

# MASTERARBEIT

Vorgelegt von Maria Hartmann

März 2022

Studiengang Architektur  
Bauhaus-Universität Weimar



# Masterarbeit

## Simulation des Einflusses von Fassadenbegrünung auf den Energiebedarf von Gebäuden

eingereicht von: Maria Hartmann, B.Sc.

geb. am: 22.07.1994 in Leinefelde

Matrikelnummer: 116377

Erstprüfung: Prof. Dr.-Ing. Conrad Völker

Zweitprüfung: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ruth

Betreuung: Dr.-Ing. Hayder Alsaad

Ausgabedatum: 14.12.2021

Abgabedatum: 22.03.2022

## Aufgabenstellung

### Hintergrund

Fassadenbegrünung im städtischen Raum wirkt sich vielfältig positiv aus. Sie verbessert das Mikroklima der näheren Umgebung, in großem Maßstab sogar einer ganzen Stadt, reduziert den Energieverbrauch der begrünten Gebäude und kann zum Regenwasserrückhalt beitragen. Unter Umständen kann sie sogar zur Grauwasserreinigung genutzt werden. Auch gestalterisch lässt sich Fassadenbegrünung einsetzen und wirkt sich nicht zuletzt positiv auf die Psyche der StadtbewohnerInnen aus.

Das Forschungsprojekt VertiKKA begann 2019 mit der Entwicklung eines prototypischen Fassadenbegrünungsmoduls. Dieses Modul kann mit Grauwasser bewässert werden, welches durch das Substrat gereinigt wird. Die Kombination mit lamellenartigen Solarpanels dient nicht nur der Energieversorgung, sondern bietet den Pflanzen Schutz vor zu starker Sonneneinstrahlung und Wind.

Dass sich solche der Fassade vorgeschalteten Begrünungsmodule verschattend und dämmend auswirken, haben sowohl Simulationen als auch die Praxis bereits gezeigt. Daher soll VertiKKA in dieser Arbeit Hauptbestandteil eines nachhaltigen Sanierungskonzeptes für ein Wohnquartier werden, welches zu Großobringen nördlich von Weimar in Thüringen gehört. Die dort befindlichen vier Wohnzeilen werden bereits im Forschungsprojekt TRAIL<sup>2</sup> mittels Thermografiekameras energetisch untersucht. TRAIL<sup>2</sup> hat es sich zum Ziel gesetzt, die Energieversorgung von Kleinstädten und Dörfern zu optimieren und Kommunen sowie PlanerInnen ein digitales Tool zur Verfügung zu stellen, das die Planung von effektiven Energieeinsparmaßnahmen unterstützt.

### Zielstellung

Im Fokus der energetischen Sanierung soll die Fassadenbegrünung durch VertiKKA stehen. Schwerpunkt dieser Arbeit bildet die Frage, welchen konkreten Effekt die VertiKKA-Module auf den Energiebedarf der zu sanierenden Wohngebäude haben. Dafür soll eines der nahezu baugleichen Gebäude beispielhaft untersucht werden. Die Betrachtung soll ganzjährig erfolgen, um den sommerlichen Wärmeschutz sowie die dämmenden Eigenschaften von VertiKKA in die Evaluierung einfließen zu lassen.

Die nachfolgenden Parameter sind dabei zu variieren und deren Auswirkungen zu bewerten:

- Himmelsorientierung der Fassaden, an denen die Module befestigt werden im Hinblick auf die Verschattung der Fassade

- Bedeckungsgrad der Fassade im Hinblick auf die Effizienz - hier soll der Frage nachgegangen werden, bis zu welchem Bedeckungsgrad das Energieeinsparpotential wesentlich steigt und das anfallende Grauwasser gleichzeitig noch zur Bewässerung aller Module ausreicht
- Flächigkeit bzw. Kleinteiligkeit der Installation einerseits im Hinblick auf die Fassadengestaltung, andererseits auf die Hinterlüftung der Module und die damit einhergehende Dämmwirkung
- Größe des Luftspalts im Hinblick auf die Hinterlüftung der Module und die Dämmwirkung

Zur Untersuchung soll die OpenSource-Software EnergyPlus verwendet werden. EnergyPlus wird von Architekten und Ingenieuren genutzt, um den Energieverbrauch von Gebäuden für Heizung, Kühlung, Lüftung, Beleuchtung und weitere Lasten zu simulieren. In EnergyPlus wie auch in ähnlicher Simulationssoftware können zwar standardmäßig Gründächer jedoch nicht Grünfassaden simuliert werden. Daher besteht die hauptsächliche Herausforderung in der detaillierten und zweckmäßigen Implementierung von VertiKKA an der Gebäudewand inklusive aller relevanten klimatischen, geometrischen und bauphysikalischen Parameter. Die geometrische Modellierung erfolgt mittels CAD-Software, welche mit EnergyPlus koppelbar ist.

Um die Effekte der Sanierungsmaßnahmen herausstellen zu können, bedarf es einerseits der Simulation des Ist-Zustandes, des Sanierungskonzeptes ohne VertiKKA und schließlich des Sanierungskonzeptes mit VertiKKA. In letzterem soll die bestmögliche Begrünungsvariante aus einer Sensitivitätsanalyse der oben genannten Parameter abgeleitet werden.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>III</b>
<b>II</b>	<b>NOMENKLATUR .....</b>	<b>V</b>
<b>1</b>	<b>EINLEITUNG.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>METHODIK.....</b>	<b>6</b>
2.1	DIE SIMULATIONSSOFTWARE ENERGYPLUS .....	7
2.2	ERSTELLUNG DES REFERENZGEBÄUDES .....	10
2.2.1	Allgemeine Gebäudebeschreibung .....	10
2.2.2	Geometrie und Konstruktion .....	12
2.2.3	Interne Wärmequellen .....	15
2.2.4	Luftwechsel.....	15
2.2.5	Heizsystem .....	16
2.2.6	Kühlsystem .....	18
2.2.7	Wetterdaten .....	20
2.2.8	Testsimulationen .....	21
2.3	SIMULATION EINER WANDGEBUNDENEN FASSADENBEGRÜNUNG.....	28
2.3.1	Grundlegende Wärmetransportmechanismen.....	28
2.3.2	Das Green-Roof-Modell in EnergyPlus.....	30
2.3.3	Vertikale Anwendung des Green-Roof-Modells.....	34
2.3.4	Aufbau der hinterlüfteten VertiKKA und Umsetzung in EnergyPlus.....	36
2.3.5	Testsimulationen – Belüftung des Luftspalts .....	39
2.3.6	Testsimulationen – Konvektiver Wärmeübergang im Luftspalt .....	46
2.4	VORGEHENSWEISE ZUR SIMULATION DER VERTIKKA .....	49
<b>3</b>	<b>ERGEBNISSE .....</b>	<b>52</b>
3.1	ORIENTIERUNG DER GRÜNFASSADE .....	54
3.2	BEDECKUNGSGRAD.....	60
3.3	VERGLEICH MIT SANIERUNGSMABNAHMEN.....	62
3.4	ZUSAMMENFASSUNG.....	65
<b>4</b>	<b>DISKUSSION .....</b>	<b>66</b>
<b>5</b>	<b>FAZIT UND AUSBLICK.....</b>	<b>70</b>
<b>A</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>73</b>
<b>B</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>82</b>

<b>C</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS.....</b>	<b>85</b>
<b>D</b>	<b>ANHANG.....</b>	<b>87</b>
<b>E</b>	<b>DANKSAGUNG .....</b>	<b>90</b>
	<b>SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG .....</b>	<b>91</b>

# I Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BEM	Building Energy Modeling / Gebäudeenergie-Modellierung
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DIN EN ISO	Deutsches Institut für Normung e.V., Europäische Norm, International Organisation of Standardization
DIN V	Deutsches Institut für Normung e.V., Vornorm
DOE	U.S. Department of Energy
EG	Erdgeschoss
EMS	Energy Management System
EnEV	Energieeinsparverordnung
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GEG	Gebäudeenergiegesetz
HuG	Haus und Grundstücksverwaltung Lange und Hofmeister GmbH
HVAC	Heating Ventilation Air Conditioning / Heizung, Lüftung, Klimatechnik
HWB	Heizwärmebedarf
IWEC	International Weather for Energy Calculations
KB	Kühlbedarf
LAD	Leaf Area Density / Blattflächendichte
LAI	Leaf Area Index / Blattflächenindex
NREL	National Renewable Energy Laboratory
OG	Obergeschoss
RLT	Raumlufttechnik
TRAIL <sup>2</sup>	Transformation im ländlichen Raum - 2
VertiKKA	Vertikale Klimakläranlage
VRF	Variable Refrigerant Flow / Variabler Kältemittelvolumenstrom

WDVS      Wärmedämmverbundsystem

WE        Wohneinheit

## II Nomenklatur

Symbol	Bedeutung	Einheit
<b>Lateinisches Alphabet</b>		
$A$	(Grenz-)Fläche	[ m <sup>2</sup> ]
$A_{opening}$	Öffnungsfläche	[ m <sup>2</sup> ]
$C_D$	Auslasskoeffizient	[ - ]
$C_f$	Bulk-Transfer-Koeffizient	[ - ]
$C_W$	Wirksamkeit der Öffnungsfläche 0,3 bis 0,55	[ - ]
$C_{p,a}$	Spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck 1005,6 J/kgK	
$F$	Netto-Wärmestromdichte	[ W/m <sup>2</sup> ]
$F_{schedule}$	Öffnungsanteil	[ - ]
$H$	Sensible Wärmestromdichte	[ W/m <sup>2</sup> ]
$H_{NPL}$	Höhe des neutralen Druckniveaus ab Unterkante Öffnung	[ m ]
$h$	Wärmeübergangskoeffizient	[ W/m <sup>2</sup> K ]
$I^\downarrow$	Totale einfallende Strahlung	[ W/m <sup>2</sup> ]
$I_{design}$	Auslegungs-Volumenstrom	[ h <sup>-1</sup> , m <sup>3</sup> /s ]
$Infiltration$	Volumenstrom durch Infiltration	[ m <sup>3</sup> /s ]
$L$	Latente Wärmestromdichte	[ W/m <sup>2</sup> ]
$\tilde{L}$	Charakteristische Länge	[ m ]
$l$	Latente Verdunstungswärme	[ J/kg ]
$LAI$	Blattflächenindex	[ - ]
$m$	Mischungsverhältnis / Wasserdampfgehalt	[ g/kg ]

$n$	Luftwechselrate	[ h <sup>-1</sup> ]
$Nu$	Nußelt-Zahl	[ - ]
$\dot{q}$	Wärmestromdichte	[ W/m <sup>2</sup> ]
$\dot{Q}$	Wärmestrom	[ W ]
$Q_w$	Volumenstrom durch Windwirkung	[ m <sup>3</sup> /s ]
$Q_s$	Volumenstrom durch Kaminwirkung	[ m <sup>3</sup> /s ]
$r''$	Faktor für Oberflächenfeuchte	[ - ]
$T$	Temperatur	[ K ]
$V$	Volumen	[ m <sup>3</sup> ]
$\dot{V}$	Volumenstrom	[ m <sup>3</sup> /s ]
<i>Ventilation</i>	Volumenstrom durch Ventilation	[ m <sup>3</sup> /s ]
$W$	Windgeschwindigkeit	[ m/s ]
$z$	Höhe oder Tiefe	[ m ]

### Griechisches Alphabet

$\alpha$	Albedo	[ - ]
$\varepsilon$	Emissionsgrad	[ - ]
$\varepsilon_1$	$\varepsilon_g + \varepsilon_f - \varepsilon_g \varepsilon_f$	[ - ]
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	[ W/mK ]
$\rho$	Dichte	[ kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Stefan-Boltzmann-Konstante $5,699 \cdot 10^8$ W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>	
$\sigma_f$	Bedeckungsgrad durch Laub	[ - ]

**Indizes**

<i>a</i>	Luft
<i>af</i>	An Laub angrenzende Luft
<i>ag</i>	An Boden angrenzende Luft
<i>c</i>	Konvektiv
<i>f</i>	Laub
<i>g</i>	Boden
<i>h</i>	Sensibel
<i>ir</i>	Langwellig
<i>l</i>	Latent
<i>odb</i>	Außenluft
<i>r</i>	Radiativ
<i>s</i>	Kurzwellig
<i>sat</i>	Gesättigt
<i>w</i>	Wand
<i>zone</i>	Thermische Zone
$\infty$	Umgebung

---

*“Modeling allows you to analyze particular strategies and components by the numbers and then decide what is really getting you to the goal”*

*– Brad Jacobson,  
AIA and EHDD Architecture [1]*

# 1 Einleitung

2019 wurden 35% des weltweiten Endenergieverbrauchs durch den Gebäudesektor erzeugt [2]. Deutschland bildet den Durchschnitt ab. Von diesem Drittel entfallen 66% auf den Betrieb von Wohngebäuden. Besonders ältere Gebäude, die vor dem Inkrafttreten der ersten Wärmeschutzverordnung 1979 errichtet wurden, verbrauchen das Fünffache der Energie im Vergleich zu einem nach 2001 errichteten Neubau. Darüber hinaus steigen die Standards der Gebäudeklimatisierung angesichts des Klimawandels. Doch hohe Verbräuche bergen zugleich ein hohes Einsparpotential. Um den Gebäudebestand bis 2050 klimaneutral zu gestalten und der globalen Erwärmung entgegenzuwirken, werden neue technologische Strategien auf den Plan gerufen [3].

Zu diesen zählt die Gebäudeoptimierung durch Fassadenbegrünungen. Lange Zeit wurden Grünfassaden nur unter ökologischen und gestalterischen Aspekten untersucht und angewandt, denn ihre positiven Effekte auf das städtische Umfeld sind nicht von der Hand zu weisen [4]: Unter anderem bewirken Grünfassaden eine Verbesserung des Mikroklimas [5–7] und erhöhen somit den thermischen Komfort im Außenraum [7]. Durch die wandgebundene Fassadenbegrünung ist dieser Effekt am größten, denn die mit Pflanz-Substrat gefüllten Platten oder Kästen, die direkt am Gebäude befestigt werden, verschatten die Außenwand und senken somit ihre Oberflächentemperatur stärker als andere Begrünungsvarianten [8]. Die verringerten Oberflächentemperaturen im Außenraum sowie die Absorptions- und Reflexionseigenschaften der Grünfassade führen schließlich zu einer verringerten Wärmeabstrahlung an die Umgebung. Die kühlenden Effekte werden durch die sogenannte Verdunstungskühlung, die an Pflanzen und Substrat stattfindet, verstärkt [9, 10].

Diese und weitere Effekte werden gleichzeitig genutzt, um die Gebäudeenergiebilanz zu verbessern. Durch die Kühlung der Außenwände, die sich ebenso auf den Innenraum auswirkt, kann der Einsatz von Klimageräten reduziert werden. Dadurch sinkt der Energieverbrauch zur Klimatisierung von Gebäuden im Sommer [9–11]. Des Weiteren werden Grünfassaden zur Vorkonditionierung der Außenluft genutzt, um als Unterstützung einer Klimaanlage zu dienen [8]. Auch zur Verschattung von Fensterflächen und als Blendschutz kommen sie in verschiedenen Ausführungen zum Einsatz. Somit können sie bspw. in Bürogebäuden wartungsaufwändigere Jalousien ersetzen [12]. In Kombination mit Photovoltaik-Anlagen können sie dessen Leistung steigern, indem sie diese kühlen [4]. Grünfassaden bewirken eine Reduktion des Wärmedurchgangs durch die Außenwand im Sommer wie im Winter [13–15]. Zur kalten Jahreszeit zeigt sich ihre Funktion als zusätzliche Dämmschicht, welche die Auskühlung der Wand reduziert [13, 14]. Darüber hinaus bergen einige Bauweisen von Grünfassaden noch weitere Einsparpotentiale. Bspw. kann durch das Substrat eine Grauwasserreinigung stattfinden, die schließlich zu einer Trinkwasserersparnis führt [4, 16].

