

# ENDBERICHT Begleitprojekt

## A. Projektdetails

<b>Kurztitel:</b>	GRÜNEzukunftSCHULEN <sup>2</sup>
<b>Langtitel:</b>	<i>Grüne Schuloasen im Neubau. Einfluss von Begrünungssystemen auf das unmittelbare Mikroklima</i>
<b>Programm:</b>	Boosting Urban Innovation – 12. Ausschreibung
<b>Dauer:</b>	04.01.2021 bis 03.01.2023
<b>KoordinatorIn/ ProjekteinreicherIn:</b>	Technische Universität Wien - Forschungsbereich Ökologische Bautechnologien, Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie
<b>Kontaktperson - Name:</b>	Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Azra Korjenic
<b>Kontaktperson – Adresse:</b>	Karlsplatz 13/207-03, 1040 Wien
<b>Kontaktperson – Telefon:</b>	+43/1/58801 - 207301
<b>Kontaktperson – E-Mail:</b>	<a href="mailto:azra.korjenic@tuwien.ac.at">azra.korjenic@tuwien.ac.at</a>
<b>Projekt- und KooperationspartnerIn (inkl. Bundesland):</b>	Rheologic GmbH (FN 393458s), Wien
<b>Projektwebsite:</b>	<a href="https://smartcities.at/projects/gruenezukunftschulen%c2%b2-2/">smartcities.at/projects/gruenezukunftschulen%c2%b2-2/</a>
<b>Schlagwörter (im Projekt bearbeitete Themen-/Technologiebereiche)</b>	<input checked="" type="checkbox"/> Gebäude <input type="checkbox"/> Energienetze <input type="checkbox"/> andere kommunale Ver- und Entsorgungssysteme <input type="checkbox"/> Mobilität <input type="checkbox"/> Kommunikation und Information
<b>Projektgesamtkosten genehmigt:</b>	49.956 €
<b>Fördersumme genehmigt:</b>	49.956 €
<b>Erstellt am:</b>	10.02.2023

Diese Projektbeschreibung wurde von der Fördernehmerin/dem Fördernehmer erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte übernimmt der Klima- und Energiefonds keine Haftung.

## B. Projektbeschreibung

### B.1 Kurzfassung

<b>Ausgangssituation / Motivation:</b>	<p>Im vorangegangenen Forschungsprojekt „GRÜNEzukunftSCHULEN-Grüne Schuloasen im Neubau-Fokus Planungsprozess und Bestandsgebäude“ (gefördert aus Mitteln des Klima- und Energiefonds und im Rahmen des Programms „Smart-Cities-Initiative des Klimafonds“ durchgeführt, Laufzeit 03/2017-02/2020), wurden zwei Wiener Schulen mit grünen Wandsystemen in Innenräumen und auf Außenfassaden ausgestattet. Die grünen Wände wurden von bauphysikalischen, mikroklimatischen, vegetationstechnischen und sozialen Messungen begleitet. Es konnten nachweislich positive Effekte auf das Raumklima und die Verbesserung der Lernumgebung durch grüne Wände festgestellt werden. Neben den positiven Auswirkungen von Begrünungen im Innenraum des Schulgebäudes wirken sich Begrünungen ebenso im Außenraum positiv aus. Hierzu zählen sowohl Begrünungen direkt an der Fassade des Schulgebäudes sowie die Gestaltung des Schulfreiraums mit grüner Infrastruktur.</p> <p>Nach Abschluss des Projekts wurden weitere offene Fragen identifiziert, die die Grundlage für das vorliegende Forschungsprojekt bildeten. Dabei standen Fragen des Mikroklimas, der Luftqualität und der Pflanzenpflege im Vordergrund.</p>
<b>Bearbeitete Themen-/ Technologiebereiche:</b>	<b>Gebäude</b>
<b>Inhalte und Zielsetzungen:</b>	<p>Im Rahmen des Ex-Post-Impact-Monitorings „GRÜNEzukunftSCHULEN<sup>2</sup>“ wurde der Einfluss von grüner Infrastruktur auf das Mikroklima im Außenbereich am Anwendungsfall Schule untersucht. In weiterer Folge wurden dynamische Mikroklimasimulationen mit der Software uhiSolver durchgeführt, deren Ergebnisse anhand der Messdaten validiert wurden.</p> <p>Im Innenraum wurde außerdem ein besonderer Fokus auf die Pflege der Pflanzen bzw. Bewässerungssysteme und das dafür notwendige innovative Monitoring gelegt. Ergänzend wurden die Schimmelsporenmessungen aus dem vorangegangenen Forschungsprojekt „GRÜNEzukunftSCHULEN“ fortgeführt, um die Entwicklung der Schimmelsporenbelastung in den 5 Jahren nach Installation der Grünen Wände (davon 2 Jahre ohne Betreuung durch das Projektteam) beurteilen zu können.</p>
<b>Methodische Vorgehensweise:</b>	<p>Aufbauend auf dem F&amp;E-Projekt „GRÜNEzukunftSCHULEN“ wurden an den installierten Forschungs-Grünflächen an den beiden beteiligten Schulgebäuden in Wien zusätzliche</p>

	<p>Lufttemperatur-, Luftfeuchte-, sowie Windgeschwindigkeitsmessungen in unterschiedlichen Abständen zu den Begrünungssystemen durchgeführt, um tiefergehende Erkenntnisse über die Auswirkungen von grüner Infrastruktur auf das unmittelbare Mikroklima zu gewinnen.</p> <p>Alle gewonnenen Messdaten wurden mit den Ergebnissen der durchgeführten dynamischen Mikroklimasimulationen mit der Software uhiSolver von der Fa. Rheologic GmbH verglichen. Durch die hochaufgelöste Simulation wurde eine differenzierte Auswertung der Auswirkungen der Begrünungsmaßnahmen auf das Mikroklima (Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Strahlungsdichte, Luftströmungen, gefühlte Temperatur etc.) ermöglicht.</p> <p>Zur Erprobung eines innovativen Pflege-Monitorings wurden Thermographie-Aufnahmen an einem Innenraum-Begrünungssystem unter partiellem Hitzestress durchgeführt. Weiters wurden analog zum vorangegangenen Forschungsprojekt „GRÜNEzukunftSCHULEN“ mit Hilfe eines Luftkeimsammlers Schimmelsporen in der Raumluft bestimmt.</p>
<p><b>Ergebnisse und Schlussfolgerungen:</b></p>	<p>Die durchgeführten Mikroklimasimulationen zeigen einen sehr geringen Einfluss der Begrünungsmaßnahmen auf das lokale Mikroklima, der mit zunehmendem Abstand zur Begrünung schnell abnimmt. Im Vergleich zu einer kahlen Wand beträgt der maximale Rückgang der Außenlufttemperatur in 10 cm Entfernung von der Fassadenbegrünung 0,3 °C an einem heißen Sommertag um 15 Uhr Ortszeit. Die gleiche Reduktion der Lufttemperatur wird innerhalb der begrüneten Pergola erreicht, während die gefühlte Temperatur um bis zu 4 °C verringert wird, was hauptsächlich auf die Beschattung der grünen Pergola im Vergleich zur unbeschatteten Terrasse zurückzuführen ist. Ein Vergleich mit den vor Ort gewonnenen Messdaten zeigt eine gute Übereinstimmung.</p> <p>Bezogen auf das innovative Begrünungsmonitoring konnte gezeigt werden, dass durch regelmäßige Thermobild-Aufnahmen die einwandfreie Funktion der Bewässerungsanlage von Grünwänden überprüft und optimiert werden kann, da bei unzureichender Bewässerung auch die Kühlwirkung der Pflanzen nachlässt und somit eine höhere Luft- bzw. Oberflächentemperatur im Bereich der nicht ausreichend bewässerten Pflanzen beobachtet werden kann.</p>
<p><b>Ausblick:</b></p>	<p>Anhand von großskaligen Mikroklimasimulationen ließe sich bereits von Seiten der Stadtplanung die Auswirkung von vermehrter Implementierung grüner Infrastruktur beurteilen. Damit hätte die Stadtverwaltung die Möglichkeit, genau jenen Anteil an Begrünungsmaßnahmen über Bebauungsplan für Neu- bzw. Umbauten vorzuschreiben, welcher notwendig ist, um die</p>

	<p>definierten UHI-Präventionsziele zu erreichen und das Stadtklima lokal nachweislich zu verbessern.</p> <p>Hinsichtlich des innovativen Begrünungsmonitorings könnte künftig mithilfe qualitativer Thermographie-Aufnahmen von Innenraumbegrünungen vollkommen automatisiert deren Bewässerung optimiert und somit der Wasserverbrauch effektiver und effizienter gestaltet werden.</p>
--	---

## B.2 English Abstract

<b>Initial situation / motivation:</b>	<p>In the previous research project "GRÜNEzukunftSCHULEN. Green School Oases in New Buildings. Focus on planning process and existing buildings" (funded by the Climate and Energy Fund and carried out as part of the programme "Smart Cities Initiative of the Climate Fund", duration 03/2017-02/2020), two Viennese schools were equipped with green wall systems in interior spaces and on exterior facades. The green walls were accompanied by building physics, vegetation and social measurements. Green walls have been shown to have a positive effect on the indoor climate and improve the learning environment.</p> <p>In addition to the positive effects of greening the interior of the school building, greening the exterior also has positive effects. This includes greenery directly on the façade of the school building as well as the design of the school grounds with green infrastructure.</p>
<b>Thematic content / technology areas covered:</b>	<a href="#">Buildings</a>
<b>Contents and objectives:</b>	<p>As part of the ex-post impact monitoring of "GRÜNEzukunftSCHULEN<sup>2</sup>", the influence of green infrastructure on the microclimate in the outdoor area was investigated using the school as a case study. Dynamic microclimate simulations were then carried out using the uhiSolver software and the results validated against the measured data.</p> <p>In the indoor environment, special attention was given to the maintenance of plants and irrigation systems and the innovative monitoring required. In addition, the mould spore measurements from the previous research project, GRÜNEzukunftSCHULEN, were continued to assess how exposure to mould spores changed over the 5 years following the installation of the green walls (2 of which were without project team support).</p>
<b>Methods:</b>	Based on the R&D project " GRÜNEzukunftSCHULEN", additional measurements of air temperature, humidity and wind speed were

