

# Auswirkungen von Fassadenbegrünungen an Bestandsgebäuden auf das Innenraumklima

## Ein Ansatz zur Kopplung von Mikroklima- und Gebäudesimulation

Wissenschaftliche Arbeit  
zur Erlangung des Grades M.Sc.  
an der Fakultät für Architektur / Ingenieurfacultät Bau Geo Umwelt  
der Technischen Universität München

Betreut von Prof. Dr.-Ing. Werner Lang,  
Roland Reitberger, M. Eng.  
Markus Kleeberger, M.Sc.  
Lehrstuhl für energieeffizientes und  
nachhaltiges Planen und Bauen

Eingereicht von David Marx  
Guldeinstraße 44  
80339 München  
david.marx@tum.de

Eingereicht am 11. April 2023

# Vereinbarung

zwischen

der Technischen Universität München, vertreten durch ihren Präsidenten,

Arcisstraße 21, 80290 München

hier handelnd der Lehrstuhl für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen  
(Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Lang), Arcisstr. 21, 80333 München

– nachfolgend TUM –

und

Herrn David Marx,

Guldeinstraße 44, 80339 München

– nachfolgend Autor –

Der Autor wünscht, dass die von ihm an der TUM erstellte Masterarbeit mit dem Titel  
„Auswirkungen von Fassadenbegrünungen an Bestandsgebäuden auf das Innenraum-  
klima – Ein Ansatz zur Kopplung von Mikroklima- und Gebäudesimulation“

in Bibliotheken der TUM, einschließlich mediaTUM und der Präsenzbibliothek des  
Lehrstuhls für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen, Studenten und  
Besuchern zugänglich gemacht wird.

auf der Homepage des Lehrstuhls für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen  
und Bauen in Dateiform (PDF) passwortgeschützt zugänglich gemacht wird.

mit einem Sperrvermerk versehen und nicht an Dritte weiter gegeben wird.

(Zutreffendes bitte ankreuzen)

Zu diesem Zweck überträgt der Autor der TUM zeitlich und örtlich unbefristet das nicht-ausschließliche Nutzungs- und Veröffentlichungsrecht an der Masterarbeit.

Der Autor versichert, dass er alleiniger Inhaber aller Rechte an der Masterarbeit ist und der weltweiten Veröffentlichung keine Rechte Dritter entgegenstehen, bspw. an Abbildungen, beschränkende Absprachen mit Verlagen, Arbeitgebern oder Unterstützern der Masterarbeit. Der Autor stellt die TUM und deren Beschäftigte insofern von Ansprüchen und Forderungen Dritter sowie den damit verbundenen Kosten frei.

Eine elektronische Fassung der Masterarbeit als pdf-Datei hat der Autor dieser Vereinbarung beigefügt. Die TUM ist berechtigt, ggf. notwendig werdende Konvertierungen der Datei in andere Formate vorzunehmen.

Vergütungen werden nicht gewährt.

Eine Verpflichtung der TUM zur Veröffentlichung für eine bestimmte Dauer besteht nicht.

Der Autor hat jederzeit das Recht, die mit dieser Vereinbarung eingeräumten Rechte schriftlich zu widerrufen. Die TUM wird die Veröffentlichung nach dem Widerruf in einer angemessenen Frist und auf etwaige Kosten des Autors rückgängig machen, soweit rechtlich und tatsächlich möglich und zumutbar.

Die TUM haftet nur für vorsätzlich oder grob fahrlässig verursachte Schäden. Im Falle grober Fahrlässigkeit ist die Haftung auf den vorhersehbaren Schaden begrenzt; für mittelbare Schäden, Folgeschäden sowie unbefugte nachträgliche Veränderungen der veröffentlichten Masterarbeit ist die Haftung bei grober Fahrlässigkeit ausgeschlossen.

Die vorstehenden Haftungsbeschränkungen gelten nicht für Verletzungen des Lebens, des Körpers oder der Gesundheit.

Meinungsverschiedenheiten im Zusammenhang mit dieser Vereinbarung bemühen sich die TUM und der Autor einvernehmlich zu klären. Auf diese Vereinbarung findet deutsches Recht unter Ausschluss kollisionsrechtlicher Regelungen Anwendung. Ausschließlicher Gerichtsstand ist München.

.....

(TUM)



.....

(Autor)

# Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die von mir eingereichte Abschlussarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

München, den 11. April 2023

A handwritten signature in black ink, appearing to read "D. Marx", written over a horizontal line.

Ort,

Datum,

Unterschrift

# Kurzzusammenfassung

Die Begrünung von Gebäuden ist ein aktuelles Thema für den nachhaltigen und klimawandeladaptierten Umbau der Städte. Dabei stellt sich für die Planungsprozesse die Frage:

*Wie können Fassadenbegrünungssysteme das Innenraumklima von Bestandsgebäuden verbessern und wie können diese mit vorhandenen Simulationssoftwares dargestellt werden?*

Anhand eines Zeilenwohnhauses in Kempten, Teil einer Wohnsiedlung aus den 1950er Jahren, wird die thermische Auswirkung einer nachträglich installierten Fassadenbegrünung auf das Innenraumklima an einem besonders heißen Sommertag untersucht.

Die numerische Simulation erfolgt über die Kopplung von Mikroklima- und Gebäudesimulationsmodellen. Die Datenübergabe benutzt dabei den Wetterdatensatz als Schnittstelle. Zum Einsatz kommen die Softwares ENVImet und Energyplus für die Simulation und Rhinceros / Grasshopper für die Modellerstellung und die Verknüpfung der beiden Schritte zu einem zusammenhängenden, teilweise automatisierten Workflow.

Es werden verschiedene Fassadenbegrünungsszenarien (bodengebundene Begrünung, fassadenhängende Tröge, vertikales Green Wall System sowie ein vor der Fassade wachsender Baum) und verschiedene Himmelsrichtungen betrachtet.

Im Ergebnis werden Vergleiche verschiedener Szenarien untereinander und mit der unbegrünten Bestandswand anhand von PMV (Predicted Mean Vote), PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), operativer Temperatur und Lufttemperatur im Innenraum angestellt, um den Einfluss der begrünten Fassade auf das Gebäudeinnere feststellen zu können.

Den größten Einfluss im Vergleich zur Bestandsituation (Vergleichsgröße, Spitzenwert der Innenraumlufttemperatur bei 32,45 °C) zeigt das Green-Wall-System (31,27 °C), gefolgt von der bodengebundenen Begrünung (31,54 °C). Danach folgen Pflanztröge an der Fassade (32,19 °C). Das schlechteste Ergebnis weist der Baum vor der Fassade auf (32,34 °C).

## Summary

In the context of the implementation of climate change adaptation and sustainable urban developments, vegetation on buildings is a current and relevant issue. This raises the question of suitable design processes:

*How can green façades help to improve the indoor climate of existing buildings and how can these systems be simulated using existing numerical simulation software?*

This paper looks at the thermal implications of added vegetation to the façade of an existing apartment building from the 1950s in Kempten, Bavaria, on a hot summer's day.

For the simulation, outdoor microclimate models and building simulation models are coupled using the weather data file to transfer the effects of the vegetation from the outside to indoors. The software tools used are ENVImet and EnergyPlus for the simulation and Rhinoceros / Grasshopper to create a coherent, partly automated workflow.

Several scenarios are evaluated: a traditional green façade, wall bound troughs, a green wall system and a tree next to the façade. Different cardinal directions are considered as well.

The results consist of the operating temperature, indoor air temperature as well as the comfort criteria PMV (predicted mean vote) and PPD (predicted percentage of dissatisfied). They are compared against each other and to reference scenarios to understand the cooling influence of the green façade on the indoor climate.

The greatest reduction in temperature compared to the existing situation (reference, peak value of indoor air temperature: 32,45°C) shows the green wall system (31,27°C), followed by the traditional green façade (31,54°C). The scenarios with troughs (32,19°C) and the tree (32,34°C) lead to lesser improvements.

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	VII
<b>1. Erläuterungen und Rahmenbedingungen .....</b>	<b>9</b>
1.1. Einleitung .....	9
1.2. Formulierung des Forschungsziels .....	11
1.3. Relevanz der Fragestellung .....	12
<b>2. Stand der Forschung.....</b>	<b>13</b>
2.1. Übersicht zum Thema Fassadenbegrünung.....	13
2.1.1. Klimatisierende Wirkung am Gebäude und Leaf Area Index.....	14
2.1.2. Kälteschutz (Dämmeffekt) .....	16
2.1.3. Klimatisierende Wirkung in der Stadt .....	16
2.1.4. Ökobilanz.....	17
2.1.5. Lebenszykluskostenanalyse .....	17
2.1.6. Ökosystem.....	18
2.2. Die verschiedenen Arten von Fassadenbegrünungssystemen.....	18
2.2.1. Bodengebundene Fassadenbegrünung mit und ohne Kletterhilfen .....	18
2.2.2. Pflanztröge mit und ohne Kletterhilfen.....	19
2.2.3. Vertikale Grünfassadensysteme.....	21
2.3. Numerische Simulation von Fassadenbegrünung .....	22
2.3.1. Konzepte zur Verknüpfung von Mikroklima- und Gebäudesimulation .....	22
2.4. Wahl der geeigneten Software.....	24
2.4.1. Mikroklimasimulation im Außenraum.....	24
2.4.2. Gebäudesimulation.....	24
2.4.3. Verknüpfung der Simulationen .....	25
<b>3. Numerische Simulation .....</b>	<b>27</b>
3.1. Beschreibung der Bestandssituation .....	27
3.2. Ablauf der Simulation .....	32
3.2.1. Energiebilanz.....	33
3.2.2. Testreferenzjahre .....	34
3.2.3. Aufbereiten der DWD-TRJ-Datensätze für Simulationssoftware .....	35
3.2.4. Vorbereitung .....	37
3.2.5. Beschreibung der Simulation in ENVI-met .....	39
3.2.6. Beschreibung des Aufprägens der Ergebnisse auf die Wetterdaten .....	40
3.2.7. Beschreibung der Simulation in EnergyPlus/Honeybee .....	41
3.3. Beschreibung der Szenarien.....	43

3.3.1.	Szenario 1 Referenz Keine Begrünung .....	43
3.3.2.	Szenario 2 Referenz Bestandsvegetation .....	43
3.3.3.	Szenario 3 Bodengebundene Begrünung .....	44
3.3.4.	Szenario 4 Fassadengebundene Tröge .....	44
3.3.5.	Szenario 5 Vertikalsystem .....	45
3.3.6.	Szenario 6 Baum .....	45
3.3.7.	Gedankliche Drehung des Areals .....	46
<b>4.</b>	<b>Ergebnisse der Simulation.....</b>	<b>47</b>
4.1.	Beschreibung Simulationsergebnisse .....	47
4.1.1.	Begrünungsszenarien.....	47
4.1.2.	Ausrichtungen.....	53
4.2.	Einordnung der Ergebnisse .....	56
4.2.1.	Begrünungsszenarien.....	56
4.2.2.	Ausrichtungen.....	57
4.2.3.	Gegenüberstellung mit Werten aus der Literatur.....	58
4.2.4.	Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlung .....	59
4.3.	Bewertung des gewählten Verfahrens .....	59
4.3.1.	Vorzüge der gewählten Methodik .....	59
4.3.2.	Probleme und Limitierungen der gewählten Methodik .....	60
4.4.	Abschließende Überlegungen.....	61
<b>5.</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>63</b>
<b>6.</b>	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>67</b>
<b>7.</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>69</b>
<b>8.</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>71</b>
<b>9.</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>72</b>

# 1. Erläuterungen und Rahmenbedingungen

## 1.1. Einleitung

Die Auswirkungen der Klimakrise werden immer spürbarer. Zunehmend werden neben Maßnahmen zur Begrenzung der Klimaerwärmung auch Konzepte nötig, um mit den steigenden Temperaturen umzugehen. In Städten gibt es ein besonderes Problem in Form des Wärmeinseleffektes oder Urban-Heat-Island-Effektes, der für eine zusätzliche Aufheizung der Städte sorgt.<sup>1</sup> Die hochversiegelten Lebensräume der Menschen sorgen für dauerhafte Aufheizung und daher unbehagliche Außen- wie Innenraumklimata.<sup>2</sup> Konventionelle mechanische Innenraumkonditionierung verstärkt das Problem noch weiter, wenn zur Kühlung der Innenräume die Wärme in die Umgebung gefördert wird. Zusammen mit der Ableitung von Niederschlagswasser entsteht so eine ungünstige Einflusskombination auf Temperaturen und Wasserhaushalt. Infolgedessen gewinnen Konzepte wie die Schwammstadt verstärkte Aufmerksamkeit.

In einer populärwissenschaftlichen Publikation fasst S. Mancuso die Forderung nach Grün in der Stadt folgendermaßen zusammen:

„Unsere Vorstellung von Stadt muss sich von Grund auf ändern. Das Bild des Großstadtdschungels dürfen wir in unseren Köpfen nicht länger mit einem Ort voller Gefahren verwechseln. Wir müssen lernen, die von Grün überwucherte Stadt als Teil der natürlichen Umgebung zu denken, die durch ihre Bäume dazu beiträgt, unsere städtische Umwelt in eine dauerhafte ökologische Nische zu verwandeln.“<sup>3</sup>

Denn: „der Ort, an dem wir leben – unser Zuhause – sollte nicht länger als etwas betrachtet werden, das jenseits der Natur liegt. Um es klar zu sagen: Die Science-Fiction-Phantasien einer Erde, die vollständig von riesigen Städten aus Glas und Metall bedeckt ist, mit Flüssen aus fliegenden Autos, aber ohne einen Hauch von Grün, stellen eine dystopische und völlig unmögliche Zukunft dar.“<sup>4</sup>

---

<sup>1</sup> Pfoser, *Vertikale Begrünung*, 30.

<sup>2</sup> ENVI-met GmbH, „ENVI-met Model Architecture“.

<sup>3</sup> Mancuso, *Die Welt der Pflanzen*, 66.

<sup>4</sup> Ebd., 53.

Urbane Vegetation vermag eine ganze Reihe an positiven Effekten zu bringen, von der Niederschlagsretention, Kohlenstoffsequestrierung, und Feinstaubbindung über temperaturregulierende Effekte<sup>5</sup> und Biotopbildung, bis hin zu psychosozialen Auswirkungen auf die Bewohnerschaft der Orte und der Möglichkeit lokaler Lebensmittelproduktion beim Urban Farming. Bei solch einem Umbau der Stadt muss gleichzeitig mit bestehenden Gebäuden gearbeitet werden. Neben baukulturellen Gründen spricht dafür hauptsächlich die Graue Energie, die im Gebäudebestand enthalten ist und die nicht durch Abriss und Neubau verloren gehen darf, wenn das verfügbare Emissionsbudget an Treibhausgasen eingehalten werden soll.<sup>6</sup>

Um derartigen Konzepte zur Realisierung zu verhelfen, bedarf es anwendbarer Planungswerkzeuge. Für die Simulation von Gebäudeinnenräumen stehen einige energetische Gebäudesimulationswerkzeuge zur Verfügung, für das Mikroklima im Freien existiert mit der Software ENVI<sup>met</sup> zumindest ein verbreitetes Softwaretool.

Während es möglich ist, in der Mikroklimasimulation ENVI<sup>met</sup> die Innentemperatur des Gebäudes zu berechnen, ist es in der Gebäudesimulation EnergyPlus möglich, die Außen-temperatur zu berechnen. Der Detailgrad dieser Resultate ist jedoch gering. Es ist klar, dass die jeweiligen Schwerpunkte der beiden Programme unterschiedlich sind: Das eine ist für den Außenraum vorgesehen, das andere für den Innenraum. Erst wenn die Möglichkeiten der unterschiedlichen Softwaretools kombiniert werden, lassen sich detaillierte Aussagen über die Zusammenhänge von Elementen an der Außenseite der Fassade treffen, die aber in ihrer Auswirkung auf den Innenraum untersucht werden sollen – wie es bei der Fassadenbegrünung der Fall ist.

---

<sup>5</sup> Vgl. Pfoser, *Vertikale Begrünung*, 12.

<sup>6</sup> Vgl. Kühner, „Wohnraum innerhalb des verfügbaren deutschen Treibhausgasbudgets planen“, 99f.

## 1.2. Formulierung des Forschungsziels

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag zur Untersuchung der Auswirkungen von Fassadenbegrünungen auf das Innenraumklima leisten. Die numerische Simulation dieses Zusammenhangs ist bisher in kommerziell verfügbarer Software kaum durchführbar, da hierfür sowohl das Innere des Gebäudes als auch sein Umgriff modelliert werden müssen. Es ist zu erwarten, dass die Fähigkeiten der einschlägigen numerischen Gebäudesimulationssoftwares in diese Richtung erweitert werden, jedoch sind aktuell nur Ansätze davon verfügbar. Ein Beispiel eines der wenigen Tools, die eine solche Simulation durchführen können, ist die Software Asmus Green<sup>7</sup>. Sie ist jedoch nicht kommerziell verfügbar. Daher soll ein Ansatz entwickelt werden, mit dem existierende Softwaretools zu diesem Zweck herangezogen werden können.

*Forschungsfrage: Wie können Fassadenbegrünungssysteme das Innenraumklima von Bestandsgebäuden verbessern, und wie können diese mit vorhandenen Simulationssoftwares dargestellt werden?*

Die Einflussfaktoren der Fassadenbegrünung sind dabei folgende:

- die Verschattung, abhängig vom Wuchs und der Laubdichte,
- die Veränderung des U-Wertes der Wand, bei laubabwerfenden Pflanzen über das Jahr variierend,
- die Kühlung durch Evapotranspiration

Die Herausforderung bei der simultanen Simulation von Innen- und Außenraumklima ist der Einfluss von Wind, der außerhalb von Gebäuden mit hohem Rechenaufwand simuliert werden muss. Diese Arbeit wird daher zwei verschiedene numerische Simulationssoftwares verknüpfen, um im ersten Schritt die Auswirkung der Fassadenbegrünung auf das Mikroklima an der Außenoberfläche des Gebäudes zu simulieren und diese Ergebnisse in einem zweiten Schritt als Eingangsgrößen für eine Gebäudesimulation zu nutzen. Die an der Fassade durch die Begrünung geschaffenen mikroklimatischen Bedingungen werden als Wetterdaten aufgefasst und wirken als solche auf die Bedingungen im Innenraum.

---

<sup>7</sup> Tils, „Einfluss von Gebäudebegrünung auf das Innenraumklima“, 5.

Für diese Arbeit wird als Fallbeispiel eine Zeilenwohnsiedlung der 1950er Jahre in Kempten in Bayern betrachtet. Dabei wird in verschiedenen Szenarien Fassadengrün, das an der Fassade eines dieser Gebäude installiert wird, studiert.

### 1.3. Relevanz der Fragestellung

Mit steigenden Temperaturen wird das Thema Klimaanpassung unausweichlich. In den Städten muss in diesem Kontext der Heat Island Effekt<sup>8</sup> bekämpft werden, um lebenswerte klimatische Bedingungen trotz unweigerlich steigender Temperaturen zu schaffen – selbst wenn in absehbarer Zukunft wirksame Klimaschutzmaßnahmen etabliert werden sollten. Hier lohnt der Blick auf Länder, in denen die Menschen seit Jahrhunderten mit solchen klimatischen Verhältnissen umgehen. Insbesondere traditionelle Verfahren<sup>9</sup> zur Regulierung des Innen- und Außenraumklimas sind interessant, während die gegenwärtige Praxis als problematisch zu bewerten ist: Die verbreitete Installation von konventionellen Klimaanlageanlagen in warmen Klimata verstärkt den Urban Heat Island Effekt noch<sup>10</sup>. Pflanzen bieten sich hier als eine gute Lösung an: sie kühlen nicht nur durch Verschattung, sondern auch durch Verdunstung.

Fassadenbegrünung ist in diesem Rahmen nicht nur ein hochaktuelles, sondern auch ein langfristig vielversprechendes Thema: Gerade durch die Begrünung des Gebäudebestandes kann mit vergleichsweise geringem Aufwand ein großes Grünvolumen geschaffen werden. Die Forschung zum Einfluss der Begrünung auf das Innenraumklima steht jedoch noch am Anfang<sup>11</sup>: Meist wird nur der Einfluss auf das Außenraumklima im Umfeld der Begrünung untersucht.

---

<sup>8</sup> Convertino, Vox, und Schettini, „Evaluation of the Cooling Effect Provided by a Green Façade as Nature-Based System for Buildings“.

<sup>9</sup> Gartler, *Klimagerechtes Bauen in der traditionellen iranischen Architektur Hotelanlage Beinol Haremein in Shiraz*, 25ff.

<sup>10</sup> Tremeac u. a., „Influence of Air Conditioning Management on Heat Island in Paris Air Street Temperatures“, 109.

<sup>11</sup> Tils, „Einfluss von Gebäudebegrünung auf das Innenraumklima“, 2f.

## 2. Stand der Forschung

### 2.1. Übersicht zum Thema Fassadenbegrünung

Grundsätzlich lassen sich drei verschiedene Grundformen von Pflanzen an der Fassade unterscheiden: Zum einen gibt es die bodengebundene Fassadenbegrünung, die in ihrer simpelsten Form aus selbstklimmenden Pflanzen besteht oder mit einfachen Rankhilfen auskommt. Weiterhin gibt es die fassadengebundene Fassadenbegrünung, die aus verschiedensten Pflanztrögen besteht, die an der Fassade installiert sind. Hier können wiederum Kletterpflanzen, aber auch Büsche oder in Extremfällen ganze Bäume, gepflanzt werden. Und hinzu kommt der neueste der drei Typen: Die Fassadenbegrünung mit vertikalen Pflanzsubstraten, in denen die Pflanzen direkt wurzeln. Hier kommen keine Kletterpflanzen zum Einsatz.<sup>12</sup>

Aus diesen Grundformen werden die vielfältigsten Variationen und architektonischen Entwürfe hervorgebracht. Bei der Untersuchung der Begrünungsmöglichkeiten an einem Bestandsgebäude ist der Gestaltungsfreiheit durch die vorhandene Bausubstanz ein Rahmen gesetzt. Daraus werden die Untersuchungsszenarien dieser Arbeit abgeleitet, die im Kapitel 2.2 ab Seite 18 dargelegt werden. Zunächst soll auf die Eigenschaften und Rahmenbedingungen von Fassadenbegrünungen und der numerischen Simulation derselben eingegangen werden.

Bei N. Pfoser<sup>13</sup> wird eine Reihe von „Leistungsfaktoren“ identifiziert, denen „Kosten und Aufwand für Herstellung und Instandhaltung der Fassadenbegrünung gegenüber“<sup>14</sup> stehen. Diese Faktoren sind die Einsparung von Kühlkosten und -energie, Unterstützung oder Entfall von mechanischen Klimaanlage, bessere Leistung installierter Photovoltaik durch Kühlung, ein verbesserter Wärmeschutz, der Schutz der Fassade durch Verschattung und Verringerung der UV-Einstrahlung, Regenwasserretention und -verdunstung, Grauwasserreinigung und damit Einsparungen bei der Niederschlagwassergebühr. Die Fassadenbegrünung bindet darüber hinaus Feinstaub, sorgt für

---

<sup>12</sup> Vgl. Hollands und Korjenic, „Ansätze zur ökonomischen Bewertung vertikaler Begrünungssysteme“, 39f; Pfoser, *Vertikale Begrünung*, 68f.

<sup>13</sup> Vgl. Pfoser, „Leistungsfaktoren Gebäudeoptimierung und Umfeldverbesserung“.

<sup>14</sup> Ebd., 26.

verbesserte Luftqualität, reduziert Lärmbelastungen und fördert die Biodiversität. Schließlich werden noch optische Gesichtspunkte genannt: Die begrünte Fassade verbessert Blend- und Blickschutz und kann Gebäude in der wahrgenommenen Attraktivität aufwerten. Darüber hinaus lässt sie sich gegebenenfalls auch als vertikaler Garten nutzen.<sup>15</sup> Dieser plakative Strauß positiver Auswirkungen lässt sich auf einige wesentliche Eigenschaften von Pflanzen an der Fassade zurückführen: Erstens wird das Gebäude mit einer natürlichen Schutzebene umhüllt, die in der Lage ist verschiedenerlei Einwirkungen abzumildern. Zweitens verdunsten Pflanzen Wasser und kühlen dadurch ihre Umgebung<sup>16</sup>. Drittens sind sie als Insel der Natur in der künstlichen gebauten Umwelt attraktiv für Mensch und Tier.

### **2.1.1. Klimatisierende Wirkung am Gebäude und Leaf Area Index**

Der wohl wichtigste Einflussfaktor für den kühlenden Einfluss der Fassadenbegrünung ist laut Pérez et al. die Verschattung. Dabei wird die auftreffende Solarstrahlung vor der Wand durch Blattwerk und Zweige aufgehalten. Zudem hat die Begrünung auch einen tatsächlich kühlenden Effekt, der durch die Evapotranspiration an Pflanzen und Pflanzsubstraten hervorgerufen wird. In vielen experimentellen Studien wird allerdings nicht zwischen den beiden Effekten unterschieden, sondern der Temperaturunterschied an der äußeren Fassadenoberfläche gemessen. Die Evapotranspiration wird im Wesentlichen von der Pflanzenart und der daraus folgenden Bewässerung bestimmt.<sup>17</sup>

Eine der wichtigsten Größen für die Wirkung von Fassadenbegrünung ist der Blattflächenindex oder Leaf Area Index (LAI), der das Verhältnis aus Blattoberfläche pro Grundfläche angibt. Die Einheit ist in der Land- und Forstwirtschaft gebräuchlich etwa um Erträge, gebildete Biomasse oder Wasserbedarfe abschätzen zu können.<sup>18</sup> Im Fall von Fassadenbegrünung ist die Grundfläche die vertikale Wandfläche. Die Einheit für den LAI ist  $m^2 m^{-2}$ , sodass der Wert meist einheitenlos angegeben wird.<sup>19</sup> Er ist im Rahmen der Untersuchung der Kühlwirkung von Gebäudegrün eine wichtige Größe, um die Verschattung durch die Belaubung, – die Belaubungsdichte – wie auch die

---

<sup>15</sup> Ebd., 28.

<sup>16</sup> Pérez u. a., „Vertical Greenery Systems (VGS) for Energy Saving in Buildings“, 148.

<sup>17</sup> Ebd.

<sup>18</sup> Pérez u. a., „Green Facade for Energy Savings in Buildings“, 429.

<sup>19</sup> Tilley u. a., „Vegetation Characteristics of Green Facades, Green Cloaks and Naturally Colonized Walls of Wooden Barns Located in the Mid-Atlantic Region of North America“, 9.

Evapotranspiration einer Pflanze abschätzen zu können.<sup>20</sup> Um den LAI zu messen wird einerseits auf direkte Methoden zurückgegriffen, bei denen die Blätter in einem definierten Bereich geerntet und einzeln vermessen werden. Andererseits stehen spezialisierte Messgeräte zur Verfügung, die unterhalb der Vegetation anhand des Durchlassgrades für Solarstrahlung auf empirischen Zusammenhängen beruhende Abschätzungen für den LAI geben.<sup>21</sup> Dabei ist es schwer pauschale Aussagen zu treffen welcher LAI für eine typische Fassadenbegrünung angenommen werden kann. Chen Y. stellt aus diesem Grund vergleichende Messungen für typische Dachbegrünungen an einem Beispiel in Singapur an: für Sträucher oder Palmen werden Werte von rund 2 bis 2,5 angegeben, andere Sträucher und Büsche erreichen Werte von rund 3 bis 6, in einer Fläche dunklen dichten Grasses wird ein LAI von 6,66 gemessen.<sup>22</sup> Auch wenn diese Messungen als Vergleichsgrößen eine augenscheinliche Abschätzung von LAI-Werten für andere Pflanzen erlauben, sind sie kein Ersatz für genaue Messwerte, an denen es bislang für diesen Einsatzzweck noch mangelt.<sup>23</sup>

Verschiedene Studien untersuchen die Auswirkungen von unterschiedlichen Arten von Fassadenbegrünungen. Hierbei zeigen sich deutliche Unterschiede: In der Übersichtsstudie von Pérez et al.<sup>24</sup> werden unter anderem folgende Beispiele für Messungen an bodengebundenen Fassadenbegrünungen genannt: An einer 15 cm Stahlbetonwand mit bodengebundenem Jungfernebenbewuchs (Wilder Wein, hier: *Parthenocissus tricuspidata*) in Tokyo konnten bei einem Durchlassgrad der Solarstrahlung von 2 % bis 7 % eine Temperaturreduktion um bis zu 13 °C an der Außenwandoberfläche und 11 °C an der Innenoberfläche der Wand gemessen werden. Eine Studie an verschiedenen Fassaden in England<sup>25</sup> zeigt eine Verringerung der Maximaltemperatur an der Außenwandoberfläche um 1,7 °C bei einer dünnen Vegetationsschicht und bis zu 9,5 °C bei einer Stärke von 45 cm. Eine andere Studie in Berlin findet unter einer Efeubegrünung einen Temperaturunterschied von 3 °C im Sommer durch die Verschattung und einen Unterschied von ebenfalls 3 °C im Winter. Die Ergänzung der Vegetationsschicht

---

<sup>20</sup> Convertino, Vox, und Schettini, „Evaluation of the Cooling Effect Provided by a Green Façade as Nature-Based System for Buildings“, 4.

<sup>21</sup> Pérez u. a., „Green Facade for Energy Savings in Buildings“, 429.

<sup>22</sup> Chen Yu, „The Intervention of Plants in the Conflicts between Buildings and Climate - A Case Study in Singapore“, 307ff.

<sup>23</sup> Pérez u. a., „Green Facade for Energy Savings in Buildings“, 436.

<sup>24</sup> Pérez u. a., „Vertical Greenery Systems (VGS) for Energy Saving in Buildings“, 151ff.

<sup>25</sup> Ebd., 152.

verbessert den U-Wert der Gebäudehülle durch die Beschaffenheit und Struktur der Blätter, des Luftgehalts der Begrünung und gegebenenfalls des Substrates. Je nach Ausführung kann die Vegetationsebene eine oder mehrere Luftschichten enthalten, die zusätzlich zur Dämmung beiträgt.<sup>26</sup> Dieser Effekt kann auch bei der englischen Studie beobachtet werden: hier wurden im Winter um bis zu 3,88 °C höhere Temperaturen unter der Begrünung gemessen als bei unbegrüntem Wänden.<sup>27</sup>

Stadtbäume versprechen durch ihr hohes Grünvolumen im Vergleich zur Fassadenbegrünung ebenfalls gute Kühlleistungen für die Gebäude. Bis zu 90 % der auftreffenden UV-Strahlung kann in der Baumkrone absorbiert werden. Die Oberflächentemperaturen der Blätter liegen um 11-30 °C unter der Oberflächentemperatur der Umgebung.<sup>28</sup> Aus diesem Grund wird für die vorliegende Arbeit zusätzlich ein Szenario mit einem Baum vor der Fassade gewählt. Durch sehr große Unterschiede zwischen verschiedenen Baumspesies ist die Quantifizierung der Effekte schwierig<sup>29</sup>, wie die hohe Spanne der Temperaturunterschiede andeutet.

### **2.1.2. Kälteschutz (Dämmeffekt)**

Fox et al.<sup>30</sup> untersuchen die Dämmwirkung einer Grünfassade in Großbritannien mit vertikalem Substrat. Es handelt sich bei der untersuchten Wand um eine zweischalige Mauerwerkskonstruktion mit einem Luftspalt von 31,8 cm Stärke. Davor ist ein Grünfassadensystem mit Pflanzsubstrat in Vliestaschen installiert, das mit Hinterlüftungsebene 13 cm stark ist. Die gemessenen mittleren U-Werte betragen 1,12 Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup> ohne Begrünung und 0,77 Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup> mit der Begrünung<sup>31</sup>.