Die klimatisierenden Eigenschaften einer Fassadenbegrünung wurden jedoch bisher am häufigsten erforscht, da in diesem Bereich die größten Energieeinsparungen

erzielt werden können. Im Jahr 2010 wurden in Wien, Österreich 850 m<sup>2</sup> einer wandgebundenen Fassadenbegrünung in Regalbauweise an dem Hauptgebäude der Abfallwirtschaft montiert. Anschließend wurden mittels Sensoren und Wärmebildaufnahmen die Oberflächentemperaturen und die Wärmestromdichte an einem begrünten sowie einem unbegrünten Teil der Außenwand gemessen. Die Oberflächentemperatur des Substrats war 10 bis 15°C niedriger als die der Putzfassade und die Wärmestromdichte konnte durch die Begrünung um bis zu 50% reduziert werden [14]. Die Autor:innen Tudiwer et al. [13] berechneten anhand der gemessenen Wärmestromdichten an einem begrünten sowie einem unbegrünten Außenwandabschnitt des gleichen Gebäudes die U-Werte und verglichen diese gegeneinander. Die Ergebnisse zeigten, dass die Begrünung den U-Wert der Außenwand um 20% senkte und somit die Dämmeigenschaften der Wand verbesserte. Gleich acht verschiedene Grünfassaden untersuchten Wong et al. [8] im tropischen Klima Singapurs. Auch dort konnten hinter jeder Begrünung verringerte Oberflächentemperaturen festgestellt werden, sodass die Autor:innen einen potentiellen thermischen Nutzen folgerten.

Messungen allein eignen sich jedoch nicht zur Feststellung des tatsächlichen Energie-Einsparpotentials durch Grünfassaden. Die Verbräuche hängen von zu vielen Variablen ab. Als probates Mittel haben sich Gebäudesimulationen etabliert, deren Ursprung in den 70er Jahren liegt [17]. Bei dem sogenannten Building Energy Modeling (BEM) wird der Energiebedarf von Gebäuden unter verschiedenen Nutzungsszenarien und Klimabedingungen simuliert. Die auf physikalischen Grundlagen basierenden numerischen Simulationen sind ein unverzichtbares Werkzeug zur Planung energieeffizienter Gebäude geworden [17]. Das beweisen erfolgreich umgesetzte Projekte ebenso wie die Vielzahl an Studien, in denen Simulationssoftwares zur Anwendung kommen [18–21]. Jedoch sind Grünfassaden bisher nicht standardmäßig in diesen Anwendungen enthalten [22]. Um dennoch begrünte Gebäude zu simulieren, wendeten verschiedene Autor:innen entweder ein Modell eines Gründachs in der Vertikalen an [23–25], oder integrierten ein selbstentwickeltes numerisches Modell in ihre Gebäudesimulationen [15, 18, 22, 26]. Alle Simulationen zeigten ein überwiegendes Einsparpotential durch Fassadenbegrünungen im Sommer. Im Winter lagen die Einsparungen im einstelligen Prozentbereich. Allerdings wurden die Simulationen bisheriger Studien bis auf eine Ausnahme [27] für warme bis tropische Klimaregionen durchgeführt. Der Mangel an Studien, die nördlicher gelegene Regionen untersuchten, liegt darin begründet, dass der Verschattung durch Grünfassaden der größte Einfluss auf den Energiebedarf von Gebäuden zugesprochen wird [4, 28]. Zudem berücksichtigten die wenigsten Autor:innen [29] die Hinterlüftung einer wandgebundenen Grünfassade. Dabei spielen die Wärmetransportmechanismen im Luftspalt eine bedeutende Rolle hinsichtlich des Wärmeaustauschs mit der Außenwand.

Aus diesen Gründen befasst sich die vorliegende Arbeit mit der Auswirkung einer hinterlüfteten, wandgebundenen Fassadenbegrünung auf den ganzjährigen Nutzenergiebedarf eines Beispielgebäudes in gemäßigttem Klima. Zum Gegenstand der Untersuchungen wird ein in Thüringen gelegenes Mehrparteien-Wohnhaus, dessen letzte Sanierung über 30 Jahre zurückliegt.

Dieses und zwei weitere baugleiche Wohngebäude stehen bereits im Fokus des Forschungsprojekts Transformation im ländlichen Raum 2 (TRAIL<sup>2</sup>), das an der Bauhaus-Universität Weimar ins Leben gerufen wurde. Ziel der Forschung ist die Optimierung der Energieversorgung von Kleinstädten und Dörfern. Dazu wurde eine Online-Anwendung entwickelt, welche die Strom- und Wärmebedarfe von Kommunen visualisiert und Akteur:innen konkrete Planungsentscheidungen erleichtert, um die Energiekosten einer Gemeinde zu senken [30, 31]. Doch maßgeblich knüpft diese Arbeit an ein weiteres Forschungsprojekt an: Dieses wurde mit dem Titel Vertikale Klima-Kläranlage (VertiKKA) 2018 durch zehn Forschungspartner:innen ins Leben gerufen. VertiKKA beschäftigt sich mit der Entwicklung einer gleichnamigen, modular aufgebauten und wandgebundenen Grünfassade, die der Grauwasserreinigung dient. Vor der Grünfassade sind steuerbare Photovoltaik-Elemente angebracht, welche die Begrünung verschatten und gleichzeitig eine Leistungssteigerung durch deren kühlende Wirkung erfahren [32]. Über ihre eigentlichen Funktionen hinaus wurden bereits weitere Auswirkungen der VertiKKA auf ihre Umgebung erforscht: darunter der Wärme- und Feuchtetransport an der Außenwand sowie die Änderung des U-Wertes [33] und die Beeinflussung des urbanen Mikroklimas [34]. Der Einfluss auf den Nutzenergiebedarf von Gebäuden, an denen die VertiKKA potenziell zum Einsatz kommen wird, wurde noch nicht untersucht.

Der Nutzenergiebedarf wird in dieser Arbeit als die Summe als Heizwärme- und Kühlbedarf verstanden. Verglichen mit bisherigen Studien auch südlicheren Regionen könnte der Kühlbedarf durch die Grünfassade weniger stark sinken, da die von der VertiKKA abgeschirmten solaren Energieeinträge im Sommer ohnehin geringer sind. Hingegen könnten die Heizwärmeeinsparungen größer ausfallen. Die durchschnittlich kälteren Winter in Deutschland lassen vermuten, dass die Pufferwirkung der Grünfassade und des Luftspalts vergleichsweise stärker zum Tragen kommen.

Diese Vermutungen sollen durch die vorliegende Arbeit anhand der folgenden Ziele bestätigt oder widerlegt werden:

1. Durch Simulationen wird das Nutzenergie-Einsparpotential einer wandgebundenen Fassadenbegrünung unter gemäßigten Klimabedingungen ganzjährig ermittelt und bewertet. Dabei soll die Frage beantwortet werden, ob eine solche Begrünung auch in mitteleuropäischen Breitengraden nennenswerte energetische Vorteile mit sich bringt.
2. Das Energie-Einsparpotential einer Grünfassade variiert mit der Himmelsausrichtung und dem Bedeckungsgrad des Gebäudes. Durch eine Sensitivitätsanalyse sollen diese Abhängigkeiten untersucht und ein optimales Begrünungsszenario für das Beispielgebäude ermittelt werden.
3. Die VertiKKA wird in einen Vorschlag einer energetischen Sanierung für das Beispielgebäude einbezogen. Dadurch soll ihre Performance einerseits im Zusammenspiel mit einer Sanierungsmaßnahme und andererseits im Vergleich zu dieser beurteilt werden können.
4. Anhand der Teilergebnisse ist eine unter energetischen Aspekten geeignete Sanierungsmaßnahme und ein geeignetes Begrünungsszenario für das Beispielgebäude auszuwählen.

Um das Nutzenergie-Einsparpotential der VertiKKA bewerten zu können, wird jeweils ein Modell des Beispielgebäudes mit und ohne Begrünung simuliert. Anschließend werden beide Varianten miteinander verglichen.

Die Simulationen werden mit der international verbreiteten und umfangreichen [35] BEM-Software EnergyPlus durchgeführt. Ihre leistungsfähige Engine wird häufig in Kombination mit anderen mehr oder weniger anwendungsorientierten Programmen genutzt. Auch diese Arbeit greift auf unterstützende Anwendungen zurück. Mit Hilfe der Software SketchUp werden die Gebäude- und VertiKKA-Geometrien erzeugt. Die Anwendung OpenStudio bietet eine Bedienoberfläche für das konsolenbasierte Programm EnergyPlus an und wird zur Dateneingabe verwendet. Zu Anfang wird ein Referenzmodell auf der Datengrundlage des Beispielgebäudes erstellt. Anschließend werden die simulierten Energiebedarfe mit den tatsächlichen Verbräuchen verglichen. Stellt das Modell eine hinreichende Annäherung an die Realität dar, kann es für die Simulationen der VertiKKA verwendet werden. Diese wird über das in EnergyPlus integrierte Modul für Gründächer, das in vertikaler Ausrichtung angewandt wird, modelliert. Anschließend werden die bereits erwähnten verschiedenen Begrünungsszenarien simuliert. Untersucht werden alle vier Fassadenorientierungen sowie die Bedeckungsgrade 100, 75, 50 und 25%. Danach wird die VertiKKA mit zwei für das Beispielgebäude in Frage kommenden Sanierungsmaßnahmen für die Außenwand verglichen. In einem letzten Schritt wird sie mit diesen kombiniert. Die Ergebnisse werden mit Studien aus anderen Klimaregionen verglichen und eingeordnet.

Die vertikale Anwendung des Modells für Gründächer bildet die Einflüsse einer Grünfassade nur begrenzt ab. Diese Einschränkungen werden im theoretischen Teil dieser Arbeit dargelegt. Um sie zu eliminieren, bedarf es der Implementierung eines zusätzlichen Codes (z.B. mit Matlab, Python, Erl), der in die Simulationen eingreift. Diesen zu entwickeln, würde über den zeitlich und inhaltlich begrenzten Umfang der Arbeit hinausführen. Gleiches gilt für die Validierung des VertiKKA- und des Referenzmodells. Zur Bewertung der VertiKKA erfolgen jedoch nur Vergleiche zwischen den auf dem Referenzmodell beruhenden Simulationen und nicht zwischen Simulation und Realität. Deswegen würde die Validierung des Referenzmodells nur eine untergeordnete Rolle spielen.

In dieser Arbeit nicht bewertet wird der Endenergiebedarf des Beispielgebäudes. Er beinhaltet unter anderem anlagenspezifische Energieverluste und Gewinne durch die Nutzung von Umweltwärme, die bspw. mittels Wärmepumpen aus dem Erdreich gewonnen werden kann. Diese Faktoren haben jedoch keinen Einfluss auf die Wirkung der VertiKKA.

Dass die VertiKKA den Heizwärme- und Kühlbedarf potenziell senken kann, lässt nicht automatisch Rückschlüsse auf die Nachhaltigkeit der Grünfassade zu. Durch diese Arbeit sollen lediglich die Einsparpotentiale für das begrünte Gebäude im Betrieb ermittelt werden. Eine energetische Betrachtung der VertiKKA hinsichtlich Herstellung, Betrieb, Wartung und Rückbau würde zu weit führen.

Die VertiKKA-Konstruktion, die in dieser Arbeit betrachtet wird, besteht aus Begrünung, Substrat und Luftspalt. Die vorgeschalteten Photovoltaik-Elemente

wurden außer Acht gelassen, denn sie können die Wirkung der VertiKKA durch viele weitere Variablen beeinflussen. Dazu zählt unter anderem der Neigungswinkel der beweglichen Elemente, der zu unterschiedlichen Verschattungen führt.

Das folgende Kapitel 2 beschreibt die Methoden dieser Arbeit im Detail. Zunächst bringt es der Leserschaft die Simulationssoftware EnergyPlus näher. Darauf folgt in Kapitel 2.2 das erste Kernthema – die Erstellung des Referenzmodells. Diese wird in den weiteren Unterkapiteln ausführlich beschrieben. Anschließend folgen erste Testsimulationen, die dem Abgleich des Referenzmodells mit dem Beispielgebäude dienen. Kapitel 2.3 beinhaltet das zweite Kernthema. Es befasst sich mit der Umsetzung der VertiKKA im Simulationsmodell. Die weiteren Unterkapitel beschreiben zunächst die allgemeinen Wärmetransportmechanismen und anschließend das numerische Modell für Gründächer von EnergyPlus. Danach werden die Limitationen des Gründachs in der vertikalen Anwendung diskutiert. Schließlich endet Kapitel 2.3 mit den Testsimulationen des Luftspalts, die auf verschiedenen Einstellungen beruhen. Kapitel 3 präsentiert die Ergebnisse der Simulationen, diskutiert diese und fasst sie zusammen. In Kapitel 4 werden die Diskussionen verallgemeinert und die Ergebnisse mit anderen Studien verglichen. Abgeschlossen wird die Arbeit durch ein Fazit und offene Fragestellungen, die eine Anregung für weitere Forschungsthemen bieten sollen.

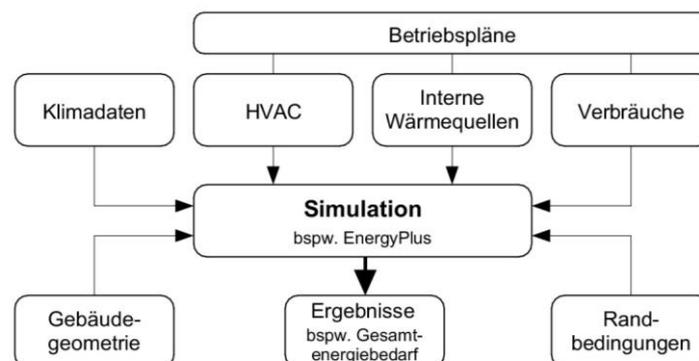
## 2 Methodik

Die vorliegende Arbeit basiert ausschließlich auf Simulationen. Daher soll dieses Kapitel einerseits einen groben Einblick in die Einstellungsmöglichkeiten der verwendeten Anwendungen geben und andererseits eine detaillierte Beschreibung der vorgenommenen Einstellungen liefern.

Die Grundlage aller Simulationen bildet das Referenzmodell, das ein existierendes Wohngebäude nachbilden soll. Da die Simulationen nicht von einer vereinfachten Geometrie ausgehen, ist zu erwarten, dass die Wirkung der VertiKKA anschließend realistisch bewertet werden kann. Doch bevor die Einstellungen und Testsimulationen des Referenzgebäudes, der Grünfassade und des Luftspalts beschrieben werden, erfolgt eine Einführung in das Themenfeld der Gebäudesimulationen. Anschließend werden die verwendeten Anwendungen EnergyPlus, SketchUp und OpenStudio vorgestellt.