	<p>carried out at different distances from the greening systems at the two participating school buildings in Vienna in order to gain deeper insights into the effects of green infrastructure on the immediate microclimate.</p> <p>All measured data were compared with the results of dynamic microclimate simulations carried out using the uhiSolver software from Rheologic GmbH. The high-resolution simulation allowed a differentiated evaluation of the effects of the greening measures on the microclimate (air temperature, relative humidity, radiation density, air currents, perceived temperature, etc.).</p> <p>To test an innovative maintenance monitoring system, thermographic images were taken of an indoor greening system under partial heat stress. In addition, an air sampler was used to determine mould spores in the indoor air, in analogy to the previous research project "GRÜNEzukunftsSCHULEN".</p>
<p><b>Results:</b></p>	<p>The microclimate simulations carried out show a very small influence of the greening measures on the local microclimate, which decreases rapidly with increasing distance from the greening. Compared to a bare wall, the maximum drop in outside air temperature at a distance of 10 cm from the green façade on a hot summer day at 15:00 local time is 0.3 °C. The same reduction in air temperature is achieved inside the green pergola, while the perceived temperature is reduced by up to 4 °C, mainly due to the shading of the green pergola compared to the unshaded terrace. A comparison with the data measured on site shows good agreement.</p> <p>With regard to the innovative monitoring of the greenery, it has been shown that regular thermal imaging can be used to check and optimize the correct functioning of the irrigation system of the green walls, since if the irrigation is insufficient, the cooling effect of the plants is also reduced and thus a higher air or surface temperature can be observed in the area of the insufficiently irrigated plants.</p>
<p><b>Outlook / suggestions for future research:</b></p>	<p>Large-scale microclimate simulations could be used by urban planners to assess the impact of increased implementation of green infrastructure. This would enable the city administration to specify the exact proportion of greening measures in the development plan for new buildings and conversions that are necessary to achieve the defined UHI prevention targets and to demonstrably improve the local urban climate.</p> <p>In terms of innovative green wall monitoring, qualitative thermographic images of indoor green walls could be used in the future to automatically optimize their watering, making water use more effective and efficient.</p>

## Inhaltsverzeichnis

A.	Projektdetails.....	1
B.	Projektbeschreibung .....	2
B.1	Kurzfassung .....	2
B.2	English Abstract .....	4
B.3	Einleitung .....	7
B.4	Hintergrundinformationen zum Projektinhalt .....	8
B.4.1	Verwendete Methoden .....	10
B.5	Ergebnisse des Projekts .....	13
B.5.1	Schimmelsporenkonzentration .....	13
B.5.2	Innovatives Begrünungsmonitoring .....	17
B.5.3	Mikroklimasimulationen.....	20
B.6	Erreichung der Programmziele .....	24
B.7	Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen .....	24
B.7.1	Schimmelsporenkonzentration .....	24
B.7.2	Innovatives Begrünungsmonitoring .....	25
B.7.3	Mikroklimasimulationen.....	25
B.8	Ausblick und Empfehlungen .....	25
C.	Literaturverzeichnis .....	27

### **B.3 Einleitung**

#### **- Aufgabenstellung**

Im Rahmen des Ex-Post-Impact-Monitorings „GRÜNEzukunftSCHULEN<sup>2</sup>“ sollte aus dem Vorprojekt „GRÜNEzukunftSCHULEN“ bereits vorhandene, grüne Infrastruktur hinsichtlich ihrer Auswirkung auf das unmittelbare, räumlich aufgelöste Mikroklima im Außenbereich am Anwendungsfall Schule untersucht werden. Darüber hinaus sollten im Innenraum der untersuchten Schulgebäude ein innovatives Konzept für das automatisierte Monitoring der automatischen Bewässerung erprobt und die Schimmelpilzkonzentration im unmittelbaren Umfeld der Begrünung, analog zu Untersuchungen im Vorprojekt, untersucht werden.

#### **- Schwerpunkte des Projektes**

Grundsätzlich lassen sich die im Projekt behandelten Schwerpunkte in die Untersuchung der mikroklimatischen Auswirkungen bereits bestehenden Forschungs-Grünflächen, die Erprobung eines innovativen Monitoringkonzepts sowie das Monitoring der Schimmelpilzkonzentration unterteilen.

#### **Schwerpunkt 1 Mikroklimasimulation:**

Um tiefere Erkenntnisse über die Auswirkungen von grüner Infrastruktur auf das unmittelbare Mikroklima zu gewinnen, wurden an den beiden beteiligten Schulgebäuden in Wien einerseits Fassadenbegrünungen mit Modulen der Firmen Optigrün (Schule Diefenbachgasse) sowie Techmetall (Schule Schuhmeierplatz) und eine begrünte Pergola als Beispiel für eine Low-Tech-Begrünungsmaßnahme (Schule Schuhmeierplatz) untersucht. Die gewonnenen Daten der Lufttemperatur-, Luftfeuchte- sowie Windgeschwindigkeitsmessungen, in unterschiedlichen Abständen zu den Begrünungssystemen, wurden anschließend den Projektpartnern der Fa. Rheologic GmbH zur Validierung der dynamischen Mikroklimasimulationen mit der Software uhiSolver zur Verfügung gestellt.

#### **Schwerpunkt 2 Innovatives Monitoring:**

Da die (automatisierte) Bewässerung von Begrünungssystemen eine wichtige Rolle für das Überleben der Pflanzen spielt, wurde eine innovative Methode für das Monitoring der Bewässerungssituation erprobt. Dazu wurde durch Thermographie-Aufnahmen der Innenraumbegrünung deren Bewässerung analysiert, um somit den Wasserverbrauch effektiver und effizienter gestalten zu können.

#### **Schwerpunkt 3 Schimmelsporenkonzentration:**

Im Innenraum wurde außerdem ein besonderer Fokus auf die Pflege der Pflanzen bzw. die Auswirkungen der Begrünungssysteme auf die Schimmelpilzkonzentration gelegt. Somit wurden, analog zu den im Vorprojekt „GRÜNEzukunftSCHULEN“ vollzogenen Schimmelsporenmessungen, erneut Messungen durchgeführt, um zu beurteilen, ob sich die Belastung mit Schimmelsporen in 5 Jahren nach Installation der Grünwände (davon 2 Jahre ohne Projektteam-Betreuung) verändert hat.

#### **- Aufbau der Arbeit**

Da die Begrünungssysteme an den beiden beteiligten Schulen bereits aus dem Vorprojekt vorhanden waren, mussten nur noch Sensoren montiert und eine Wetterstation je Schulgebäude aufgestellt werden, um ausreichend Messdaten für die Validierung der Mikroklimasimulationen mit uhiSolver bereitstellen zu können. Die Messungen wurden hierbei ausschließlich in den

Sommermonaten durchgeführt, um den Schulbetrieb nicht zu stören. Von den gesammelten Messdaten wurde im Anschluss für beide Projektjahre ein repräsentativer Hitzetag ausgewählt, für den die Simulationen durchgeführt wurden.

Das innovative Begrünungsmonitoring wurde anhand einer kleinskaligen Innenraumbegrünung im Labor getestet, um für kontrollierte Klimabedingungen sorgen zu können. Die Schimmelsporenmessungen wurden über die gesamte Projektlaufzeit verteilt an mehreren Terminen in beiden Schulen durchgeführt.

## **B.4 Hintergrundinformationen zum Projektinhalt**

### **- Beschreibung des Standes der Technik**

#### **Städte und Klimawandel**

Klimawandel, zunehmende Verstädterung und Nachverdichtungen im innerstädtischen Raum erfordern neue Wege und Lösungsansätze zur Steigerung der Lebensqualität und des Lebens- und Wohnkomforts in städtischen Strukturen. Die städtischen Räume und Agglomerationen bewirken per se Temperaturerhöhungen; was durch Klimaveränderung aber noch verstärkt wird. Durch den hohen Anteil versiegelter Oberflächen ist in Städten die Verdunstung reduziert, während gleichzeitig die Sonneneinstrahlung auf Gebäude- und Straßenoberflächen gespeichert wird [1]. Dies führt zur Ausbildung von urbanen Hitzeinseln, d.h. die Temperaturen können z.T. erheblich über diejenigen in Umlandbereichen liegen. Sommerliche Hitze führt zu Beeinträchtigungen der Lebensqualität und des Wohlbefindens der Bevölkerung bis hin zu gesundheitlichen Folgen, insbesondere für vulnerable Bevölkerungsgruppen wie alte oder kranke Menschen sowie Kinder. Das urbane System ist in Zukunft – aufgrund weiterer Zunahme der Durchschnittstemperaturen und durch erhöhtes Auftreten von Extremereignissen wie Hitze, Hochwasser und Dürre – darauf angewiesen, an Resilienz zu gewinnen, um die Lebensqualität der BewohnerInnen zu sichern [2]. Das städtische (Mikro-)Klima ist vor dem Hintergrund des Klimawandels als besonders sensibel und störungsanfällig anzusehen. Durch die besondere räumliche Situation in Städten mit vielen versiegelten Flächen, einer hohen Baumassendichte und einer starken Wärmeproduktion durch konzentrierte anthropogene Nutzungen ist es notwendig, ein besonderes Augenmerk auf Maßnahmen zu legen, die städtischen Hitzeinseln und anderen negativen Effekten entgegenwirken.

#### **Die Bedeutung von Schulfreiräumen**

Die zunehmende Urbanisierung und Nachverdichtung geht, wie beschrieben, mit einem Verlust an Grünflächen einher, wodurch auch die Aktionsräume von Kindern und Jugendlichen im unmittelbaren Wohnumfeld weniger werden. Wien erlebt einen Bauboom, wodurch sogar in den Neubaugebieten am Stadtrand immer weniger Bewegungs- und Freiräume zu finden sind. In den dicht bebauten gründerzeitlichen Quartieren, in denen kleinere Parks oft völlig überbelastet sind, bietet der überwiegend vom motorisierten Verkehr dominierte öffentliche Raum nur mehr wenig Aufenthaltsqualität. Abgesehen von den zumeist eingeschränkten Aktionsräumen im direkten Wohnumfeld verbringen viele SchülerInnen zunehmend mehr Zeit in der Schule, sowohl im Unterricht wie auch in der Nachmittagsbetreuung. Hier liegt es nahe, im direkten Schulumfeld anzusetzen und dabei neue Potenziale der Schulen und deren Freiräume zu erschließen und weiterzuentwickeln. Geeignete und in den Schulalltag integrierte Freiräume können darüber hinaus mit einer entsprechenden Vegetationsausstattung bioklimatische Verbesserungen für SchülerInnen und Lehrende bewirken und für angenehme Lernräume sorgen. Das Kleinklima und bioklimatische Effekte zeigen Wirkung – auf jede und jeden von uns. Das Wohlfühlen in Innen- und Außenräumen beeinflusst die Arbeit, das Lernen und Spielen. Da Kinder und



Jugendliche immer mehr Zeit in der Schule verbringen, wird die Schule neben der Wissensvermittlung auch vermehrt Ort für motorisches und soziales Lernen. Kindgerechte Räume bzw. Freiflächen sind dabei eine große Unterstützung in der Entwicklung der Jugendlichen und können zudem, gerade im Außenbereich, vermehrt als „externe Klassenzimmer“ genutzt werden [3].

