

Diplomarbeit

# Thermische Auswirkungen von bodengebundener Fassadenbegrünung

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads  
Diplom-Ingenieur  
eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bauingenieurwissenschaften

---

Diploma Thesis

## Thermal impact of soil-bound facade greening

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of  
Diplom-Ingenieur  
of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

von

**Mateusz Cebula**

Matr.Nr.: 01327733

Betreuung: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Azra Korjenic  
Dipl.-Ing. Erich Streit BSc  
Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie  
Forschungsbereich Ökologische Bautechnologien  
Technische Universität Wien,  
Karlsplatz 13/207, 1040 Wien, Österreich

Wien, Jänner 2023

---

## Danksagung

Vor allem möchte ich mich bei meinen Eltern für ihre Erziehung und die mir vermittelten Werte bedanken. Ihre Unterstützung hat mir geholfen, ein erfülltes Leben zu führen und an mich selbst zu glauben. Ich weiß es zu schätzen, dass ich die Möglichkeit hatte, meinen eigenen Weg zu gehen.

An dieser Stelle möchte ich mich auch bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Azra Korjenic, Dipl.-Ing. Erich Streit BSc und Alexander Pichlhöfer für ihre Betreuung und Unterstützung bedanken, die ich während des Verfassens meiner Diplomarbeit erhalten habe.

Auch mir selbst möchte ich für meine Motivation danken, die ich immer in mir hatte, um mich an neuen Herausforderungen zu versuchen. Auch wenn ich verschiedene Erfahrungen in meinem Leben machen musste, habe ich nie aufgehört, die Schönheit des Lebens wahrzunehmen.

## Kurzfassung

### **Thermische Auswirkungen von bodengebundener Fassadenbegrünung**

In dieser Arbeit wurden die thermischen Auswirkungen verschiedener Kletterpflanze auf die bewachsenen Gebäude untersucht. Es wurden Messdaten von zwei Gebäuden mit unterschiedlichen Wandaufbauten in Wien während der Wintermonate ausgewertet und analysiert. Anhand der Auswertung konnten Erkenntnisse über den Wärmewiderstand der Kletterpflanzen herausgefunden werden. Der Wärmewiderstand der Kletterpflanze hat in Abhängigkeit der Dichte der Kletterpflanze und des Wandaufbaus  $0,492 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$  für eine ungedämmte und  $0,573 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$  für eine gedämmte Fassade betragen. Das hat eine Verbesserung des Wärmewiderstandes um 26% für die nicht wärmegeämmte Wand und 24% für die wärmegeämmte Wand bedeutet. Die Analyse der Außenoberflächentemperaturen hat ergeben, dass die Außenoberflächentemperatur der Fassade mit der Kletterpflanze im Mittel zwischen  $1,3\text{-}3,5^\circ\text{C}$  über die Wintermonate erhöht und dabei die Standardabweichung in den beiden Fällen reduziert wurde. Mithilfe der Software „WUFI Pro“ wurde eine Simulation zur Ermittlung des Wärmewiderstands für die untersuchten Wände durchgeführt. Die Ergebnisse der Simulation wurden dann mit den in situ Messungen verglichen. Es wird eine Abweichung zwischen den gemessenen und simulierten Werten festgestellt. Die größte Abweichung von 38% wurde für die Wand ohne eine Wärmedämmung festgestellt. Dies ist auf die abweichende tatsächliche Wärmeleitfähigkeit des Vollziegelmauerwerks zurückzuführen.

## **Abstract**

### **Thermal impact of soil-bound facade greening**

In this thesis the thermal effects of climbing plants on different buildings were investigated. Measurement data from two buildings with different wall structures in Vienna, Austria, obtained during the winter months, were analyzed. The thermal resistance of the climbing plant was  $0.492 \text{ m}^2\text{K/W}$  for an uninsulated facade and  $0.573 \text{ m}^2\text{K/W}$  for an insulated facade, also depending on the density of the climbing plant and the wall construction. This means a 26% improvement in thermal resistance for the non-insulated wall and 24% for the insulated wall. The analysis of the external surface temperatures shows that the façade with the climbing plant increases the mean value of the external surface temperature between  $1.3\text{-}3.5^\circ\text{C}$  over the winter months, reducing also the standard deviation. Using the software "WUFI Pro", a simulation was carried out to determine the thermal resistance of the walls. The results of the simulation were then compared to the in situ measurements. A deviation between the measured and simulated values was observed. The largest deviation of 38% was found for the wall without thermal insulation.

**Inhaltsverzeichnis**

1	Einleitung .....	2
1.1	Grundlagen .....	1
1.1.1	Thermischer Widerstand .....	1
1.1.2	Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand .....	2
1.2	Vorteile der Fassadenbegrünung .....	2
1.2.1	Beschattung durch die Vegetationsschicht .....	3
1.2.2	Wärmedämmung durch die Vegetationsschicht .....	4
1.2.3	Abkühlung durch Evapotranspiration .....	5
1.2.4	Schutz vor direkter Windeinwirkung .....	7
2	Stand der Forschung .....	7
2.1	Einfluss der Kletterpflanze auf die thermischen Eigenschaften eines Bauteils .....	8
2.2	Beschreibung der Begrünung anhand der gängigen physikalischen Parameter .....	14
3	Beschreibung der Gebäude .....	18
3.1	Kopalgasse .....	19
3.2	Muthgasse .....	21
3.3	Messtechnik und Messequipment .....	22
4	Auswertung des thermischen Widerstandes .....	22
4.1	Messdatenauswertung .....	23
4.2	Ergebnisse .....	24
4.3	Berechnung des Wärmewiderstandes der Kletterpflanze .....	27
4.4	Berechnung des Gesamt-Wärmedurchlasswiderstandes homogener Komponenten .....	27
4.5	Vergleich der gemessenen Außenoberflächentemperatur .....	29
5	Simulation der untersuchten Konstruktion in WUFI Pro .....	31
5.1	Muthgasse .....	31
5.2	Kopalgasse .....	37
5.3	Vergleich der Außenoberflächentemperaturen .....	43
5.4	Muthgasse - modifizierter Wandaufbau .....	45
5.5	Kopalgasse modifizierter Wandaufbau .....	49
6	Zusammenfassung und Ausblick .....	52
7	Anhang .....	55
7.1	Abbildungsverzeichnis .....	56
7.2	Tabellenverzeichnis .....	57
8	Literatur .....	58

## 1 Einleitung

Heutzutage steigt das Klimabewusstsein der Menschen immer mehr. Es wird darauf geachtet, was verbraucht und verzehrt wird. Viele Länder suchen intensiv nach alternativen Energiequellen um Klimaresilienz zu erreichen. Fassadenbegrünungen werden dabei eine relevante Rolle in der zukünftigen Entwicklung einer klimaresilienten und nachhaltigen Stadt spielen [1]. Allerdings darf nicht vergessen werden, dass die Gebäudebegrünung aus Fassaden-, Dach- und Innenraumbegrünung besteht und nur als Ganzes kann ihr Potential voll ausgeschöpft werden. Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von Grünflächen im städtischen Raum, bietet die Gebäudebegrünung eine wichtige Ergänzung zu anderen städtischen Grünflächen wie beispielsweise die Errichtung neuer Parks.

Die Begrünung von Fassaden, vor allem mit Efeu, hat eine lange Tradition und hat bereits in der Antike seine Anwendung gefunden. In späteren Architekturepochen sind hauptsächlich bodengebundene Begrünungen mit oder ohne Klettergerüst zu finden. Durch Architekten und Künstler wie Friedensreich Hundertwasser oder Patrick Blanc hat die Idee der Fassadenbegrünung in den letzten Jahrzehnten einen Aufschwung erfahren. Dank technischer Lösungen wird heutzutage eine Realisierung der Fassadenbegrünung einfacher umsetzbar, weswegen sie immer öfter in Städten gesehen werden kann. Allerdings fehlt es an einer Standardisierung und Verankerung im Bauhandwerk, die eine breitere Entwicklung ermöglichen würde. [1]

Fassadenbegrünungen haben nicht nur eine ästhetische Funktion, die zeigt, wie Architektur in Harmonie mit der Natur leben kann, sondern auch viele wichtige Funktionen für die Eigentümer, Nutzer als auch Investoren. Einige davon sind Verbesserungen des Mikroklimas, Reduktion von Feinstaub, O<sub>2</sub>-Produktion und CO<sub>2</sub>-Bindung [2]. Zusätzlich bewirken Fassadenbegrünungen einen Wasserrückhalt [3]. Dieser führt zu einer Pufferung des Abflusses bei Starkregenereignissen und entlastet die Kanalisation. Weitere erwähnenswerte Gründe sind die Reduktion der Lärmbelastung, Steigerung menschlicher Produktivität und Denkleistung in begrünten Umgebungen, Aktivierung ungenutzter urbaner Flächen als multifunktionale Oberflächen, Verbesserung der

Attraktivität von Gebäuden und Liegenschaften (Wertsteigerung), Reduktion von Betriebskosten (für Heizung und Kühlung – projektbezogen) [3], [4].

Ein weiterer Aspekt ist das Verhältnis von Stadt und Natur. Es sollte immer im Hinterkopf behalten werden, dass der Stadtraum den Naturraum verbraucht. Deshalb liegt es in der menschlichen Verantwortung angemessen zu handeln und eine Fehlentwicklung zu vermeiden. Um ökologische, klimatische und visuelle Folgen der Urbanisierung auszugleichen, sollte bei einer nachhaltigen Stadtentwicklung die entfallenen Vegetationsflächen durch begrünte Oberflächen ersetzen werden. Dank der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten der Gebäudebegrünung ist es möglich, ein ausgewogenes Gleichgewicht zwischen Natur und Stadt herzustellen. [5]

In weiterer Folge haben Fassadenbegrünungen Auswirkungen auf das Stadtklima, weil Temperaturspitzen durch ihre temperaturnivulierende Wirkung im Sommer gedämpft werden. Diese wird durch die Verschattungen der Oberflächen, den Wasserrückhalt und die Verdunstung erzeugt. Zusätzlich wird die Luftqualität durch die Kohlendioxidaufnahme, die Ausfilterung von Stäuben und Schadstoffen, sowie die Sauerstoffproduktion verbessert. Die weiteren Vorteile, bei denen Fassadenbegrünungen positiv wirken, sind der Schutz der Fassade vor UV-Strahlung und Niederschlägen, die Schallabsorption und Minderung der Schallreflexion. Der ästhetische Aspekt und die psychologisch-medizinische Wirkung werden dabei durch die Vermehrung und Diversifizierung des Grünangebots in der Stadt unterstützt. [5]

Das zentrale Thema dieser Arbeit ist die Untersuchung der thermischen Auswirkungen selbstklimmender, bodengebundener Kletterpflanzen. Die Forschungsfrage ist: Welchen Einfluss hat die bodengebundene Fassadenbegrünung auf den Wärmewiderstand des Wandaufbaus? Anhand der durchgeführten Messungen in Wien wurde der Wärmewiderstand der jeweiligen Gebäudehüllen während der Wintermonate berechnet. Anschließend wurde eine Simulation mit der Software „WUFI Pro“ durchgeführt, um die berechneten und simulierten Werte zu vergleichen.

## 1.1 Grundlagen

Die thermische Auswirkung der Kletterpflanzen auf die Gebäudehülle kann grundsätzlich mit Hilfe des Wärmewiderstands beschrieben werden. In diesem Kapitel werden alle Formeln beschrieben, die in der Auswertung und Simulation verwendet werden.

### 1.1.1 Thermischer Widerstand

Der thermische Widerstand oder absolute Wärmewiderstand beschreibt die Temperaturdifferenz, die sich in einem Material beim Durchfluss des Wärmestromes ergibt. Der Wärmewiderstand wird durch die Temperaturdifferenz pro Wärmestrom mit der Einheit [K/W] ausgedrückt [6].

$$R_{Th} = \frac{\Delta T}{\dot{Q}} \quad (1)$$

$R_{Th}$       Wärmewiderstand in K/W

$\Delta T$       Temperaturdifferenz z.B. zwischen Außen- und Innenwand in Kelvin

$\dot{Q}$       Wärmestrom in W

Der Wärmestrom (auch Wärmefluss) wird als die pro Zeiteinheit  $\Delta t$  übertragende Wärmeenergie  $Q$  definiert. Die Einheit des Wärmestromes ist Watt und entspricht 1 Joule pro Sekunde. Demnach wird ein Wärmestrom von einem Watt erbracht, wenn 1 Joule an Wärmemenge pro Sekunde umgesetzt wird. Die Voraussetzung für einen Wärmefluss ist eine Temperaturdifferenz. Aus der Praxis lässt sich feststellen, dass der Wärmestrom umso größer ist, je größer die Temperaturdifferenz ist. Somit kann der Temperaturunterschied als Maß für die Antriebsstärke des Wärmestromes angesehen werden. [7]

Die Richtung des Wärmeflusses kommt aus dem thermodynamischem Verständnis des Wärmebegriffs. Dies bedeutet, dass die Wärmeenergie immer nur von einem heißeren Gegenstand auf einen kühleren Gegenstand übertragen werden kann. Die Darstellung des Wärmeflusses im Teilchenmodell zeigt, dass die schnellen Teilchen des heißen Stoffes einen Teil ihrer Energie an die langsamen Teilchen des kühlen Stoffes abgeben und nicht umgekehrt. Somit

strömt Wärme immer von der Stelle höherer Temperatur zu Stelle der niedrigeren Temperatur. [7]

### 1.1.2 Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand

Laut DIN EN ISO 6946 [8] wird der Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand eines Bauteils aus homogenen Schichten mit der Formel (2) und (3) berechnet.

$$R_{\text{tot}} = R_{\text{si}} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{\text{se}} \quad (2)$$

$R_{\text{tot}}$  der Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand, in  $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$

$R_{\text{si}}$  der innere Wärmeübergangswiderstand, in  $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$

$R_1 \dots R_n$  die Bemessungs-Wärmedurchlasswiderstände jeder Schicht, in  $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$

$R_{\text{se}}$  der äußere Wärmeübergangswiderstand, in  $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ .

Der Wärmedurchlasswiderstand einer homogenen Schicht wird nach Formel (3) ermittelt.

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (3)$$

$R$  der Wärmedurchlasswiderstand, in  $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$

$d$  die Dicke der Baustoffschicht in der Komponente, in m

$\lambda$  die Bemessungs-Wärmeleitfähigkeit des Baustoffes, in  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ .

## 1.2 Vorteile der Fassadenbegrünung

Fassadenbegrünungen können als passive Systeme zur Energieersparung verwendet werden. Bei der Betrachtung der Vorteile durch Fassadenbegrünungen sind vier grundsätzliche Mechanismen ausschlaggebend: Beschattung durch die Vegetationsschicht, Wärmedämmung durch die Vegetationssicht, Abkühlung durch die Evapotranspiration und der Schutz vor direkter Windeinwirkung. [9]

### 1.2.1 Beschattung durch die Vegetationsschicht

Mit dem Beginn des neunzehnten Jahrhunderts wurden die ersten Arbeiten über thermische Einwirkungen verschiedener Pflanzen verfasst. Der Fokus dieser Arbeiten richtete sich auf die Begrenzung der Sonneneinstrahlung auf die Fassade, die Reduzierung der Kühllast und die Verbesserung der Innen- und Außentemperatur. [10]

Kölner [11] konnte feststellen, dass die natürliche Beschattung der Fassade die Energiekosten für die Gebäudekühlung reduziert und dieser Abkühlungseffekt hauptsächlich von der Blattdichte abhängig ist. Die Untersuchung wurde an zwei Gebäuden in Deutschland durchgeführt, um Auswirkungen von Fassadenbegrünungen zu erfassen. In beiden Fällen wurde der Efeu als Fassadenbegrünung verwendet. Die Fassade in Vaihingen hat eine Orientierung in Richtung Nordwesten. Die Fassade des Gebäudes in Stuttgart ist nach Südwesten ausgerichtet. Die Analyse der gemessenen Oberflächentemperaturen im Zeitraum von November bis Juli zeigte, dass die mittleren Temperaturdifferenzen der Nord-West Fassade zwischen dem begrünten und dem nicht begrünten Bereich während der Wintermonate 1-2°C betragen hat. Die lange Beschattungsdauer an der Nord-West Wand verursachen die sommerlichen Unterschiede von 1 °C. Die Auswirkung der Fassadenbegrünung an der ungedämmten Süd-West Wand war ausgeprägter als die Auswirkung an der Nord-West Wand. Hier betrug der Mittelwert der Oberflächentemperatur im Winter unter der Begrünung 2°C mehr. Aufgrund des Efeus auf der Süd-West Fassade ist die mittlere Temperatur unter der Begrünung während der Sommermonate um 3°C gesunken. [12]

Zusätzlich wurden Infrarotmessungen an einem alten Mühlgebäude in Deutschland durchgeführt, um den Wärmedämmungseffekt des Efeus zu bestimmen. Die Wand hat aus Vollziegelmauerwerk bestanden und war mit 30 cm dickem Efeu bedeckt, welcher ungefähr 100 Jahre alt war. Im Winter, an einem kalten Tag ohne Wind und Regeneinwirkungen, hat der Temperaturunterschied während der Untersuchungen zwischen der Fassadenoberfläche unter dem Efeu und der Blattemperatur des Efeus 3°C betragen. [11]

Anhand eines Simulationsmodells wurden die thermischen Auswirkungen des gemeinen Efeus an einer Doppelfassade untersucht [13]. Die Doppelfassaden bestehen aus Jalousien, die sich in einem hinterlüfteten Hohlraum der zweischaligen Fassade befinden. Die Jalousien schützen das Gebäude vor Überwärmung oder fungieren als Vorwärmer für die Lüftungsluft. Statt der Jalousie wurde die Kletterpflanze im Hohlraum montiert. Das Modell wurde entwickelt und durch Labortests validiert. Danach konnte der Einfluss der Kletterpflanzen auf die Effizienz der Doppelfassade im Vergleich zu den Jalousien analysiert werden. Es wurde festgestellt, dass die berechnete Temperatur jeder Schicht der Doppelfassade mit Kletterpflanze signifikant niedriger als bei der Doppelfassade mit Jalousie während Sommerbedingungen war. Bei derselben Sonneneinstrahlung steigt die Temperatur mit Jalousie doppelt so hoch an als mit Efeu. Darüber hinaus erreichte die Pflanzentemperatur nie mehr als 35°C während bei der Jalousie die Temperatur von 55°C überschritten werden konnte. Eine weitere positive Auswirkung der Kletterpflanze in der Doppelfassade ist eine Reduzierung der Kühlleistung um bis zu fast 20%. Ähnliche Resultate wurde auch im Energieverbrauch verzeichnet. [13]

### 1.2.2 Wärmedämmung durch die Vegetationsschicht

Vertikale Begrünungssysteme können bei der Reduzierung der Wärmeübertragung durch die Gebäudehülle helfen. Um die thermischen Auswirkungen des Wärmeüberganges durch die Wand zu bestimmen, wurde ein Experiment an einer Wand, die zu 0%, 50% und 90% mit einer Kletterpflanze bedeckt war, durchgeführt. Dieses Experiment wurde in Indonesien bei tropischem Regenwaldklima umgesetzt. Die Datenmessung erfolgte im Dezember. Es wurden nur Daten von klaren Tagen für die Analyse verwendet. Bei der Auswertung der Daten ist die Wärmestromdichte der nicht begrünten Wand um 2,1 W/m<sup>2</sup> aus dem Außenklima gestiegen, während die 50% begrünte Wand einen Wert von 1,81W/m<sup>2</sup> erreicht hat. Die Wärmestromdichte der 90% begrünten Wand beträgt 1,46W/m<sup>2</sup>. Die Ergebnisse des Experimentes haben bewiesen, dass die Fassadenbegrünung signifikant zur Verbesserung der wärmedämmenden Wirkung durch eine Reduzierung der Wärmestromdichte

führt. Bessere Resultate konnten erreicht werden, wenn die Abdeckung der Kletterpflanze 90 % der Fläche beträgt. [14]

Darüber hinaus haben die Studien von Köhler bezüglich der Vorteile der Fassadenbegrünung gezeigt, dass im Vergleich zur traditionellen Fassade, ein Oberflächentemperaturunterschied von 3 °C im Winter erreicht werden kann. Die begrünte Wand weist einen um 25% niedrigeren Wärmeverlust, für eine nach Norden ausgerichtete Fassade auf, wobei diese Verbesserung vom Wandaufbau abhängt. [11]

Zusätzlich erfolgte eine Messung der Wärmestromdichte im Sommer auf einem zweigeschossigen Gebäude, das mit Efeu bedeckt ist, um Kühlungseigenschaften des Efeus festzustellen. Die Tsinghua-Universitäts-Bibliothek befindet sich in Peking, China. Die Grünwand war nach Westen ausgerichtet. Für die Auswertung des Wärmestromes an der Innenseite der Wand wurden die Messdaten vom 24.07.1996 gewählt. Der maximale Wärmestrom der kahlen Wand erreichte einen Wert von 11,38 W/m<sup>2</sup>, während der maximale Wert der begrünten Wand bei 8,16 W/m<sup>2</sup> lag [15]. Somit reduziert der Efeu die Kühlleistung im Maximum um 28% an einem klaren Sommertag. [9]

### 1.2.3 Abkühlung durch Evapotranspiration

Evapotranspiration ist ein Prozess, der aus direkter Verdunstung (Evaporation) und Wasserabgabe durch Pflanzen und Tieren (Transpiration) besteht.