### **2.1.3. Klimatisierende Wirkung in der Stadt**

Jede Form der Vegetation in der Stadt vermag es, durch den kühlenden Effekt und die Verschattung, dem Wärmeinseleffekt in der Stadt entgegenzuwirken. Neben städtischen Parks und Bäumen können mit der Begrünung von Fassaden sowie von

---

<sup>26</sup> Ebd., 148.

<sup>27</sup> Ebd., 152.

<sup>28</sup> Moser u. a., „Stadtbäume: Wachstum, Funktionen und Leistungen – Risiken und Forschungsperspektiven“, 99.

<sup>29</sup> Moser u. a., „Stadtbäume: Wachstum, Funktionen und Leistungen – Risiken und Forschungsperspektiven“.

<sup>30</sup> vgl. Fox u. a., „Living Wall Systems for Improved Thermal Performance of Existing Buildings“.

<sup>31</sup> Ebd., 6.

Gebäuden im Allgemeinen wichtige zusätzliche Flächen erschlossen werden, auf denen mehr Grünvolumen bereitgestellt werden kann.<sup>32 33</sup>

#### **2.1.4. Ökobilanz**

Wie alle Maßnahmen zur Anpassung und Bekämpfung des Klimawandels bedürfen auch Fassadenbegrünungen einer Betrachtung ihrer Lebenszyklusemissionen. Zu den wohl aufwendigsten Systemen, den Vertikalbegrünungen, finden sich Betrachtungen bei Pulselli et al. In einer Gegenüberstellung der Emissionen, die durch die Herstellung der Systemkomponenten, die Installation und Pflege entstehen, und der Absorption und Einsparung von CO<sub>2</sub>-äq. durch die Begrünung, kommen sie zu dem Schluss, dass innerhalb von 25 Jahren die Klimaneutralität erreicht werden könne.<sup>34</sup>

Bei entsprechend simpleren Begrünungen ist bei gleichem Grünvolumen mit entsprechend schnellerem Emissionsausgleich zu rechnen.

#### **2.1.5. Lebenszykluskostenanalyse**

Untersuchungen zu den bei Ökosystemleistungen üblicherweise schwierig zu beantwortenden Fragen der Lebenszykluskosten finden sich bei J. Hollands<sup>35</sup>: den Kosten der Fassadenbegrünung wird der Nutzen gegenübergestellt. Persönliche Kosten und Nutzen sind dabei Auswirkungen, die die Nutzer:innen und / oder die Eigentümer:innen betreffen, soziale Kosten und Nutzen betreffen die Allgemeinheit.

Auf der persönlichen Kostenseite stehen die Errichtung, Pflege und Unterhalt, die Kosten für eventuelle Strom- und Wasserverbräuche sowie die Kosten für die Entsorgung. Die sozialen Kosten beschränken sich auf eventuelle Subventionen für Fassadenbegrünung.<sup>36</sup> Auf der Nutzenseite wird den vorstehend dargestellten nützlichen Effekten der Begrünung ein monetärer Wert beigemessen. Dies geschieht hauptsächlich über Kostenersparnisse, etwa durch geringere Kosten für die Gebäudekonditionierung oder eine längere Lebensdauer der Gebäudehülle.<sup>37</sup>

---

<sup>32</sup> Erlwein, Zölch, und Pauleit, „Regulating the Microclimate with Urban Green in Densifying Cities“, 13.

<sup>33</sup> Pfoser, „Leistungsfaktoren Gebäudeoptimierung und Umfeldverbesserung“, 29.

<sup>34</sup> Pulselli u. a., „A Comprehensive Lifecycle Evaluation of Vertical Greenery Systems Based on Systemic Indicators“, 1022.

<sup>35</sup> Hollands und Korjenic, „Ansätze zur ökonomischen Bewertung vertikaler Begrünungssysteme“.

<sup>36</sup> Ebd., 42f.

<sup>37</sup> Ebd., 43ff.

### 2.1.6. Ökosystem

Zuletzt leisten Fassadenbegrünungen einen wertvollen Beitrag zur Natur in den Städten und bieten Lebensraum für die Fauna. Sie tragen damit zum Erhalt oder womöglich gar zur Steigerung der Biodiversität bei.<sup>38</sup>

## 2.2. Die verschiedenen Arten von Fassadenbegrünungssystemen

### 2.2.1. Bodengebundene Fassadenbegrünung mit und ohne Kletterhilfen

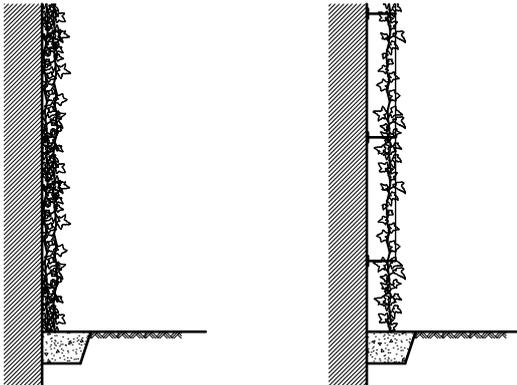


Abb. 1 – Fassadenbegrünung bodengebunden selbstkletternd (l.) und mit Kletterhilfe (r.), M 1:50, eigene Darstellung

Das System bodengebundener selbstklimmender Fassadenbegrünung ist das wahrscheinlich älteste und bekannteste Verfahren für Vertikales Grün. Die selbstklimmenden Pflanzen – Wurzel- und Haftscheibenklimmer – wachsen auf natürliche Weise und können nach rund 5 bis 20 Jahren die gesamte Fassade abdecken.<sup>39</sup> Die Anforderungen an die Konstruktion sind gering und beschränken sich auf den Pflanzbereich und Abschirmun-

gen an Stellen, die vom Bewuchs freigehalten werden sollen. Wichtig ist allerdings ein ausreichend widerstandsfähiger Untergrund wie Mauerwerk oder Beton. Leichte hinterlüftete Konstruktionen oder Wärmedämmverbundsysteme sind ungeeignet den Haftscheiben der Kletterpflanzen standzuhalten.<sup>40</sup>

In vielen Fällen benötigt diese Form der Fassadenbegrünung keine künstliche Bewässerung. Aus diesen Gründen kommt diese Bauweise mit geringen Kosten in Errichtung und Unterhalt aus. Einzig die Entsorgung geht mit großen Kosten einher, da die Fassade aufwändig saniert werden muss, um die pflanzlichen Anhaftungen zu entfernen.<sup>41</sup>

---

<sup>38</sup> Pfoser, „Leistungsfaktoren Gebäudeoptimierung und Umfeldverbesserung“, 29.

<sup>39</sup> Pfoser, *Vertikale Begrünung*, 71.

<sup>40</sup> Vgl. ebd., 72f.

<sup>41</sup> Ebd.

Beispiele für diese Art Kletterpflanze sind etwa Efeu (*Hedera helix*)<sup>42</sup> oder verschiedene *Parthenocissus*-Arten (Wilder Wein).<sup>43</sup>

Einen etwas höheren baulichen Aufwand erfordern Pflanzen, die zwar ebenfalls bodengebunden wachsen, aber ein Rankgerüst als Kletterhilfe benötigen. Diese Systeme sind auch an Fassaden möglich, die sich für Selbstklimmer nicht eignen. Je nach Typ der Kletterpflanze sind verschiedenartige Rankhilfen erforderlich. Schlinger benötigen eher vertikale Gerüste, während Ranker und Spreizklimmer mit rasterförmigen Unterkonstruktionen gut zurecht kommen.<sup>44</sup>

An den Rankhilfen können Pflanzen wie der Echte Wein (*Vitis vinifera*), Knöterich (*Fallopia aubertii*) oder auch die Waldrebe (*Clematis*) wachsen.<sup>45</sup>

Der Aufwand für die Installation ist weiterhin gering, obwohl die erheblichen Kräfte, die die Kletterpflanzen entwickeln können, von der Rankhilfe aufgenommen werden müssen.<sup>46</sup>

### 2.2.2. Pflanztröge mit und ohne Kletterhilfen

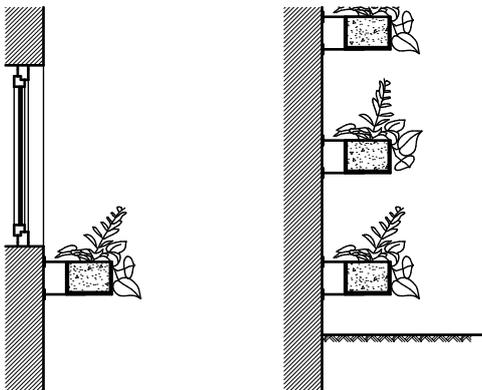


Abb. 2 – Trog unter Fenster (l.) und in Raster an Fassade (r.), M 1:50, eigene Darstellung

Als weiteres System für Fassadenbegrünung werden üblicherweise Pflanztröge genannt.<sup>47</sup> Ein System im eigentlichen Sinne ist dies jedoch nicht – zu groß ist die Bandbreite der möglichen Variation: Möglich ist alles von bewohnerseitig installierten Blumenkästen über Anordnungen von Pflanztrögen verschiedenster Ausgestaltung, die Teil der architektonischen Gestaltung der Fassade sind (auch

<sup>42</sup> Ebd., 71.

<sup>43</sup> Goergens, „Vertikale Begrünung in wachsenden Städten Lebenszyklusanalyse verschiedener Begrünungssysteme“, 12.

<sup>44</sup> Pfoser, *Vertikale Begrünung*, 214.

<sup>45</sup> Goergens, „Vertikale Begrünung in wachsenden Städten Lebenszyklusanalyse verschiedener Begrünungssysteme“, 13.

<sup>46</sup> Pfoser, *Vertikale Begrünung*, 76.

<sup>47</sup> Pfoser, „Entwurfsaspekte boden- und wandgebundener Fassadenbegrünungen“, 66.

als Regalbauweise bezeichnet)<sup>48</sup>, mit Einzelbehältern oder linearen Pflanzträgern<sup>49</sup> bis hin zu extrem aufwändigen Konstruktionen mit ganzen Bäumen – wie dem „Bosco Verticale“<sup>50</sup> in Mailand, der hierfür eines von ganz wenigen Beispielen weltweit ist.

Wie bei der bodengebundenen Fassadenbegrünung können hierbei ohne Gerüst rankende Pflanzen eingesetzt werden, oder solche, die an Rankhilfen unterschiedlichster Ausführung an der Fassade klettern. Auch nicht rankende Pflanzen, von verschiedenen Balkonblumen über Zwiebelgewächsen und Gräsern, bis hin zu Sträuchern sind denkbar, je nach gestalterischer Idee. Sinnvoll ist in unseren Breiten der Einsatz winterharter Pflanzen, da die Substratbehälter nicht groß genug sind, um die Wurzeln vor Frost zu schützen.<sup>51</sup>

Arten, die zum Einsatz kommen können, sind etwa Hopfen (*Humulus lupulus*), Rose (*Rosa*) oder Winterjasmin (*Jasminum nudiflorum*).<sup>52</sup>

Die Wahl der Pflanzen lässt eine gewisse Flexibilität zu: es ist möglich eine Fassadenbegrünung mit Rosen auch bodengebunden anzulegen oder, umgekehrt, eine Klematis in einem geeigneten Pflanzgefäß vorzusehen. Eine Übersicht über die Eignung verschiedener Pflanzenarten für unterschiedliche Arten von Gebäudebegrünungen stellt der Bundesverband GebäudeGrün e.V. zur Verfügung<sup>53</sup> oder findet sich ausführlicher bei N. Pfoser.<sup>54</sup>



Abb. 3 – Hochhaus "Bosco Verticale" in Mailand, N. Pfoser, *Grüne Fassaden*, 53



Abb. 4 – Flower Tower, Paris, Pfoser, *Vertikale Begrünung*, 108

---

<sup>48</sup> Pfoser, *Vertikale Begrünung*, 78.

<sup>49</sup> Ebd., 79.

<sup>50</sup> Pfoser, „Fassadenbegrünung als Entwurfs- und Gestaltungsfaktor“, 53.

<sup>51</sup> Pfoser, *Vertikale Begrünung*, 78.

<sup>52</sup> Goergens, „Vertikale Begrünung in wachsenden Städten Lebenszyklusanalyse verschiedener Begrünungssysteme“, 14.

<sup>53</sup> Fachvereinigung, „Planungshinweise - Bundesverband GebäudeGrün e.V. BuGG“.

<sup>54</sup> Pfoser, *Vertikale Begrünung*.

### 2.2.3. Vertikale Grünfassadensysteme

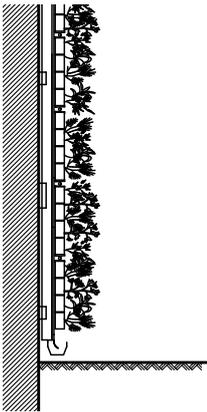


Abb. 5 – Vertikale Fassadenbegrünung, eigene Darstellung

Dieses Konzept kann nicht wie die anderen auf eine lange Tradition<sup>55</sup> zurückblicken, sondern wurde in den 1980er Jahren als „Mur Végétal“ von Patrick Blanc entwickelt, der verschiedene Arten nach Farbe und Krautigkeit kombiniert, um eine besondere ästhetische Wirkung zu erzielen<sup>56</sup>.

Für dieses System werden üblicherweise Bauprodukte spezialisierter Hersteller verwendet, die mit einem vertikalen Pflanzsubstrat ermöglichen auch Arten an der Fassade wachsen zu lassen, die natürlicherweise nicht in die Höhe wachsen würden. Dazu zählen Moose, Farne, Kleingehölze, Gräser oder auch Geranien.<sup>57</sup>

Der Bauteilaufbau dieser Konstruktionen unterscheidet sich je nach Hersteller, lässt sich jedoch grob in zwei Kategorien einteilen. Zum einen gibt es Modulsysteme aus Kassetten mit Substrat aus Materialien wie Steinwolle, Tuffstein oder anorganischen Filzen<sup>58</sup> und einer Außenhaut aus Streckmetall oder Ähnlichem, die den Pflanzen Halt bietet und dabei Verwurzelung im Substrat ermöglicht. Zum anderen gibt es Systeme bei denen ein Vlies als Substrat dient und den Pflanzen entweder durch die Materialstruktur oder die Ausbildung von Taschen im Vlies Halt bietet. Vertikale Grünfassaden sind bewässert. Dies erfolgt beispielsweise durch Tropfschläuche oder Feinsprühdüsen.



Abb. 6 – Flächige, wandgebundene Begrünung, Musée du Quai Branly, Paris, Pfoser, *Vertikale Begrünung*, 87

<sup>55</sup> Pfoser, „Der Stellenwert der Fassadenbegrünung in Architektur und Städtebau“, 5.

<sup>56</sup> Förster, „Gebäudebegrünungen international“, 13.

<sup>57</sup> Goergens, „Vertikale Begrünung in wachsenden Städten Lebenszyklusanalyse verschiedener Begrünungssysteme“, 16.

<sup>58</sup> Pfoser, *Vertikale Begrünung*, 83.

## 2.3. Numerische Simulation von Fassadenbegrünung

Üblicherweise wird bislang das Gebäudeinnere und der Außenraum separat untersucht. Gebäudesimulation und Mikroklimasimulation unterscheiden sich jedoch nicht in physikalischer Sicht, sondern hauptsächlich durch die getroffenen Vereinfachungen. Im Gebäudeinneren wird je Raum meist ein Knoten angenommen, die Übergänge zwischen den einzelnen Knoten sind in den meisten Fällen luftundurchlässige Baukonstruktionen. Gleichwohl muss auch hier die Möglichkeit vorhanden sein direkt in Austausch stehende Knoten darzustellen, da bei sehr großen Räumen oder offenen Grundrissen ein einzelner Knoten pro Luftvolumen zu verfälschten Ergebnissen führen würde. Dies ist hingegen der Standardfall für die Außenraumsimulation, wenn wie bei ENVImet die Knoten ein Raster aus rechteckigen Zellen bilden, aus denen die Modellgeometrie zusammengefügt ist, sodass die Anzahl der Knoten deutlich höher ist. Zusätzlich ist die Simulation des Windes für den Außenraum unerlässlich, um realistische Ergebnisse zu erhalten: Ein aufwendiges Windmodell erhöht jedoch den Rechenaufwand für die Simulation stark. Die Laufzeiten im Innenraum und im Außenraum unterscheiden sich daher sehr. Aufgrund der zeitintensiven Berechnungen der Außenraumsimulation beschränkt sich diese Arbeit auf die Simulation einzelner Tage.

### 2.3.1. Konzepte zur Verknüpfung von Mikroklima- und Gebäudesimulation

Die Dissertation von Robert von Tils befasst sich mit der numerischen Simulation von Begrünung am Gebäude und ihren Auswirkungen auf das Innenraumklima. Anders als in der vorliegenden Arbeit verfolgt von Tils keinen Ansatz mit vorhandenen Softwarewerkzeugen, sondern beschreibt den Aufbau eines eigenen Simulationstools. Für die Berechnung stellt er eine Energiebilanz auf, die die Temperaturen der Gebäudehülle, des Bodens und der Vegetation berechnet. Seine Software besteht aus verschiedenen Teilen, die zusammen „sowohl das Stadtklima als auch das Innenraumklima modellieren kann. Insbesondere soll der Einfluss von Bäumen und Gebäudebegrünung und deren kühlende Wirkung auf das Gebäude und die Lufttemperatur, auch im längerfristigen Verlauf bei unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit, simuliert werden können.“<sup>59</sup> Von Tils erweitert damit ein bestehendes Mikroklimamodell namens ASMUS\_Green, das „die numerische Betrachtung von urbanen, insbesondere kleinskaligen Strukturen“<sup>60</sup>

---

<sup>59</sup> Tils, „Einfluss von Gebäudebegrünung auf das Innenraumklima“, 5.

<sup>60</sup> Ebd., 6.

ermöglicht. Von Tils erweitert dieses Modell um die gekoppelte Simulation des Innenraumklimas.

Die Software ASMUS steht nicht allgemein käuflich zur Verfügung; Ziel der vorliegenden Arbeit ist es unter Verwendung allgemein zugänglicher Software zu ähnlichen Ergebnissen zu kommen. Hierfür werden existierende Schnittstellen für die Energieflüsse an der Fassadenoberfläche der begrünten Gebäude genutzt und ein daraus erstellter Wetterdatensatz für die Kopplung der verschiedenen Modelle verwendet. Zur Anwendung kommt eine Kombination des Mikroklimamodells ENVI<sub>met</sub> und der Gebäudesimulation Honeybee/EnergyPlus. Im Folgenden werden die Überlegungen erläutert, die zur Wahl dieser Softwarekombination führen.

Bei D. Schwede et al.<sup>61</sup> findet sich eine Kombination aus einer ENVI<sub>met</sub>-Mikroklimasimulation städtischer Quartiere in Kombination mit TRNSYS-Gebäudeenergiesimulationen. Um dem Problem ausufernder Simulationslaufzeiten zu begegnen, wurde hier aus wöchentlichen Mittelwerten und einigen zusätzlichen Extremtagen mit Mikroklimasimulationen über 56 Tage ein künstliches Jahr konstruiert, mit dem Aussagen zum Einfluss des lokalen Mikroklimas auf das Innenraumklima getroffen werden konnten. Wenn gleich damit die erforderliche Rechenzeit in einen für manche Fälle vertretbaren Rahmen gesenkt werden kann, sind dennoch, je nach Hardware, Rechenzeiten von mehreren Wochen zu erwarten.

---

<sup>61</sup> Schwede und Sheng, „Assessment of the Annual Energy Demand for Cooling of Buildings in Their Urban Context in 26 Cities in China“.

## 2.4. Wahl der geeigneten Software

### 2.4.1. Mikroklimasimulation im Außenraum

Bei der numerischen Simulation von Mikroklima im Außenraum ist ENVI<sup>met</sup> die Software mit der größten Verbreitung. Es handelt sich um ein validiertes Modell, das speziell auf die Simulation von Außenraumplanungen im städtischen Rahmen und bei der Landschaftsplanung zugeschnitten ist. Es enthält ebenso wie ASMUS ein Bodenmodell, eine fluiddynamische Windsimulation und die nötigen Energiebilanzen. Obgleich das Modell nicht für Innenraumsimulationen ausgelegt ist, bietet es für Betrachtungen wie in dieser Arbeit eine spezielle Ausgabe der Energieflüsse und anderer Werte an der Fassadenoberfläche. Darüber kann die Kopplung mit der Gebäudesimulation erfolgen.<sup>62</sup> Ein Nachteil des Programmes sind die langen Berechnungslaufzeiten, die im Zuge dieser Arbeit nur die Simulation einzelner Tage ermöglichen; die Berechnung ganzer Jahresverläufe würde auch auf modernen leistungsfähigen PCs bei Szenarien mittlerer Komplexität Laufzeiten von mehreren Monaten erfordern.

Vergleichbare Softwares sind meist dezidierte CFD-Softwares wie Open FOAM, die zwar fluiddynamische Simulationen für diverse Anwendungszwecke durchführen können<sup>63</sup>, dabei aber nicht das komplette Mikroklima mit allen notwendigen Energieflüssen abbilden können.

### 2.4.2. Gebäudesimulation

Im Gegensatz zur Simulation des Mikroklimas im Außenraum gibt es für die energetische Simulation von Gebäuden eine Reihe von verbreiteten und validierten Gebäudeenergiesimulationssoftwares, die für diese Arbeit infrage kommen – etwa IDA-ice, EnergyPlus und Trnsys. Zunächst muss die Entscheidung für eine Software getroffen werden, auf der der Workflow aufgebaut werden soll.

Für IDA-ice<sup>64</sup> spricht die gut strukturierte und verhältnismäßig intuitiv verständliche Benutzeroberfläche. Darüber hinaus ist die Software je nach lokaler Variante mit den entsprechenden Vorlagen und Richtlinien ausgestattet, wodurch sich der Aufwand bei der

---

<sup>62</sup> ENVI-met GmbH, „ENVI-met | Startseite“.

<sup>63</sup> Brook-Lawson und Holz, *CFD Comparison Project for Wind Simulation in Landscape Architecture*.

<sup>64</sup> EQUA Simulation AB, „IDA ICE - Simulation Software“.

Modellerstellung verringert. Als nachteilig wird bewertet, dass IDA-ice-Modelle bislang nicht in Grasshopper erstellt werden können.

Das Gebäudesimulationsmodell TRNSYS<sup>65</sup> ist ebenfalls validiert, verbreitet und genießt zudem den Vorteil über TRNLizard in Rhinoceros/Grasshopper integrierbar zu sein. Darüber hinaus ist die Ausgabe der Fassadendaten aus ENVI met auf TRNSYS abgestimmt. Ein Hindernis ist die hohe Komplexität der Modellerstellung, die eine längere Einarbeitungszeit als IDA-ice erforderlich macht.

EnergyPlus<sup>66</sup> ist eine numerische Gebäudeenergiesimulationssoftware, die vom US-amerikanischen Energieministerium kostenlos zur Verfügung gestellt wird. Die Software kommt in der Grundform ohne graphische Nutzeroberfläche und kann daher die Installation von zusätzlichen Programmen zur einfacheren Anwendung erforderlich machen. EnergyPlus ist über das Plugin Honeybee besonders gut in die Grasshopperumgebung eingebunden. Für Honeybee, das Teil des Opensource-Softwarepakets Ladybug Tools von M. Sadeghipour Roudsari und C. Mackey<sup>67</sup> ist, stehen umfangreiche Komponenten zur Durchführung von EnergyPlus-Simulationen zur Verfügung, sodass hierüber eine effizient nutzbare Bedienoberfläche für EnergyPlus zur Verfügung steht. Honeybee und EnergyPlus sind stark auf die US-amerikanische Baubranche zugeschnitten, sodass die Vorteile der enthaltenen umfangreichen Vorlagen für Gebäudetypen, Bauweisen, Dämmstandards usw. außerhalb der USA nicht zum Tragen kommen. Dadurch entsteht bei der Modellerstellung zusätzlicher Aufwand. Darüber hinaus ist die Einstiegshürde durch die komplexe Bedienung hoch, wenn keine Vorkenntnisse in Rhino/Grasshopper bei den Nutzer:innen bestehen.

### **2.4.3. Verknüpfung der Simulationen**

Die Nutzung von Grasshopper verspricht die Möglichkeit, verschiedene Simulationssoftwares in einem einheitlichen Workflow auf flexible Weise miteinander zu koppeln. Das graphische Skriptingwerkzeug Grasshopper<sup>68</sup> ermöglicht durch die vielen verfügbaren Plugins die Integration verschiedener Simulationssoftwares in einen einzigen kohärenten Workflow<sup>69</sup>. Leider stoßen diese Plugins verschiedentlich an Grenzen, sodass

---

<sup>65</sup> Transsolar Energietechnik GmbH, „Trnsys18“.

<sup>66</sup> National Renewable Energy Laboratory, „EnergyPlus“.

<sup>67</sup> Brook-Lawson und Holz, *CFD Comparison Project for Wind Simulation in Landscape Architecture*, 319.

<sup>68</sup> Robert McNeel & Associates, „Eigenschaften“.

<sup>69</sup> Ladybug Tool LLC, „Ladybug Tools“.

es nützlich ist an diesen Stellen andere Werkzeuge zu verwenden. Die Simulation in ENVImet, beispielsweise, kann zwar aus Grasshopper heraus durchgeführt werden, jedoch fehlt dann das ENVImet-Nutzerinterface, das eine Abschätzung der verbleibenden Zeit anbietet, die für die Simulation benötigt wird – bei den langen Rechenzeiten dieser Simulationen eine nützliche Funktion.

Alternativ zur Kopplung der Modelle über den Weg des modifizierten Wetterdatensatzes ist es möglich, eine spezielle Kopplungskomponente für Grasshopper zu erstellen, wie es Yang et al.<sup>70</sup> in der Software BCVTB umsetzen. Ein Vorteil gegenüber der in dieser Arbeit gewählten Lösung ist nicht zu erkennen, würde aber mit zusätzlichem Aufwand einhergehen.

---

<sup>70</sup> Yang u. a., „An Integrated Simulation Method for Building Energy Performance Assessment in Urban Environments“, 244.

## 3. Numerische Simulation

### 3.1. Beschreibung der Bestandssituation

Das Untersuchungsgebiet liegt in Kempten in einem Dreieck, das im Nordosten aus der Haslacher Straße, im Westen durch die Bahnhofstraße und im Süden durch den Campus der Hochschule Kempten begrenzt wird. Im Osten beginnt hinter der Kirche St. Anton ein Wohngebiet mit einer Bebauung aus mittleren Mehrfamilienhäusern und größeren Einfamilienhäusern. Zwischen den Gebäuden ist erhebliches Grünvolumen zu erkennen. Der Hochschulcampus im Süden ist im Gegensatz stark versiegelt und von großvolumigen Gebäudekubaturen und Parkplätzen geprägt. Im Norden und Westen schließen gemischt genutzte Nachbarschaften ohne Bebauungspläne an, mit einer Bebauung mittlerer Dichte und wenig Grün.<sup>71</sup>

Das Untersuchungsgebiet liegt einige Meter erhöht im Vergleich zum Nachbargrundstück im Norden wie auch zum Hochschulcampus. Es ist mit fünf parallel Nord-Süd-orientierten Zeilenhäusern bebaut und stärker durchgrünt als die Nachbarschaft.

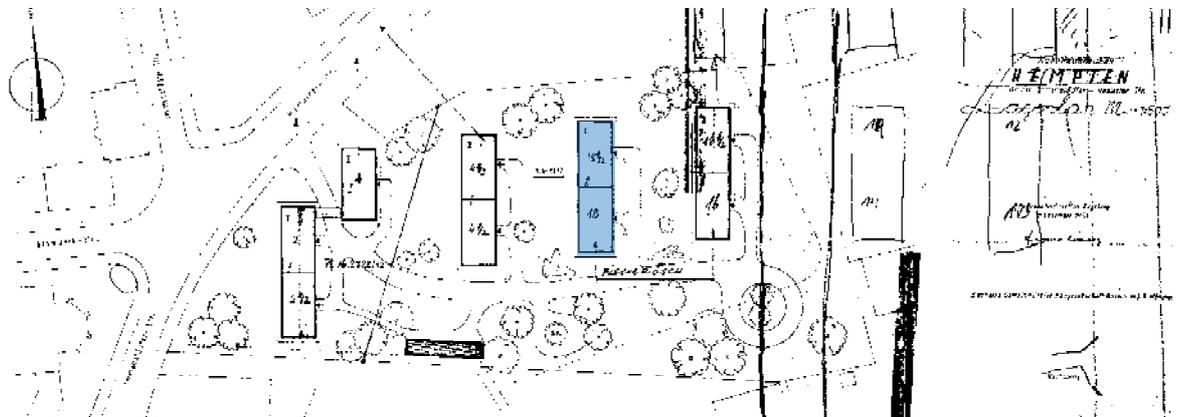


Abb. 7 – Lageplan aus Bauakt, M 1:2000, Bauakt, Hervorhebung des Untersuchungsgebäudes durch den Autor

Die Bautypologie der Zeilenbauten<sup>72</sup> war in den ersten zwei Nachkriegsjahrzehnten in Deutschland sehr verbreitet. Es gibt in fast jeder Stadt Zeilenwohnsiedlungen in unterschiedlicher Maßstäblichkeit, die nach den Prinzipien des Modernen Städtebaus als reine Wohnsiedlungen mit wenigen Einzelhandelsgeschäften und großen Grünflächen

<sup>71</sup> Bayerische Vermessungsverwaltung, „BayernAtlas“.

<sup>72</sup> Detail GmbH, „Vom Sanatorium zum Zeilenbau“.



Bimsbetonhohlblocksteine handelt. Diese weisen durch den Bimszuschlag eine geringe Dichte auf, was zu guten Dämmeigenschaften und erheblichen Gewichtseinsparungen führt. Aus diesem Grund waren solche Bimssteine in den 1950er Jahren ein beliebter Baustoff.<sup>74</sup>

Entlang der Längsachse der Gebäude liegt eine tragende Innenwand, die die Last der Mittelpfette aufnimmt. Diese Wand und die Wohnungstrennwände sind in den Regalgeschossen als 24 cm Mauerwerkswand aus Hochlochziegeln 100 und im Erdgeschoss aus Hochlochziegeln 150 ausgeführt.<sup>75</sup> Die nichttragenden Innenwände bestehen aus Schwemmstein.

Die Geschossdecken sind nach dem Remy-Decken-System ausgeführt. Sie bestehen aus vorgefertigten Leichtbetonhohlkörpern, die mit Ortbeton vergossen werden. Das System hat eine Höhe von 25 cm, dazu kommt eine 5 cm Aufbetonschicht.

Der Dachaufbau besteht aus Stahlbetonfertigteilen, die mit einer Doppellage Dachpappe gedeckt sind. Für die Fertigteile wird angenommen, dass sie sich thermisch wie die Remy-Rippendecke verhalten.

Die bauphysikalischen Werte der Baustoffe werden im Wesentlichen der Masea-Datenbank<sup>76</sup> entnommen, einer Sammlung von Kennwerten historischer Baustoffe, die vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Kooperation mit dem Institut für Bauklimatik der Technischen Universität Dresden und dem Zentrum für umweltbewusstes Bauen in Kassel für die hygrothermische Simulation von Altbauten zur Verfügung gestellt wird. Die Werte für die Remy-Decke stammen aus einer Publikation des Energieinstituts Hessen<sup>77</sup>, in der keine weitere Begründung für den angegebenen U-Wert von  $0,47 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$  genannt wird. Die leichte Bauweise, bei der wiederum Bimsbeton zum Einsatz kommt, lässt die Angabe aber plausibel erscheinen. Die Angaben für die Zimmertür und das Holz des Fensterrahmens entstammen den Schneider Bautabellen<sup>78</sup>.