## 2.1 Die Simulationssoftware EnergyPlus

Die Realisierung energieeffizienter Gebäude erfordert eine vorausschauende Planung, um die Energiebedarfe eines Bauwerks über alle Lebenszyklusphasen hinreichend genau abschätzen zu können. Daher wurden in den vergangenen 30 Jahren zunehmend Gebäudesimulationen in den Planungsprozess integriert [35, 36]. Sie basieren auf detaillierten Strömungssimulationen und gewöhnlichen oder partiellen Differentialgleichungen, die den Wärmetransport durch ein Gebäude darstellen. So komplex die numerisch zu lösenden Grundlagen sind, so einfach sind die Rückschlüsse, die sich auf das Verhalten bauphysikalischer Systeme ziehen lassen [17]. Die Anwendungen erfassen die Gebäudegeometrie, Klimadaten, interne Wärmequellen und Nutzungsszenarien. Auch Heiz-, Kühl- und Lüftungsanlagen – kurz HVAC (Heating, Ventilation, Air Conditioning) – sowie weitere energie- oder wasserverbrauchende Systeme können definiert werden (Abbildung 1). Nutzungsabhängige Komponenten werden mit Hilfe von Betriebsplänen gesteuert, die Nutzungszeiten und Sollwerte festlegen. Die Anzahl der Iterationsschritte oder die Auswahl bestimmter Algorithmen sind in Abbildung 1 unter den Randbedingungen zusammengefasst. Nicht nur Energiebedarfe, sondern auch Wärme- und Feuchtetransportmechanismen (THERM [37], WUFI Pro [38]), Tageslichteinträge (Honeybee [39] und Ladybug [40] als Plugin für Grasshopper) oder die Belastung durch atmosphärische Schadstoffe (EnergyPlus [41]) können durch Gebäudesimulationen untersucht werden.



**Abbildung 1** Ein- und Ausgabe von Gebäudesimulationssoftwares

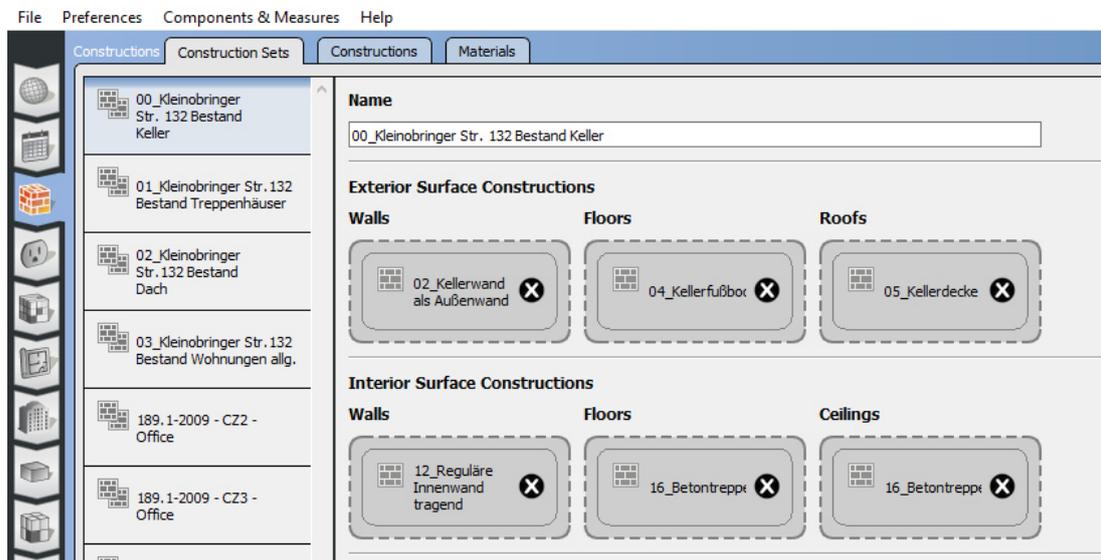
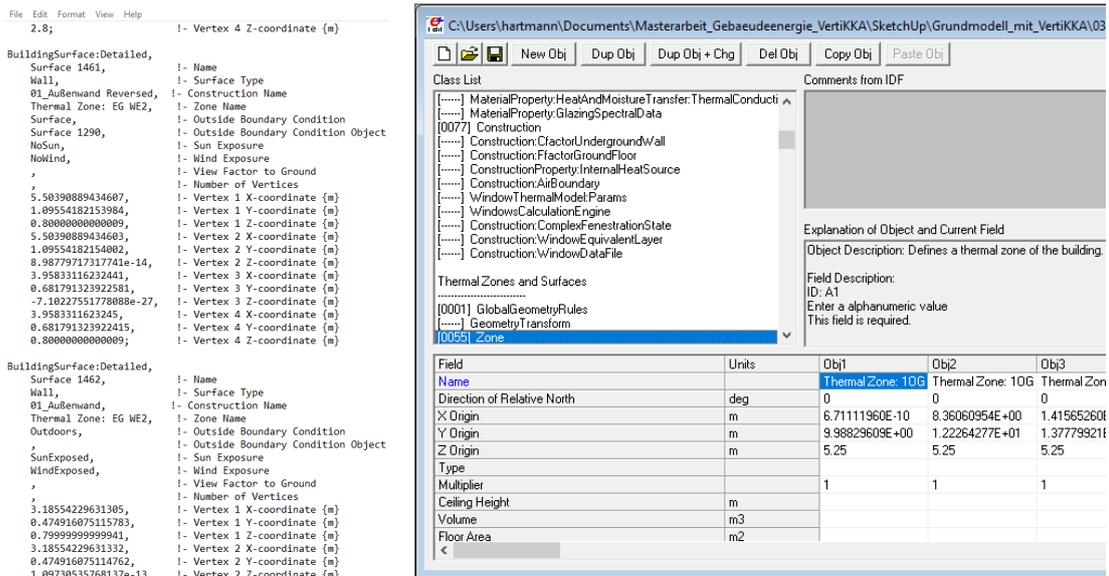
Die aktuell bekanntesten und umfangreichsten Anwendungen sind Design Builder, TRNSYS, EnergyPlus und eQuest [35]. EnergyPlus wurde durch das U.S. Department of Energy (DOE) entwickelt und ging aus den Programmen BLAST und DOE-2 der 1970er Jahre hervor [42, 43]. Die Open-Source-Anwendung ist kostenfrei verfügbar und wird seit 2014 in der Programmiersprache C++ verfasst [43, 44]. Ein wichtiges Merkmal der Anwendung ist ihr modularer Aufbau. Die Module können unabhängig voneinander aufgerufen und in die Simulation integriert werden. Alle Teilsimulationen laufen parallel. Ein Lösungsmanager prüft die Ergebnisse auf Konvergenz und übergibt sie an den übergeordneten Simulationsmanager. Dieser fasst alle Teilergebnisse zu einem Gesamtergebnis zusammen. Die Zeitschritte der Ein- und Ausgaben sowie der numerischen Berechnungen können kleiner als eine Stunde gewählt werden, um die Genauigkeit der Berechnungen zu erhöhen [43, 45]. Grundsätzlich weist EnergyPlus keine Bedienoberfläche auf, wie Abbildung 2, oben

links zeigt. Um die Akzeptanz der Anwendung zu erhöhen, entwickelte das DOE einige wenige konsolenbasierte Schnittstellen [43]. Zu den wichtigsten zählen:

- der IDF-Editor mit einer Auflistung der Module, die dort modifiziert werden können (Abbildung 2, oben rechts)
- EP-Launch zur Auswahl der Ein- und Ausgabedateien und zur Durchführung der Simulationen
- EP-Compare zum grafischen Vergleich der Ergebnisse mehrerer Simulationen

Der erschwerten Bedienbarkeit zugrunde liegt die Fokussierung des DOE auf die Entwicklung einer leistungsfähigen Engine. Dieser Motor kann und soll zur praktischen Anwendung in Programme mit grafischer Bedienoberfläche von Drittanbietern integriert werden [43].

Einer dieser Drittanbieter ist das National Renewable Energy Laboratory (NREL), das durch das DOE finanziert wird und 2008 die Open-Source-Anwendung OpenStudio veröffentlichte. OpenStudio wurde, wie EnergyPlus, in C++ verfasst und basiert auf Objekten, die über das Prinzip von Hierarchie und Vererbung miteinander verknüpft sind (Abbildung 2, unten). Das heißt, spezifische Tochterobjekte erben zentrale Attribute der Mutterobjekte. Bspw. kann ein Konstruktionsset auf verschiedene Räume angewandt werden. Dieses Prinzip erleichtert das Erstellen von Simulationsmodellen und gestaltet es effizienter [17]. Die Simulationsdateien werden im OSM-Format erstellt, anschließend in eine IDF-Datei überführt und durch EnergyPlus simuliert. Diese Prozesse laufen im Hintergrund ab, sodass nicht zwingend zwischen den Anwendungen gewechselt werden muss. Alternativ kann das Modell im IDF-Format exportiert und über den IDF-Editor von EnergyPlus nochmals bearbeitet werden, um Einstellungen vorzunehmen, die in OpenStudio bisher nicht implementiert sind. Beide Anwendungen, EnergyPlus und OpenStudio, enthalten weitere Schnittstellen, die eine Integration eines selbsterstellten Algorithmus (bspw. mit C++, Ruby oder Python) ermöglichen. EnergyPlus sieht für diesen Fall spezielle Module vor, unter anderem das *Energy Management System* (EMS) oder das Python-Plugin [46].



**Abbildung 2** Bedienoberfläche der Anwendungen EnergyPlus (oben) und OpenStudio (unten)

OpenStudio (Abbildung 2, unten) erleichtert die Dateneingabe, ermöglicht aber nicht der Erzeugung der Gebäudegeometrie. Die Lösung bietet das OpenStudio-Plugin für SketchUp. Das weitverbreitete Gestaltungswerkzeug SketchUp wurde zum Erstellen dreidimensionaler Modelle im Architektur- und Designbereich entwickelt [47]. Mit Hilfe des Plugins werden Gebäude, aber auch Verschattungsobjekte dreidimensional erfasst und Gebäudebereiche thermisch zониert. Durch das gleichzeitige Arbeiten in SketchUp und OpenStudio können unter anderem Konstruktionen erstellt und auf Flächen angewandt werden. Diese Vorgehensweise wird in Kapitel 2.2.2 für das Beispielgebäude beschrieben. Die darauffolgenden Kapitel befassen sich mit der Modellierung in OpenStudio.

## 2.2 Erstellung des Referenzgebäudes

Der ganzjährige Energiebedarf eines Gebäudes hängt von vielen verschiedenen Faktoren ab. Zu diesen zählen unter anderem: die Beschaffenheit der thermischen Hülle, die klimatischen Bedingungen, das individuelle Heiz- und Lüftungsverhalten der Bewohnenden, interne Wärmequellen, Verschattungen und die Effektivität des Heiz- und – wenn vorhanden – Kühlsystems. Soll der Endenergiebedarf durch Simulationen ermittelt werden, hilft eine umfangreiche Datenlage, das Modell zu präzisieren. Diese liegt für drei Wohngebäude in Großobringen, Thüringen vor, denn, wie in Kapitel 1 erwähnt, werden sie bereits im Rahmen des Forschungsprojekts TRAIL<sup>2</sup> [30, 31] untersucht. Dank der Kooperation wurden Grundrisse, Schnitte, Wand- und Bodenaufbauten durch das mitwirkende Büro Reich Architekten aus Weimar sowie Strom- und Gasabrechnungen von der Haus und Grundstücksverwaltung GmbH Lange & Hofmeister (HuG GmbH) ebenfalls aus Weimar, Thüringen zur Verfügung gestellt. Eines der drei baugleichen Gebäude dient als Referenzmodell für die Simulationen der VertiKKA und wird daher im Folgenden eingehender betrachtet. Nach einer allgemeinen Beschreibung folgt die Implementierung des Modells in EnergyPlus. Dieses wird schließlich anhand von Testsimulationen überprüft, deren Ergebnisse mit den tatsächlichen Verbräuchen aus drei Jahren verglichen werden.

### 2.2.1 Allgemeine Gebäudebeschreibung

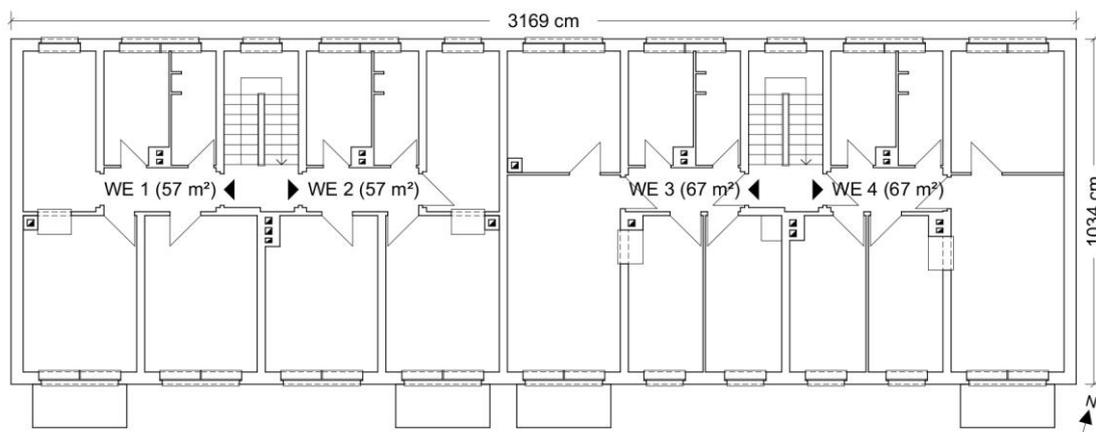
Großobringen liegt nördlich von Weimar am südlichen Rand des Thüringer Beckens und ist laut Köppen-Geiger-Klassifikation [48] durch ein feuchtgemäßigtes Klima mit warmen Sommern (Cfb) gekennzeichnet. Die drei Wohnbauten befinden sich am nördlichen Ortsrand in der Kleinobringer Straße auf etwa 231 m Höhe (Abbildung 3, links).



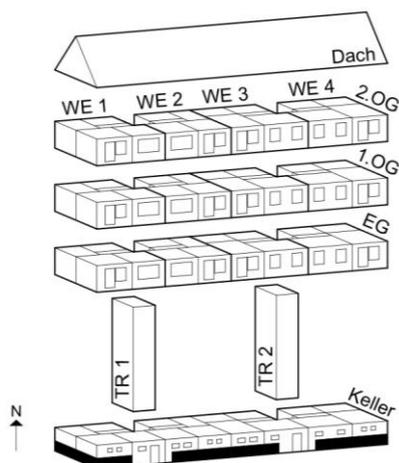
**Abbildung 3** Lageplan (links) und Beispielgebäude in Großobringen, Thüringen (rechts)

Sie wurden 1979 als Mauerwerksbauten errichtet und im Zuge der Sanierungsmaßnahmen nach 1990 mit einem Wärmedämmverbundsystem (WDVS) ausgestattet. Damit repräsentieren sie eine noch vielerorts bestehende Typologie. Die zwölf Wohneinheiten je Gebäude verteilen sich auf drei Geschosse und etwa 745 m<sup>2</sup>, die über zwei Treppenträume erschlossen werden. Zudem sind die Gebäude vollständig unterkellert und gründen auf einer Fläche von je 328 m<sup>2</sup>. Die ungedämmten Kaltdächer sind thermisch entkoppelt. Die Wärmedurchlässigkeit der Bauteile wird durch den Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) beschrieben. Er gibt den Wärmestrom durch das Bauteil in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenseite pro Quadratmeter und Kelvin an. Je niedriger der U-Wert, umso besser ist die Dämmwirkung des Bauteils. Der U-Wert der Außenwände liegt bei 0,33 W/m<sup>2</sup>K und damit über den von der Energieeinsparverordnung (EnEV) 2016 bzw. dem Gebäudeenergiegesetz (GEG) geforderten 0,24 W/m<sup>2</sup>K für Außenwände gegen Außenluft [49]. Alle drei Gebäude sind um 15° gegen Norden gedreht (Abbildung 3, links). Die nach Südosten orientierten Längsfassaden wurden mit Balkonen ausgestattet. Die Wohnfläche setzt sich aus zwei Wohnungstypen zusammen – einem kleineren mit etwa 57 m<sup>2</sup> und einem größeren mit etwa 67 m<sup>2</sup>. Wie an dem Regelgeschoss in Abbildung 5 erkennbar, umschließt ein Typus je einen Treppenraum, da die Grundrisse an dessen Längsachse gespiegelt sind. Zur Orientierung wurden die Wohneinheiten (WE) im Erdgeschoss (EG) sowie im ersten und zweiten Obergeschoss (OG) von West nach Ost mit WE1 bis 4 und die Treppenträume mit TR1 und 2 bezeichnet (Abbildung 5). Eine Datenbank in Anhang D.1 enthält die Konstruktionen und verbauten Materialien des Bestandes.