Nach Lexikon [16] gilt Folgendes:

*Die Evapotranspiration ist eine meteorologische Größe, welche die Gesamtsumme des Wasserverlustes in einem Gebiet an die Atmosphäre beschreibt. Sie setzt sich dabei zusammen aus der direkten, physikalischen Verdunstung d.h. Übergang des Wassers von flüssiger in die gasförmige Form von Land- und Wasserflächen hauptsächlich durch Sonneneinstrahlung und Wind sowie aus der Wasserabgabe in erster Linie von Pflanzen über die Spaltöffnungen ihrer Blätter und über die Wachsschicht.*

Die Verdunstungskühlung der Blätter ist unter anderem von der Pflanzenart und der Sonneneinstrahlung abhängig. Auch klimatische Bedingungen

beeinflussen den Vorgang, demnach kann sowohl eine trockene Umgebung als auch Windeinwirkung die Transpiration der Pflanzen erhöhen. [9]

Zusätzlich spielt das Substrat der Kletterpflanze bei der evapotranspirativen Kühlung auch eine Rolle. Messungen aus einem Projekt in Berlin, Adlershof, Deutschland haben gezeigt, dass eine Pflanzenkiste von ca. 1 m<sup>2</sup> und 40 cm Tiefe mit Substrat und zwei Wisteria-Pflanzen in Verbindung mit einer künstlichen Regenwasserbewässerung eine jährliche Evapotranspiration von ca. 2.000 l aufweist. Das entspricht einem energetischen Kühlungseffekt von 1483 kWh pro Jahr [11].

An der Universität von Brighton wurde ein Experiment mit einer doppelschaligen grünen Fassade durchgeführt. Die doppelschalige Grünfassade wurde an einem Fenster eines Büroraumes angebracht und mit einem anderen Referenzraum ohne Pflanzen verglichen [9]. „Bioshader“ bezeichnet, die biologischen Beschattungsvorrichtung für Gebäude. Diese nachhaltige Beschattungslösung besteht aus einer vertikalen Schicht aus laubabwerfenden Kletterpflanzen, die an einem Rankgerüst aus Metall hängen. Die Konstruktion wird außen an den Fenstern angebracht, sodass eine natürliche Belüftung garantiert ist. [17]

Das „Bioshader“ Experiment führt zur Schlussfolgerung, dass die Fassadenbegrünung die Feuchtigkeit vom Juli bis Oktober im Innenraum um 5-14% erhöht, im Vergleich zum Raum ohne begrünte Außenoberfläche. Zusätzlich wurde die Raumtemperatur durch den Bioshader an den meisten heißen Sommernachmittagen stark reduziert. Die maximale Temperaturabsenkung im „Bioshader“ Raum betragen 5,6°C. Im Zeitraum von Juli bis September wurden die Raumtemperaturen an jedem Sommernachmittag um mindestens 3,5°C gesenkt. [17]

Eine weitere Studie, in der eine Innen- und Außenbegrünung untersucht wurde, stellte fest, dass die Fassadenbegrünung, im Vergleich zu Innenraumbegrünung, mehr Vorteile in Sommer hat. Der Grund hierfür ist, dass zusätzlich zur Verdunstungskühlung der Pflanzen der Effekt der Schattenwirkung der Vegetationsschicht wirkt [9]. Beide Mechanismen können zu Energieeinsparungen beitragen.

#### 1.2.4 Schutz vor direkter Windeinwirkung

Kletterpflanzen wirken als Windschutz und verhindern, dass der Wind direkt auf die Fassade weht. Wie effektiv der Schutz ist, hängt von der Dichte der Kletterpflanze, der Durchlässigkeit des Laubes, der Ausrichtung der Fassade und vor allem der Richtung und der Geschwindigkeit des Windes ab.

Ein Test mittels einer Computersimulation wurde in den USA auf vier unterschiedlichen Gebäuden durchgeführt. Jedes Gebäude repräsentiert vier verschiedene Klimabedingungen. Das Ziel der Simulation war es den Einfluss der Vegetationsschicht aufgrund der Reduktion der Bestrahlungsstärke und des Windes auf den Energieverbrauch festzustellen. Diese, im Winter vorteilhafte Art von Bepflanzung soll die Windeinwirkung reduzieren und den solaren Zugang zu Süd- und Ostwänden erlauben. Dieses Prinzip gilt auch für gemäßigte Klimazonen, aber es ist zu beachten, dass der Wind im Sommer von der direkten Wirkung auf die Fassade nicht abgehalten wird. In heißen Klimazonen sollten stark verzweigte Schattenbäume und niedrige Bodenbedeckungen verwendet werden, um die Vorteile von Schatten und Wind zu nutzen. [18]

Einerseits lässt sich die Energieeffizienz eines Gebäudes durch den Schutz vor direkter Windeinwirkung auf die Fassade verbessern. Eine Fassadenbegrünung kann dabei als Lösung betrachtet werden. Im Winter spielt der kalte Wind eine entscheidende Rolle bei der Senkung der Raumtemperatur. Andererseits verursacht der Schatteneffekt, eine Erhöhung des Energieverbrauches, weil die Sonneneinstrahlung nicht direkt auf die Fassade wirkt. Demnach ist eine gute Planung der Fassadenbegrünung essentiell, damit es zu keiner Behinderung der Fassadenbelüftung im Sommer kommt und im Winter eine Zirkulation der Luft vermieden wird. [9]

## 2 Stand der Forschung

In diesem Kapitel werden einige veröffentlichte Publikationen, in denen thermische Auswirkungen der Kletterpflanzen auf die Gebäudehülle untersucht wurden, zusammengefasst. Die untersuchten Fassadenbegründungen und ihre thermischen Verbesserungen werden detailliert beschrieben.

Zuerst wird der Einfluss der Kletterpflanze auf die thermischen Eigenschaften eines Bauteils beschrieben. In veröffentlichten Untersuchungen werden Auswirkungen von bodengebundener Fassadenbegrünung hinsichtlich der Temperatur, des Wärmestromes und Wärmewiderstandes dargestellt.

Anschließend wird die Fassadenbegrünung anhand der physikalischen gängigen Parameter beschrieben. Schließlich wird ein Modell dargestellt, das bei der Auswertung der Messdaten in Wien genutzt wurde um den Wärmewiderstand der Kletterpflanze zu bestimmen.

## **2.1 Einfluss der Kletterpflanze auf die thermischen Eigenschaften eines Bauteils**

In diesem Kapitel werden Publikationen die bodengebundenen Fassadenbegrünungen behandeln, angeführt. Um die thermischen Eigenschaften der Kletterpflanzen darzustellen, werden sie mit Hilfe ihres Wärmewiderstands dargestellt. Oberflächentemperaturen und der Wärmestrom sind die wichtigen Faktoren, die den Wärmewiderstand zu definieren ermöglichen. Der Fokus dieser Diplomarbeit lag auf der Auswertung von Messdaten welche im Winter aufgezeichnet wurden. Weil zu dieser speziellen Forschungsfrage keine Literatur gefunden wurde, die sich mit Oberflächentemperaturen und den Wärmestrom der Kletterpflanzen im Winter beschäftigt, werden die Auswertungsergebnisse sowohl anhand von Sommerbeispielen als auch anhand Kletterpflanzen mit Rankhilfen im Winter verglichen.

Um Auswirkungen eines vertikalen Begrünungssystems auf das Innenraumklima und den Energieverbrauch von Gebäuden unter nassen und kalten Klimabedingungen im Winter zu beurteilen, wurde eine Studie in Hunan, China durchgeführt. Zwei gleich große Räume (3 m × 2.5 m × 3 m) wurden von Dezember 2017 bis Januar 2018 auf dem Dach eines Bürogebäudes untersucht. Ein Raum war mit Kletterpflanzen mit Rankhilfen versehen, während der andere Raum über keine Fassadenbegrünung verfügte und als Referenzraum diente. Die Fassadenbegrünung hat eine Luftschicht zwischen der Wand und den Pflanzen aufgewiesen. Zwei Versuchsszenarien wurden durchgeführt: Eine mit und eine ohne Heizung [19]. Die Ergebnisse zeigten, dass die vertikale

Begrünung unter ungeheizten Bedingungen die Temperaturschwankungen der Innenraumlufte deutlich verringert hat. Die Raumlufteemperatur im Raum mit vertikaler Begrünung war in der Nacht 1-3 °C höher als die des Referenzraums. In weiterer Folge wurden die Räume geheizt und der Wärmestrom durch die Außenwand von innen nach außen gemessen. Die Reduzierung des Wärmestroms um durchschnittlich 3,1 W/m<sup>2</sup> war auf die zusätzliche Wärmedämmung der vertikalen Begrünung zurückzuführen. [19]

In einer weiteren Arbeit wurde die thermische Auswirkung von Kletterpflanzen während des Sommers in Chicago analysiert [20]. Hierbei wurde ein Modell für die Beschreibung der thermischen Auswirkung der Kletterpflanze, bezüglich des Wärmestromes durch die Fassade, entwickelt. Die Analyse belegt, dass die Effekte durch Kletterpflanzen mit hohem Blattflächenindex am besten bei der Reduzierung der Oberflächentemperaturen und des Wärmestromes ausfallen. Die Simulation umfasste einen Zeitraum von 24h und zeigte die größte Abweichung zwischen den kahlen und der begrünten Wand am Nachmittag. Die ermittelte Reduktion der Außenoberflächentemperatur liegt an heißen, sonnigen Tagen bei 0,7-13,1°C. Zusätzlich wurde es festgestellt, dass die Fassadenbegrünung den Wärmewiderstand zwischen 0 und 0,7m<sup>2</sup>K/W je nach Klimazone, Blattflächenindex und Kletterpflanzen Charakteristik, verbessern kann. [20]

Anhand des validierten Modells wurde die Sensitivität der Wärmeübertragungsdifferenzen zwischen der kahlen und der begrünten Fassade analysiert. Die Ergebnisse zeigten, dass die Fassadenbegrünung mit den steigenden Temperaturen weniger effektiv hinsichtlich der Kühlung war. Dabei sinkt die Reduktion des Wärmeflusses durch Kletterpflanzen. In Abb. 1 ist die Reduktion des Wärmeflusses durch die begrünte Fassade in der Abhängigkeit der Außenlufttemperatur zu sehen. [20]

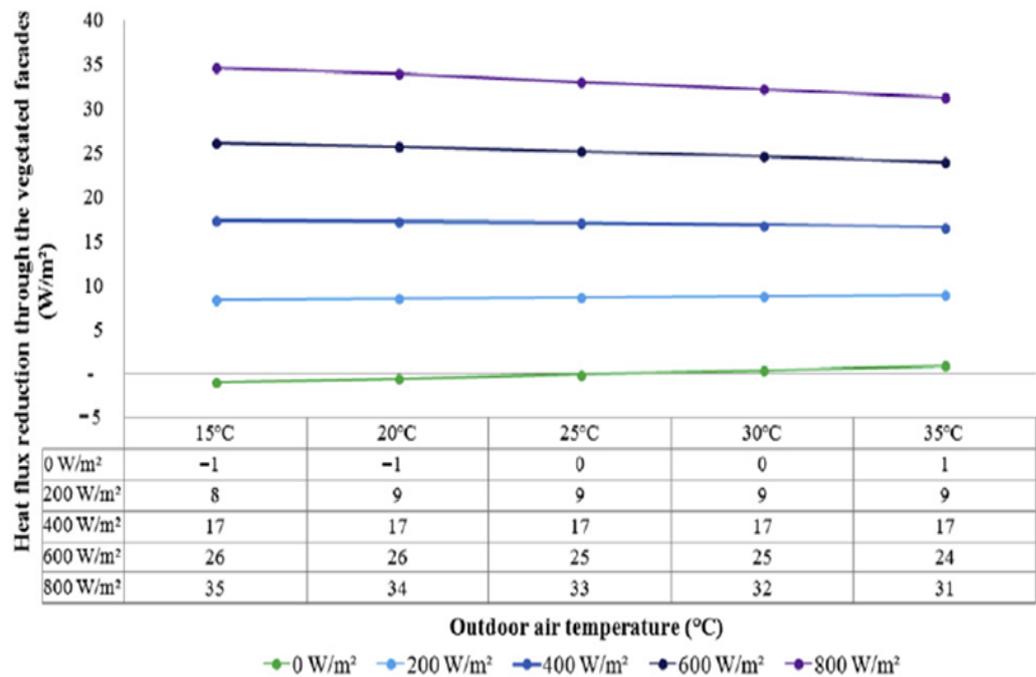


Abb. 1: Sensitivität der Wärmestromunterschiede zwischen der nicht begrünten und der begrünten Fassade[20]

Die Ermittlung des Wärmeflusses wurde durch eine Fassadenbegrünung in der Publikation [21] durchgeführt. Es wurden zwei grüne Wände in einem Abstand von 7m zueinander untersucht. Der Abstand zwischen Wand und dem Begrünungssystem hat 15 cm betragen. Die Studie sollte bewerten, welche thermodynamischen Transmissionsprozesse in einem vertikalen Begrünungssystem stattfinden. Ein weiteres Ziel der Untersuchung war die Erstellung eines thermodynamischen Modells, um den Wärmefluss und die Temperaturschwankungen zu simulieren. In-situ Messungen des Wärmeflusses und der Temperatur sind auf dem Dach des vierstöckigen Runme-Shaw-Gebäudes in der University of Hong Kong durchgeführt worden. Die Simulation von Reflexion und Transmission des Wärmeflusses durch die grüne Wand beruht auf dem Strahlungsabschirmeffektivitätsmodell. [21]

Die Ergebnisse zeigten, dass die Beschattungswirkung der Vegetationsschicht, vor allem während Hochtemperaturperioden tagsüber entscheidend ist. Begrünte Wände reduzieren offensichtlich den Wärmestrom und die Temperatur wirksamer als Kontrollwände, die als Referenz dienen. Die Temperatur der südlichen Kontrollwand ohne Begrünung erreichte höhere

Maximalwerte (48,48 °C), die Werte der südlichen begrünen Wände fielen dagegen deutlich niedriger aus (39,65 °C). [21]

Die Grünwand absorbiert bzw. reduziert die Strahlungsenergie und verhindert, dass sie die Gebäudeoberfläche ungehindert erreicht. Dank der Vegetationsschicht erstet eine ruhende Luftschicht unmittelbar vor der Wandoberfläche, welche als Puffer gegen die täglichen makroklimatischen Temperaturschwankungen wirkt. Die Simulationszeit wurde vom 08.11.2008 bis 21.08.2009 festgelegt. Das Begrünungssystem hat sogar die Lufttemperatur während 1200 Stunden des Simulationszeitraums um mehr als 10,3 °C, im Vergleich zur Wand ohne Begrünung, reduziert. Die Simulation zeigt, dass die Fassadenbegrünung die Extremwerte der Temperatur reduziert. Die maximale Temperatur der Wand mit Vegetationsschicht liegt bei 44,5°C und ist niedriger als die Temperatur der Wand ohne Begrünung (48,5°C). Ein weiterer Vorteil von Blättern ist, dass sie Strahlungsenergie absorbieren und nutzen, um Photosynthese zu betreiben. [21]

Die Ergebnisse zeigen auch deutlich, dass die größte Wärmestromübertragung während der täglichen Simulation in der grünen Wand mit der Orientierung nach Süden stattfindet. In der gleichen Jahreszeit zeigt die nördliche grüne Wand schmalere Amplituden im Wärmestrom, aufgrund kleinerer Unterschiede zwischen Maximum und Minimum, gefolgt von der südlichen grünen Wand und der kahlen Nord- und Südwand. [21]

Kühlungseffekte der Kletterpflanzen auf ein Gebäude und dessen Umgebung wurden in der Publikation [22] analysiert. Es wurde zwischen zwei Effekten, der Transpiration und der Schattenwirkung unterschieden. Zusätzlich wurden wärmedämmende Aspekte betrachtet. Die Untersuchung wurde in Berlin an drei Gebäuden während des Sommers durchgeführt. Ein wichtiger Begriff, der oft mit „Green Citys“ in Verbindung gebracht wird, ist die städtische Wärmeinsel. Die Messungen haben gezeigt, dass die Lufttemperatur im dicht bebauten Stadtzentrum bis zu 8 °C höher ist als im Grünwald [23]. Der Grünwald ist ein rund 3000 Hektar großes Waldgebiet in den westlichen Berliner Bezirken Charlottenburg-Wilmersdorf und Steglitz-Zehlendorf. Die größere Absorptionsfläche der Solarstrahlung in der Stadt spielt hier eine entscheidende

Rolle. Der Vergleich der Umgebungstemperaturen vor der Wand, mit und ohne Fassadenbegrünung, haben gezeigt, dass keine großen Unterschiede in den Messungen an den untersuchten Orten festgestellt wurden. Der gemessene Unterschied von 0,03 und 0,2°C liegen im Bereich der Messunsicherheit. Während die Fassadenbegrünung keinen Einfluss auf die Kühlung der Umgebungstemperatur in der Straßenschlucht hat, weichen die Oberflächentemperaturverläufe der beiden Fassaden eindeutig voneinander ab. [22]

Abb. 2 stellt die mittleren Oberflächentemperaturen der begrünten und der nicht begrünten Wand an drei untersuchten Orten während heißer Sommertage dar.