---

<sup>74</sup> Ebd., 67.

<sup>75</sup> Ebd., 66.

<sup>76</sup> Das Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, „MASEA Datenbank“.

<sup>77</sup> Werner Eicke-Hennig, „Historischer Wärmeschutz: Decken und Böden“, 6.

<sup>78</sup> Schneider u. a., *Bautabellen für Architekten*.

Kennwert:	Stärke	Wärmeleitfähigkeit	Spezif. Wärmekapazität	Rohdichte
	d	$\lambda_r$	$c_p$	$\rho$
	[m]	$\left[\frac{W}{mK}\right]$	$\left[\frac{J}{kgK}\right]$	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
AW UG Stampfbeton	0,4	1,94	776	2104
AW EG HLZ	0,3	0,12	850	600
AW OG Bimsstein <sup>79</sup> 30	0,3	0,14	850	672
AW DG Bimsstein <sup>79</sup> 24	0,24	0,14	850	672
IW tragend EG HLZ 150	0,225	0,12	850	600
IW tragend OG HLZ 100	0,225	0,12	850	600
IW nichttragend Schwemmstein <sup>80</sup>	0,115	0,14	850	672
Putz Kalkzement	0,015	0,8	1000	1900
Remy Rippendecke (auch Dach)	0,3	0,64	776	2104
Estrich Fliessestr FE 50	0,035	0,97	699	2058
Trittschalldämmung	0,008	0,04	850	60
Dachpappe, doppelte Lage <sup>81</sup>	0,004	5	1000	1200
Fenster ("Generic Single Pane" aus Honeybee- Datenbank)	U-Wert: $5,73 \frac{W}{m^2K}$			

Tabelle 1 – thermische Eigenschaften der Baustoffe und Bauteile

<sup>79</sup> angenommen als Bimsbetonhohlblockstein nach Kühner, „Wohnraum innerhalb des verfügbaren deutschen Treibhausgasbudgets planen“, 66.

<sup>80</sup> angenommen als Bimsbetonhohlblockstein, vgl. vorstehend.

<sup>81</sup> für ENVI met Albedo von "Asphalt" übernommen

Für die Simulation wird pauschal ein Wandaufbau der Außenwände aus 30 cm Bimsbetonstein angenommen, der innen sowie außen mit je 1,5 cm Kalkzementputz verputzt ist. Über die Stärke des Putzes gibt es in den Bauakten keine Angaben.

Als Untersuchungsgebäude (im Lageplan Abb. 7 blau markiert) wurde das mittlere Haus mit der Adresse Fischerösch 18 und 18 ½ ausgewählt, damit sich die Nachbargebäude auf beiden Seiten gleichen und die Randlage vermieden wird.

Die Umgebung des Untersuchungsgebäudes wird in der Simulation auf die benachbarten parallelen Zeilenhäuser begrenzt. Nebengebäude und Geländeversprünge werden nicht dargestellt. Die Durchwegung des Quartiers, wie im Lageplan sichtbar, wird einheitlich als asphaltierte Oberfläche angenähert. Die Flächen zwischen den Gebäuden und Wegen werden als Grasflächen dargestellt.

### 3.2. Ablauf der Simulation

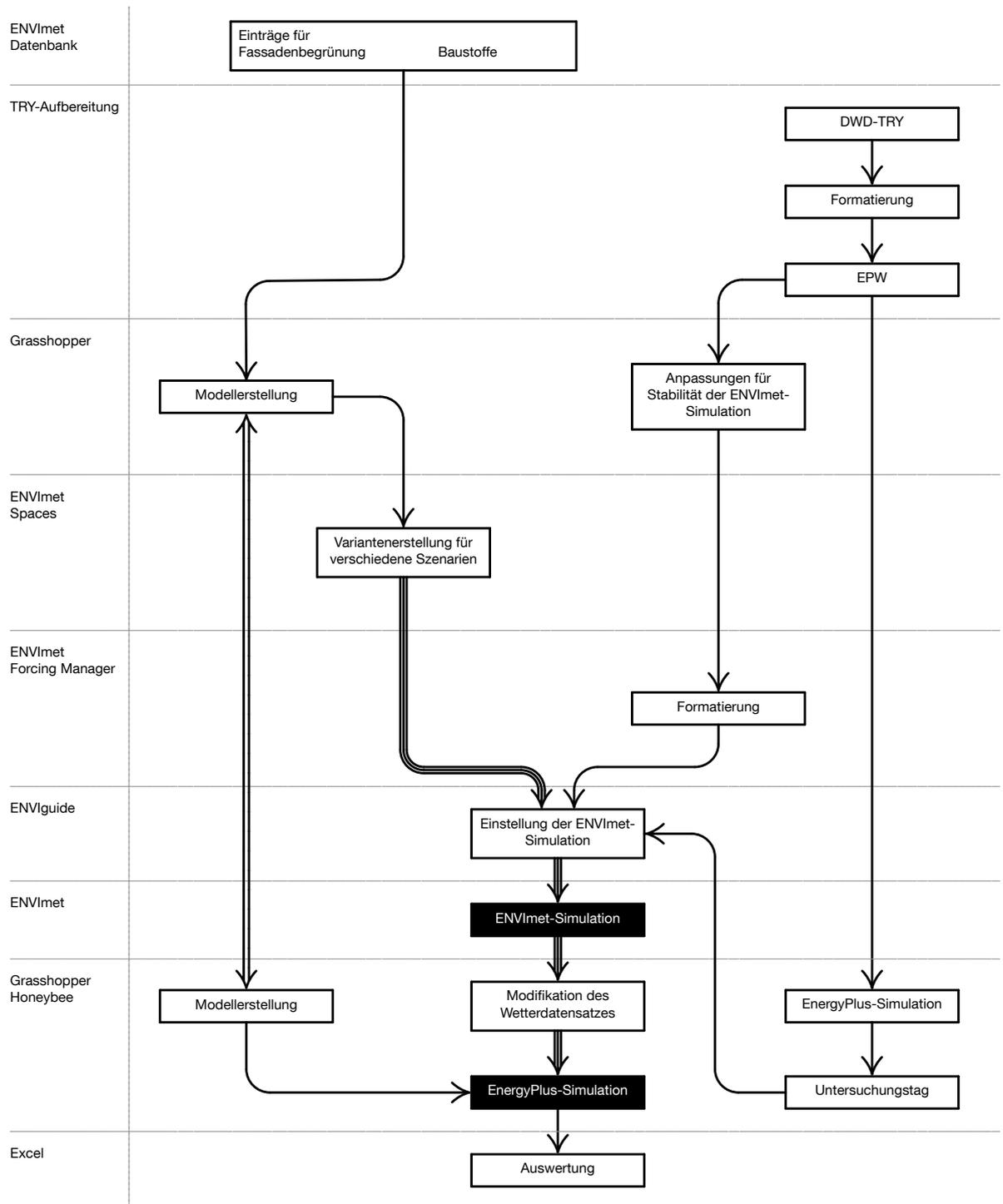


Abb. 9 – Ablauf des Workflows, eigene Darstellung

Im Folgenden wird der Ablauf des Simulationsworkflows beschrieben. Zunächst werden die Wetterdaten aufbereitet, danach wird das Mikroklimamodell mit den vier Begrünungs- und zwei Referenzszenarien erstellt. Diese Simulationen werden sodann in Envimet durchgeführt. Mit den Ergebnissen wird ein Wetterdatensatz modifiziert, ein Gebäudesimulationsmodell wird in Honeybee erstellt. Schließlich wird mit diesem modifizierten Begrünungswetterdatensatz eine EnergyPlus-Gebäudesimulation durchgeführt. Ausgegeben werden Raumtemperaturen und Behaglichkeitswerte.

### 3.2.1. Energiebilanz

Das Modell besteht aus zwei Teilen, in denen die Energieflüsse separat simuliert werden. Die Übertragung erfolgt über den modifizierten Wetterdatensatz.

Das Mikroklimamodell weist folgende Energieflüsse auf:

- Direkte, diffuse und reflektierte Strahlung
- Evaporation, Transpiration und Wärmefluss der Pflanzen
- Wärmeleitung und Oberflächentemperaturen von Gebäuden und Erdboden<sup>82</sup>

Der Datensatz mit den Wetterdaten enthält direkte kurzwellige Strahlung  $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ , diffuse kurzwellige Strahlung  $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ , langwellige Strahlung  $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ , die Lufttemperatur [K], die relative Luftfeuchtigkeit [%], Windrichtung [°] und -geschwindigkeit  $\left[\frac{m}{s}\right]$ .

Die Energiebilanz für eine Zone, also einen Raum, des Gebäudemodells ist

$$Q_{\text{loads}} = Q_{\text{int}} + Q_{\text{conv,int}} + Q_{\text{inf}} + Q_{\text{vent}} + \Delta E_{\text{air}}$$

$Q_{\text{loads}}$  sind die Heiz- oder Kühllasten,

$Q_{\text{int}}$  sind die internen Gewinne,

$Q_{\text{inf}}$  ist der Wärmeaustausch mit der Außenluft durch Undichtigkeit,

$Q_{\text{vent}}$  ist der Wärmeaustausch mit der Außenluft durch Fensterlüftung,

$\Delta E_{\text{air}}$  ist die Änderung der in der Raumluft enthaltenen Energie.<sup>83</sup>

Die Energiebilanz der Gebäudeaußenhülle ist

$$q_{\text{tsol}} + q_{\text{asol}} + q_{\text{lw}} + q_{\text{conv}} - q_{\text{cond}} = 0$$

$q_{\text{tsol}}$  ist die durchgehende Solarstrahlung,

---

<sup>82</sup> ENVI-met GmbH, „ENVI-met Model Architecture“.

<sup>83</sup> Yang u. a., „An Integrated Simulation Method for Building Energy Performance Assessment in Urban Environments“, 244.

$q_{\text{asol}}$  ist die absorbierte Solarstrahlung,  
 $q_{\text{lw}}$  ist der Fluss der langwelligen Strahlung,  
 $q_{\text{conv}}$  ist der konvektive Wärmefluss zwischen Raum- und Außenluft und  
 $q_{\text{cond}}$  ist der konduktive Wärmefluss durch die Wand.<sup>84</sup>

Der Wetterdatensatz überträgt die Datenreihen für diese Werte vor der Fassade vom Mikroklimamodell auf das Gebäudemodell:

- Lufttemperatur,
- relative Luftfeuchtigkeit,
- direkte kurzwellige Strahlung,
- langwellige Strahlung,
- reflektierte kurzwellige Strahlung,
- Luftdruck und
- Windgeschwindigkeit.

Die übrigen Werte im EPW werden aus dem Umgebungsdatensatz beibehalten.

### **3.2.2. Testreferenzjahre**

Vom Deutschen Wetterdienst (DWD) werden für ganz Deutschland aussagekräftige Testreferenzjahre (TRJ, engl. Test Reference Year, TRY) für thermische Gebäudesimulationen, die Auslegung von Heizungs- und Klimaanlage und ähnliche Zwecke zur Verfügung gestellt. Sie enthalten Wetterdaten, die aus realen Beobachtungen zu künstlichen Jahresverläufen zusammengesetzt wurden und mit einer Ortsauflösung von einem Quadratkilometer interpoliert und nach empirisch ermittelten statistischen Zusammenhängen an die lokalen Verhältnisse adaptiert wurden. Hierbei fließen unter anderem städtische Wärmeinseleffekte und die Höhenlage ein. Aufgrund des Klimawandels stehen die Datensätze für zwei Referenzzeiträume zur Verfügung: Der Datensatz TRY2015 basiert auf Wetterbeobachtungen aus den Jahren 1995 bis 2012, der Datensatz TRY2045 basiert auf Modellrechnungen für den Zeitraum 2021 bis 2060<sup>85</sup>. Diese Daten liegen wiederum jeweils als ein typisches Jahr, ein Jahr mit besonders kaltem Winter und ein Jahr mit besonders heißem Sommer vor.

---

<sup>84</sup> Ebd.

<sup>85</sup> Deutscher Wetterdienst, „Ortsgenaue Testreferenzjahre“, 4ff.

In den TRJ-Wetterdaten sind die kurzwelligen direkten und diffusen Solarstrahlungswerte, die langwelligen atmosphärischen und terrestrischen Strahlungswerte, der Bedeckungsgrad, die Lufttemperatur in zwei Meter Höhe, der Wasserdampfgehalt der Luft, der Luftdruck, die relative Luftfeuchtigkeit in zwei Meter Höhe sowie Windrichtung und Windgeschwindigkeit für jede Stunde des Jahres enthalten. Dazu kommt ein sogenanntes Qualitätsbit, das „die maximal auftretende monatliche Abweichung des jeweiligen TRJ-Datensatzes zum mittleren Jahresgang des Zeitraums 1995 -2012 bezüglich Mittelwert (sic!) bzw. Standardabweichung der Lufttemperatur und Mittelwert der Globalstrahlung“<sup>86</sup> angibt. Für die hier durchgeführten Simulationen werden Bedeckungsgrad und Wasserdampfgehalt der Luft aufgrund ihrer Redundanz nicht verwendet. Die langwellige terrestrische Gegenstrahlung wird ausgelassen, da sie von den verwendeten Modellen nicht verarbeitet werden kann.

### 3.2.3. Aufbereiten der DWD-TRJ-Datensätze für Simulationssoftware

Für das weitere Vorgehen müssen die Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes in die Formate der Simulationssoftwares EnergyPlus und ENVImet umgewandelt werden. Das EnergyPlus-Wetterdatenformat EPW ist generell weit verbreitet und kann auch von vielen anderen Programmen verarbeitet werden.

The screenshot shows the 'Elements' software interface with the following data:

Site Name: Kempten TRY extremer Sommer  
 Latitude [degrees]: 47.72 Longitude [degrees]: 10.31  
 Time Zone: 1 Elevation [m]: 687

Tools: Offset Scale Normalize Normalize By Month

Variables to Hold Constant:

Date/Time	Dry Bulb Temperature [C]	Wet Bulb Temperature [C]	Atmospheric Pressure [kPa]	Relative Humidity %	Dew Point Temperature [C]	Global Solar [Wh/m2]	Normal Solar [Wh/m2]	Diffuse Solar [Wh/m2]	Wind Speed [m/s]
2045/01/01 @ 00:00:00	2.7	2.44	93.7	96.01	2.12	0	0	0	2.2
2045/01/01 @ 01:00:00	4.6	4.32	93.7	96.01	4.03	0	0	0	2.9
2045/01/01 @ 02:00:00	6.1	5.8	93.8	96	5.53	0	0	0	3.4
2045/01/01 @ 03:00:00	6.4	6.02	93.8	95.01	5.68	0	0	0	3.5
2045/01/01 @ 04:00:00	6.5	6.12	93.8	95	5.78	0	0	0	3.4
2045/01/01 @ 05:00:00	6.5	6.12	93.8	95	5.78	0	0	0	3.4
2045/01/01 @ 06:00:00	6.2	5.9	93.8	96	5.63	0	0	0	2.9
2045/01/01 @ 07:00:00	6.4	6.17	93.8	97	5.98	0	0	0	2.8
2045/01/01 @ 08:00:00	7	6.77	93.9	97	6.58	19.19	5	19	3.3
2045/01/01 @ 09:00:00	8.1	7.45	93.9	92	6.91	72.41	21	69	3.6
2045/01/01 @ 10:00:00	8.5	7.5	93.9	88	6.65	74	0	74	3.6
2045/01/01 @ 11:00:00	9.2	8.09	93.9	87	7.18	110.94	3	110	4.2
2045/01/01 @ 12:00:00	9.3	7.93	94	84	6.76	96	0	96	2.9
2045/01/01 @ 13:00:00	10.1	8.23	94	79	6.65	119.73	9	117	2.9
2045/01/01 @ 14:00:00	10.5	8.23	93.9	75	6.28	106.2	22	101	2.5

Columns: Add Remove Move Left Move Right

Units: SI IP

Abb. 10 – Oberfläche von „Elements“, Screenshot

<sup>86</sup> Ebd., 10.

Da es sich sowohl bei den Datensätzen der Testreferenzjahre als auch bei EPW-Dateien um speziell formatierte Textdateien handelt, können sie mit Hilfe von Tabellenkalkulationssoftware wie Microsoft Excel geöffnet und formatiert werden. Zur Vereinfachung der Erstellung von EPW-Formatierungen existieren spezielle Hilfsprogramme, in die die einzelnen Datenspalten aus der Tabellenkalkulation eingefügt werden können. Hier wurden zwei verschiedene Programme getestet. Zum einen die Software „Elements“<sup>87</sup>, die die Bearbeitung von Wetterdaten erlaubt und dabei im Gegensatz zu gewöhnlicher Tabellenkalkulation die physikalischen Zusammenhänge berücksichtigt. Jedoch kam es zu Problemen mit der Übertragung mancher Datenreihen. Daher wurde die Software „IBK Climate Data Editor“<sup>88</sup> gewählt, die vom Institut für Bauklimatik der TU Dresden zur Verfügung gestellt wird und im Wesentlichen die gleiche Funktionalität bietet wie Elements, aber den besagten Fehler nicht aufweist.

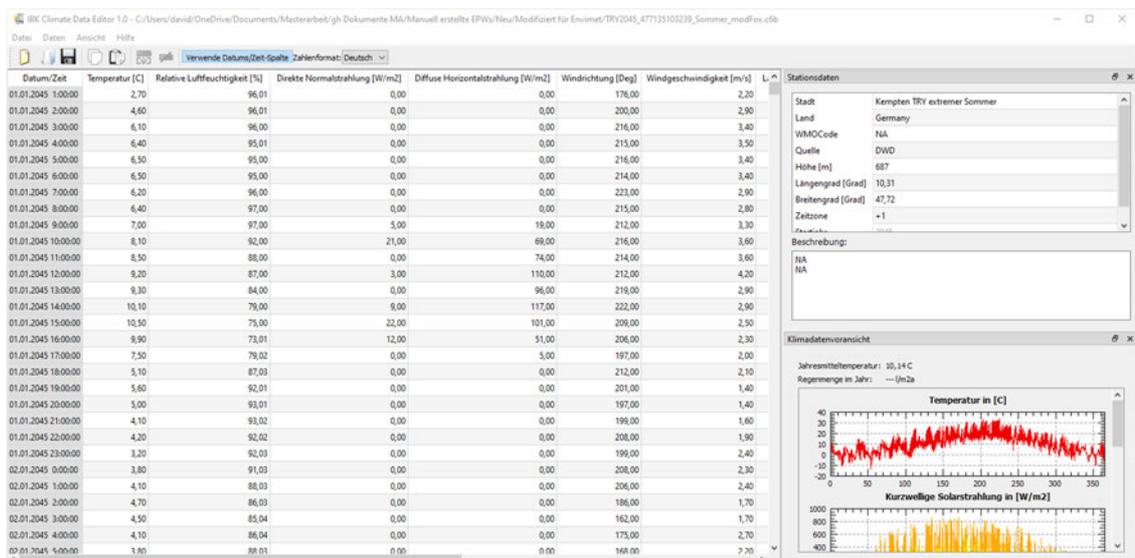


Abb. 11 – Oberfläche von „IBK Climate Data Editor“, Screenshot

Der so erstellte EPW-Datensatz kann direkt für die Simulation in EnergyPlus verwendet werden, für ENVImet müssen jedoch noch Anpassungen vorgenommen werden: Da für die Windsimulation ein CFD-Modell zum Einsatz kommt<sup>89</sup>, dürfen die Werte für die Windgeschwindigkeit keine zu kleinen Werte annehmen. Das Modell kann sonst instabil

<sup>87</sup> Big Ladder Software, „Elements“.

<sup>88</sup> Bauklimatik Dresden Software GmbH, „Software für Bauphysik und Bauklimatik“.

<sup>89</sup> Brook-Lawson und Holz, *CFD Comparison Project for Wind Simulation in Landscape Architecture*, 319.

werden.<sup>90</sup> Die Datenreihe für die Windgeschwindigkeit wird daher in einem separaten Grasshopper-Skript so angepasst, dass alle Werte unter 1,0 m/s auf diese Schwelle angehoben werden.

Das Resultat kann anschließend mit dem ENVI-met-Hilfsprogramm „Forcing Manager“ in das ENVI-met-Wetterdatenformat umgewandelt werden.

#### **3.2.4. Vorbereitung**

Um möglichst aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten und gleichzeitig die Rechenzeiten in einem handhabbaren Rahmen zu halten, wird die ENVI-met-Simulation für jedes Szenario über einen Zeitrahmen von zwei Tagen durchgeführt: Simuliert wird jeweils ein besonders heißer Sommertag und zusätzlich der vorangegangene Tag, um eine kurze Aufwärmzeit zu erhalten. Um den Untersuchungstag zu ermitteln, werden mit den DWD-Testreferenzjahren EnergyPlus-Gebäudesimulationen durchgeführt, die einen Raum des Bestandsgebäudes abbilden. Aus diesen Ergebnissen wird der Tag mit der höchsten mittleren operativen Temperatur ermittelt und dieser als Untersuchungstag für den jeweiligen Wetterdatensatz festgelegt. Das Modell für diese Simulation ist dabei das gleiche, das weiter unten im Abschnitt 3.2.7 auch für die Ermittlung des Innenraumklimas genutzt und dort näher beschrieben wird. Der einzige Unterschied besteht darin, dass die Verschattung durch die Nachbarbebauung hier, im Gegensatz zum Kapitel 3.2.7, über die Gebäudegeometrie berücksichtigt wird.

---

<sup>90</sup> Yang u. a., „An Integrated Simulation Method for Building Energy Performance Assessment in Urban Environments“, 246.



Wetterszenario	Heißester Tag	Übertemperaturgradstunden [Kh a <sup>-1</sup> ]
2015 normales Jahr Ostraum	28.6.2015	474,02
2015 extremer Sommer Ostraum	27.6.2015	954,25
2045 normales Jahr Ostraum	14.7.2045	922,08
2045 extremer Sommer Ostraum	22.7.2045	1589,58
2015 normales Jahr Westraum	28.6.2015	313,51
2015 extremer Sommer Westraum	27.7.2015	1741,28
2045 normales Jahr Westraum	11.7.2045	650,34
2045 extremer Sommer Westraum	1.7.2045	1212,76

Tabelle 2 – Ermittlung des Untersuchungsrahmens mit EnergyPlus

Diese Daten führen zur Entscheidung, sich bei der weiteren Untersuchung auf den heißesten Tag des Datensatzes „TRY2015 – extremer Sommer“ und einen Raum an der Westfassade des Gebäudes zu beziehen, da hier der höchste Bedarf an Hitzeschutzmaßnahmen besteht. Als heißester Tag wurde der 27. Juli ermittelt. Er ist folglich der Untersuchungstag.

### 3.2.5. Beschreibung der Simulation in ENVImet

In den vorhergehenden Schritten wurde der Wetterdatensatz für die Simulation vorbereitet. Für die Simulation in ENVImet ist darüber hinaus ein geometrisches Modell erforderlich, und die Zuweisung der Materialeigenschaften in der ENVImet-Projektdatei.

Mithilfe des Ladybug-Legacy-Plugins mit den Dragonfly-Komponenten von A. di Nunzio<sup>92</sup> wird auf Grundlage eines 3D-Modells das geometrische Modell, in ENVImet „Area Input File“ genannt, in Grasshopper erstellt. Dabei wird die dreidimensionale Geometrie aus Rhinoceros automatisch auf das gewählte Raster übersetzt, das von ENVImet verarbeitet werden kann. Auch die Einrichtung des Bodens und der Grasflächen erfolgt mit nur wenigen händischen Eingaben. Für den Bodenaufbau wird „Loamy Soil“

<sup>92</sup> Di Nunzio, „Programming“.

für unversiegelte Flächen und „Asphalt Road“ für versiegelte Flächen aus der ENVI-met-Standarddatenbank gewählt. Auf den unversiegelten Flächen wird ein Standard-Grasbewuchs angenommen mit dem „Simple Plant“-Objekt „Grass 50cm aver. dense“. Die Bäume werden anhand eines Luftbildes manuell in Rhinoceros platziert.

Die Eigenschaften der Baustoffe aus der Tabelle 1 auf Seite 27 werden manuell in die ENVI-met-Datenbank eingetragen, ebenso wie die Werte für die Fassadenbegrünungen, die in den Abschnitten zu den verschiedenen Szenarien ab Seite 43 im Kapitel 3.3 erläutert werden.

Anschließend wird der in Grasshopper erstellte Area Input File im ENVI-met-Modelleditor „Spaces“ weiterbearbeitet, da die weiteren Modellierungsaufgaben auf dem Maßstab einzelner Rasterzellen stattfinden, sodass die Bearbeitung in Spaces effizienter ist: Das Gebäude, das fokussiert betrachtet wird, erhält Fenster und wird für den Building Simulation Output eingetragen. Das bedeutet, dass ENVI-met die mikroklimatischen Bedingungen an der Oberfläche jeder Fassade des Gebäudes bei der Simulation in einer separaten Ausgabe bereitstellt. Mit diesen Daten wird später der Einfluss der Begrünung auf das Innenraumklima bestimmt. Dieses Vorgehen wird im Abschnitt 3.2.6 auf Seite 40 dargestellt.

In einem nächsten Schritt wird der Area Input File in ENVI-met jeweils für die verschiedenen Szenarien verändert. Es werden die verschiedenen Begrünungen modelliert, die wiederum ab Seite 43 im Kapitel 3.3 beschrieben werden.

Die Simulation wird schließlich für alle sechs Szenarien über den 26. und 27. Juli des Wetterdatensatzes „TRY2015 – extremer Sommer“ durchgeführt, um eine Aufwärmphase von vierundzwanzig Stunden zu haben. Dies dient dem Zweck, die verfälschenden Effekte der thermischen Masse der Gebäude möglichst zu reduzieren.

### **3.2.6. Beschreibung des Aufprägens der Ergebnisse auf die Wetterdaten**

ENVI-met verfügt über eine separate Ausgabe für Gebäudesimulationen, die für einzelne Gebäude aktiviert werden kann. Diese wird BPS-Output genannt und besteht aus einer CSV-Datei für jedes untersuchte Gebäude. Im vorliegenden Fall wird ein einzelnes Gebäude untersucht. Der BPS-Output enthält den Tagesverlauf für die Werte an den Oberflächen aller Fassaden des Gebäudes jeweils für kurz- und langwellige, reflektierte und direkte Strahlung, Luftdruck, Lufttemperatur, Sky View Factor, Windgeschwindigkeit und relative Luftfeuchtigkeit. Aus diesen Werten werden die Daten mittels eines

Grasshopper-Scripts für den Untersuchungstag am 27. Juli für die Westfassade entnommen und in den ursprünglichen Wetterdatensatz „TRY2015 – extremer Sommer“ eingefügt. Dieser stellt nun für den Untersuchungstag die mikroklimatischen Bedingungen unmittelbar dort dar, wo die Fassadenbegrünung Einfluss nimmt. Aus diesen Daten wird in Grasshopper ein EPW-Wetterdatensatz erstellt, der an die folgende Honeybee-Simulation übergeben wird. Mit diesem Verfahren können die Ergebnisse der Mikroklimasimulation der verschiedenen Begrünungsszenarien ohne weitere manuelle Eingriffe in die Gebäudesimulation überführt werden.

### **3.2.7. Beschreibung der Simulation in EnergyPlus/Honeybee**

Die Gebäudesimulation beschränkt sich auf einen Raum. Dieser hat eine Außenwand, drei Innenwände, eine Decke und einen Boden, wobei ausschließlich über die Außenwand Energie ausgetauscht wird. Die Innenwände, Decke und Boden werden als adiabatisch angenommen. Da das EnergyPlus-Modell nur eine Außenfassade haben darf, weil nach der Modifikation des Wetterdatensatzes an jeder Gebäudeseite unterschiedliche Bedingungen herrschen, ist die Beschränkung auf einen Raum nötig. Es liegt in der Natur der Sache, dass EnergyPlus nur einen Wetterdatensatz für das gesamte Modell verarbeiten kann.

Mit den thermischen Eigenschaften der Baustoffe aus der Tabelle 1 werden Honeybee-Materialien gebildet, die zu neuen EnergyPlus-Bauteilaufbauten mit den gleichen bauphysikalischen Eigenschaften, wie bereits in der ENVI-met-Simulation, zusammengefügt werden. Das Fenster wird der Honeybee-Standarddatenbank entnommen: Es wird die Vorlage „Generic Single Pane“ gewählt, eine Konstruktion mit schlechten Dämmeigenschaften. Die internen Lasten werden gemäß der schweizerischen Norm SIA 2024<sup>93</sup> entsprechend der Tabellenwerte für ein Mehrfamilienhaus (vgl. Tabelle 3) dargestellt.

Die Simulation gibt für den Untersuchungstag die operative Temperatur, die Lufttemperatur sowie PMV (Predicted Mean Vote) und PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) nach Ole Fanger<sup>94</sup> bei sitzender Tätigkeit und normaler Sommerbekleidung (Clothing Factor 0,45, dies ist gemäß Ladybug eine Bekleidung aus Unterwäsche, leichten Schuhen, kurzärmeligem Hemd und einer Hose, aber keine Strümpfe, Unterhemden oder ähnliches) aus.

---

<sup>93</sup> SIA, *Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik*.

<sup>94</sup> BauNetz, „PMV | Gesund Bauen | Glossar | Baunetz\_Wissen“.

## Wohnen MFH

### Standardwerte

Interne Gewinne $Q_{int}$			
Geräte	$E_A$	21,6	$\frac{kWh}{m^2}$
Beleuchtung	$E_L$	4,2	
Klimakälte <sup>95</sup>	$Q_C$	5,4	
Heizwärme <sup>96</sup>	$Q_H$	14,2	
Warmwasser <sup>97</sup>	$Q_W$	16,9	
Personenprofil (Anwesenheit)		Lastprofil Geräte	
1.-6. Stunde	100%	1.-6. Std.	20%
7. Std.	60%	7. Std.	80%
8. Std.	40%	8.-12. Std.	20%
9.-12. Std.	0%	13. Std.	80%
13. Std.	80%	14.-18. Std.	20%
14. Std.	40%	19. Std.	80%
15.-17. Std.	0%	20. Std.	100%
18. Std.	40%	21.-24. Std.	20%
19.-21. Std.	80%		
22.-24. Std.	100%		

Tabelle 3 – Auszug aus SIA-Norm 2024

Im modellierten Raum wird eine natürliche Fensterlüftung simuliert, die ab einer Temperatur von 23 °C aktiviert wird. Bei einer Außentemperatur ab 24 °C oder einem Temperaturunterschied von 5 °C zwischen innen und außen und wenn gemäß des Personenprofils keine Anwohner zu Hause sind wird nicht gelüftet. Diese Vorgaben führen dazu, dass das Fenster nachts geöffnet wird, um eine Nachtabkühlung zu erzielen. Tagsüber bleiben die Fenster geschlossen. Diese Annahmen werden als übliche sinnvolle Verhaltensweisen an einem so heißen Tag unterstellt.

<sup>95</sup> Keine Anwendung, da keine mechanische Kühlung modelliert wird

<sup>96</sup> Keine Anwendung, da die Heizung nur stark vereinfacht abgebildet wird und am simulierten Sommertag nicht in Betrieb ist.

<sup>97</sup> Keine Anwendung, da ein Wohnraum ohne Wasseranschluss dargestellt wird.

