit Hammerkopf-Bohrbild, Löcher mit Aerogel gefüllt mit historischem Putz
10	Mauerwerk mit Hammerkopf-Bohrbild, Löcher mit Aerogel gefüllt mit Aerogelputz
Parallel und zum Abgleich mit den Messergebnissen wurde untersucht:	
34	Mauerwerk in realer Lage
35	Mauerwerk in realer Lage mit weitem Bohrbild, Löcher mit Aerogel gefüllt mit historischem Putz
36	Mauerwerk in realer Lage mit weitem Bohrbild, Löcher mit PCM gefüllt mit historischem Putz
37	Mauerwerk in realer Lage mit weitem Bohrbild, Löcher mit PCM und Heizstab mit historischem Putz

Tabelle 9 zeigt einige Bohrmuster, die untersucht wurden und zum Teil in-situ messtechnisch untersucht wurden.

Tabelle 9: Untersuchte Bohrmuster

Einbausituation	Putz	Löcher	aktiv	Bohrmuster	Kombinationen
Feld	historisch	keine	-	eng	untersucht mit verschiedenen Detaillierungsgraden, Geometrien und verschiedenen Materialeigenschaften
Feld	Aerogel	keine	-	eng	
Feld	historisch	Aerogel	-	eng	
Feld	Aerogel	Aerogel	-	eng	
in situ (AP7)	historisch	keine	-	weit	
in situ (AP7)	historisch	Aerogel	-	weit	
in situ (AP7)	historisch	PCM	-	weit	
in situ (AP7)	historisch	PCM	2 W je Bohrung	weit	

Diese Varianten wurden wiederum in verschiedenen Detaillierungsgraden untersucht, um die Integrität der Berechnungen sicher zu stellen. Die nachstehende Abbildung 35 zeigt eine Überblicksdarstellung der erreichten U-Werte von den unterschiedlichen Optimierungsvarianten. Es ist zu berücksichtigen, dass diese ausschließlich auf Wärmebrückensimulationen beruhen. Die

oranjen Balken sollen die in-Situ Messungen (siehe 4.4.4) als Kontroll-Rechnung simulieren. Sämtliche Berechnungen sind in Anhang 8.1 dokumentiert. Eine abschließende Bewertung oder Validierung wird für die jeweiligen hochbautechnischen Einzelsituation immer erforderlich bleiben.

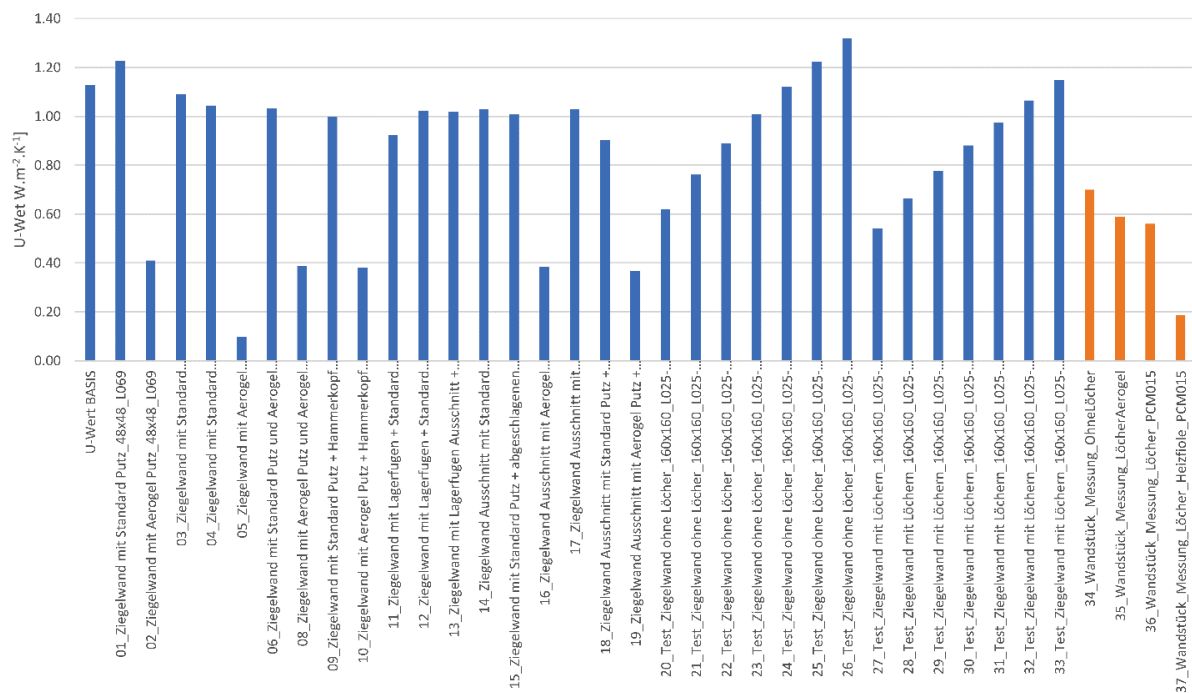


Abbildung 35: Gegenüberstellung der errechneten U-Werte bei unterschiedlichen Varianten

#### 4.4.4. In-Situ Versuchsreihen: Anordnung

Um weitere Erkenntnisse zu gewinnen, wurden Versuche an einem bestehendem Wandstück durchgeführt. Die Wand wurde in einem engen Innenhof im Erdgeschoß gewählt, um Einflüsse der direkten Sonnenstrahlen auszuschließen, siehe Abbildung 36 und Abbildung 37. Das Mauerwerk wurde in unverändertem Zustand gemessen und sodann wurden neun Löcher entsprechend Abbildung 38 gebohrt. Der Messpunkt an der Innenoberfläche wurde ungefähr in der Mitte des Lochfeldes gesetzt.



Abbildung 36: Fassade für In-Situ-Test, 1010 Wien, Parisergasse

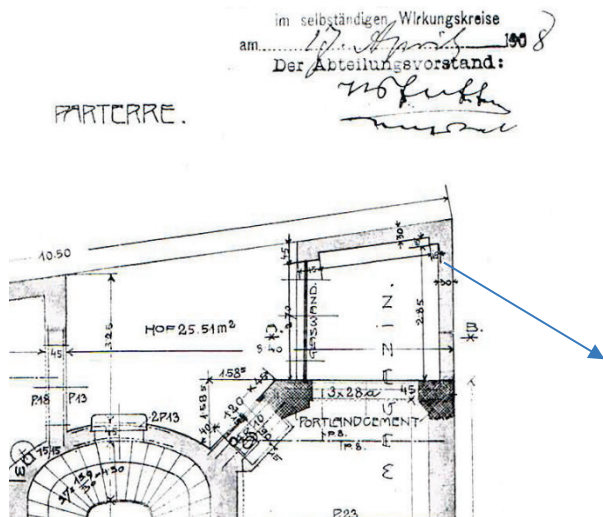


Abbildung 37: Planausschnitt Original-Einreichplan Parisergasse, Baujahr 1908

In der Phase der In-Situ-Testung sollte ein Bohrbild getestet werden, das robust und gut realisierbar erscheint. Es wurde also für diese Untersuchungen das „weite Bohrbild“ gewählt, siehe Abbildung 38.

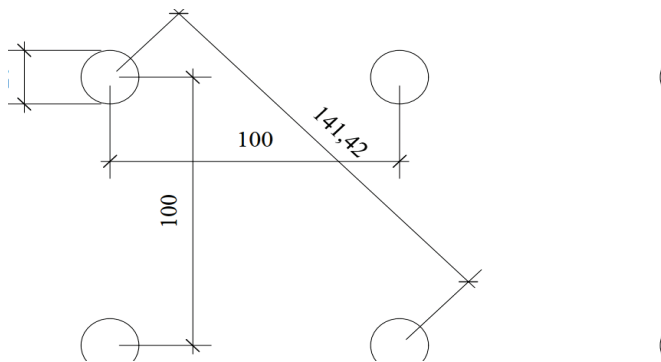


Abbildung 38: „weites Bohrbild“, 100x100mm, 20mm Bohrdurchmesser

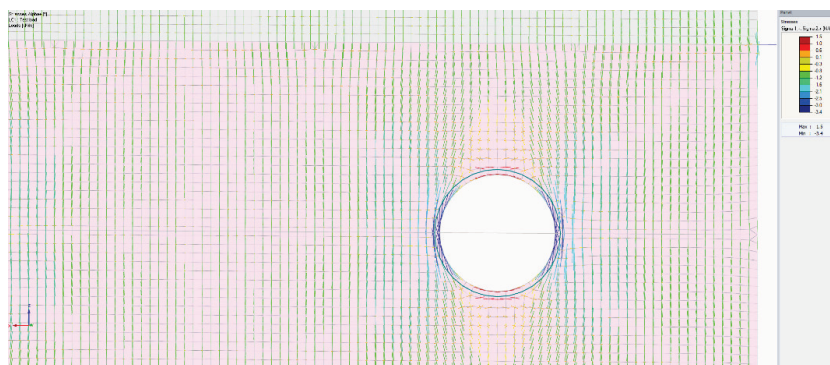


Abbildung 39: statisch-konstruktive Detailuntersuchung: Die Größenordnung der Spaltzugkräfte ist am oberen und unteren Lochrand, bedingt durch die kleinere, auf den verbliebenen Nettoquerschnitt bezogene Auslastung, um den Faktor  $3.7/1.5 = 2.5$  (im Vergleich zum „engen Bohrbild“) kleiner und damit im Bereich der aufnehmbaren Spaltzugkräfte im Ziegelstein.

Bereits in der Simulation zeigen sich trotz der deutlich geringeren Porosität gute Ergebnisse für dieses Bohrmuster. Der ermittelte U-Wert sinkt von 0,7 auf 0,59 W/m<sup>2</sup>k

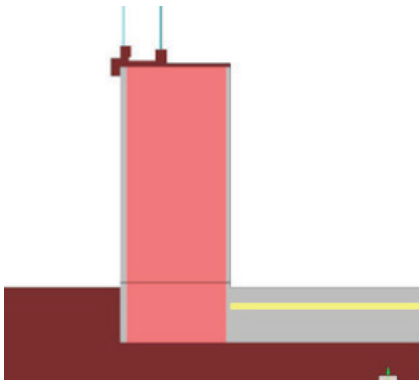


Abbildung 40: Modellierung der in-situ-Bauteile in Antherm (Fensterscheiben gehen bis Mitte Fenster, Erdreich 3m unter die Erde, Raum nicht unterkellert)

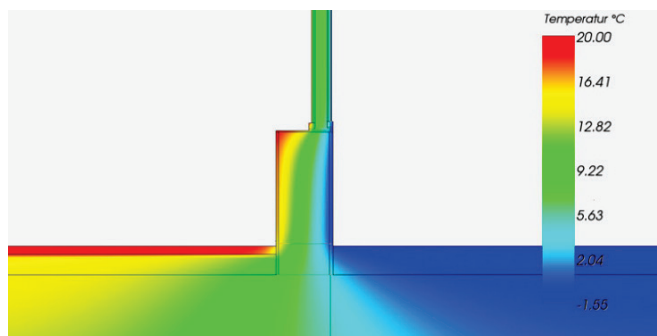


Abbildung 41: Thermische Simulation des Ist-Zustandes

Auch bei der Messung zeigte sich, dass mit dem weiten und realistischen Bohrbild doch deutlich ablesbare Ergebnisse erzielt wurden.

#### 4.4.5. In-Situ Versuchsreihen: U-Wert-Messung

Die Messungen wurden mit dem U-Wert Kit und der U-Wert Kit Software der Firma greenTEG AG, 8005 Zürich durchgeführt. Beim greenTEG U-Wert Kit handelt es sich um eine Messvorrichtung, die der ISO 9869-1:2014 entspricht.

*Der ISO-Standard nennt die folgenden wichtigen Punkte für die Installation (Messaufbau):*

- *Der Wärmeflussmesser (HFS=heat flux sensor) und die Temperatursensoren müssen an einer Stelle montiert werden, die für das gesamte Element repräsentativ ist (vorherige Inspektion mit einer Wärmebildkamera wird als Hinweis genannt).*
- *HFS sollen nicht:*
  - *In der Nähe von Wärmebrücken, Rissen oder ähnliche Fehlerquellen installiert werden*
  - *Unter direktem Einfluss einer Wärme-, einer Kühlvorrichtung oder unter dem Luftstrom eines Ventilators stehen*
- *Die äußere Oberfläche sollte vor folgenden Einflüssen geschützt werden:*
  - *Regen*
  - *Schnee*

- Sonneneinstrahlung
- Schutz der Außenfläche kann durch künstliche Abschirmung erreicht werden.
- Datenerfassungsintervalle sollten kleiner als 30min sein.

Die Messung kann nur erfolgreich beendet werden, wenn die Bedingungen wie folgt erfüllt sind:

1. Messdauer > 72h
2. Der R-Wert, welcher am Ende des Tests bestimmt wird, darf nicht mehr als 5% von dem Wert abweichen, der 24h vorher gemessen wurde
3. Der R-Wert, der während der ersten 2/3 der gesamten Messperiode erhalten wird (was auch einem ganzzahligen Vielfachen von 24 Stunden entsprechen muss), weicht nicht mehr als 5% von dem Wert ab, der in den letzten 2/3 der gesamten Messperiode ermittelt wurde (muss auch einem ganzzahligen Vielfachen von 24 Stunden entsprechen).
4. Die Änderung der in der Wand gespeicherten Wärme ist  $\leq 5\%$  der Wärme, die durch die Wand fließt.

Während Testbedingungen 1-3 durch die neue Software validiert werden, wird die Bedingung 4 nicht getestet. greenTEGs Messsystem kann derzeit keine Messung bzgl. der Änderung der Wärmespeicherung der Wand durchführen.<sup>xix</sup>

Grundsätzlich sollen Messungen mindestens über einen Zeitraum von 72h durchgeführt werden. Die U-Wert Analysen basieren auf der Mittelwertmethode gem. Kapitel 7.1 der ISO 9869-1:2014.

Die Eingangsparameter sind in der in Abbildung 42 dargestellten Tabelle der greenTEG AG erläutert. Das Test-Kit selbst besteht im Wesentlichen aus einem Wärmefluss-Sensor (Abbildung 44) und einem Data Logger (Abbildung 43).

Bei den Messungen wurde die Mindestdauer von 72h weitestgehend eingehalten. Es gab fünf Anordnungen, siehe Tabelle 10. Dabei wurde zuerst das bestehende Mauerwerk und in der Folge wurden vier verschiedenen Manipulationen gemessen.