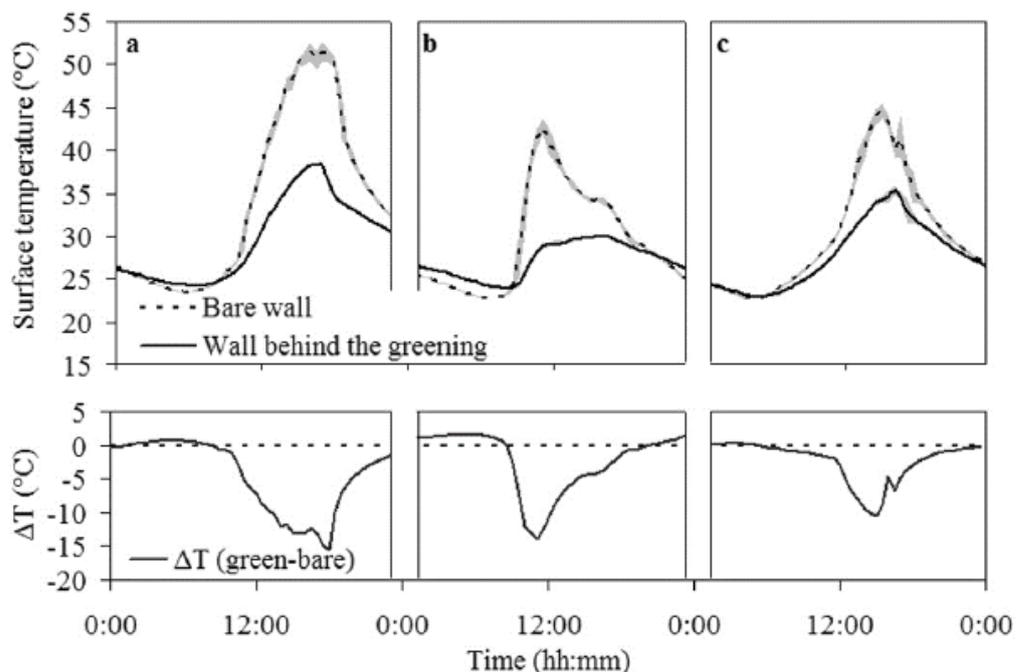


Abb. 2: Mittlere Oberflächentemperatur der begrünten und nicht begrünten Wand an drei untersuchten Orten während heißer Sommertage (a) Süd-West ausgerichtet, (b) Osten ausgerichtet, (c) West ausgerichtet [22]

In Abb. 2 ist ersichtlich, dass die höchste Reduktion der Oberflächentemperatur am Ort A, der süd-westlich exponierten Fassade, stattfand. Um 18 Uhr beträgt die Differenz 15,5°C. Die Wand mit Ost Ausrichtung und dem Efeu hat einen maximalen Unterschied von 13,9°C. Die untersuchten Fassaden für diese Diplomarbeit in Wien weisen die gleiche Orientierung nach

Osten auf. Ein ähnliches Experiment wurde in Chicago, USA mit Lufttemperatur von 20,7 bis 38,8°C durchgeführt [20]. Die maximalen Oberflächentemperaturen der begrünten Fassaden liegen bei beiden Experimente nicht weit voneinander und betragen 0,9°C. Der Wandaufbau mit Glas, Stahl und leicht gefärbten Fliesen in Chicago hat einen deutlichen Einfluss auf die Oberflächentemperatur der nicht begrünten Wand von 41,5°C, im Vergleich zur Oberflächentemperatur in Berlin mit einer Vollziegelmauer von 51,5°C [22]. Die Ursache liegt an dem Albedo Effekt. Die Albedo beschreibt das Rückstrahlungsvermögen von nicht selbst leuchtenden Oberflächen [24]. Die Werte der Albedo liegen zwischen 0 (totale Absorption) und 1 (totale Reflexion). Helle Oberflächen vermögen große Teile der Sonnenstrahlen zu reflektieren, während dunkle Oberflächen die Sonnenenergie vermehrt absorbieren. Das Vollziegelmauerwerk absorbiert demnach im Vergleich zur Glasfassade mehr Sonnenstrahlung.

Bezüglich der wärmedämmenden Effekte sind folgende Vorgänge zu betrachten. Die Isolation steigt mit einer steigenden Dichte der Fassadenbegrünung. In der Nacht sinkt die Oberflächentemperatur der kahlen Wand schneller, als eine Wand mit einer Begrünung. Die Fassadenbegrünung schützt die Wand vor der direkten Windeinwirkung und somit wird die Wärme unter der Begrünung langsamer abgegeben. Die Wand ohne Begrünung kühlt in der Nacht stärker ab. Tagsüber trägt die Fassadenbegrünung durch ihre Schattenwirkung und durch die Transpiration zur Kühlung bei. Obwohl die Oberflächentemperatur der kahlen Wand in der Nacht niedriger ist, sind die Oberflächentemperaturen der begrünten Wand am Tag niedriger. Bei der Betrachtung des Temperaturverlaufes über einen gesamten Tag, schneidet die Fassadenbegrünung hinsichtlich der Oberflächentemperaturen besser ab. Außerdem konnte in dieser Publikation nachgewiesen werden, dass die Kühlung, die eine Kletterpflanze verursacht, vor allem an einem klaren Tag auf die Schattenwirkung zurückzuführen ist. Die Transpiration einer Kletterpflanze hat demnach einen geringeren Einfluss auf die Kühlung der Fassade als die Verschattung. [22]

## 2.2 Beschreibung der Begrünung anhand der gängigen physikalischen Parameter

Die thermische Auswirkung der Fassadenbegrünung wurde in der Publikation [20] als eine Differenz zwischen dem Wärmewiderstand der Fassade mit Begrünung und ohne Begrünung beschrieben. Der thermische Widerstand wird als der Temperaturgradient zwischen Innen und Außen, dividiert durch den Wärmefluss, berechnet. Die Formel (4) beschreibt den Wärmewiderstand der kahlen Wand.

$$R_{bw} = \frac{T_{sbw} - T_{in}}{Q_{bw}} \quad (4)$$

- $R_{bw}$       Wärmewiderstand der kahlen Wand in K/W  
 $T_{sbw}$      Außenoberflächentemperatur der kahlen Wand in K  
 $T_{in}$        Innenoberflächentemperatur der kahlen Wand in K  
 $Q_{bw}$       Wärmefluss durch die kahle Wand in W/m<sup>2</sup>

Um den Wärmewiderstand der begrünten Wand zu berechnen, wird Formel (5) verwendet.

$$R_{vw} = \frac{T_{sbw} - T_{in}}{Q_{vw}} \quad (5)$$

- $R_{vw}$       Wärmewiderstand der begrünten Wand in K/W  
 $T_{sbw}$      Außenoberflächentemperatur der begrünten Wand in K  
 $T_{in}$        Innenoberflächentemperatur der begrünten Wand in K  
 $Q_{vw}$       Wärmefluss durch die begrünte Wand in W/m<sup>2</sup>

Die Kenntnis über beide Wärmewiderstandswerte ermöglicht die Bestimmung des thermischen Widerstandes der Pflanzenschicht. Die Berechnung erfolgt mit Formel (6). Während milden Wetterbedingungen herrscht nur ein minimaler Wärmefluss durch die Wand. In diesem Fall ist die Ermittlung des effektiven Wärmewiderstandes der Kletterpflanze nicht sinnvoll. Die Wärmewiderstandswerte mit  $Q < 10 \text{ W/m}^2$  werden in der erwähnten Arbeit als unerheblich betrachtet [20].

$$R_{\text{plant}} = R_{\text{vw}} - R_{\text{bw}} \quad (6)$$

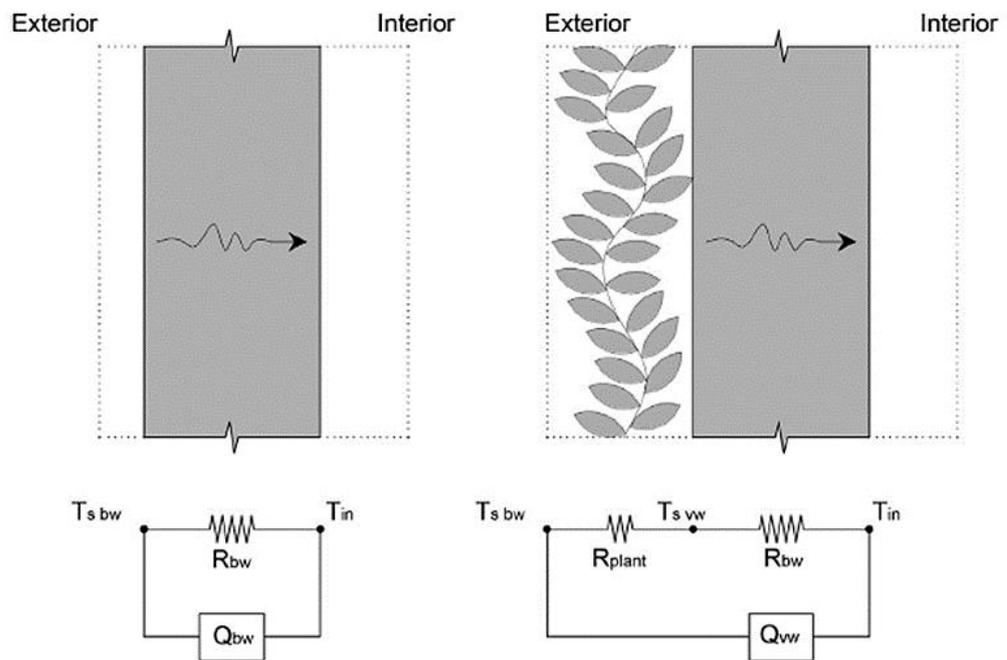


Abb. 3: Wärmefluss durch eine Fassade mit und ohne Begrünung als eine elektrische Reihenschaltung dargestellt [20]

Zusätzlich wurde ein mathematisches Modell für eine Wand mit Kletterpflanze entwickelt, um die thermischen Auswirkungen der Kletterpflanzen auf die Wärmeübertragung durch Gebäudefassaden zu erforschen. Mithilfe des Modells kann die Reduzierung der Außenoberflächentemperatur und des Wärmeflusses durch die Wand in der Abhängigkeit von dem Blattflächenindex, der durchschnittlichen Blattabmessung und der Absorptionsvermögen der Blätter analysiert werden. Das Absorptionsvermögen der Blätter ist der Anteil der

einfallenden Sonnenstrahlung, der von einer Blattoberfläche absorbiert wird. Das Absorptionsvermögen von Blättern, hängt von der Blattfarbe, der Blattstruktur und dem Pflanzenalter ab. [20]

Das gleiche Vorgehen wurde in dieser Diplomarbeit bei der Auswertung der Messdaten während der Wintermonate angewandt. Die Verifikation des Modells erfolgte durch die Messungen vor Ort. Gemessen wurde die kahle und begrünte Fassade während des Sommers in Chicago. Die vor Ort gemessenen Ergebnisse wurden verwendet, um diese mit den Oberflächentemperaturen von der Simulation zu vergleichen. Dank der Kenntnis der reduzierten Oberflächentemperaturen zwischen der kahlen und begrünten Wand ist es möglich die Senkung des Wärmeflusses zu berechnen, wenn ein konstanter Wärmewiderstand der Wand vorliegt. Somit kann der effektive Wärmewiderstand der Kletterpflanzen bestimmt werden. Allgemein konnte festgestellt werden, dass die gemessenen und die modellierten Werte für Außenoberflächentemperaturen eng miteinander korrelieren. [20]

Ein dynamisches Wärmeübertragungsmodell wurde in der Publikation [25] von Zhang und Meng erarbeitet. Das Modell basiert auf dem Beer-Lambert Gesetz und der Penman–Monteith Gleichung. Mit vor Ort gemessenen Werten wurde die Richtigkeit der dynamischen Wärmeübertragung validiert. Vier Szenarien wurden mit unterschiedlichen Fassadenorientierungen in chinesischen Städten durchgeführt. Während eines heißen Sommers und warmen Winters wurden die Auswirkung der vertikalen Fassadenbegrünung analysiert. In Abb. 4 befinden sich die Ergebnisse der Kühllast und deren Ersparnisse aus der Simulation in Nanning, China. Die Kühllast ist die Wärmemenge, die beim Kühlen eines Raumes auf eine gewisse Temperatur auftritt. Die Abkürzungen aus Abb. 4 sind: „VGF case“ bedeutet die vertikale Fassadenbegrünung, „WIN case“ hat zusätzlich eine wärmedämmende Schicht in dem Wandaufbau und „base case“ ist ein Referenzraum. Im Allgemeinen besteht die Hauptfunktion einer Fassadenbegrünung darin, die Temperatur der Gebäudewände zu senken und den Wärmestrom in die Räume zu reduzieren. Somit verringert sich die Kühllast eines Gebäudes. Die Abmessungen des simulierten Gebäudes waren 18,46 m (Länge) × 18,46 m (Breite) × 3 m (Höhe). Anhand der Ergebnisse ist festzustellen, dass die untersuchte

Fassadenbegrünung die Kühllast eines Raumes effektiver reduziert, als eine zusätzliche angebrachte Dämmschicht in heißen Sommern. [25]

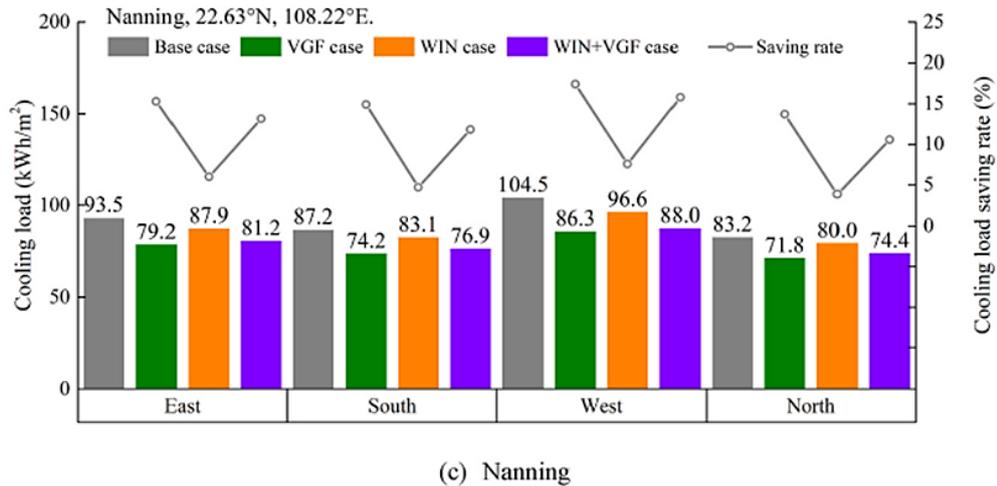


Abb. 4: Ergebnisse der Kühllast und deren Einsparrate in Nanning [25]

Die Ergebnisse aus allen vier untersuchten Orten zeigten, dass die Fassadenbegrünung die Kühllast für den Raum, je nach Raumausrichtung und meteorologischen Faktoren, um 11,7–18,4 % reduziert. In den Sommermonaten hat die Positionierung einer Begrünung an Westfassaden im Vergleich zu den anderen möglichen Ausrichtungen den größten Effekt hinsichtlich des Kühleffekts. Eine Verbesserung der Wanddämmung lässt die Raumkühllast um 0,3–8,4 % sinken. Die Studie kommt zum Ergebnis, dass in den warmen Klimazonen die Beschattung und die Transpirationskühlung von Fassadenbegrünungen effektiver sind als das Aufbringen einer Dämmschicht. Darüber hinaus erreichen die Einsparungen der Kühllast bei Räumen mit einer Fassadenbegrünung und einer Dämmschicht Werte von 6,6 – 15,8 %. In diesem Fall ist diese Reduzierung der Kühllast niedriger als jene von Räumen mit der Fassadenbegrünung ohne Dämmschicht. Letztendlich präsentieren die Ergebnisse, dass die Fassadenbegrünungen gute wärmedämmende Eigenschaften in warmen Klimazonen aufweisen. [25]

Dieses Ergebnis impliziert, dass die Fassadenbegrünung ein großes Anwendungspotenzial für eine energieeffiziente Sanierung bestehender Gebäude ohne gute Wanddämmung in warmen Klimazonen hat.

### 3 Beschreibung der Gebäude

Die Ermittlung der Daten hat an folgenden Gebäuden stattgefunden:

- Altbau mit Ziegelmauer in der Muthgasse 109, 1190 Wien;
- Altbau mit Ziegelmauer und EPS (expandiertes Polystyrol) in der Kopalgasse 7, 1110 Wien.

Die beiden untersuchten Gebäude sind mit Kletterpflanzen bedeckt. Die Bauwerke unterscheiden sich voneinander durch den Wandaufbau. In jedem Gebäude wurde sowohl ein Referenzraum ohne Kletterpflanze, als auch ein Raum, der draußen mit einer Kletterpflanze bedeckt ist, untersucht. Der Referenz- und Begrünungsraum haben sich jeweils auf dem gleichen Stockwerk befunden und waren nach Osten ausgerichtet. Damit sind die ermittelten Messwerte vergleichbar. Die untersuchten Fassaden wurden von der Nachbarbebauung und Bäumen nicht wesentlich beschattet.

Die Art der untersuchten Kletterpflanze ist Efeu „*Hedera hibernica*“, die aus Irland stammt [26]. Abb. 5 zeigt den Efeu auf der Fassade in der Muthgasse. Aufgrund seiner dekorativen Erscheinung durch große Blätter und den dichten Bewuchs, ist diese eine der gebräuchlichsten Kletterpflanzen bei Fassadenbegrünungen. „*Hedera hibernica*“ haftet sehr gut an Fassaden und im Vergleich zu "*Hedera woerner*", sind ihre Blätter etwas lockerer angeordnet. [26]

Diese Efeuart zeichnet sich durch das hohe Alter aus, das er erreichen kann. Unter guten Bedingungen kann die Kletterpflanze 400 Jahre alt werden. Die maximale Wuchshöhe beträgt 20 m. Durch seine Frosthärte und seinen genügsamen, robusten Charakter erfreut sich diese Efeuart einer großen Beliebtheit unter den Kletterpflanzen. [27]

Die Kletterpflanze befindet sich direkt an der Wand und benötigt grundsätzlich keine Unterkonstruktion. Bei den untersuchten Kletterpflanzen handelt es sich in beiden Fällen um eine bodengebundene Begrünung.



Abb. 5: Efeu „*Hedera hibernica*“ in der Muthgasse

### 3.1 Kopalgasse

Das Gebäude befindet sich im 11. Wiener Gemeindebezirk und wurde im Jahre 1910 errichtet. Abb. 6 stellt eine Ansicht des Gebäudes in der Kopalgasse 7 dar. Die Fassade ist nach Osten ausgerichtet. Zusätzlich ist in Abb. 6 die Montagestelle der Messsensoren für den Referenzraum auf der Fassade zu sehen. In der Kopalgasse waren die Messstellen für Referenz und Begrünung in zwei verschiedenen Räumen.



Abb. 6: Ansicht des Gebäudes in der Kopalgasse

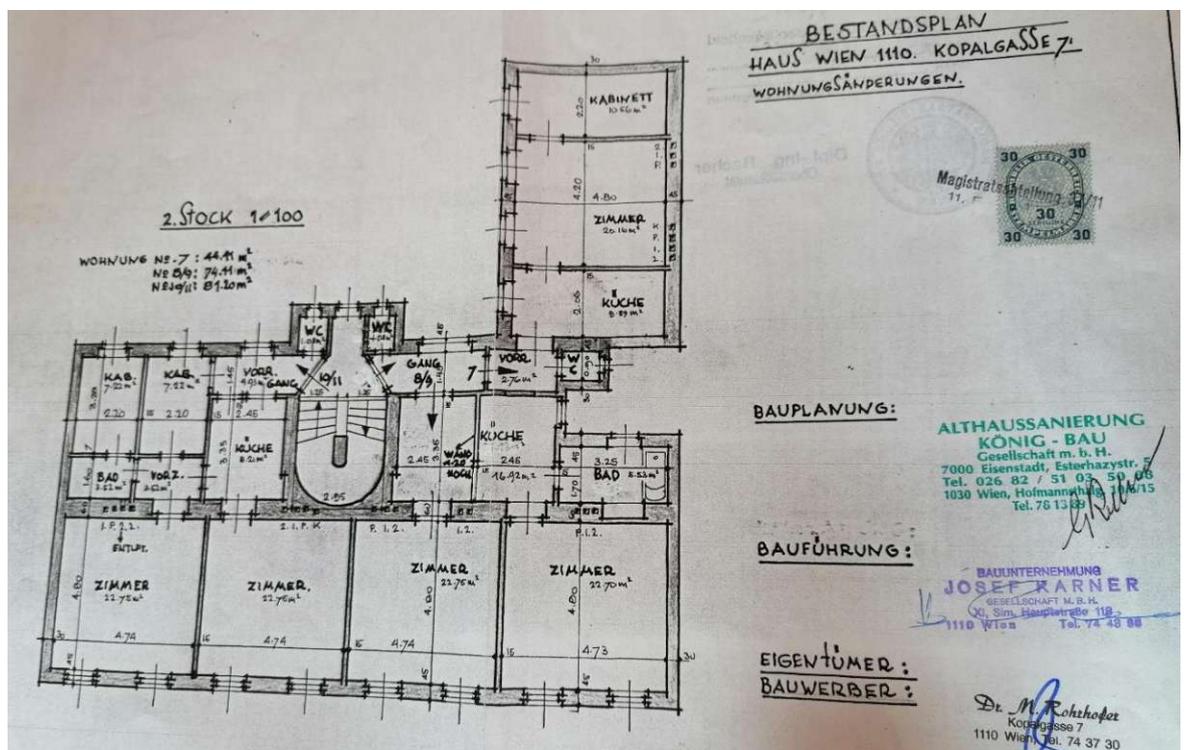


Abb. 7: Der Bestandsplan des Gebäudes in der Kopalgasse

Der Außenwandaufbau besteht aus einer 30-45cm dicken Ziegelmauer, mit darauf geklebten 5 cm EPS-Platten. Aus Abb. 7 ist ersichtlich, dass die

Außenwand des Referenzraums aus einer Vollziegelmauer besteht und eine Dicke von 30 cm hatte, während die Dicke des Vollziegelmauerwerks im begrünten Raum bei 45 cm gelegen hat.