### 3.3. Beschreibung der Szenarien

Für die Wahl der modellierten Szenarien wurden drei Varianten ausgewählt: 1. Die bodengebundene Begrünung, selbstkletternd oder mit Rankhilfe, 2. Pflanztröge unter den Fenstern und 3. ein „Green Wall“-System aus Modulen mit vertikalem Pflanzsubstrat. Zum Vergleich werden darüber hinaus noch zwei Varianten ohne Fassadenbegrünung dargestellt und eine Variante mit einem großen Nadelbaum vor der Fassade, der in der Lage ist ein weit größeres Grünvolumen zu erzeugen als eine Fassadenbegrünung.

#### 3.3.1. Szenario 1 Referenz Keine Begrünung

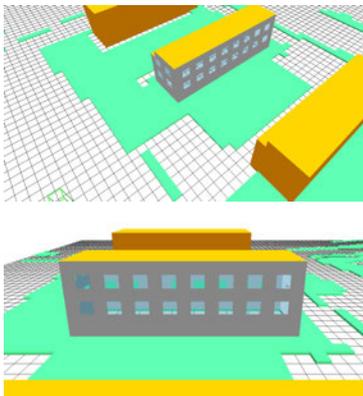


Abb. 13 – Szenario 1, Screenshot aus Spaces

Dieses Szenario dient als Referenz und erhält als einzige Begrünung die Rasenflächen. Anhand dieses Szenarios wurde der Workflow erprobt. Es ist durch die nicht dargestellten Bäume auch eine gute Vergleichsgröße: Das Szenario ist weniger ortsspezifisch und erscheint somit in seiner Aussagekraft auf andere, vergleichbare Zeilenwohnsiedlungen übertragbar. Ferner zeigt sich in der Gegenüberstellung mit dem Szenario 2 der Unterschied, der durch die heute bereits vorhandenen Bäume erzielt wird.

#### 3.3.2. Szenario 2 Referenz Bestandsvegetation

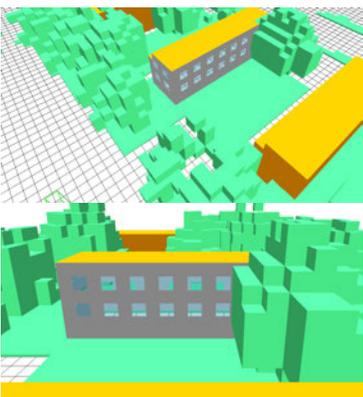


Abb. 14 – Szenario 2, Screenshot aus Spaces

Bei diesem Szenario wird die bestehende Vegetation abgebildet. Dargestellt sind, wie vorstehend, die Grasflächen und zudem die vorhandenen Bäume. Diese werden nach Art und Größe unterschieden. Bei einer Ortsbegehung wurden die vorhandenen Nadelbäume als Kiefern, die meisten Laubbäume als Birken identifiziert. Der Einfachheit halber werden die Nadelbäume als Gemeine Fichte (*picea abies*) mit einer Höhe von 18 m und einem Durchmesser von 11 m abgebildet und die Laubbäume als Weißbirken (*betula pendula*) anhand eines Luftbildes

in drei Größen dargestellt: Als alter Baum mit 17 m Höhe und 14 m Kronendurchmesser, als mittelalter Baum mit 15 m Höhe und 13 m Kronendurchmesser sowie als junger

Baum mit 7 m Höhe und einem Kronendurchmesser von 8 m. Die Baummodelle entstammen der Standarddatenbank von ENVI-met.

### 3.3.3. Szenario 3 Bodengebundene Begrünung

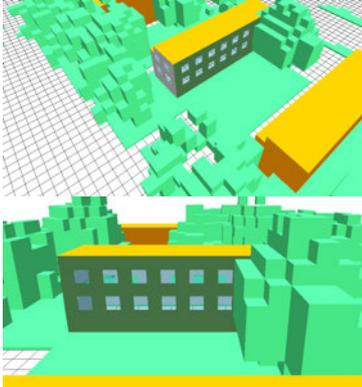


Abb. 15 – Szenario 3, Screenshot aus Spaces



Abb. 16 – Selbstklimmende (li.) und gerüstkletternde (re.) Begrünung, Pérez et al., *Seasonal influence ...*, 2

Dieses Szenario stellt eine bodengebundene Fassadenbegrünung dar, die die gesamte Westfassade des Gebäudes bedeckt – mit Ausnahme der Fensterflächen. Damit wird sowohl eine selbstkletternde direkte Begrünung als auch eine mit Rankhilfe dargestellt. Die Unterschiede der Struktur des Bewuchses bei diesen beiden Systemen sind nicht sinnvoll in ENVI-met darstellbar, erscheinen aber auch nicht relevant. Für die Modellierung wurde ein Efeu aus der ENVI-met-Standarddatenbank mit einem Blattflächenindex (Leaf Area Index – LAI) von 4,0 gewählt. Dies entspricht in etwa einer Kletterhortesie oder einer Klematis<sup>98</sup>.

### 3.3.4. Szenario 4 Fassadengebundene Tröge

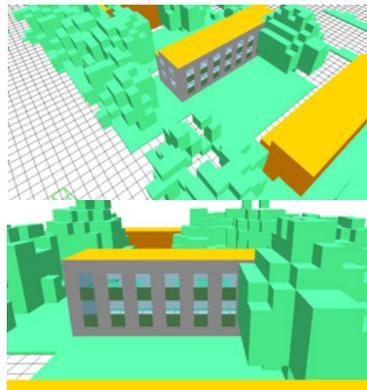


Abb. 17 – Szenario 4, Screenshot aus Spaces

Noch mehr als andere Typen der Fassadenbegrünung ist dieses System stark entwurfsabhängig. Große Pflanztrogsysteme sind integraler Teil der Fassadenkonstruktion und daher ungeeignet für die hier vorgenommenen Untersuchungen. Stattdessen wird an dieser Stelle ein anderer Weg gewählt, der mit geringem Aufwand verbunden ist: Einfache, aber große Pflanzkästen werden unterhalb der Fenster zur Bewirtschaftung durch die Anwohnerschaft vorgesehen.

<sup>98</sup> Chen Yu, „The Intervention of Plants in the Conflicts between Buildings and Climate - A Case Study in Singapore“, 308ff.No Reference

Im Modell werden diese Pflanztröge durch als Green-Wall mit LAI 4,0 abgebildet, die im Raster jeweils punktuell unter den Fenstern angeordnet sind.

### 3.3.5. Szenario 5 Vertikalsystem

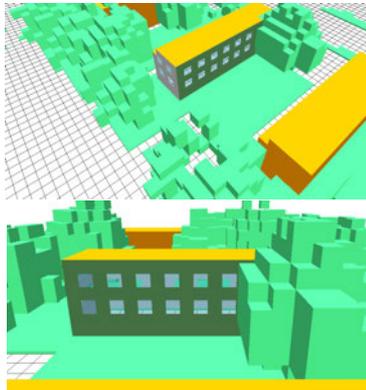


Abb. 18 – Szenario 5, Screenshot aus Spaces

Für das Green-Wall-System wurde der Aufbau des Grünfassadensystems des britischen Herstellers Biotope<sup>99</sup> als Vorlage genommen. Das System besteht aus Pflanzpaneelen, die an Aluminiumschienen hinterlüftet an der Fassade montiert werden. Die 82 mm starken Module enthalten ein Hydrokultursystem der Firma Grodan mit Steinwolle als Pflanzsubstrat. Da keine ausreichenden Informationen über die Eigenschaften von Steinwolle als Substrat auffindbar sind, die eine Simulation in ENVI<sup>met</sup> zulassen würden, wurde im Modell das gleiche Substrat

wie in den Fassadengebundenen Pflanzkästen angenommen. Da auch solche Grünfassadensysteme existieren erscheint die Abweichung legitim. Auch hier wird ein LAI von 4,0 angenommen.

### 3.3.6. Szenario 6 Baum

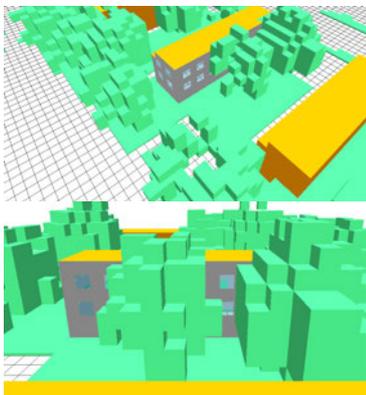


Abb. 19 – Szenario 6, Screenshot aus Spaces

Statt einer Fassadenbegrünung ist bei diesem Szenario ein zusätzlicher großer Baum vor der Fassade vorgesehen. Unter den richtigen Bedingungen können Bäume ein weitaus höheres Grünvolumen erzielen als die meisten Fassadenbegrünungen, benötigen jedoch – wiederum artabhängig – viele Jahrzehnte, bis die entsprechenden Abmessungen erreicht werden. Nichtsdestotrotz erscheint die direkte Gegenüberstellung interessant. Gewählt wird hierfür eine Kiefer (*Picea abies*) vor der Westfassade, da sich bereits einige Kiefern im Quartier befinden,

die mit dem Bau der Wohnhäuser Wohnhäusern gepflanzt worden sein dürften und die seither teilweise erhebliche Größen erreicht haben.

<sup>99</sup> „Green Wall Specification and Drawings“.

	<b>Vegetationsstärke [m] und Art</b>	<b>Substratstärke [m] und -material</b>	<b>Hinterlüftung [m]</b>
Szenario 3 Bodengebundene Fassadenbegrünung	0,40 <i>Hedera helix</i>	–	–
Szenario 4 Fassadengebundene Tröge	0,40 <i>Hedera helix</i>	0,30 „Sandy Loam“	0,15
Szenario 5 Vertikalsystem	0,40 <i>Hedera helix</i>	0,06 „Sandy Loam“ 0,01 „Aluminium“	0,08

Tabelle 4 – Eigenschaften der Fassadenbegrünungen für Mikroklimasimulation

### 3.3.7. Gedankliche Drehung des Areals

Weitere interessante Einsichten verspricht eine Untersuchung, die zeigt wie sich die Fassadenbegrünung auswirkt, wenn das Areal in andere Himmelsrichtungen orientiert wäre. Dazu werden zusätzlich zur Westorientierung, mit der alle Szenarien berechnet werden, das Szenario 3 „Bodengebundene Fassadenbegrünung“ und das Szenario 2 „Referenz Bestandsvegetation“ mit um 90°, 180° und 270° gedrehter Nordrichtung simuliert.

Die alternative Simulation von Räumen mit anderer Ausrichtung im Untersuchungsgebäude wurde verworfen, auch wenn sich mit ihr weitere Aussagen über den konkreten Fall hätten treffen lassen können. Die höhere Vergleichbarkeit der Fälle durch die abstrakte Drehung des gesamten Areals verspricht besser zu demonstrieren, wie die Fassadenbegrünung unter sonst gleichen Umständen in verschiedenen Himmelsrichtungen auf das Innenraumklima einwirkt. Darüber hinaus existieren in den Gebäuden im Untersuchungsgebiet an den kurzen Enden an Nord- und Südseite nur Eckräume mit zwei Fassaden (vgl Abb. 8 auf S. 28), Räume mit einer einzelnen Außenwand gibt es dagegen nur entlang der langen Seiten mit Ost- und Westausrichtung.

## 4. Ergebnisse der Simulation

### 4.1. Beschreibung Simulationsergebnisse

#### 4.1.1. Begrünungsszenarien

Die folgenden Tabellen zeigen die Auswertung der Extremwerte der Begrünungsszenarien und der rotierten Szenarien. Die wärmsten Werte werden stets um 15.00 h oder 16.00 h erreicht, die größte Abkühlung entweder um 3.00 h oder 4.00 h morgens, oder bereits um 23.00 h. Die Übertemperaturgradstunden beziehen sich auf den einzelnen Tag. Die zulässige höchste Innenraumtemperatur für diese wird mit 25 °C angesetzt, was der Lage des Untersuchungsgebietes in einem „Sommerkühlen Gebiet“ der Klimaregion A nach DIN 4108-2 entspricht.<sup>100</sup>

Im Anhang finden sich Tabellen mit den Simulationsergebnissen ebenso wie die Zwischenergebnisse aus ENVImet, die für die Gebäudesimulation herangezogen wurden.

	Tagesmittelwerte [°C] der	
	operativen Temperatur	Innenraumlufttemperatur
Szenario 1 Referenz Keine Begrünung	29,25	28,40
Szenario 2 Referenz Bestandsvegetation	29,27	28,44
Szenario 3 Bodengebundene Fassadenbegrünung	28,83	28,03
Szenario 4 Fassadengebundene Tröge	29,12	28,30
Szenario 5 Vertikalsystem	28,71	27,93
Szenario 6 Baum	29,21	28,39

Tabelle 5 –Simulationsergebnisse Tagesmittelwerte der Begrünungsszenarien

<sup>100</sup> Sencoglas Holding GmbH, „EnergyGuide“.

	Maximum	Minimum	Uhrzeit Max.	Uhrzeit Min.	Übertemperatur- gradstunden: [Kh/d]
<b>Szenario 1 Referenz Keine Begrünung</b>					
operat. Temp. [°C]	32,40	26,38	15.00 h	3.00 h	101,97
Lufttemperatur [°C]	32,73	24,02	15.00 h	23.00 h	
PMV [-]	+2,38	+0,03	15.00 h	3.00 h	
PPD [%]	90,57	5,02	15.00 h	3.00 h	
<b>Szenario 2 Referenz Bestandsvegetation</b>					
operat. Temp. [°C]	32,09	26,51	15.00 h	3.00 h	102,41
Lufttemperatur [°C]	32,45	24,14	14.00 h	3.00 h	
PMV [-]	+2,14	+0,07	14.00 h	4.00 h	
PPD [%]	82,83	5,10	14.00 h	4.00 h	
<b>Szenario 3 Bodengebundene Fassadenbegrünung</b>					
operat. Temp. [°C]	31,12	26,25	15.00 h	23.00 h	91,88
Lufttemperatur [°C]	31,54	23,94	14.00 h	3.00 h	
PMV [-]	+1,81	-0,04	14.00 h	23.00 h	
PPD [%]	67,73	5,00	14.00 h	4.00 h	
<b>Szenario 4 Fassadengebundene Tröge</b>					
operat. Temp. [°C]	31,82	26,42	15.00 h	3.00 h	98,90
Lufttemperatur [°C]	32,19	24,01	14.00 h	3.00 h	
PMV [-]	+2,01	+0,04	14.00 h	3.00 h	
PPD [%]	77,37	5,04	14.00 h	3.00 h	
<b>Szenario 5 Vertikalsystem</b>					
operat. Temp. [°C]	30,83	26,12	14.00 h	23.00 h	89,08
Lufttemperatur [°C]	31,27	23,86	14.00 h	23.00 h	
PMV [-]	+1,71	-0,09	14.00 h	23.00 h	
PPD [%]	62,17	5,00	14.00 h	4.00 h	
<b>Szenario 6 Baum</b>					
operat. Temp. [°C]	31,94	26,46	15.00 h	3.00 h	100,95
Lufttemperatur [°C]	32,34	24,06	14.00 h	3.00 h	
PMV [-]	+2,06	+0,06	14.00 h	3.00 h	
PPD [%]	79,50	5,07	14.00 h	3.00 h	

Tabelle 6 – Simulationsergebnisse Extrema der Begrünungsszenarien

In allen Begrünungsszenarien gleichen sich die Tagesverläufe der Innenraumlufttemperatur und der operativen Temperatur des abgebildeten Raumes in ihrer grundsätzlichen Form. In den Nacht- und Morgenstunden bis 7.00 h (d. h. zum Beginn der 8. Stunde, wie in den Grafiken dargestellt) sind die Temperaturverläufe bis auf 0,2 °C einheitlich. Der tiefste Punkt im Tagesgang in allen Szenarien liegt in der Nacht bei rund 26,5 °C zwischen 3.00 h und 4.00 h für die operative Temperatur und bei etwa 24 °C für die Lufttemperatur im Raum. Bis 7.00 h steigen beide Temperaturen in allen Szenarien auf Werte zwischen über 29 °C und unter 30 °C. Im Zeitraum von 7.00 h bis 17.00 h zeigen die Graphen der Ergebnisse der verschiedenen Szenarien unterschiedlich starke Steigungen. Der Anstieg verläuft in diesem Zeitabschnitt langsamer als vor 7.00 h. Die Spitzenwerte der operativen Temperatur ebenso wie der Innenraumlufttemperatur werden je nach Szenario um 14.00 h oder 15.00 h erreicht und liegen in einem Spektrum von rund 1,6 °C. Nach 17.00 h fallen die Temperaturen wieder. Die Unterschiede zwischen den Szenarien liegen dabei in einem Bereich von höchstens 0,6 °C.

Die Tagesgänge der Behaglichkeitskennwerte PMV und PPD folgen im Wesentlichen dem Verlauf der Temperaturen. Die Spreizung der Werteverläufe am Morgen tritt jedoch mit einer Verzögerung von ein bis zwei Stunden auf. Der Verlauf des Szenarios 1 „Referenz Keine Begrünung“ weicht hier stärker von allen anderen Szenarien ab, da es keine Bäume im Untersuchungsgebiet darstellt, während die übrigen Szenarien die Bestandsbäume mit aufnehmen.

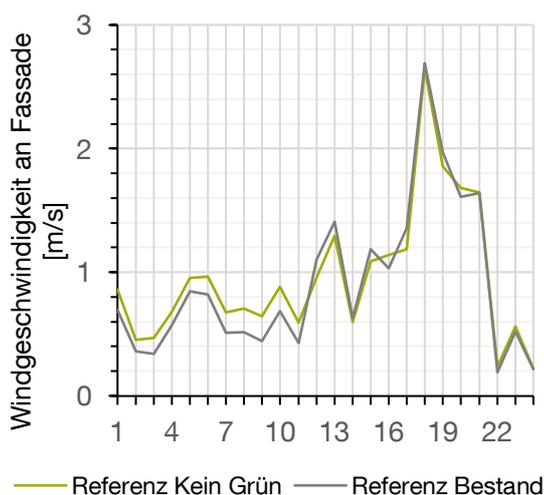


Abb. 20 – Vergleich der Windgeschwindigkeiten vor der Fassade der beiden Referenzszenarien, eig. Darstellung

Am simulierten Tag liegt beim Szenario 1 „Referenz Keine Begrünung“ die operative Höchsttemperatur gegen 15.00 h bei 32,40 °C, die Innenraumlufttemperatur erreicht 32,73 °C. Dies sind erwartungsgemäß die höchsten Innenraumtemperaturen unter den verglichenen Szenarien. Der Höchstwert des PPD liegt hier folgerichtig ebenfalls mit 90,57 % so hoch wie in keinem anderen Szenario. Die Übertemperaturgradstunden an diesem Tag liegen jedoch mit 101,97 Kh d<sup>-1</sup> knapp unter den

102,41 Kh d<sup>-1</sup> des Simulationslaufs Szenario 2 „Referenz Bestandsvegetation“. Die höheren Übertemperaturgradstunden trotz einer fast gleichen Höchsttemperatur – der Unterschied zwischen den Szenarien beträgt bei beiden Innenraumtemperaturwerten rund 0,3 °C, also 1 % – dürfte durch die leicht unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten (vgl. Abb. 20) bei den beiden Szenarien hervorgerufen werden.

Beim PMV zeigt sich ein lokales Maximum am Vormittag (vgl. Abb. 24), im Wesentlichen beim Szenario 2 „Referenz Bestandsvegetation“.

Auch die anderen Szenarien mit Begrünung zeigen an dieser Stelle eine veränderte Steigung der Kurve. Nur das Szenario 1 „Referenz Keine Begrünung“ zeigt dieses Merkmal nicht. Das Verhalten steht im Zusammenhang mit der Innenraumlufffeuchtigkeit und der Fensterlüftung, die bei einer Außentemperatur über 24 °C (siehe Abschnitt 3.2.7) unterlassen wird. Der Unterschied zwischen der relativen Luftfeuchtigkeit der beiden Referenzszenarien ist in Abb. 21 zu erkennen: beim Szenario 2 steigt die Luftfeuchtigkeit nach dem Schließen der Fenster zunächst stark an und sorgt so für die kurzzeitig gesteigerte Unbehaglichkeit, die im Anschluss wieder leicht fällt, bevor sie wieder ansteigt bis zu ihrem temperaturbedingten Höchstwert am Nachmittag. Dieser zeigt sich bei allen Szenarien in unterschiedlichem Maße, aber zu ähnlichen Zeitpunkten zwischen 14.00 h und 15.00 h.

Die niedrigste operative Höchsttemperatur hat das Szenario 5 „Vertikalsystem“, es liegt um 3,93 % unter dem Wert des Szenarios 2. Danach folgt mit 3,02 % das Szenario 3. Es folgt mit Abstand das Szenario 4 mit 0,84 % und mit der geringsten Temperaturreduktion folgt das Szenario 6 mit 0,47 %. Die Resultate für die Innenraumlufttemperatur sind ähnlich.

Die Behaglichkeitswerte zeigen signifikantere Unterschiede. Das Szenario 5 wird um 20,09 % weniger unangenehm beurteilt als das Szenario 2, das Szenario 3 immer noch um 15 %. Die Szenarien 4 und 6 erzielen nur eine um 6,07 % und 3,74 % verbesserte Bewertung. Die Werte für das PPD verhalten sich wiederum ähnlich.

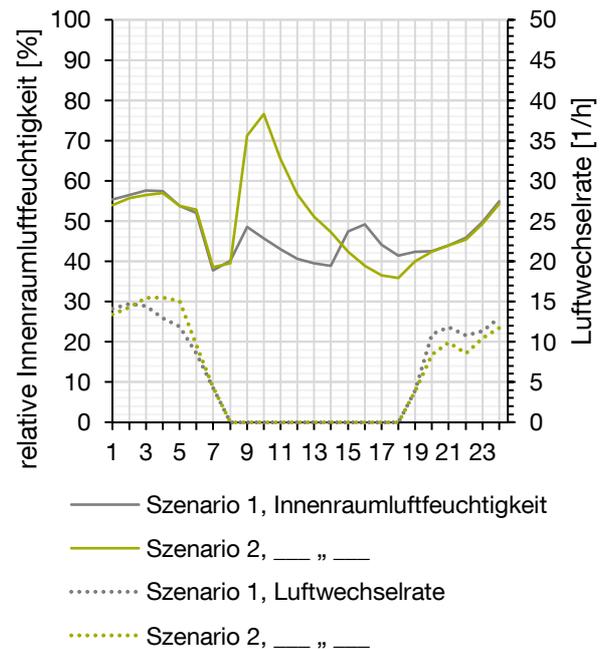


Abb. 21 – Vergleich der Luftfeuchten und Luftwechselraten der beiden Referenzszenarien, eig. Darstellung

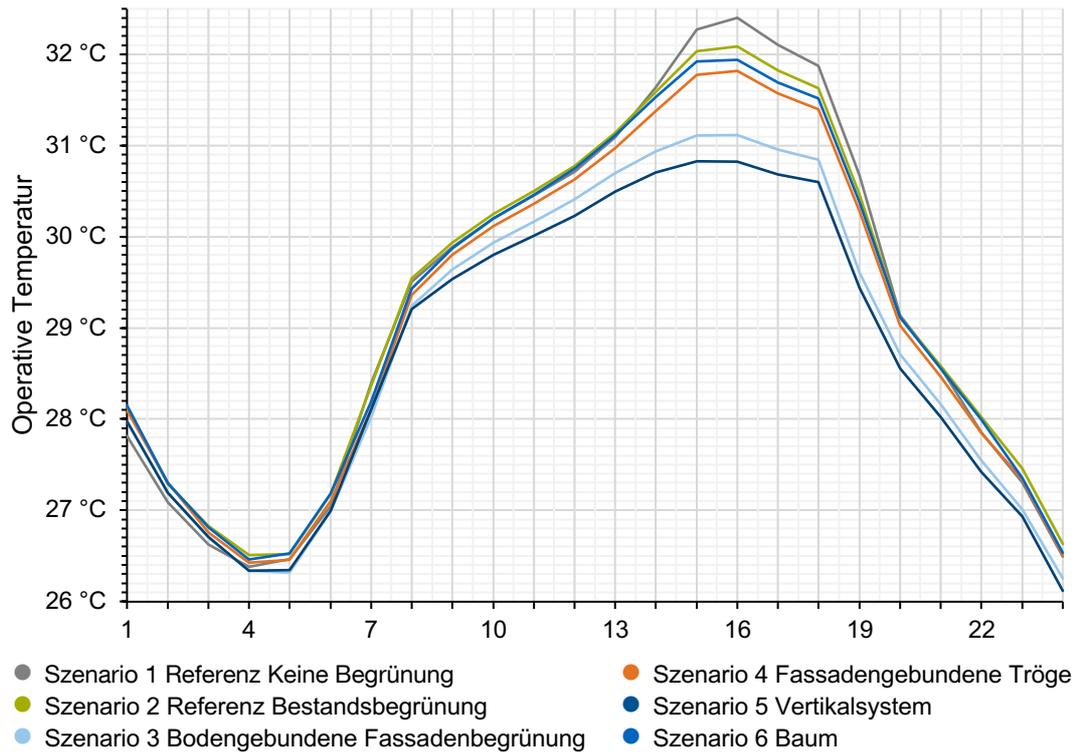


Abb. 22 – Operative Temperatur in den verschiedenen Begrünungsszenarien, eig. Darstellung

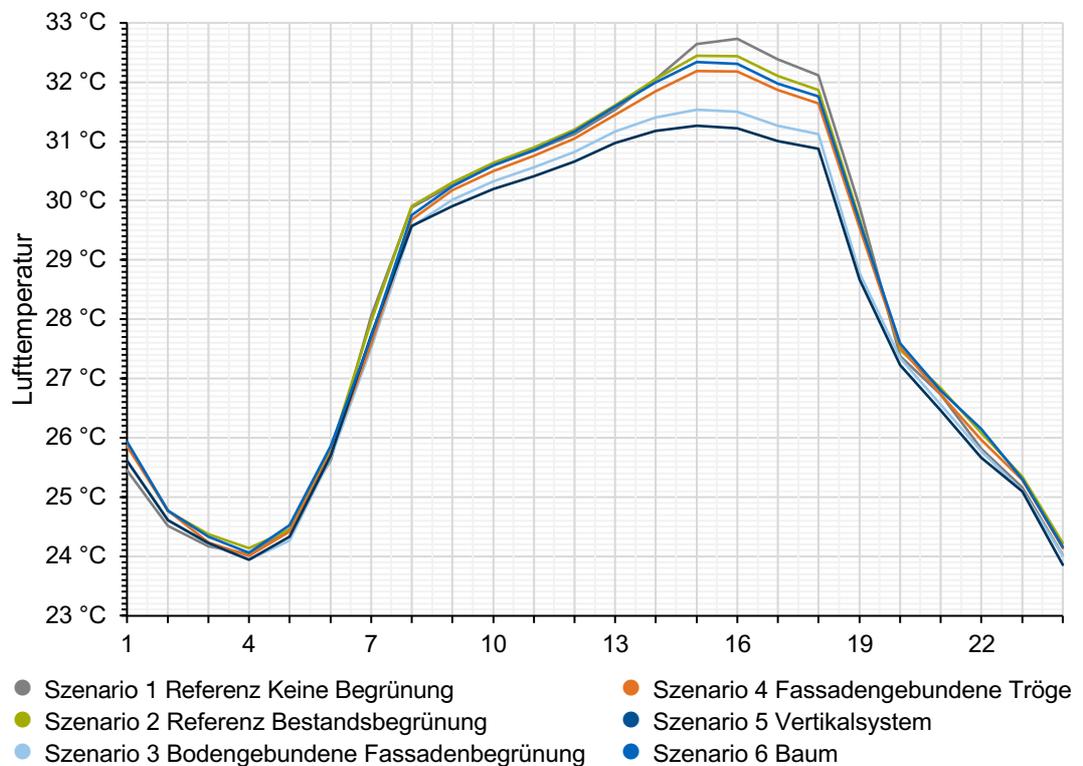


Abb. 23 – Lufttemperatur in den verschiedenen Begrünungsszenarien, eig. Darstellung

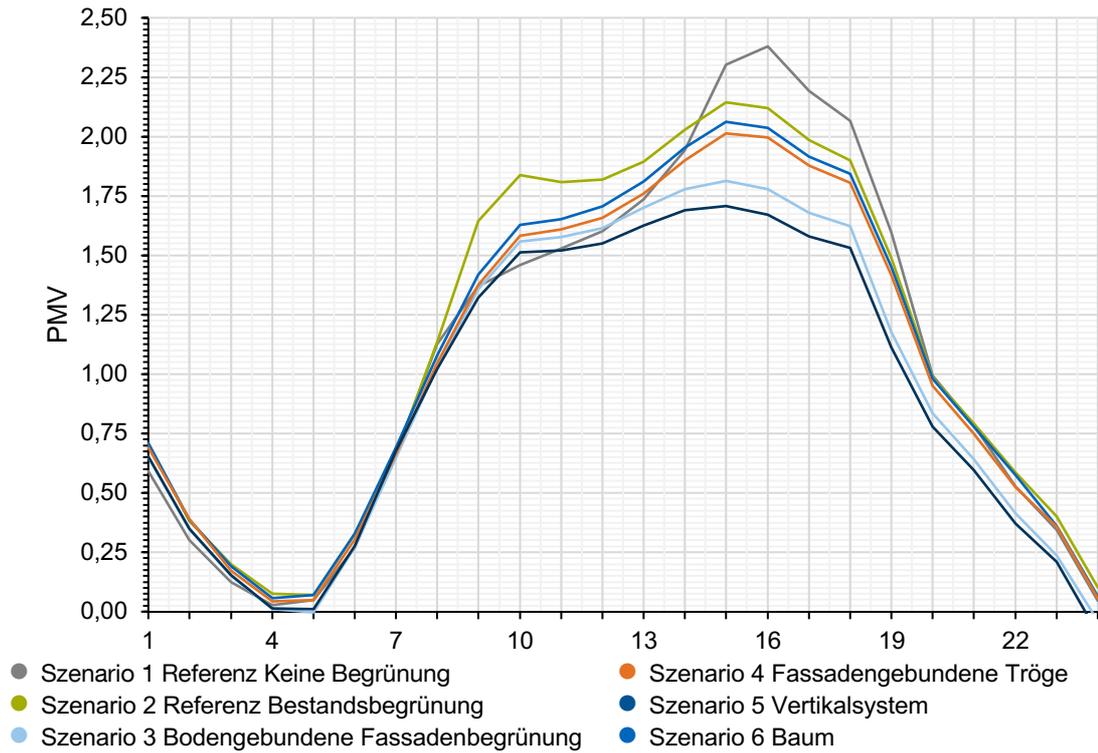


Abb. 24 – Predicted Mean Vote in den verschiedenen Begrünungsszenarien, eig. Darstellung

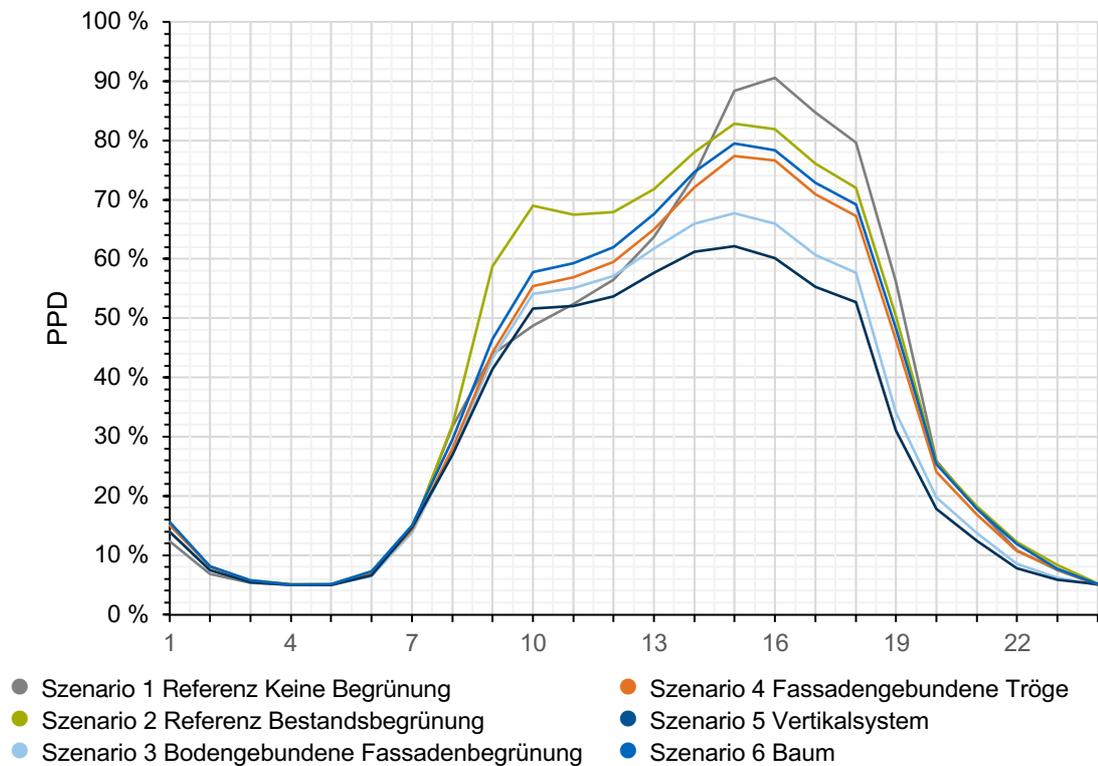


Abb. 25 – Predicted Percentage of Dissatisfied in den verschiedenen Begrünungsszenarien, eig. Darstellung

#### 4.1.2. Ausrichtungen

Die Untersuchung der Drehung der Himmelsrichtung des Quartiers resultiert in den Ergebnissen, die in den folgenden Tabellen dargestellt sind. Zur Übersicht werden die Szenarien 1 und 3 erneut aufgeführt, die die Grundlage für die gedrehten Szenarien bilden. Im Anhang ab Seite 99 befinden sich graphische Darstellungen der Temperatur- und Behaglichkeitsverläufe.