(vgl. <http://www.oekolog.at/fileadmin/oekolog/dokumente/Publikationen/Schulraumgestaltung.pdf>)

#### - Beschreibung der Vorarbeiten zum Thema

### **Forschungsprojekt „GRÜNEzukunftSCHULEN“**

Im vorangegangenen Forschungsprojekt „GRÜNEzukunftSCHULEN. Grüne Schuloasen im Neubau. Fokus Planungsprozess und Bestandsgebäude“ (gefördert aus Mitteln des Klima- und Energiefonds und im Rahmen des Programms „Smart-Cities-Initiative des Klimafonds“ durchgeführt, Laufzeit 03/2017-02/2020), wurden zwei Wiener Schulen mit grünen Wandsystemen in Innenräumen und auf Außenfassaden ausgestattet. Die grünen Wände wurden von bauphysikalischen, mikroklimatischen, vegetationstechnischen und sozialen Messungen begleitet. Es konnten nachweislich positive Effekte auf das Raumklima und die Verbesserung der Lernumgebung durch grüne Wände festgestellt werden. Unter anderem wirken sich Pflanzen auf die Konzentrationsfähigkeit aus, fördern das soziale Miteinander, erhöhen die Behaglichkeit usw. [4]. Dies konnte nicht nur im Forschungsprojekt GRÜNEzukunftSCHULEN für den Schulbereich herausgestellt werden, sondern wurde national sowie international auch für weitere Gebäudenutzungen sowie den öffentlichen Raum nachgewiesen [5]–[16].

Neben den positiven Auswirkungen von Begrünungen im Innenraum des Schulgebäudes wirken sich ebenso Begrünungen im Außenraum positiv aus. Hierzu zählen sowohl Begrünungen direkt an der Fassade des Schulgebäudes sowie die Gestaltung des Schulfreiraums mit grüner Infrastruktur. Untersuchungen haben gezeigt, dass Fassadenbegrünungen die wärmedämmenden Eigenschaften der Außenwand eines Gebäudes beeinflussen können, eine Verkürzung der Nachhallzeit im begrünten Raum bewirken, zur Bindung von verschiedenen Luftschadstoffen beitragen und das Mikroklima im Nahbereich der Begrünungen beeinflussen [12], [16]–[22].

### **Weitere relevante Forschungsprojekte**

Der Einfluss von Fassadenbegrünung auf das Mikroklima ist unter anderem bereits im Vorgängerprojekt GrünPlusSchule untersucht worden. Dabei wurde die Kühlleistung von Fassadenbegrünung zufolge Evapotranspiration, sowie die Auswirkung auf die Oberflächentemperatur der Außenfassade zufolge der Beschattung durch das Begrünungssystem bestimmt [23].

Im Projekt Greening Aspang wurden Vor-Ort-Messungen in Innen- und Außenräumen im Pilotgebiet durchgeführt. Infrarot-Bilder der Fassaden an der Aspangstraße wurden im Sommer und Winter aufgenommen. Dreidimensionale hygrothermische Simulationen der Häuser und Wohnungen entlang der Straße zeigten die Innen- und Außentemperaturentwicklungen und die Lebenskomfortbedingungen der BewohnerInnen auf. Zudem wurden mikroklimatische Modellierungen für die Zwischenräume des Stadtteils bezugnehmend auf die Strukturelemente der Freiräume, wie Vegetation, Windbewegungen und Luft- und Oberflächentemperaturen, durchgeführt [24].

Auch bei der Fassadenbegrünung der MA 31 in der Grabnergasse wurde unter anderem die Auswirkung der Begrünung auf die Luftfeuchtigkeit und -temperatur im Nahbereich der Fassade gemessen. Dabei konnte beobachtet werden, dass die absolute Luftfeuchtigkeit in Fassadennähe in den Jahren nach der Sanierung/Begrünung (2016, 2017 und 2018) deutlich höher war als vor der Sanierung (2015). Dies kann im Wesentlichen auf den Einfluss der Wasserverdunstung der Begrünung und des Substrates zurückgeführt werden [25].

#### - Beschreibung der Neuerungen sowie ihrer Vorteile gegenüber dem Ist-Stand (Innovationsgehalt des Projekts)

Im Rahmen des Ex-Post-Impact-Monitorings „GRÜNEzukunftSCHULEN<sup>2</sup>“ wurde der Einfluss von grüner Infrastruktur auf das unmittelbare, räumlich aufgelöste Mikroklima im Außenbereich am Anwendungsfall Schule untersucht. Im Gegensatz zu bisherigen Untersuchungen, bei denen punktuelle Messungen von Außentemperatur und Luftfeuchtigkeit erfolgt sind, wurde in diesem Projekt ein großflächiges Raster an Sensoren vor Ort aufgestellt, um erstmals Rückschlüsse auf die räumliche Wirkung von Begrünungsmaßnahmen (Fassadensysteme und begrünte Pergola) ziehen zu können. Die räumliche Wirkung war noch komplett unbekannt. In keinem Projekt wurde bisher gemessen, wie weit sich die Wirkung der Begrünung in den Außenraum erstreckt.

Die gewonnenen Messdaten dienen in weiterer Folge zur Validierung für dynamische Mikroklimasimulationen mit der Software uhiSolver. Im Vergleich zur Greenpass-Methode, die eine Umgebungsmikroklima-Simulation im großen Maßstab (kleinste Auflösung 2x2m) darstellt, erfolgt in uhiSolver eine an das Gebäude und die unmittelbare Umgebung (Maßstab bis zu einigen Zentimetern) angepasste Simulation. Gegenüber den älteren Greenpass-/EnviMet-Simulationen ist die Auflösung damit in bestimmten Bereichen um ein Vielfaches höher. Darüber hinaus ist die Zellgeometrie nicht auf rechte Winkel beschränkt, sodass abweichende Flächen (z.B. Dachschrägen) und Rundungen (Säulen, gekrümmte Baukörper etc.) sehr viel genauer abgebildet werden können. Dies ist ein besonderer Vorteil der uhiSolver-Methode, wenn es um die korrekte Abbildung wandnaher Strömungen in der Mikroklimasimulation geht. Damit wird es erstmals möglich sein, die komplexen Zusammenhänge zwischen der solaren Einstrahlung, den Luftströmungen, der Kühlleistung der Pflanzen durch Verdunstung und der Wärmespeicherung der umgebenden Oberflächen realitätsgetreu abzubilden. Dies liefert die Grundlage für ein tiefergehendes Verständnis der Wirkung von Begrünungsmaßnahmen auf das unmittelbare, gebäudenaher Mikroklima.

Im Innenraum wurde außerdem ein besonderer Fokus auf die Pflege der Pflanzen bzw. Bewässerungssysteme und das dafür notwendige innovative Monitoring gelegt. So wurde mithilfe qualitativer Thermographie-Aufnahmen von der Innenraumbegrünung deren Bewässerung analysiert. Mit dieser Technik könnte in weiterer Folge der Wasserverbrauch von Begrünungssystemen effektiver und effizienter gestaltet werden.

Ergänzend wurden die Schimmelsporenmessungen aus dem vorangegangenen Forschungsprojekt „GRÜNEzukunftSCHULEN“ fortgeführt, um die Entwicklung der Schimmelpilzsporenbelastung in den 5 Jahren nach Installation der Grünen Wände (davon 2 Jahre ohne Betreuung durch das Projektteam) beurteilen zu können.

#### **B.4.1 Verwendete Methoden**

An den bereits installierten Forschungs-Grünflächen an den beiden beteiligten Schulgebäuden in Wien wurden zusätzliche Lufttemperatur-, Luftfeuchte-, sowie Windgeschwindigkeitsmessungen in unterschiedlichen Abständen zu den Begrünungssystemen durchgeführt, um tiefergehende Erkenntnisse über die Auswirkungen von grüner Infrastruktur auf das unmittelbare Mikroklima

zu gewinnen. Untersucht wurden dabei einerseits Fassadenbegrünungen mit Modulen der Firmen Optigrün (Schule Diefenbachgasse) bzw. Techmetall (Schule Schuhmeierplatz) sowie eine begrünte Pergola als Beispiel für eine Low-Tech-Begrünungsmaßnahme (ebenfalls Schule Schuhmeierplatz).

Alle gewonnenen Messdaten wurden den Projektpartnern der Fa. Rheologic GmbH zur Verfügung gestellt und dienten zur Validierung der anschließenden dynamischen Mikroklimasimulationen mit der Software uhiSolver. Dabei ermöglichte die Simulation eine differenzierte Aufbereitung und Auswertung der Auswirkungen der Begrünungsmaßnahmen auf das Mikroklima (Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Strahlungsdichte, Luftströmungen, gefühlte Temperatur etc.).

Für das innovative Pflege-Monitoring von Grünwänden im Innenraum wurde ein Laborversuch an einem kleinskaligen Begrünungssystem in einem klimatisierten Raum mit konstanter Temperatur ( $20\pm 1^\circ\text{C}$ ) und rel. Luftfeuchtigkeit ( $30\pm 5\%$ ) durchgeführt. Durch regelmäßige Thermobild-Aufnahmen wurde die Reaktion der Pflanzen auf eine unzureichende Bewässerung untersucht. Damit könnte in weiterer Folge die einwandfreie Funktion der Bewässerungsanlagen von Grünwänden überprüft und optimiert werden, da bei unzureichender Bewässerung auch die Kühlwirkung der Pflanzen nachlässt und in weiterer Folge eine Erhöhung der Oberflächentemperatur im Bereich der nicht ausreichend bewässerten Pflanzen beobachtet werden kann. Für den Laborversuch wurden folgende Pflanzen, aufgrund ihrer häufigen Anwendung in Begrünungssystemen im Innenraum, ausgewählt:

**Grünlilie** (*Chlorophytum comosum*); **Philodendron** (*Philodendron scandens*);  
**Einblatt** (*Spathiphyllum wallisii*).

Abbildung 1 zeigt die untersuchten Pflanzen kurz nach dem Einsetzen in das kleinskalige Begrünungssystem. Als Substrat wurde handelsübliches Tongranulat der Marke Seramis® verwendet. Um die Pflanzen an die Umgebungsbedingungen zu gewöhnen, wurden diese nach dem Einpflanzen über einen Zeitraum von 4 Wochen, zweimal pro Woche mit jeweils ca. 200 mL pro Pflanze und Gießvorgang, händisch bewässert. Gleichzeitig wurden die für den Versuch notwendigen Einstellungen an der Wärmebildkamera vorgenommen, um optimale Aufnahmen zu erhalten. Nachdem alle Vorbereitungen abgeschlossen waren, wurde die Bewässerung der oberen zwei Reihen beendet und der eigentliche Versuch gestartet. Während des Versuchs wurden die unteren zwei Reihen weiterhin zweimal wöchentlich mit 200 mL Wasser pro Pflanze bewässert und stündlich Thermobilder des Begrünungssystems aufgenommen. Die somit gewonnenen Daten wurden anschließend zur Auswertung herangezogen.



Abbildung 1: kleinskaliges Begrünungssystem kurz nach dem Einsetzen der Pflanzen

Zur Fortführung der Schimmelsporenmessungen aus dem vorangegangenen Forschungsprojekt „GRÜNEzukunftSCHULEN“ wurde die Schimmelsporenkonzentration in der Raumluft der relevanten Klassenräume bestimmt. Es wurde damit die Langzeitwirkung von Innenraumbegrünung auf die Schimmelsporen-Konzentration im Innenraum untersucht.