### 3.2 Muthgasse

Das Gebäude befindet sich im 19. Wiener Gemeindebezirk. Abb. 8 zeigt eine Ansicht des Gebäudes in der Muthgasse 109. Die Fassade ist nach Osten ausgerichtet. Die Messsensoren für den Referenzraum und den begrünten Raum, befinden sich am ersten Stockwerk. In der Muthgasse sind die Messstellen für den Referenzfall und die Begrünungsfall im selben Raum.



Abb. 8: Ansicht des Gebäudes in der Muthgasse

Die Messsensoren zeichnen die Außenoberflächen- und Innenoberflächentemperatur, sowie den Wärmestrom auf. Das Intervall beträgt

10 Minuten und die Messwerte können nur vor Ort ausgelesen werden. In Abb. 9 sind die Montagestellen der Messsensoren zu sehen.



Abb. 9: Messsensoren auf der Außen- und Innenwandseite in der Muthgasse

### 3.3 Messtechnik und Messequipment

Sowohl in der Muthgasse als auch in der Kopalgasse wurden die gleichen Messgeräte verwendet. Der Wärmestrom wurde mit einer Phymeeas® Wärmestrommessplatte in  $W/m^2$  gemessen. Die Innen- und Außenoberflächentemperatur wurden mit einem PT1000 Widerstandsthermometer in  $^{\circ}C$  aufgezeichnet. Zusätzlich erfolgte die Messung der Innen- und Außenlufttemperatur in  $^{\circ}C$  mit TandD RTR 500. Das gleiche Messgerät hat die relative Innen- und Außenluftfeuchtigkeit in % aufgezeichnet.

## 4 Auswertung des thermischen Widerstandes

In diesem Kapitel werden die erhobenen Messdaten der Wintermonate ausgewertet. Mithilfe der vorhandenen Messdaten wurden die jeweiligen

Wärmewiderstände der Kletterpflanzen berechnet. Es wurde sowohl die Innenoberflächen- und Außenoberflächentemperatur, als auch der Wärmestrom zwischen Innen- und Außenwand gemessen. Die Daten aus der Kopalgasse wurden vom 19.11.2021 09:30 bis 28.02.2022 23:50 und die Messdaten in der Muthgasse vom 17.12.2021 12:20 bis 23.02.2022 11:40 ausgewertet.

#### 4.1 Messdatenauswertung

Die gemessenen Daten werden in Anlehnung an entsprechende Kriterien, die auch in der Dissertation von Tudiwer [28] verwendet wurden, ausgefiltert. Der Grund hierfür ist möglichst stationäre Zustände während der Wintermonate zu betrachten. Während der in situ Messungen ist die Fassade die ganze Zeit Temperatur- und Einstrahlungsänderungen ausgesetzt. Dies führt zu Schwankung des gemessenen Wärmestromes, da der Wärmestrom von den Temperaturen, der Sonneneinstrahlung, der Windgeschwindigkeit und der Speichermasse der Wand abhängig ist. [28]

Um stationäre Zustände bei der Auswertung der in situ Messungen zu gewährleisten, wurden folgende Filter festgelegt:

1. Der Oberflächentemperaturunterschied zwischen der Innen- und Außenseite der Fassade muss größer als 15 K sein.
2. Die Oberflächentemperaturen der Innen- und Außenfassade dürfen in den letzten 24 Stunden nicht mehr als 2 K geschwankt haben.
3. Der Wärmewiderstand darf maximal 4,5 m<sup>2</sup>\*K/W in der Kopalgasse und 4,0 m<sup>2</sup>\*k/W in der Muthgasse betragen.

Das erste oben genannte Kriterium hat die Aufgabe den Einfluss der Wärmekapazität auszuschließen, um den effektiven Wärmestrom durch die Wand in horizontaler Richtung sicherzustellen. Die meisten Werte werden durch das zweite Kriterium ausgefiltert, weil es eine maximale Schwankung von 2K in 24h zulässt. Mithilfe des ersten und zweiten Kriteriums wird der stationäre Zustand für die Berechnung des R-Werts sichergestellt. Das dritte Kriterium wird herangezogen um Fehler in den Messungen, sowie Ausreißer auszuschließen.

Wenn der Wärmewiderstand extreme Werte annimmt, werden diese nicht in der Auswertung der Ergebnisse berücksichtigt.

## 4.2 Ergebnisse

Die Berechnung des Wärmewiderstandes erfolgt unter Berücksichtigung der im vorherigen Kapitel erwähnten Kriterien und der Formel (1). Für die Wintermonate wurde der Mittelwert des Wärmewiderstandes, in Abhängigkeit des maximalen Wärmewiderstandes, bestimmt.

In der Muthgasse wurde das dritte Auswertungskriterium in drei Stufen unterteilt um festzustellen, welchen Einfluss die Obergrenze auf die Auswertung der Daten hat. Die Obergrenze des Wärmewiderstandes wurde bei der Auswertung der Messdaten stufenweise auf 3,5 auf 4 und auf 4,5 m<sup>2</sup>K/W festgelegt. Abb. 10 veranschaulicht die Resultate der gemessenen Wärmewiderstände in der Muthgasse. R max 4 m<sup>2</sup>\*K/W bedeutet eine Obergrenze des Wärmewiderstandes von 4 m<sup>2</sup>\*K/W. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl der Wärmewiderstand für die begrünte Wand, als auch der Wärmewiderstand für den Referenzraum mit der steigenden Obergrenze konstant bleiben. Eine Differenz des Wärmewiderstandes von 0,05% m<sup>2</sup>\*K/W zwischen R max 4 m<sup>2</sup>\*K/W und 4,5 m<sup>2</sup>\*K/W kann vernachlässigt werden.

Für die maximale Obergrenze des Wärmewiderstandes von 4 m<sup>2</sup>\*K/W liegt der gemessene Wärmewiderstand der begrünten Wand bei 2,412 m<sup>2</sup>\*K/W und der nicht begrünten Wand bei 1,920 m<sup>2</sup>\*K/W. Bei der Wand mit dem 60 cm dicken Vollziegelmauerwerk wurde dank der Fassadenbegrünung eine Verbesserung des Wärmewiderstandes um 26% festgestellt.

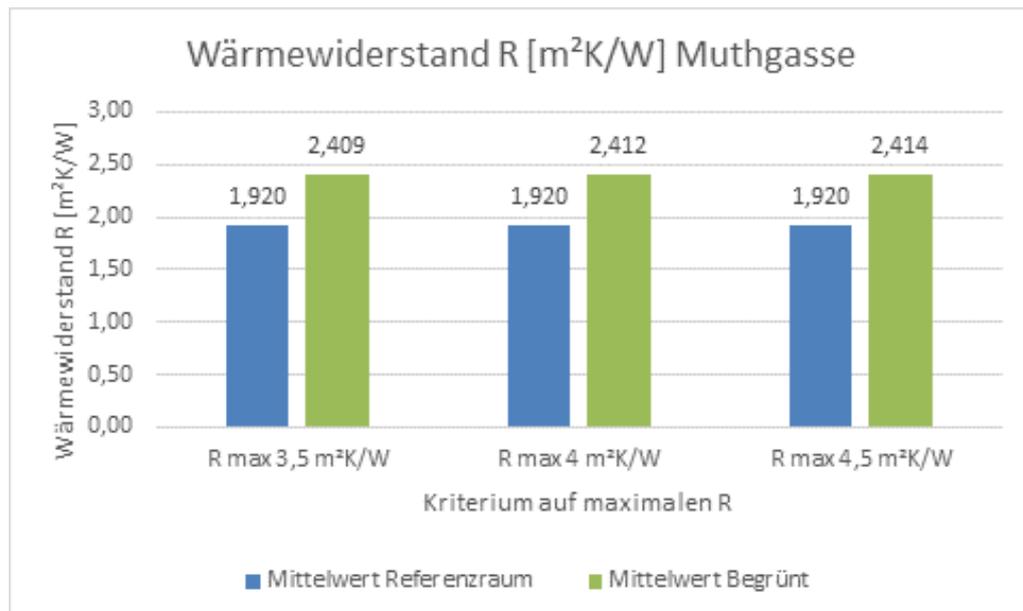


Abb. 10: Der gemessene Wärmewiderstand in der Muthgasse

Analog zur Muthgasse wurde auch für die Daten der Kopalgasse das dritte Auswertungskriterium in drei Stufen unterteilt, um festzustellen, welchen Einfluss die Obergrenze auf die Auswertung der Daten hat. Die Obergrenze des Wärmewiderstandes wurde bei der Auswertung der Messdaten stufenweise auf 4, auf 4,5 und auf 5 m<sup>2</sup>K/W festgelegt. Die Werte der Obergrenze sind höher als in der Muthgasse, weil der Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand in der Kopalgasse aufgrund des unterschiedlichen Wandaufbaus höher ist. In Abb. 11 sind die Resultate des gemessenen Wärmewiderstände in der Kopalgasse dargestellt. Die ausgewerteten Messdaten im Referenzraum bleiben mit dem steigenden Kriterium des maximalen Wärmewiderstandes konstant. Der Mittelwert des gemessenen Wärmewiderstandes im begrünnten Raum steigt mit dem steigenden Kriterium des maximalen Wärmewiderstandes. Das bedeutet, dass die höheren Wärmewiderstandswerte eine entscheidende Rolle bei der Auswertung spielen.

Für die maximale Obergrenze des Wärmewiderstandes von 4,5 m<sup>2</sup>K/W liegt der gemessene Wärmewiderstand der begrünnten Wand bei 2,980 m<sup>2</sup>K/W und der nicht begrünnten Wand bei 2,407 m<sup>2</sup>K/W. Bei der Wand mit dem 30 cm dicken Vollziegelmauerwerk und einer 5 cm EPS-Platte wurde dank der

Fassadenbegrünung eine Verbesserung des Wärmewiderstandes um 24% festgestellt.

Bei der wärmegeämmten und bei der nicht wärmegeämmten Wand sind ähnliche Verbesserungen durch die Kletterpflanzen während der Wintermonaten im Bereich von 24% und 26% zu verzeichnen. Der Vergleich mit der wärmedämmenden Wirkung der Kletterpflanzen im Sommer zeigte, dass Kletterpflanzen die thermischen Eigenschaften der Wand auch im Sommer verbessert. In der Publikation [25] wurden eine Kühllastreduzierung durch die Wärmedämmung in Kombination mit den Kletterpflanzen analysiert. Der Abb. 4 ist zu entnehmen, dass die Verbesserung der Kühlungswirkung durch die Kletterpflanzen auf der ungedämmten Wand bei 15% und auf der gedämmten Wand bei 13% liegt [25]. Beide Fälle bestätigen, dass die positiven Auswirkungen der Kletterpflanzen auf den Wärmewiderstand für die Wand ohne Wärmedämmung sogar noch ausgeprägter sind.

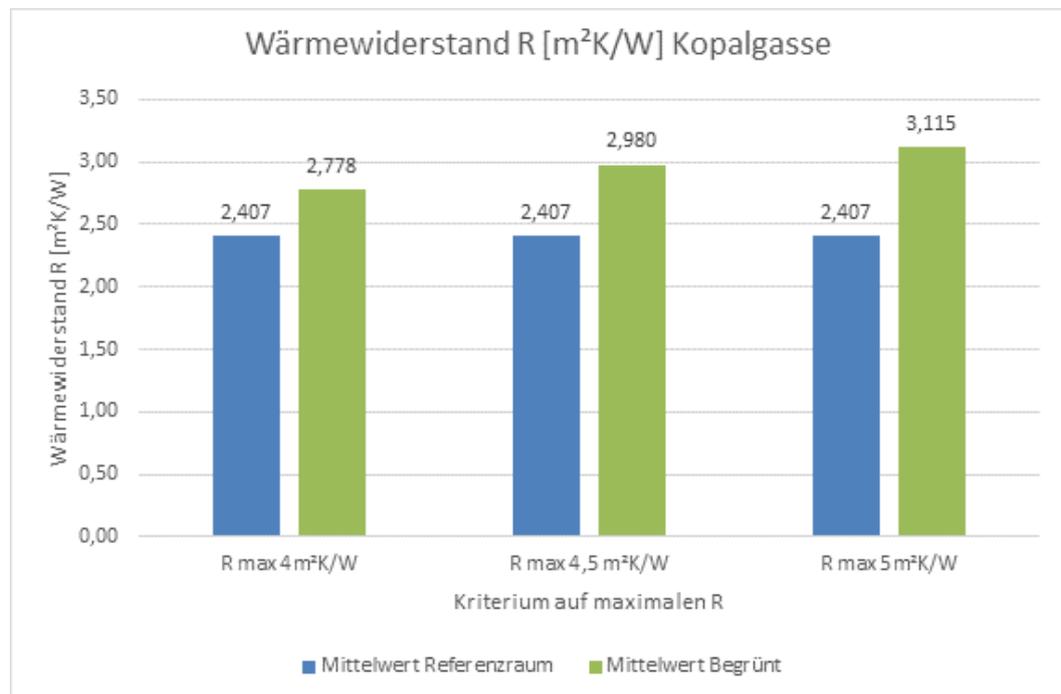


Abb. 11: Der gesamte Wärmewiderstand in der Kopalgasse

### 4.3 Berechnung des Wärmewiderstandes der Kletterpflanze

Der Wärmewiderstand der Kletterpflanzen wird als Differenz zwischen dem Wärmewiderstand des begrünten Raumes und des Referenzraumes mit Formel (6) berechnet. Tab. 1 zeigt die Ergebnisse für die Kletterpflanzen in der Muthgasse und der Kopalgasse in Abhängigkeit der festgelegten Obergrenzen (Kriterium 3).

Tab. 1: Wärmewiderstand der Kletterpflanze in der Muthgasse und der Kopalgasse

Wärmewiderstand der Kletterpflanze R [m <sup>2</sup> K/W]		
	Muthgasse	Kopalgasse
R max 3,5	0,489	
R max 4	0,492	0,371
R max 4,5	0,493	0,573
R max 5		0,708

In der Muthgasse hat der Wärmewiderstand der Kletterpflanzen 0,492 m<sup>2</sup>\*K/W für die Obergrenze von 4 m<sup>2</sup>\*K/W betragen. Der Wärmewiderstand der Kletterpflanzen in der Kopalgasse im stationären Zustand war 0,573 m<sup>2</sup>\*K/W für die Obergrenze von 4,5 m<sup>2</sup>\*K/W. Anhand des berechneten Wärmewiderstandes der Kletterpflanzen kann die Wärmeleitfähigkeit der Kletterpflanzen bestimmt werden. Anschließend wird eine Pflanzenschicht in WUFI Pro modelliert und simuliert.

### 4.4 Berechnung des Gesamt-Wärmedurchlasswiderstandes homogener Komponenten

Der Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand homogener Komponenten wird mit den Formeln (2) und (3) nach DIN EN ISO 6946 [8] bestimmt, um einen Vergleich zwischen dem gemessenen Wärmewiderstand (aus Kapitel 4.2) und dem berechneten Wärmewiderstand (aus Kapitel 4.4) zu ziehen. Die Berechnung des Gesamt-Wärmedurchlasswiderstandes erfolgt nach dem vereinfachten

Verfahren. Werte der Wärmeleitfähigkeit werden aus der DIN 4108-4 [29] genommen.

In Tab. 2 sind die Ergebnisse der Berechnung des Gesamt-Wärmedurchlasswiderstandes für den Referenzraum in der Kopalgasse, wobei der Gesamt-Wärmewiderstand ( $R_{tot}$ )  $2,10 \text{ m}^2\text{K/W}$  beträgt. Im Vergleich zum gemessenen Gesamt-Wärmewiderstand des Referenzraumes in der Kopalgasse, der bei  $2,407 \text{ m}^2\text{K/W}$  liegt, beträgt die Differenz der beiden Werte  $0,307 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Dieser Unterschied kann auf die tatsächlich höhere Wärmeleitfähigkeit des Ziegelmauerwerkes als der Wert, der in DIN 4108-4 [29] angegeben ist, zurückgeführt werden.

Tab. 2: Berechnung des Gesamt-Wärmedurchlasswiderstands für den Referenzraum in der Kopalgasse

Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand				
	Außenputz	EPS	Vollziegel	Kalkputz
d [m]	0,02	0,05	0,3	0,02
$\lambda$ [W/m*K]	0,07	0,04	0,81	1
$R_n$ [m <sup>2</sup> *K/W]	0,29	1,25	0,37	0,02
$R_{se}$ [m <sup>2</sup> *K/W]	0,04			
$R_{si}$ [m <sup>2</sup> *K/W]	0,13			
$R_{tot}$ [m <sup>2</sup> *K/W]	2,10			

Tab. 3 zeigt die Berechnung des Gesamt-Wärmedurchlasswiderstandes für den Referenzraum in der Muthgasse. Der gemessene Wärmewiderstand in der Muthgasse liegt bei  $1,920 \text{ m}^2\text{K/W}$  und der berechnete Wert bei  $0,93 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Der Unterschied zwischen dem berechneten und dem gemessenen Wert ist noch größer als in der Kopalgasse und beträgt  $0,99 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Die Abweichung der Wärmeleitfähigkeit des Vollziegelmauerwerkes liegt aufgrund des Alters und des Zustands des Mauerwerks vor. Durch die höhere Schichtdicke des Vollziegelmauerwerkes kommt es zur größeren Abweichung

Tab. 3: Berechnung des Gesamt-Wärmedurchlasswiderstands für den Referenzraum in der Muthgasse

Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand		
	Vollziegel	Kalkputz
d [m]	0,6	0,02
$\lambda$ [W/m*K]	0,81	1
$R_n$ [m <sup>2</sup> *K/W]	0,74	0,02
$R_{se}$ [m <sup>2</sup> *K/W]	0,04	
$R_{si}$ [m <sup>2</sup> *K/W]	0,13	
$R_{tot}$ [m <sup>2</sup> *K/W]	0,93	

#### 4.5 Vergleich der gemessenen Außenoberflächentemperatur

Um den Einfluss der Kletterpflanzen auf die Außenoberflächentemperatur zu bestimmen, wird der Vergleich zwischen dem begrünten Raum und dem Referenzraum in der Muthgasse und der Kopalgasse, mit Hilfe von in situ Messdaten, durchgeführt.

Abb. 12 gibt die Mittelwerte und die Standardabweichungen der Außenoberflächentemperatur in der Muthgasse und in der Kopalgasse wieder. Die Auswertung umfasst alle Werte, ohne Berücksichtigung der Kriterien für den stationären Zustand während der Wintermonate von Dezember bis Februar in der Muthgasse und von November bis Februar in der Kopalgasse. In Abb. 12 ist ersichtlich, dass die Außenoberflächentemperatur des begrünten Raums höher, als die Außenoberflächentemperatur des Referenzraums war. Der Unterschied der Außenoberflächentemperatur zwischen dem begrünten Raum und dem Referenzraum beträgt 1,3°C in der Muthgasse und 3,5°C in der Kopalgasse. Demzufolge kommt es zu einer Erhöhung der Außenoberflächentemperatur infolge der Kletterpflanzen um 24% in der Muthgasse und 82% in der Kopalgasse. Die Wirkung der Kletterpflanzen hängt von der Dicke und der Blätterdichte ab. Hinsichtlich der Standardabweichung findet die größte Reduzierung durch die Kletterpflanzen in der Kopalgasse von 4,16°C auf 2,50°C statt. Die Grünwand in der Muthgasse verringert die gemessene Standardabweichung von 3,59°C auf 3,13°C. Somit bewirkt die Kletterpflanze, dass Schwankungen der Außenoberflächentemperatur verringert werden.