Alle drei Gebäude sind mit einer Gaszentralheizung mit Warmwasserspeicher zur Trinkwassererwärmung ausgestattet. Die Verbrauchsdaten für Gas und Strom wurden für die Jahre 2018 bis 2020 bereitgestellt. Da sich die Daten auf die gesamte Liegenschaft und somit alle drei Gebäude in Summe beziehen, wurde ein Drittel der Verbräuche für das Beispielgebäude angenommen.



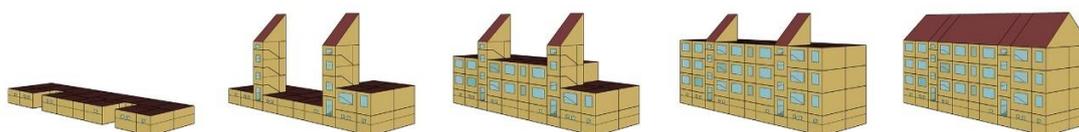
**Abbildung 4** Grundriss eines Regelgeschosses mit Bezeichnung der Wohneinheiten



**Abbildung 5** Schematischer Gebäudeaufbau mit Bezeichnung

### 2.2.2 Geometrie und Konstruktion

Alle Einstellungen des Referenzmodells basieren auf dessen Geometrie. Diese wurde in SketchUp mit Hilfe des OpenStudio-Plugins im OSM-Format erstellt. Das Plugin ermöglicht einen unkomplizierten Wechsel zwischen SketchUp und OpenStudio. Im ersten Schritt wurden die zwölf Wohneinheiten, die beiden Treppenhäuser sowie das Keller- und Dachgeschoss in sogenannten *Spaces* – Räumen mit einem Bezugspunkt – erstellt (Abbildung 6). Für diese wurden in einem späteren Schritt gemeinsame Merkmale, wie interne Lasten, Konstruktionen oder Luftwechselraten, definiert. Räume mit gleichen Merkmalen können auch zu Raumtypen, den sogenannten *Space Types*, zusammengefasst werden.



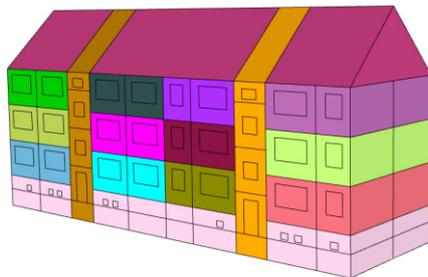
**Abbildung 6** Schrittweiser Aufbau des Referenzmodells in SketchUp

Bei der Übertragung der Geometrien aus den Bestandsplänen in SketchUp wurde berücksichtigt, dass die Tiefen von Konstruktionsflächen in SketchUp nicht dreidimensional dargestellt, sondern über Zahlenwerte definiert werden. Für Außenwände, Böden und Decken gilt die Innenfläche als Referenz. Das heißt, diese Flächen werden entlang ihrer Normalen nach außen extrudiert. Bei Innenwänden verläuft die Referenzfläche entlang der Mittelachse. Ihre Flächen werden folglich in beide Richtungen gleichermaßen extrudiert [46]. Blicke dieser Zusammenhang unbeachtet, würden das Gebäudevolumen und die thermischen Massen der Bauteile falsch kalkuliert und damit auch das Endergebnis verfälscht werden.

Den Räumen wurden schließlich thermische Zonen zugeordnet. Wie der Name vermuten lässt, sind diese Zonen kein geometrisches Konzept. Vielmehr werden sie durch das enthaltene Luftvolumen sowie alle Wärmeübertragungsflächen, die sie begrenzen oder darin enthalten sind, definiert. EnergyPlus berechnet während der

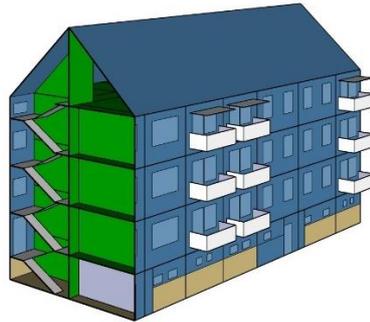
Simulation für jeden Zeitschritt die Energie, die benötigt wird, um das Luftvolumen auf einer bestimmten Temperatur zu halten [43]. Daher sind thermische Zonen ein zentraler Bestandteil des Simulationsmodells. Eng verbunden mit dem Konzept der thermischen Zone, welches auch in anderen Simulationsprogrammen (z.B. TRNSYS [50]) Anwendung findet, ist das Thermostat. Dieses wird in den Kapiteln 2.2.5 und 2.2.6, die sich mit dem Heiz- und Kühlsystem befassen, eine Rolle spielen.

Eine thermische Zone kann mehrere *Spaces* enthalten. Im einfachsten Fall kann ein ganzes Gebäude als eine thermische Zone simuliert werden [17], doch in diesem Modell wurde jedem *Space* – und damit jeder Wohneinheit, jedem Treppenraum, dem Keller- und Dachgeschoss – eine thermische Zone zugewiesen. Somit konnten die Auswirkungen der Fassadenbegrünung auf den Nutzenergiebedarf des Gebäudes in Kapitel 3 detailliert bewertet werden. Abbildung 7 zeigt die 16 thermischen Zonen in einer Farbdarstellung durch die Option *Render by Thermal Zone* des OpenStudio-Plugins in SketchUp.



**Abbildung 7** Darstellung der 16 thermischen Zonen durch *Render by Thermal Zone*

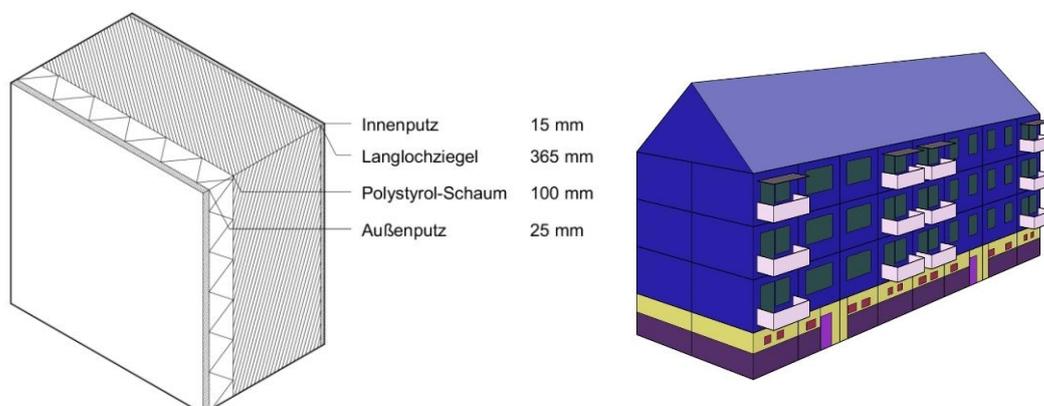
Die thermischen Zonen wechselwirken untereinander ebenso wie mit ihrer Umgebung. Außenwände sind typischerweise dem Umgebungsklima, sprich Außenluft, Wind, kurz- und langwelliger Strahlung, ausgesetzt. Gegen das Erdreich grenzende Bauteile werden hingegen von dessen Temperatur beeinflusst. Grenzen die Wände zweier thermischer Zonen aneinander, unterliegen sie den Innenraumbedingungen beider Zonen [17]. Die Funktion *Zone Matching*, zu dt. Zonenanpassung, des OpenStudio-Plugins erkennt die Randbedingungen für den Wärmeübergang an den Grenzflächen automatisch, sofern diese aneinander liegen und die gleiche Größe und Form aufweisen. Über die Darstellung *Render by Boundary Condition* werden diese Wärmeübertragungsflächen, wie in Abbildung 8 zu erkennen, eingefärbt: Blaue Flächen grenzen an den Außenraum, braune an das Erdreich und grüne an andere thermische Zonen. Grau dargestellte Flächen sind beispielsweise Innenwände innerhalb einer thermischen Zone. Sie werden über eine untergeordnete Flächengruppe, die *Interior Partition Surface-Group*, erzeugt und von EnergyPlus als thermische Masse interpretiert.



**Abbildung 8** Darstellung der Randbedingungen für den Wärmeübergang an den Grenzflächen durch *Render by Boundary Condition*

Abbildung 9 zeigt auf der rechten Seite die Darstellung *Render by Construction* und damit die farbliche Unterscheidung nach den Konstruktionen, die den Flächen zugeordnet sind. Diese setzen sich aus Materialien zusammen, welche über ihre Rauigkeit, Dicke, Dichte, Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität definiert werden. Optional können auch der thermische, solare und visible Absorptionskoeffizient verändert werden. Die Eigenschaften der verwendeten Materialien und damit der Konstruktionen entsprechen der Datenbank des Bestandsgebäudes nach Anhang D.1. Exemplarisch zeigt Abbildung 9, links den Aufbau der Außenwand, die schließlich mit der VertiKKA versehen wurde. Rechts ist die Außenwand in Dunkelblau dargestellt. Fenster und Türen wurden über das Material *Simple Glazing System* bzw. Einfach-Verglasung beschrieben, da es entgegen anderen Materialien allein über den U-Wert und den Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) charakterisiert werden kann. Der g-Wert beschreibt den Teil der Sonnenenergie, der durch das Material ins Innere des Gebäudes gelangt. Er setzt sich aus direkt durchgelassener sowie absorbierter und anschließend nach innen emittierter Strahlung zusammen [51, S. 61]. Für die Türen als opake Bauteile musste er entsprechend angepasst werden (Anhang D.1).

Um die Konstruktionen den Flächen des Modells besser zuweisen zu können, eignet sich das Erstellen von Konstruktionssets. Diese werden auf die *Spaces* oder *Space Types* angewandt und definieren entweder eine Auswahl oder alle Bauteilaufbauten automatisch. Somit kann die Modellierung effizienter gestaltet werden.



**Abbildung 9** Wandaufbau der Außenwand (links) und Darstellung unterschiedlicher Konstruktionen durch *Render by Construction* (rechts)

### 2.2.3 Interne Wärmequellen

Zu den internen Wärmequellen zählen Personen, Geräte und Beleuchtung. HuG GmbH zufolge werden die Wohnungen des Beispielgebäudes durchschnittlich von zwei bis drei Personen bewohnt. Daher wurde folgende Annahme getroffen: Der kleinere Wohntypus (57 m<sup>2</sup>) ist mit zwei Personen und der größere Wohntypus (67 m<sup>2</sup>) mit drei Personen belegt. Entsprechend der DIN V 18599-10 [52] wurde von einem dauerhaften Aufenthalt an jedem Wochentag ausgegangen. Daher wurde eine Belegungsdichte von 100% in OpenStudio definiert. Jede Person gibt laut derselben DIN-Norm Wärme mit einer thermischen Leistung von 70 W an die Umgebung ab – in OpenStudio definiert über den Aktivitätsgrad. Daraus ergeben sich 2,76 W/m<sup>2</sup> für den kleineren bzw. 3,13 W/m<sup>2</sup> für den größeren Wohntypus. Die Wärmeabgabe wurde zu 70% als Konvektion und zu 30% als Strahlung angesetzt (Standard).

Geräte und Beleuchtung wurden in OpenStudio über das Objekt *Electric Equipment Definitions* berücksichtigt. Die DIN 4108-2 [53] gibt als Wärmeeintrag 100 W/m<sup>2</sup>d bezogen auf die Nettogrundfläche von Wohngebäuden vor. Da diese Angabe sämtliche Wärmeeinträge zusammenfasst und die Personenwärme bereits berücksichtigt wurde, ergibt sich die Wärmeabgabe durch Geräte und Beleuchtung aus der Differenz. Die Eingabe in OpenStudio erfolgt in der Einheit W/m<sup>2</sup>. Da der Gesamt-Wärmeeintrag umgerechnet 4,17 W/m<sup>2</sup> und die Personenwärme durchschnittlich 2,79 W/m<sup>2</sup> entspricht, ergibt sich schließlich ein durchschnittlicher Wärmeeintrag von 1,37 W/m<sup>2</sup> für Geräte und Beleuchtung. Dieser Wert wurde für jede Wohneinheit verwendet.

### 2.2.4 Luftwechsel

Der Luftwechsel in Innenräumen bzw. thermischen Zonen spielt eine wichtige Rolle in energetischen Simulationen, da durch einen Luftwechsel je nach Richtung des Temperaturgefälles stets Wärmeverluste oder -einträge entstehen. Bauphysikalisch wird zwischen Ventilation und Infiltration unterschieden: Infiltration beschreibt den unbeabsichtigten Zuluftstrom vom Außenraum in die thermische Zone. Dieser entsteht durch das Öffnen und Schließen von Türen sowie durch Fugen und Risse im Bauwerk – besonders rund um Bauwerksöffnungen [46, 51, S. 52]. Die Ventilation ist hingegen eine zweckorientierte Lüftungsmaßnahme, um Frischluft gezielt von außen in die thermische Zone einbringen [46]. Während Wohnungen durch das Öffnen von Fenstern und Türen effektiv quergelüftet werden können, kommen in gewerblichen Nutzungen oft raumluftechnische Anlagen zum Einsatz. In Gebäudesimulationssoftwares wird die Ventilation in der Regel über Zeitpläne sowie Maximal- und Minimaltemperaturen oder Temperaturänderungen gesteuert – so auch in EnergyPlus. Infiltration und Ventilation hängen vom Winddruck (erzwungene Konvektion) und der Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenraum (freie Konvektion) ab [46]. Diese Einflüsse konnten in dem Eingabeobjekt *Design Flow Rate* berücksichtigt werden. Dafür wurde ein Auslegungs-Volumenstrom in Form einer Luftwechselrate angegeben. Diese variiert anhängig von den Koeffizienten der Berechnungsvorschrift, welche den Einfluss der Windgeschwindigkeit und Temperaturdifferenz regulieren. Eine detaillierte Erklärung erfolgt in Kapitel 2.3.5 im

Zusammenhang mit den Testsimulationen der VertiKKA. Die Koeffizienten  $A$ ,  $B$ ,  $C$  und  $D$  wurden mit den Werten 0,606, 0,03636, 0,1177, 0 belegt. Diese wurden bereits von dem EnergyPlus-Vorgänger BLAST verwendet [54] und entsprechen den Standardeinstellungen in OpenStudio.