- [Beschreibung der Vorgangsweise und ggf. der verwendeten Daten mit Quellenangabe, ggf. Erläuterung der Erhebung](#)

Dazu wurde die Schimmelsporenkonzentration in den begrünten Räumen, in nicht begrünten Räumen sowie in der Außenluft im direkten Umfeld der Schulen gemessen. Um die Anzahl der kultivierbaren, vitalen Schimmelpilzsporen in der Luft zu bestimmen, wurden in Anlehnung an ÖNORM ISO 16000-18 Proben aus der Luft, mit Hilfe eines Luftkeimsammlers der Fa. Holbach Umweltanalytik, entnommen. Dabei wird eine genau bekannte Menge Luft (100 Liter) auf den jeweiligen Nährboden geblasen und, nach anschließender Bebrütung die Nährböden bei definierten Bedingungen, das Wachstum der vorhandenen Schimmelpilze beobachtet. Vor den jeweiligen Probenahmen wurden die untersuchten Räume ca. 15 Minuten lang gelüftet und anschließend Fenster und Türen für 24 Stunden geschlossen gehalten. Die Probeentnahme erfolgte anschließend in der Raummitte des jeweiligen Raumes. Pro Raum wurden unmittelbar nacheinander mindestens drei Proben zu je 100 Liter genommen und die anschließend bebrüteten Nährböden nach 3 bzw. 7 Tagen ausgezählt und die Anzahl der vorhandenen Keime (koloniebildende Einheiten) bestimmt. Abbildung 2 zeigt den Luftkeimsammler in einer begrünten (links) bzw. nicht begrünten Klasse (rechts).



Abbildung 2: Luftkeimsammler in einer begrünt (links) bzw. nicht begrüntem Klasse (rechts)

## B.5 Ergebnisse des Projekts

### B.5.1 Schimmelsporenkonzentration

Um einen einfachen Vergleich mit den Ergebnissen aus dem Vorprojekt zu ermöglichen, wurde die Auswertung und Darstellung der Ergebnisse analog zu den aus dem Vorprojekt präsentierten Ergebnissen durchgeführt. Somit bestehen diese aus den berechneten Konzentrationen in KBE/m<sup>3</sup> für mesophile und thermophile Pilze sowie der während der Probenahme vorherrschenden Lufttemperatur und relativen Luftfeuchtigkeit. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die in weiterer Folge verwendeten Abkürzungen und Begriffe.

Tabelle 1: Überblick über verwendete Abkürzungen und Begriffe

KBE/m <sup>3</sup>	Koloniebildende Einheiten pro Kubikmeter Luft
n.b.	nicht bestimmbar
mesophil	bevorzugt mittlere Temperaturen und mittlere Feuchtigkeitsverhältnisse
thermophil	bevorzugt hohe Temperaturen

Grundsätzlich ist die Bestimmung der Schimmelsporenkonzentration aufgrund der relativ kurzen Dauer der Probenahme (ca. 60 Sekunden je Probe) als Momentaufnahme zu betrachten. Gleichzeitig ist die Schimmelsporenkonzentration, ähnlich zur Feinstaubkonzentration, maßgeblich von Raumnutzung, Luftaustausch mit der Außenluft, Witterung und vorhandenen Quellen im Innenraum abhängig. Somit ist trotz der Tatsache, dass die Räume vor der Probenahme gelüftet und für 24 Stunden verschlossen gehalten wurden, ein direkter Vergleich von Messungen, die an unterschiedlichen Tagen bzw. bei unterschiedlichen Witterungen und Jahreszeiten durchgeführt wurden, nicht zielführend. Darum wurde für die Interpretation der gewonnenen Ergebnisse, in Anlehnung an den Schimmelleitfaden [26], das Verhältnis (Q) zwischen der Konzentration im Innenraum ( $c_{\text{Innen}}$ ) und Außenraum ( $c_{\text{Außen}}$ ) entsprechend Formel 1 berechnet.

Formel 1: Verhältnis zwischen der Konzentration im Innen- und Außenraum

$$Q = \frac{c_{Innen}}{c_{Außen}}$$

Q > 1 ... Quelle im Innenraum wahrscheinlich

Q < 1 ... Quelle im Innenraum unwahrscheinlich

#### B.5.1.1 Diefenbachgasse:

Im Folgenden wird auf die Ergebnisse der einzelnen Messungen in den Räumlichkeiten des Schulgebäudes Diefenbachgasse eingegangen.

Die erste Messung wurde im Juli 2021, also im Sommer, bei relativ hoher Luftfeuchtigkeit und hohen Temperaturen durchgeführt. Dies spiegelt sich auch in den gemessenen Schimmelsporenkonzentrationen wider. So hat die Konzentration der mesophilen Pilze in der Außenluft > 1000 KBE/m<sup>3</sup> und in der Innenluft im Durchschnitt 367 KBE/m<sup>3</sup> betragen, wobei zwischen den nicht begrüntem und begrüntem Räumen relativ geringe Unterschiede bestanden haben. Für die Berechnung des Verhältnisses wurde für die Konzentration in der Außenluft ein Wert von 1000 KBE/m<sup>3</sup> angenommen. Die beiden begrüntem Räume haben mit einem Q von 0,4 keine erhöhte Konzentration aufgewiesen, wodurch ausgeschlossen werden kann, dass die Begrünungssysteme eine Quelle für Schimmelsporen dargestellt haben. Darüber hinaus konnten im Innenraum keine thermophilen Pilze nachgewiesen werden.

Tabelle 2: Probenahme Diefenbachgasse am 09.07.2021

Probenahme: 09.07.2021					
Raum / Messstelle	mesophile Pilze KBE/m <sup>3</sup>	thermophile Pilze KBE/m <sup>3</sup>	mesophile Pilze "Q"	Luft-Temperatur °C	Relative Luftfeuchte %
<b>Außenluft (Dachterrasse)</b>	> 1000	> 1000	-	23,9	60
<b>Raum 253 (nicht begrünt)</b>	313	n.b.	0,3	28,4	41
<b>Raum 255 (begrünt)</b>	367	n.b.	0,4	29,3	50,7
<b>Raum 251 (begrünt)</b>	420	n.b.	0,4	29,6	45,4

Um Erkenntnisse über die Situation in der kalten Jahreszeit zu erlangen, wurde die zweite Messung im Winter 2021/2022 durchgeführt. Dies spiegelt sich vor allem in der geringen Konzentration, die in der Außenluft (107 KBE/m<sup>3</sup>) gemessen wurde, wider. Der nicht begrüntem Raum hat bei dieser Messung mit einem Q von 0,2 sogar eine geringere relative Belastung mit Schimmelsporen als bei der ersten Messung im Sommer 2021 aufgewiesen. Gleichzeitig hat das Q für den begrüntem Raum 255 ca. 0,8 betragen, was ungefähr eine Verdopplung im Gegensatz

zu der Messung im Sommer 2021 bedeutet, jedoch immer noch weniger als 1 beträgt und somit nicht auf eine Quelle im Innenraum schließen lässt. Beim begrünten Raum 251 (mit einem Vliessystem der Firma Florawall) wurde mit einer Konzentration von  $\sim 600$  KBE/m<sup>3</sup> und einem daraus resultierendem Q von 5,6 eine Belastung mit Schimmelsporen festgestellt. Da dieser erhöhte Wert jedoch bei der ersten und dritten Messung nicht bestätigt bzw. reproduziert wurde, ist davon auszugehen, dass bei der Messung eine vom Raum und der Begrünung unabhängige Quelle (z.B.: Müll, Essensreste) für Schimmelsporen vorhanden war. Weder in der Außenluft noch in den untersuchten Räumen konnten thermophile Pilze nachgewiesen werden.

Tabelle 3: Probenahme Diefenbachgasse am 09.02.2022

Probenahme: 09.02.2022					
Raum / Messstelle	mesophile Pilze KBE/m <sup>3</sup>	thermophile Pilze KBE/m <sup>3</sup>	mesophile Pilze "Q"	Luft-Temperatur °C	Relative Luftfeuchte %
<b>Außenluft (Dachterrasse)</b>	107	n.b.	-	9,1	45
<b>Raum 253 (nicht begrünt)</b>	24	n.b.	0,2	19,1	41
<b>Raum 255 (begrünt)</b>	86	n.b.	0,8	19,5	53
<b>Raum 251 (begrünt)</b>	600	n.b.	5,6	20,5	51

Die dritte Messung im Oktober 2022 wurde vor allem durchgeführt, um die bei der zweiten Messung festgestellte erhöhte Konzentration in Raum 251 bei ähnlichen Wetterbedingungen zu bestätigen bzw. zu widerlegen. Um eine vom Raum unabhängige Quelle auszuschließen, wurden die Bankfächer und Mistkübel in den Räumen vor der Messung kontrolliert und gesäubert. Mit einem Q von 0 sowohl für den nicht begrünten Raum als auch den begrünten Raum 251 konnte die erhöhte Konzentration, die bei der Messung im Februar 2022 festgestellt wurde, nicht bestätigt werden. Gleichzeitig hat das Q für den begrünten Raum 255 mit 0,4 weniger als 1 betragen. Somit kann darauf geschlossen werden, dass die Begrünungssysteme keine Quelle für Schimmelsporen im Innenraum darstellen. Wie bereits bei den beiden vorhergehenden Messungen, konnten keine thermophilen Pilze im Innenraum nachgewiesen werden.

Abbildung 3 gibt eine Übersicht über die festgestellten Konzentrationen (mesophile Pilze) der durchgeführten Messungen in der Diefenbachgasse. Bei genauerer Betrachtung wird deutlich, dass die absoluten Konzentrationen im Innenraum in den Sommermonaten höher als in den Wintermonaten sind, wobei dies auf die ebenfalls deutlich höhere Konzentration in der Außenluft zurückgeführt werden kann.