Der Vergleich der Referenzräume zeigt, dass der Mittelwert der Außenoberflächentemperatur einen höheren Wert in der Muthgasse als in der Kopalgasse erreicht. Außerdem liegt die Standardabweichung in der Kopalgasse bei  $\pm 4,14^{\circ}\text{C}$  und in der Muthgasse bei  $\pm 3,59^{\circ}\text{C}$ . Aufgrund der dunklen Fassadenfarbe des Vollziegelmauerwerks in der Muthgasse, wird diese Oberfläche durch die Sonnenstrahlung thermisch stärker beansprucht, als eine Fassade mit einem hellen Außenputz wie in der Kopalgasse. Dies begründet den höheren Mittelwert in der Muthgasse. Bei der gesamten Betrachtung der Ergebnisse ist festzuhalten, dass die Erhöhung der Außenoberflächentemperatur während der Wintermonate für die Fassade mit Wärmedämmung in der Kopalgasse ausgeprägter und größer ist.

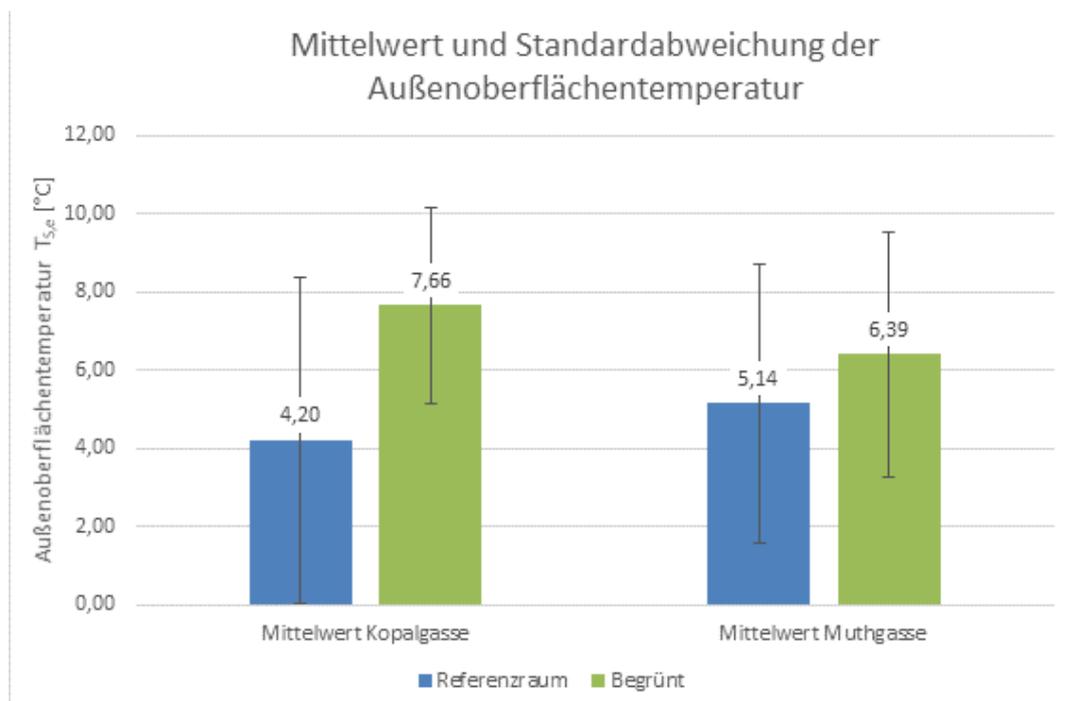


Abb. 12: Mittelwert und Standardabweichung der gemessenen Außenoberflächentemperatur in der Kopalgasse und der Muthgasse

Der Auswertung der Außenoberflächentemperatur ist zu entnehmen, dass die Kletterpflanzenschicht die thermischen Eigenschaften der Wand während der Wintermonate verbessert, sowohl durch die Erhöhung der Außenoberflächentemperatur hinter der Kletterpflanze, als auch durch die Reduzierung der Standardabweichung. Die Außenoberflächentemperatur ist

neben der Wärmestromdichte eine der wichtigsten Faktoren bei der Berechnung des instationären Wärmewiderstands.

## **5 Simulation der untersuchten Konstruktion in WUFI Pro**

Das folgende Kapitel befasst sich mit der Analyse, der mit Hilfe der Software „WUFI Pro“ simulierten, Werten. Anschließend werden die Ergebnisse aus den in-situ Messungen der jeweiligen Fassaden mit den Ergebnissen aus dem Simulationsprogramm verglichen. Zuletzt wird die Wärmeleitfähigkeit des Vollziegelmauerwerks in der Simulation modifiziert, um den simulierten Wärmewiderstand zu erhalten, die mit den gemessenen Werten vergleichbar sind. Es wurden Wandaufbauten in der Software „WUFI Pro“ modelliert und während der Wintermonate erforscht. Mit „WUFI Pro“ erfolgt die eindimensionale Berechnung des hygrothermischen Verhaltens von Bauteilen im Regelquerschnitt unter Berücksichtigung von Baufeuchte, Schlagregen, Sonnenstrahlung, langwelliger Abstrahlung, Kapillartransport und Sommerkondensation.

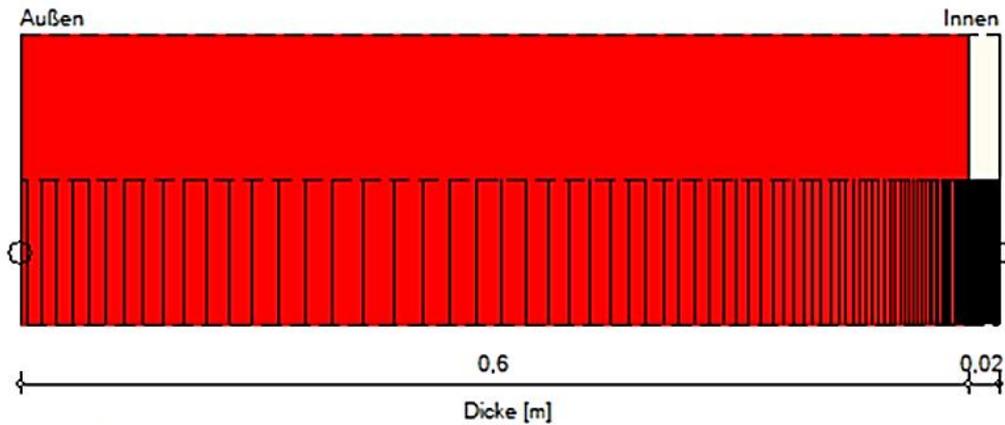
### **5.1 Muthgasse**

In der Software „WUFI“ wurde der Wandaufbau aus der Muthgasse modelliert und von 17.12.2021 12:20 bis 23.02.2022 11:40 im Zeitintervall von 10 Minuten simuliert. Als Außenklima wurde Wien - Hohe Warte ausgewählt.

In Abb. 13 ist der Bauteilaufbau aus der Muthgasse ersichtlich. Der Referenzraum weist ein 60 cm dickes Vollziegelmauerwerk und einen 2 cm dicken Innenputz auf.

### Bauteilaufbau

Variante: Muthgasse 109 Referenzraum



○ - Monitorpositionen

### Materialien:

	- Vollziegelmauerwerk	0,6 m
	- Kalkputz (w-Wert: 3,0 kg/m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> )	0,02 m

Gesamtdicke: 0,62 m  
Wärmedurchlasswiderstand: 0,9 (m<sup>2</sup> K)/W  
U-Wert: 0,922 W/(m<sup>2</sup> K)

Abb. 13: Bauteilaufbau des Referenzraumes in der Muthgasse

Mithilfe des Postprozesses in „WUFI Pro“ wird der Wärmedurchlasswiderstand der Konstruktion berechnet. In Abb. 14 befinden sich die Ergebnisse des Wärmedurchlasswiderstands. Um den Gesamtwärmedurchlasswiderstand zu berechnen, müssen zusätzlich die inneren und äußeren Wärmeübergangswiderstände ( $R_{se}$  &  $R_{si}$ ) laut Formel (2) addiert werden.

$$R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Abb. 14 stellt drei Varianten des stationären Wärmedurchlasswiderstands und zwei Varianten des instationären Zustandes dar. Stationäre Bedingungen liegen bei konstanten Randbedingungen und nach Abklingen von instationären Effekten (wie z.B. Wärmespeicherung) vor.

Der Postprozessor zeigt die mittleren stationären R-Werte unter Verwendung der:

- Wärmeleitfähigkeiten der trockenen Materialien (die schwarze Linie)
- Wärmeleitfähigkeiten bei einem Referenzwassergehalt  $u_{80}$  (die Sorptionsfeuchte bei 80% relative Luftfeuchtigkeit) der enthaltenen Materialien (die blaue Linie)
- Wärmeleitfähigkeiten bei den typischen Einbaufeuchten der enthaltenen Materialien (die grüne Linie)

Bei instationären R- und U-Werten wird der Einfluss des von „WUFI Pro“ ermittelten Feuchtegehalts für gegebene klimatische Bedingungen untersucht. Zu diesem Zweck bietet der Postprozessor eine monatliche Auswertung der R- und U-Werte, unter Berücksichtigung der jeweiligen monatlichen Wassergehälter.

Der Postprozessor berechnet die Monatsmittel der Temperaturen und des Wärmestromes aus den stündlichen Temperaturen und Wärmeströmen der instationären WUFI-Simulation, die an den Postprozessor übergeben werden.

Neben den monatlichen Mittelwerten (blaue Punkte) zeigt der Postprozessor auch den mittleren R-Wert für die gesamte Berechnungsperiode (die rote Linie) an, definiert als das Verhältnis aus dem Mittelwert der Temperaturdifferenz und dem Mittelwert des Wärmestromes (nicht als das arithmetische Mittel der Monatsmittelwerte).

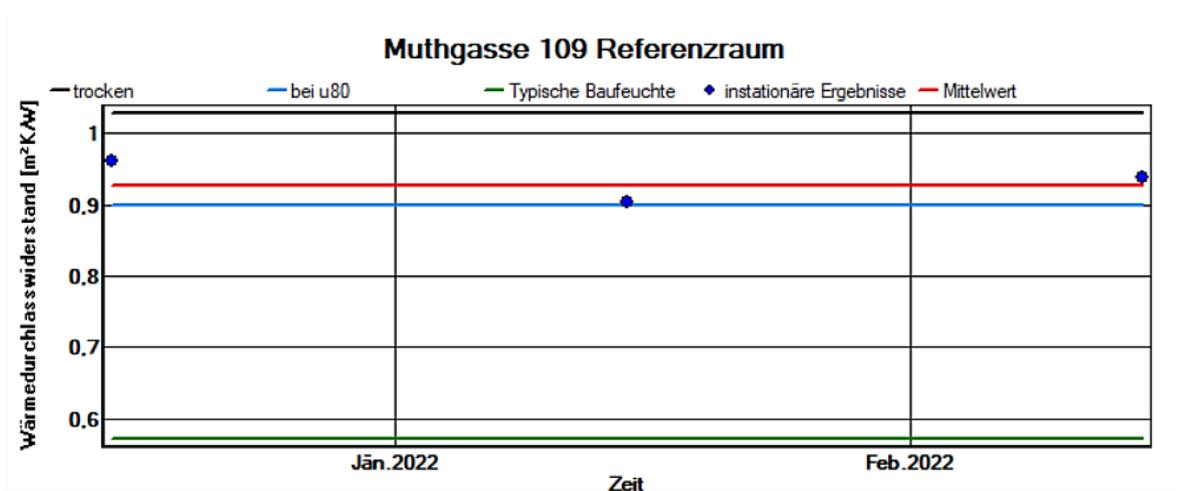


Abb. 14: Wärmedurchlasswiderstand des Referenzraums in der Muthgasse

Abb. 14 veranschaulicht die Ergebnisse des Wärmedurchlasswiderstandes des Referenzraumes in der Muthgasse.

Tab. 4: Ergebnisse des Gesamt-Wärmedurchlasswiderstands für den Referenzraum in der Muthgasse

Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand des Referenzraums in der Muthgasse	
Simulierter Wert (trocken)	1,19 m <sup>2</sup> K/W
Simulierter Wert (instationär)	1,03 m <sup>2</sup> K/W
Berechneter Wert	0,93 m <sup>2</sup> K/W
Gemessener Wert	1,92 m <sup>2</sup> K/W

Tab. 4 zeigt Ergebnisse des Gesamt-Wärmedurchlasswiderstands für den Referenzraum in der Muthgasse. Der Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand des trockenen Materials beträgt 1,19 m<sup>2</sup>K/W (Wärmedurchlasswiderstand 1,02 m<sup>2</sup>K/W und Wärmeübergangswiderstand 0,17 m<sup>2</sup>K/W). Im Vergleich zum berechneten Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand von 0,93 m<sup>2</sup>K/W aus Kapitel 4.4 ergibt sich ein Unterschied von 0,26 m<sup>2</sup>K/W. Dieser Unterschied beruht auf dem Wärmeleitfähigkeitswert der in der Software „WUFI Pro“ anders ist als in der DIN 4108-4 [29]. Mit der Berechnung der Wärmeleitfähigkeitswerte aus der Software „WUFI Pro“ werden die gleichen Ergebnisse für den trockenen

stationären Zustand, wie im Postprozess erhalten. Die Werte der Wärmeleitfähigkeit aus der Software „WUFI Pro“ befinden sich im Anhang. Der Mittelwert des Gesamt-Wärmedurchlasswiderstandes des instationären Zustandes liegt bei  $1,09 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Die Berücksichtigung der instationären Ergebnisse reduziert den Wärmedurchlasswiderstand aus dem Postprozess um 8%. Der gemessene Wärmewiderstand im Referenzraum ist viel höher und erreicht  $1,92 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Eine Abweichung von 38% zwischen dem gemessenen und dem berechneten Wert im stationären Zustand ist auf die abweichende tatsächliche Wärmeleitfähigkeit des Vollziegelmauerwerks zurückzuführen.

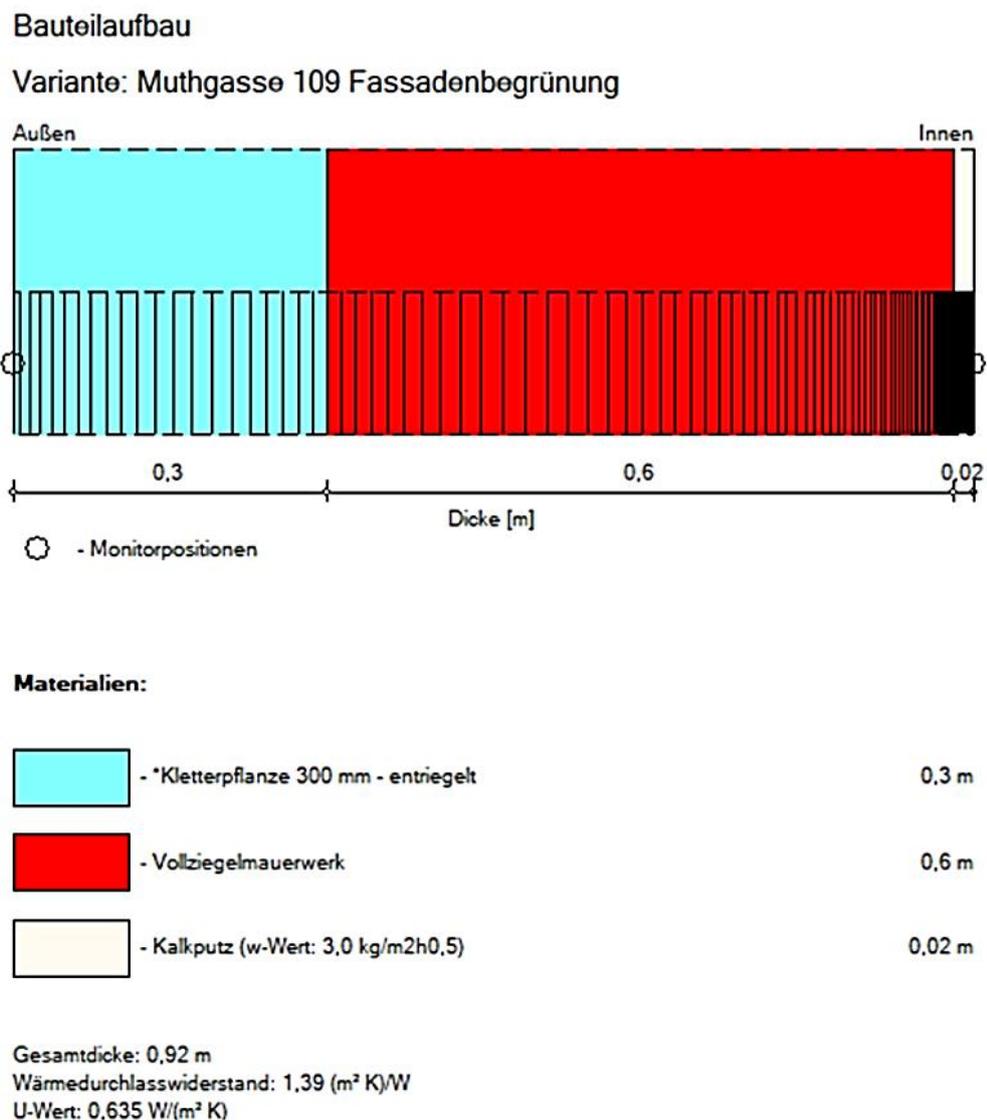


Abb. 15: Bauteilaufbau des begrünzten Raums in der Muthgasse

In Abb. 15 ist der Bauteilaufbau des begrünten Raums in der Muthgasse dargestellt. Die Kletterpflanze wurde als eine 30 cm dicke Luftschicht mit der berechneten Wärmeleitfähigkeit modelliert. Die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit der Kletterpflanze erfolgte mit der Formel (7). Der Wärmewiderstand der Kletterpflanze wurde aus dem Kapitel 4.3 entnommen und in die Formel (7) eingesetzt und nach der unbekanntenen Wärmeleitfähigkeit der Kletterpflanze ( $\lambda_{\text{Kletterpflanze}}$ ) aufgelöst.

$$R_{\text{Kletterpflanze}} = \frac{d_{\text{Kletterpflanze}}}{\lambda_{\text{Kletterpflanze}}} \quad (7)$$

$R_{\text{Kletterpflanze}}$  der gemessene Wärmewiderstand der Kletterpflanze 0,492  $\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$

$d_{\text{Kletterpflanze}}$  die Dicke der Kletterpflanze 0,30 m

$\lambda_{\text{Kletterpflanze}}$  die Bemessungs-Wärmeleitfähigkeit der Kletterpflanze  $\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})$

Die berechnete Wärmeleitfähigkeit der Kletterpflanze beträgt 0,61  $\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})$  und wurde für die Kletterpflanzenschicht in der Software „WUFI Pro“ definiert.

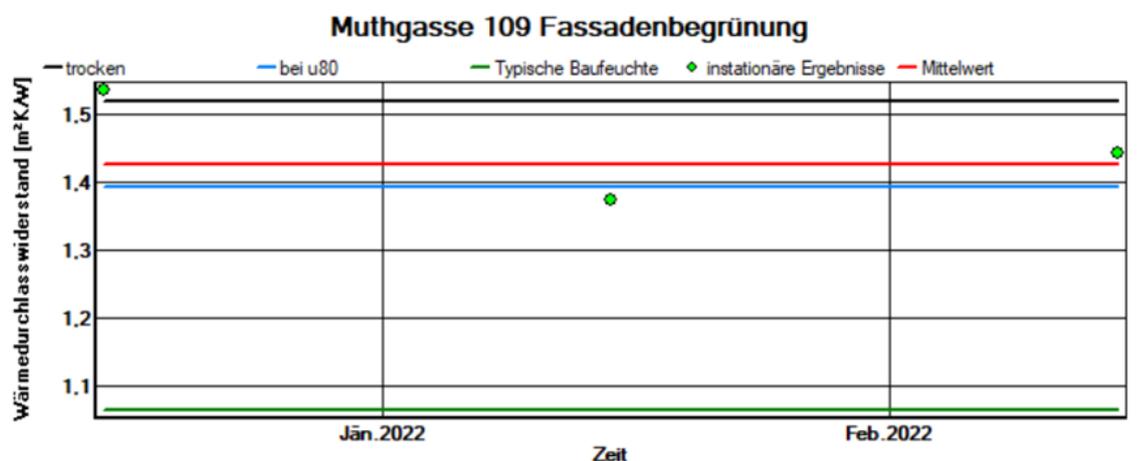


Abb. 16: Wärmedurchlasswiderstand des begrünten Raums in der Muthgasse

Abb. 16 zeigt die Ergebnisse des simulierten Wärmedurchlasswiderstandes des begrünten Raumes in der Muthgasse.