Der für die Wohneinheiten verwendete Grund-, Tag- und Nachtluftwechsel orientiert sich an der DIN 4108-2 [53] sowie der DIN V 18599-10 [52]. Diese schreiben für Wohngebäude einen Grundluftwechsel von  $0,5 \text{ h}^{-1}$  vor (Summe aus Ventilation und Infiltration). Wird die Raumtemperatur von  $23^\circ\text{C}$  überschritten und liegt diese über der Außenlufttemperatur, kann der Luftwechsel von 6 bis 23 Uhr auf  $3,0 \text{ h}^{-1}$  und in den übrigen Stunden auf  $2,0 \text{ h}^{-1}$  erhöht werden. Für Verkehrsflächen sehen die genannten Normen keinen Mindestluftwechsel vor. Allerdings enthält die DIN EN ISO 13789 [55] übliche Luftwechselraten für unconditionierte Räume [56]. Dementsprechend wurde für die Treppenträume sowie den Keller ebenfalls eine Luftwechselrate von  $0,5 \text{ h}^{-1}$  gewählt. Der Luftwechsel für das belüftete Dach wurde nach Kölsch [57] berechnet, welcher hygrothermische Simulationen von hinterlüfteten Steildächern durchführte:

$$n = \frac{\dot{V}}{V} = \frac{W \cdot A_{\text{opening}} \cdot 3600}{V} \quad 1$$

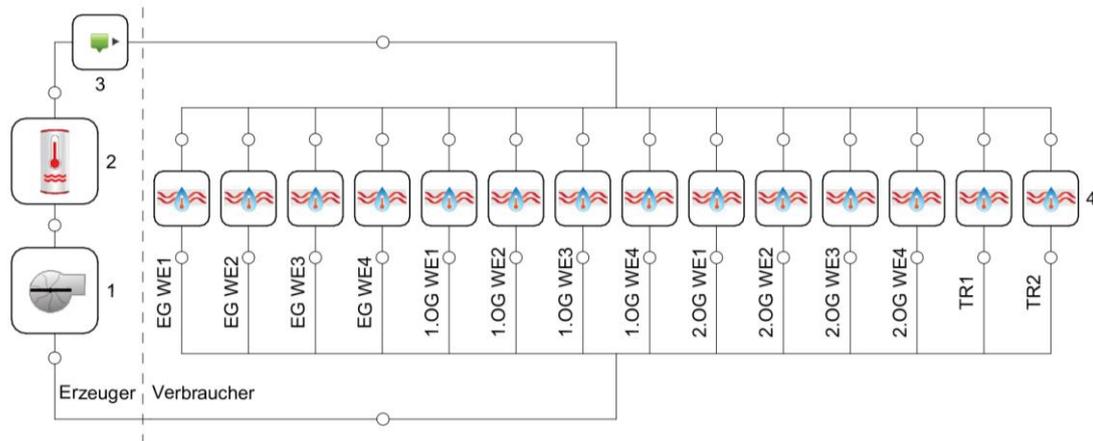
Nach Kölsch bezieht sich Gleichung 1 allein auf den Luftwechsel in der Konstruktionsebene und nicht im gesamten Dachraum. Deshalb wurde für  $V$  das gesamte Dachvolumen von  $660,72 \text{ m}^3$ , für  $A_{\text{opening}}$  jedoch nur die Öffnungsflächen an Traufen und First – das heißt, vier Luftspalte je  $3 \text{ cm}$  Breite über die gesamte Längsseite des Gebäudes ( $3,72 \text{ m}^2$ ) – angesetzt. Für die Windgeschwindigkeit  $W$  wurde der Durchschnittswert von  $4,24 \text{ m/s}$  des nächstgelegenen Messstandortes Buttelstedt und des Jahres 2020 verwendet [58]. Aus diesen Abgaben ergibt sich eine ausschließlich auf Infiltration beruhende Luftwechselrate von  $85,86 \text{ h}^{-1}$  für das hinterlüftete ungedämmte Kaltdach.

### 2.2.5 Heizsystem

Wie bereits erwähnt, verfügt das Beispielgebäude in Großobringen über eine Gaszentralheizung. In Deutschland beginnt die Heizperiode üblicherweise zum 1.10. und endet zum 30.04. des Folgejahres [59]. Je nach Klimaregion und Jahr kann sie jedoch früher beginnen oder länger andauern, denn eine gesetzliche Regelung gibt es nicht. Aufgrund der verwendeten Klimadaten (Kapitel 2.2.7) wurde die Heizperiode um je zwei Wochen zu Beginn und Ende verlängert. Mithin beginnt sie am 15.09. und endet am 15.05. des Folgejahres [60]. Die Temperatur-Untergrenze der Wohneinheiten wurde entsprechend der DIN 4108-2 [53] auf  $20^\circ\text{C}$  festgelegt. Alle Wohneinheiten aber auch die Treppenträume wurden mit Heizkörpern ausgestattet, um das Bestandgebäude nachzubilden. Für die, laut besagter Norm, niedrig beheizten Treppenträume wurde die untere Grenztemperatur während der Heizperiode auf  $14^\circ\text{C}$  festgelegt.

Das Grundgerüst eines fluid-basierten Heizsystems in OpenStudio bildet der Anlagenkreislauf bzw. *Plant Loop*. Er verbindet alle Komponenten der Anlage

miteinander – gleichsam wie das Rohrsystem des Wärmeträgers in der Realität. Verschiedene Fluide können als Energieträger ausgewählt werden, darunter Ethylen- und Propylenglykol aufgrund ihrer Frostschutzeigenschaften, Wasserdampf und Wasser, wobei letzteres verwendet wurde. Auf einer Seite des Kreislaufs, der *Supply Side*, befinden sich die erzeugenden Komponenten – auf der anderen Seite, der *Demand Site*, die verbrauchenden Komponenten. Über die Knotenpunkte können weitere Elemente in Reihe hinzugefügt werden, wie Abbildung 10 zeigt.



**Abbildung 10** Heizkreislauf mit den Komponenten: Pumpe (1), Brennwertheizung (2), Sollwertgeber (3) und Sockenheizungen (4)

Die folgenden Komponenten sind neben den Erzeugern und Verbrauchern obligatorisch: mindestens eine Pumpe zur Beförderung des Fluids und ein Sollwertgeber, der die Fluid-Temperatur kontrolliert. Alternativ können auch andere Kontrollgrößen, bspw. der Massendurchfluss, gewählt werden. Kernstück der Anlage bildet die Brennwertheizung. Diese kann entweder durch das Eingabeobjekt *Water Heater Mixed* oder *Stratified* simuliert werden. Bei dem *Water Heater Mixed*, dem Wärmerezeuger mit durchmischtem Wassertank, wird die Tanktemperatur durch nur einen Knotenpunkt beschrieben. Das komplexere Objekt *Water Heater Stratified* simuliert hingegen differenzierte Temperaturschichten im Tank, die mithin durch mehrere Knotenpunkte beschrieben werden müssen. Aufgrund seiner Komplexität erfordert dieses Objekt deutlich mehr Eingaben, unter anderem die Beschreibung der Quellanschlüsse. Aus diesen Gründen wurde der vereinfachte Wärmerezeuger *Water Heater Mixed* verwendet. Beide Eingabeobjekte berücksichtigen Umgebungsverluste. Diese gehen mit 6 W je Kelvin Temperaturdifferenz zwischen Tankfüllung und Umgebungsluft in die Energiebilanz der thermischen Zone „Keller“ ein, in der sich das Objekt befindet. Des Weiteren wurden die parasitären Lasten, die während des Betriebs auftreten berücksichtigt. Gemäß den Standardeinstellungen in OpenStudio verbrauchen diese 2562 W der Brennstoffenergie. Diese Verluste wurden bei dem jährlichen Brennstoffbedarf des *Water Heater Mixed* berücksichtigt.

Als Energiequelle wurde entsprechend dem Bestandsgebäude Erdgas gewählt. Das System kann zyklisch oder modulierend betrieben werden. Bei einem zyklischen Betrieb schaltet sich der Brenner entweder ein, wenn die Tanktemperatur unter die Sollwerttemperatur sinkt oder aus, wenn die Temperatur des Tanks erreicht ist. Bei einem modulierenden Betrieb schwankt die Heizleistung zwischen einem Maximal-

und Minimalwert. Da die meisten Systeme zyklisch arbeiten, wurde dieses Prinzip verwendet [46, 54]. Die Berechnung des Tankvolumens erfolgte automatisch.

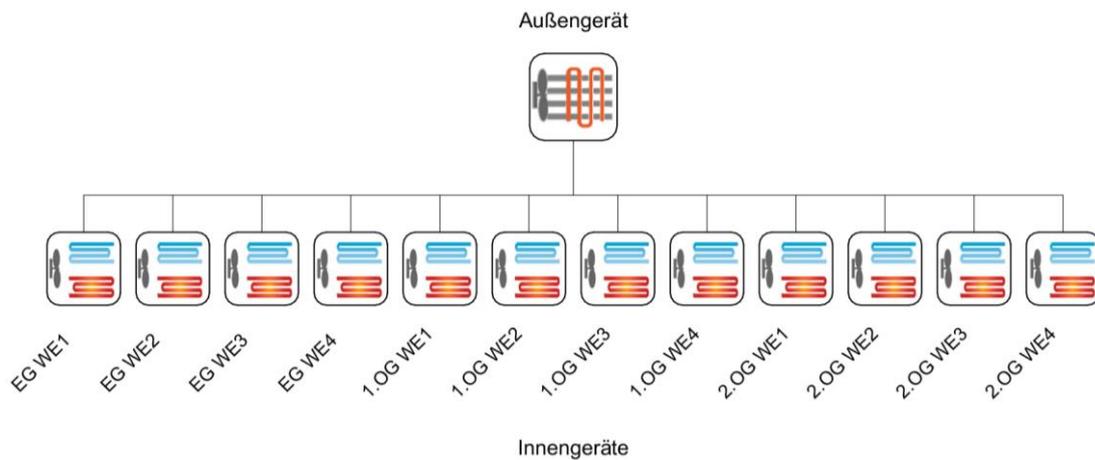
Die Brennwerttherme versorgt die wasserbasierten Sockelheizungen (*Baseboard Radiant Convective Water*) in den Wohneinheiten und Treppenträumen. Obwohl dieser Heizungstyp im Bestand nicht verbaut ist, eignete sich das Eingabeobjekt für die Simulation, denn es berücksichtigt die konvektive und Strahlungswärmeübertragung auf Personen und Umgebungsflächen [54]. Die meisten Simulationsprogramme vernachlässigen den Anteil der Strahlungswärme in den Bilanzgleichungen – EnergyPlus hingegen nicht [61]. Somit steigt die Genauigkeit der Oberflächenwärmebilanzen [46]. Neben der Sockelheizung verfügbar sind Hoch- und Niedertemperaturmodelle, die elektrisch oder gasbetriebene Heizgeräte oder Fußbodenheizungen mit variablem oder konstantem Durchfluss simulieren können [46]. Das Eingabeobjekt *Baseboard Radiant Convective Water* wurde jedoch von erfahrenen Nutzer:innen der Software empfohlen. Die Strahlungswärme wurde mit einem Anteil von 40% mit Orientierung an Glieder- und Plattenheizkörpern angegeben [62]. 30% der Strahlungswärme gingen entsprechend den Standardeinstellungen auf Personen über, der übrige Anteil auf die geometrisch sichtbaren Oberflächen. Die mittlere Durchflusstemperatur betrug 55°C und der Bemessungs-Massenstrom 0,063 kg/s (Standard). Die Modelle von EnergyPlus sind noch nicht in der Lage, die Wärmespeicherung im Heizkörper selbst zu berücksichtigen. Deshalb wirkt sich das System nur auf die thermische Zone aus, wenn es tatsächlich in Betrieb ist [61].

Die im Bestand über einen zusätzlichen Wärmetauscher gekoppelte Trinkwassererwärmung wurde nicht simuliert. Sie erfordert mehrere, miteinander verknüpfte Anlagenkreisläufe in OpenStudio, um die Versorgung mit Kalt- und Warmwasser sowie die Abwasserentsorgung abzubilden.

### 2.2.6 Kühlsystem

Das Beispielgebäude in Großbrünnen wird nicht aktiv gekühlt. Doch um auch den Einfluss der VertiKKA auf den Kühlbedarf bewerten zu können, wurde das Simulationsmodell um eine raumluftechnische Anlage (RLT-Anlage) ergänzt. EnergyPlus stellt verschiedene Vorlagen, sogenannte *Templates*, für die Konstruktion von HVAC-Systemen bereit – darunter das VRF-System (Variable Refrigerant Flow). Dieses System simuliert einen variablen Kältemittelvolumenstrom in Abhängigkeit vom Kühl- oder Heizwärmebedarf. Es wurde in das Simulationsmodell integriert, da es durch eine kompakte Vorlage in OpenStudio beschrieben werden kann. Somit war es nicht notwendig, weitere Komponenten, bspw. Pumpen, manuell hinzuzufügen, einzustellen und zu verknüpfen. VRF-Anlagen werden üblicherweise in Gebäuden mit gewerblicher Nutzung verbaut. Sie kommen aber auch in fortschrittlichen Wohnungsbauten zum Einsatz. Die Systeme arbeiten nicht wie klassische RLT-Anlagen, welche die Außenluft temperieren, filtern und entfeuchten, um sie anschließend dem Innenraum zuzuführen. Stattdessen strömt ein Kältemittel von einem Außengerät durch Kupferrohre zu den Klimageräten der Räume und kühlt dort die Innenluft (Abbildung 11). Wie bereits angedeutet, kann eine VRF-Anlage auch

heizen. Diese Funktion wurde jedoch deaktiviert, da der Heizwärmebedarf bereits durch die Gaszentralheizung abgedeckt wurde. In OpenStudio wird das Außengerät als *Air Conditioner* bezeichnet – die Innengeräte heißen *Terminal Units*.



**Abbildung 11** Kompaktes VRF-Kühlsystem mit zentralem Außengerät und Innengeräten

Das in OpenStudio integrierte Klimagerät arbeitet mit einer Wärmepumpe (mit Wärmerückgewinnung) und basiert auf einem Systemkurven-Modell [54]. Die Systemkurven beschreiben unterschiedliche Drücke und Luftströme, die für den Betrieb erforderlich sind. Die VRF-Anlage wurde nur in der Kühlperiode, sprich vom 16.05. bis 14.09., eingeschaltet. Die Brutto-Kühlleistung sowie die Luftfördermenge der Endgeräte wurden automatisch kalkuliert. Wie aus Abbildung 11 ersichtlich, wurden alle Wohneinheiten mit einem Innengerät versehen. Ihre Leistung wird über die Thermostate in den zugehörigen thermischen Zonen reguliert. Die DIN EN 15251 [63] schreibt zulässige Temperaturgrenzen für die Kühlperiode vor. Unter der Annahme, dass das Beispielgebäude der Kategorie II für renovierte Gebäude zuzuordnen ist, wird eine Innenraumtemperatur von 23 bis 26°C für die Auslegung von RLT-Anlagen empfohlen. Wie bereits in Kapitel 2.2.4 erwähnt, kann in thermischen Gebäudesimulationen laut DIN 4108-2 [53] ein erhöhter Tag- und Nachluftwechsel ab dem Überschreiten einer Innenraumtemperatur von 23°C angesetzt werden. Auf Grundlage dieser Angaben wurde der Wert von 23°C als Temperatur-Obergrenze in der Kühlperiode verwendet.

Viele Eigenschaften des Heiz- und Kühlsystems werden durch EnergyPlus automatisch bemessen. Die Bemessung erfolgt anhand sogenannter Auslegungstage, den *Design Days*, die obligatorisch für die Dimensionierung von HVAC-Systemen sind. Sie beschreiben die extremen Wetterbedingungen eines Jahres – Lufttemperatur, Luftfeuchte, Luftdruck, Wind, Niederschlag und Strahlung – üblicherweise für einen exemplarischen Sommer- und Wintertag [17]. Das DOE stellt sogenannte IWEC-Wetterdaten (International Weather for Energy Calculations) verschiedener Regionen zur Verfügung, die nach den Auslegungsbedingungen der American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) erstellt wurden [46]. Diese können im DDY-Format heruntergeladen und in OpenStudio integriert werden. Ausgewählt wurden die Auslegungstage für Frankfurt am Main, Hessen [64].

## 2.2.7 Wetterdaten

Die Wetterdaten sind im EPW-Format in OpenStudio bzw. EnergyPlus einzubinden [46]. Die Datensätze können – wie die Auslegungstage – für verschiedene Regionen heruntergeladen [64] oder selbst erstellt werden. Dabei hilft die Anwendung Elements, welche tabellarisch eingegebene Standort- und Klimadaten in eine EPW-Datei konvertiert.