Tabelle 4: Probenahme Diefenbachgasse am 28.10.2022

Probenahme: 28.10.2022					
Raum / Messstelle	mesophile Pilze KBE/m <sup>3</sup>	thermophile Pilze KBE/m <sup>3</sup>	mesophile Pilze "Q"	Luft-Temperatur °C	Relative Luftfeuchte %
<b>Außenluft (Dachterrasse)</b>	265	n.b.	-	11,3	92
<b>Raum 253 (nicht begrünt)</b>	n.b.	n.b.	0	19,7	44
<b>Raum 255 (begrünt)</b>	93	n.b.	0,4	20,1	44
<b>Raum 251 (begrünt)</b>	n.b.	n.b.	0	19,9	42

Diefenbachgasse, mesophile Pilze (KBE/m<sup>3</sup>)

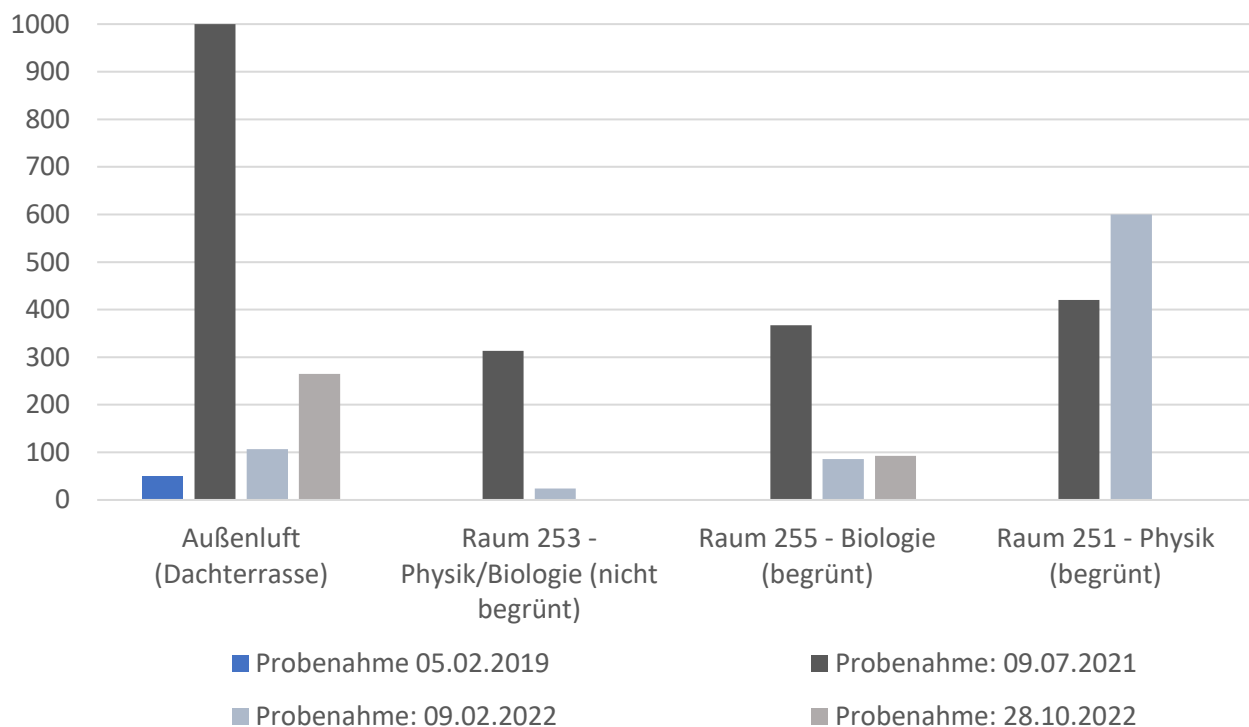


Abbildung 3: Übersicht über die festgestellten Konzentrationen (mesophile Pilze) der durchgeführten Messungen in der Diefenbachgasse



### B.5.1.2 Schuhmeierplatz

Um ebenfalls eine Aussage über die Situation in der Schule Schuhmeierplatz machen zu können, wurde im Oktober 2022 analog zu den Messungen in der Diefenbachgasse ebenfalls eine Messkampagne in den begrünten Klassenräumen bzw. einem Referenzraum ohne Begrünung durchgeführt. Zwar wurden dabei für die begrünten Räume höhere Werte für Q als bei dem nicht begrünten Raum festgestellt, jedoch haben diese dennoch unter 1 gelegen (siehe Tabelle 5), was grundsätzlich gegen eine Quelle im Innenraum spricht und zum Beispiel durch eine geringere Luftdichtheit der Fenster und einen dadurch verursachten größeren Luftaustausch mit der Außenluft verursacht werden kann.

Tabelle 5: Probenahme Schuhmeierplatz am 24.10.2022

Probenahme: 24.10.2022					
<b>Raum / Messstelle</b>	<b>Konzentration mesophiler Pilze KBE/m<sup>3</sup></b>	<b>Konzentration thermophiler Pilze KBE/m<sup>3</sup></b>	<b>mesophile Pilze "Q"</b>	<b>Luft-Temperatur °C</b>	<b>Relative Luftfeuchte %</b>
<b>Außenluft (Innenhof)</b>	200	n.b.	-	12,3	79
<b>Biologie-Saal (begrünt)</b>	100	n.b.	0,5	20,1	45
<b>Klasse (begrünt)</b>	70	n.b.	0,35	20,2	44
<b>Klasse (nicht begrünt)</b>	n.b.	n.b.	0	19,8	49

### B.5.2 Innovatives Begrünungsmonitoring

Bevor mit dem Laborversuch zum innovativen Begrünungsmonitoring begonnen wurde, wurden versuchsweise Thermografie-Aufnahmen in den begrünten Klassen der Schulen durchgeführt. Abbildung 4 zeigt exemplarisch eine Aufnahme aus dem Raum 255 in der Diefenbachgasse und Tabelle 6 die dazugehörigen Werte für die gemessenen Oberflächentemperaturen der Pflanzen. Wie ersichtlich ist, hat zwischen den Oberflächentemperaturen der einzelnen Pflanzen kein signifikanter Unterschied bestanden. Daraus folgend lässt sich auch keine eindeutige Aussage über die Performance des Bewässerungssystems machen. Dies ist auf die Tatsache, dass die Pflanzen bereits mehrere Jahre eingepflanzt waren und nur Pflanzen überleben und wachsen konnten, deren Bedarf mit der vorliegenden Bewässerungssituation abgedeckt wurde, zurückzuführen. Es ist also davon auszugehen, dass die unterversorgten Pflanzen bereits verdorrt sind und somit nicht mehr untersucht werden konnten.

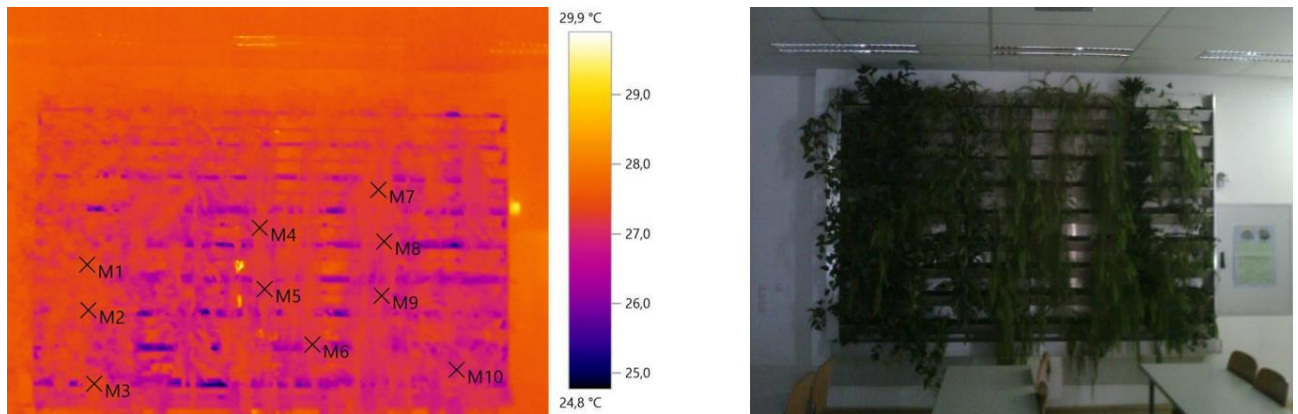


Abbildung 4: Thermobild-Aufnahme (links) der Grünwand (rechts) im Raum 255, Diefenbachgasse

Tabelle 6: gemessene Oberflächentemperaturen bei der Grünwand im Raum 255, Diefenbachgasse

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
T (°C)	27,4	27,4	27,4	27,2	27,1	27,1	27,3	27,2	27,2	27,0

Um in weiterer Folge das innovative Monitoring unter kontrollierten Bedingungen durchführen zu können und den Begrünungssystemen in der Schule keinen Schaden zuzufügen, wurde, wie bereits unter Punkt B.4.1 beschrieben, ein Laborversuch konzipiert und durchgeführt. Abbildung 5 zeigt zwei ausgewählte Wärmebilder, die zu Beginn des Versuchs (links) bzw. nach 14 Tagen ohne Bewässerung in Reihe 1 und 2 (rechts) aufgenommen wurden. Um die beiden Aufnahmen direkt vergleichen zu können, wurde für beide Bilder die gleiche Skala (19,0 – 21,0 °C) verwendet. Wie ersichtlich ist, kann man rein optisch erkennen, dass die nicht bewässerten Pflanzen (rot gestrichelter Bereich) nach 14 Tagen einen deutlichen Temperaturunterschied im Vergleich zu den bewässerten Pflanzen (blau eingerahmter Bereich) aufweisen.

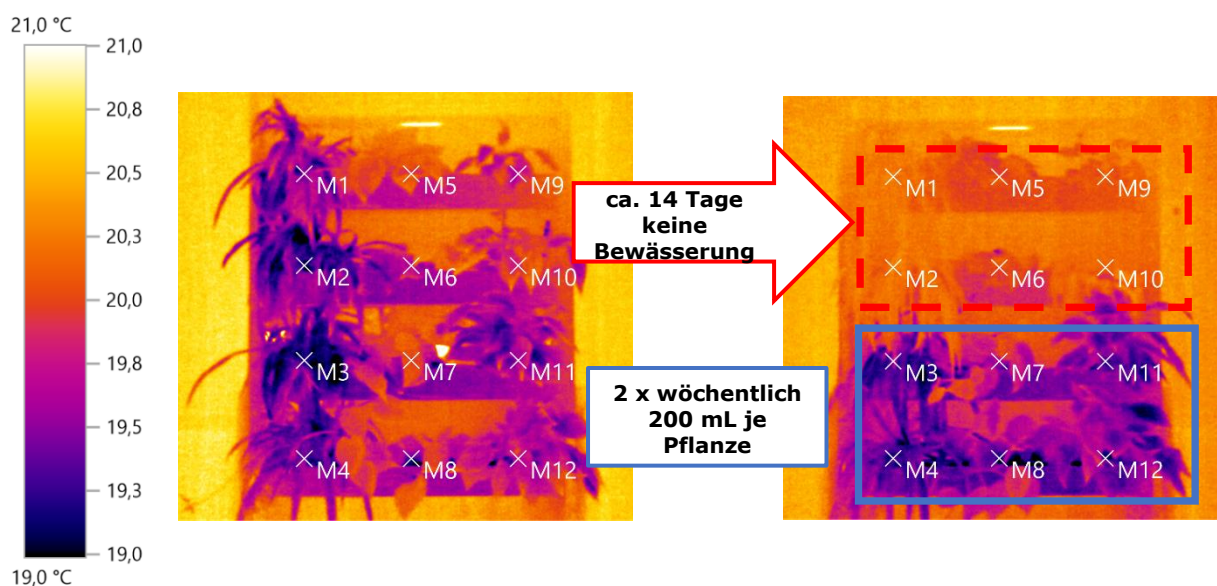


Abbildung 5: Wärmebilder zu Beginn des Versuchs (links) bzw. nach 14 Tagen ohne Bewässerung in Reihe 1 und 2 (rechts)

Um die mit der Wärmebildkamera gewonnenen Daten genau auswerten zu können, wurden die Messpunkte je Pflanze mit einer genau definierten Position festgelegt (M1 – M10) und die Temperaturdaten somit aus den Wärmebildern ausgelesen. Tabelle 7 zeigt die entsprechenden Daten für die in Abbildung 5 dargestellten Wärmebilder. Um die Temperaturänderungen übersichtlicher betrachten zu können, wurden die Temperaturänderungen (Differenzen) der Messpunkte in Form von Mittelwerten zusammengefasst (z.B.: M1 & M2 bzw. M3 & M4). Anschließend wurde die mittlere Temperaturänderung der Pflanzen mit Bewässerung bzw. ohne Bewässerung je Pflanzenart verglichen.