Tab. 5: Ergebnisse des Gesamt-Wärmedurchlasswiderstands für den begrünten Raum in der Muthgasse

Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand des begrünten Raums in der Muthgasse	
Simulierter Wert (trocken)	1,68 m <sup>2</sup> K/W
Simulierter Wert (instationär)	1,59 m <sup>2</sup> K/W
Gemessener Wert	2,412 m <sup>2</sup> K/W

Der Tab. 5 wird entnommen, dass der Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand im stationären trockenen Zustand bei 1,68 m<sup>2</sup>\*K/W liegt. Der berechnete Wärmewiderstand der in situ Messungen beträgt 2,412 m<sup>2</sup>\*K/W. Die Abweichung der beiden Werte ergibt 30%. Im Vergleich zum Referenzraum sind die Abweichungen zwischen dem gemessenen und dem simulierten Wert kleiner. Der Grund hierfür ist die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit von Kletterpflanzen aus den in situ Messungen. Der Mittelwert der simulierten instationären Ergebnisse für den Wärmedurchlasswiderstand ist 1,59 m<sup>2</sup>\*K/W. Die Berechnung des instationären Zustandes, die nach klimatischen Bedingungen erfolgt, reduziert den Wärmewiderstandeswert um 5%.

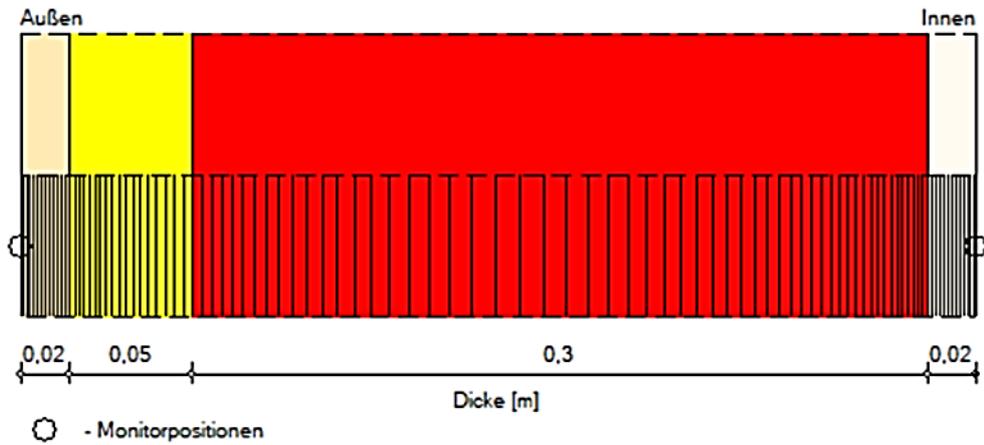
## 5.2 Kopalgasse

In der Software „WUFI Pro“ wurde der Wandaufbau aus der Kopalgasse modelliert und vom 19.11.2021 09:30 bis 28.02.2022 23:50 im Zeitintervall von 10 Minuten simuliert. Die für den Vergleich dienenden Klimadaten für den Außenbereich wurde Messdaten der Hohen Warte in Wien ausgewählt.

In Abb. 17 ist der Bauteilaufbau aus der Kopalgasse ersichtlich. Der Referenzraum in der Kopalgasse hat eine 5 cm dicke EPS Schicht vor dem 30 cm dicken Vollziegelmauerwerk. In diesem Fall wird auch der Einfluss der Dämmschicht auf die Auswirkungen der Kletterpflanzen analysiert.

### Bauteilaufbau

Variante: Kopalgasse Referenzraum 30cm VZM



### Materialien:

	- Mineralischer Außenputz (w-Wert: 0,1 kg/m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> )	0,02 m
	- EPS (Wärmeleit.: 0,04 W/mK - Dichte: 15 kg/m <sup>3</sup> )	0,05 m
	- Vollziegelmauerwerk	0,3 m
	- Kalkputz (w-Wert: 3,0 kg/m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> )	0,02 m

Gesamtdicke: 0,39 m  
Wärmedurchlasswiderstand: 1,73 (m<sup>2</sup> K)/W  
U-Wert: 0,522 W/(m<sup>2</sup> K)

Abb. 17: Bauteilaufbau des Referenzraum in der Kopalgasse

Abb. 18 gibt den simulierten Wärmedurchlasswiderstand des Referenzraums in der Kopalgasse wieder.

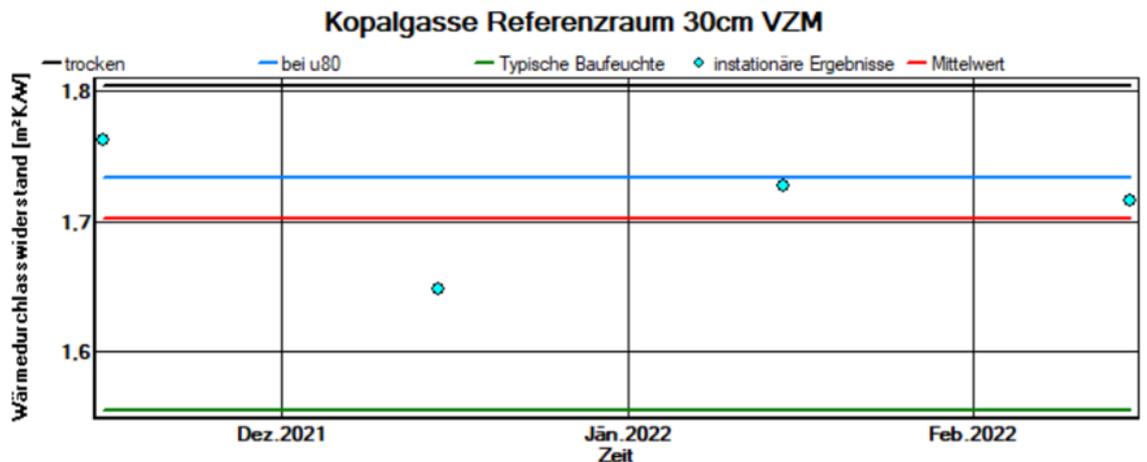


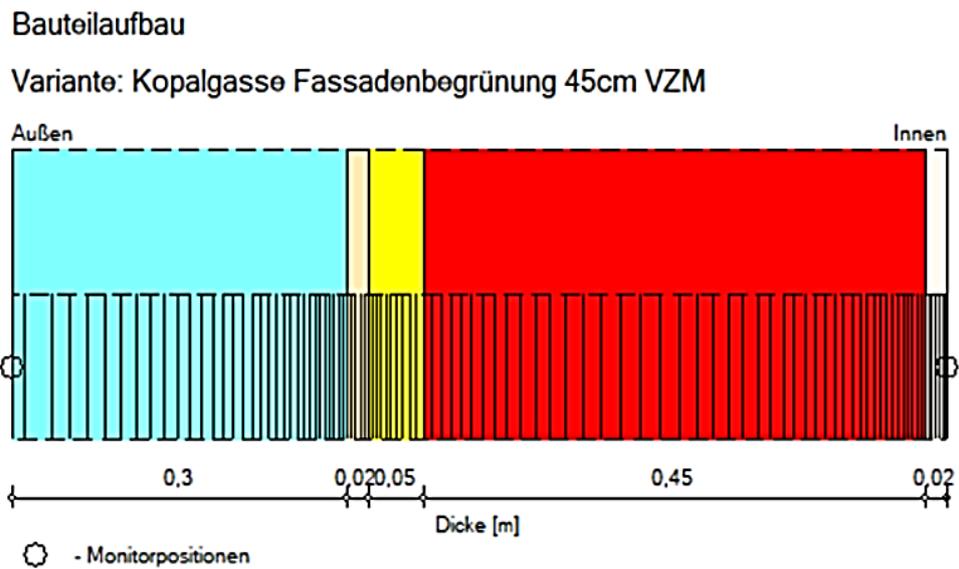
Abb. 18: Wärmedurchlasswiderstand des Referenzraums in der Kopalgasse

Tab. 6 präsentiert Ergebnisse des Gesamt-Wärmedurchlasswiderstands des Referenzraumes in der Kopalgasse. Es ist zu erkennen, dass der Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand des trockenen stationären Zustandes  $1,97 \text{ m}^2\text{K/W}$  und im instationären Fall  $1,87 \text{ m}^2\text{K/W}$  beträgt. Die beiden Werte weisen eine prozentuelle Differenz von 5% auf und im Vergleich zur Muthgasse reduziert sich die Abweichung um 3%.

Tab. 6: Ergebnisse des Gesamt-Wärmedurchlasswiderstands für den Referenzraum in der Kopalgasse

Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand des Referenzraums in der Kopalgasse	
Simulierter Wert (trocken)	$1,97 \text{ m}^2\text{K/W}$
Simulierter Wert (instationär)	$1,87 \text{ m}^2\text{K/W}$
Gemessener Wert	$2,407 \text{ m}^2\text{K/W}$

Der gemessene Wärmewiderstand des Referenzraums in der Kopalgasse liegt bei  $2,407 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Außerdem ist die Abweichung zwischen dem gemessenen und dem simulierten Wert im trockenen Zustand kleiner als in der Muthgasse und beträgt nur 18%. Die im Gegensatz zur Kopalgasse unterschiedliche Dicke des Vollziegelmauerwerks (30 vs. 60cm) werden als Grund dafür angesehen, dass die Abweichung zwischen den simulierten und gemessenen Wert kleiner als in der Muthgasse ist. Auch hier entspricht der theoretische Wärmeleitfähigkeitswert des Vollziegelmauerwerks nicht dem in der Realität gemessenen Wert.



**Materialien:**

	- *Kletterpflanze 300 mm - entriegelt	0,3 m
	- Mineralischer Außenputz (w-Wert: 0,1 kg/m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> )	0,02 m
	- EPS (Wärmeleit.: 0,04 W/mK - Dichte: 15 kg/m <sup>3</sup> )	0,05 m
	- Vollziegelmauerwerk	0,45 m
	- Kalkputz (w-Wert: 3,0 kg/m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> )	0,02 m

Gesamtdicke: 0,84 m  
Wärmedurchlasswiderstand: 2,53 (m<sup>2</sup> K)/W  
U-Wert: 0,369 W/(m<sup>2</sup> K)

Abb. 19: Bauteilaufbau des begrünten Raums in der Kopalgasse

In Abb. 19 ist der Bauteilaufbau des begrünten Raums in der Kopalgasse dokumentiert. Die Kletterpflanze wurde als eine 30cm dicke Luftschicht mit der berechneten Wärmeleitfähigkeit in der Software „WUFI Pro“ modelliert. Die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit der Kletterpflanze erfolgte mit der Formel (8) . Der Wärmewiderstand der Kletterpflanze wurde aus Kapitel 4.3 in die Formel

(8) eingesetzt und nach der unbekanntem Wärmeleitfähigkeit der Kletterpflanze ( $\lambda_{\text{Kletterpflanze}}$ ) aufgelöst.

$$R_{\text{Kletterpflanze}} = \frac{d_{\text{Kletterpflanze}}}{\lambda_{\text{Kletterpflanze}}} \quad (8)$$

$R_{\text{Kletterpflanze}}$  der gemessene Wärmewiderstand der Kletterpflanze 0,573  $\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$

$d_{\text{Kletterpflanze}}$  die Dicke der Kletterpflanze 0,30 m

$\lambda_{\text{Kletterpflanze}}$  die Bemessungs-Wärmeleitfähigkeit der Kletterpflanze  $\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})$

Die berechnete Wärmeleitfähigkeit der Kletterpflanze beträgt 0,524  $\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})$  und wurde für die Kletterpflanzenschicht in der Software „WUFI Pro“ definiert. Im Vergleich zum berechneten Wert in der Muthgasse liegt die Abweichung bei 14%

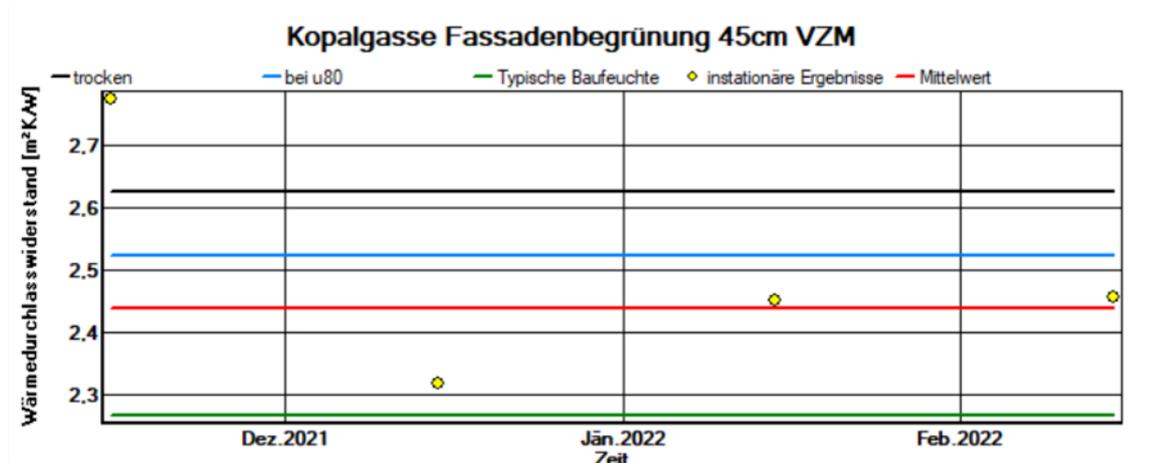


Abb. 20: Wärmedurchlasswiderstand des begrünten Raums in der Kopalgasse

Abb. 20 stellt den simulierten Wärmedurchlasswiderstand des begrünten Raums in der Kopalgasse dar.

Tab. 7: Ergebnisse des Gesamt-Wärmedurchlasswiderstands für den begrünten Raum in der Kopalgasse

Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand des begrünten Raums in der Kopalgasse	
Simulierter Wert (trocken)	2,80 m <sup>2</sup> K/W
Simulierter Wert (instationär)	2,61 m <sup>2</sup> K/W
Gemessener Wert	2,98 m <sup>2</sup> K/W

Tab. 7 zeigt Ergebnisse des Gesamt-Wärmedurchlasswiderstands für den begrünten Raum in der Kopalgasse. Der Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand des trockenen stationären Zustandes beträgt 2,8 m<sup>2</sup>·K/W. Der gemessene Wärmewiderstand des begrünten Raums in der Kopalgasse ist größer und hat den Wert von 2,98 m<sup>2</sup>·K/W. Die Differenz beträgt nur 6%. Dass der simulierte Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand im Vergleich zum gemessenen Fall so wenig abweicht, hat zwei Ursachen. Einerseits ist die Dicke des Vollziegelmauerwerks kleiner als die in der Muthgasse und andererseits wird die gemessene Wärmeleitfähigkeit der Kletterpflanze berücksichtigt. Die Reduzierung der Dicke verringert die Abweichung zwischen dem gemessenen und simulierten Wärmewiderstand um 20%, während die Berücksichtigung der Wärmeleitfähigkeit der Kletterpflanze um 12% reduziert. Der Mittelwert des instationären Gesamt-Wärmedurchlasswiderstandes liegt bei 2,61 m<sup>2</sup>·K/W. Bei der Betrachtung des instationären Zustandes sinkt der simulierte Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand um 7%.

In der Software „WUFI Pro“ erfolgt die instationäre Berechnung des Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand nach klimatischen Bedingungen und demnach spielt die Außenoberflächentemperatur eine relevante Rolle in der Bestimmung des Wärmewiderstandes. Das Außenklima beeinflusst viel stärker die Außenoberflächentemperatur als die Innenoberflächentemperatur. Dementsprechend werden die Außenoberflächentemperaturen der Messdaten und der Simulation im nächsten Kapitel miteinander verglichen, um die Ursache der Abweichung zwischen den beiden Werten in den Referenzräume zu ermitteln.

### 5.3 Vergleich der Außenoberflächentemperaturen

Um die Ursache des abweichenden Wärmewiderstandes zwischen den in situ Messungen und der instationäre Simulation aus der Software „WUFI Pro“ zu ermitteln, wurden die Außenoberflächentemperaturen miteinander verglichen. Der instationäre Zustand wird in der Software „WUFI Pro“ mit Hilfe Formel (9) berechnet. Somit sollten die gemessenen Außenoberflächentemperaturen den simulierten Außenoberflächentemperaturen entsprechen bzw. möglichst nah aneinander liegen. Die exportierten Daten aus der Software „WUFI Pro“ wurden in Abb. 21 mithilfe eines Diagramms dargestellt. Abb. 21 veranschaulicht den Verlauf der gemessenen und der simulierten Außenoberflächentemperaturen des Referenzraums in der Muthgasse. Es ist zu erkennen, dass der Verlauf aus der WUFI Pro nicht mit den vor Ort gemessenen Werten übereinstimmt. Ferner ist die größte Abweichung Anfang Januar und Mitte Februar zu verzeichnen. Die simulierten Außenoberflächentemperaturen nehmen hauptsächlich kleinere Werte an als die in situ gemessenen Werte. Im Zeitraum vom 01.01.2022 bis 10.01.2022 beträgt der Unterschied bis zu 10°C. Darüber hinaus weisen die simulierten Werte vom 04.02.2022 bis 23.02.2022 eine fallende Tendenz auf, obwohl die gemessenen Werte eine Zunahme zeigen. Die Unterschiede in der Außenoberflächentemperatur führen zu abweichenden Temperaturdifferenzen und folglich auch zu anderen Wärmewiderständen.

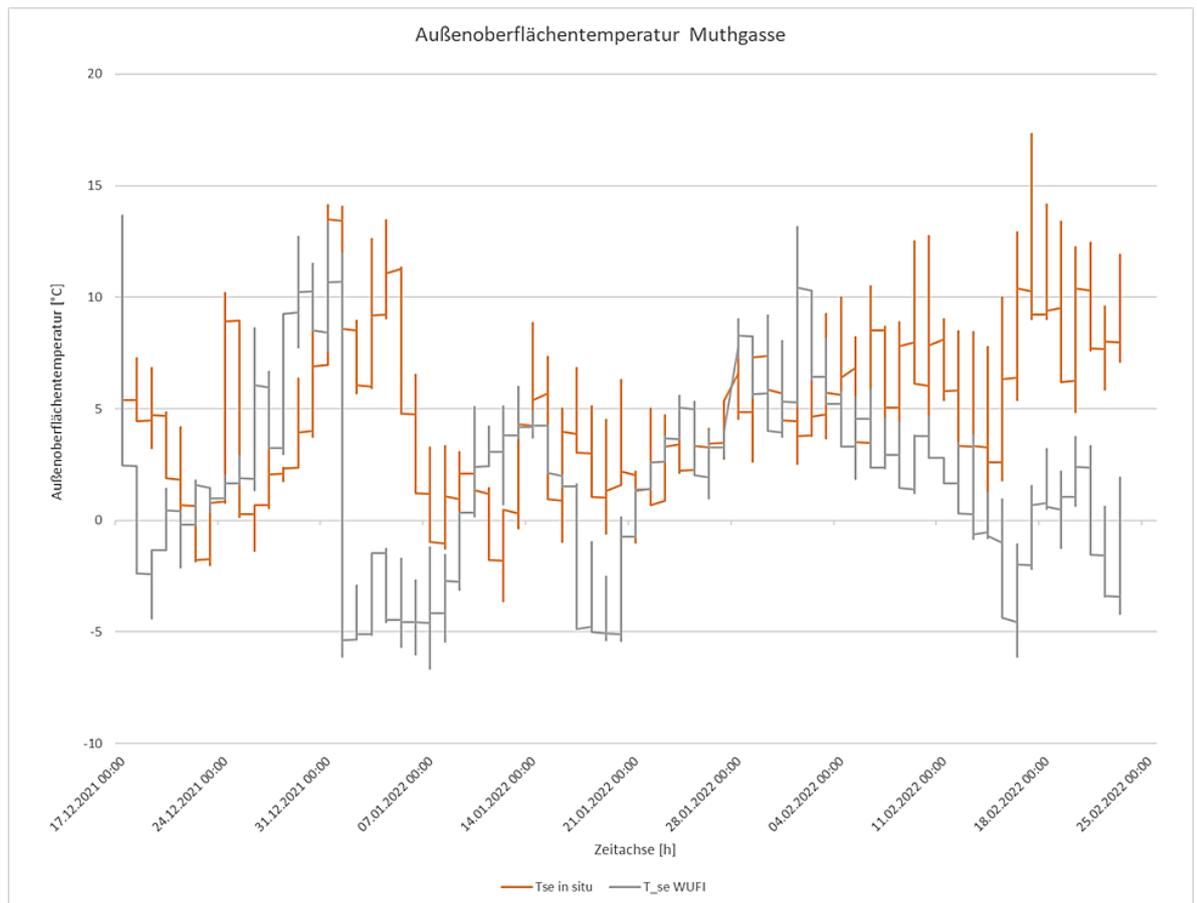


Abb. 21: Verlauf der Außenoberflächentemperatur des Referenzraums in der Muthgasse

Abb. 22 gibt den Verlauf der gemessenen und simulierten Außenoberflächentemperaturen des Referenzraums in der Kopalgasse wieder. Die gemessenen Werte in der Kopalgasse werden über einen längeren Zeitraum als in der Muthgasse aufgezeichnet. Dabei ist auffällig, dass in der Kopalgasse, über den gesamten Verlauf, die simulierten Werte der Außenoberflächentemperatur allgemein besser mit den gemessenen Werten übereinstimmen als in der Muthgasse. Die Stellen mit der größten Abweichung befinden sich Anfang Januar und Mitte Februar. In beiden Fällen kommt es zu unterschiedlichen Tendenzen. Die simulierten Werte weisen Anfang Januar eine steigende Tendenz auf, während die gemessenen Werte sinken. Die umgekehrte Entwicklung findet Ende Februar mit den fallenden simulierten Werten und den steigenden gemessenen Werten statt. Darüber hinaus zeigt der Vergleich zwischen der Muthgasse und der Kopalgasse, dass die simulierten Werte einen

ähnlichen Verlauf haben und es sowohl zu einem Sprung am 01.01.2022 im Diagramm als auch zur Regression in Februar führt.