Tabelle 10: Beschreibung der gemessenen Manipulation

Messprotokoll	1	2	3	4	5
<b>Messung ISO 9869-1</b>	"original"	"hol"	"glas inaktiv"	"glas aktiv"	"onoff"
<b>Messeinrichtung-Start</b>	2021-02-16 20:54	2021-03-15 17:03	2021-03-31 20:54	2021-04-02 15:53	2021-04-06 22:13
<b>Analyse-Start</b>	2021-02-17 14:45	2021-03-16 11:38	2021-03-31 20:54	2021-04-03 20:42	2021-04-06 22:13
<b>Analyse-Ende</b>	2021-02-25 14:45	2021-03-22 11:38	2021-04-02 14:53	2021-04-06 20:42	2021-04-09 18:41
<b>Messeinrichtung-Ende</b>	2021-02-25 14:45	2021-03-26 10:28	2021-04-02 14:53	2021-04-06 21:58	2021-04-09 18:41
<b>Messdauer [min]</b>	11520	8640	2519	4320	4108
<b>Messdauer [h]</b>	192	144	42	72	68
<b>Mess-Setting</b>	Bestands- mauerwerk	9 Bohrungen lt. "weitem Bohrbild"	9 Bohrungen, mittlere Bohrung mit Glasfiole und Wachs	9 Bohrungen, mittlere Bohrung mit Glasfiole und Wachs, durchgehend beheizt	9 Bohrungen, mittlere Bohrung mit Glasfiole und Wachs, teilweise beheizt

Bezeichnung	Beschreibung	Berechnung/ Formel
Messdauer	Gesamte Länge der Messperiode	(Zeit des Messendes) - (Zeit des Messanfangs)
Analysierte Zeitdauer	Dauer der Periode, die für die Datenanalyse benutzt wird (muss einem Vielfachen von 24 h entsprechen)	Messdauer abgerundet zu einem Vielfachen von 24h. (Analyse Start) - (Analyse Ende)
Analyse Start	Da der Analysezeitraum kürzer ist als die Länge der gesamten Messperiode muss ein Teil der Messdaten verworfen werden. Der erste Teil wird in unserer Software verworfen, da er in der Regel anfälliger für Schwankungen ist, als der letzte Teil der Messperiode.	-
Analyse Ende	Entspricht immer dem Ende der gesamten Messung	
U-Wert (U)	Berechneter U-Wert unter Verwendung der Daten der analysierten Zeitdauer	$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_{ej})}$ <p> <math>q_j</math> = Wärmefluss zur Zeit j  <math>T_{ij}</math> = Luftinnentemperatur zur Zeit j  <math>T_{ej}</math> = Luftaußentemperatur zur Zeit j </p>
U24	Berechneter U-Wert unter Verwendung der Daten der analysierten Zeitdauer ohne die letzten 24h	Siehe oben
U2/3s	Berechneter U-Wert unter Verwendung der Daten der ersten 2/3 der analysierten Zeitdauer in Tagen	Anzahl der Tage dieser Periode wird unter Verwendung von INT (2/3 * D) berechnet, wobei D für die Dauer in Tagen des Analysezeitraums steht.
U2/3e	Berechneter U-Wert unter Verwendung der Daten der letzten 2/3 der analysierten Zeitdauer in Tagen	Anzahl der Tage dieser Periode wird unter Verwendung von INT (2/3 * D) berechnet, wobei D für die Dauer in Tagen des Analysezeitraums steht.
dU24	Unterschied zwischen U und U24	$dU24 = 2 * (U - U24) / (U + U24)$
dU2/3	Unterschied zwischen U2/3s und U2/3e	$dU2/3 = 2 * ((U2/3s) - [U2/3e]) / ((U2/3s) + [U2/3e])$
R-Wert (wird nicht in SW gezeigt)	Der R-Wert errechnet sich aus dem U-Wert und der Annahme standardisierter Wärmedurchgangskoeffizienten von 0,13 (innen) und 0,04 (außen).	$R = 1/U - 0.13 - 0.04$
R24 (wird nicht in SW gezeigt)	Berechneter R-Wert unter Verwendung der Daten der analysierten Zeitdauer ohne die letzten 24h	Siehe oben
R2/3s (wird nicht in SW gezeigt)	Berechneter U-Wert unter Verwendung der Daten der ersten 2/3 der analysierten Zeitdauer in Tagen	Analog zu U2/3s
R2/3e (wird nicht in SW gezeigt)	Berechneter R-Wert unter Verwendung der Daten der letzten 2/3 der analysierten Zeitdauer in Tagen	Analog zu U2/3e
dR24	Unterschied zwischen R und R24	$dR24 = 2 * (R - R24) / (R + R24)$
dR2/3	Unterschied zwischen R2/3s und R2/3e	$dR2/3 = 2 * ((R2/3s) - [R2/3e]) / ((R2/3s) + [R2/3e])$

Abbildung 42: Parameter für in-situ-Messungen<sup>xx</sup>



Abbildung 43: Data Logger

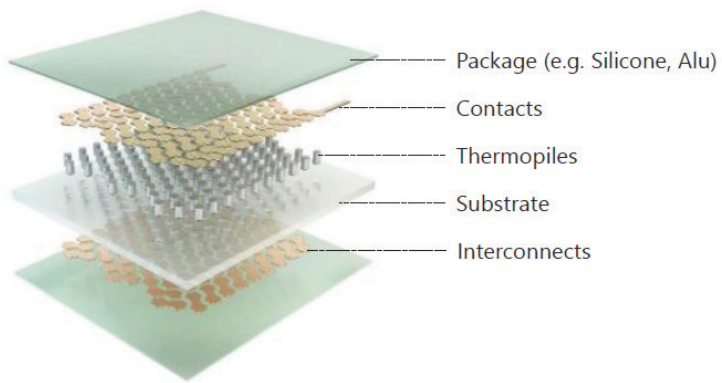


Abbildung 44: Aufbau des Wärmefluss-Sensors

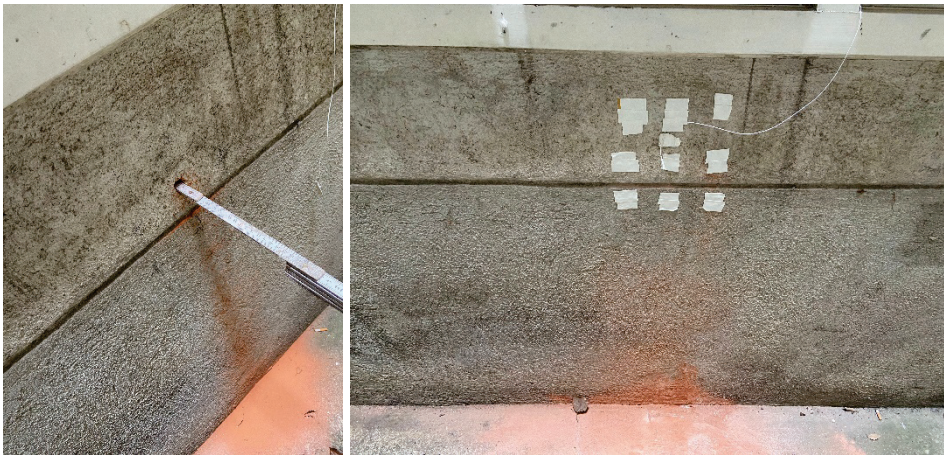


Abbildung 45: In Situ - Testfeld

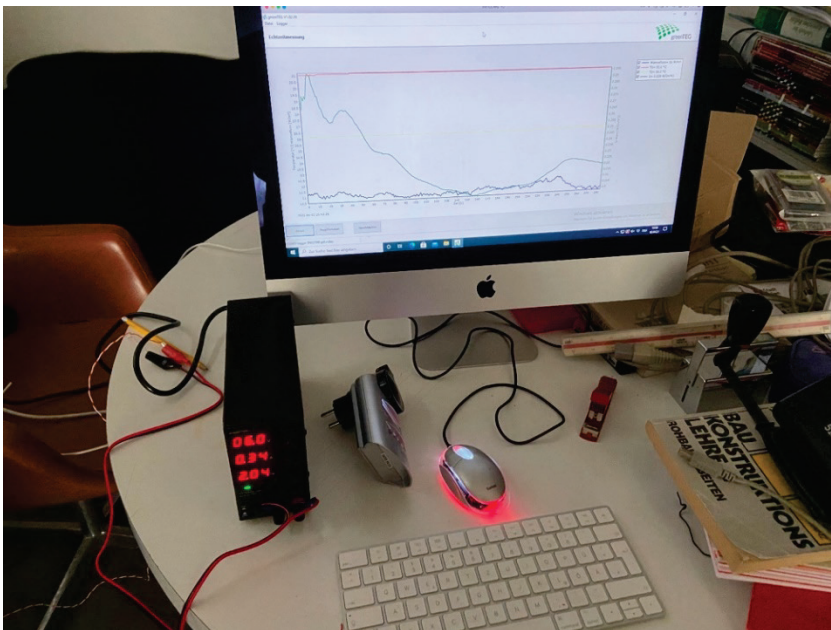


Abbildung 46: Mess-Software und Netzgerät zur Simulation der Heizstäbe

Dadurch, dass GreenTEG die Änderung der Wärmespeicherung der Wand nicht erfassen kann, war eine Manipulation möglich. Diese soll durch die oben beschriebenen Heizstäbe erfolgen. Als Energiequelle sind in Zukunft Mini-PV-Modelle angedacht. Für die Versuchsreihe sollte ein konstanter Stromfluss gewährleistet sein. Dafür wurde ein Netzgerät der Marke *Wanptek*, Type *NPS3010W 0-30V/10A* verwendet, das ein präzises Einstellen der Ausgabe von Spannung und Stromstärke erlaubt. Auf diese Weise konnte ein realistischer Stromfluss simuliert werden.

Es wurde schrittweise wie folgt vorgegangen: Nach der 1. Messung „original“ des unveränderten Mauerwerks wurden 9 Löcher gebohrt und die 2. Messung „hol“ durchgeführt. Diese Maßnahme führte zu einer Verbesserung des gemessenen U-Werts. Der resultierende Wert hat keine Allgemeingültigkeit. Dafür wären mehrere Wiederholungen notwendig. Dennoch ist der Effekt der Bohrungen bemerkenswert. In das mittlere Loch wurde nun eine Glasfiole mit Wachs gefüllt eingeschoben und die 3. Messung durchgeführt. Dadurch steigt der U-Wert wieder, da die Glasfiole und auch die das Wachs eine höhere Wärmeleitfähigkeit hat als die stehende Luftschicht. Vor allem das Glas führt zu einer starken Wärmeleitung bis nach außen. Nun wird das Netzteil in Betrieb genommen und eine Leistung von 2,94 W in die Glasfiole eingebracht. Dadurch sinkt der gemessene U-Wert wieder unter das gemessene Niveau mit den Löchern.

Die Protokolle zu den verschiedenen Messperioden sind in Abbildung 47, Abbildung 48, Abbildung 49, Abbildung 50, Abbildung 51 dargestellt.

Mit:

- Wärmefluss      Wärmefluss  $q$  in  $W/m^2$
- T1                Innentemperatur in  $^{\circ}C$
- T2                Außentemperatur in  $^{\circ}C$
- U                 U-Wert, kumuliert aus den o.a. Parametern, in  $W/m^2K$   
dabei ist  $U = \sum q / \sum \Delta T$

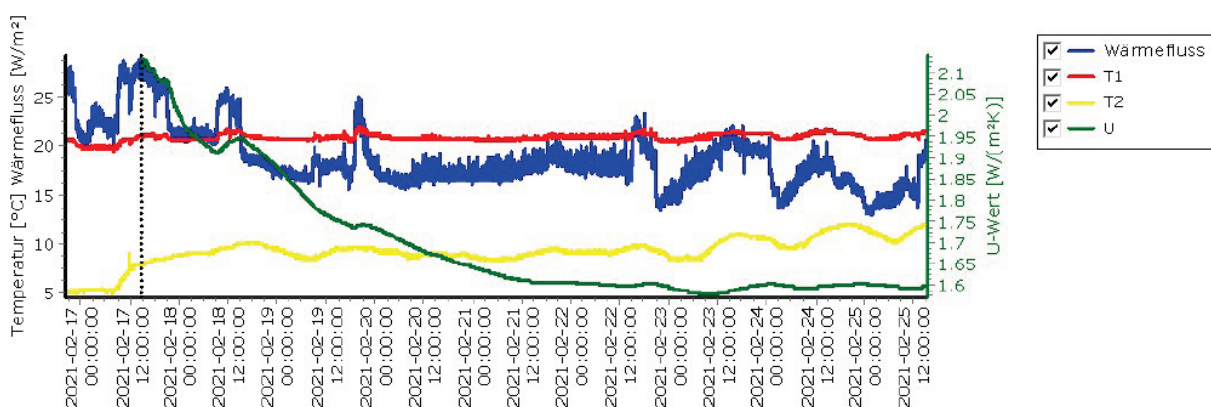


Abbildung 47: Messprotokoll, „original“, unveränderte Situation des Bestandes



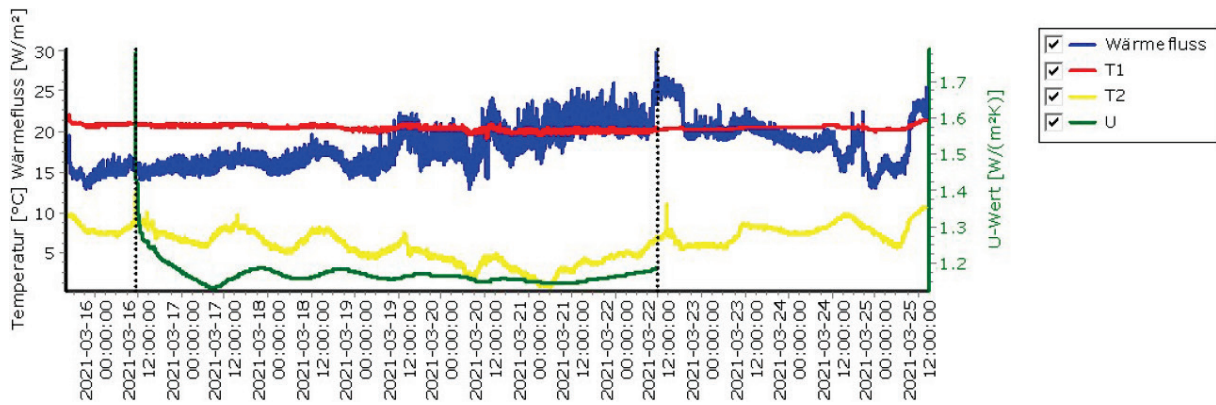


Abbildung 48: Messprotokoll „hol“, Bestandsmauerwerk mit 9 Löchern „weites Bohrild“

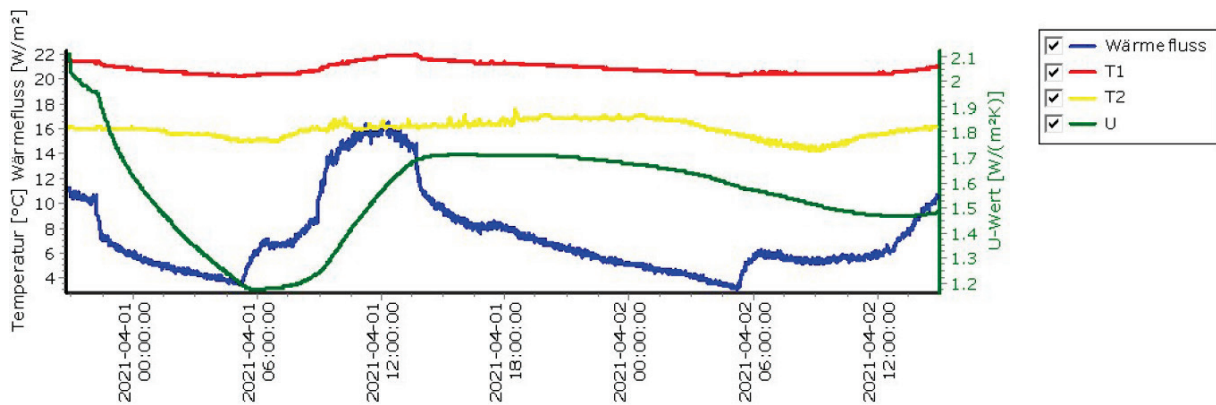


Abbildung 49: Messprotokoll „glas inaktiv“, Glasföle in mittlere der 9 Bohrungen eingesetzt