	Tagesmittelwerte [°C] der	
	operativen Temperatur	Innenraum- lufttemperatur
Szenario 2 Referenz Bestandsvegetation	29,27	28,44
Szenario 3 Bodengebundene Fassadenbegrünung	28,83	28,03
Rotation Referenz Süd	28,32	27,75
Rotation Begrünung Süd	27,96	27,42
Rotation Referenz Ost	29,04	28,34
Rotation Begrünung Ost	28,24	27,66
Rotation Referenz Nord	28,36	27,81
Rotation Begrünung Nord	28,01	27,51

Tabelle 7 – Simulationsergebnisse Tagesmittelwerte der Szenarien mit Drehung der Nordrichtung

	Maximum	Minimum	Uhrzeit Max.	Uhrzeit Min.	Übertemperatur- gradstunden: [Kh/d]
<b>Rotation Referenz Süd</b>					
operat. Temp. [°C]	30,49	25,72	14.00 h	4.00 h	
Lufttemperatur [°C]	30,94	23,95	14.00 h	3.00 h	79,65
PMV [-]	+1,48	-0,22	14.00 h	4.00 h	
PPD [%]	49,74	5,01	14.00 h	5.00 h	
<b>Rotation Begrünung Süd</b>					
operat. Temp. [°C]	29,82	25,67	14.00 h	4.00 h	
Lufttemperatur [°C]	30,27	23,85	14.00 h	3.00 h	71,05
PMV [-]	+1,30	-0,23	14.00 h	4.00 h	
PPD [%]	40,05	5,01	14.00 h	5.00 h	
<b>Rotation Referenz Ost</b>					
operat. Temp. [°C]	31,49	25,62	14.00 h	3.00 h	
Lufttemperatur [°C]	31,89	23,65	14.00 h	3.00 h	96,90
PMV [-]	+1,85	-0,27	14.00 h	4.00 h	
PPD [%]	69,56	5,00	14.00 h	23.00 h	
<b>Rotation Begrünung Ost</b>					
operat. Temp. [°C]	30,19	25,53	15.00 h	3.00 h	
Lufttemperatur [°C]	30,59	23,53	15.00 h	3.00 h	77,77
PMV [-]	+1,42	-0,29	14.00 h	3.00 h	
PPD [%]	46,61	5,03	14.00 h	5.00 h	
<b>Rotation Referenz Nord</b>					
operat. Temp. [°C]	30,35	25,87	15.00 h	3.00 h	
Lufttemperatur [°C]	30,75	24,02	15.00 h	3.00 h	80,74
PMV [-]	+1,37	-0,15	15.00 h	4.00 h	
PPD [%]	43,84	5,00	15.00 h	1.00 h	
<b>Rotation Begrünung Nord</b>					
operat. Temp. [°C]	29,77	25,79	15.00 h	3.00 h	
Lufttemperatur [°C]	30,18	23,95	15.00 h	3.00 h	72,21
PMV [-]	+1,19	-0,18	15.00 h	3.00 h	
PPD [%]	34,81	5,00	15.00 h	1.00 h	

Tabelle 8 – Simulationsergebnisse Extrema der Szenarien mit Drehung der Nordrichtung

Die Resultate spiegeln den Verlauf der Sonne wider. Die Südausrichtung zeigt einen weitgehend symmetrischen Tagesgang und erreicht die höchste Temperatur gegen 15.00 h. Obwohl sowohl die operative als auch die Innenraumlufttemperatur durch die Begrünung am heißesten Zeitpunkt nur um 0,67 K gesenkt werden kann, reduziert sich der PPD zu dieser Urzeit von 49,74 % auf 40,05 %.

Bei der Ostausrichtung treten hohe Temperaturen im Innenraum bereits am Vormittag auf, da diese Seite früher von der direkten Solarstrahlung erreicht wird. Es bildet sich ein Plateau, sowohl bei der Temperatur als auch bei der Behaglichkeit. Die Begrünung vermag in diesem Szenario dieses Temperaturplateau signifikant zu senken. Insbesondere der morgendliche Temperaturanstieg ist reduziert: um 8.00 h liegt die operative Temperatur im Szenario „Rotation Referenz Osten“ bei 30,94 °C, bei „Rotation Bodengebundene Begrünung Osten“ nur bei 29,34 °C, ein Unterschied von 1,60 K. Um 15.00 h liegt die begrünte Variante noch um 1,28 K niedriger. Die Lufttemperatur im Raum verhält sich ähnlich. In der Folge liegt auch die Unzufriedenheit in der Variante „Rotation Referenz Osten“ zwischen 8.00 h und 17.00 h mit geringen Schwankungen konstant im Bereich zwischen 65 und 70 %. Die Variante „Rotation Bodengebundene Begrünung Osten“ hingegen zeigt um 8.00 h einen PPD von 35,49 %, der im Laufe des Vormittags ansteigt auf 46,61 % um 14.00 h. Danach bleibt die Unbehaglichkeit im Wesentlichen gleich bis um 17.00 h die abendliche Abkühlung einsetzt und die Unzufriedenheit sowohl in der begrünten, als auch in der unbegrünten Variante wieder fallen.

Bei der Nordausrichtung erhält die Fassade nur morgens geringe Mengen direkter kurzwelliger Solarstrahlung, auch die reflektierte kurzwellige Strahlung ist gering. Der wesentliche Anteil des Strahlungsenergieeintrages kommt durch die langwellige Strahlung zustande. Die maximalen Temperaturen, ebenso wie die Unbehaglichkeit, sind hier dementsprechend geringer. Die Wirkung der Fassadenbegrünung zeigt sich in diesem Szenario stärker als in allen anderen Simulationsresultaten in der Nacht. Der Unterschied zur der Innenraumlufttemperatur ohne Begrünung (Rotation Referenz Norden) beträgt zum kältesten Zeitpunkt um 4.00 h fast 2 K.

## 4.2. Einordnung der Ergebnisse

### 4.2.1. Begrünungsszenarien

Die beiden Referenzszenarien 1 und 2 zeigen einen Unterschied von 0,31 K bei der maximalen operativen Temperatur auf, die Innenraumlufttemperatur liegt ohne Begrünung bei einem Spitzenwert um 0,28 K über der Lufttemperatur mit Bestandsvegetation. Das Szenario 2 „Referenz Bestandsvegetation“ führt zu 0,44 Kh d<sup>-1</sup> Übertemperaturgradstunden mehr als das Szenario 1 „Referenz Keine Begrünung“, was an der geringeren Abkühlung in der Nacht liegen dürfte. Die Ursache hierfür dürfte in den unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten liegen (siehe Tabelle 9 und 10). Insofern sind die Temperaturunterschiede und damit die Hitzeschutzwirkung der vorhandenen Vegetation gering.

Das schlechte Abschneiden des Szenario 4 „Fassadengebundene Tröge“ liegt an der gewählten Ausführung. Die geringen Aufwendungen für Installation und Unterhalt führen zwar zu geringen Kosten und Treibhausgasemissionen über den Lebenszyklus, reduzieren jedoch auch die Effektivität der Kühlwirkung. Um mit einem solchen System einen nützlichen bauphysikalischen Vorteil zu erzielen, muss eine aufwändigere Konstruktion zum Einsatz kommen, die dann einen ähnlichen baulichen Aufwand wie die Vertikalmodule erfordern würde. Für die hier vorliegende Bestandssituation wurde ein solches System bewusst nicht gewählt, um den Aufwand für den Umbau gering zu halten. Demzufolge überrascht das schlechte Abschneiden nicht, sondern bestätigt vielmehr das intuitive Verständnis der Systemzusammenhänge.

Das Szenario 6 „Baum“ überrascht hingegen mit seiner geringen Effektivität. Das hohe Grünvolumen, das der Stadtbaum vor der Fassade erzeugt, hätte eine stärkere Kühlwirkung vermuten lassen, wie dies beispielsweise bei R. von Tils zu beobachten war.<sup>101</sup> Es ist denkbar, dass andere Arten und ein geringer Abstand zum Gebäude bessere Ergebnisse erzielen würden. Ein Nachteil eines Baumes ist darüber hinaus die lange Zeit, bis er eine ausreichende Größe erreicht hat, um die Fassade hinreichend zu verschatten. Zusammengenommen lassen diese Faktoren den abgebildeten Baum nicht sinnvoll erscheinen.

---

<sup>101</sup> Tils, „Einfluss von Gebäudebegrünung auf das Innenraumklima“, 59.

Das System aus Vertikalmodulen wirkt als zweite Fassadenschale am effektivsten zur Kühlung des Gebäudes. Dies wird jedoch durch hohe Lebenszykluskosten und -emissionen erkauft. Letztere amortisieren sich nach rund 25 Jahren<sup>102</sup> (siehe auch Abschnitt 2.1.4 auf S. 17), bedürfen dabei jedoch kontinuierlicher, geschulter Pflege, damit sie das nötige Alter erreichen. Für prestigereiche Bauten sind solche Systeme nicht zuletzt ein geeignetes Vehikel, um die durchgrünte Stadt als attraktives, erstrebenswertes Konzept zu etablieren. Bei einem normalen Wohngebäude, wie dem hier untersuchten, erscheint ein solches System jedoch nicht angemessen. Es könnte – je nach Standort – durch die damit einhergehenden Kosten unter Umständen zu Mieterhöhungen und, daraus folgend, Verdrängungseffekten und Gentrifizierung beitragen.

#### 4.2.2. Ausrichtungen

Die Gegenüberstellung der verschiedenen Ausrichtungen bei sonst gleichen Bedingungen zeigt – mit und ohne Fassadenbegrünung – die üblichen Auswirkungen des Sonnenverlaufs mit frühem Temperaturanstieg am Morgen, etwas späterem Temperaturanstieg im Süden und Westen, den größten Hitzestress im Westen und das weitgehende Ausbleiben direkter Solarstrahlung im Norden. Die raumklimatische Wirkung der Fassadenbegrünung ist in allen Ausrichtungen dabei prinzipiell die gleiche und unterscheidet sich nur im Norden. Hier kommt die Verschattung durch die Vegetation nicht zum Tragen, es zeigen sich stattdessen die Effekte der Verdunstungskühlung. Die stärkere Nachtabkühlung korreliert mit der Nachtlüftung und der Reduktion der Wärmestrahlung an der Fassade, die durch die Fassadenbegrünung hervorgerufen wird. Tagsüber wird die Fensterlüftung wiederum eingestellt, sodass der Effekt hier kaum zum Tragen kommt.

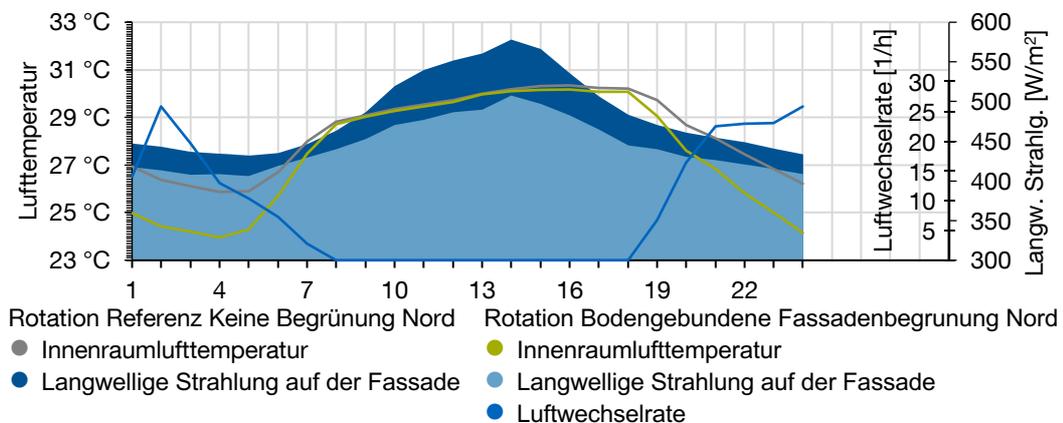


Abb. 26 – Langwellige Solarstrahlung, Innenraumlufttemperatur und Luftwechselrate in den Nordvarianten

<sup>102</sup> Pulselli u. a., „A Comprehensive Lifecycle Evaluation of Vertical Greenery Systems Based on Systemic Indicators“, 1022.

### 4.2.3. Gegenüberstellung mit Werten aus der Literatur

Im Vergleich zu den Werten aus der Literatur sind die Temperaturunterschiede zwischen den Szenarien mit und ohne Begrünung gering. Die Szenarien von R. von Tils zeigen Temperaturreduktionen von im Mittel 1,3 bis 2,3 K bei bodengebundener Fassadenbegrünung mit Efeu und 1,8 bis 4,4 K bei Szenarien mit Bäumen vor der Fassade.<sup>103</sup> Diese Simulationen wurden mit einem Wetterdatensatz aus Berlin-Tempelhof von 2003 durchgeführt.<sup>104</sup> Auch die von Pérez et al. verglichenen Werte zeigen hohe Temperatursenkungen von 5,6 °C an einem Sommertag in einem Experiment und rund 2,5 °C in einer anderen Untersuchung mit Südausrichtung. Diese Untersuchungen wurden dabei in wärmeren mediterranen Klimazonen durchgeführt.<sup>105</sup>

Die Ergebnisse dieser Arbeit liegen, gemittelt über die drei Fassadenbegrünungsszenarien, verglichen mit dem Mittelwert der beiden Referenzszenarien bei Temperatursenkungen der Innenraumlufttemperatur von nur 0,33 K bei West- und Südausrichtung. Das Szenario 3 „Bodengebundene Fassadenbegrünung“ führt gegenüber dem Szenario „Referenz Bestandsvegetation“ zu einer in der Spitze um 0,97 K geringeren operativen Temperatur, im Vergleich zum unbegrünten Referenzszenario liegt die Verringerung bei 1,28 K, die maximale Lufttemperatur liegt im Vergleich mit dem Bestandsszenario um 0,91 K niedriger, die Übertemperaturgradstunden verringern sich um 10,53 Kh d<sup>-1</sup>.

Die Ursache für diese niedrigen Ergebnisse kann verschiedene Gründe haben, da die Wirkzusammenhänge komplex sind: „Die Art der Begrünungsmaßnahme, das Potential zur Evapotranspiration, die Wasserverfügbarkeit auch bei längerer Trockenheit, ihre Größe und Lage, die Ausgangssituation hinsichtlich des Mikroklimas und seines Verlaufs und die Baukörper- und Stadtquartiereigenschaften“<sup>106</sup> nehmen großen Einfluss auf die Kühlwirkung der Fassadenbegrünung. Eine wichtige übergeordnete Einflussgröße ist der LAI, der ohne destruktive Eingriffe nur schwer präzise zu bestimmen ist<sup>107</sup>, sich aber auf die Evapotranspiration und die Verschattungswirkung stark auswirkt.<sup>108</sup>

---

<sup>103</sup> Tils, „Einfluss von Gebäudebegrünung auf das Innenraumklima“, 80.

<sup>104</sup> Ebd., 46.

<sup>105</sup> Pérez u. a., „Green Facade for Energy Savings in Buildings“, 436.

<sup>106</sup> Tils, „Einfluss von Gebäudebegrünung auf das Innenraumklima“, 79.

<sup>107</sup> Vgl. Pérez u. a., „Green Facade for Energy Savings in Buildings“, 436.

<sup>108</sup> Vgl. ebd., 429.

Vermutlich sind diese Effekte zu gering, da der hier gewählte LAI von 4,0 eher niedrig liegt. Der Vergleich zeigt eine große Spannbreite der Messwerte für typische LAIs: Die indirekten Messungen (vgl. Abschnitt 2.1.1 auf S. 14) des LAI ergeben bei Pérez et al. Werte zwischen 0,8 und 3,5 bei einer mehrere Monate alten Fassadenbegrünung<sup>109</sup>. In einer kühleren niederschlagsreicheren Klimaregion am Standort Pillnitz in Sachsen und nach einem Wachstum von zwei Jahren zeigen sich laut B. Heider an einer Efeuhecke (*Hedera helix*) Werte von 7,0 bis 8,5.<sup>110</sup>

#### **4.2.4. Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlung**

Durchgehend erscheinen die Resultate zu niedrig. Der Vergleich mit anderen ähnlichen Studien hätte eine stärkere Kühlwirkung vermuten lassen. Dies kann einerseits am gewählten LAI von 4,0 liegen, der von realen Fassadenbegrünungen häufig übertroffen wird. Andererseits stellen aber auch Studien an Vegetationen ähnlicher Belaubungsdichte deutlichere Resultate fest. Vom LAI abgesehen könnte die Ursache daher auch in den bauphysikalischen Eigenschaften der Gebäudehülle oder aber im Umstand, dass nur ein einzelner Raum abgebildet wurde, liegen. Im Rahmen dieser Arbeit konnten diese Zusammenhänge nicht untersucht werden.

Insgesamt erscheint für den hier untersuchten Anwendungsfall einer Fassadenbegrünung an einem gewöhnlichen Mehrfamilienhaus die bodengebundene Begrünung am vielversprechendsten. Die Ergebnisse stehen dem vertikalen Modulsystem nur wenig nach, die Aufwendungen sind aber ungleich geringer. Nicht nur sind die Lebenszykluskosten des bodengebundenen Begrünungssystems geringer, auch der konstruktive Aufwand und daraus folgend die Ökobilanz sind viel vorteilhafter. Darüber hinaus sollte Wert auf eine Pflanzenart gelegt werden, die bei geringem Pflegeaufwand eine hohe Laubdicke erzielt, um den LAI möglichst zu erhöhen.

### **4.3. Bewertung des gewählten Verfahrens**

#### **4.3.1. Vorzüge der gewählten Methodik**

Obwohl sich der Workflow nicht im beabsichtigten Umfang automatisieren lässt, wird die Nutzung von Grasshopper für die Kopplung der beiden Modelle als Erfolg gewertet. Die Arbeitsschritte für die Gebäudesimulation sind weitgehend ohne manuelles

---

<sup>109</sup> Ebd., 434.

<sup>110</sup> Heider, „Grüner Feinstaubfilter“.

Eingreifen möglich, einzig für die Drehung der Nordrichtung der Rotationsszenarien muss eine händische Einstellung erfolgen. Alle anderen Daten werden automatisch aus den ENVImet BPS-Ausgaben übernommen, am richtigen Tag in den Wetterdatensatz eingefügt und an das EnergyPlus-Simulationsmodul übergeben. Die Übertragung der Ergebnisse in die Tabellenkalkulation Excel erfolgt wiederum manuell, um die Anzahl der nötigen Grasshopper-Plug-Ins gering zu halten. Eine große Zahl separater Softwareinstallationen würde den Workflow weniger leicht nachvollziehbar machen.

Ebenfalls im Sinne der Nachvollziehbarkeit ist die Nutzung von Ladybug/Honeybee für die Gebäudesimulation. Eine der drei zentralen Softwarekomponenten im Ablauf ist damit kostenfrei verfügbar.

#### **4.3.2. Probleme und Limitierungen der gewählten Methodik**

Wie in Kapitel 3.2.7 dargelegt, ist die Beschränkung der Innenraumsimulation auf einen einzelnen Raum der Unmöglichkeit geschuldet, mehr als einen Wetterdatensatz in einem EnergyPlus-Modell gleichzeitig einzusetzen. Dadurch konnte kein Energiefluss durch Innenwände, Decke und Boden des simulierten Raumes dargestellt werden, was der Qualität der Ergebnisse zuträglich gewesen wäre. Hierfür müssten die Energieflüsse über einen anderen Weg als den Wetterdatensatz abgebildet werden. Um dies umzusetzen wäre zusätzlicher Aufwand erforderlich, der sich mit dem hier verfolgten Ziel, die Auswirkung von Fassadenbegrünung auf den Innenraum mit vorhandenen Softwaretools darzustellen, nicht vereinbaren ließe.

Für Gebäudesimulationsmodelle ist es üblich Simulationslaufzeiten von einem Jahr zu wählen, bei der Mikroklimasimulation in ENVImet ist hingegen die Simulation einzelner Tage üblich. In diesem Fall spielt die Gebäudehülle allerdings eine größere Rolle als es in der Mikroklimasimulation üblich ist. Die thermische Masse des Gebäudes ist daher ebenfalls von größerer Bedeutung, Einschwing- und Aufwärmvorgänge kommen hier zum Tragen. Die in diesem Modell angewendeten zusätzlichen 24 Stunden Vorlaufzeit wirken dem entgegen, sind bei Massivbauweise der fraglichen Gebäudefassade vermutlich zu wenig, um eine echte Stabilisierung der Tages- und Nachtzyklen zu erreichen.

Die Kühlwirkung der Fassadenbegrünung wird in der vorliegenden Arbeit im Vergleich zu anderen Studien deutlich geringer eingeschätzt. Es müssten weitere Untersuchungen mit diesem Modell durchgeführt werden, um abschätzen zu können, ob mit einem

höheren LAI bessere Ergebnisse zu erzielen sind oder ob wesentliche Energieflüsse unberücksichtigt bleiben.

Während bei der Kopplung der ENVI-met-Mikroklimasimulation und der EnergyPlus-Gebäudesimulation die Vorteile der Grasshopper-Skriptingumgebung deutlich zum Tragen gekommen sind, hat sich die Nutzung von Grasshopper bei der Modellerstellung und Einrichtung der ENVI-met-Simulation in Grasshopper für diesen Anwendungsfall nicht bewährt. Das 2D-Modell konnte zwar unproblematisch erstellt werden, die Erweiterung in die dritte Dimension und die Unterteilung in einzelne Szenarien erfolgte dann in ENVI-met Spaces, um den Aufwand gering zu halten. Auch die Einrichtung der Simulation bis hin zur Erstellung der SIMX-Datei erfolgte dann in den ENVI-met-eigenen Tools.

Die Werkzeuge zur Modellerstellung für ENVI-met in Grasshopper, die von A. di Nunzio bereitgestellt werden, sind für eher kleine Modellbereiche wie den vorliegenden nicht optimiert, da die Arbeitersparnis gegenüber der manuellen Modellerstellung dem Aufwand für die Erstellung des Grasshopperscripts gegenübersteht. Darüber hinaus spielt die Art der untersuchten Varianten eine Rolle: Bei Iterationen von Gebäudegeometriealternativen dürfte die Automatisierung wertvoll sein, im hier vorliegenden Fall war sie es nicht, da die Unterschiede sich nur auf die Fassadenoberfläche beschränken. Allerdings wäre es mit dem vorliegenden Skript vereinfacht möglich für andere Quartiere, für die 3D-Modelle vorliegen, die gleichen Untersuchungen durchzuführen.

#### 4.4. Abschließende Überlegungen

Bezugnehmend auf die eingangs formulierte Forschungsfrage ist festzustellen: Das beschriebene Verfahren der numerischen Simulation von Fassadenbegrünungen und ihrem Einfluss auf das Innenraumklima an heißen Tagen durch die Kopplung von Mikroklima- und Gebäudesimulation ist gangbar, wenn auch mit gewissen Schwächen.

Das intuitive Verständnis der Wirkungszusammenhänge profitiert ungeachtet der numerischen Werte ebenfalls.

Insbesondere einfache bodengebundene Fassadenbegrünungen mit üppiger Belaubung sind ein geeignetes Mittel, um dabei zu helfen, die zunehmend häufiger auftretenden Temperaturspitzen an heißen Tagen und die daraus folgende Unbehaglichkeit in den Aufenthaltsräumen von Bestandsgebäuden abzufedern.

Aufbauend auf dieser Arbeit sind weitere Untersuchungen interessant, die die thermischen Auswirkungen von Bäumen in direkter Nähe zur Fassade betrachten, um festzustellen, welche Einflussfaktoren hierbei eine Rolle spielen und ob Bäume in anderen Konstellationen nützliche Resultate erzielen können.

Die Untersuchung der vorliegenden Szenarien mit weiteren Werten für den LAI ist mit dem vorliegenden Simulationsworkflow ohne weiteres umsetzbar, sodass die Auswirkung dichteren Bewuchses auf die Effektivität der Temperaturreduktion festgestellt werden kann. Auch eine Studie des individuellen Einflusses einzelner anderer Einflussfaktoren kann einfach umgesetzt werden.

Ferner ist die Auswirkung einer längeren Aufwärmzeit auf die Qualität der Simulationsergebnisse eine genauere Untersuchung wert.

Auch wenn das gegenwärtig hohe Interesse an Fassadenbegrünungen die Erwartung erlaubt, dass Gebäudesimulationen, die mit geringem Aufwand auch die Darstellung von Fassadenbegrünungen ermöglichen, in naher Zukunft allgemein verfügbar werden, ist ein wichtiger Einflussfaktor in der Regel unbekannt: Der LAI kann als Planungswerkzeug nicht herangezogen werden. Für die Gebäudeplanung im Bestand, wie auch im Neubau, sind standardisierte Berechnungsverfahren notwendig, die ohne normierte Tabellenwerke für die Laubdichte verschiedener Pflanzenarten in verschiedenen Zuständen nicht möglich sind. Nötig wären hier Normen, die – ähnlich wie für die Gebäudenutzungsdaten bei den Raumauslegungsdaten der SIA 2024 – die letztlich unberechenbaren Prozesse an der Schnittstelle zwischen Mensch und Pflanze einerseits und dem Gebäude andererseits kalkulierbar und vergleichbar machen. Damit könnten die Fassadenbegrünungen Teil der alltäglichen haustechnischen Auslegung von Gebäuden, wie dem hier untersuchten, werden.

Mit solchen in die alltäglichen Bauplanungsprozesse integrierten Anwendungen von Vegetation am Gebäude wird es möglich dem Ziel grüner Städte nahezukommen. Oder wie es S. Mancuso in einer populärwissenschaftlichen Publikation formuliert: „In der Stadt sollte deshalb jede verfügbare Fläche mit Pflanzen bedeckt sein. Und damit meine ich nicht nur die üblichen Orte, also die (wenigen) Parks, Boulevards und Blumenbeete, sondern buchstäblich jede Oberfläche, also auch Dächer, Fassaden und Straßen. Überall dort, wo Pflanzen wachsen können, sollten auch welche wachsen.“<sup>111</sup>

---

<sup>111</sup> Mancuso, *Die Welt der Pflanzen*, 63.

## 5. Literaturverzeichnis

- Bauklimatik Dresden Software GmbH. „Bauklimatik Dresden: Software für Bauphysik und Bauklimatik“. Zugegriffen 19. März 2023. <http://www.bauklimatik-dresden.de/index.php>.
- BauNetz. „PMV | Gesund Bauen | Glossar | Baunetz\_Wissen“. Baunetz Wissen. Zugegriffen 1. März 2023. <https://www.baunetzwissen.de/glossar/p/pmv-2350493>.
- Bayerische Vermessungsverwaltung. „BayernAtlas“. bayernatlas.de. Zugegriffen 6. März 2023. <https://www.bayernatlas.de>.
- Big Ladder Software. „Elements“. Zugegriffen 18. März 2023. <https://bigladdersoftware.com/projects/elements/>.
- Biotecture. „Green Wall Specification and Drawings“. Zugegriffen 12. März 2023. <https://www.biotecture.uk.com/design-and-specify/specifications-and-compliance/specifications-and-drawings/>.
- Brook-Lawson, Joshua, und Sophie Holz. CFD Comparison Project for Wind Simulation in Landscape Architecture. DE: Wichmann Verlag, 2020. <https://doi.org/10.14627/537690033>.
- Chen Yu. „The Intervention of Plants in the Conflicts between Buildings and Climate - A Case Study in Singapore“, 2006. <https://scholarbank.nus.edu.sg/handle/10635/15511>.
- Convertino, Fabiana, Giuliano Vox, und Evelia Schettini. „Evaluation of the Cooling Effect Provided by a Green Façade as Nature-Based System for Buildings“. Building and Environment 203 (Oktober 2021): 14. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108099>.
- Das Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP. „MASEA Datenbank“. Zugegriffen 6. Februar 2023. <https://www.masea-ensan.com/>.
- Detail GmbH. „Vom Sanatorium zum Zeilenbau“. Detail, 3. April 2011. [https://www.detail.de/de/de\\_de/vom-sanatorium-zum-zeilenbau-172](https://www.detail.de/de/de_de/vom-sanatorium-zum-zeilenbau-172).
- Deutscher Wetterdienst, Hrsg. „Handbuch – Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse“, Juli 2017, 46.
- Di Nunzio, Antonello. „Programming“. Zugegriffen 22. März 2023. <https://www.antonellodinunzio.online/programming.html>.
- ENVI-met GmbH. „ENVI-met | Startseite“. ENVI-met. Zugegriffen 2. November 2022. <https://www.envi-met.com/de/>.
- — —. „ENVI-met Model Architecture“. Zugegriffen 9. April 2023. <https://envi-met.info/doku.php?id=intro:modelconcept>.