Beide Diagramme zeigen Abweichungen zwischen den gemessenen und simulierten Außenoberflächentemperaturen und führen bei der Berechnung des Wärmewiderstandes zu den unterschiedlichen Werten zwischen instationären und gemessenen Zustand.

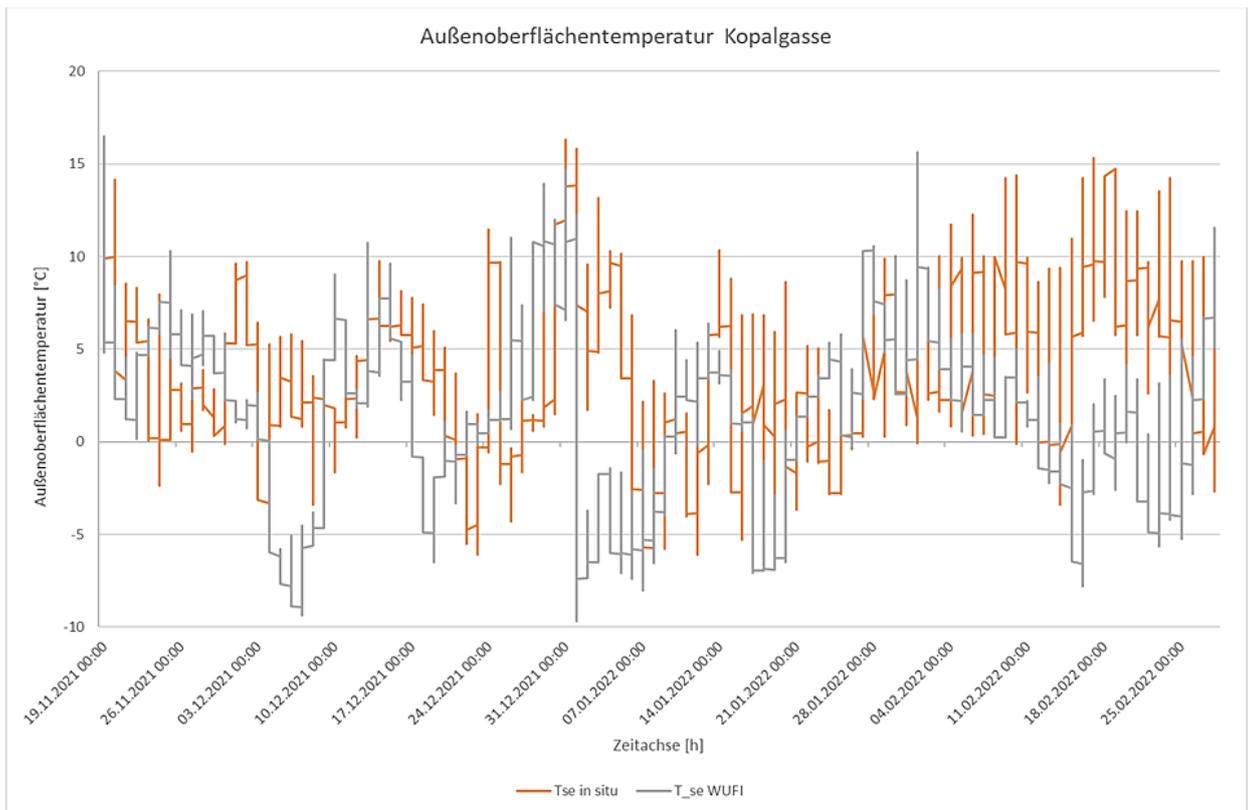


Abb. 22: Verlauf der Außenoberflächentemperatur des Referenzraums in der Kopalgasse

#### 5.4 Muthgasse - modifizierter Wandaufbau

In diesem Kapitel wurde die Wärmeleitfähigkeit des Vollziegelmauerwerks in der Muthgasse geändert, um Ergebnisse zu bekommen, die mit den in situ Messungen vergleichbar sind. Damit könnte die Simulation für eine Fassade mit den Kletterpflanzen in der Zukunft verwendet werden, um den Wärmewiderstandes der Wand zu bestimmen.

Die Berechnung erfolgte folgendermaßen: Der Mittelwert des Wärmewiderstandes aus den in situ Messungen wurde in die Formel (2)

eingesetzt und nach der unbekanntem Wärmeleitfähigkeit vom Vollziegelmauerwerk aufgelöst. Die Eigenschaften des Vollziegelmauerwerks wurden aufgrund des maßgebenden Einflusses des stationären Zustandes auf den Wärmewiderstand modifiziert.

Formel (10) veranschaulicht die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit des Vollziegelmauerwerks in der Muthgasse. Der gemessene Wärmewiderstand des Referenzraums wurde in die Formel (2) für den Gesamtwärmedurchlasswiderstand der homogenen Schichten eingesetzt und nach der unbekanntem Wärmeleitfähigkeit des Vollziegelmauerwerks ( $\lambda_{VZM,modi}$ ) aufgelöst.

$$R_{tot,ref} = R_{se} + \frac{d_{VZM}}{\lambda_{VZM,modi}} + \frac{d_{Kalkputz}}{\lambda_{Kalkputz}} + R_{si} \quad (10)$$

$R_{tot,ref}$  der gemessene Gesamtwärmedurchlasswiderstand des Referenzraums  $1,92 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$

$R_{se}$  der äußere Wärmeübergangswiderstand  $0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$

$d_{VZM}$  die Dicke des Vollziegelmauerwerks  $0,60 \text{ m}$

$\lambda_{VZM,modi}$  die Bemessungs-Wärmeleitfähigkeit des Vollziegelmauerwerks  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

$d_{Kalkputz}$  die Dicke des Kalkputzes  $0,02 \text{ m}$

$\lambda_{Kalkputz}$  die Bemessungs-Wärmeleitfähigkeit des Kalkputzes  $0,7 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

$R_{si}$  der innere Wärmeübergangswiderstand  $0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$

Die berechnete Wärmeleitfähigkeit des Vollziegelmauerwerks beträgt nach Formel (10)  $0,348 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ . Mit diesem Wert wird die Vollziegelmauerwerk Schicht in der Software „WUFI Pro“ simuliert.

Abb. 23 gibt den simulierten Wärmedurchlasswiderstad des Referenzraumes in der Muthgasse für die modifizierte Wärmeleitfähigkeit des Vollziegelmauerwerks wieder.

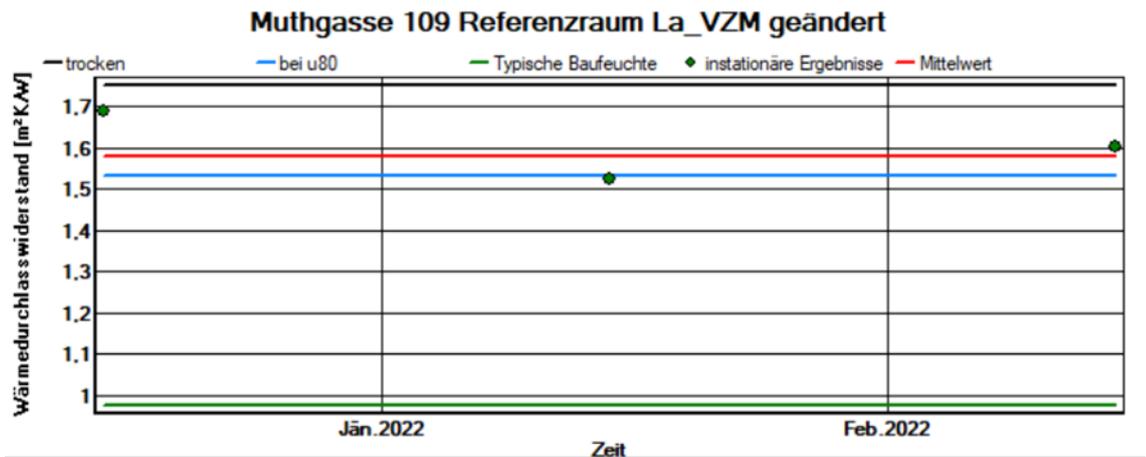


Abb. 23: Wärmedurchlasswiderstand des modifizierten Referenzraums in der Muthgasse

Tab. 8 zeigt Ergebnisse des modifizierten Gesamt-Wärmedurchlasswiderstands für den Referenzraum in der Muthgasse. Der simulierte Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand liegt bei 1,92 m<sup>2</sup>·K/W (Wärmedurchlasswiderstand 1,75 m<sup>2</sup>·K/W und Wärmeübergangswiderstand 0,17 m<sup>2</sup>·K/W) und entspricht dem vor Ort gemessenen Wärmewiderstand.

Tab. 8: Ergebnisse des modifizierten Gesamt-Wärmedurchlasswiderstands für den Referenzraum in der Muthgasse

Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand des Referenzraums in der Muthgasse	
Simulierter modifizierter Wert (trocken)	1,92 m <sup>2</sup> K/W
Simulierter modifizierter Wert (instationär)	1,76 m <sup>2</sup> K/W
Gemessener Wert	1,92 m <sup>2</sup> K/W

Der Mittelwert des instationären Gesamt-Wärmedurchlasswiderstandes beträgt 1,76 m<sup>2</sup>·K/W. Die Berücksichtigung der instationären Bedingungen ergibt eine Reduzierung um 8%. Die gleiche Reduzierung liegt im Fall ohne eine modifizierte Wärmeleitfähigkeit des Vollziegelmauerwerks vor. Die Modifikation der Wärmeleitfähigkeit des Vollziegelmauerwerks führte zur Erreichung des gemessenen Wärmewiderstandes.

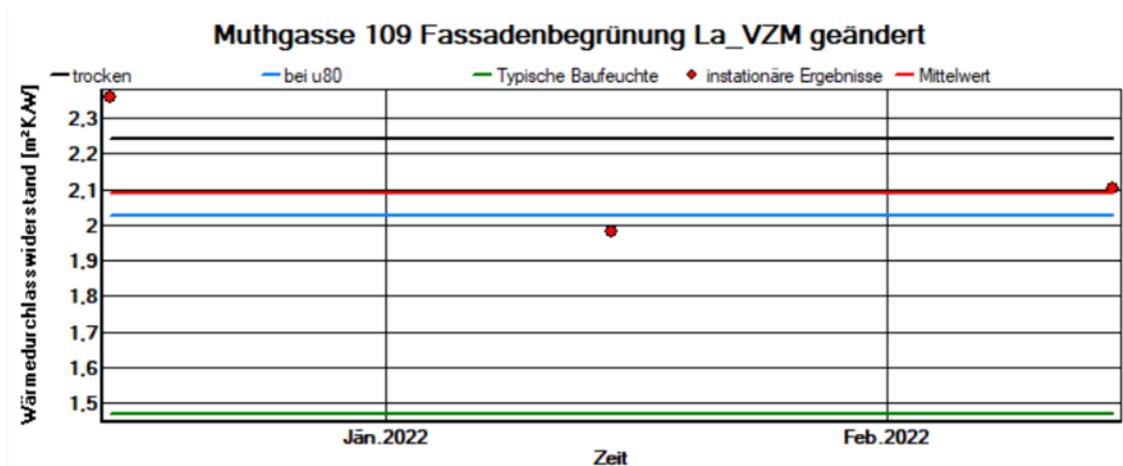


Abb. 24: Wärmedurchlasswiderstand des modifizierten begrünten Raums in der Muthgasse

Abb. 24 stellt die Ergebnisse des simulierten Wärmedurchlasswiderstandes des begrünten Raumes in der Muthgasse für die modifizierte Wärmeleitfähigkeit des Vollziegelmauerwerks dar.

Tab. 9 präsentiert Ergebnisse des Gesamt-Wärmedurchlasswiderstands für den begrünten Raum in der Muthgasse. Der simulierte Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand liegt bei 2,41 m<sup>2</sup>·K/W (Wärmedurchlasswiderstand 2,24 m<sup>2</sup>·K/W und Wärmeübergangswiderstand 0,17 m<sup>2</sup>·K/W) und entspricht dem vor Ort gemessenen Wärmewiderstand. Der Mittelwert des instationären Gesamt-Wärmedurchlasswiderstandes beträgt 2,27 m<sup>2</sup>·K/W. Die Berücksichtigung des instationären Bedingungen ergibt eine Reduzierung um 6%. Auch in diesem Fall führt die Modifikation der Wärmeleitfähigkeit des Vollziegelmauerwerks zu einer Annäherung an den gemessenen Wärmewiderstand des begrünten Raumes.

Tab. 9: Ergebnisse des modifizierten Gesamt-Wärmedurchlasswiderstands für den begrünten Raum in der Muthgasse

Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand des begrünten Raums in der Muthgasse	
Simulierter modifizierter Wert (trocken)	2,41 m <sup>2</sup> K/W
Simulierter modifizierter Wert (instationär)	2,27 m <sup>2</sup> K/W
Gemessener Wert	2,412 m <sup>2</sup> K/W

## 5.5 Kopalgasse modifizierter Wandaufbau

Formel (11) veranschaulicht die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit des Vollziegelmauerwerks in der Muthgasse. Der gemessene Wärmewiderstand des begrünten Raumes wurde in die Formel (2) für den Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand der homogenen Schichten eingesetzt und nach der unbekanntem Wärmeleitfähigkeit des Vollziegelmauerwerks ( $\lambda_{VZM,modi}$ ) aufgelöst.

$$R_{tot,ref} = R_{se} + \frac{d_{Außenputz}}{\lambda_{Außenputz}} + \frac{d_{EPS}}{\lambda_{EPS}} + \frac{d_{VZM}}{\lambda_{VZM,modi}} + \frac{d_{Kalkputz}}{\lambda_{Kalkputz}} + R_{si} \quad (11)$$

$R_{tot,ref}$  der gemessene Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand des Referenzraums  $2,407 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$

$R_{se}$  der äußere Wärmeübergangswiderstand,  $0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ .

$d_{Außenputz}$  die Dicke des Außenputzes  $0,02 \text{ m}$

$\lambda_{Außenputz}$  die Bemessungs-Wärmeleitfähigkeit des Außenputzes  $0,8 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

$d_{EPS}$  die Dicke der EPS-Platte  $0,05 \text{ m}$

$\lambda_{EPS}$  die Bemessungs-Wärmeleitfähigkeit der Kletterpflanze  $0,04 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

$d_{VZM}$  die Dicke des Vollziegelmauerwerks  $0,30 \text{ m}$

$\lambda_{VZM,modi}$  die Bemessungs-Wärmeleitfähigkeit des Vollziegelmauerwerks  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

$d_{Kalkputz}$  die Dicke des Kalkputzes  $0,02 \text{ m}$

$\lambda_{Kalkputz}$  die Bemessungs-Wärmeleitfähigkeit des Kalkputzes  $0,7 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

$R_{si}$  der innere Wärmeübergangswiderstand  $0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ .

Die berechnete Wärmeleitfähigkeit des Vollziegelmauerwerks in der Kopalgasse beträgt gemäß der Formel (11)  $0,321 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ . Mit diesem Wert wurde die Vollziegelmauerwerkschicht in der Software „WUFI Pro“ simuliert. Im Vergleich zu der berechneten Wärmeleitfähigkeit in der Muthgasse, die bei  $0,348 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  liegt, gibt es eine Abweichung von 8%.

Abb. 25 zeigt die Ergebnisse der WUFI-Simulation für die modifizierte Wärmeleitfähigkeit des Vollziegelmauerwerks.

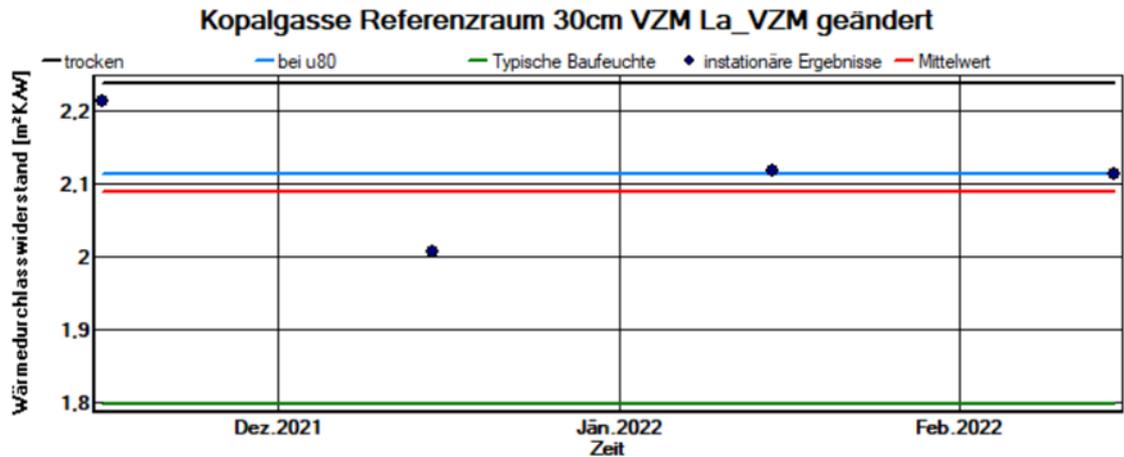


Abb. 25: Wärmedurchlasswiderstand des modifizierten Referenzraums in der Kopalgasse

Tab. 10 präsentiert Ergebnisse des modifizierten Gesamt-Wärmedurchlasswiderstands des Referenzraumes in der Kopalgasse.

Tab. 10: Ergebnisse des modifizierten Gesamt-Wärmedurchlasswiderstands für den Referenzraum in der Kopalgasse

Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand des Referenzraums in der Kopalgasse	
Simulierter modifizierter Wert (trocken)	2,41 m²K/W
Simulierter modifizierter Wert (instationär)	2,26 m²K/W
Gemessener Wert	2,407 m²K/W

Der Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand des stationären trockenen Zustandes weist einen Wert von 2,41 m²·K/W auf (Wärmedurchlasswiderstand 2,24 m²·K/W und Wärmeübergangswiderstand 0,17 m²·K/W) und entspricht dem vor Ort gemessenen Wärmewiderstand. Der Mittelwert des instationären Gesamt-Wärmedurchlasswiderstandes beträgt 2,26 m²·K/W. Die Berücksichtigung des instationären Bedingungen ergibt eine Reduzierung um 6%. Die Modifikation der Wärmeleitfähigkeit des Vollziegelmauerwerks führt zu einer Annäherung an den gemessenen Wärmewiderstand.