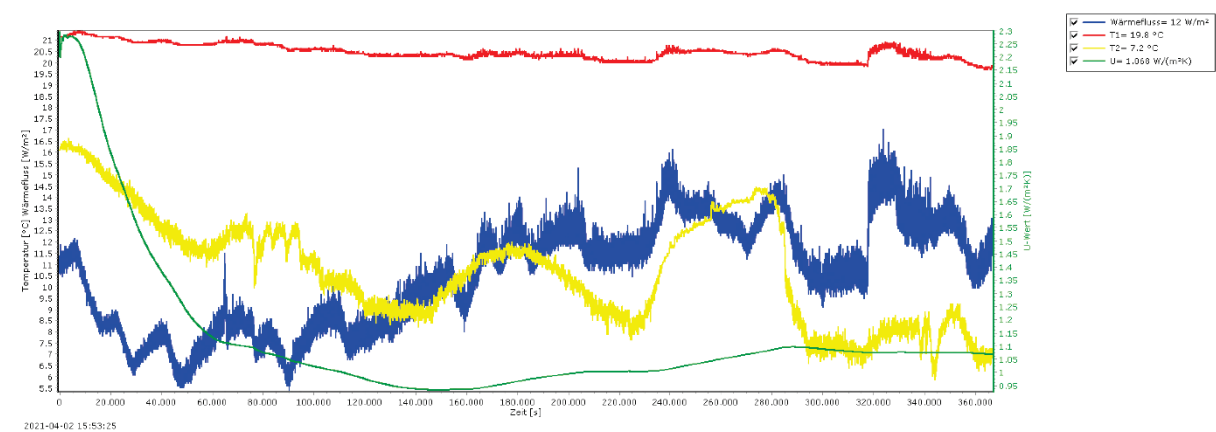


Abbildung 50: Messprotokoll „glas aktiv“, Glasföle beheizt (aktiv)

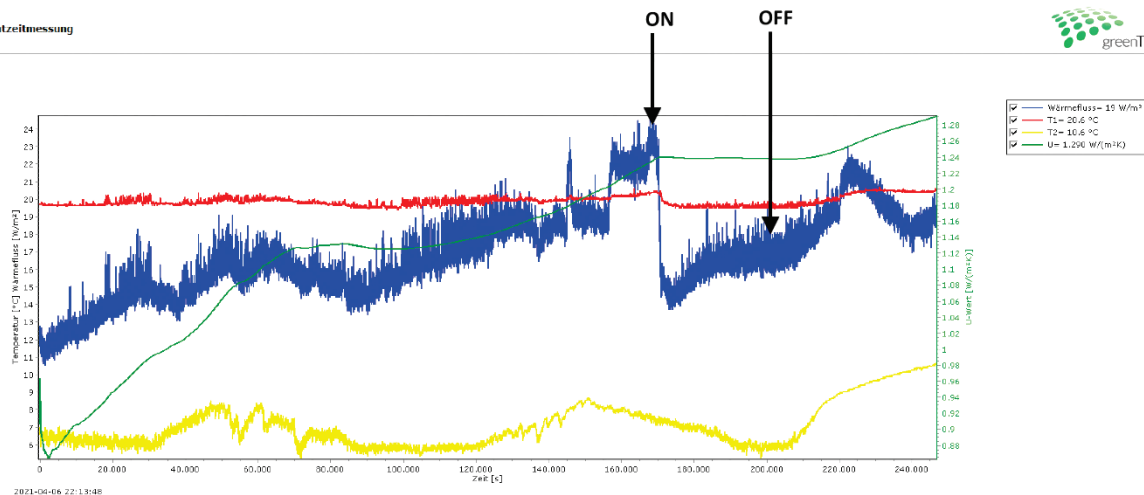


Abbildung 51: Messprotokoll „onoff“, Glasfiole 12% der Zeit aktiv

Geht man von einer Einflussgröße der Maßnahme von 1 m<sup>2</sup> aus, müssten für dieses Ergebnis 2,94 W/m<sup>2</sup> aufgebracht werden. Dabei ist aber zu beachten, dass die Idee der aktiven Beheizung erst am Ende der Studie aufkam. Würde man diese zu Ende führen, würde man weniger Löcher, diese aber tiefer bohren, sodass die Wärme näher an der Innenoberfläche ist. Die Idee wäre also, ähnlich einer Trombé-Wand die Wände als sonnenbetriebenen Heizungen zu verwenden. Findet die Beheizung möglichst nah an der Innenseite der Wände statt, lassen sich Wärmeverluste reduzieren. Diese sehr spät entwickelte Idee müsste also in einem eigenen Projekt neu durchdacht werden. Offen ist auch, was im Sommer mit der gesammelten Energie passiert. Eine Möglichkeit wäre Übertragung des Stroms durch induktive Koppelung.

Die Messergebnisse, sowie die Prüfanordnung finden sich in

Tabelle 11, eine graphische Darstellung der Ergebnisse in untenstehender Abbildung 52.

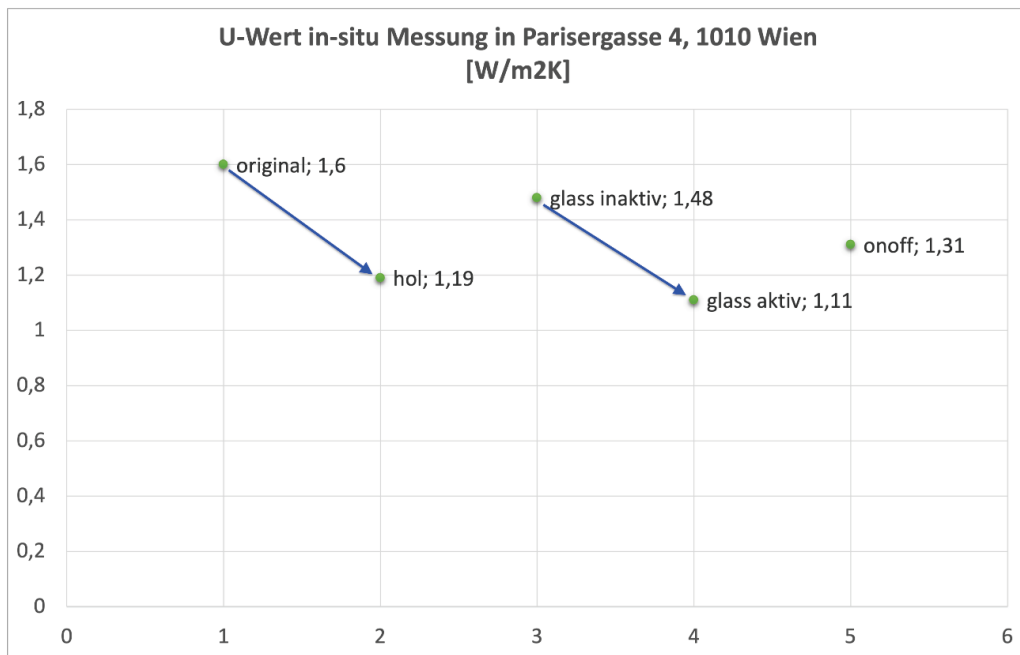


Abbildung 52: Grafische Darstellung der Messergebnisse

Tabelle 11: Prüfanordnungen und Messergebnisse

Messung ISO 9869-1	"original"	"hol"	"glas inaktiv"	"glas aktiv"	"onoff"
Analyse-Start	2021-02-17 14:45	2021-03-16 11:38	2021-03-31 20:54	2021-04-03 20:42	2021-04-06 22:13
Analyse-Ende	2021-02-25 14:45	2021-03-22 11:38	2021-04-02 14:53	2021-04-06 20:42	2021-04-09 18:41
ausgewerte Zeit in [h]	192	144	42	72	68
<b>U-Wert</b>	<b>1,6</b>	<b>1,19</b>	<b>1,48</b>	<b>1,11</b>	<b>1,31</b>
Messprotokoll	1	2	3	4	5
Löcher*	nein	ja	ja	ja	ja
Material Hohlraum	-	air, closed	Fiole, Wachs	Fiole, Wachs	Fiole, Wachs
aktiv	-	-	nein	100% der Zeit	12% der Zeit
V				1,4	1,4
A				1,39	1,39
W				2,94	2,94
Einflußgröße [m2]	-	1,00	1,00	1,00	1,00
W/m2	-	-	-	2,94	0,35
*)Löcher:	3x3 Löcher, DM18mm, a=100mm				
Anmerkung		Abdeckung mit Greenteg Klebeband	nur das mittlere Loch mit Fiole	nur das mittlere Loch mit Fiole und Heizung	Betrieb: 30.000 von 245.000 sec nach ca 170.000 sec wird die Fiole aktiviert der kumulierte (!) U-Wert stabilisiert sich bei 1,24W/m <sup>2</sup> K und steigt nach abschalten nach 200.000 sec weiter auf 1,31W/m <sup>2</sup> K

Dabei wurde auch geprüft, wie sich ein Ein- und Ausschalten des Heizstabs auswirkt. Damit sollte ein Szenario durchgespielt werden, wo auf Grund der Witterung zu wenig Sonnenstrahlung für den Dauerbetrieb zur Verfügung steht. Es wurde angenommen, dass für die geringen Energiemengen Akkumulatoren in den Solarstäben verbaut werden können, die zumindest einen Puffer von 24h erlauben. Um zu prüfen, ob genügend Strom für das Beheizen der Wände allein durch Solarstrahlung generiert werden kann, wurden die drei hinsichtlich Sonnenstands ungünstigsten Tage eines Jahres betrachtet und die Einstrahlung unverschattet untersucht. Als Datenbasis wurde der ASHRAE

Klimadatenatz für Wien IWEK 110360 gewählt. Der mögliche Ertrag der Module wurde abgeleitet von der Formel (156a) der ÖNORM H 5056-1:2019-01 berechnet. Die Abbildung 53, Abbildung 54, Abbildung 55 zeigen die Strahlungssummen am 20., 21. und 22. Dezember auf unverschatteten vertikalen Flächen für die Haupthimmelsrichtungen Nord, Ost, Süd, West. Die Daten wurden mittels *Rhin3d/Grasshopper/Ladybug* ermittelt.

Tabelle 12: Strahlungssummen ungünstiger Tage auf Basis der Klimadaten für Wien IWEK 110360

	S	O	N	W	
<b>DEC 20</b>	1658,91	497,83	379,73	744,49	Wh pro Tag
	69,12	20,74	15,82	31,02	Wh/m <sup>2</sup> pro Stunde ....W/m <sup>2</sup>
	S	O	N	W	
<b>DEC 21</b>	175,46	165,77	159,34	165,84	Wh pro Tag
	7,31	6,91	6,64	6,91	Wh/m <sup>2</sup> pro Stunde ....W/m <sup>2</sup>
	S	O	N	W	
<b>DEC 22</b>	1271,63	555,46	375,96	540,42	Wh pro Tag
	52,98	23,14	15,66	22,52	Wh/m <sup>2</sup> pro Stunde ....W/m <sup>2</sup>

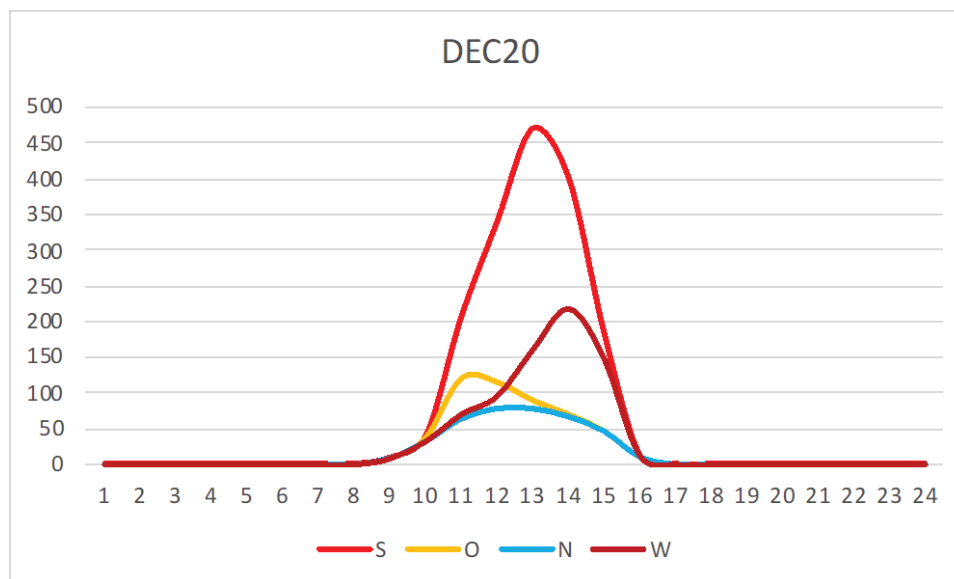


Abbildung 53: Klimadaten für Wien IWEK 110360, Globalstrahlung auf den vertikalen Oberflächen der Haupthimmelsrichtungen am 20. Dezember

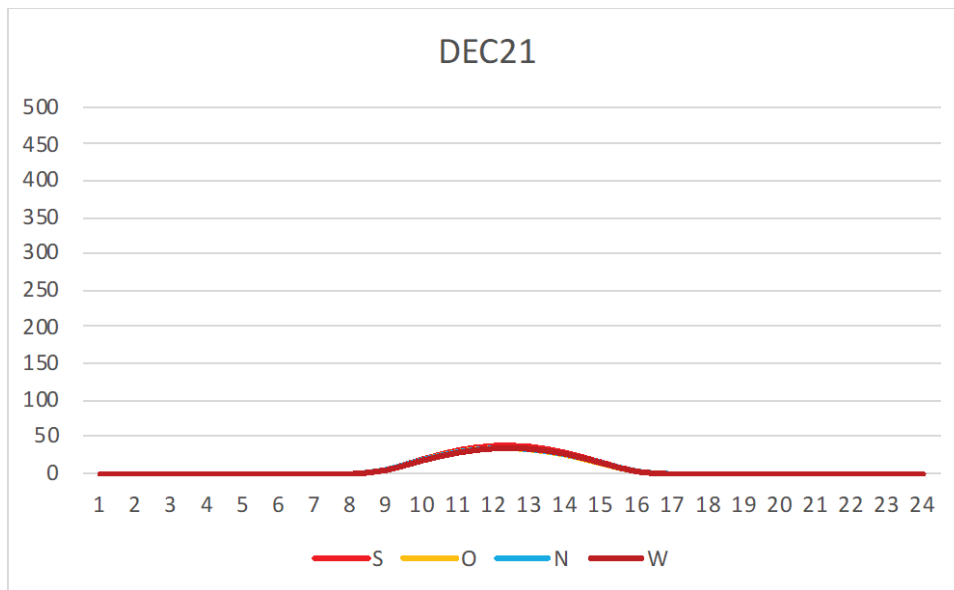


Abbildung 54: Klimadaten für Wien IWEC 110360, Globalstrahlung auf den vertikalen Oberflächen der Haupthimmelsrichtungen am 21. Dezember

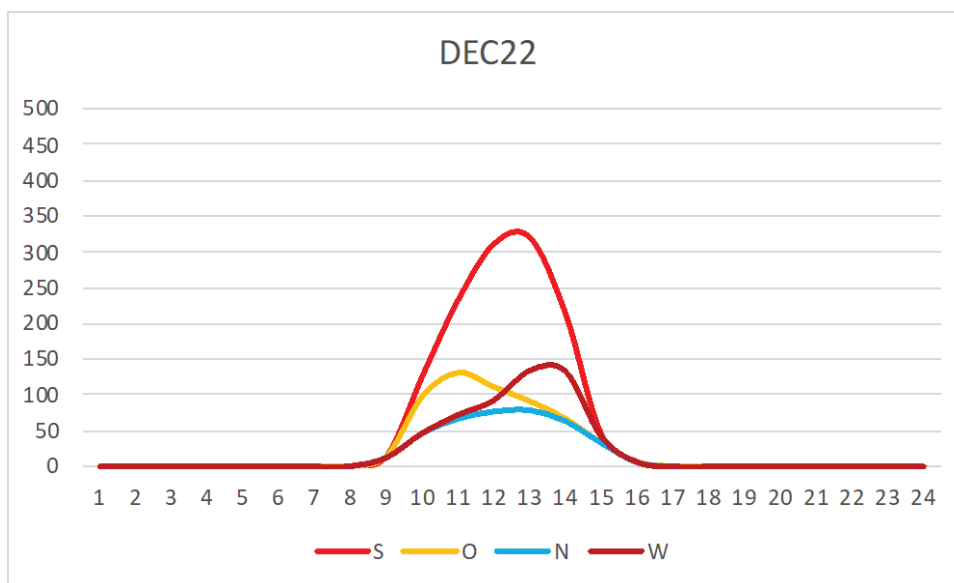


Abbildung 55: Klimadaten für Wien IWEC 110360, Globalstrahlung auf den vertikalen Oberflächen der Haupthimmelsrichtungen am 22. Dezember

Diese Strahlungssummen müssen nun in Photovoltaik-Strom umgewandelt werden. Lt. Tabelle 51 der ÖNORM H 5056-1:2019-01 ist für monokristallines Silicium der mittlere Wirkungsgrad des Moduls,  $\eta_{PVM} = 0,15$ . Der Systemwirkungsgrad berücksichtigt Leistungsverluste durch Überhitzung und kann bei der winterlichen Betrachtung abweichend von der ÖNORM auf 1,00 gesetzt werden.