Tabelle 7: Ergebnisse der Thermobild-Aufnahmen des Labor-Versuches

		Temperatur (°C)				
		mit Bewässerung	ohne Bewässerung	Differenz	Ø	Δ
<b>Grünlilie</b>	M1	19.5	20.2	0.7	<b>0,9</b>	<b>0,7</b>
	M2	19.1	20.3	1.2		
	M3	19,1	19,7	0,6	<b>0,2</b>	
	M4	19,4	19,2	-0,2		
<b>Philodendron</b>	M5	20	20	0	<b>0.2</b>	<b>0,4</b>
	M6	19.7	20	0.3		
	M7	19,9	19,6	-0,3	<b>-0,2</b>	
	M8	19,2	19,1	-0,1		
<b>Einblatt</b>	M9	19.8	20.2	0.4	<b>0.4</b>	<b>0,9</b>
	M10	19.9	20.2	0.3		
	M11	19,6	19,2	-0,4	<b>-0,5</b>	
	M12	19,7	19,2	-0,5		

Die aus dieser Auswertung gewonnenen Ergebnisse zeigen, dass mit Hilfe der Wärmebildkamera ein deutlicher Temperaturunterschied zwischen Pflanzen mit bzw. ohne Bewässerung detektiert werden kann (siehe Spalte Δ). Die Tatsache, dass die Unterschiede bei Grünlilie und Einblatt stärker ausfallen (0,7 bzw. 0,9 °C) als bei Philodendron, könnte auf die Wuchsform und das daraus resultierende geringere Wasserspeichervermögen zurückgeführt werden.

### B.5.3 Mikroklimasimulationen

Folgende Tätigkeiten wurden im Rahmen des Forschungsprojektes „GRÜNEzukunftSCHULEN<sup>2</sup>“ von der Rheologic GmbH im Zusammenhang mit den Mikroklimasimulationen durchgeführt:

- Geometrieimplementierung Diefenbachgasse und Schuhmeierplatz
- mehrere Windsimulationen für beide Standorte, um gemessene, lokale Windrichtungen der Wetterstationen und großräumigen Wind am Modelltag zu korrelieren
- Suche von Wetterdaten zum korrekten Forcing der Mikroklima-Simulation (ZAMG, Meteoblue, Weatherunderground, wetter1030.at)
- Mikroklimasimulation der Modelltage (für Sommer 2021 und Sommer 2022) für die beiden Schulen Diefenbachgasse und Schuhmeierplatz von 06:00 bis 15:00 Lokalzeit (Sommerzeit) mit maximaler Sonneneinstrahlung (wolkenlos)
- Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Messdaten der TU Wien

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Simulationen für Diefenbachgasse (B.5.3.1 bzw. Abbildung 6 bis Abbildung 8) und Schuhmeierplatz (B.5.3.2 bzw. Abbildung 9 bis Abbildung 12) grafisch dargestellt.

#### B.5.3.1 Simulationsergebnisse Diefenbachgasse 22.07.2022 - WSW - 15:00 CEST

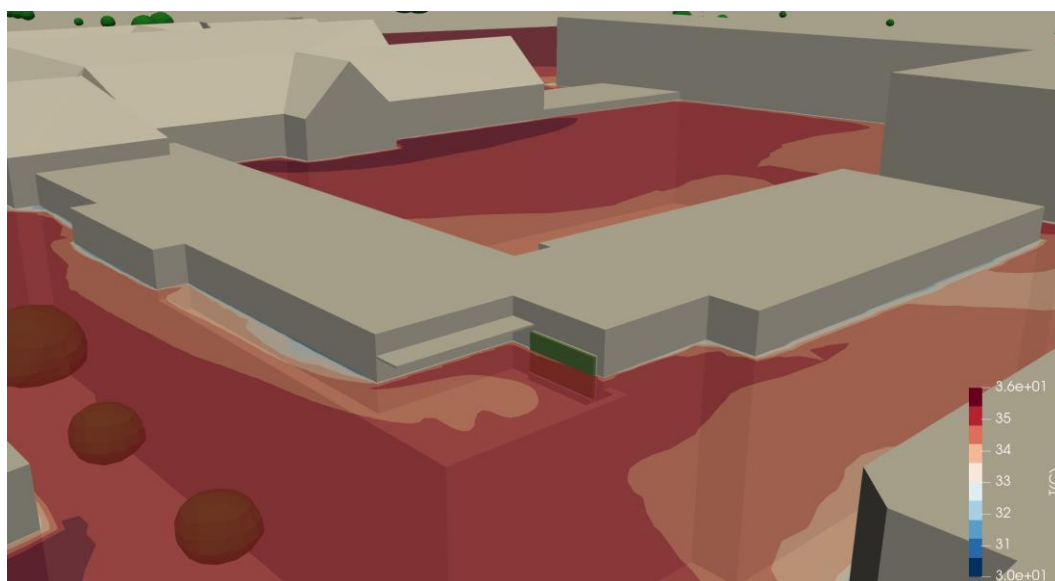


Abbildung 6: Lufttemperaturen (°C) auf Niveau der Wetterstation, Diefenbachgasse

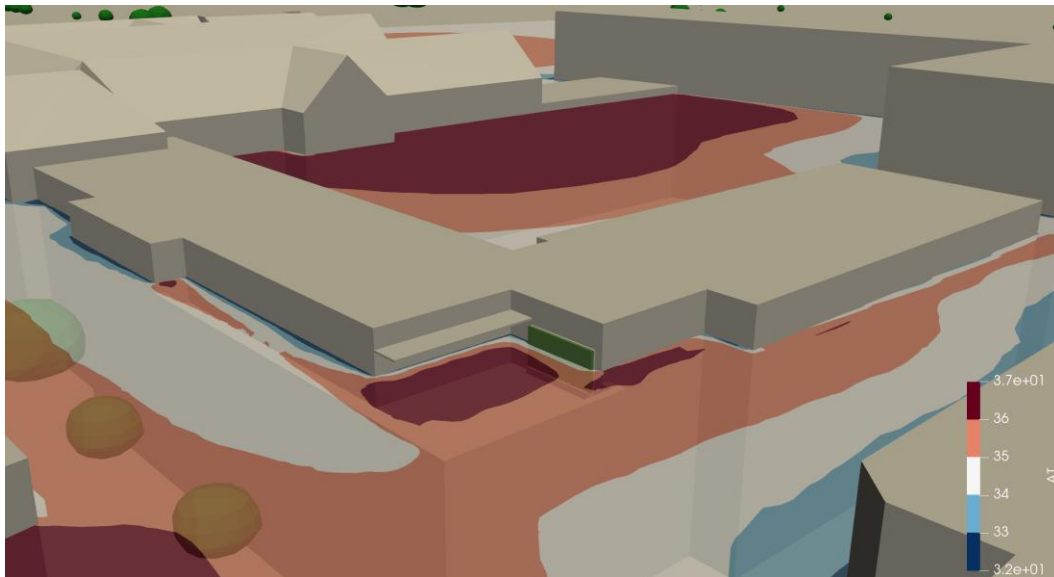


Abbildung 7: Gefühlte Temperaturen (AT) (°C) auf Niveau der Wetterstation, Diefenbachgasse

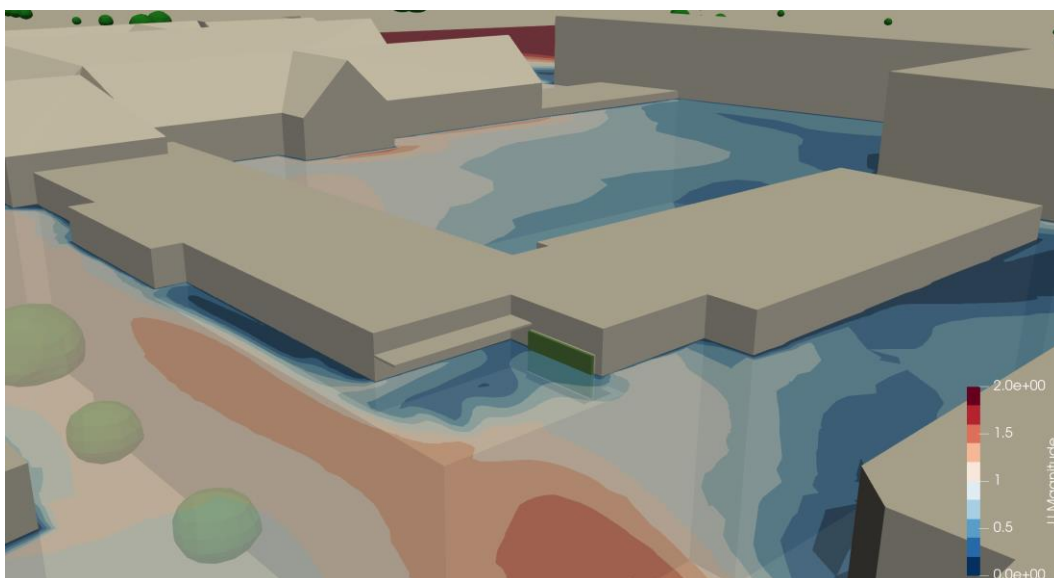


Abbildung 8: Windgeschwindigkeiten (m/s) auf Niveau der Wetterstation, Diefenbachgasse