Aufgrund unterschiedlicher Wanddicken zwischen den begrünten Raum und dem Referenzraum wurde die Wärmeleitfähigkeit mithilfe des Strahlensatzes angepasst, um ein proportionales Verhältnis zu erhalten. Formel (12) zeigt diese Berechnung.

$$\frac{d_{\text{VZM},30}}{\lambda_{\text{VZM},30}} = \frac{d_{\text{VZM},45}}{\lambda_{\text{VZM},45}} \quad (12)$$

$d_{\text{VZM},30}$  die Dicke des Vollziegelmauerwerks 0,30 m

$\lambda_{\text{VZM},45}$  die Bemessungs-Wärmeleitfähigkeit des Vollziegelmauerwerks 0,321 W/(m·K)

$d_{\text{VZM},45}$  die Dicke des Vollziegelmauerwerks 0,45 m

$\lambda_{\text{VZM},45}$  die Bemessungs-Wärmeleitfähigkeit des Vollziegelmauerwerks W/(m·K)

Die modifizierte Wärmeleitfähigkeit des Vollziegelmauerwerks beträgt für den begrünten Raum 0,482 W/(m·K).

Abb. 26 veranschaulicht den simulierten Wärmedurchlasswiderstand des begrünten Raumes in der Kopalgasse für die modifizierte Wärmeleitfähigkeit des Vollziegelmauerwerks.

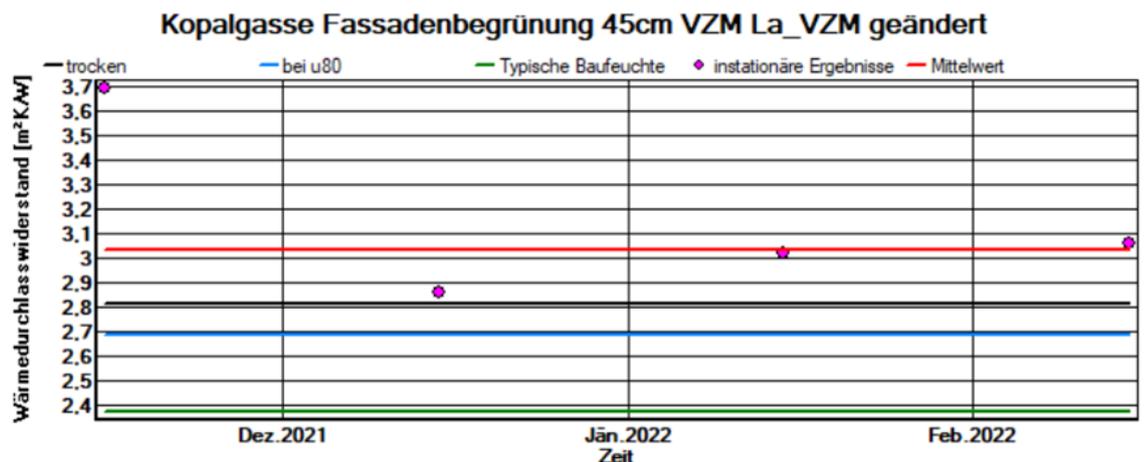


Abb. 26: Wärmedurchlasswiderstand des modifizierten begrünten Raumes in der Kopalgasse

Tab. 11 zeigt Ergebnisse des modifizierten Gesamt-Wärmedurchlasswiderstands für den begrünten Raum in der Kopalgasse. Der simulierte Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand des trockenen stationären

Zustandes liegt bei  $2,98 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$  (Wärmedurchlasswiderstand  $2,81 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$  und Wärmeübergangswiderstand  $0,17 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ) und entspricht dem vor Ort gemessenen Wärmewiderstand. Der Mittelwert des instationären Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand beträgt  $3,19 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ . Die Berücksichtigung der instationären Bedingungen ergibt eine Zunahme um 7%.

Tab. 11: Ergebnisse des modifizierten Gesamt-Wärmedurchlasswiderstands für den begrünten Raum in der Kopalgasse

Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand des begrünten Raums in der Kopalgasse	
Simulierter Wert (trocken)	$2,98 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$
Simulierter Wert (instationär)	$3,19 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$
Gemessener Wert	$2,98 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$

In allen anderen Fällen kam es durch die instationäre Berechnung zu einer Reduktion des Wärmewiderstandes von 6-8%. Die Ursache, wieso es in diesem Fall zu einer Zunahme kommt, kann auf die Abnahme des Wärmestromes, welcher in der Berechnung des instationären Zustandes vorkommt, zurückzuführen sein. Die Abnahme des Wärmestromes ist mit der größeren Abnahme der modifizierten Wärmeleitfähigkeit des Vollziegelmauerwerks in Verbindung zu bringen. Die Modifikation der Wärmeleitfähigkeit des Vollziegelmauerwerks ermöglicht die Annäherung an den gemessenen Wärmewiderstand des begrünten Raums in der Kopalgasse.

## **6 Zusammenfassung und Ausblick**

Die Verwendung von Kletterpflanzen als Fassadenbegrünung bringt thermische Vorteile mit sich, welche durch Verschattung, Wärmedämmung, Kühlung durch Evapotranspiration und Schutz vor direktem Wind bieten. Dabei ist außerdem zu beachten, dass die Wirkung für das Gebäudeinnere durch die Fassadenbegrünung von dem Wandaufbau, der Ausrichtung, dem Klima, der Dicke und Dichte der Kletterpflanze beeinflusst wird.

Das zentrale Thema dieser Arbeit war die Untersuchung der thermischen Auswirkungen selbstklimmender, bodengebundener Kletterpflanzen, die anhand

der durchgeführten Messungen in Wien während der Wintermonate, analysiert und anschließend mit der Software „WUFI Pro“ simuliert wurden.

Die Fassadenbegrünung hat nachweislich einen positiven Einfluss auf die thermischen Eigenschaften der Wand. Anhand der Messdaten von zwei verschiedenen Gebäuden mit einem unterschiedlichen Wandaufbau wurde die Schlussfolgerung gezogen, dass die Fassadenbegrünung den stationären Wärmewiderstand der Wand um 24-26% verbessert. Die Fassade ohne Dämmschicht(Muthgasse) schneidet mit einer Verbesserung von 26% ein wenig besser ab, als die Fassade mit Wärmedämmung (Kopalgasse) von 24%. Dieser Unterschied von 2% zeigt, dass eine Kletterpflanzenschicht auf einer Vollziegelmauerwerkswand, sowohl mit als auch ohne Dämmschicht effektiv wirkt. Bei dem Vergleich der Außenoberflächentemperatur zwischen dem begrünten Raum und dem Referenzraum stellte sich heraus, dass sich der Mittelwert der Außenoberflächentemperatur der Kletterpflanze während der Wintermonate in Abhängigkeit vom Wandaufbau, zwischen 1,3°C und 3,5°C, erhöht. Ferner wurde die Standardabweichung der Außenoberflächentemperatur, infolge der Fassadenbegrünung um 40% in der Kopalgasse und um 30% in der Muthgasse reduziert. Eine Erhöhung der Außenoberflächentemperatur ist für eine Fassade mit Wärmedämmung sogar noch ausgeprägter.

Mithilfe der Software „WUFI Pro“ wurde eine Analyse der jeweiligen Wandaufbauten durchgeführt. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass der simulierte Gesamt-Wärmewiderstand einen viel kleineren Wert aufweist, als der gemessene Wärmewiderstand. Die größte Abweichung des Wärmewiderstandes in der Höhe von 30% wurde für die Wand mit 60 cm dicken Vollziegelmauerwerk verzeichnet. Der Wandaufbau des 30 cm dicken Vollmauerziegelwerk und der 5 cm dicken EPS-Platte reduziert die Abweichung des gemessenen Wärmewiderstandes auf 18 %. Aufgrund des Unterschiedes zwischen dem Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit des Vollziegelmauerwerks und dem tatsächlichen Wert, stimmen die Ergebnisse aus dem Programm mit den gemessenen Werten nicht überein. Die durchgeführte Simulation der begrünten Räume ergibt weniger Abweichungen, weil die Wärmeleitfähigkeit der Kletterpflanzen anhand der gemessenen Daten berechnet wurde. Die

Modifizierung der Wärmeleitfähigkeit des Vollziegelmauerwerks ermöglicht eine Angleichung des simulierten Gesamt-Wärmewiderstands an die gemessenen Werte.

Als eine Art der Fassadenbegrünung hat die Kletterpflanze viel Potenzial den thermischen Widerstand der Wand zu verbessern. Aufgrund des steigenden Interesses und Notwendigkeit an Fassadenbegrünungen, kommt es zur ständigen Forschungsentwicklung, die eine Erleichterung bei der Planung und der Anwendung mit sich bringt. Die Thematik bedarf weiterer Untersuchungen, damit eine Standarisierung der Richtlinien auf internationaler Ebene erreicht wird und somit eine einfache Dimensionierung für die Planung zur Verfügung steht. Viele Aspekte bezüglich der Erhaltung und der Wartung müssen auch mitberücksichtigt werden, da eine Kletterpflanze ein sich veränderndes Lebewesen ist.

## 7 Anhang

Tab. 12: Wärmeleitfähigkeiten aus WUFI Pro

	Wärmeleitfähigkeit aus WUFI Pro [W/K*m]
Kalkputz	0,7
Vollziegelmauerwerk	0,6
EPS	0,04
Mineralischer Außenputz	0,8

## 7.1 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Sensitivität der Wärmestromunterschiede zwischen der nicht begrünten und der begrünten Fassade[20] .....	10
Abb. 2: Mittlere Oberflächentemperatur der begrünten und nicht begrünten Wand an drei untersuchten Orten während heißer Sommertage (a) Süd-West ausgerichtet, (b) Osten ausgerichtet , (c) West ausgerichtet [22] .....	12
Abb. 3: Wärmefluss durch eine Fassade mit und ohne Begrünung als eine elektrische Reihenschaltung dargestellt [20].....	15
Abb. 4: Ergebnisse der Kühlungslast und deren Einsparrate in Nanning [25]...	17
Abb. 5: Efeu „ <i>Hedera hibernica</i> “ in der Muthgasse .....	19
Abb. 6: Ansicht des Gebäudes in der Kopalgasse .....	20
Abb. 7: Der Bestandsplan des Gebäudes in der Kopalgasse .....	20
Abb. 8: Ansicht des Gebäudes in der Muthgasse .....	21
Abb. 9: Messsensoren auf der Außen- und Innenwandseite in der Muthgasse	22
Abb. 10: Der gemessene Wärmewiderstand in der Muthgasse .....	25
Abb. 11: Der gesamte Wärmewiderstand in der Kopalgasse.....	26
Abb. 12: Mittelwert und Standardabweichung der gemessenen Außenoberflächentemperatur in der Kopalgasse und der Muthgasse .....	30
Abb. 13: Bauteilaufbau des Referenzraumes in der Muthgasse .....	32
Abb. 14: Wärmedurchlasswiderstand des Referenzraums in der Muthgasse ...	34
Abb. 15: Bauteilaufbau des begrünten Raums in der Muthgasse .....	35
Abb. 16: Wärmedurchlasswiderstand des begrünten Raums in der Muthgasse 36	
Abb. 17: Bauteilaufbau des Referenzraum in der Kopalgasse.....	38
Abb. 18: Wärmedurchlasswiderstand des Referenzraums in der Kopalgasse..	39
Abb. 19: Bauteilaufbau des begrünten Raums in der Kopalgasse .....	40
Abb. 20: Wärmedurchlasswiderstand des begrünten Raums in der Kopalgasse 41	
Abb. 21: Verlauf der Außenoberflächentemperatur des Referenzraums in der Muthgasse .....	44
Abb. 22: Verlauf der Außenoberflächentemperatur des Referenzraums in der Kopalgasse .....	45
Abb. 23: Wärmedurchlasswiderstand des modifizierten Referenzraums in der Muthgasse .....	47
Abb. 24: Wärmedurchlasswiderstand des modifizierten begrünten Raums in der Muthgasse .....	48
Abb. 25: Wärmedurchlasswiderstand des modifizierten Referenzraums in der Kopalgasse .....	50

Abb. 26: Wärmedurchlasswiderstand des modifizierten begrünten Raums in der Kopalgasse .....51

## 7.2 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Wärmewiderstand der Kletterpflanze in der Muthgasse und der Kopalgasse .....27

Tab. 2: Berechnung des Gesamt-Wärmedurchlasswiderstands für den Referenzraum in der Kopalgasse.....28

Tab. 3: Berechnung des Gesamt-Wärmedurchlasswiderstands für den Referenzraum in der Muthgasse.....29

Tab. 4: Ergebnisse des Gesamt-Wärmedurchlasswiderstands für den Referenzraum in der Muthgasse.....34

Tab. 5: Ergebnisse des Gesamt-Wärmedurchlasswiderstands für den begrünten Raum in der Muthgasse.....37

Tab. 6: Ergebnisse des Gesamt-Wärmedurchlasswiderstands für den Referenzraum in der Kopalgasse.....39

Tab. 7: Ergebnisse des Gesamt-Wärmedurchlasswiderstands für den begrünten Raum in der Kopalgasse.....42

Tab. 8: Ergebnisse des modifizierten Gesamt-Wärmedurchlasswiderstands für den Referenzraum in der Muthgasse.....47

Tab. 9: Ergebnisse des modifizierten Gesamt-Wärmedurchlasswiderstands für den begrünten Raum in der Muthgasse.....48

Tab. 10: Ergebnisse des modifizierten Gesamt-Wärmedurchlasswiderstands für den Referenzraum in der Kopalgasse.....50

Tab. 11: Ergebnisse des modifizierten Gesamt-Wärmedurchlasswiderstands für den begrünten Raum in der Kopalgasse.....52

Tab. 12: Wärmeleitfähigkeiten aus WUFI Pro .....55

## 8 Literatur

- [1] MA 22-Wiener Umweltschutzabteilung, ÖkoKaufWien, "Leitfaden Fassadenbegrünung." Wien, 2019  
<https://zueri.begruent.ch/assets/pdf/Leitfaden-Fassadenbegruenung-Wien.pdf> (accessed 10.04.2022).
- [2] Enzi V., Scharf B. "Das Haus im „Grünen Pelz".", Wien, 2012.
- [3] Pfoser N. "Warum Gebäude begrünen? Motivation aus Sicht von Städteplanern, Bauherren und Nutzenden." Darmstadt, 2015.
- [4] Körner S., Bellin-Harder F., Nagel A., "Grün und Gesundheit." Kassel, 2008.
- [5] Nicole Pfoser, "Vertikale Begrünung: Bauweisen und Planungsgrundlagen zur Begrünung von Wänden und Fassaden mit und ohne natürlichen Boden-/Bodenwasseranschluss." 2018.
- [6] Ingenieurkurse.de, "Wärmewiderstand."  
<https://www.ingenieurkurse.de/waermeuebertragung-waermeleitung/waermeleitung-in-einem-feststoff/stationaere-waermeleitung/widerstaende-der-waermeleitung/waermewiderstand.html> (accessed 10.04.2022).
- [7] Tec-science, "Wärmestrom: Definition und Richtung." 2020.  
[https://www.tec-science.com/de/thermodynamik-waermelehre/waerme/waermestrom-definition-und-richtung/#Definition\\_des\\_Waermestroms](https://www.tec-science.com/de/thermodynamik-waermelehre/waerme/waermestrom-definition-und-richtung/#Definition_des_Waermestroms) (accessed 01.12.2022).
- [8] Deutsches Institut für Normung, "DIN EN ISO 6946. Bauteile Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient Berechnungsverfahren." Berlin, 2018.
- [9] Gabriel Pérez, Lída Rincón, Anna Vila, Josep M. González, Luisa F. Cabeza, "Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings." Golmés, 2011.  
[https://www.sciencedirect.com/search?q=Green%20vertical%20systems%20for%20buildings%20as%20passive%20systems%20for%20energy%](https://www.sciencedirect.com/search?q=Green%20vertical%20systems%20for%20buildings%20as%20passive%20systems%20for%20energy%20)

- 20savings (accessed 01.09.2022).
- [10] Hoyano A. "Climatological uses of plants for solar control and the effects on the thermal environment of a building." Tokyo, 1988.
- [11] Köhler M. "Green facades – a view back and some visions. Urban Ecosystems." Neubrandenburg, 2008.  
<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11252-008-0063-x.pdf>  
(accessed 01.09.2022).
- [12] K. Kießl, J. Rath, "Auswirkungen von Fassadenbegrünungen auf den Wärme - und Feuchtigkeitsgehalt von Aussenwänden und Schadensrisiko." Stuttgart, 1989.  
<https://www.irbnet.de/daten/rswb/89009501418.pdf> (accessed 01.12.2022).
- [13] W.J. Stec, A.H.C. van Paassen, A. Maziarz, "Modelling the double skin facade with plants." Delft, 2004.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778804002531>  
(accessed 01.09.2022).
- [14] Ratih Widiastuti, Juliana Zaini, Wahyu Caesarendra, Georgios Kokogiannakis, Siti Nurul Nadia Binti Suhailian, "Thermal insulation effect of green façades based on calculation of heat transfer and long wave infrared radiative exchange." Indonesiasia, 2021.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224121014299>  
(accessed 01.09.2022).
- [15] H. F. Di, D. N. Wang "Cooling effect of ivy on a wall." Pekin, 1999
- [16] Pflanzenforschung.de, "Lexikon A-Z".  
<https://www.pflanzenforschung.de/de/pflanzenwissen/lexikon-a-z/evapotranspiration-10021> (accessed 01.09.2022).
- [17] Miller A, Shaw K, Lam M. "Vegetation on building facades: "Bioshader". Case Study Report." Brighton, 2007.
- [18] E.GregoryMcPherson, Lee P.Herrington, Gordon M.Heisler, "Impacts of vegetation on residential heating and cooling." 1988.

- [19] Qingwei Xing, Xiaoli Hao, Yaolin Lin, Hang Tan, Ke Yang, "Experimental investigation on the thermal performance of a vertical greening system with green roof in wet and cold climates during winter.", Hunan, 2018
- [20] Irina Susorova, Melissa Angulo, Payam Bahrami, Brent Stephens, "A model of vegetated exterior facades for evaluation of wall thermal performance." Chicago, 2013.
- [21] C.Y. Jim, Hongming He, "Estimating heat flux transmission of vertical greenery ecosystem." Hong Kong, 2011.
- [22] Marie-Therese Hoelschera, Thomas Nehlsa, Britta Jänicke, Gerd Wessolek, "Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation." Berlin, 2015.
- [23] Senate Department for Urban Development and the Environment, "04.04 Temperature in medium low-exchange nocturnal radiation periods." Berlin, 2001
- [24] Christoph Schulz, "Albedo Effekt – Was ist das eigentlich?." ,2022  
<https://www.careelite.de/albedo-effekt/> (accessed 01.12.2022)
- [25] Yu Zhang, Lei Zhang, Qinglin Meng "Dynamic heat transfer model of vertical green façades and its co-simulation with a building energy modelling program in hot-summer/warm-winter zones" Guangzhou, 2022.
- [26] FassadenGrün, "Efeu "Hibernica"" <https://www.fassadengruen.de/efeu-hibernica.html> (accessed 10.06.2022).
- [27] Baumschule Horstmann, "Großblättriger Irischer Efeu"  
<https://www.baumschule-horstmann.de/shop/exec/product/1421/612/Grossblaettriger-Irischer-Efeu.html> (accessed 11.06.2022).
- [28] David Tudiwer, "Einflüsse vertikaler Gebäudebegrünung auf Wärmeschutz, sommerliche Überwärmung und hygrothermische Behaglichkeit." Wien, 2019.  
<https://repositum.tuwien.at/handle/20.500.12708/2731> (accessed 01.09.2022).

- [29] Deutsches Institut für Normung, "DIN 4108-4. Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden –Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte." Berlin, 2020.