Mit:

$Q_{PV}$	Photovoltaikertrag in Wh/t
t	betrachtete Zeitdauer, hier: 24h
$A_{PVM}$	wirksame Modulfläche in $m^2$
$\eta_{PVM}$	mittlerer Wirkungsgrad des Moduls, hier: 0,15
$f_{PVA}$	mittlerer Systemwirkungsgrad der Anlage, hier: 1,00
$I_{sol,t}$	Globalstrahlung unter Berücksichtigung von Orientierung und Neigung während der Zeitdauer t

dabei ist  $Q_{PV} = I_{sol,t} * A_{PVM} * \eta_{PVM} * f_{PVA}$  in Wh/t

Für die Modulfläche wird von einer Größe von 10 x 10 cm ausgegangen und dass jeweils das zweite Loch in beiden Achsrichtungen entsprechend des „weiten Bohrbildes“ mit einem PV- und Heizelement besetzt ist. Das ergibt 25 Elemente mit einer Modulfläche von jeweils 0,01  $m^2$ , siehe Abbildung 56.

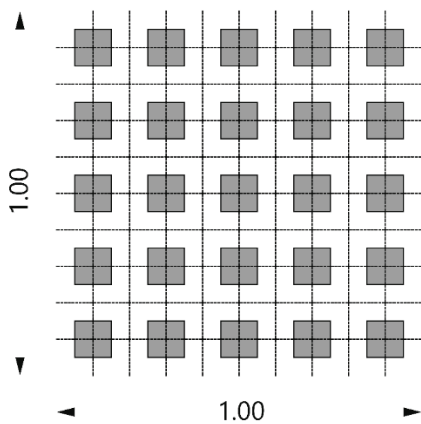


Abbildung 56: Belegung des „weiten Bohrbildes“ mit aktiven Elementen (Heizstäben)

Geht man von einer Speicherkapazität der Akkumulatoren von ca. 24h aus, dann errechnet sich die verfügbare Leistung  $P_{PV,24h}$ , die um ca. 12h versetzt über 24h zur Verfügung steht, mit:

$Q_{PV,i}$	Photovoltaikertrag in $Wh/m^2h$ innerhalb der Stunde i
n	Anzahl der Stunden i

dabei ist  $P_{PV,24h} = \sum(Q_{PV,i}) / n$  in  $W/m^2$

Die verfügbare Leistung  $P_{PV,24h}$  ist für die Tage 20. bis 22. Dezember pro Himmelsrichtung in Abbildung 57, Abbildung 58, Abbildung 59, und den zugehörigen Tabellen dargestellt. Um die Ergebnisse der Messanordnung „glas aktiv“ zu erreichen, wurde über die gesamte Messperiode (100%) 2,94W über den Heizdraht in das Mauerwerk eingebracht. Die Messanordnung „onoff“ zeigt, dass messbare Ergebnisse auch mit einem Teilbetrieb von nur 12% erreicht werden. Daher werden in den Grafiken und den Tabellen auch die mit der eingestrahlten Energiemenge möglichen Betriebszeiten angegeben. Diese 12% Teilbetrieb werden nur am kürzesten und offenbar sehr bewölkten 21. Dezember unterschritten. An den beiden anderen, dem vorhergehenden und dem nachfolgenden Tag, werden sie in alle Himmelsrichtungen gut eingehalten bzw. deutlich überschritten. Diese Werte sind ohne Verschattungen aber auch ohne Verbesserungen, wie leichtes Schrägstellen der Module ermittelt worden.

Tabelle 13: Strahlungssummen und mögliche Energieausbeute auf Basis der Klimadaten für Wien IWEK 110360, entsprechend den Haupthimmelsrichtungen am 20. Dezember, detailliert

	S	O	N	W	
1	0	0	0	0	Wh/m2h
2	0	0	0	0	Wh/m2h
3	0	0	0	0	Wh/m2h
4	0	0	0	0	Wh/m2h
5	0	0	0	0	Wh/m2h
6	0	0	0	0	Wh/m2h
7	0	0	0	0	Wh/m2h
8	0	0	0	0	Wh/m2h
9	9,022	8,966	8,536	8,480	Wh/m2h
10	39,634	37,534	31,769	32,495	Wh/m2h
11	206,176	120,178	63,095	70,229	Wh/m2h
12	338,901	114,985	77,269	95,484	Wh/m2h
13	469,315	89,268	77,004	160,161	Wh/m2h
14	400,763	70,027	65,910	217,602	Wh/m2h
15	182,750	46,557	45,668	147,580	Wh/m2h
16	12,349	10,317	10,474	12,455	Wh/m2h
17	0	0	0	0	Wh/m2h
18	0	0	0	0	Wh/m2h
19	0	0	0	0	Wh/m2h
20	0	0	0	0	Wh/m2h
21	0	0	0	0	Wh/m2h
22	0	0	0	0	Wh/m2h
23	0	0	0	0	Wh/m2h
24	0	0	0	0	Wh/m2h
	<b>1658,91</b>	<b>497,83</b>	<b>379,73</b>	<b>744,49</b>	Wh pro Tag
	69,1	20,7	15,8	31,0	Wh/m2 pro Stunde ....W/m2
f_PVA	1	1	1	1	
eta_PVM	0,15	0,15	0,15	0,15	
Q_m2	10,368	3,111	2,373	4,653	W/m2
A_PVM	0,01	0,01	0,01	0,01	m2
#_PVM	25	25	25	25	Stk
A_ΣPVM	0,25	0,25	0,25	0,25	m2
Q_PVM	2,592	0,778	0,593	1,163	W einen Tag lang
Q_24h	2,94	2,94	2,94	2,94	W einen Tag lang
aktiv_max	88	26	20	40	% von 24h
power per element	0,691	0,207	0,158	0,310	W/module
power per field	<b>17,280</b>	<b>5,186</b>	<b>3,955</b>	<b>7,755</b>	W/m2
	S	O	N	W	



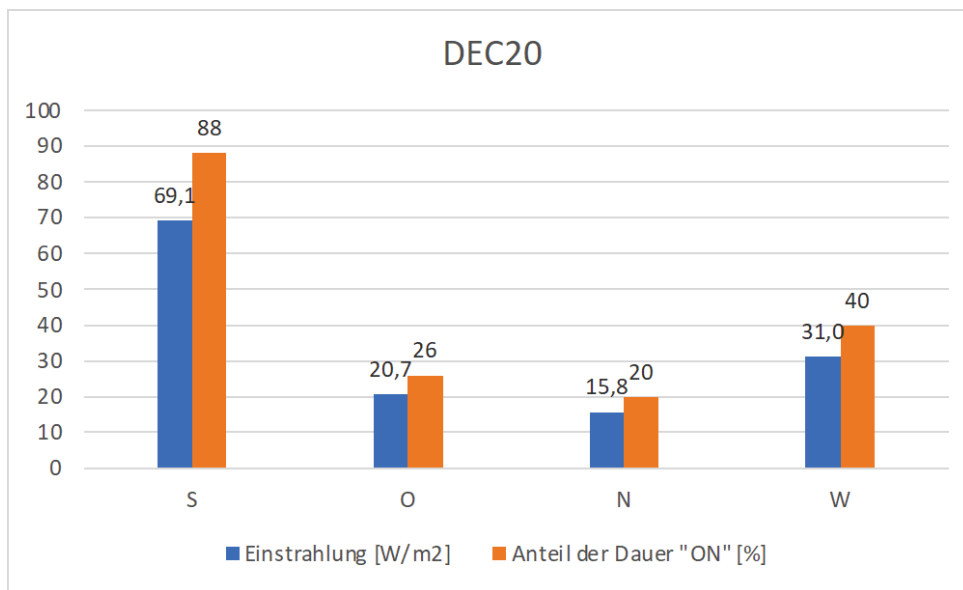


Abbildung 57: Strahlungssummen und mögliche Energieausbeute auf Basis der Klimadaten für Wien IWEC 110360, entsprechend den Haupthimmelsrichtungen am 20. Dezember

Tabelle 14: Strahlungssummen und mögliche Energieausbeute auf Basis der Klimadaten für Wien IWEC 110360, entsprechend den Haupthimmelsrichtungen am 21. Dezember, detailliert

	S	O	N	W	
1	0	0	0	0	Wh/m2h
2	0	0	0	0	Wh/m2h
3	0	0	0	0	Wh/m2h
4	0	0	0	0	Wh/m2h
5	0	0	0	0	Wh/m2h
6	0	0	0	0	Wh/m2h
7	0	0	0	0	Wh/m2h
8	0	0	0	0	Wh/m2h
9	5,479	5,445	5,371	5,336	Wh/m2h
10	19,238	18,895	17,937	18,063	Wh/m2h
11	31,110	29,814	28,020	28,739	Wh/m2h
12	37,147	34,804	32,953	34,425	Wh/m2h
13	35,921	33,216	31,977	33,875	Wh/m2h
14	28,117	26,044	25,536	27,166	Wh/m2h
15	15,166	14,354	14,320	14,981	Wh/m2h
16	3,282	3,198	3,229	3,259	Wh/m2h
17	0	0	0	0	Wh/m2h
18	0	0	0	0	Wh/m2h
19	0	0	0	0	Wh/m2h
20	0	0	0	0	Wh/m2h
21	0	0	0	0	Wh/m2h
22	0	0	0	0	Wh/m2h
23	0	0	0	0	Wh/m2h
24	0	0	0	0	Wh/m2h
	<b>175,46</b>	<b>165,77</b>	<b>159,34</b>	<b>165,84</b>	Wh pro Tag
	7,3	6,9	6,6	6,9	Wh/m2 pro Stunde ....W/m2
f_PVA	1	1	1	1	
eta_PVM	0,15	0,15	0,15	0,15	
Q_m2	1,097	1,036	0,996	1,037	W/m2
A_PVM	0,01	0,01	0,01	0,01	m2
#_PVM	25	25	25	25	Stk
A_ΣPVM	0,25	0,25	0,25	0,25	m2
Q_PVM	0,274	0,259	0,249	0,259	W einen Tag lang
Q_24h	2,94	2,94	2,94	2,94	W einen Tag lang
aktiv_max	9	9	8	9	% von 24h
power per element	0,073	0,069	0,066	0,069	W/module
power per field	<b>1,828</b>	<b>1,727</b>	<b>1,660</b>	<b>1,728</b>	W/m2
	S	O	N	W	

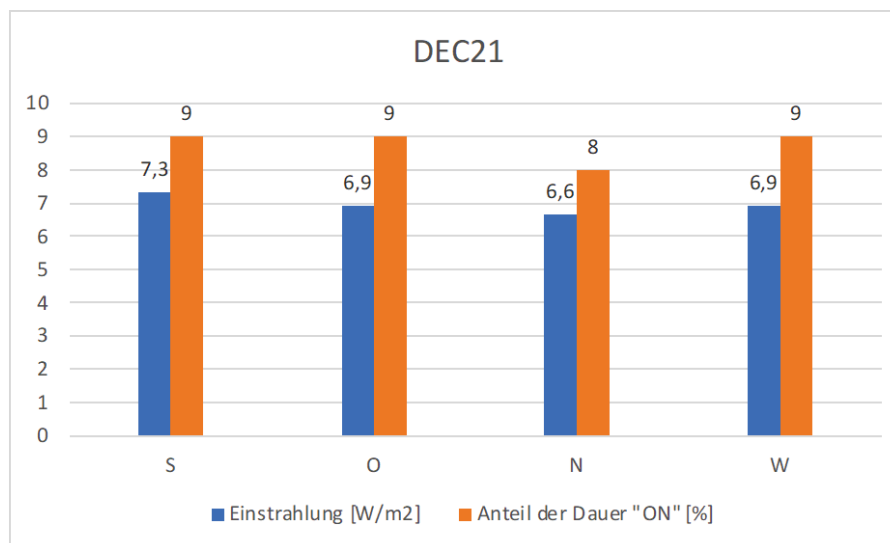


Abbildung 58: Strahlungssummen und mögliche Energieausbeute auf Basis der Klimadaten für Wien IWEC 110360, entsprechend den Haupthimmelsrichtungen am 21. Dezember

Tabelle 15: Strahlungssummen und mögliche Energieausbeute auf Basis der Klimadaten für Wien IWEC 110360, entsprechend den Haupthimmelsrichtungen am 22. Dezember, detailliert

	S	O	N	W	
1	0	0	0	0	Wh/m2h
2	0	0	0	0	Wh/m2h
3	0	0	0	0	Wh/m2h
4	0	0	0	0	Wh/m2h
5	0	0	0	0	Wh/m2h
6	0	0	0	0	Wh/m2h
7	0	0	0	0	Wh/m2h
8	0,541	0,532	0,539	0,529	Wh/m2h
9	14,248	14,176	12,609	12,520	Wh/m2h
10	126,032	98,856	45,346	46,964	Wh/m2h
11	233,111	132,188	65,416	72,503	Wh/m2h
12	311,757	111,972	75,096	92,650	Wh/m2h
13	321,039	91,930	76,875	133,970	Wh/m2h
14	214,097	67,255	62,012	133,243	Wh/m2h
15	44,589	32,724	32,176	41,851	Wh/m2h
16	6,213	5,824	5,886	6,192	Wh/m2h
17	0	0	0	0	Wh/m2h
18	0	0	0	0	Wh/m2h
19	0	0	0	0	Wh/m2h
20	0	0	0	0	Wh/m2h
21	0	0	0	0	Wh/m2h
22	0	0	0	0	Wh/m2h
23	0	0	0	0	Wh/m2h
24	0	0	0	0	Wh/m2h
	<b>1271,63</b>	<b>555,46</b>	<b>375,96</b>	<b>540,42</b>	Wh/m2 pro Tag
	53,0	23,1	15,7	22,5	Wh/m2 pro Stunde ....W/m2
f_PVA	1	1	1	1	
eta_PVM	0,15	0,15	0,15	0,15	
Q_m2	7,948	3,472	2,350	3,378	W/m2
A_PVM	0,01	0,01	0,01	0,01	m2
#_PVM	25	25	25	25	Stk
A_ΣPVM	0,25	0,25	0,25	0,25	m2
Q_PVM	1,987	0,868	0,587	0,844	W einen Tag lang
Q_24h	2,94	2,94	2,94	2,94	W einen Tag lang
aktiv_max	68	30	20	29	% von 24h
power per element	0,530	0,231	0,157	0,225	W/module
power per field	<b>13,246</b>	<b>5,786</b>	<b>3,916</b>	<b>5,629</b>	W/m2