- EQUA Simulation AB. „IDA ICE - Simulation Software“. Zugegriffen 24. Februar 2022. <https://equa.se/de/ida-ice>.
- Erlwein, Sabrina, Teresa Zölch, und Stephan Pauleit. „Regulating the Microclimate with Urban Green in Densifying Cities: Joint Assessment on Two Scales“. *Building and Environment* 205 (November 2021): 108233. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108233>.
- Fachvereinigung, F. B. B. „Planungshinweise - Bundesverband GebäudeGrün e.V. BuGG“. FBB Fachvereinigung. Zugegriffen 16. Februar 2023. <https://www.gebaeudegruen.info/gruen/fassadenbegruenung/planungshinweise>.
- Förster, Yorck. „Gebäudebegrünungen international“. In *Grüne Fassaden*, 1. Auflage., 12–15. DETAIL Praxis. München: Detail Business Information GmbH, 2023.
- Fox, Matthew, Jack Morewood, Thomas Murphy, Paul Lunt, und Steve Goodhew. „Living Wall Systems for Improved Thermal Performance of Existing Buildings“. *Building and Environment* 207 (Januar 2022): 10. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108491>.
- Gartler, Jochen. *Klimagerechtes Bauen in der traditionellen iranischen Architektur Hotelanlage Beinol Haremein in Shiraz*, 2001. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:101:1-201608043527>.
- Goergens, Marta Viola. „Vertikale Begrünung in wachsenden Städten Lebenszyklusanalyse verschiedener Begrünungssysteme“, 28. Juli 2018.
- Heider, Bärbel. „Grüner Feinstaubfilter“. *idw-Informationsdienst Wissenschaft*, 21. Januar 2008. <https://idw-online.de/de/news243533>.
- Hollands, Jutta, und Azra Korjenic. „Ansätze zur ökonomischen Bewertung vertikaler Begrünungssysteme“. *Bauphysik* 41, Nr. 1 (Februar 2019): 38–54. <https://doi.org/10.1002/bapi.201800033>.
- Kühner, Elena. „Wohnraum innerhalb des verfügbaren deutschen Treibhausgasbudgets planen“. Abschlussarbeit, Technische Universität München, 2022. [https://mediatum.ub.tum.de/1401256?show\\_id=1693205](https://mediatum.ub.tum.de/1401256?show_id=1693205).
- Ladybug Tool LLC. „Ladybug Tools“. Zugegriffen 1. November 2021. <https://www.ladybug.tools/>.
- Mancuso, Stefano. *Die Welt der Pflanzen und wie sie Geschichte machen*. Übersetzt von Andreas Thomsen. 1. Auflage 2023. Stuttgart: Klett-Cotta, 2023.
- Moser, Astrid, Thomas Rötzer, Stephan Pauleit, und Hans Pretzsch. „ Stadtbäume: Wachstum, Funktionen und Leistungen – Risiken und Forschungsperspektiven“, 2017, 18.
- National Renewable Energy Laboratory. „EnergyPlus“. Zugegriffen 19. März 2023. <https://energyplus.net/>.

- Pérez, Gabriel, Julià Coma, Ingrid Martorell, und Luisa F. Cabeza. „Vertical Greenery Systems (VGS) for Energy Saving in Buildings: A Review“. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39 (November 2014): 139–65. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.055>.
- Pérez, Gabriel, Julià Coma, Salvador Sol, und Luisa F. Cabeza. „Green Facade for Energy Savings in Buildings: The Influence of Leaf Area Index and Facade Orientation on the Shadow Effect“. *Applied Energy* 187 (Februar 2017): 424–37. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.055>.
- Pfoser, Nicole. „Der Stellenwert der Fassadenbegrünung in Architektur und Städtebau“, 25. September 2018. <https://docplayer.org/124684475-Der-stellenwert-der-fassadenbegrueung-in-architektur-und-staedtebau.html>.
- — —. „Entwurfsaspekte boden- und wandgebundener Fassadenbegrünungen“. In *Grüne Fassaden*, 1. Auflage., 64–67. DETAIL Praxis. München: Detail Business Information GmbH, 2023.
- — —. „Fassadenbegrünung als Entwurfs- und Gestaltungsfaktor“. In *Grüne Fassaden*, 1. Auflage., 63. DETAIL Praxis. München: Detail Business Information GmbH, 2023.
- — —. „Leistungsfaktoren Gebäudeoptimierung und Umfeldverbesserung“. In *Grüne Fassaden*, 1. Auflage., 26–30. DETAIL Praxis. München: Detail Business Information GmbH, 2023.
- — —. *Vertikale Begrünung: Bauweisen und Planungsgrundlagen zur Begrünung von Wänden und Fassaden mit und ohne natürlichen Boden-/Bodenwasseranschluss*. Fachbibliothek grün. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer, 2018.
- Pulselli, R. M., F. Saladini, E. Neri, und S. Bastianoni. „A Comprehensive Lifecycle Evaluation of Vertical Greenery Systems Based on Systemic Indicators“, 1017–24. Siena, Italy, 2014. <https://doi.org/10.2495/SC140862>.
- Robert McNeel & Associates. „Eigenschaften“. [www.rhino3d.com](http://www.rhino3d.com). Zugegriffen 22. September 2022. <https://www.rhino3d.com/features/>.
- Schneider, Klaus-Jürgen, Andrej Albert, Jan Akkermann, und Joachim P. Heisel, Hrsg. *Bautabellen für Architekten: mit Entwurfshinweisen und Beispielen*. 25. Auflage. Köln: Reguvis Fachmedien, 2022.
- Schwede, Dirk, und Meiling Sheng. „Assessment of the Annual Energy Demand for Cooling of Buildings in Their Urban Context in 26 Cities in China“. *Procedia Engineering* 198 (2017): 305–12. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.087>.
- Semcoglas Holding GmbH, Hrsg. „EnergyGuide: Zulässige Übertemperaturgradstunden Gemäß DIN 4108-2:2013-02“, o. J.
- SIA, Hrsg. *Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik*. [Ausgabe 2021], 1. Auflage. SIA 2024: 2021 Bauwesen. Zürich: Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, 2021.

- Tilley, David, Serena Matt, Laura Schumann, und Patrick Kangas. „Vegetation Characteristics of Green Facades, Green Cloaks and Naturally Colonized Walls of Wooden Barns Located in the Mid-Atlantic Region of North America“. *Journal of Living Architecture* 1, Nr. 3 (2014): 1–34.  
<https://doi.org/10.46534/jliv.2014.01.03.001>.
- Tils, Robert von. „Einfluss von Gebäudebegrünung auf das Innenraumklima : Simulationen mit einem mikroskaligen Modell“. Dissertation, Hannover : Institutionelles Repositorium der Leibniz Universität Hannover, 2020.  
<https://doi.org/10.15488/9977>.
- Transsolar Energietechnik GmbH. „Trnsys18“. Zugegriffen 11. April 2023. <https://trnsys.de/trnsys18>.
- Tremeac, Brice, Pierre Bousquet, Cecile de Munck, Gregoire Pigeon, Valery Masson, Colette Marchadier, Michele Merchat, Pierre Poeuf, und Francis Meunier. „Influence of Air Conditioning Management on Heat Island in Paris Air Street Temperatures“. *Applied Energy* 95 (Juli 2012): 102–10.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.015>.
- Werner Eicke-Hennig. „Historischer Wärmeschutz: Decken und Böden“. Herausgegeben von Energieinstitut-Hessen. Zugegriffen 12. Februar 2023.  
<https://www.nei-dt.de/Downloads/Historische%20Decken%20Boeden-2017.pdf>.
- Yang, Xiaoshan, Lihua Zhao, Michael Bruse, und Qinglin Meng. „An Integrated Simulation Method for Building Energy Performance Assessment in Urban Environments“. *Energy and Buildings* 54 (November 2012): 243–51.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.042>.

## 6. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 – Fassadenbegrünung bodengebunden selbstkletternd (l.) und mit Kletterhilfe (r.), M 1:50, eigene Darstellung.....	18
Abb. 2 – Trog unter Fenster (l.) und in Raster an Fassade (r.), M 1:50, eigene Darstellung .....	19
Abb. 3 – Hochhaus "Bosco Verticale" in Mailand, N. Pfoser, <i>Grüne Fassaden</i> , 53 .....	20
Abb. 4 – Flower Tower, Paris, Pfoser, <i>Vertikale Begrünung</i> , 108 .....	20
Abb. 5 – Vertikale Fassadenbegrünung, eigene Darstellung .....	21
Abb. 6 – Flächige, wandgebundene Begrünung, Musée du Quai Branly, Paris, Pfoser, <i>Vertikale Begrünung</i> , 87 .....	21
Abb. 7 – Lageplan aus Bauakt, M 1:2000, Bauakt, Hervorhebung des Untersuchungsgebäudes durch den Autor.....	27
Abb. 8 – Grundriss Regelgeschoss, M 1:250, Bauakt .....	28
Abb. 9 – Ablauf des Workflows, eigene Darstellung .....	32
Abb. 10 – Oberfläche von „Elements“, Screenshot.....	35
Abb. 11 – Oberfläche von „IBK Climate Data Editor“, Screenshot.....	36
Abb. 12 – Grundrissausschnitt, typische Wohnung, M 1:150, Bauakt .....	38
Abb. 13 – Szenario 1, Screenshot aus Spaces.....	43
Abb. 14 – Szenario 2, Screenshot aus Spaces.....	43
Abb. 15 – Szenario 3, Screenshot aus Spaces.....	44
Abb. 16 – Selbstklimmende (li.) und gerüstkletternde (re.) Begrünung, Pérez et al., <i>Seasonal influence ...</i> , 2 .....	44
Abb. 17 – Szenario 4, Screenshot aus Spaces.....	44
Abb. 18 – Szenario 5, Screenshot aus Spaces.....	45
Abb. 19 – Szenario 6, Screenshot aus Spaces.....	45
Abb. 20 – Vergleich der Windgeschwindigkeiten vor der Fassade der beiden Referenzszenarien, eig. Darstellung .....	49
Abb. 21 – Vergleich der Luftfeuchten und Luftwechselraten der beiden Referenzszenarien, eig. Darstellung .....	50

Abb. 22 – Operative Temperatur in den verschiedenen Begrünungsszenarien, eig. Darstellung .....	51
Abb. 23 – Lufttemperatur in den verschiedenen Begrünungsszenarien, eig. Darstellung .....	51
Abb. 24 – Predicted Mean Vote in den verschiedenen Begrünungsszenarien, eig. Darstellung .....	52
Abb. 25 – Predicted Percentage of Dissatisfied in den verschiedenen Begrünungsszenarien, eig. Darstellung .....	52
Abb. 26 – Langwellige Solarstrahlung, Innenraumlufttemperatur und Luftwechselrate in den Nordvarianten.....	57
Abb. 27 – Envimet-Modell für Szenario 1, 2D Ansicht, Spaces Screenshot .....	74
Abb. 28 – Envimet-Modell für Szenario 2-5, 2D Ansicht, Spaces Screenshot.....	74
Abb. 29 – Envimet-Modell für Szenario 6, 2D Ansicht, Spaces Screenshot .....	74
Abb. 30 – Operative Temperatur, Lufttemperatur, PMV und PPD im Szenario „bodengebundene Begrünung“ und Vergleich mit Bestandssituation bei Südausrichtung, eig. Darstellung .....	99
Abb. 31 – Operative Temperatur, Lufttemperatur, PMV und PPD im Szenario „bodengebundene Begrünung“ und Vergleich mit Bestandssituation bei standardmäßiger Westausrichtung, eig. Darstellung .....	99
Abb. 32 – Operative Temperatur, Lufttemperatur, PMV und PPD im Szenario „bodengebundene Begrünung“ und Vergleich mit Bestandssituation bei Ostausrichtung, eig. Darstellung .....	100
Abb. 33 – Operative Temperatur, Lufttemperatur, PMV und PPD im Szenario „bodengebundene Begrünung“ und Vergleich mit Bestandssituation bei Nordausrichtung, eig. Darstellung.....	100

## 7. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 – thermische Eigenschaften der Baustoffe und Bauteile.....	30
Tabelle 2 – Ermittlung des Untersuchungsrahmens mit EnergyPlus .....	39
Tabelle 3 – Auszug aus SIA-Norm 2024 .....	42
Tabelle 4 – Eigenschaften der Fassadenbegrünungen für Mikroklimasimulation .....	46
Tabelle 5 – Simulationsergebnisse Tagesmittelwerte der Begrünungsszenarien.....	47
Tabelle 6 – Simulationsergebnisse Extrema der Begrünungsszenarien.....	48
Tabelle 7 – Simulationsergebnisse Tagesmittelwerte der Szenarien mit Drehung der Nordrichtung.....	53
Tabelle 8 – Simulationsergebnisse Extrema der Szenarien mit Drehung der Nordrichtung.....	54
Tabelle 9 – Auszug der ENVImet BPS Ausgabe: Szenario 1 Referenz Keine Begrünung.....	75
Tabelle 10 – Auszug der ENVImet BPS Ausgabe: Szenario 2 Referenz Bestandsvegetation.....	76
Tabelle 11 – Auszug der ENVImet BPS Ausgabe: Szenario 3 Bodengebundene Fassadenbegrünung .....	77
Tabelle 12 – Auszug der ENVImet BPS Ausgabe: Szenario 4 Fassadengebundene Tröge.....	78
Tabelle 13 – Auszug der ENVImet BPS Ausgabe: Szenario 5 Vertikalsystem.....	79
Tabelle 14 – Auszug der ENVImet BPS Ausgabe: Szenario 6 Baum.....	80
Tabelle 15 – Auszug der ENVImet BPS Ausgabe: Rotation Referenz Süden .....	81
Tabelle 16 – Auszug der ENVImet BPS Ausgabe: Rotation Referenz Osten.....	82
Tabelle 17 – Auszug der ENVImet BPS Ausgabe: Rotation Referenz Norden.....	83
Tabelle 18 – Auszug der ENVImet BPS Ausgabe: Rotation Bodengebundene Begrünung Süden .....	84
Tabelle 19 – Auszug der ENVImet BPS Ausgabe: Rotation Bodengebundene Begrünung Osten .....	85

Tabelle 20 – Auszug der ENVImet BPS Ausgabe: Rotation Bodengebundene Begrünung Norden .....	86
Tabelle 21 – Szenario 1 Referenz Keine Begrünung .....	87
Tabelle 22 – Szenario 2 Referenz Bestandsvegetation .....	88
Tabelle 23 – Szenario 3 Bodengebundene Fassadenbegrünung .....	89
Tabelle 24 – Szenario 3 Fassadengebundene Tröge .....	90
Tabelle 25 – Szenario 4 Vertikalsystem .....	91
Tabelle 26 – Szenario 5 Baum .....	92
Tabelle 27 – Rotation Referenz Süden .....	93
Tabelle 28 – Rotation Referenz Osten .....	94
Tabelle 29 – Rotation Referenz Norden .....	95
Tabelle 30 – Rotation Bodengebundene Begrünung Süden .....	96
Tabelle 31 – Rotation Bodengebundene Begrünung Osten .....	97
Tabelle 32 – Rotation Bodengebundene Begrünung Norden .....	98

## 8. Abkürzungsverzeichnis

<b>B</b>	
BPS – Building Performance Simulation .....	40
<b>C</b>	
CFD – engl. Computational Fluid Dynamics, Numerische Strömungsmechanik .....	36
CO <sub>2</sub> -äq. – CO <sub>2</sub> -Äquivalente, Treibhausgasmenge mit der gleichen Wirkung wie die entsprechende Menge Kohlenstoffdioxid .....	17
CSV – Comma Separated Values, Textdatenformat .....	40
<b>D</b>	
DWD – Deutscher Wetterdienst .....	34
<b>E</b>	
engl. Leaf Area Index, Blattflächenindex, Verhältnis aus Blattfläche zu Grundfläche..	14
EPW – EnergyPlus Wetterdaten-Dateiformat .....	34
<b>L</b>	
LAI – engl. Leaf Area Index, Blattflächenindex, Verhältnis aus Blattfläche zu Grundfläche .....	44
<b>P</b>	
PMV – Predicted Mean Vote, erwartete durchschnittliche Empfindung, Beschreibt Grad der Behaglichkeit .....	41
PPD – Predicted Percentage of Dissatisfied, durchschnittliche Unzufriedenheitsrate in Bezug auf die Behaglichkeit .....	41
<b>S</b>	
SIA – Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein .....	41
<b>T</b>	
TRJ – Testreferenzjahr.....	34
engl. TRY – Test Reference Year.....	34

## 9. Anhang

### 9.1. Grasshopperskripte

Unter dem untenstehenden Link sind die zur Anwendung gekommenen Grasshopperskripte zu finden:

- I. Aufbereitung der TRY für die Mikroklimasimulation in ENVImet.

Erforderliches Grasshopper-Plugin:

Ladybug 1.5.0

- II. Erstellen der ENVImet-INX-Datei.

Erforderliche Grasshopper-Plugins:

Bifocals (optional), Human 1.1.0, dfenvimet (Ladybug Legacy) 0.0.04

- III. Honeybee-Simulation.

Erforderliche Grasshopper-Plugins:

Bifocals (optional), Ladybug 1.5.0, Human 1.1.0

<https://syncandshare.lrz.de/getlink/fi3LBeriF8kgM1qbxmfkB5/>



## 9.2. Auszug aus ENVI-met-Datenbank

### 9.2.1. Fassadenbegrünung – Pflanze

Database-ID	0100IV
Name	Ivy (Hedera Helix)
Leaf Type	Deciduous (Laub, immergrün)
Albedo	0,20000
Emissivity (Emissivität)	0,97000
Transmittance (Durchlassgrad)	0,30000
Plant height (Höhe)	0,25000 m
Root Zone Depth (Wurzeltiefe)	0,50000 m

### 9.2.2. Fassadenbegrünung – Substrat

Database-ID	0000SL
Name	Sandy Loam
Typ of material	Natural soil
Water content at saturation	0,43500 m <sup>3</sup> (water) / m <sup>3</sup> (soil) /
Water content at field capacity	0,19500 m <sup>3</sup> (water) / m <sup>3</sup> (soil) /
Water content at wilting point	0,11400 m <sup>3</sup> (water) / m <sup>3</sup> (soil) /
Matrix potential	-0,21800 m
Hydraulic conductivity	34,10000 m/s * 10 <sup>-6</sup>
Volumetric heat capacity	1,32000 J/(m <sup>3</sup> K) * 10 <sup>-6</sup>
Clapp & Hornberger Constant	4,90000
Heat conductivity	0,00000 W/mK

### 9.3. Zusätzliche Screenshots aus Spaces



Abb. 27 – Envimet-Modell für Szenario 1, 2D Ansicht, Spaces Screenshot

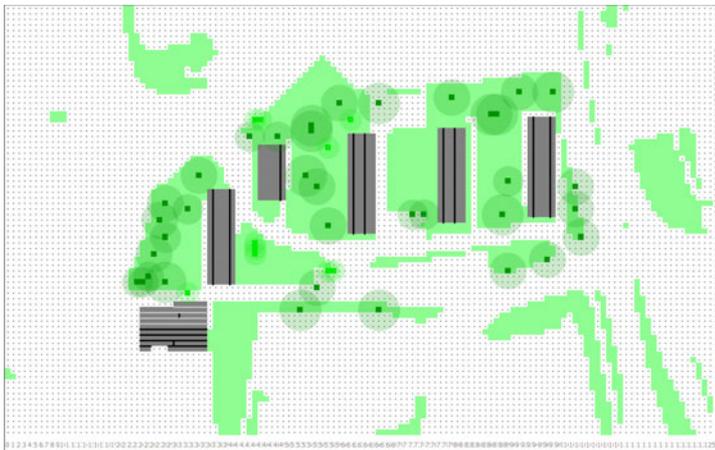


Abb. 28 – Envimet-Modell für Szenario 2-5, 2D Ansicht, Spaces Screenshot

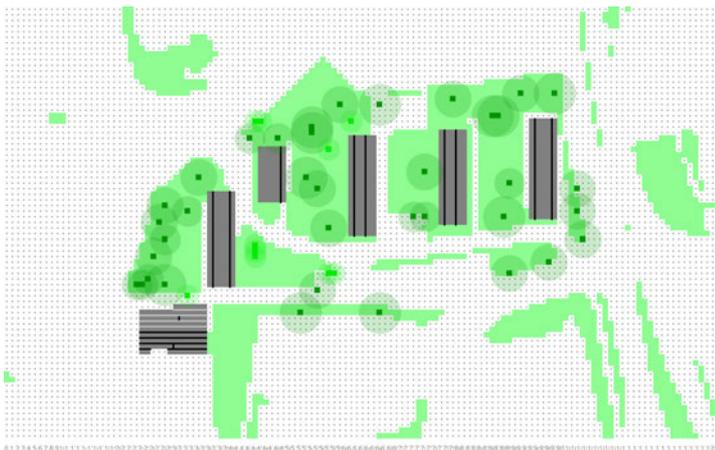


Abb. 29 – Envimet-Modell für Szenario 6, 2D Ansicht, Spaces Screenshot

## 9.4. Simulationsergebnisse Mikroklimasimulation

### 9.4.1. Szenario 1 Referenz Keine Begrünung

Lufttemperatur [°C]	relative Luftfeuchtigkeit [%]	direkte kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	diffuse kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Langwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Reflektierte kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Sky View Factor	Verschattung	Wind- geschwindigkeit [m/s]
21,74	72,99	0,00	0,00	445,93	0,00	0,47	1,00	0,86
20,89	73,86	0,00	0,00	443,66	0,00	0,47	1,00	0,45
20,41	73,51	0,00	0,00	441,42	0,00	0,47	1,00	0,47
19,32	75,75	0,00	0,00	436,05	0,00	0,47	1,00	0,68
19,33	78,40	0,00	0,00	431,02	0,00	0,47	1,00	0,95
18,94	75,82	0,00	18,65	428,08	2,44	0,47	1,00	0,97
19,77	72,27	0,00	58,55	431,23	15,35	0,47	1,00	0,67
21,91	65,79	0,00	78,20	443,08	34,38	0,47	1,00	0,71
24,90	56,52	0,00	82,38	460,50	53,80	0,47	1,00	0,64
27,46	48,94	0,00	79,33	482,39	73,19	0,47	1,00	0,88
30,91	40,23	0,00	66,78	509,49	87,07	0,47	1,00	0,60
31,03	37,18	0,00	62,06	534,86	96,40	0,47	1,00	0,96
32,40	33,93	0,00	73,90	547,12	98,14	0,47	1,00	1,29
33,76	29,29	125,26	82,10	559,50	95,00	0,47	0,03	0,60
36,08	27,19	295,08	99,78	568,36	87,88	0,47	0,03	1,09
35,51	24,14	308,56	141,87	564,56	73,39	0,47	0,02	1,14
34,21	27,48	77,82	121,21	536,57	36,42	0,47	0,00	1,18
29,27	32,90	2,86	37,28	505,83	9,55	0,47	1,00	2,65
25,64	41,19	0,00	21,70	483,68	3,69	0,47	1,00	1,86
25,26	50,97	2,46	13,79	469,19	2,71	0,47	0,71	1,68
23,09	53,55	0,92	2,03	459,21	0,77	0,47	1,00	1,64
22,55	57,05	0,00	0,00	452,00	0,00	0,47	1,00	0,24
21,43	58,85	0,00	0,00	445,53	0,00	0,47	1,00	0,56
20,88	61,74	0,00	0,00	437,36	0,00	0,47	1,00	0,22
19,95	70,34	0,00	0,00	430,40	0,00	0,47	1,00	0,32

Tabelle 9 – Auszug der ENVI-met BPS Ausgabe: Szenario 1 Referenz Keine Begrünung

#### 9.4.2. Szenario 2 Referenz Bestandsvegetation

Lufttemperatur [°C]	relative Luftfeuchtigkeit [%]	direkte kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	diffuse kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Langwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Reflektierte kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Sky View Factor	Verschattung	Wind- geschwindigkeit [m/s]
21,89	72,38	0,00	0,00	448,59	0,00	0,36	1,00	0,69
21,36	71,91	0,00	0,00	445,95	0,00	0,36	1,00	0,36
20,63	72,62	0,00	0,00	443,39	0,00	0,36	1,00	0,34
19,56	74,70	0,00	0,00	437,82	0,00	0,36	1,00	0,57
19,53	77,48	0,00	0,00	433,14	0,00	0,36	1,00	0,84
19,11	75,10	0,00	13,06	430,28	1,73	0,36	1,00	0,82
19,97	71,69	0,00	41,00	433,50	9,79	0,36	1,00	0,51
21,98	66,01	0,00	54,77	446,04	23,32	0,36	1,00	0,51
24,87	57,26	0,00	57,69	464,38	38,24	0,36	1,00	0,45
27,60	49,43	0,00	55,55	486,26	53,07	0,36	1,00	0,69
31,24	40,63	0,00	50,64	517,49	64,59	0,36	1,00	0,43
30,95	37,82	0,00	50,94	542,17	73,02	0,36	1,00	1,10
32,28	34,50	0,00	65,01	550,88	74,83	0,36	1,00	1,41
33,67	29,77	87,54	69,70	564,15	72,27	0,36	0,37	0,63
35,75	27,48	195,08	77,12	575,29	65,94	0,36	0,39	1,18
35,42	24,40	202,59	103,79	569,62	53,90	0,36	0,38	1,03
33,98	27,81	52,65	85,29	539,35	25,95	0,36	0,32	1,36
29,20	32,76	2,03	26,11	507,32	6,72	0,36	1,00	2,69
25,60	41,28	0,00	15,19	483,89	2,60	0,36	1,00	1,97
25,26	51,01	0,62	9,65	470,03	1,90	0,36	0,94	1,61
23,14	53,45	0,24	1,42	460,88	0,52	0,36	1,00	1,64
22,82	56,25	0,00	0,00	454,05	0,00	0,36	1,00	0,19
21,66	58,16	0,00	0,00	447,99	0,00	0,36	1,00	0,52
21,17	60,78	0,00	0,00	440,57	0,00	0,36	1,00	0,22
20,20	69,40	0,00	0,00	433,83	0,00	0,36	1,00	0,32

Tabelle 10 – Auszug der ENVImet BPS Ausgabe: Szenario 2 Referenz Bestandsvegetation

### 9.4.3. Szenario 3 Bodengebundene Fassadenbegrünung

Lufttemperatur [°C]	relative Luftfeuchtigkeit [%]	direkte kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	diffuse kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Langwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Reflektierte kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Sky View Factor	Verschattung	Wind- geschwindigkeit [m/s]
21,66	73,67	0,00	0,00	420,31	0,00	0,36	1,00	0,69
21,19	72,98	0,00	0,00	417,54	0,00	0,36	1,00	0,34
20,46	73,70	0,00	0,00	414,61	0,00	0,36	1,00	0,33
19,42	75,68	0,00	0,00	409,60	0,00	0,36	1,00	0,56
19,37	78,43	0,00	0,00	407,37	0,00	0,36	1,00	0,83
18,93	76,77	0,00	4,97	404,85	0,26	0,36	1,00	0,81
19,76	74,70	0,00	16,50	408,65	1,46	0,36	1,00	0,49
21,70	70,03	0,00	24,12	418,74	3,47	0,36	1,00	0,50
24,44	62,12	0,00	28,20	432,39	5,68	0,36	1,00	0,43
26,99	54,92	0,00	30,47	446,81	7,88	0,36	1,00	0,67
30,65	46,29	0,00	30,64	468,49	9,58	0,36	1,00	0,41
30,62	41,10	0,00	32,03	478,17	10,82	0,36	1,00	1,11
31,94	37,81	0,00	38,96	484,28	11,07	0,36	1,00	1,41
33,27	35,28	14,35	39,21	494,04	10,67	0,36	0,93	0,64
35,21	31,56	35,44	40,53	504,04	9,72	0,36	0,92	1,19
34,58	31,06	46,06	47,55	499,63	7,94	0,36	0,89	1,02
33,21	31,82	15,05	35,38	483,99	3,82	0,36	0,42	1,36
29,04	33,34	0,67	10,60	464,86	0,99	0,36	1,00	2,69
25,49	41,98	0,00	5,90	445,54	0,39	0,36	1,00	1,97
25,01	52,28	0,23	3,80	438,97	0,28	0,36	0,98	1,60
22,99	54,15	0,05	0,61	429,87	0,08	0,36	1,00	1,64
22,62	57,42	0,00	0,00	425,72	0,00	0,36	1,00	0,19
21,47	59,34	0,00	0,00	420,33	0,00	0,36	1,00	0,52
20,95	62,10	0,00	0,00	415,66	0,00	0,36	1,00	0,21
20,00	70,60	0,00	0,00	410,62	0,00	0,36	1,00	0,32

Tabelle 11 – Auszug der ENVI met BPS Ausgabe: Szenario 3 Bodengebundene Fassadenbegrünung

#### 9.4.4. Szenario 4 Fassadengebundene Tröge

Lufttemperatur [°C]	relative Luftfeuchtigkeit [%]	direkte kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	diffuse kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Langwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Reflektierte kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Sky View Factor	Verschattung	Wind- geschwindigkeit [m/s]
21,84	72,70	0,00	0,00	439,20	0,00	0,36	1,00	0,69
21,32	72,18	0,00	0,00	436,64	0,00	0,36	1,00	0,35
20,58	72,91	0,00	0,00	434,14	0,00	0,36	1,00	0,34
19,52	74,99	0,00	0,00	429,00	0,00	0,36	1,00	0,57
19,49	77,73	0,00	0,00	425,02	0,00	0,36	1,00	0,84
19,06	75,49	0,00	11,24	422,25	1,45	0,36	1,00	0,82
19,92	72,32	0,00	35,28	425,07	8,19	0,36	1,00	0,50
21,92	66,79	0,00	47,13	436,14	19,52	0,36	1,00	0,51
24,79	58,19	0,00	49,65	452,31	32,01	0,36	1,00	0,44
27,49	50,45	0,00	47,81	471,44	44,43	0,36	1,00	0,68
31,13	41,54	0,00	44,12	498,63	54,09	0,36	1,00	0,42
30,88	38,33	0,00	44,91	519,26	61,15	0,36	1,00	1,10
32,22	35,07	0,00	56,30	527,03	62,67	0,36	1,00	1,41
33,62	30,66	74,36	60,51	538,52	60,52	0,36	0,43	0,63
35,67	28,15	165,29	66,84	548,47	55,20	0,36	0,45	1,19
35,28	25,49	171,61	89,69	543,55	45,10	0,36	0,44	1,03
33,81	28,58	44,77	73,49	517,79	21,71	0,36	0,38	1,36
29,17	32,92	1,69	22,47	489,58	5,62	0,36	1,00	2,69
25,56	41,49	0,00	13,08	469,06	2,18	0,36	1,00	1,97
25,20	51,33	0,62	8,31	457,77	1,59	0,36	0,94	1,61
23,09	53,67	0,19	1,22	449,32	0,44	0,36	1,00	1,64
22,75	56,60	0,00	0,00	443,44	0,00	0,36	1,00	0,19
21,58	58,58	0,00	0,00	437,87	0,00	0,36	1,00	0,52
21,10	61,19	0,00	0,00	431,42	0,00	0,36	1,00	0,21
20,13	69,80	0,00	0,00	425,70	0,00	0,36	1,00	0,32