The screenshot shows the Elements application interface. At the top, there is a menu bar with 'File', 'Edit', 'Tools', 'View', 'Window', and 'Help'. Below the menu bar, there are input fields for 'Site Name' (with a 'City Name' label), 'Latitude [degrees]' (0), 'Longitude [degrees]' (0), 'Time Zone' (0), and 'Elevation [m]' (0). There are 'Header' and 'Chart' buttons on the right. Below these fields, there are 'Tools' buttons: 'Offset', 'Scale', 'Normalize', and 'Normalize By Month'. A 'Variables to Hold Constant' dropdown menu is also visible. The main part of the interface is a table with the following data:

Date/Time	Dry Bulb Temperature [C]	Wet Bulb Temperature [C]	Atmospheric Pressure [kPa]	Relative Humidity %	Dew Point Temperature [C]	Global Solar [Wh/m <sup>2</sup> ]	Normal Solar [Wh/m <sup>2</sup> ]	Diffuse Solar [Wh/m <sup>2</sup> ]	Wind Speed [m/s]
2013/01/01 @ 00:00:00	15	9.67	101.33	50	4.69	0	0	0	0
2013/01/01 @ 01:00:00	15	9.67	101.33	50	4.69	0	0	0	0
2013/01/01 @ 02:00:00	15	9.67	101.33	50	4.69	0	0	0	0
2013/01/01 @ 03:00:00	15	9.67	101.33	50	4.69	0	0	0	0

**Abbildung 12** Bedienoberfläche der Hilfs-Anwendung Elements

Schließlich simuliert EnergyPlus mit den in Abbildung 12 erkennbaren Parametern. Nicht verfügbare Parameter, wie die Feuchtkugeltemperatur, kalkuliert Elements automatisch, indem andere Parameter, bspw. die Trockenkugeltemperatur und der Luftdruck, konstant gehalten werden. Eingegeben wurden die Trockenkugeltemperatur (Lufttemperatur), der Luftdruck, die relative Luftfeuchte, die Globalstrahlung und die Windrichtung. Für die Simulationen wurden verschiedene Wetterdatensätze konvertiert:

1. Die Wetterdaten der Jahre 2018 bis 2020 des ca. 4,7 km entfernten Standortes Buttstedt [58], um das Referenzgebäude mit den tatsächlichen Verbrauchsdaten derselben Jahre abzugleichen.
2. Die quadratkilometergenauen Wetterdaten des Testreferenzjahres 1995 bis 2012 mit den Bezugskoordinaten 51,0291° N, 11,3360° O [65] für alle weiteren Simulationen, um die Allgemeingültigkeit der Ergebnisse zu erhöhen.

## 2.2.8 Testsimulationen

Die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Simulationseinstellungen wurden zur besseren Übersicht in Tabelle 1 noch einmal zusammengefasst.

**Tabelle 1** Übersicht der Simulationseinstellungen des Referenzmodells

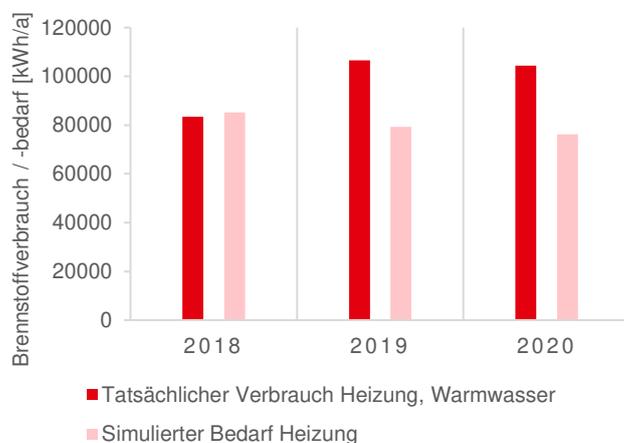
<b>Standort</b>				
<b>Breitengrad</b>	<b>Längengrad</b>	<b>Höhe ü. NN</b>	<b>Zeitzone</b>	
51,0291°	11,3360°	231 m	UTC+1	
<b>Wetterdaten</b>				
Von lokaler Wetterstation (Buttelstedt) oder Testreferenzjahr				
<b>Thermische Zonen</b>				
<b>Raumtyp</b>	<b>Personenwärme</b>	<b>Geräte und Beleuchtung</b>	<b>Luftwechsel</b>	<b>Thermostat Heizen / Kühlen</b>
Wohneinheit	2,46 W/m <sup>2</sup> (WE1,2) 3,13 W/m <sup>2</sup> (WE3,4)	1,37 W/m <sup>2</sup>	0,5 h <sup>-1</sup>	20°C / 23°C
Treppenraum	-	-	0,5 h <sup>-1</sup>	14°C
Keller	-	-	0,5 h <sup>-1</sup>	-
Dach	-	-	86 h <sup>-1</sup>	-
<b>Heizsystem</b> (15.09. – 15.05.)				
<b>Komponenten</b>	<b>Brennstoff</b>	<b>Durchflusstemperatur</b>	<b>Parasitäre Lasten</b>	
<i>Plant Loop mit Pump Constant Speed, Water Heater Mixed, Setpoint Manager (Temperatur), Baseboard Radiant Convective Water (14 x)</i>	Erdgas	55°C	2562 W (aktiv)	
<b>Kühlsystem</b> (16.05. – 14.09.)				
<b>Komponenten</b>				
VRF-System mit <i>Air Conditioner, VRF Zone Terminal (12 x)</i>				

Um die Simulationseinstellungen zu prüfen, wurde das Referenzmodell mit den vorliegenden Verbrauchsdaten für drei Jahre verglichen. Die Verbrauchsdaten beziehen sich auf die gesamte Liegenschaft, bzw. alle drei baugleichen Wohngebäude, und wurden daher durch die Gebäudeanzahl geteilt. Somit ergeben sich die jährlichen Brennstoffverbräuche der Gaszentralheizung inklusive Warmwassererzeugung laut Tabelle 2.

**Tabelle 2** Jährlicher Brennstoffverbrauch der Gaszentralheizung mit Trinkwassererwärmung für das Bestandsgebäude

Jahr	Erdgas Heizwert [kWh]
2018	83416
2019	106543
2020	104481
Durchschnitt	98147

98147 kWh/a entsprechen bezogen auf 745 m<sup>2</sup> Wohnfläche einem Verbrauch von 132 kWh/m<sup>2</sup>a. Um den simulierten Brennstoffbedarf mit dem tatsächlichen Verbrauch vergleichen zu können, wurden die Simulationen des Referenzgebäudes zunächst mit den lokalen Wetterdaten der Jahre 2018 bis 2020 [58] durchgeführt. Abbildung 13 zeigt die Ergebnisse im Vergleich zu den tatsächlichen Verbräuchen.

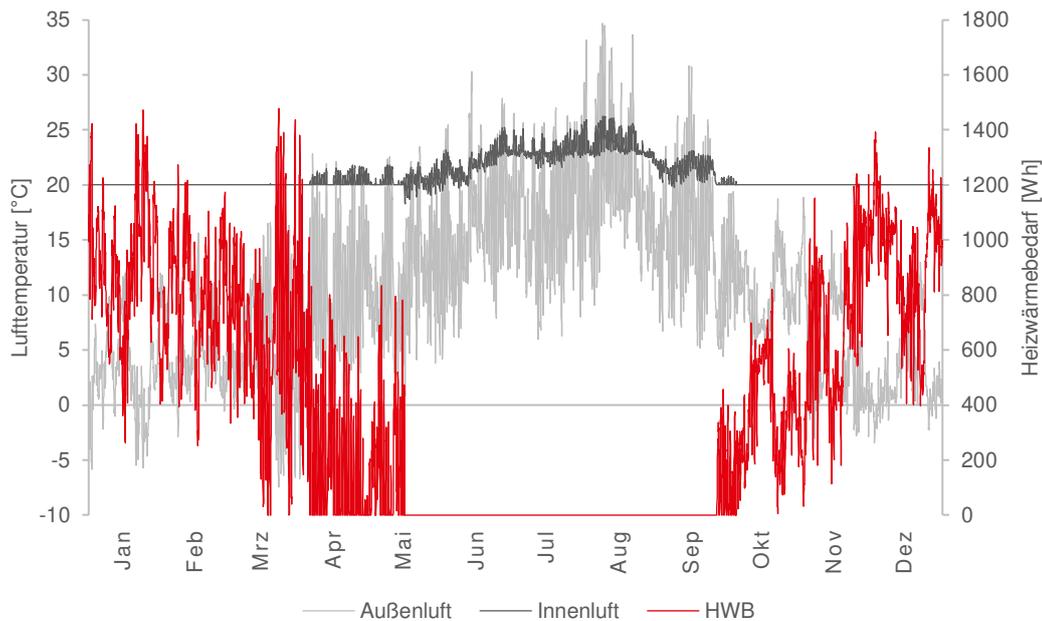


**Abbildung 13** Vergleich der simulierten Brennstoffbedarfe mit den tatsächlichen Brennstoffverbräuchen der Jahre 2018 bis 2020

Mit durchschnittlich 108 kWh/m<sup>2</sup>a liegen die simulierten Bedarfe ca. 18% unter den tatsächlichen Durchschnittsverbräuchen von 132 kWh/m<sup>2</sup>a. Während der simulierte Brennstoffbedarf bis 2020 leicht sinkt und mit dem Anstieg der jährlichen Durchschnittstemperaturen 9,97°C auf 10,07°C [58] korreliert, verhält sich der tatsächliche Verbrauch umgekehrt. In der Realität kann ein alleiniger Zusammenhang mit den Außentemperaturen nicht beobachtet werden, da der jährliche Verbrauch von vielen weiteren, variablen Faktoren abhängt. Zu diesen zählen unter anderem die Belegung der Wohnungen, das Heiz- und Lüftungsverhalten der Bewohnenden, die Nutzungszeiten, interne Wärmequellen und die Effizienz des gesamten Heizsystems. Eine vollkommene Übereinstimmung von simuliertem und tatsächlichem Verbrauch war daher nicht zu erwarten. Zudem war die Trinkwassererwärmung nicht Bestandteil der Simulationen. Laut Felsmann und Schmidt [66] entspricht die Warmwasserbereitung abhängig vom Zustand der thermischen Hülle 17 bis 28% des Heizenergieverbrauchs. Wird diese Tatsache berücksichtigt, stellen die Simulationen eine hinreichende Annäherung an die Realität dar.

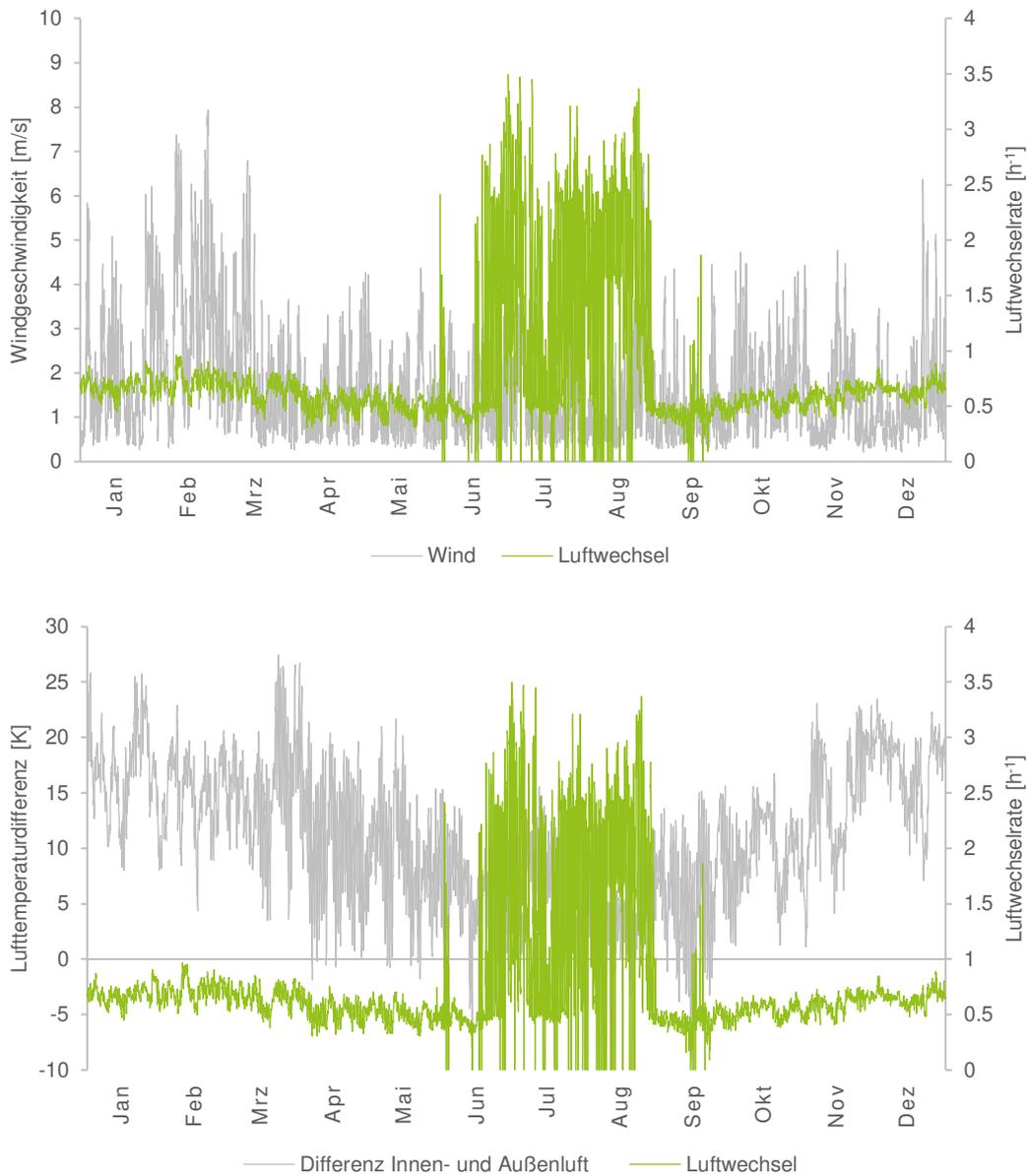
Abbildung 14 zeigt den Heizwärmebedarf in Abhängigkeit vom Jahresverlauf der Außentemperaturen exemplarisch für die Wohneinheit 1 im ersten Obergeschoss. Der Heizwärmebedarf ist die Wärmeenergie, die der thermischen Zone zugeführt

werden muss, um die Thermostat-Temperatur aufrecht zu erhalten [51, S. 72]. Sowohl durch den Verlauf des Heizwärmebedarfs als auch den der Innenraumtemperatur zeichnet sich die Heizperiode deutlich ab. Mit zunehmenden Außenlufttemperaturen im April und Mai steigen auch die Innenraumtemperaturen über die des Thermostats. Ende Mai tritt noch einmal eine kühlere Periode auf, in der die Innenraumtemperatur in Folge der bereits abgeschalteten Heizung unter die Thermostat-Temperatur sinkt. Im Sommer steigt die Innenraumtemperatur trotz des erhöhten Tag- und Nachtluftwechsels auf über 26°C an.



**Abbildung 14** Jahresverlauf des Heizwärmebedarfs von WE1 1.OG in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur

Wie in Kapitel 2.2.4 beschrieben, wurden die angesetzten Luftwechselraten von 0,5 bzw. 2,0 und 3,0 h<sup>-1</sup> abhängig von der Windgeschwindigkeit und Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Innenraum dynamisch kalkuliert und sind deshalb nicht konstant. Die Auswirkungen werden in Abbildung 15 deutlich. Weitere Informationen zur dynamischen Berechnung der Luftwechselrate enthält Kapitel 2.3.5.