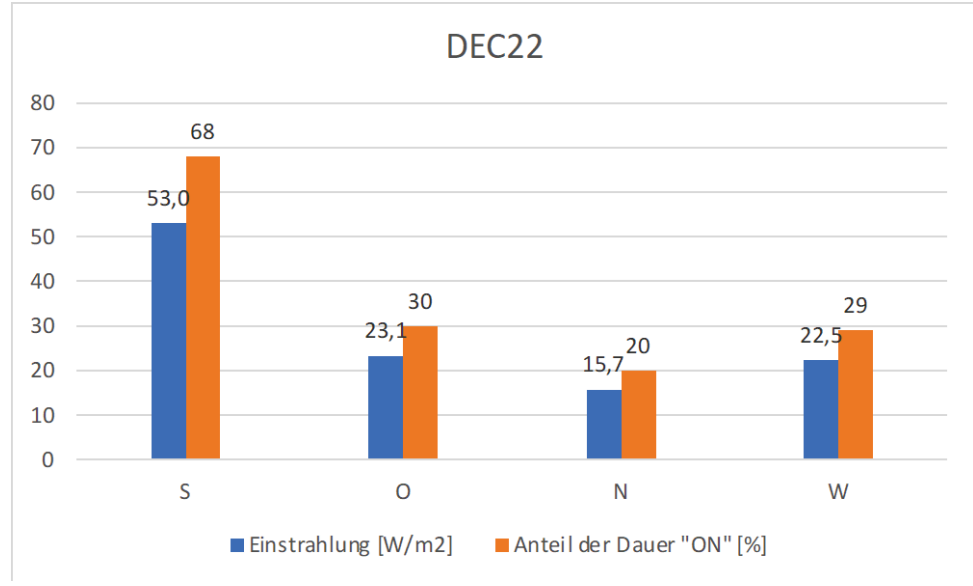
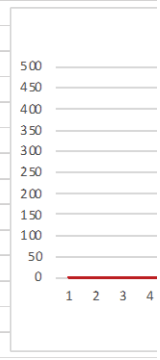


Abbildung 59: Strahlungssummen und mögliche Energieausbeute auf Basis der Klimadaten für Wien IWEC 110360, entsprechend den Haupthimmelsrichtungen am 22. Dezember

## 4.5. Entwurf autonomer Roboter zur Durchführung der Sanierungen

Die ursprünglich verfolgte Idee war zur Umsetzung der Sanierung, autonome, fassadenkletternde Roboter einzusetzen, da die vorgeschlagene Form der Sanierung ein hohes Maß an Differenzierung der Maßnahmen erfordert, sei es, um statisch-konstruktive Besonderheiten des Mauerwerks zu berücksichtigen, sei es, um dessen baulichen Zustand oder die Geometrie der Ornamentik zu berücksichtigen. Da es heute selbstverständlich ist, solche Technologien möglichst CO<sub>2</sub>-arm und klimaneutral zu entwickeln, war von vornherein klar, dass die Betriebsenergie erneuerbar bereitzustellen ist. Das Grundkonzept ging davon aus, sämtliche für den Sanierungsvorgang selbst erforderliche Energie über Solarenergie zu gewinnen. Dabei würden wir davon ausgehen, dass bei einem voll automatisierten Bauprozess, die Bauzeit eine geringere Rolle spielt und sich an die witterungsbedingte Verfügbarkeit von Sonnenenergie gut anpassen kann. So werden die Roboter bei einem Schaltwert von 250W/m<sup>2</sup> im Jänner nur drei Stunden oder auch gar nicht aktiv sein können, während sie im Juni acht Stunden aktiv wären, siehe Abbildung 60. Wenn die Einheiten vollständig autonom bleiben sollen, bedeutet das, dass jeder Roboter seine eigene solare Versorgung mittragen würde und diese Energie zumindest in geringen Mengen auch speichert. Schon auf Grund des Speichers erschien es sinnvoll die Energieproduktion und -speicherung von den Robotern zu trennen. Für die Dauer der Baustelle (ev. auch darüber hinaus) soll daher in günstiger Lage eine Photovoltaikanlage errichtet werden. Weiters kann zentral unter Dach ein Energiespeicher eingerichtet werden. Die Spinnen-Roboter bleiben auf diese Weise mit dem Dach verbunden und seilen sich von den Gesimsen beginnend ab. Damit werden sie auch vor dem Absturz gesichert, siehe Abbildung 61.

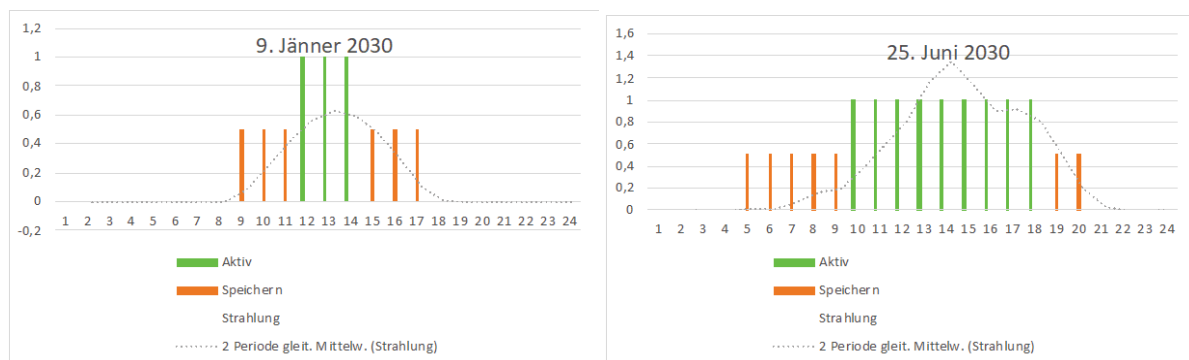


Abbildung 60: Strahlungs- und witterungsabhängige Aktivität der Roboter

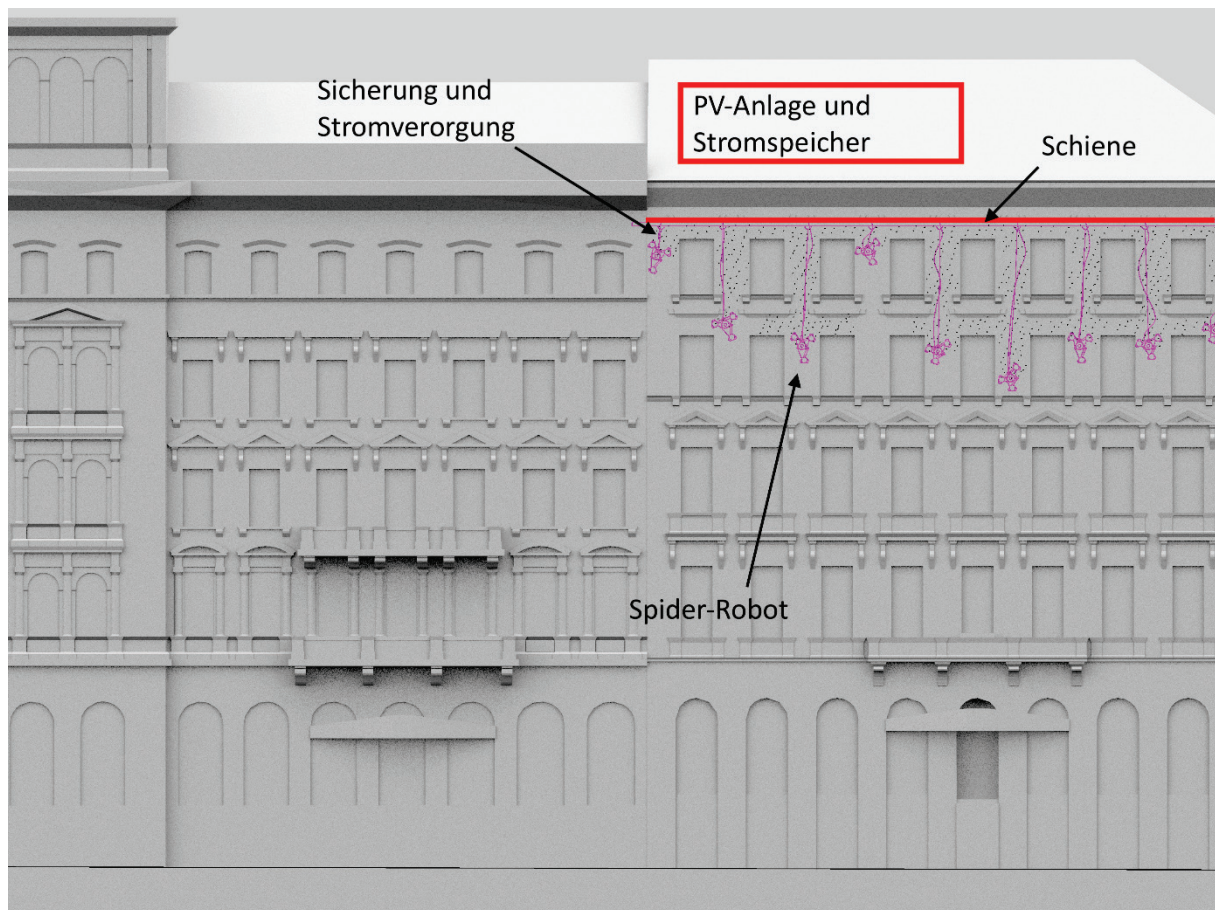


Abbildung 61: Konzept des automatisierten Sanierungsprozesses

Durch dieses Konzept muss nicht für jede Bewegung gebohrt werden. Der Aufbau des Roboters selbst sieht zwei Basis-Füße vor und einen Fuß, der die Bewegung vorantreibt. Mittig sitzen der Bohrer und eine Vorrichtung zur Bestückung oder Befüllung der Löcher, siehe Abbildung 62 und Abbildung 63. Um die Beweglichkeit und Mobilität des Konzepts zu überprüfen, wurden Studien nach dem Prinzip der Inverse Kinematik durchgeführt, siehe Abbildung 64.