Tabelle 12 – Auszug der ENVI met BPS Ausgabe: Szenario 4 Fassadengebundene Tröge

#### 9.4.5. Szenario 5 Vertikalsystem

Lufttemperatur [°C]	relative Luftfeuchtigkeit [%]	direkte kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	diffuse kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Langwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Reflektierte kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Sky View Factor	Verschattung	Wind- geschwindigkeit [m/s]
21,68	73,82	0,00	0,00	413,72	0,00	0,36	1,00	0,69
21,21	73,16	0,00	0,00	411,88	0,00	0,36	1,00	0,34
20,47	73,91	0,00	0,00	409,96	0,00	0,36	1,00	0,33
19,43	75,94	0,00	0,00	407,47	0,00	0,36	1,00	0,56
19,39	78,54	0,00	0,00	405,04	0,00	0,36	1,00	0,83
18,94	76,93	0,00	1,96	402,98	0,26	0,36	1,00	0,81
19,79	74,81	0,00	6,15	402,03	1,46	0,36	1,00	0,49
21,74	70,03	0,00	8,21	403,13	3,47	0,36	1,00	0,50
24,50	62,07	0,00	8,65	405,93	5,68	0,36	1,00	0,43
27,05	54,78	0,00	8,33	410,09	7,88	0,36	1,00	0,67
30,74	46,01	0,00	7,01	416,58	9,58	0,36	1,00	0,41
30,67	40,98	0,00	6,48	424,00	10,82	0,36	1,00	1,11
32,01	37,57	0,00	10,66	428,62	11,07	0,36	1,00	1,41
33,43	34,50	14,35	10,22	434,07	10,67	0,36	0,93	0,64
35,39	30,89	31,32	11,37	439,96	9,72	0,36	0,94	1,19
34,78	30,21	32,21	15,44	442,54	7,94	0,36	0,94	1,02
33,19	31,84	8,53	12,73	439,38	3,82	0,36	0,93	1,36
29,03	33,65	0,34	3,91	434,69	0,99	0,36	1,00	2,69
25,45	42,25	0,00	2,28	429,90	0,38	0,36	1,00	1,97
24,95	52,75	0,11	1,45	425,94	0,28	0,36	0,99	1,60
22,95	54,55	0,01	0,21	422,84	0,08	0,36	1,00	1,64
22,55	58,06	0,00	0,00	419,76	0,00	0,36	1,00	0,19
21,38	60,09	0,00	0,00	416,90	0,00	0,36	1,00	0,52
20,87	62,84	0,00	0,00	413,75	0,00	0,36	1,00	0,21
19,93	71,25	0,00	0,00	410,74	0,00	0,36	1,00	0,32

Tabelle 13 – Auszug der ENVI met BPS Ausgabe: Szenario 5 Vertikalsystem

#### 9.4.6. Szenario 6 Baum

Lufttemperatur [°C]	relative Luftfeuchtigkeit [%]	direkte kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	diffuse kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Langwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Reflektierte kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Sky View Factor	Verschattung	Wind- geschwindigkeit [m/s]
21,91	72,33	0,00	0,00	450,93	0,00	0,34	1,00	0,69
21,38	71,84	0,00	0,00	448,21	0,00	0,34	1,00	0,36
20,65	72,56	0,00	0,00	445,57	0,00	0,34	1,00	0,34
19,58	74,64	0,00	0,00	439,94	0,00	0,34	1,00	0,57
19,53	77,44	0,00	0,00	435,31	0,00	0,34	1,00	0,84
19,12	75,07	0,00	12,00	432,46	1,67	0,34	1,00	0,81
19,98	71,64	0,00	37,68	435,84	9,40	0,34	1,00	0,50
22,00	65,96	0,00	50,33	448,79	22,48	0,34	1,00	0,51
24,90	57,22	0,00	53,02	467,55	36,92	0,34	1,00	0,44
27,61	49,41	0,00	51,06	489,67	51,27	0,34	1,00	0,68
31,28	40,56	0,00	53,70	521,89	62,61	0,34	1,00	0,43
30,98	37,76	0,00	54,30	546,69	70,97	0,34	1,00	1,10
32,29	34,47	0,00	78,06	554,87	72,84	0,34	1,00	1,40
33,65	29,80	68,90	81,57	568,32	70,35	0,34	0,51	0,62
35,74	27,56	153,56	86,35	579,83	64,06	0,34	0,53	1,18
35,41	24,44	155,98	106,18	573,83	52,25	0,34	0,52	1,03
33,97	27,81	40,00	80,29	542,70	25,08	0,34	0,32	1,36
29,20	32,77	1,54	24,05	509,97	6,48	0,34	1,00	2,67
25,60	41,28	0,00	13,96	486,08	2,51	0,34	1,00	1,97
25,27	51,00	0,37	8,90	472,19	1,83	0,34	0,96	1,57
23,14	53,44	0,24	1,31	463,14	0,50	0,34	1,00	1,65
22,84	56,19	0,00	0,00	456,31	0,00	0,34	1,00	0,19
21,68	58,12	0,00	0,00	450,29	0,00	0,34	1,00	0,51
21,20	60,71	0,00	0,00	442,98	0,00	0,34	1,00	0,21
20,21	69,35	0,00	0,00	436,24	0,00	0,34	1,00	0,32

Tabelle 14 – Auszug der ENVImet BPS Ausgabe: Szenario 6 Baum

#### 9.4.7. Rotation Referenz Süden

Lufttemperatur [°C]	relative Luftfeuchtigkeit [%]	direkte kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	diffuse kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Langwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Reflektierte kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Sky View Factor	Verschattung	Wind- geschwindigkeit [m/s]
21,97	71,65	0,00	0,00	450,03	0,00	0,36	1,00	0,29
20,24	76,81	0,00	0,00	445,60	0,00	0,36	1,00	1,05
20,39	73,25	0,00	0,00	444,58	0,00	0,36	1,00	0,27
19,82	73,38	0,00	0,00	438,68	0,00	0,36	1,00	0,21
19,29	78,53	0,00	0,00	434,15	0,00	0,36	1,00	0,80
19,14	74,92	0,00	13,06	431,03	1,73	0,36	1,00	0,53
19,65	72,87	0,00	41,98	433,95	10,70	0,36	1,00	0,61
21,53	67,43	0,00	61,72	445,82	23,12	0,36	1,00	0,50
24,59	58,41	12,72	69,26	463,67	37,58	0,36	0,67	0,36
27,03	50,36	83,72	67,75	483,21	52,29	0,36	0,60	0,69
30,42	42,19	185,85	59,20	509,62	64,16	0,36	0,48	0,88
31,76	35,31	278,78	55,61	538,12	73,04	0,36	0,37	0,46
33,30	31,45	316,25	63,75	548,77	74,79	0,36	0,31	0,58
34,27	28,41	305,74	65,42	560,30	72,44	0,36	0,28	0,62
35,71	25,23	250,89	77,04	575,34	65,74	0,36	0,25	0,58
34,41	25,17	151,97	105,89	566,39	53,62	0,36	0,22	0,98
33,39	27,80	18,98	86,28	535,66	25,82	0,36	0,12	1,27
29,61	31,24	0,17	26,16	506,82	6,72	0,36	1,00	0,51
25,05	42,36	0,00	15,19	483,53	2,60	0,36	1,00	2,55
25,74	49,25	0,00	9,65	470,60	1,90	0,36	1,00	0,53
23,58	51,88	0,00	1,42	461,17	0,52	0,36	1,00	1,04
22,87	55,82	0,00	0,00	455,04	0,00	0,36	1,00	0,10
22,27	55,82	0,00	0,00	448,76	0,00	0,36	1,00	0,36
21,12	60,82	0,00	0,00	440,54	0,00	0,36	1,00	0,56
20,03	70,13	0,00	0,00	433,17	0,00	0,36	1,00	1,02

Tabelle 15 – Auszug der ENVImet BPS Ausgabe: Rotation Referenz Süden

#### 9.4.8. Rotation Referenz Osten

Lufttemperatur [°C]	relative Luftfeuchtigkeit [%]	direkte kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	diffuse kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Langwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Reflektierte kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Sky View Factor	Verschattung	Wind- geschwindigkeit [m/s]
21,58	74,19	0,00	0,00	448,27	0,00	0,36	1,00	0,63
20,98	73,75	0,00	0,00	445,71	0,00	0,36	1,00	0,12
20,37	73,87	0,00	0,00	443,05	0,00	0,36	1,00	0,48
19,01	77,31	0,00	0,00	437,58	0,00	0,36	1,00	0,73
19,08	79,75	0,00	0,00	432,87	0,00	0,36	1,00	0,81
18,71	77,15	0,00	13,06	430,05	1,73	0,36	1,00	0,81
19,47	74,06	73,30	41,05	433,11	9,57	0,36	0,89	0,46
21,52	68,04	290,54	54,81	445,30	22,20	0,36	0,75	0,54
24,58	58,53	520,63	61,61	463,37	37,38	0,36	0,33	0,57
27,46	50,35	501,76	62,70	484,79	51,83	0,36	0,29	0,71
31,22	40,93	425,79	58,76	515,33	63,76	0,36	0,27	0,32
31,17	35,81	261,33	57,89	542,65	72,42	0,36	0,23	1,04
32,26	32,42	78,05	70,22	551,37	74,44	0,36	0,19	1,42
33,29	29,62	0,00	64,16	562,27	72,11	0,36	1,00	0,96
35,63	26,35	0,00	69,69	576,24	65,97	0,36	1,00	1,12
33,69	26,56	0,00	99,21	567,92	54,06	0,36	1,00	1,08
34,03	27,03	0,00	84,43	538,44	26,11	0,36	1,00	1,25
29,68	31,93	0,00	26,10	506,99	6,73	0,36	1,00	2,55
25,44	41,26	0,00	15,19	483,64	2,60	0,36	1,00	1,29
25,70	49,68	0,00	9,65	469,95	1,91	0,36	1,00	1,06
22,94	54,93	0,00	1,42	460,50	0,53	0,36	1,00	2,31
22,56	57,88	0,00	0,00	453,74	0,00	0,36	1,00	0,66
21,25	60,15	0,00	0,00	447,75	0,00	0,36	1,00	0,93
20,76	62,73	0,00	0,00	440,47	0,00	0,36	1,00	0,60
19,93	70,83	0,00	0,00	433,80	0,00	0,36	1,00	0,75

Tabelle 16 – Auszug der ENVI met BPS Ausgabe: Rotation Referenz Osten

#### 9.4.9. Rotation Referenz Norden

Lufttemperatur [°C]	relative Luftfeuchtigkeit [%]	direkte kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	diffuse kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Langwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Reflektierte kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Sky View Factor	Verschattung	Wind- geschwindigkeit [m/s]
21,76	72,73	0,00	0,00	449,95	0,00	0,36	1,00	0,54
21,10	72,68	0,00	0,00	447,40	0,00	0,36	1,00	0,42
20,02	75,42	0,00	0,00	443,58	0,00	0,36	1,00	0,94
18,92	77,55	0,00	0,00	437,09	0,00	0,36	1,00	0,65
19,69	76,85	0,00	0,00	434,72	0,00	0,36	1,00	0,24
19,14	75,14	0,00	13,06	432,08	1,73	0,36	1,00	0,16
19,99	72,06	121,38	42,73	435,07	9,72	0,36	0,25	0,15
22,04	66,17	82,16	64,33	446,76	22,28	0,36	0,22	0,35
24,51	58,45	0,00	72,00	463,61	37,04	0,36	1,00	0,60
27,36	50,11	0,00	61,73	486,42	51,71	0,36	1,00	0,15
30,77	41,16	0,00	50,24	519,35	63,96	0,36	1,00	0,29
31,02	36,90	0,00	47,06	540,08	72,99	0,36	1,00	1,15
32,55	32,98	0,00	55,02	552,11	75,32	0,36	1,00	1,40
32,57	31,41	0,00	57,22	560,95	73,07	0,36	1,00	1,45
36,95	23,81	0,00	69,87	578,16	66,16	0,36	1,00	0,42
34,72	25,05	0,00	101,46	566,16	54,03	0,36	1,00	0,38
33,79	27,18	0,00	85,69	535,31	26,01	0,36	1,00	1,21
30,03	30,70	0,00	26,14	506,60	6,72	0,36	1,00	1,17
25,41	41,65	0,00	15,19	483,80	2,60	0,36	1,00	2,81
26,06	48,51	0,05	9,66	470,92	1,91	0,36	0,94	0,49
23,16	53,32	0,22	1,42	461,23	0,52	0,36	1,00	0,75
22,70	56,54	0,00	0,00	454,83	0,00	0,36	1,00	0,32
21,47	58,64	0,00	0,00	448,65	0,00	0,36	1,00	0,43
20,65	62,71	0,00	0,00	440,48	0,00	0,36	1,00	0,54
19,61	71,95	0,00	0,00	433,18	0,00	0,36	1,00	0,80

Tabelle 17 – Auszug der ENVImet BPS Ausgabe: Rotation Referenz Norden

#### 9.4.10. Rotation Bodengebundene Begrünung Süden

Lufttemperatur [°C]	relative Luftfeuchtigkeit [%]	direkte kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	diffuse kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Langwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Reflektierte kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Sky View Factor	Verschattung	Wind- geschwindigkeit [m/s]
21,80	72,70	0,00	0,00	420,82	0,00	0,36	1,00	0,28
20,07	77,84	0,00	0,00	414,66	0,00	0,36	1,00	1,05
20,31	73,92	0,00	0,00	414,57	0,00	0,36	1,00	0,28
19,71	74,21	0,00	0,00	410,43	0,00	0,36	1,00	0,20
19,14	79,48	0,00	0,00	407,19	0,00	0,36	1,00	0,79
18,97	76,62	0,00	4,97	405,21	0,26	0,36	1,00	0,53
19,47	75,94	0,00	16,95	408,29	1,60	0,36	1,00	0,61
21,42	71,70	0,00	26,54	419,75	3,44	0,36	1,00	0,49
24,54	64,26	2,21	32,01	437,57	5,57	0,36	0,95	0,35
26,73	57,56	13,83	34,46	449,06	7,73	0,36	0,95	0,69
29,87	50,05	32,00	33,81	466,50	9,47	0,36	0,94	0,87
31,55	39,70	53,02	34,27	484,30	10,76	0,36	0,91	0,46
32,97	36,06	65,75	37,96	491,09	11,00	0,36	0,90	0,58
33,81	33,76	62,55	37,95	496,00	10,65	0,36	0,90	0,61
35,42	29,53	47,40	40,82	507,45	9,67	0,36	0,90	0,57
33,57	32,74	25,94	48,57	494,24	7,89	0,36	0,91	0,95
32,50	32,41	2,98	35,83	479,73	3,81	0,36	0,91	1,24
29,16	33,59	0,03	10,62	462,54	0,99	0,36	1,00	0,51
24,89	42,96	0,00	5,90	443,58	0,39	0,36	1,00	2,55
25,41	51,18	0,00	3,80	439,33	0,28	0,36	1,00	0,53
23,44	52,72	0,00	0,61	431,09	0,08	0,36	1,00	1,04
22,75	56,66	0,00	0,00	426,42	0,00	0,36	1,00	0,10
22,04	57,13	0,00	0,00	422,00	0,00	0,36	1,00	0,36
20,86	62,22	0,00	0,00	415,55	0,00	0,36	1,00	0,56
19,83	71,23	0,00	0,00	409,75	0,00	0,36	1,00	1,02

Tabelle 18 – Auszug der ENVI met BPS Ausgabe: Rotation Bodengebundene Begrünung Süden

### 9.4.11. Rotation Bodengebundene Begrünung Osten

Lufttemperatur [°C]	relative Luftfeuchtigkeit [%]	direkte kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	diffuse kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Langwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Reflektierte kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Sky View Factor	Verschattung	Wind- geschwindigkeit [m/s]
21,40	75,26	0,00	0,00	419,53	0,00	0,36	1,00	0,62
20,84	74,72	0,00	0,00	416,68	0,00	0,36	1,00	0,11
20,27	74,68	0,00	0,00	414,01	0,00	0,36	1,00	0,46
18,93	77,95	0,00	0,00	408,28	0,00	0,36	1,00	0,71
18,91	80,78	0,00	0,00	406,07	0,00	0,36	1,00	0,80
18,54	78,80	0,00	4,97	403,83	0,26	0,36	1,00	0,79
19,40	77,53	25,70	16,46	409,63	1,42	0,36	0,96	0,45
21,67	73,37	115,20	23,88	424,93	3,27	0,36	0,90	0,52
24,86	66,27	173,88	28,92	445,12	5,45	0,36	0,81	0,55
27,38	59,64	148,28	32,33	457,44	7,57	0,36	0,83	0,69
31,00	49,11	101,51	33,84	478,52	9,35	0,36	0,87	0,30
30,83	40,94	44,56	35,57	480,62	10,65	0,36	0,91	1,05
31,90	36,35	12,21	40,64	483,97	10,98	0,36	0,92	1,43
32,84	34,07	0,00	37,66	491,16	10,66	0,36	1,00	0,96
35,11	29,28	0,00	37,74	504,96	9,76	0,36	1,00	1,12
33,04	31,72	0,00	45,86	495,52	8,01	0,36	1,00	1,07
33,31	30,48	0,00	35,18	485,73	3,87	0,36	1,00	1,25
29,57	32,48	0,00	10,60	466,55	1,00	0,36	1,00	2,55
25,25	42,59	0,00	5,90	444,66	0,39	0,36	1,00	1,30
25,44	51,14	0,00	3,80	439,80	0,28	0,36	1,00	1,06
22,82	55,44	0,00	0,61	429,21	0,08	0,36	1,00	2,31
22,36	59,05	0,00	0,00	425,12	0,00	0,36	1,00	0,65
21,11	61,06	0,00	0,00	419,21	0,00	0,36	1,00	0,92
20,58	63,84	0,00	0,00	414,70	0,00	0,36	1,00	0,59
19,78	71,78	0,00	0,00	409,85	0,00	0,36	1,00	0,74

Tabelle 19 – Auszug der ENVImet BPS Ausgabe: Rotation Bodengebundene Begrünung Osten

#### 9.4.12. Rotation Bodengebundene Begrünung Norden

Lufttemperatur [°C]	relative Luftfeuchtigkeit [%]	direkte kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	diffuse kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Langwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Reflektierte kurzwellige Strahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Sky View Factor	Verschattung	Wind- geschwindigkeit [m/s]
21,55	73,95	0,00	0,00	420,62	0,00	0,36	1,00	0,54
20,95	73,67	0,00	0,00	417,77	0,00	0,36	1,00	0,42
19,90	76,19	0,00	0,00	413,36	0,00	0,36	1,00	0,93
18,83	78,25	0,00	0,00	407,83	0,00	0,36	1,00	0,64
19,52	77,93	0,00	0,00	408,20	0,00	0,36	1,00	0,25
18,99	76,74	0,00	4,97	406,01	0,26	0,36	1,00	0,15
20,14	76,22	20,12	17,23	419,19	1,42	0,36	0,92	0,14
22,29	72,23	12,44	27,50	429,48	3,28	0,36	0,93	0,34
24,59	65,91	0,00	33,64	439,63	5,48	0,36	1,00	0,59
27,25	54,81	0,00	33,10	452,57	7,65	0,36	1,00	0,14
30,39	46,02	0,00	30,42	470,34	9,47	0,36	1,00	0,29
30,71	39,76	0,00	31,10	477,23	10,81	0,36	1,00	1,15
32,26	35,25	0,00	34,40	486,27	11,15	0,36	1,00	1,39
32,28	33,84	0,00	34,74	490,19	10,82	0,36	1,00	1,45
36,53	26,56	0,00	37,82	507,66	9,80	0,36	1,00	0,43
34,07	30,68	0,00	46,39	496,87	8,00	0,36	1,00	0,38
33,07	30,78	0,00	35,61	482,75	3,85	0,36	1,00	1,21
29,68	32,42	0,00	10,61	464,97	0,99	0,36	1,00	1,17
25,31	42,04	0,00	5,90	445,01	0,39	0,36	1,00	2,81
25,75	50,33	0,00	3,80	440,19	0,28	0,36	1,00	0,49
23,04	54,24	0,01	0,61	430,15	0,08	0,36	1,00	0,75
22,57	57,43	0,00	0,00	426,15	0,00	0,36	1,00	0,32
21,34	59,59	0,00	0,00	420,45	0,00	0,36	1,00	0,43
20,51	63,67	0,00	0,00	414,71	0,00	0,36	1,00	0,53
19,48	72,83	0,00	0,00	408,90	0,00	0,36	1,00	0,80

Tabelle 20 – Auszug der ENVI met BPS Ausgabe: Rotation Bodengebundene Begrünung Norden

## 9.5. Simulationsergebnisse Gebäudesimulation

### 9.5.1. Szenario 1 Referenz Keine Begrünung

	Operative Temperatur [°C]	Lufttemperatur [°C]	PMV	PPD [%]	rel. Luftfeuchtigkeit [%]	Luftwechselrate [1/h]
1. Stunde	27,82	25,45	+0,59	12,34	55,41	14,09
2. Stunde	27,08	24,51	+0,30	6,89	56,53	14,72
3. Stunde	26,62	24,17	+0,12	5,31	57,60	14,41
4. Stunde	26,38	24,04	+0,03	5,02	57,44	12,93
5. Stunde	26,46	24,46	+0,05	5,05	53,74	11,93
6. Stunde	27,05	25,63	+0,27	6,50	51,98	8,56
7. Stunde	28,40	28,06	+0,67	14,31	37,74	4,30
8. Stunde	29,51	29,89	+1,13	31,70	40,08	0
9. Stunde	29,89	30,27	+1,37	43,88	48,57	0
10. Stunde	30,20	30,59	+1,46	48,71	45,68	0
11. Stunde	30,45	30,85	+1,53	52,42	43,06	0
12. Stunde	30,71	31,12	+1,60	56,46	40,67	0
13. Stunde	31,09	31,53	+1,74	63,66	39,58	0
14. Stunde	31,64	32,05	+1,94	74,14	38,91	0
15. Stunde	32,27	32,64	+2,30	88,38	47,38	0
16. Stunde	32,40	32,73	+2,38	90,57	49,26	0
17. Stunde	32,10	32,38	+2,19	84,68	44,16	0
18. Stunde	31,87	32,12	+2,07	79,64	41,37	0
19. Stunde	30,67	29,90	+1,60	56,16	42,39	3,97
20. Stunde	29,14	27,38	+0,99	25,90	42,52	10,98
21. Stunde	28,57	26,73	+0,79	17,99	43,91	11,85
22. Stunde	27,86	25,81	+0,53	10,81	45,88	10,77
23. Stunde	27,30	25,16	+0,34	7,46	49,84	11,39
24. Stunde	26,49	24,02	+0,05	5,05	54,84	13,00
Maximum	32,40 °C	32,73 °C	2,38	90,57 %	57,60 %	
Minimum	26,38 °C	24,02 °C	0,03	5,02 %	37,74 %	
Zeit Max.	15.00 h	15.00 h	15.00 h	15.00 h	2.00 h	
Zeit Min.	3.00 h	23.00 h	3.00 h	3.00 h	6.00 h	

Übertemperaturgradstunden: 101,97 Kh d<sup>-1</sup>

Tabelle 21 – Szenario 1 Referenz Keine Begrünung

## 9.5.2. Szenario 2 Referenz Bestandsvegetation

	Operative Temperatur [°C]	Lufttemperatur [°C]	PMV	PPD [%]	rel. Luftfeuchtigkeit [%]	Luftwechselrate [1/h]
1. Stunde	28,14	25,92	+0,71	15,52	54,02	13,42
2. Stunde	27,29	24,76	+0,38	8,04	55,74	14,26
3. Stunde	26,83	24,37	+0,20	5,83	56,46	15,47
4. Stunde	26,51	24,14	+0,08	5,12	57,02	15,50
5. Stunde	26,52	24,45	+0,07	5,10	53,73	15,06
6. Stunde	27,18	25,79	+0,33	7,25	52,86	9,60
7. Stunde	28,37	27,97	+0,66	14,22	38,55	4,38
8. Stunde	29,55	29,91	+1,13	32,05	39,54	0
9. Stunde	29,93	30,31	+1,64	58,77	71,19	0
10. Stunde	30,25	30,64	+1,84	68,98	76,59	0
11. Stunde	30,50	30,90	+1,81	67,51	65,37	0
12. Stunde	30,77	31,20	+1,82	67,94	56,68	0
13. Stunde	31,14	31,61	+1,90	71,83	51,05	0
14. Stunde	31,59	32,05	+2,03	78,03	47,21	0
15. Stunde	32,03	32,45	+2,14	82,83	42,37	0
16. Stunde	32,09	32,44	+2,12	81,87	38,87	0
17. Stunde	31,82	32,10	+1,99	76,09	36,53	0
18. Stunde	31,63	31,86	+1,90	72,05	35,85	0
19. Stunde	30,46	29,70	+1,49	50,33	40,02	3,91
20. Stunde	29,12	27,49	+0,99	25,57	42,37	8,39
21. Stunde	28,59	26,84	+0,79	18,28	43,88	9,90
22. Stunde	28,02	26,08	+0,59	12,22	45,35	8,60
23. Stunde	27,45	25,34	+0,40	8,34	49,40	10,50
24. Stunde	26,63	24,23	+0,10	5,22	54,25	11,77
Maximum	32,09 °C	32,45 °C	2,14	82,83 %	76,59 %	
Minimum	26,51 °C	24,14 °C	0,07	5,10 %	35,85 %	
Zeit Max.	15.00 h	14.00 h	14.00 h	14.00 h	9.00 h	
Zeit Min.	3.00 h	3.00 h	4.00 h	4.00 h	17.00 h	

Übertemperaturgradstunden: 102,41 Kh d<sup>-1</sup>

Tabelle 22 – Szenario 2 Referenz Bestandsvegetation

### 9.5.3. Szenario 3 Bodengebundene Fassadenbegrünung

	Operative Temperatur [°C]	Lufttemperatur [°C]	PMV	PPD [%]	rel. Luftfeuchtigkeit [%]	Luftwechselrate [1/h]
1. Stunde	27,97	25,61	+0,65	13,92	55,23	13,67
2. Stunde	27,19	24,61	+0,35	7,50	56,51	14,75
3. Stunde	26,70	24,22	+0,15	5,47	56,98	16,26
4. Stunde	26,34	23,94	+0,01	5,00	58,03	16,63
5. Stunde	26,31	24,26	-0,00	5,00	55,08	17,11
6. Stunde	26,99	25,66	+0,27	6,54	54,87	10,58
7. Stunde	28,02	27,51	+0,65	13,82	50,84	3,48
8. Stunde	29,24	29,57	+1,03	27,35	40,91	0
9. Stunde	29,64	30,01	+1,36	43,21	56,20	0
10. Stunde	29,94	30,33	+1,56	54,10	63,57	0
11. Stunde	30,17	30,56	+1,58	55,07	57,04	0
12. Stunde	30,41	30,83	+1,61	57,13	51,91	0
13. Stunde	30,70	31,17	+1,70	61,78	49,31	0
14. Stunde	30,94	31,40	+1,78	65,96	47,99	0
15. Stunde	31,11	31,54	+1,81	67,73	45,32	0
16. Stunde	31,12	31,50	+1,78	65,93	42,26	0
17. Stunde	30,95	31,27	+1,68	60,68	39,39	0
18. Stunde	30,85	31,12	+1,62	57,65	38,23	0
19. Stunde	29,61	28,77	+1,18	34,13	42,03	4,61
20. Stunde	28,71	27,35	+0,84	19,75	43,03	7,38
21. Stunde	28,16	26,56	+0,64	13,70	45,42	9,63
22. Stunde	27,55	25,78	+0,41	8,59	46,59	9,35
23. Stunde	27,01	25,11	+0,24	6,17	50,35	9,64
24. Stunde	26,25	24,01	-0,04	5,03	55,06	10,72
Maximum	31,12 °C	31,54 °C	1,81	67,73 %	63,73 %	
Minimum	26,25 °C	23,94 °C	-0,04	5,00 %	38,23 %	
Zeit Max.	15.00 h	14.00 h	14.00 h	14.00 h	9.00 h	
Zeit Min.	23.00 h	3.00 h	23.00 h	4.00 h	17.00 h	

Übertemperaturgradstunden: 91,88 Kh d<sup>-1</sup>

Tabelle 23 – Szenario 3 Bodengebundene Fassadenbegrünung

#### 9.5.4. Szenario 4 Fassadengebundene Tröge

	Operative Temperatur [°C]	Luft- temperatur [°C]	PMV	PPD [%]	rel. Luft- feuchtigkeit [%]	Luftwech- selrate [1/h]
1. Stunde	28,09	25,85	+0,69	15,06	54,29	13,15
2. Stunde	27,30	24,78	+0,39	8,15	55,78	14,07
3. Stunde	26,76	24,23	+0,17	5,61	56,92	15,95
4. Stunde	26,42	24,01	+0,04	5,04	57,60	15,48
5. Stunde	26,46	24,42	+0,05	5,05	53,98	14,40
6. Stunde	27,10	25,74	+0,30	6,91	53,38	9,60
7. Stunde	28,11	27,58	+0,66	14,27	48,95	3,66
8. Stunde	29,36	29,68	+1,04	28,02	37,90	0
9. Stunde	29,80	30,18	+1,37	44,18	52,16	0
10. Stunde	30,11	30,51	+1,58	55,44	59,45	0
11. Stunde	30,36	30,76	+1,61	56,91	53,26	0
12. Stunde	30,63	31,05	+1,66	59,48	48,26	0
13. Stunde	30,97	31,45	+1,76	65,00	45,37	0
14. Stunde	31,38	31,84	+1,90	72,07	43,56	0
15. Stunde	31,77	32,19	+2,01	77,37	40,21	0
16. Stunde	31,82	32,18	+2,00	76,64	37,56	0
17. Stunde	31,58	31,87	+1,88	70,97	35,67	0
18. Stunde	31,40	31,65	+1,80	67,27	35,30	0
19. Stunde	30,28	29,55	+1,42	46,39	39,91	4,10
20. Stunde	29,03	27,53	+0,95	24,06	42,25	7,64
21. Stunde	28,46	26,73	+0,75	16,84	44,35	9,84
22. Stunde	27,85	25,97	+0,52	10,73	45,78	8,77
23. Stunde	27,34	25,29	+0,36	7,68	49,65	9,85
24. Stunde	26,51	24,13	+0,06	5,06	54,55	11,69
Maximum	31,82 °C	32,19 °C	2,01	77,37 %	59,45 %	
Minimum	26,42 °C	24,01 °C	0,04	5,04 %	35,30 %	
Zeit Max.	15.00 h	14.00 h	14.00 h	14.00 h	9.00 h	
Zeit Min.	3.00 h	3.00 h	3.00 h	3.00 h	17.00 h	

Übertemperaturgradstunden: 98,90 Kh d<sup>-1</sup>

Tabelle 24 – Szenario 3 Fassadengebundene Tröge

### 9.5.5. Szenario 5 Vertikalsystem

	Operative Temperatur [°C]	Lufttemperatur [°C]	PMV	PPD [%]	rel. Luftfeuchtigkeit [%]	Luftwechselrate [1/h]
1. Stunde	27,97	25,61	+0,65	13,98	55,40	13,66
2. Stunde	27,19	24,62	+0,35	7,53	56,70	14,75
3. Stunde	26,70	24,22	+0,15	5,49	57,15	16,25
4. Stunde	26,34	23,95	+0,01	5,00	58,16	16,62
5. Stunde	26,34	24,33	+0,01	5,00	55,02	15,86
6. Stunde	27,00	25,70	+0,28	6,61	55,01	10,78
7. Stunde	28,11	27,73	+0,68	14,68	50,37	3,36
8. Stunde	29,21	29,57	+1,02	26,96	41,14	0
9. Stunde	29,54	29,91	+1,32	41,42	56,81	0
10. Stunde	29,80	30,20	+1,51	51,63	64,29	0
11. Stunde	30,01	30,42	+1,52	52,11	57,69	0
12. Stunde	30,23	30,66	+1,55	53,65	52,49	0
13. Stunde	30,50	30,97	+1,62	57,68	49,79	0
14. Stunde	30,70	31,17	+1,69	61,25	48,40	0
15. Stunde	30,83	31,27	+1,71	62,17	45,73	0
16. Stunde	30,83	31,22	+1,67	60,16	42,73	0
17. Stunde	30,68	31,00	+1,58	55,27	39,90	0
18. Stunde	30,60	30,88	+1,53	52,68	38,73	0
19. Stunde	29,44	28,67	+1,11	31,14	42,19	3,36
20. Stunde	28,56	27,23	+0,78	17,83	43,54	7,65
21. Stunde	28,02	26,46	+0,60	12,46	46,14	8,49
22. Stunde	27,42	25,66	+0,37	7,87	47,26	8,67
23. Stunde	26,93	25,09	+0,21	5,91	50,67	9,71
24. Stunde	26,12	23,86	-0,09	5,17	55,68	11,11
Maximum	30,83 °C	31,27 °C	1,71	62,17 %	64,29 %	
Minimum	26,12 °C	23,86 °C	-0,09	5,00 %	38,73 %	
Zeit Max.	14.00 h	14.00 h	14.00 h	14.00 h	9.00 h	
Zeit Min.	23.00 h	23.00 h	23.00 h	4.00 h	17.00 h	