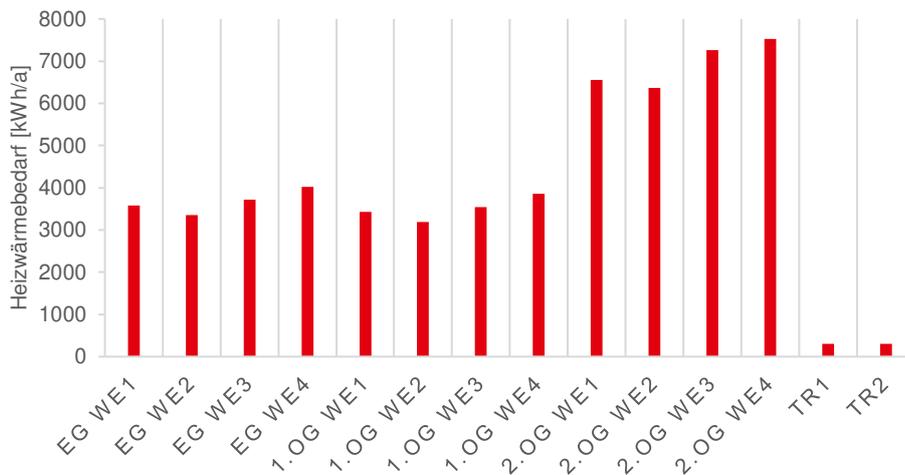


**Abbildung 15** Luftwechselrate von WE1 1.OG in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit (oben) und Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Innenluft (unten)

Abbildung 16 zeigt die jährlichen Energieeinträge durch interne Wärmequellen. Wie bereits erwähnt, wurden die Wärmeeinträge für Geräte und Beleuchtung sowie Personen als konstant angesetzt. Daraus ergibt sich eine Personenwärme von 1226 kWh pro Jahr für die Wohneinheiten 1 und 2 bzw. von 1840 kWh pro Jahr für die Wohneinheiten 3 und 4. Die Wärmeabgabe durch Geräte und Beleuchtung liegt, abhängig von der Fläche, zwischen 749 und 900 kWh pro Jahr.



**Abbildung 16** Jährliche Wärmeinträge durch interne Wärmequellen der thermischen Zonen



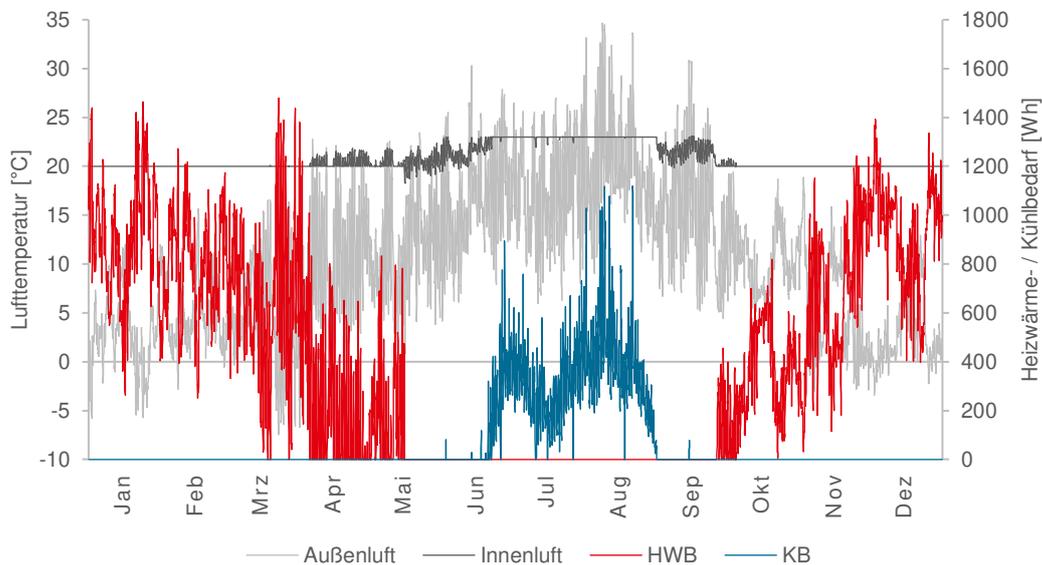
**Abbildung 17** Jährlicher Heizwärmebedarf der thermischen Zonen

Aus Abbildung 17, die den jährlichen Heizwärmebedarf der einzelnen thermischen Zonen zeigt, ist Folgendes ersichtlich:

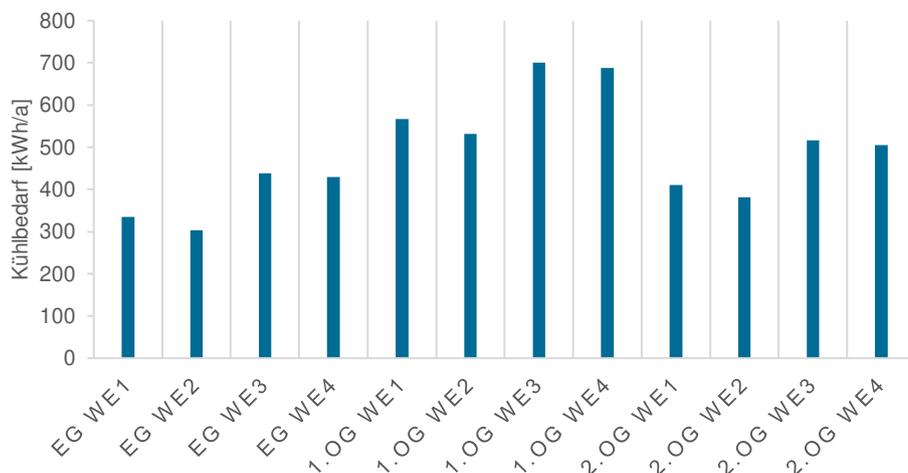
1. Die Wohnungen des ersten Obergeschosses müssen aufgrund der Lage zwischen den übrigen thermischen Zonen am wenigsten beheizt werden.
2. Das zweite Obergeschoss muss aufgrund der niedrigen Durchschnittstemperatur des Dachraumes im Winter am stärksten beheizt werden.
3. Die innenliegenden Wohneinheiten 2 und 3 müssen weniger als die außenliegenden Wohneinheiten 1 und 4 beheizt werden.
4. Die größeren Wohneinheiten 3 und 4 (67 m<sup>2</sup>) haben einen höheren Heizwärmebedarf als für die kleineren Wohneinheiten 1 und 2 (57 m<sup>2</sup>).
5. Die Treppenträume müssen aufgrund der geringen Thermostat-Temperatur (14°C) am wenigsten beheizt werden.

Damit nicht nur die Auswirkungen der VertiKKA auf den Heizwärme-, sondern auch auf den Kühlbedarf bewertet werden können, wurde das Referenzmodell, wie in Kapitel 2.2.6 beschrieben, um ein Kühlsystem ergänzt. Dieses ist in der Sommerperiode von Mitte Mai bis Mitte September aktiv und begrenzt die Innenraumtemperatur auf 23°C, wie Abbildung 18 zeigt. Der Kühlbedarf ist analog

zum Heizwärmebedarf zu verstehen und beschreibt die Energiemenge, die nötig ist, um eine thermische Zone auf die Thermostat-Temperatur zu kühlen. Da es sich bei beiden Größen um systemunabhängige Bedarfe handelt, die allein zur Aufrechterhaltung der Innenraumtemperatur verwendet werden, können Heizwärme- und Kühlbedarf unter dem Begriff Nutzenergiebedarf zusammengefasst werden.



**Abbildung 18** Jahresverlauf des Heizwärme- und Kühlbedarfs von WE1 1.OG in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur



**Abbildung 19** Jährlicher Kühlbedarf der thermischen Zonen

Abbildung 19 enthält folgende Informationen und teilweise Schlussfolgerungen:

1. Die Wohnungen des ersten Obergeschosses müssen aufgrund der Lage zwischen den übrigen thermischen Zonen am stärksten gekühlt werden.
2. Das Erdgeschoss muss aufgrund der geringen Durchschnittstemperatur des Kellers im Sommer (im Vergleich zum Dach, das an das zweite Obergeschoss angrenzt) am wenigsten gekühlt werden.
3. Die innenliegende Wohneinheit 2 muss weniger als die gleichgroße außenliegende Wohneinheit 1 gekühlt werden und die innenliegende

Wohneinheit 3 muss stärker als die gleichgroße außenliegende Wohneinheit 4 gekühlt werden.

4. Die größeren Wohneinheiten 3 und 4 (67 m<sup>2</sup>) haben einen höheren Kühlbedarf als für die kleineren Wohneinheiten 1 und 2 (57 m<sup>2</sup>).

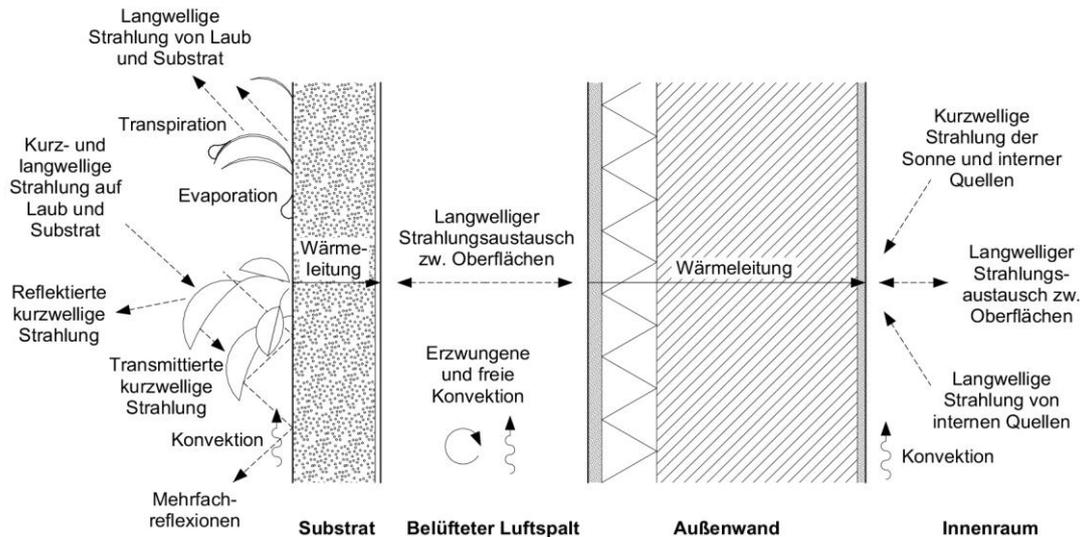
Die Treppenträume wurden nicht gekühlt. Der Kühlbedarf ist wesentlich geringer als der Heizwärmebedarf. Das liegt unter anderem an den klimatischen Bedingungen in Mitteleuropa, der geringeren Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Innenluft im Sommer verglichen mit dem Winter und den Balkonen, welche die größten, nach Süden orientierten Fensterflächen verschatten. Zudem ist die Kühlperiode, ganzjährig betrachtet, zwei Monate kürzer als die Heizperiode.

## 2.3 Simulation einer wandgebundenen Fassadenbegrünung

Im vorangegangenen Unterkapitel wurden die Simulationsergebnisse des Referenzgebäudes mit den tatsächlichen Verbrauchsdaten aus drei Jahren abgeglichen. Da das Referenzmodell die Realität für alle weiteren Simulationen hinreichend genau abbildete, kann mit der Modellierung der Fassadenbegrünung fortgefahren werden. Zur besseren Nachvollziehbarkeit der Folgekapitel wird in diesem Abschnitt zunächst auf die grundlegenden Wärmetransportmechanismen an einer hinterlüfteten, wandgebundenen Grünfassade eingegangen, bevor im Anschluss das in EnergyPlus integrierte Green-Roof-Modell näher betrachtet wird. Dieses Modell wurde durch einige wenige Autor:innen zur vertikalen Anwendung modifiziert. Auch wenn diese Anpassungen aufgrund ihrer Komplexität nicht Gegenstand dieser Arbeit sind, stellen sie einen wichtigen Beitrag zur Simulation von Grünfassaden dar und werden daher eingehender betrachtet. Anschließend werden die Einstellungen zur Simulation der VertiKKA vorgestellt. Diese betreffen nicht nur das vertikal angewandte Green-Roof-Modell, sondern auch die hinterlüftete Fassade. Luftwechsel und konvektiver Wärmeübergangskoeffizient wurden zu Testzwecken mit unterschiedlichen Einstellungen simuliert. Anhand der Testsimulationen konnten schließlich die richtigen Einstellungen für die Hauptsimulationen gewählt werden.

### 2.3.1 Grundlegende Wärmetransportmechanismen

Da der Einfluss einer Grünfassade, speziell der VertiKKA, auf den Nutzenergiebedarf untersucht werden soll, stellt sich folgende Frage: Welche klimatischen und physikalischen Effekte, die diese Bedarfe potenziell senken können, treten an der begrünten Wand auf? Der bedeutendste und gleichzeitig am einfachsten zu simulierende Effekt ist der Verschattungseffekt [15, 67]. Verschattung reduziert die Außenoberflächentemperatur und somit den Wärmestrom durch die Wand nach innen. Die kühleren Innenseiten der Wand geben weniger Wärme an den Innenraum ab, wodurch dessen Temperatur im Sommer schließlich ebenfalls sinkt [67–69]. Des Weiteren schützt die Grünfassade, die als vorgehängte, hinterlüftete Fassade zu verstehen ist, die Außenwand vor starkem Wind. Der Luftspalt bildet eine Pufferzone mit reduziertem Luftstrom, in der die Wand langsamer auskühlt. Dieser Effekt ist abhängig von der Belüftung des Luftspalts, die im weiteren Verlauf über die Luftwechselrate beschrieben wird. Bei fehlender Sonneneinstrahlung – wenn die Verschattung keine Rolle spielt – kann dieser Puffereffekt den Heizwärmebedarf im Winter senken [70]. Einen geringeren Einfluss hat die thermische Speichermasse der Substratschicht und die sogenannte Evapotranspiration [11]. Diese beschreibt den Wasserverlust von Pflanzen und Substrat. Wird das Substrat durch die Sonneneinstrahlung erwärmt, verdunstet vermehrt Feuchtigkeit (Evaporation). Gleichzeitig transpirieren die Blätter der Pflanzen über die Spaltöffnungen (Stomata) an der Blattunterseite, um sich über die sogenannte Verdunstungskälte zu kühlen. Abbildung 20 zeigt neben diesem Prozess alle weiteren, die für die Wärmebilanz der Grünfassade und Außenwand relevant sind.