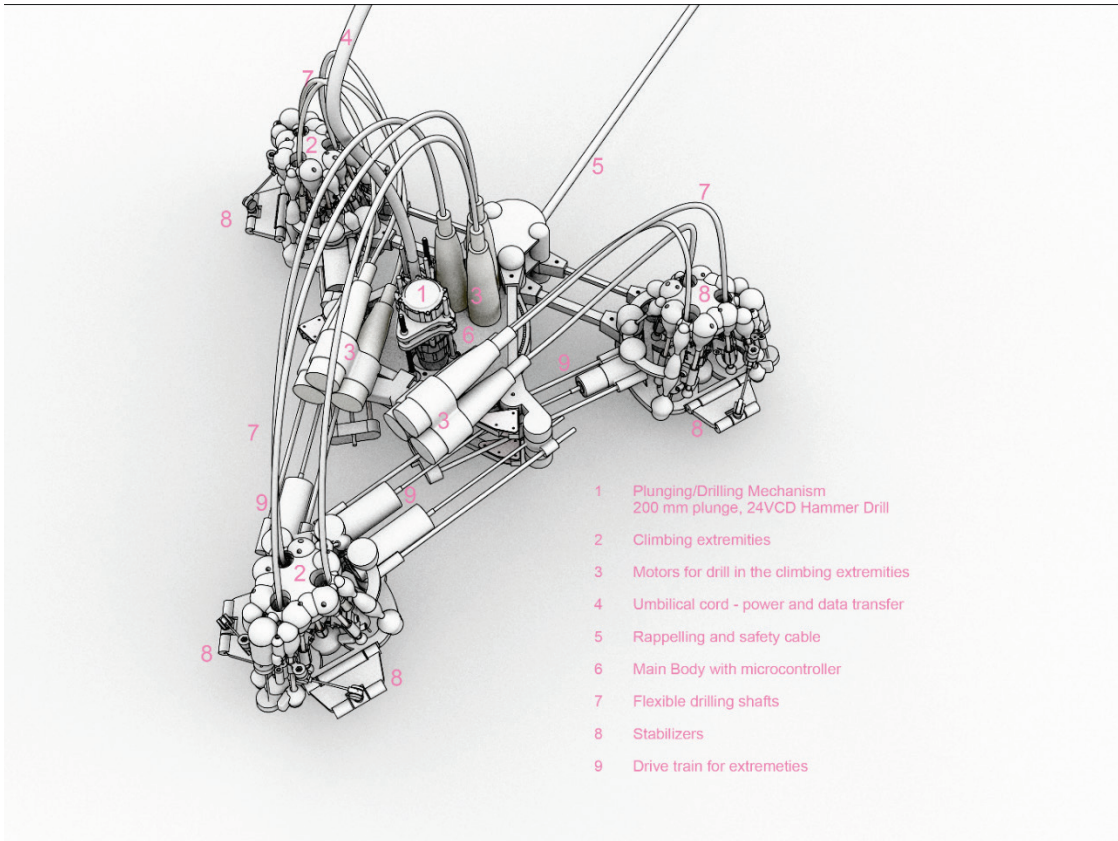


Abbildung 62: Aufbau des Spinnenroboters Aufsicht

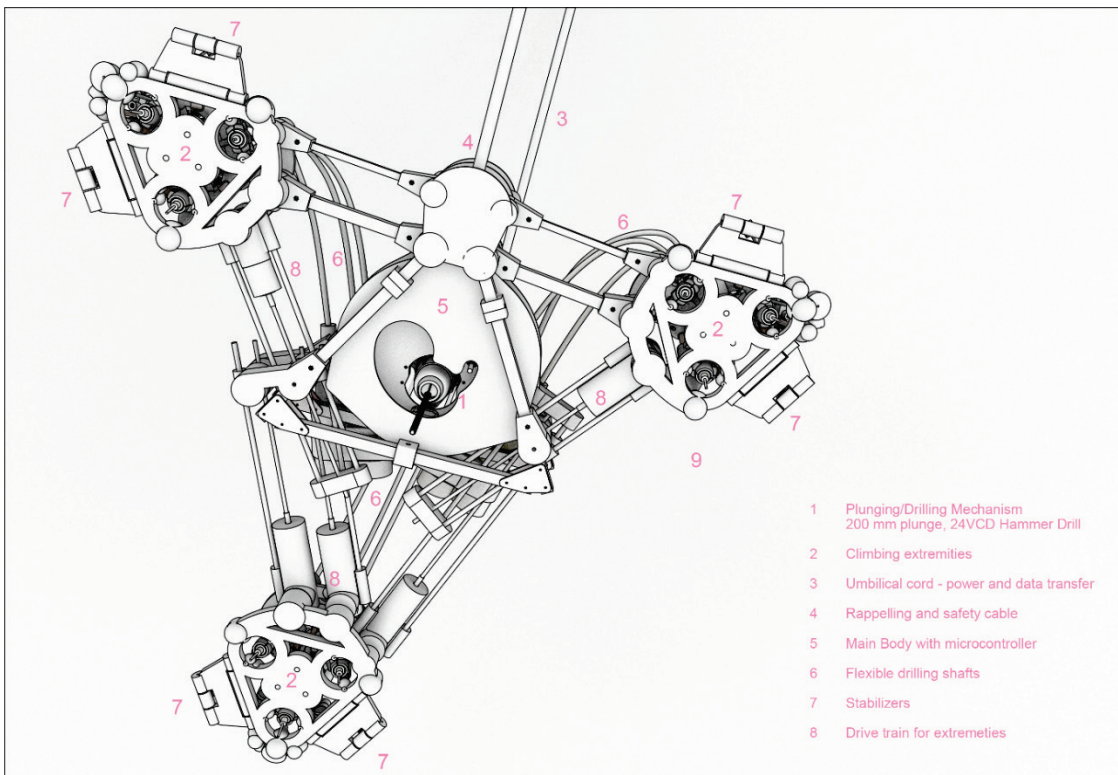


Abbildung 63: Aufbau des Spinnenroboters Untersicht

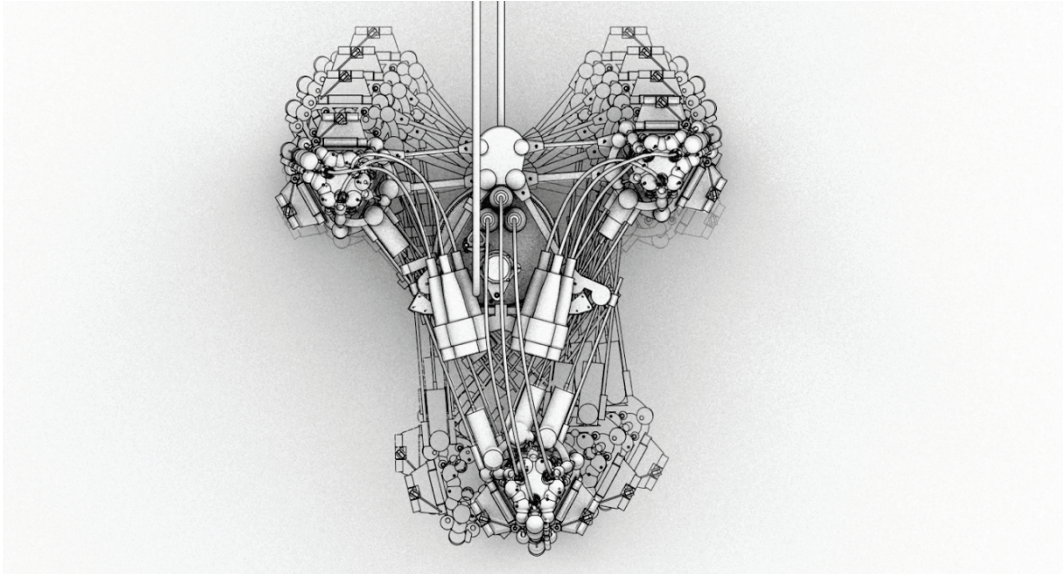


Abbildung 64: Bewegungsstudie, Simulation mittels Inverser Kinematik

Die Planung des Spinnenroboters erfolgte in allen Bereichen parametrisiert, sodass eine flexible Entwicklung möglich war. *Grasshopper* ist ein graphischer Algorithmus-Editor, entwickelt von David Rutten, der eng in die CAM-Software *Rhino* integriert ist.<sup>xxi</sup>

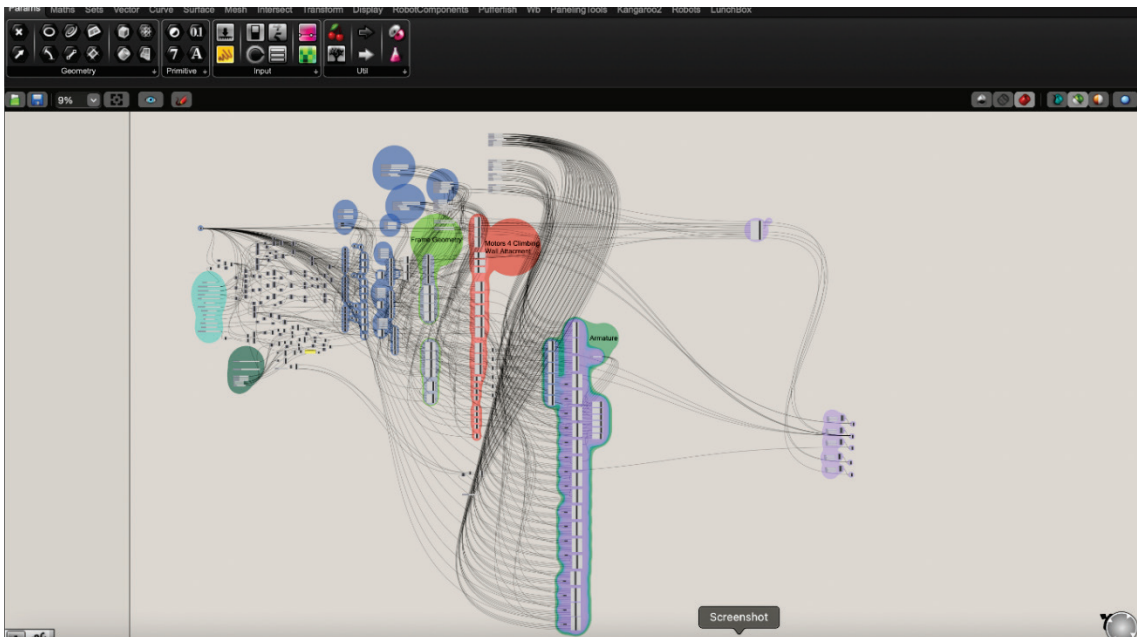


Abbildung 65: Übersicht grafisches Skript

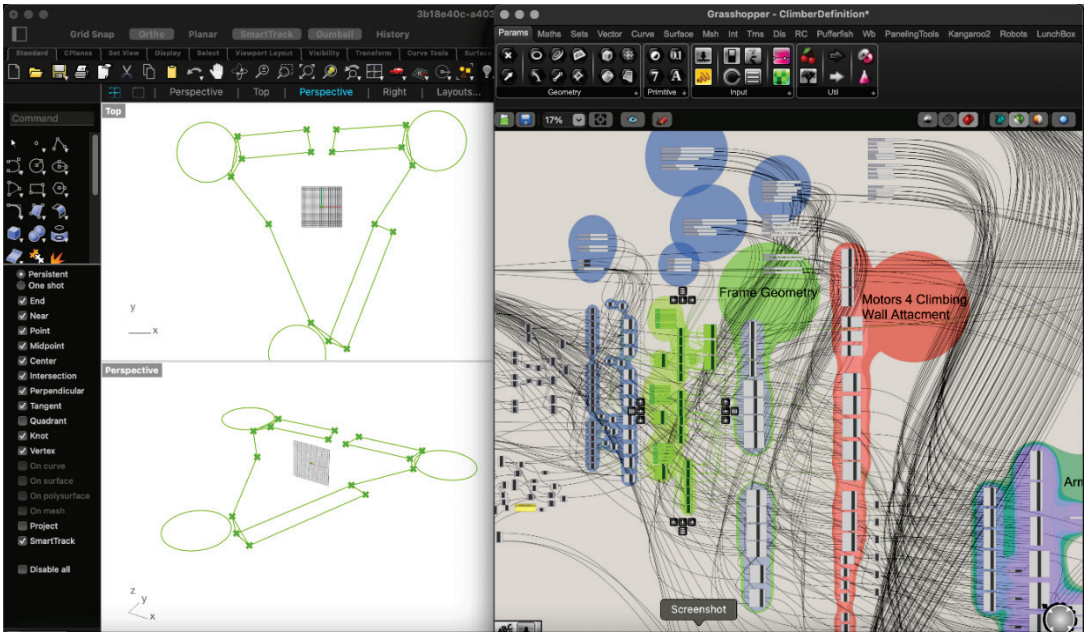


Abbildung 66: Übersicht grafisches Skript und Visualisierung

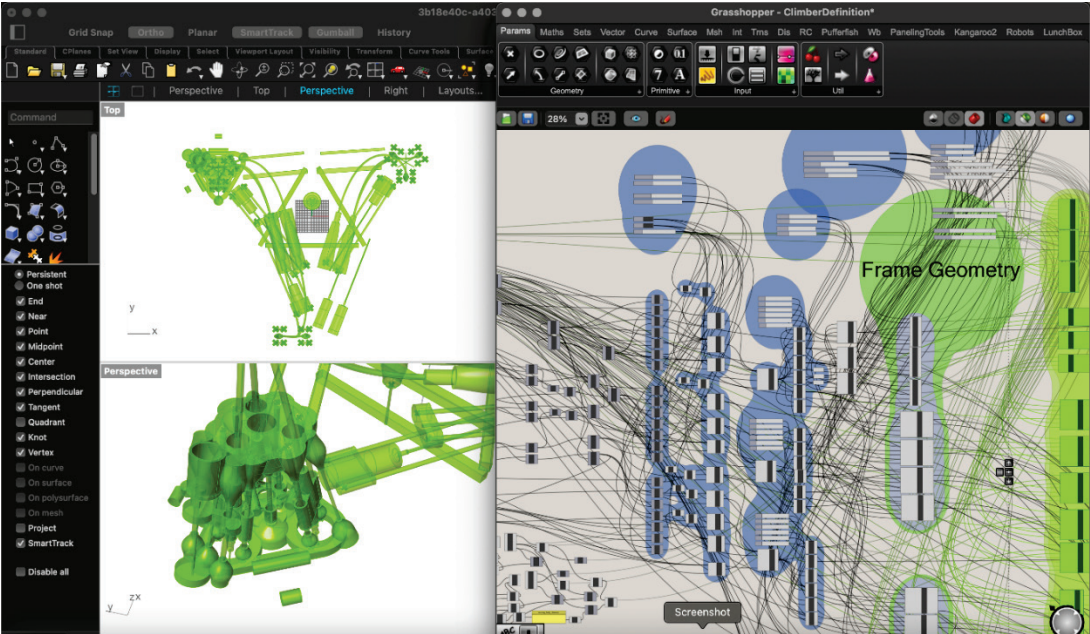


Abbildung 67: Frame Geometry



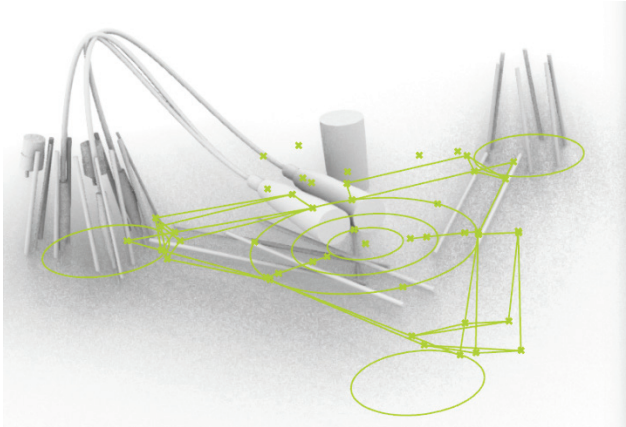


Abbildung 68: Kinematik, Visualisierung

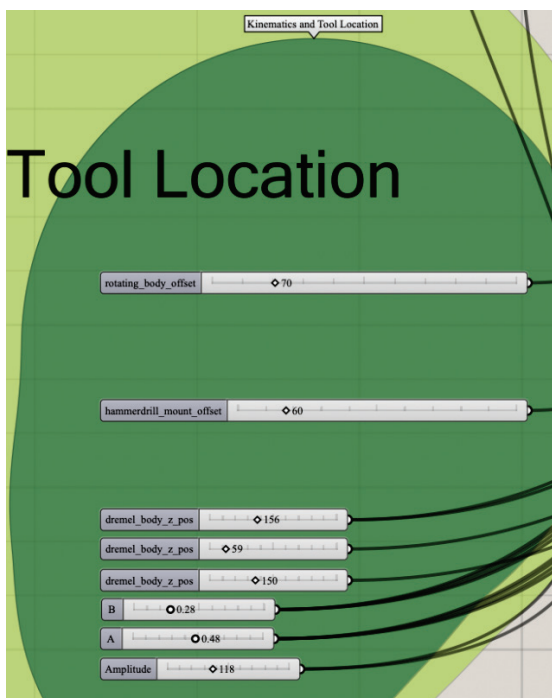


Abbildung 69: Kinematik, Parameter

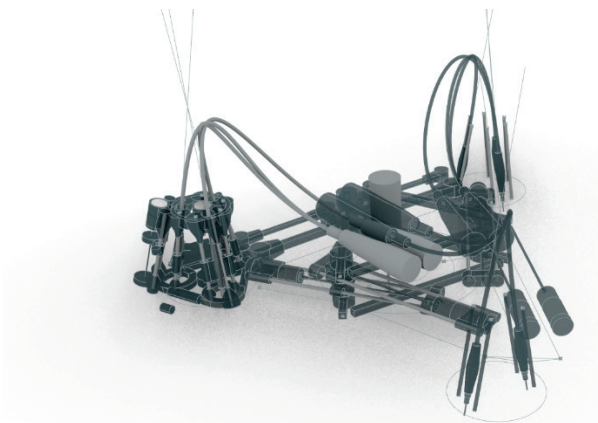


Abbildung 70: Visualisierung Main Parts



Abbildung 71: Roboterfuß, fertig zum Drucken



Abbildung 72: Roboterfuß, Einzelteile, in-house Druck



Abbildung 73: Roboterfuß, Einzelteile, in-house Druck



Abbildung 74: Roboterfuß, Einzelteile, in-house Druck



Abbildung 75: verbauter Aktuator

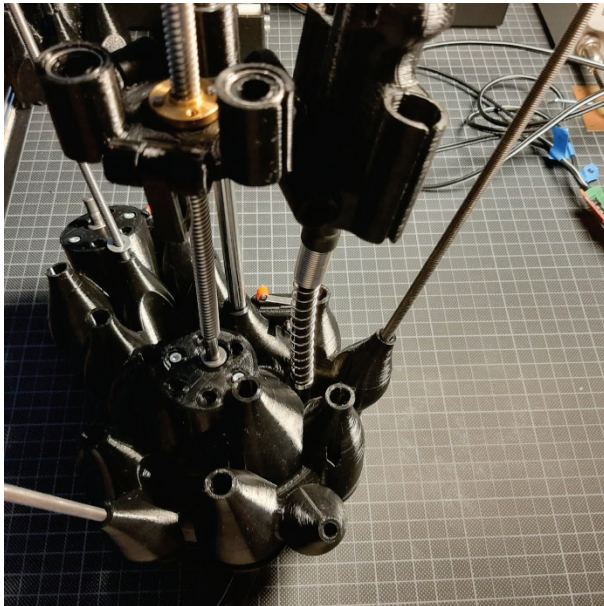


Abbildung 76: Roboterfuß, Einzelteile, in-house Druck



Abbildung 77: Roboterfuß, zusammgebaut

# 5 Ergebnisse

## 5.1. Bohrloch-Studie

Das Porosifizieren des Mauerwerks selbst hat beschränkte Wirkung und dürfte in etwa 80% weniger Wärmeverluste bedeuten, auch wenn die Messungen selbst, im Gegensatz zu den Berechnungen, Anlass zu etwas mehr Hoffnung geben. Die Auswirkung von PCM, Phase Changing Materials, ist gering anzusehen. Am interessantesten ist das Bestücken der Fassade mit aktiven Elementen. Das ist auch vor der Notwendigkeit zu beurteilen, Photovoltaik in die Fassade zu integrieren. Für die Klimaneutralität des gründerzeitlichen Bestandes würden die gelochten Fassaden dennoch Bedeutung haben. Die in Abbildung 78 dargestellten gemessenen Verbesserungen lassen sich prozentuell darstellen.