B.5.3.2 Simulationsergebnisse Schuhmeierplatz 22.07.2022 - W - 15:00 CEST

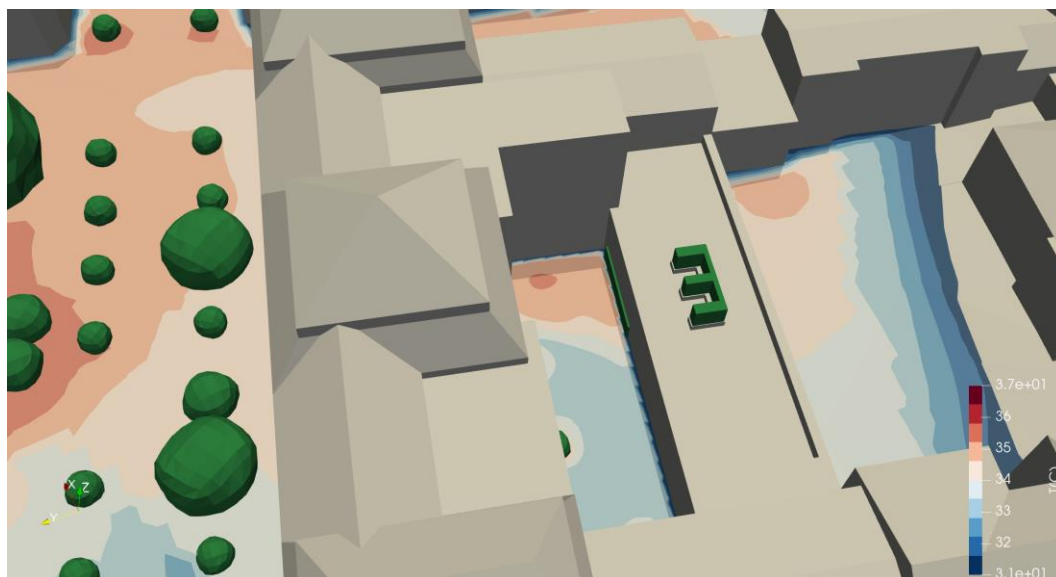


Abbildung 9: Lufttemperaturen (°C) auf Niveau der Fassadenbegrünung, Schuhmeierplatz

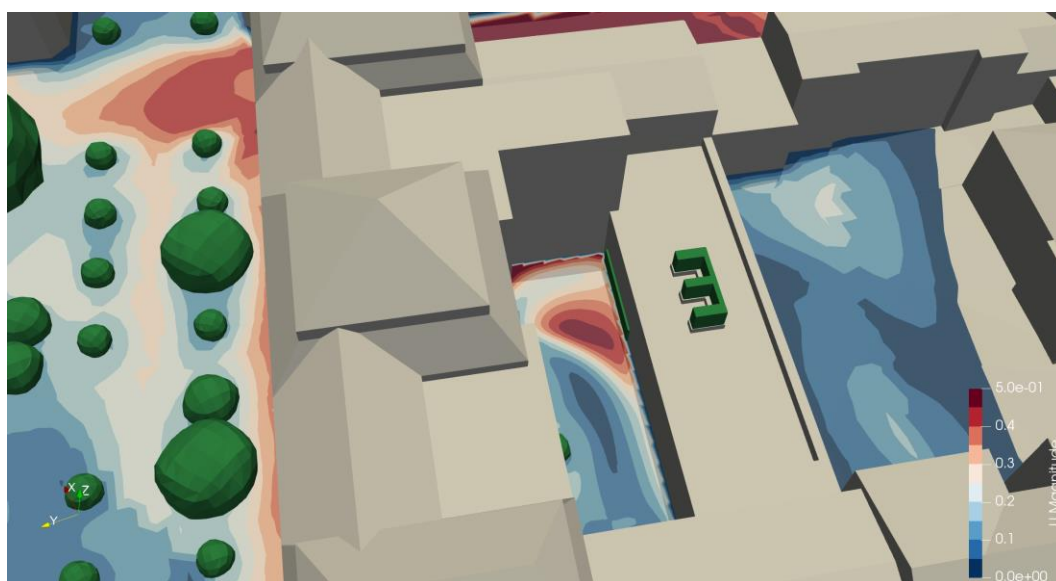


Abbildung 10: Windgeschwindigkeiten (m/s) auf Niveau der Fassadenbegrünung, Schuhmeierplatz



Abbildung 11: Lufttemperaturen (°C) auf Niveau der begrünten Pergola, Schuhmeierplatz

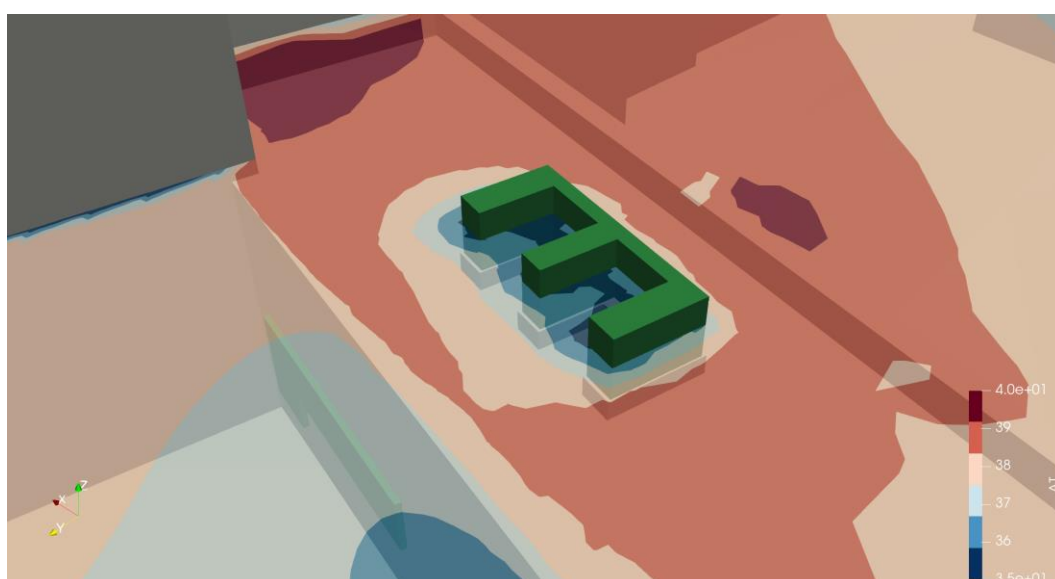


Abbildung 12: Gefühlte Temperaturen (AT) (°C) auf Niveau der begrünten Pergola, Schuhmeierplatz

### B.5.3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der Mikroklimasimulationen

#### Zusammenfassung der Ergebnisse:

- gute Übereinstimmung der simulierten mit den gemessenen Lufttemperaturen in weiten Bereichen
- minimale Auswirkungen der Fassadenbegrünungen auf die lokale Lufttemperatur (max ca. -0,4K im direkten Nahbereich vor der Begrünung im Vergleich zur Simulation ohne Begrünung)
- größere Auswirkung auf die gefühlte Temperatur unterhalb der begrünten Pergola (bis zu 4 Kelvin) – zurückzuführen auf den reduzierten Eintrag an Solarstrahlung zufolge Verschattung durch das Blattwerk der Pflanzen

#### Probleme:

- Strahlungseinfluss bei Verwendung unbelüfteter Strahlenschutzschirme → Messdaten der Nachmittagstemperaturen (12-15h) tendenziell zu hoch → Unterschied bis zu 2 Kelvin
- Strahlungseinfluss auf die Wetterstation, trotz Strahlungsschutzschirm nicht ganz auszuschließen → kritische Diskussion der Messwerte notwendig

## **B.6 Erreichung der Programmziele**

### - Einpassung in das Programm

Das Forschungsprojekt „GRÜNEzukunftSCHULEN<sup>2</sup>“ lässt sich in erster Linie den Programmzielen „#1: Forschungsergebnisse in die Praxis überleiten“ und „#2: Experimentierräume in der realen Stadt schaffen“ zuordnen, da die Grünwände und die begrünte Pergola aus dem vorangegangenen Forschungsprojekt „GRÜNEzukunftSCHULEN“ weiterverwendet werden und somit der Erprobung und praktischen Anwendung aktueller wissenschaftlicher Erkenntnisse dienen.

### - Beitrag zum Gesamtziel des Programms

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes werden Methoden und Tools in der praktischen Anwendung getestet, mit denen Regionen und Gemeinden die Möglichkeit gegeben wird, sich auf den Klimawandel vorzubereiten und mittels Anpassungsmaßnahmen die negativen Folgen des Klimawandels zu minimieren. Als solche Tools können sowohl das innovative Begrünungsmonitoring mittels Thermobildkamera als auch die dynamischen Mikroklimasimulationen der Firma Rheologic GmbH angesehen werden.

### - Einbeziehung der Zielgruppen und Berücksichtigung ihrer Bedürfnisse im Projekt

Als Zielgruppen fungierten in diesem verhältnismäßig kleinen Forschungsprojekt in erster Linie die Direktoren und die beteiligten Lehrer\*innen der beiden Schulen. Diese wurden einerseits in die Planung der Sensorpositionen für die Mikroklimamessungen einbezogen und andererseits laufend über die Projektergebnisse informiert.

### - Beschreibung der Umsetzungs-Potenziale (Marktpotenzial, Verbreitungs- bzw. Realisierungspotenzial) für die Projektergebnisse

Die (weiter-)entwickelte Methode des innovativen Begrünungsmonitorings könnte weiter automatisiert und in den Ausstattungskatalog von Herstellenden von Begrünungssystemen aufgenommen werden. Hierfür müsste diese Methode vorab über einen Zeitraum von mind. einem Jahr an einem bestehenden Begrünungssystem getestet werden, um dessen Praxistauglichkeit unter Beweis zu stellen. Ein solcher Testlauf ist seitens TU Wien – OBT angedacht und es nach Umsetzungsmöglichkeiten gesucht.

Die Mikroklimasimulationssoftware uhiSolver wird von der Firma Rheologic GmbH zu Erwerbszwecken im Rahmen von diversen Planungs-/Stadtentwicklungsprojekten angewendet und laufend weiter optimiert, wofür die im Rahmen dieses Forschungsprojektes gewonnenen Erkenntnisse einen wichtigen Beitrag leisten.

## **B.7 Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen**

### **B.7.1 Schimmelsporenkonzentration**

Grundsätzlich ist die Bestimmung der Schimmelsporenkonzentration in Anlehnung an ÖNORM ISO 16000-17 und 18 aufgrund der punktuellen Probenahme und relativ kurzen Dauer der Probenahme als Momentaufnahme zu betrachten. Zusammenfassend kann bezüglich der in



diesem Projekt gewonnenen Messergebnisse gesagt werden, dass die Begrünungssysteme in den zwei untersuchten Schulen keine Quellen für Schimmelsporen darstellen und somit auch ohne die Betreuung durch das Projektteam keine Verschlechterung der Luftqualität bestanden hat bzw. besteht.

### **B.7.2 Innovatives Begrünungsmonitoring**

Die durch diesen Versuch gewonnenen Ergebnisse zeigen deutlich, dass bildgebende Verfahren wie Thermografie großes Potential für das punktuelle oder durchgehende Monitoring von Begrünungssystemen, sogar bei relativ niedrigen Temperaturen ( $\sim 20^{\circ}\text{C}$ ) und ohne zusätzlichem Hitzestress, bergen. Gleichzeitig sollte anhand von weiterführenden Untersuchungen festgestellt werden, ob eine reproduzierbare Korrelation zwischen den Oberflächentemperaturen der Pflanzen und deren Vitalität hergestellt werden kann. Dazu muss der Versuch wiederholt und um Messungen der Photosynthese- und Transpirationsrate der Pflanzen erweitert werden, um den korrekten Zeitpunkt, an dem ein Eingriff in die Bewässerung notwendig ist, feststellen zu können. In der Praxis könnte vor allem die Kombination von immer günstiger werdenden Wärmebildkameras mit Algorithmen, die mit maschinellem Lernen trainiert wurden, dazu dienen, dieses innovative Monitoring-Konzept anwendbar zu machen.