Übertemperaturgradstunden: 89,08 Kh d<sup>-1</sup>

Tabelle 25 – Szenario 4 Vertikalsystem

### 9.5.6. Szenario 6 Baum

	Operative Temperatur [°C]	Lufttemperatur [°C]	PMV	PPD [%]	rel. Luftfeuchtigkeit [%]	Luftwechselrate [1/h]
1. Stunde	28,15	25,94	+0,71	15,62	53,99	13,41
2. Stunde	27,30	24,77	+0,39	8,11	55,72	14,25
3. Stunde	26,81	24,33	+0,19	5,77	56,49	15,97
4. Stunde	26,46	24,06	+0,06	5,07	57,33	15,47
5. Stunde	26,52	24,52	+0,07	5,11	53,33	14,23
6. Stunde	27,18	25,86	+0,33	7,25	52,64	9,62
7. Stunde	28,19	27,70	+0,69	15,03	48,24	3,66
8. Stunde	29,43	29,76	+1,08	29,53	38,57	0
9. Stunde	29,87	30,24	+1,42	46,46	53,50	0
10. Stunde	30,20	30,59	+1,63	57,82	60,23	0
11. Stunde	30,46	30,86	+1,65	59,27	53,63	0
12. Stunde	30,75	31,17	+1,70	62,02	48,25	0
13. Stunde	31,11	31,58	+1,81	67,61	45,04	0
14. Stunde	31,53	32,00	+1,95	74,65	43,02	0
15. Stunde	31,92	32,34	+2,06	79,50	39,53	0
16. Stunde	31,94	32,31	+2,04	78,40	36,91	0
17. Stunde	31,69	31,98	+1,92	72,82	35,12	0
18. Stunde	31,51	31,76	+1,84	69,23	34,83	0
19. Stunde	30,38	29,64	+1,45	48,29	39,57	4,11
20. Stunde	29,11	27,60	+0,98	25,37	42,01	7,63
21. Stunde	28,55	26,79	+0,78	17,83	43,88	9,81
22. Stunde	28,00	26,15	+0,58	11,95	45,15	9,37
23. Stunde	27,35	25,30	+0,36	7,70	49,48	10,00
24. Stunde	26,53	24,15	+0,06	5,09	54,47	11,90
Maximum	31,94 °C	32,34 °C	2,06	79,50 %	60,23 %	
Minimum	26,46 °C	24,06 °C	0,06	5,07 %	34,83 %	
Zeit Max.	15.00 h	14.00 h	14.00 h	14.00 h	9.00 h	
Zeit Min.	3.00 h	3.00 h	3.00 h	3.00 h	17.00 h	

Übertemperaturgradstunden: 100,95 Kh d<sup>-1</sup>

Tabelle 26 – Szenario 5 Baum

### 9.5.7. Rotation Referenz Süden

	Operative Temperatur [°C]	Lufttemperatur [°C]	PMV	PPD [%]	rel. Luftfeuchtigkeit [%]	Luftwechselrate [1/h]
1. Stunde	26,83	24,99	+0,22	6,03	56,25	14,29
2. Stunde	26,58	24,79	+0,11	5,27	54,85	13,22
3. Stunde	26,13	24,19	-0,05	5,04	57,24	12,39
4. Stunde	25,83	23,95	-0,17	5,60	57,13	11,48
5. Stunde	25,72	24,00	-0,22	6,02	55,43	9,95
6. Stunde	26,25	25,10	-0,02	5,01	53,38	7,36
7. Stunde	27,33	27,07	+0,37	7,81	47,63	3,45
8. Stunde	28,36	28,70	+0,74	16,65	44,02	0
9. Stunde	28,86	29,22	+0,93	23,39	43,16	0
10. Stunde	29,36	29,75	+1,11	30,84	41,79	0
11. Stunde	29,67	30,10	+1,21	35,61	39,95	0
12. Stunde	29,91	30,36	+1,28	39,28	38,08	0
13. Stunde	30,20	30,70	+1,39	44,79	37,40	0
14. Stunde	30,39	30,88	+1,46	48,71	36,93	0
15. Stunde	30,49	30,94	+1,48	49,74	34,93	0
16. Stunde	30,47	30,89	+1,45	48,41	33,28	0
17. Stunde	30,29	30,63	+1,37	43,85	32,27	0
18. Stunde	30,17	30,47	+1,33	41,57	32,65	0
19. Stunde	29,76	29,69	+1,20	35,29	37,03	2,50
20. Stunde	28,51	27,51	+0,75	16,88	41,38	9,06
21. Stunde	28,04	26,83	+0,58	12,08	42,80	9,90
22. Stunde	27,46	25,94	+0,37	7,90	44,59	9,77
23. Stunde	26,85	25,06	+0,17	5,62	49,57	10,06
24. Stunde	26,21	24,26	-0,07	5,11	50,77	18,21
Maximum	30,49 °C	30,94 °C	1,48	49,74 %	57,24 %	
Minimum	25,72 °C	23,95 °C	-0,22	5,01 %	32,27 %	
Zeit Max.	14.00 h	14.00 h	14.00 h	14.00 h	2.00 h	
Zeit Min.	4.00 h	3.00 h	4.00 h	5.00 h	16.00 h	

Übertemperaturgradstunden: 79,65 Kh d<sup>-1</sup>

Tabelle 27 – Rotation Referenz Süden

### 9.5.8. Rotation Referenz Osten

	Operative Temperatur [°C]	Lufttemperatur [°C]	PMV	PPD [%]	rel. Luftfeuchtigkeit [%]	Luftwechselrate [1/h]
1. Stunde	27,09	25,30	+0,32	7,13	55,65	14,34
2. Stunde	26,42	24,43	+0,06	5,07	57,19	15,59
3. Stunde	25,94	23,92	-0,13	5,34	58,74	15,33
4. Stunde	25,62	23,65	-0,25	6,35	58,89	15,34
5. Stunde	25,63	23,90	-0,27	6,54	54,83	15,38
6. Stunde	26,52	25,39	+0,07	5,09	51,26	11,37
7. Stunde	28,14	27,65	+0,68	14,86	49,58	4,77
8. Stunde	30,07	30,29	+1,40	45,29	47,18	0
9. Stunde	30,94	31,23	+1,71	62,07	45,20	0
10. Stunde	31,25	31,55	+1,81	67,29	43,02	0
11. Stunde	31,23	31,57	+1,78	66,14	40,84	0
12. Stunde	31,24	31,62	+1,77	65,42	38,72	0
13. Stunde	31,36	31,79	+1,81	67,79	38,13	0
14. Stunde	31,43	31,86	+1,85	69,48	38,32	0
15. Stunde	31,49	31,89	+1,85	69,56	36,63	0
16. Stunde	31,47	31,86	+1,82	68,18	34,82	0
17. Stunde	31,30	31,64	+1,78	66,16	36,98	0
18. Stunde	31,18	31,51	+1,76	64,68	38,26	0
19. Stunde	30,19	29,68	+1,40	45,33	41,03	5,41
20. Stunde	28,93	27,59	+0,91	22,68	42,62	11,65
21. Stunde	28,28	26,68	+0,68	14,75	44,56	13,92
22. Stunde	27,73	25,99	+0,48	9,79	45,98	13,24
23. Stunde	27,08	25,09	+0,26	6,44	50,40	14,92
24. Stunde	26,34	24,10	-0,01	5,00	54,77	17,28
Maximum	31,49 °C	31,89 °C	1,85	69,56 %	58,89 %	
Minimum	25,62 °C	23,65 °C	-0,27	5,00 %	34,82 %	
Zeit Max.	14.00 h	14.00 h	14.00 h	14.00 h	3.00 h	
Zeit Min.	3.00 h	3.00 h	4.00 h	23.00 h	15.00 h	

Übertemperaturgradstunden: 96,90 Kh d<sup>-1</sup>

Tabelle 28 – Rotation Referenz Osten

### 9.5.9. Rotation Referenz Norden

	Operative Temperatur [°C]	Lufttemperatur [°C]	PMV	PPD [%]	rel. Luftfeuchtigkeit [%]	Luftwechselrate [1/h]
1. Stunde	26,95	25,16	+0,27	6,53	56,36	14,29
2. Stunde	26,37	24,41	+0,01	5,00	53,04	21,12
3. Stunde	26,10	24,22	-0,02	5,01	60,29	17,97
4. Stunde	25,87	24,02	-0,15	5,47	56,54	11,59
5. Stunde	25,88	24,26	-0,15	5,49	55,02	10,43
6. Stunde	26,69	25,53	+0,12	5,32	50,34	7,40
7. Stunde	27,99	27,78	+0,65	13,90	51,28	3,61
8. Stunde	28,82	29,18	+0,97	24,79	48,42	0
9. Stunde	29,10	29,48	+1,05	28,48	45,80	0
10. Stunde	29,35	29,75	+0,98	25,08	30,47	0
11. Stunde	29,54	29,94	+0,97	24,72	23,36	0
12. Stunde	29,73	30,13	+1,07	29,37	26,44	0
13. Stunde	30,01	30,46	+1,22	35,98	29,40	0
14. Stunde	30,20	30,63	+1,32	41,11	31,78	0
15. Stunde	30,31	30,72	+1,36	43,38	31,81	0
16. Stunde	30,35	30,75	+1,37	43,84	31,17	0
17. Stunde	30,25	30,64	+1,32	41,54	30,60	0
18. Stunde	30,21	30,60	+1,32	41,06	31,27	0
19. Stunde	29,74	29,71	+1,18	34,35	35,89	5,20
20. Stunde	28,68	27,84	+0,81	18,80	41,01	17,99
21. Stunde	28,12	27,02	+0,61	12,69	42,81	22,57
22. Stunde	27,45	25,94	+0,37	7,79	45,15	22,69
23. Stunde	26,83	25,09	+0,17	5,58	49,49	23,64
24. Stunde	26,21	24,28	-0,05	5,05	52,95	25,97
Maximum	30,35 °C	30,75 °C	1,37	43,84 %	60,29 %	
Minimum	25,87 °C	24,02 °C	-0,15	5,00 %	23,36 %	
Zeit Max.	15.00 h	15.00 h	15.00 h	15.00 h	2.00 h	
Zeit Min.	3.00 h	3.00 h	4.00 h	1.00 h	10.00 h	

Übertemperaturgradstunden: 80,74 Kh d<sup>-1</sup>

Tabelle 29 – Rotation Referenz Norden

### 9.5.10. Rotation Bodengebundene Begrünung Süden

	Operative Temperatur [°C]	Lufttemperatur [°C]	PMV	PPD [%]	rel. Luftfeuchtigkeit [%]	Luftwechselrate [1/h]
1. Stunde	26,72	24,87	+0,18	5,69	56,63	15,03
2. Stunde	26,49	24,72	+0,08	5,14	55,88	14,66
3. Stunde	26,00	24,05	-0,10	5,20	57,95	13,30
4. Stunde	25,74	23,85	-0,20	5,87	57,82	11,58
5. Stunde	25,67	23,88	-0,23	6,14	57,31	11,34
6. Stunde	26,20	25,01	-0,02	5,01	55,64	7,84
7. Stunde	27,28	27,03	+0,38	7,94	50,78	2,26
8. Stunde	28,22	28,57	+0,72	16,04	47,58	0
9. Stunde	28,55	28,93	+0,86	20,56	47,53	0
10. Stunde	28,88	29,29	+0,98	25,27	46,73	0
11. Stunde	29,14	29,58	+1,06	28,88	45,02	0
12. Stunde	29,36	29,82	+1,13	31,93	43,31	0
13. Stunde	29,62	30,12	+1,23	36,63	42,94	0
14. Stunde	29,76	30,26	+1,29	39,67	43,09	0
15. Stunde	29,82	30,27	+1,30	40,05	41,81	0
16. Stunde	29,81	30,22	+1,27	38,55	39,64	0
17. Stunde	29,67	30,01	+1,18	34,49	37,55	0
18. Stunde	29,58	29,89	+1,14	32,46	36,86	0
19. Stunde	29,24	29,23	+1,03	27,49	39,99	2,44
20. Stunde	28,11	27,20	+0,61	12,77	42,69	7,23
21. Stunde	27,72	26,68	+0,47	9,53	43,67	8,02
22. Stunde	27,07	25,64	+0,23	6,12	46,08	9,07
23. Stunde	26,48	24,84	+0,04	5,03	50,59	10,22
24. Stunde	25,95	24,14	-0,17	5,62	51,04	19,08
Maximum	29,82 °C	30,27 °C	1,30	40,05 %	57,95 %	
Minimum	25,67 °C	23,85 °C	-0,23	5,01 %	36,86 %	
Zeit Max.	14.00 h	14.00 h	14.00 h	14.00 h	2.00 h	
Zeit Min.	4.00 h	3.00 h	4.00 h	5.00 h	17.00 h	

Übertemperaturgradstunden: 71,05 Kh d<sup>-1</sup>

Tabelle 30 – Rotation Bodengebundene Begrünung Süden

### 9.5.11. Rotation Bodengebundene Begrünung Osten

	Operative Temperatur [°C]	Lufttemperatur [°C]	PMV	PPD [%]	rel. Luftfeuchtigkeit [%]	Luftwechselrate [1/h]
1. Stunde	27,04	25,25	+0,30	6,91	56,25	14,27
2. Stunde	26,37	24,35	+0,04	5,04	57,72	16,15
3. Stunde	25,87	23,83	-0,16	5,51	59,30	15,37
4. Stunde	25,53	23,53	-0,29	6,74	59,79	15,38
5. Stunde	25,58	23,89	-0,29	6,69	55,99	16,49
6. Stunde	26,40	25,44	+0,04	5,03	54,28	12,21
7. Stunde	27,98	28,07	+0,67	14,34	53,50	3,48
8. Stunde	28,91	29,26	+1,04	27,72	52,20	0
9. Stunde	29,34	29,69	+1,21	35,49	52,25	0
10. Stunde	29,58	29,95	+1,29	39,57	51,04	0
11. Stunde	29,69	30,08	+1,30	40,20	48,20	0
12. Stunde	29,81	30,21	+1,31	41,02	45,31	0
13. Stunde	30,00	30,46	+1,38	44,45	44,10	0
14. Stunde	30,11	30,54	+1,42	46,44	43,79	0
15. Stunde	30,17	30,58	+1,42	46,61	41,96	0
16. Stunde	30,19	30,59	+1,40	45,48	39,54	0
17. Stunde	30,07	30,44	+1,41	46,01	44,18	0
18. Stunde	30,00	30,35	+1,40	45,58	45,93	0
19. Stunde	29,27	28,97	+1,09	30,11	45,13	5,39
20. Stunde	28,26	27,19	+0,67	14,42	43,50	11,26
21. Stunde	27,75	26,48	+0,48	9,90	45,20	12,89
22. Stunde	27,14	25,63	+0,26	6,44	46,48	11,62
23. Stunde	26,72	25,07	+0,13	5,34	50,98	14,59
24. Stunde	26,00	24,04	-0,13	5,35	55,26	16,30
Maximum	30,19 °C	30,59 °C	1,42	46,61 %	59,79 %	
Minimum	25,53 °C	23,53 °C	-0,29	5,03 %	39,54 %	
Zeit Max.	15.00 h	15.00 h	14.00 h	14.00 h	3.00 h	
Zeit Min.	3.00 h	3.00 h	3.00 h	5.00 h	15.00 h	

Übertemperaturgradstunden: 77,77 Kh d<sup>-1</sup>

Tabelle 31 – Rotation Bodengebundene Begrünung Osten

### 9.5.12. Rotation Bodengebundene Begrünung Norden

	Operative Temperatur [°C]	Lufttemperatur [°C]	PMV	PPD [%]	rel. Luftfeuchtigkeit [%]	Luftwechselrate [1/h]
1. Stunde	26,85	24,99	+0,24	6,15	56,78	14,10
2. Stunde	26,32	24,41	-0,01	5,00	54,40	25,85
3. Stunde	26,03	24,19	-0,04	5,04	61,44	19,58
4. Stunde	25,79	23,95	-0,18	5,67	57,71	13,03
5. Stunde	25,86	24,28	-0,15	5,44	56,94	10,44
6. Stunde	26,61	25,71	+0,11	5,27	53,33	7,32
7. Stunde	27,57	27,48	+0,52	10,68	57,75	2,78
8. Stunde	28,34	28,71	+0,84	20,01	55,82	0
9. Stunde	28,63	29,02	+0,94	23,49	52,69	0
10. Stunde	28,87	29,28	+0,84	19,76	34,62	0
11. Stunde	29,07	29,48	+0,82	19,05	25,94	0
12. Stunde	29,25	29,66	+0,92	22,92	29,01	0
13. Stunde	29,51	29,96	+1,06	28,58	32,02	0
14. Stunde	29,67	30,11	+1,15	32,88	34,80	0
15. Stunde	29,74	30,15	+1,19	34,63	35,49	0
16. Stunde	29,77	30,18	+1,19	34,81	34,76	0
17. Stunde	29,69	30,09	+1,15	32,80	33,64	0
18. Stunde	29,67	30,07	+1,14	32,39	33,72	0
19. Stunde	29,14	29,06	+0,98	25,15	38,24	6,74
20. Stunde	28,35	27,62	+0,69	14,99	41,79	16,46
21. Stunde	27,82	26,84	+0,50	10,23	43,59	22,52
22. Stunde	27,14	25,82	+0,26	6,36	45,84	22,95
23. Stunde	26,56	25,01	+0,07	5,10	50,15	23,04
24. Stunde	25,95	24,16	-0,15	5,44	53,41	25,81
Maximum	29,77 °C	30,18 °C	1,19	34,81 %	61,44 %	
Minimum	25,79 °C	23,95 °C	-0,18	5,00 %	25,94 %	
Zeit Max.	15.00 h	15.00 h	15.00 h	15.00 h	2.00 h	
Zeit Min.	3.00 h	3.00 h	3.00 h	1.00 h	10.00 h	

Übertemperaturgradstunden: 72,21 Kh d<sup>-1</sup>

Tabelle 32 – Rotation Bodengebundene Begrünung Norden

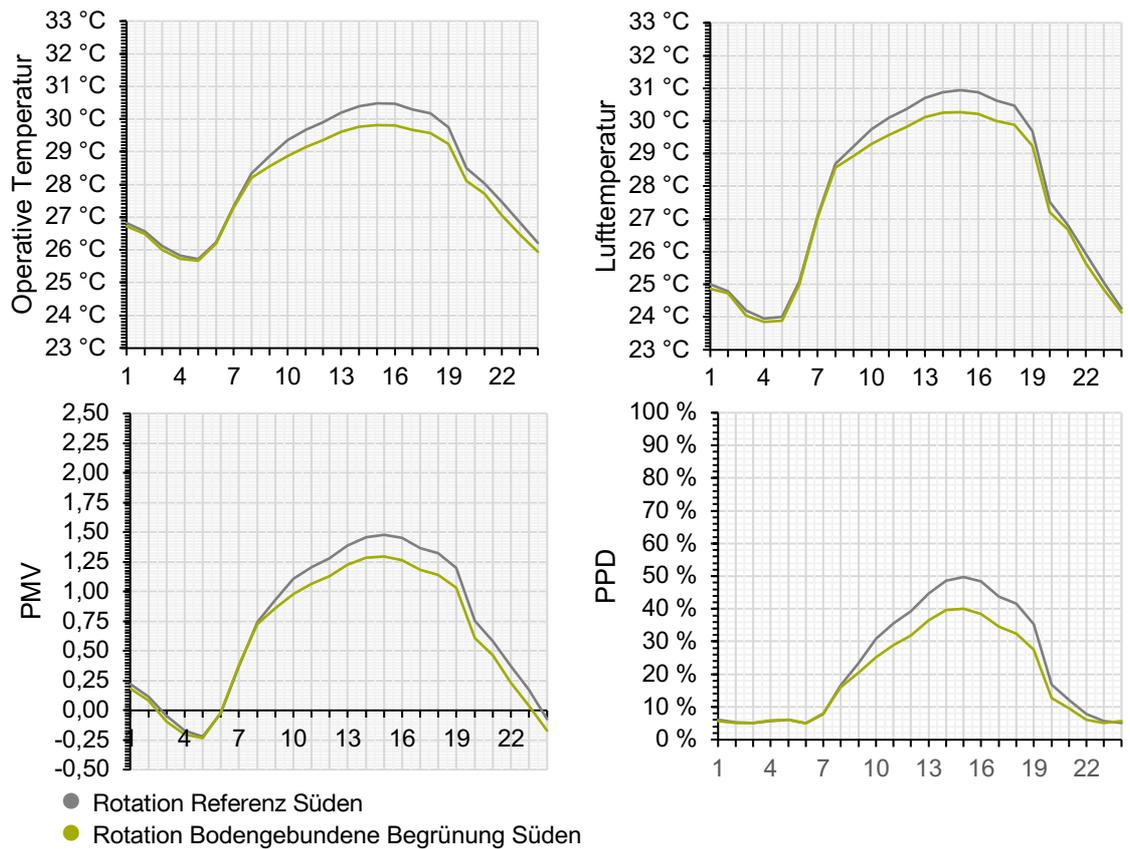


Abb. 30 – Operative Temperatur, Lufttemperatur, PMV und PPD im Szenario „bodengebundene Begrünung“ und Vergleich mit Bestandssituation bei Südausrichtung, eig. Darstellung

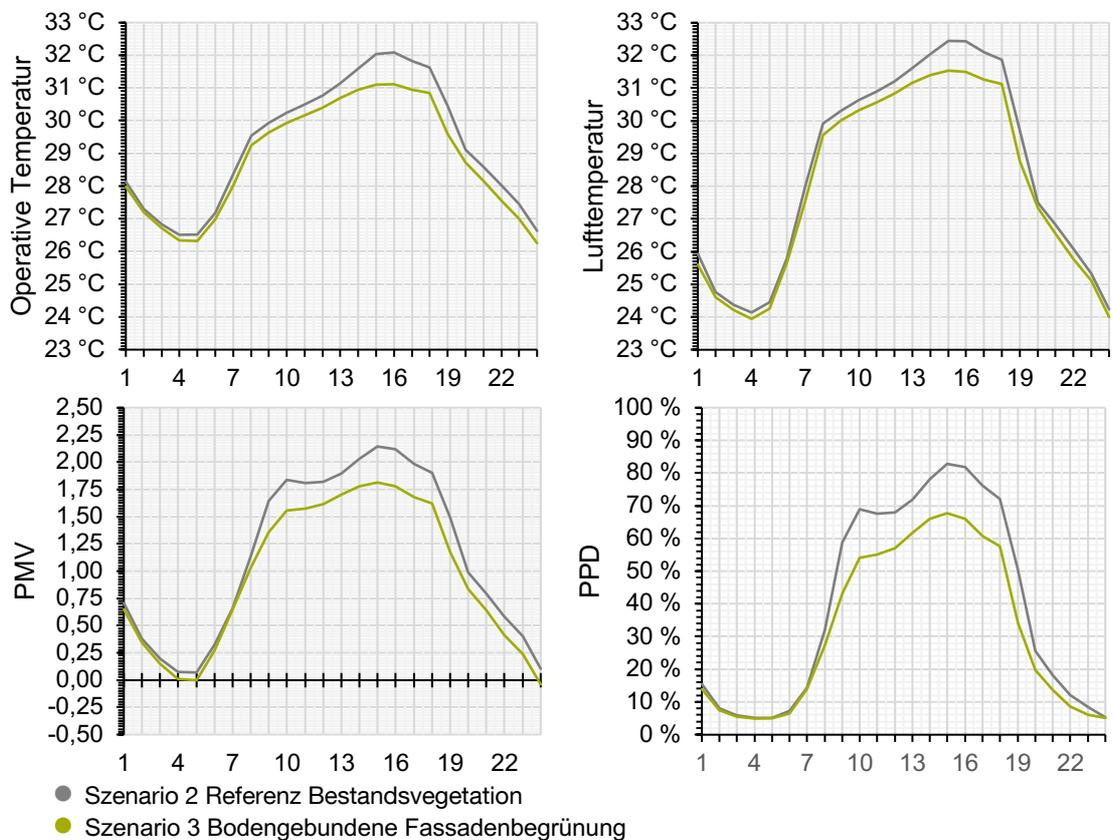


Abb. 31 – Operative Temperatur, Lufttemperatur, PMV und PPD im Szenario „bodengebundene Begrünung“ und Vergleich mit Bestandssituation bei standardmäßiger Westausrichtung, eig. Darstellung

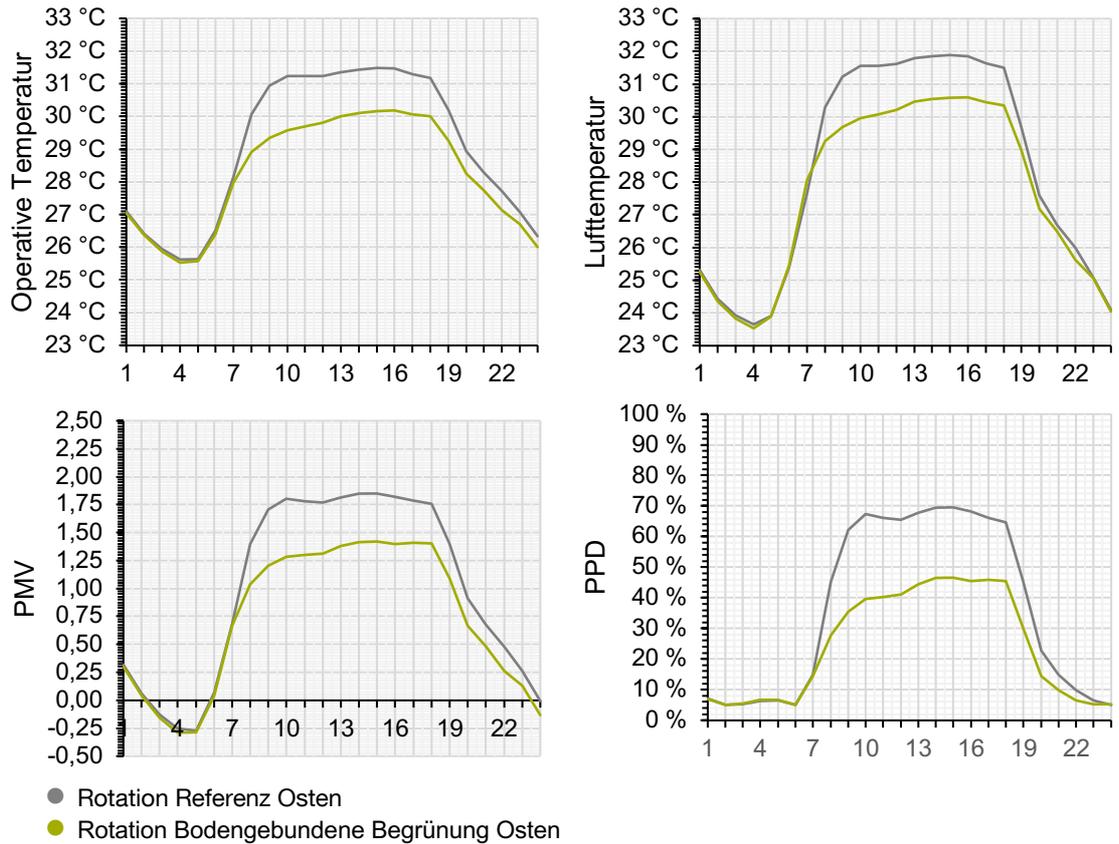


Abb. 32 – Operative Temperatur, Lufttemperatur, PMV und PPD im Szenario „bodengebundene Begrünung“ und Vergleich mit Bestandssituation bei Ostausrichtung, eig. Darstellung

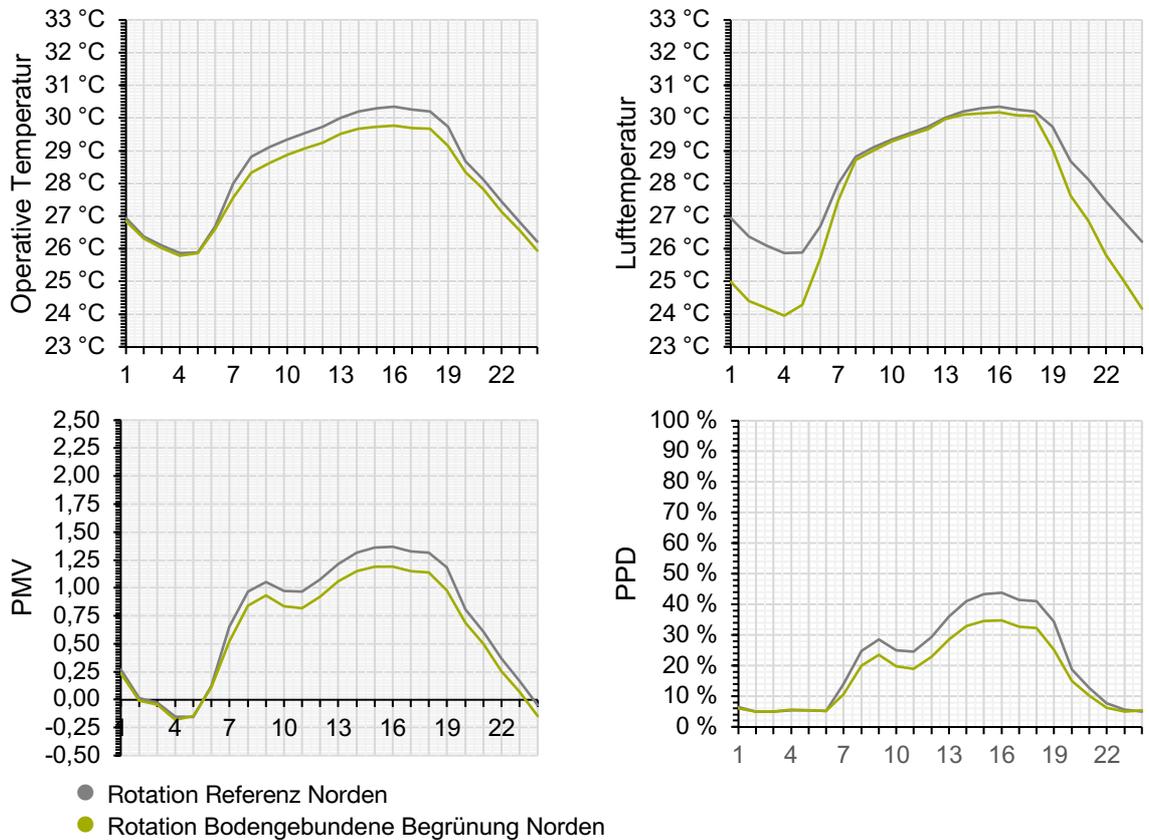


Abb. 33 – Operative Temperatur, Lufttemperatur, PMV und PPD im Szenario „bodengebundene Begrünung“ und Vergleich mit Bestandssituation bei Nordausrichtung, eig. Darstellung