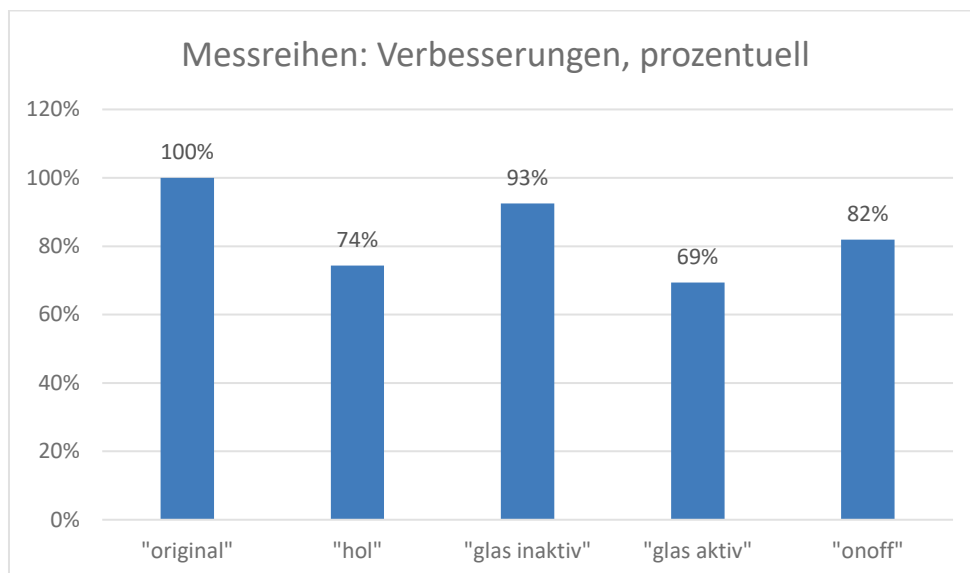


Abbildung 78: Messreihen: Verbesserungen

Nimmt man davon nur den Wert für die unbeheizten Löcher, also eine Verbesserung auf 74%, an und geht man von einer Sanierung von Kellerdecke und oberster Geschoßdecke auf ein Zehntel ihres bisherigen Wärmedurchgangskoeffizienten aus, sowie für die Fenster einen  $U_w$ -Wert von  $0,75 \text{ W/m}^2\text{K}$  an, dann lässt sich der Heizwärmebedarf am Standort von durchschnittlich  $197 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  auf  $71 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  reduzieren. Für den gesamten gründerzeitlichen Bestand verringert sich der  $\text{CO}_2$ -Ausstoß von  $2,09 \text{ Mt/a}$  auf  $0,95 \text{ Mt/a}$ . Belegt man aber nun von diesen unbeheizten Löchern in einem Abstand von durchschnittlich  $10 \times 10 \text{ cm}$  („weites Bohrbild“) jedes zweite mit einem  $10 \times 10 \text{ cm}$  Photovoltaik Modul, so würde man bei einer mittleren Einstrahlung von  $750 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  hinreichend Strom produzieren, um die Wärmepumpen zu betreiben, die den verbleibenden Heizwärmebedarf decken können. Damit wäre zumindest für die Heizwärme die Klimaneutralität erreicht. Die Dachflächen wären nun frei, um Strom für den Haushalt und die Beleuchtung zu produzieren.

Vor der Sanierung, davon ausgehend, dass kaum eines dieser Häuser thermisch verbessert wurde, ergeben sich die Kennwerte laut Tabelle 16.



Wärmepumpen. COP steht für „Coefficient of Performance“ und bezeichnet die Effizienz der Wärmepumpe. Der COP-Wert gibt das Verhältnis von Wärmeleistung und der dazu erforderlichen Antriebsenergie (Strom) an.<sup>xxii</sup> Der COP-Wert muss unter der Angabe einer minimalen Außentemperatur und einer maximalen Vorlauftemperatur des Heizsystems angegeben werden. Den Autoren liegen Angaben unter der Bedingung vor, dass eine Außenlufttemperatur von 7°C (=A7)n erreicht wird und die Vorlauftemperatur der Heizung 35°C (=W35) nicht überschreitet. Die Autoren gehen bei dieser Abschätzung also davon aus, dass die durch die Sanierungsmaßnahmen verringerte Heizleistung ein Beheizen mit so geringen Temperaturen, wie sie Wärmepumpen, sollen sie ökologisch und ökonomisch sinnvoll sein, liefern, erlaubt.

Tabelle 19: Heizwärmebedarf des gesamten gründerzeitlichen Bestandes Wiens, Sanierung ohne opaken Anteil der Fassaden

				g/kWh							
				247							
Klasse	84,9923							Sanierung			
	HMFRef_SK							1 (=vor 1900)	2 (=1900-1945)		
	[kWh/m2a]			kWh/a	TWh/a	t/a	M/a				
A++	10	0	1					AW	1	1,55	1,5
A+	15	0	1					KD	0,1	0,125	0,12
A	25	0	1					OD	0,1	0,075	0,12
B	50	0	1					FE	0,3	0,75	0,75
C	100	1	0	4.610.397.623	4,61	1.138.768	1,14				
D	150	1	0								
E	200	1	0								
F	250	1	0								
G	> 250										
					4,61		1,14				
					8,46	< as of now >	2,09				
					Δ HMB		Δ CO2				
					3,85	< saved >	0,95				
					46%		46%				
Belegung der opaken Fassaden mit PV-Modulen				25%							
mittlere Einstrahlung in kWh/m2a				750	725.609.765			COP	6,35		

Die Wärmepumpen müssten ohne Bohrungen in den Wänden (Porosifizierung) einen COP (A7/W35) von 6,35 aufweisen, ein Wert, für den die von der Salzburger Landesregierung veröffentlichte Produktdatenbank [www.produktdatenbank-get.at](http://www.produktdatenbank-get.at) derzeit nur zwei Geräte angibt, siehe Abbildung 79. Die besten gängigen Wärmepumpen haben laut dieser Datenbank einen COP (A7/W35) von 5,5.



hinzurechnen. Demgegenüber kann der erzeugte Strom direkt mit dem Heizwärmebedarf in Beziehung gesetzt werden und ein CO<sub>2</sub>-neutraler Betrieb erreicht werden.

## 5.2. Gesamtenergieausweis

Besonders hervorzuheben ist auch der auf den Daten der Mehrzweckkarte beruhende Gesamtenergieausweis für die gründerzeitlichen Häuser Wiens und der mit diesem Tool geschaffenen Möglichkeit, schnell und interaktiv die Auswirkung von Verbesserungsmaßnahmen an der Gebäudehülle zu untersuchen und die Verschränkung der technisch-konstruktiven Lösungen mit einem Gestaltungskonzept.

## 5.3. Programmziele und baukulturelle Attraktivität

Lt. Homepage der FFG soll das Programm „Stadt der Zukunft“ einen Transformationsprozess in Richtung nachhaltig ausgerichtete, zukunftsfähige Städte einleiten. Die „Stadt der Zukunft“ soll optimierte Energie- und Ressourceneffizienz mit hoher Attraktivität für BewohnerInnen und Wirtschaft verbinden.<sup>xxiv</sup> Darauf geht diese Sondierung insofern in einzigartiger Weise ein, als sie nicht nur einen Weg zur Reduktion von Wärmeverlusten bei gleichzeitig einsetzender Energieproduktion aufzeigt, sondern indem sie Attraktivität auch unter einem baukünstlerischen Gesichtspunkt deutet. Während Otto Wagner bei der Postsparkasse, siehe Abbildung 80, den Eindruck vorgehängter Elemente erzeugt - ohne dass die Nieten tatsächlich eine konstruktive Funktion hätten<sup>xxv</sup>, werden bei der in dieser Sondierung vorgeschlagenen Gestaltung funktionale Elemente zum Ornament, ohne ihre Funktionsfähigkeit einzubüßen. Das System selbst ist hinreichend generisch, um durch seine Pixel-Ästhetik eine Vielzahl von Ausdrucksmöglichkeit zu erlauben. Die im Zuge der Sondierung entwickelte Gestaltung folgt dem Kraftverlauf oder weicht diesem vielmehr aus, siehe Abbildung 81.





Abbildung 80: 1906, Otto Wagner, Postsparkasse, Neubau, Fassade mit Scheinnieten, Foto: Gerd Eichmann, (CC-Lizenz, Wikimedia)



Abbildung 81: 2022, Renovierung, Fassade mit aktiven Photovoltaik-Modulen

## 6 Schlussfolgerungen

Zwar konnte in dieser Untersuchung kein (vor)schnell umsetzbares Ergebnis vorgestellt werden. Der Hinweis auf Redundanzen im gründerzeitlichen Mauerwerk und dass diese energetisch genützt werden können, erscheint aber dennoch wesentlich. Besonders interessant erscheint hier die stärkere Nutzung der solaren Einstrahlung bis hin zur aktiven Nutzung. Dieser Ansatz ist aus Sicht der Autoren eine weitere Untersuchung wert. Wichtig ist dabei auch die Möglichkeit, eine zweite ornamentale Ebene mit dieser neuen funktionalen Schicht zu schaffen. Das Bestücken der Fassade mit aktiven Elementen ist auch vor der Notwendigkeit zu beurteilen, Photovoltaik in die Fassade zu integrieren, mit der Architektinnen und Architekten zunehmend konfrontiert sind, wenn die Europäischen CO<sub>2</sub>-Ziele erreicht werden sollen. Ganz im Sinne des Aufrufs der Präsidentin der Europäischen Kommission, Ursula von der Leyen am 23. Oktober 2020: *„Ich will, dass NextGenerationEU eine europäische Renovierungswelle auslöst und unsere Union zu einem Spitzenreiter in der Kreislaufwirtschaft macht. Aber dies ist nicht nur ein Umwelt- oder Wirtschaftsprojekt, sondern muss auch ein neues Kulturprojekt für Europa werden. Jede Bewegung hat ihr eigenes Gefühl. Wir müssen dem Systemwandel ein Gesicht verleihen – um Nachhaltigkeit mit einer eigenen Ästhetik zu verbinden.“*<sup>xxvi</sup>



Abbildung 82: Ästhetik der Nachhaltigkeit

Bei den vorliegenden Größenordnungen des Sanierungsaufwandes tausender von Häusern ist auch der hier entwickelte Ansatz einer robotergetriebenen Sanierung von Bedeutung. Das Team arbeitet derzeit an einem Antrag zur Fortsetzung dieser Forschungsbemühungen.

Die Projektergebnisse sind gerade durch die jüngsten, nun auch politisch erforderlichen, Anstrengungen zumindest im Gebäudesektor von fossilen Energieträgern unabhängig zu werden, für all jene eine Grundlage, die in der Gebäudesanierung neue Wege beschreiten wollen. Neben Architekt:innen sind dies alle weiteren an der Planung Beteiligten, sowie Eigentümer:innen und Förderstellen.

Das Interesse an dem Projekt ist nach wie vor hoch. Die jüngste Vorstellung der Sondierung in wissenschaftlichem Kontext fand am 7. April bei der 2nd *International Sustainable Energy Conference 2022* (ISEC) statt. Einem breiten Publikum wurde die Arbeit am 14.4.2022 durch die *Austria Presse Agentur* als Dossier zum *Bauen in Zeiten des Klimawandels* vorgestellt.<sup>xxvii</sup>



Abbildung 83: Ästhetik der Nachhaltigkeit

# 7 Ausblick und Empfehlungen

## 7.1. Empfehlungen für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten

Weiterführende Forschung muss sich auf zwei wesentliche Themen konzentrieren:

1. Fassadenintegrierte Photovoltaik
2. Automatisiertes Bauen in der Sanierung

ad 1. Wie immer erfolgreich die Europäische Sanierungswelle verlaufen wird, so bleibt Wärmezufuhr und immer öfter auch Kühlen ein notwendiger Faktor. Neben der Fernwärme und Biomasse, die durchaus Emissionen in Form von Feinstaub und Abgasen freisetzt und deren CO<sub>2</sub>-Neutralität allenfalls in der Bilanz liegt, bleiben die Wärmepumpen die sauberste Möglichkeit eines Heizsystems, das sich noch dazu gut mit Kühlung kombinieren lässt. So wie in der Mobilität spielt also die Elektrizität eine entscheidende Rolle. Aus unserem Gründerzeit-Energieausweis-Tool, wissen wir, dass an den Gründerzeithäusern ca. 31km<sup>2</sup> opake Fassadenflächen brach liegen. Wenn davon ein Viertel für die Stromproduktion aktiviert werden kann, kann man bei einer durchschnittlichen Strahlung von 750 kWh/m<sup>2</sup>a jenen fünften Anteil Strom produzieren, den diese Gebäude nach Sanierung zum Betrieb von Wärmepumpen benötigen. Auf diese Weise wären sie hinsichtlich des Wärmebedarfs tatsächlich CO<sub>2</sub>-neutral.

ad 2. Die mittlerweile auch durch die politische Situation (Unabhängigkeit von russischem Erdgas) erforderlich Geschwindigkeit beim Sanieren wird eine Unterstützung der bisherigen, konventionellen Bautätigkeit durch automatisierte Systeme erforderlich machen.

## 7.2. Potenzial für Demonstrationsvorhaben

Die Umsetzung eines Full-Scale-Demonstrationsobjektes sollte erst nach weiterführender Forschung, wie oben beschrieben, durchgeführt werden. Dann sollte die ausgearbeitete Idee aber zumindest an einem gesamten Gebäude oder an einem Häuserblock gezeigt werden.