### **B.7.3 Mikroklimasimulationen**

An zwei Schulgebäuden in Wien wurden nach Norden bis Nordwesten ausgerichtete Grünwände und eine begrünte Pergola untersucht. Es wurden instationäre dynamische Mikroklimasimulationen mit der Software uhiSolver durchgeführt, die einen sehr geringen Einfluss der Begrünungsmaßnahmen auf das lokale Mikroklima zeigen, der mit zunehmender Entfernung von der Begrünung rasch abnimmt. Im Vergleich zu einer unbegrünten Wand beträgt die maximale Absenkung der Lufttemperatur in 0,1 m Entfernung von der Fassadenbegrünung an einem heißen Sommertag um 15:00 Uhr Ortszeit (MESZ) nur ca.  $0,3^{\circ}\text{C}$ . Die gleiche Absenkung der Lufttemperatur wird innerhalb der begrünten Pergola erreicht, während die gefühlte Temperatur um bis zu  $4^{\circ}\text{C}$  verringert wird, was hauptsächlich auf die Verschattung der begrünten Pergola im Vergleich zur unbeschatteten Dachterrasse zurückzuführen ist. Ein Vergleich mit den vor Ort gemessenen Daten zeigt eine gute Übereinstimmung.

Aus den Simulationsergebnissen zu den Auswirkungen von Begrünungsmaßnahmen auf das lokale Mikroklima lässt sich die Empfehlung an die Stadtverwaltungen ableiten, differenzierte Strategien zur Minderung des UHI-Effektes zu verfolgen, die sowohl den großflächigen Einsatz von vertikalen Begrünungssystemen und Dachbegrünung – wo möglich und sinnvoll – als auch die Neupflanzung von großkronigen Bäumen und Baumreihen umfassen. Weitere Forschungsarbeiten sind jedoch erforderlich, um den Einfluss verschiedener vertikaler Begrünungssysteme auf das lokale Mikroklima im Detail zu bewerten und zu untersuchen, inwieweit sie zur Minderung des UHI-Effekts beitragen können, wenn sie im städtischen Maßstab eingesetzt werden.

## **B.8 Ausblick und Empfehlungen**

Es besteht ein großes Potential an weiterführenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Bezogen auf das innovative Begrünungsmonitoring könnte im Rahmen eines ersten Demonstrationsprojektes eine bestehende Innenraumbegrünung über einen Zeitraum von mind. einem Jahr in regelmäßigen Intervallen (z.B. täglich) von einer Thermobildkamera fotografiert werden. In Verbindung mit Messungen der Photosynthese- und Transpirationsrate der Pflanzen

könnten somit Parameter für den optimalen Zeitpunkt der Bewässerung definiert und mit den Auswirkungen auf die Oberflächentemperaturen der Pflanzen gemäß den Thermobildaufnahmen korreliert werden. Das Ziel wäre dabei eine Automatisierung und Optimierung der Bewässerung in Hinblick auf eine maximale Klimawirksamkeit.

Die Mikroklimasimulationen mit der Software uhiSolver könnten in folgenden Forschungsprojekten auf die Auswirkungen von Fassadebegrünung auf das Innenraumklima erweitert werden. Hierbei spielt, wie anhand der begrünten Pergola aufgezeigt, die Beschattungswirkung der Begrünung eine zentrale Rolle. Jedoch wird durch die Begrünung auch die Windgeschwindigkeit in Fassadennähe reduziert und weiters die nächtliche Wärme-Abstrahlung gegen den kalten Nachthimmel eingeschränkt. Die gemeinsame Betrachtung dieser komplexen Zusammenhänge wurde bisher noch kaum untersucht und bietet ein großes Potential für die Optimierung von Klimawandelanpassungsmaßnahmen.

## C. Literaturverzeichnis

- [1] T. (2009): Mursch-Radlgruber, E., Trimmel, H. Gerersdorfer, "Räumliche Differenzierung der mikroklimatischen Eigenschaften von Wiener Stadtstrukturen und Anpassungsmaßnahmen. Ergebnisse kleinklimatischer Messungen. Teil 2 der Studie "Räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Temperaturszenarien für Wien und ausgewählte," *Wiener Umweltschutzabteilung (MA 22), EU-Strategie und Wirtschaftsentwicklung (MA 27)*, 2009.
- [2] G. Steininger, Karl; Haas, Willi; Pech, Michael; Pretenthaler, Franz; Prutsch, Andrea; Themessl, Matthias; Wagner and A. Wolf, "Die Folgeschäden des Klimawandels in Österreich. Dimensionen unserer Zukunft in zehn Bildern für Österreich. Broschüre aus dem Forschungsprojekt COIN," *COIN, Medieninhaber Klima- und Energiefonds. Wien.*, 2015.
- [3] E. Thun-Täubert, "Raumgestaltung - Schulgestaltung."
- [4] A. Korjenic *et al.*, "GRÜNEzukunftSCHULEN - Grüne Schuloasen im Neubau. Fokus Planungsprozess und Bestandsgebäude," Endbericht; FFG; Wien, 2020.
- [5] U. Morawetz, D. Mayr, and D. Damyanovic, "Ökonomische Effekte grüner Infrastruktur als Teil eines Grünflächenfaktors. Ein Leitfaden.," 2016.
- [6] E. Abel and B. Kopelent, "Handhabung und Eignung von Vertikalbegrünungen im Innen- und Außenraum öffentlicher Gebäude Anhand der Schule GRG 7 Wien.," Universität für Bodenkultur Wien, 2018.
- [7] U. Pitha *et al.*, *Leitfaden Fassadenbegrünung*. Wien: ÖkoKauf Wien, Arbeitsgruppe 25, Grün- und Freiräume Arbeitsgruppenleiter: Jürgen Preiss/Wiener Umweltschutzabteilung – MA 22, 2013.
- [8] D. Tudiwer and A. Korjenic, "The effect of an indoor living wall system on humidity, mould spores and CO<sub>2</sub>-concentration," *Energy Build*, vol. 146, pp. 73–86, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.04.048.
- [9] I. Zluwa, D. Tudiwer, A. Korjenic, and U. Pitha, "Vertikale Innenraumbegrünung Ergebnisse zu Systemeignung und Raumklima," *Gebäudegrün*, vol. 3, 2018.
- [10] L. Weber, A. Korjenic, and D. Tudiwer, "Influence of vertical interior wall greening on the indoor climate and comfort in schools Einfluss von vertikaler Innenwand-Begrünung auf das Raumklima und Behaglichkeit in Schulen," Technische Universität Wien, 2019.
- [11] S. Strübing, A. Korjenic, and D. Tudiwer, "Vergleich raumklimarelevanter physikalischer Größen zweier Schulgebäude mit unterschiedlicher Belüftung, jeweils ausgestattet mit zwei verschiedenen Innenwandbegrünungssystemen," Technische Universität Wien, 2019.
- [12] J. Hollands, D. Tudiwer, A. Korjenic, and B. B. Bretschneider, "Greening Aspang - Messtechnische Untersuchungen zur ganzheitlichen Betrachtung mikroklimatischer Wechselwirkungen in einem Straßenzug einer urbanen Hitzeinsel," *Bauphysik*, vol. 40, no. 3, pp. 105–119, 2018, doi: 10.1002/bapi.201810014.
- [13] K. Perini and P. Rosasco, "Cost-benefit analysis for green façades and living wall systems," *Build Environ*, vol. 70, pp. 110–121, 2013, doi: 10.1016/j.buildenv.2013.08.012.
- [14] A. Antonaia *et al.*, "Cool materials for reducing summer energy consumptions in Mediterranean climate: In-lab experiments and numerical analysis of a new coating based

- on acrylic paint," *Appl Therm Eng*, vol. 102, pp. 91–107, 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.03.111.
- [15] T. Van Renterghem and D. Botteldooren, "Numerical evaluation of sound propagating over green roofs," *J Sound Vib*, vol. 317, no. 3–5, pp. 781–799, 2008, doi: 10.1016/j.jsv.2008.03.025.
- [16] D. Tudiwer, V. Höckner, and A. Korjenic, "Greening Aspang – Hygrothermische Gebäudesimulation," *Bauphysik*, vol. 40, no. 3, pp. 120–130, 2018.
- [17] D. Tudiwer and A. Korjenic, "The Risk of Humidity at Greened Façades," *enviBUILD 2016 International Conference on Buildings and Environment, enviBUILD 2016 - Buildings and Environment International Conference Proceedings Brno, Czech Republic*, p. 117, 2016.
- [18] D. Tudiwer and A. Korjenic, "The effect of living wall systems on the thermal resistance of the facade"; *Energy and Buildings*, "Applied Mechanics and Materials", vol. 861, no. 1662–7482, pp. 343–350, 2016.
- [19] M. R. Ismail, "Quiet environment: Acoustics of vertical green wall systems of the Islamic urban form," *Frontiers of Architectural Research*, vol. 2, no. 2, 2013.
- [20] T. Van Renterghem, M. Hornikx, J. Forssen, and D. Botteldooren, "The potential of building envelope greening to achieve quietness," *Build Environ*, vol. 61, 2013.
- [21] M. Rakhshandehroo, M. J. Mohd Yusof, and M. Deghati Najd, "Green Façade (Vertical Greening): Benefits and Threats," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 747, no. August 2016, pp. 12–15, 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.747.12.
- [22] M. T. Hoelscher, T. Nehls, B. Jänicke, and G. Wessolek, "Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation," *Energy Build*, vol. 114, pp. 283–290, 2016.
- [23] A. Korjenic *et al.*, "GrünPlusSchule@Ballungszentrum Hocheffiziente Fassaden- und Dachbegrünung mit Photovoltaik Kombination; optimale Lösung für die Energieeffizienz in gesamtökologischer Betrachtung," Endbericht, Stadt der Zukunft, FFG/BMVIT, Wien, 2018.
- [24] B. Brettschneider, A. Korjenic, U. Pitha, and M. Lutz, "Greening Aspang," Endbericht; FFG; Wien, 2017.
- [25] Technische Universität Wien and Universität für Bodenkultur Wien, "Forschungsbericht Vegetationstechnisches und bauphysikalisches Monitoring des 'Vertikalen Gartens' der MA31 in der Grabnergasse 4-6, 1060 Wien," Wien, 2018.
- [26] P. Tappler and E. Mairinger, "Leitfaden zur Vorbeugung, Erfassung und Sanierung von Schimmelbefall in Gebäuden," Wien, 2019. [Online]. Available: [www.grasl.eu](http://www.grasl.eu)