# 8 Anhänge

**8.1. FFG873475-Anhang-III-Simulationen.pdf**

**8.2. FFG873475-Anhang-I-Gruenderzeit.pdf**

**8.3. FFG873475-Anhang-II-historischesMWK-Statik.pdf**

# 9 Verzeichnisse

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bevölkerung Wiens, Grafik nach STATISTIK AUSTRIA und [1].....	12
Abbildung 2: Peter Sandbichler, Fassadengestaltung, Mariahilfer Straße / Getreidemarkt, Wien 6. Bezirk, 2017, Foto Copyright: Günter Richard Wett, online veröffentlicht [2] .....	13
Abbildung 3: überwiegend gründerzeitliche Wohngebiete, MA 18; Referat Stadtforschung und Raumanalyse (Zahlen: Stand 1.1.2017) farbige oder dunkle Bereiche [1].....	14
Abbildung 4: Wärmeverlust eines Blockrandgebäudes .....	15
Abbildung 5: Gramazio & Köhler, Flight Assembled Architecture 2011 .....	17
Abbildung 6: University of Applied Arts vienna, University of Innsbruck, workshop, published on <i>suckerpunch</i> .....	18
Abbildung 7: 3D-Druck von Beton, <i>Fa. Baumit</i> .....	18
Abbildung 8: Viktoria Sandor, Studie zu bauphysikalischen Verbesserungen im städtebaulichen Maßstab unter Anwendung von Drohnen. ....	19
Abbildung 9: Dachkonstruktion File-to-Factory-to-site.....	19
Abbildung 10: Montageplan und automatisierte Planung inkl. Optimierungsschritten.....	20
Abbildung 11: File-to-Machine-to-site > automatisiert produzierte Deckengestaltung.....	20
Abbildung 12: Erläuterung 02/2013 zur OIB Richtlinie 1 wurde maßgeblich von Peter Bauer verfasst	21
Abbildung 13: in der o.a. Literaturliste zur OIB Richtlinie 1 war Peter Bauer maßgeblicher Autor der Quellen [4] und [6] .....	21
Abbildung 14: Zeitleiste typischer Geschoß- und Gebäudehöhen in Zusammenhang mit der baurechtlichen Entwicklung .....	25
Abbildung 15: Gründerzeitgebäude Datenmodell der Fassade, <i>1010 Wien, Fichtegasse/Kantgasse</i> ..	25
Abbildung 16: Rechteckige Fensteröffnung (Friedel, 1900; Fig. 808) .....	27
Abbildung 17: Gegenüberstellung Wiener und Berliner Bauordnung 1890 (Kolbitsch, 1989; Abb. 1.5) .....	27
Abbildung 18: Flussdiagramm zur Auswertung der Open Government Daten.....	28
Abbildung 19: Datensatz und Berechnung der Energiekennzahlen, jede Zeile repräsentiert ein Gründerzeit-Gebäude.....	29
Abbildung 20: Berechnungsergebnis für den gesamten gründerzeitlichen Bestand der Stadt Wien mit den OIB-Default-Werten, ohne Sanierung .....	29
Abbildung 21: Berechnungsergebnis für den gesamten gründerzeitlichen Bestand der Stadt Wien mit den erforderlichen U-Werten einer Sanierung mit dem Ziel einer 50% Reduktion von Verbrauch und Emission.....	29
Abbildung 22: Simulation 11, detaillierter Aufbau einer Ziegelwand mit Lagerfugen.....	31
Abbildung 23: <i>Bild 1 der ÖNORM B 3200:2016</i> , Datenreihe der Tab. A.1 der ÖNORM EN 1745, Wärmeleitfähigkeit von Mauerziegeln.....	32

Abbildung 24: Der Hoffmansche Ringofen ermöglichte eine sehr gleichmäßige Temperatur des Brandes (Friedel, 1900; Fig. 48a).....	32
Abbildung 25: bauteilbezogene Leitwerte in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit, Simulation eines Mauerwerksverbands mit <i>Antherm</i> .....	33
Abbildung 26: enges Bohrbild, mit welchem eine Optimierung der wärmetechnischen Performance zu erwarten ist (Rand-zu-Rand-Abstand 8mm). .....	34
Abbildung 27: zeigt eine statische Simulation dieses Bilds (Querzugspannungen). .....	35
Abbildung 28: Bohrer für das Aufweiten im Inneren einer Bohrung .....	35
Abbildung 29: „Hammerkopf“-Bohrungen.....	36
Abbildung 30: Isotherme Darstellung, Vollziegel-MWK, ohne und mit (rechts) Hammerkopf-Bohrung .....	36
Abbildung 31: Modellierung eines Mauerwerksverbandes mit Bohrungen .....	37
Abbildung 32: Simulation eines Mauerwerksverbandes mit Bohrungen .....	38
Abbildung 33: Solare Heizstäbe gekoppelt mit einem Mini-PV-Paneel .....	39
Abbildung 34: Aufbau der Heizstäbe.....	39
Abbildung 35: Gegenüberstellung der errechneten U-Werte bei unterschiedlichen Varianten .....	41
Abbildung 36: Fassade für In-Situ-Test, 1010 Wien, Parisergasse .....	41
Abbildung 37: Planausschnitt Original-Einreichplan Parisergasse, Baujahr 1908.....	42
Abbildung 38: „weites Bohrbild“, 100x100mm, 20mm Bohrdurchmesser.....	42
Abbildung 39: statisch-konstruktive Detailuntersuchung: Die Größenordnung der Spaltzugkräfte ist am oberen und unteren Lochrand, bedingt durch die kleinere, auf den verbliebenen Nettoquerschnitt bezogene Auslastung, um den Faktor $3.7/1.5 = 2.5$ (im Vergleich zum „engen Bohrbild“) kleiner und damit im Bereich der aufnehmbaren Spaltzugkräfte im Ziegelstein. ....	42
Abbildung 40: Modellierung der in-situ-Bauteile in Antherm (Fensterscheiben gehen bis Mitte Fenster, Erdreich 3m unter die Erde, Raum nicht unterkellert).....	43
Abbildung 41: Thermische Simulation des Ist-Zustandes .....	43
Abbildung 42: Parameter für in-situ-Messungen.....	45
Abbildung 43: Data Logger .....	45
Abbildung 44: Aufbau des Wärmefluss-Sensors .....	46
Abbildung 45: In Situ - Testfeld .....	46
Abbildung 46: Mess-Software und Netzgerät zur Simulation der Heizstäbe.....	46
Abbildung 47: Messprotokoll, „original“, unveränderte Situation des Bestandes .....	47
Abbildung 48: Messprotokoll „hol“, Bestandsmauerwerk mit 9 Löchern „weites Bohrbild“ .....	48
Abbildung 49: Messprotokoll „glas inaktiv“, Glasfiole in mittlere der 9 Bohrungen eingesetzt.....	48
Abbildung 50: Messprotokoll „glas aktiv“, Glasfiole beheizt (aktiv) .....	48
Abbildung 51: Messprotokoll „onoff“, Glasfiole 12% der Zeit aktiv .....	49
Abbildung 52: Grafische Darstellung der Messergebnisse.....	50
Abbildung 53: Klimadaten für Wien IWEC 110360, Globalstrahlung auf den vertikalen Oberflächen der Haupthimmelsrichtungen am 20. Dezember.....	52
Abbildung 54: Klimadaten für Wien IWEC 110360, Globalstrahlung auf den vertikalen Oberflächen der Haupthimmelsrichtungen am 21. Dezember.....	53

Abbildung 55: Klimadaten für Wien IWEC 110360, Globalstrahlung auf den vertikalen Oberflächen der Haupthimmelsrichtungen am 22. Dezember.....	53
Abbildung 56: Belegung des „weiten Bohrbildes“ mit aktiven Elementen (Heizstäben).....	54
Abbildung 57: Strahlungssummen und mögliche Energieausbeute auf Basis der Klimadaten für Wien IWEC 110360, entsprechend den Haupthimmelsrichtungen am 20. Dezember .....	56
Abbildung 58: Strahlungssummen und mögliche Energieausbeute auf Basis der Klimadaten für Wien IWEC 110360, entsprechend den Haupthimmelsrichtungen am 21. Dezember .....	57
Abbildung 59: Strahlungssummen und mögliche Energieausbeute auf Basis der Klimadaten für Wien IWEC 110360, entsprechend den Haupthimmelsrichtungen am 22. Dezember .....	58
Abbildung 60: Strahlungs- und witterungsabhängige Aktivität der Roboter .....	59
Abbildung 61: Konzept des automatisierten Sanierungsprozesses .....	60
Abbildung 62: Aufbau des Spinnenroboters Aufsicht .....	61
Abbildung 63: Aufbau des Spinnenroboters Untersicht .....	61
Abbildung 64: Bewegungsstudie, Simulation mittels Inverser Kinematik .....	62
Abbildung 65: Übersicht grafisches Skript .....	62
Abbildung 66: Übersicht grafisches Skript und Visualisierung.....	63
Abbildung 67: Frame Geometry.....	63
Abbildung 68: Kinematik, Visualisierung.....	64
Abbildung 69: Kinematik, Parameter .....	64
Abbildung 70: Visualisierung Main Parts.....	64
Abbildung 71: Roboterfuß, fertig zum Drucken .....	65
Abbildung 72: Roboterfuß, Einzelteile, in-house Druck .....	65
Abbildung 73: Roboterfuß, Einzelteile, in-house Druck .....	65
Abbildung 74: Roboterfuß, Einzelteile, in-house Druck .....	66
Abbildung 75: verbauter Aktuator .....	66
Abbildung 76: Roboterfuß, Einzelteile, in-house Druck .....	66
Abbildung 77: Roboterfuß, zusammengebaut .....	66
Abbildung 78: Messreihen: Verbesserungen .....	67
Abbildung 79: COP-Werte und andere Kennzahlen erhältlicher Luft/Wasser-Wärmepumpen .....	70
Abbildung 80: 1906, Otto Wagner, Postsparkasse, Neubau, Fassade mit Scheinnieten, Foto: Gerd Eichmann, (CC-Lizenz, Wikimedia) .....	72
Abbildung 81: 2022, Renovierung, Fassade mit aktiven Photovoltaik-Modulen.....	72
Abbildung 82: Ästhetik der Nachhaltigkeit.....	73
Abbildung 83: Ästhetik der Nachhaltigkeit.....	74



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einfluss der verschiedenen Gebäudehüllenelemente .....	16
Tabelle 2: vorliegende Ergebnisse .....	22
Tabelle 3: methodischer Ablauf .....	24
Tabelle 4: Mögliches Raumgewicht historischer Ziegelsteine .....	31
Tabelle 5: bauteilbezogene Leitwerte in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit, Simulation eines Mauerwerksverbands mit <i>Antherm</i> , Verbesserung durch Bohrungen .....	33
Tabelle 6: Hammerkopf-Studie mit Normalputz .....	36
Tabelle 7: Hammerkopf-Studie mit Aerogel-Putz .....	36
Tabelle 8: mittels thermischer Simulation berechnete Varianten .....	40
Tabelle 9: Untersuchte Bohrmuster .....	40
Tabelle 10: Beschreibung der gemessenen Manipulation .....	44
Tabelle 11: Prüfanordnungen und Messergebnisse.....	51
Tabelle 12: Strahlungssummen ungünstiger Tage auf Basis der Klimadaten für Wien IWEC 110360..	52
Tabelle 13: Strahlungssummen und mögliche Energieausbeute auf Basis der Klimadaten für Wien IWEC 110360, entsprechend den Haupthimmelsrichtungen am 20. Dezember, detailliert.....	55
Tabelle 14: Strahlungssummen und mögliche Energieausbeute auf Basis der Klimadaten für Wien IWEC 110360, entsprechend den Haupthimmelsrichtungen am 21. Dezember, detailliert.....	57
Tabelle 15: Strahlungssummen und mögliche Energieausbeute auf Basis der Klimadaten für Wien IWEC 110360, entsprechend den Haupthimmelsrichtungen am 22. Dezember, detailliert.....	58
Tabelle 16: Heizwärmebedarf des gesamten gründerzeitlichen Bestandes Wiens, U-Werte lt. Default-Werten des Leitfadens zu OIB-Richtlinie 6 .....	68
Tabelle 17: bestmögliche Sanierungsmaßnahmen; bei AW wurden die Feuermauern abgezogen. ....	68
Tabelle 18: mögliche Jahreserträge PV an den Gründerzeitfassaden.....	68
Tabelle 19: Heizwärmebedarf des gesamten gründerzeitlichen Bestandes Wiens, Sanierung ohne opaken Anteil der Fassaden .....	69
Tabelle 20: Heizwärmebedarf des gesamten gründerzeitlichen Bestandes Wiens, Sanierung mit Porofizierung des opaken Anteils der Fassaden.....	70

## Literaturverzeichnis

---

- <sup>i</sup> <https://waymo.com>
- <sup>ii</sup> [www.meixner.com/de/photogrammetrie/drohnen-uav](http://www.meixner.com/de/photogrammetrie/drohnen-uav), abgerufen am 14.2.2019
- <sup>iii</sup> [www.vermessung-angst.com/leistungen](http://www.vermessung-angst.com/leistungen), abgerufen am 14.2.2019
- <sup>iv</sup> [www.chip.de/news/3D-Drucker-baut-ein-Haus-in-24-Stunden-Der-Preis-ist-unschlagbar-und-macht-Mut\\_135927528.html](http://www.chip.de/news/3D-Drucker-baut-ein-Haus-in-24-Stunden-Der-Preis-ist-unschlagbar-und-macht-Mut_135927528.html), abgerufen am 14.2.2019
- <sup>v</sup> [gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/273.html](http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/273.html), abgerufen am 14.2.2019
- <sup>vi</sup> [dieangewandte.at/ausstellungen/robotic\\_woodcraft](http://dieangewandte.at/ausstellungen/robotic_woodcraft), abgerufen am 14.2.2019
- <sup>vii</sup> [www.suckerpunchdaily.com/2014/04/16/robotic-infiltrations](http://www.suckerpunchdaily.com/2014/04/16/robotic-infiltrations), abgerufen am 14.2.2019
- <sup>viii</sup> [baunit.at/baunit-bauminator](http://baunit.at/baunit-bauminator), abgerufen am 14.2.2019
- <sup>ix</sup> [www.vikisandor.com/plot](http://www.vikisandor.com/plot), abgerufen am 14.2.2019
- <sup>x</sup> Sommer, B., Sommer-Nawara, M. (2011), *Free-Form Design by Data-Driven Components*, CONVR 2011: Proceedings of the 11th Int. Conf on Constr. Applications of VR, Verlag der Bauhaus-Universität Weimar
- <sup>xi</sup> Sommer, B., Sommer-Nawara, M., Data-Driven Design, in: Building Information Modelling for Life Cycle Structures. Praxisreport 2013, NWV Verlag GmbH
- <sup>xii</sup> [https://www.data.gv.at/katalog/dataset/stadt-wien\\_baublckewien](https://www.data.gv.at/katalog/dataset/stadt-wien_baublckewien), abgerufen am 14.2.2019
- <sup>xiii</sup> [www.antherm.eu](http://www.antherm.eu), abgerufen am 14.2.2019
- <sup>xiv</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/Hoffmannscher\\_Ringofen](https://de.wikipedia.org/wiki/Hoffmannscher_Ringofen), abgerufen am 1.11.2024 20:53
- <sup>xv</sup> Gierga, M. and Meyer, U. (2012), *Bauen im Bestand – Materialkennwerte von historischem Ziegelmauerwerk. Mauerwerk*, 16: 201-205. <https://doi.org/10.1002/dama.201200545>
- <sup>xvi</sup> Pech, Michael, et al.: Ziegel im Hochbau. Basel, 2015, S.20
- <sup>xvii</sup> Kornicki Dienstleistungen in EDV & IT: Handbuch Wärmebrücken & Dampfdiffusionsbrücken – Programm AnTherm. Wien 2020
- <sup>xviii</sup> Estévez Cimadevila, J., Otero Chans, D., Martín Gutiérrez, E., Vázquez Rodríguez, J. (2012), *Constr. and Bldg. Mat.*, 30, 583-589.
- <sup>xix</sup> greenTEG AG: Kurzübersicht: U-Wert Kit Software Version 1.01.05. 2016  
(Dokument: greenTEG\_U-Value-Software v1 01 05\_Übersicht.pdf)
- <sup>xx</sup> wie oben.
- <sup>xxi</sup> siehe auch: [www.grasshopper3d.com](http://www.grasshopper3d.com), abgerufen am 26.4.2022
- <sup>xxii</sup> <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/c/cop-wert.html>, abgerufen am 26.4.2022 16:13
- <sup>xxiii</sup> <https://www.produktdatenbank-get.at>, abgerufen am 26.4.2022 09:54
- <sup>xxiv</sup> <https://www.ffg.at/8-Ausschreibung-stadt-der-zukunft>, abgerufen am 26.4.2022 12:22

---

<sup>xxv</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/Wiener\\_Postsparkasse#cite\\_note-3](https://de.wikipedia.org/wiki/Wiener_Postsparkasse#cite_note-3) am 26.4.2022 13:34

<sup>xxvi</sup> [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/speech\\_20\\_1655](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/speech_20_1655), abgerufen am 29.9.2021 19:42

<sup>xxvii</sup> <https://science.apa.at/mehrzumthema/bauen-in-zeiten-des-klimawandels> abgerufen am 26.4.2022 12:22

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

+43 800 21 53 59

[servicebuero@bmk.gv.at](mailto:servicebuero@bmk.gv.at)

[bmk.gv.at](http://bmk.gv.at)