**Abbildung 20** Die für die Wärmebilanz wichtigsten physikalischen Prozesse an der Grünfassade und Außenwand

Die Blätter der Pflanzen absorbieren die langwellige Sonneneinstrahlung nahezu vollständig. Der thermische Absorptionskoeffizient beträgt daher annähernd 1 [68, 71]. Die kurzwellige Strahlung wird anteilig absorbiert, reflektiert (abhängig von der Albedo) oder transmittiert durch die Blattfläche und trifft auf das Substrat auf. Der Anteil der Sonneneinstrahlung, der das Substrat tatsächlich erreicht, ist nicht nur vom Transmissionsgrad der Blätter für kurzwellige Strahlung, sondern auch vom Bedeckungsgrad sowie vom Blattflächenindex (LAI = Leaf Area Index) abhängig [54]. Der Bedeckungsgrad ist dimensionslos und beschreibt die Laubfläche, die für die eintreffende Strahlung „sichtbar“ ist, als Bruchteil von 1. Der übrige Teil entspricht der „sichtbaren“ Bodenoberfläche. Der LAI beschreibt hingegen das Verhältnis von gesamter Blattfläche zur Bodenoberfläche und ist daher auch dimensionslos. Bei dieser Größe geht es vielmehr um die Schichten, die von der Sonneneinstrahlung durchdrungen werden müssen, um den Boden zu erreichen. Zur Vereinfachung wird die Laubschicht als ein großes Blatt, das den Boden zu einem gewissen Teil bedeckt, betrachtet. Um den LAI weiterhin einzubeziehen, wird der Bedeckungsgrad direkt durch den LAI charakterisiert [54]. Die lang- und kurzwellige Strahlung, die das Substrat erreicht, wird zum einen absorbiert und zum anderen reflektiert. Innerhalb des Blätterdachs können so auch Mehrfachreflexionen auftreten. Die aufgenommene Wärmeenergie geben Laub und Substrat nicht nur über Evaporation (latente Wärme) wieder an die Umgebung ab, sondern auch über Emission (langwellige Strahlung) und Konvektion (sensible Wärme) [54]. Da die Blätter der Pflanzen gute Absorber langwelliger Strahlung sind, sind sie nach dem Kirchhoffschen Gesetz auch ebenso gute Emittier [68]. Die Teilchen der Umgebungsluft tauschen an der Grenzfläche zum Substrat – entsprechend dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik – Wärme mit dessen Teilchen aus. Diese Wärme binden die Teilchen als innere Energie und transportieren sie durch das Luftvolumen innerhalb des Blätterdachs und aus ihm heraus, bis sie sie an anderer Stelle wieder abgeben. Wie viel Energie aufgenommen werden kann, hängt von der Temperaturdifferenz zwischen Substrat und angrenzender Luftschicht ab. Die Konvektion kann frei oder erzwungen sein. Freie

Konvektion entsteht durch Dichteunterschiede im Fluid, die auf Temperaturdifferenzen zurückzuführen sind. Erzwungene Konvektion wird hingegen durch Druckunterschiede, wie in diesem Fall durch Wind, erzeugt. Während im in diesem Beispiel nur Mischkonvektion stattfindet (frei und erzwungen), kann im Innenraum ausschließlich freie Konvektion vorhanden sein. Die Intensität des Wärmeübergangs an der Grenzfläche wird durch den Wärmeübergangskoeffizienten  $h$  beschrieben. Er hängt von zahlreichen Parametern ab, die allgemein über die dimensionslose Nußelt-Zahl  $Nu$  beschrieben werden können. Dann gilt für den mittleren Wärmeübergangskoeffizienten der allgemeine Zusammenhang:

$$h = \frac{Nu \cdot \lambda}{\tilde{L}} \quad 2$$

Hier ist  $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit und  $\tilde{L}$  die charakteristische Länge. Der Wärmeübergangskoeffizient setzt sich aus einem konvektiven Anteil  $h_c$  und einem Strahlungsanteil  $h_r$  zusammen:

$$h = h_c + h_r \quad 3$$

Bei Luft wird der Strahlungsanteil aufgrund ihrer geringen Wärmeleitfähigkeit vernachlässigt ( $h = h_c$ ). Daher bestimmt der konvektive Wärmeübergangskoeffizient  $h$  zusammen mit der Temperaturdifferenz zwischen Substrat (allgemein: Wand) und Umgebungsluft  $T_w - T_\infty$  die Wärmestromdichte an der Grenzfläche  $A$ :

$$\dot{q} := \frac{\dot{Q}}{A} = h(T_w - T_\infty) \quad 4$$

Da der Wärmeübergangskoeffizient von diversen Faktoren, wie beispielsweise der Orientierung und Rauigkeit der Oberfläche, abhängt, kann er nur schwer vorhergesagt werden [72, S. 177f]. Für den Wärmeübergang am Substrat spielt er jedoch eine wesentliche Rolle und wird daher in Kapitel 2.3.3 nochmals aufgegriffen.

Ein Teil der vom Substrat absorbierten Wärme wird durch dieses selbst und alle weiteren Masseschichten geleitet. Im Luftspalt kommt es zum Wärmeaustausch mit der Außenwand – einerseits über langwellige Strahlung und andererseits durch Mischkonvektion. Für den Wärmeübergang an den Grenzflächen spielt der eingangs erwähnte Luftwechsel eine wesentliche Rolle. Durch die Außenwand wird die Wärme schließlich ins Gebäudeinnere geleitet. Die Innenseite der Wand steht im Strahlungswärmeaustausch mit anderen geometrisch sichtbaren Oberflächen. Darüber hinaus ist sie unter Umständen auch der Sonneneinstrahlung, die durch Fenster einfällt, und der Strahlung von internen Wärmequellen ausgesetzt [54].

### 2.3.2 Das Green-Roof-Modell in EnergyPlus

Eine umfassende Betrachtung der Wärmebilanz einer Fassadenbegrünung mit Substrat stellt eine Herausforderung für Simulationssoftwares dar [73]. In den vergangenen 30 Jahren wurden zwar mehr als 35 numerische Wärme- und

Massetransportmodelle für Gründächer [22, 74–79], hingegen aber nur fünf Modelle für Grünfassaden entwickelt, die in Tabelle 3 genannt sind [22].

**Tabelle 3** Übersicht der bisher entwickelten Grünfassaden-Modelle

<b>Autor:innen</b>	<b>Jahr</b>	<b>Ort</b>	<b>Publikation</b>	<b>Modell und Software</b>
Malys et al. [20]	2014	Nantes, Frankreich	A Hydrothermal Model to Assess the Impact of Green Walls on Urban Microclimate and Building Energy Consumption	Selbst entwickelt, integriert in SOLENE-Microclimate
Scarpa et al. [15]	2014	Venedig, Italien	Modeling the Energy Performance of Living Walls: Validation Against Field Measurements in Temperate Climate	Selbst entwickelt
Davis und Hirmer [9]	2015	Exeter, Großbritannien	The Potential for Vertical Gardens as Evaporative Coolers: An Adaptation of the 'Penman Monteith Equation'	Selbst entwickelt
Djedjig et al. [80]	2015	La Rochelle, Frankreich	Analysis of Thermal Effects of Vegetated Envelopes: Integration of a Validated Model in a Building Energy Simulation Program	Selbst entwickelt, integriert in TRNSYS
He et al. [81]	2017	Shanghai, China	An Investigation on the Thermal and Energy Performance of Living Wall System in Shanghai Area	Selbst entwickelt

Die Modelle werden in der Regel aus eindimensionalen dynamischen Wärmebilanzen gewonnen. Diese beruhen auf der Finite-Differenzen- oder Finite-Volumen-Methode und werden numerisch gelöst [82]. Aufgrund ihrer Komplexität ist bisher keines der Modelle für eine Fassadenbegrünung in eine Gebäudesimulationssoftware implementiert worden [22, 28]. Zur Simulation von Gründächern entwickelte Sailor [74] das sogenannte Green-Roof-Modell und integrierte es in die Software EnergyPlus. Bei diesem Modell handelt es sich um eine Weiterentwicklung des Fast-All-Season Soil-Strength-Modells (FASST-Modell) aus dem Jahr 2004 von Frankenstein und König [83]. In Auftrag gegeben durch die U.S. Army Corps of Engineers sollte es ursprünglich die Fähigkeit des Bodens vorhersagen, bemannte Fahrzeuge und Personen zu tragen. Von Bedeutung waren dabei die Bodenfestigkeit und Oberflächenreibung, die vom Feuchtegehalt des Bodens in unterschiedlichen Schichten abhängen [83]. Das Modell berechnet den Energie- und Wassertransport durch den Boden sowie den Wärme- und Feuchteausaustausch an den Grenzflächen zur Umgebung. In dem Energiebilanzmodell von Sailor [74] wird die Energiemenge auf die Laubschicht und den Boden aufgeteilt. Das Modell berücksichtigt [54]:

- den lang- und kurzwelligen Strahlungsaustausch innerhalb des Blätterdachs
- die Auswirkungen des Pflanzendachs auf die konvektive Wärmeübertragung
- die Evapotranspiration der Pflanzen und des Bodens
- die Wärmeleitung und -speicherung in der Bodenschicht

Bisher noch nicht implementiert sind:

- feuchteabhängige thermische Eigenschaften des Bodens
- die durch einen Phasenwechsel des Bodenwassers freigesetzte oder gewonnene Wärme
- der Wärmeaustausch durch Niederschlag
- der vertikale Wärmetransport durch Wasser im Boden

Im Folgenden werden die Energiebilanzen von Laub und Substrat eingehender betrachtet. Die Energiebilanz des Laubs ist allein auf Sailor [74] zurückzuführen, während die des Bodens durch das ursprüngliche FASST-Modell von Frankenstein und König [83] berechnet wird. Die Energiebilanz der Laubschicht wird von der Strahlungsenergie der Sonne dominiert und lautet, wie folgt:

$$F_f = \sigma_f [I_s^\downarrow (1 - \alpha_f) + \varepsilon_f (I_{ir}^\downarrow - \sigma T_f^4)] + \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_f + L_f \quad 5$$

$I_{s,ir}^\downarrow$  ist die einfallende kurz- bzw. langwellige Strahlung,  $\alpha_f$  die Albedo des Laubs und  $T_{f,g}$  die Laub- bzw. Bodentemperatur. Der erste Summand beschreibt die Absorption kurz- und langwelliger Strahlung  $I_s^\downarrow$  und  $I_{ir}^\downarrow$  in Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad  $\sigma_f$ . Ein Teil der eintreffenden kurzwelliger Strahlung wird abhängig von der Albedo der Blattoberfläche  $\alpha_f$  reflektiert. Die Absorption langwelliger Strahlung wird unter Berücksichtigung des Stefan-Boltzmann-Gesetzes berechnet.  $\sigma$  ist hier die Stefan-Boltzmann-Konstante mit  $5,699 \cdot 10^8 \text{ W/m}^2\text{K}^4$ . Der zweite Summand fasst die Mehrfachreflexionen langwelliger Strahlung innerhalb des Blätterdachs zusammen. Dabei ist  $\varepsilon_{f,g}$  der Emissionsgrad des Laubs bzw. Bodens und  $\varepsilon_1 = \varepsilon_g + \varepsilon_f - \varepsilon_g \varepsilon_f$ . Der übrige und überwiegende Teil der gesamten Strahlung wird absorbiert. Die Transmission kurzwelliger Strahlung wird hier vernachlässigt.  $H_f$  beschreibt die sensible Wärmestromdichte aufgrund von Konvektion und  $L_f$  die latente Wärmestromdichte – das heißt, die Wärmemenge, die durch die Transpiration der Blätter und die Verdunstung an der Blattoberfläche an die Umgebungsluft übergeht. Beide Ausdrücke sind komplexer und werden daher separat beschrieben:

$$H_f = (1.1LAI\rho_{af}C_{p,a}C_fW_{af})(T_{af} - T_f) \quad 6$$

Wie Gleichung 6 zeigt, ist die Übertragung sensibler Wärme von der Blattoberfläche auf die angrenzende Luftschicht abhängig von der Temperaturdifferenz  $T_{af} - T_f$ , der Windgeschwindigkeit innerhalb des Blätterdachs  $W_{af}$ , dem sogenannten Bulk-Transfer-Koeffizienten  $C_f$  des Laubs, den Eigenschaften der Umgebungsluft und dem LAI.  $C_{p,a}$  ist die spezifische Wärmekapazität der Luft mit  $1005,6 \text{ J/kgK}$  bei konstantem Druck. Die Multiplikatoren der Temperaturdifferenz ergeben formal den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten, der in Gleichung 4 beschrieben wurde. Er wird in Kapitel 2.3.3 noch einmal aufgegriffen. Die latente Wärmestromdichte wird beschrieben durch:

$$L_f = l_f LAI \rho_{af} C_f W_{af} r'' (m_{af} - m_{f,sat}) \quad 7$$

Dieser hängt unter anderem von der Wassermasse  $m_{af} - m_{f,sat}$  ab, die von der Luft noch aufgenommen werden kann.  $l_f$  ist die latente Verdunstungswärme. Sie beschreibt die Energiemenge, die erforderlich ist, um eine Masseinheit Wasser in Dampf umzuwandeln und verhält sich umgekehrt proportional zur Temperatur. Das heißt, je höher die Laubtemperatur ist, umso leichter geht die Umwandlung von Wasser in Dampf vonstatten. Die Wassermenge auf der Blattoberfläche hängt von der Transpiration der Pflanze ab. Die Stomata können sich je nach Intensität der Solarstrahlung, Wassergehalt im Boden und Dampfdruckdifferenz zwischen Blattinnerem und Umgebungsluft öffnen und schließen. Diese Effekte werden über den stomatären Widerstand beschrieben. Der aerodynamische Widerstand bildet die Gegenkraft ab, welche die auf der Blattoberfläche gebildete Grenzschicht aus Luft dem Feuchtigkeitsaustausch entgegensetzt. Das Verhältnis von aerodynamischem Widerstand zu Gesamtwiderstand wird durch den Faktor für Oberflächenfeuchte  $r''$  dargestellt.

Die Energiebilanz des Bodens wird durch seine thermischen Eigenschaften und seinen Feuchtegehalt beeinflusst. Auf den Boden trifft der Teil der Strahlung  $1 - \sigma_f$ , der nicht vom Laub abgeschirmt wird und nimmt dort Einfluss auf dessen Oberflächentemperatur. Diese schwankt umso weniger, je höher der LAI ist, denn der Bedeckungsgrad hängt direkt vom LAI ab. Die Gesamtbilanz des Bodens lautet analog zu der des Laubs:

$$F_g = (1 - \sigma_f) [I_S^\downarrow (1 - \alpha_g) + \varepsilon_g I_{ir}^\downarrow - \varepsilon_g T_g^4] - \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_g + L_g + \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial z} \quad 8$$

Während der überwiegende Teil der Bilanzgleichung analog zu der des Laubs (Gleichung 5) zu verstehen ist, drückt der letzte Summand die Wärmeleitung durch die Bodenschicht gemäß dem Fourierschen Gesetz aus. Dabei ist  $\lambda_g$  die Wärmeleitfähigkeit und  $z$  die Schichtdicke des Bodens. Die sensible Wärmestromdichte an der Grenzfläche zwischen Boden und Umgebungsluft wird beschrieben durch:

$$H_g = \rho_{ag} C_{p,a} C_h^g W_{af} (T_{af} - T_g) \quad 9$$

$C_h^g$  ist der Bulk-Transfer-Koeffizient für sensible Wärme. Er ergibt sich aus einer Linearkombination der Bulk-Transfer-Koeffizienten des Bodens und des Laubs und ist dimensionslos. Die latente Wärmestromdichte an der Grenzfläche zwischen Boden und Umgebung berechnet sich aus Gleichung 10:

$$L_g = l_g \rho_{ag} C_l^g W_{af} (m_{af} - m_g) \quad 10$$

Die Wärmebilanzgleichungen des Laubs und des Bodens sind Gleichungen vierter Ordnung. Um diese zu lösen, werden die Gleichungen linearisiert, bis sie folgende Form erhalten:

$$C_1^f + C_2^f T_g + C_3^f T_f = 0 \quad 11$$

$$C_1^g + C_2^g T_g + C_3^g T_f = 0 \quad 12$$

Die Koeffizienten  $C_{1,2,3}$  folgen aus der direkten Kombination der Gleichungen 5 und 8. Dieser letzte Gleichungssatz wird durch EnergyPlus gleichzeitig gelöst, um  $T_g$  und  $T_f$  zu erhalten.

### 2.3.3 Vertikale Anwendung des Green-Roof-Modells

Wie im vorigen Kapitel beschrieben, existiert zum aktuellen Zeitpunkt noch kein Fassadenbegrünungsmodell in einer Simulationssoftware. Eine Fassadenbegrünung kann deshalb nur auf zwei Arten simuliert werden: Das Green-Roof-Modell wird entweder ohne Modifikationen in der Vertikalen angewandt oder mit Hilfe eines zusätzlichen Codes (z.B. Erl, C++, Fortran) angepasst. Die vertikale Anwendung ohne Anpassungen bildet einige Effekte ebenso gut wie in der Horizontalen ab. Dazu zählen die Verschattung der Außenwand und die Windbarriere. Andere Effekte, die Fassadenbegrünungen von Dachbegrünungen unterscheiden, werden jedoch vernachlässigt. Mögliche Anpassungen für die vertikale Anwendung werden von den Autor:innen Dahanayake und Chow [28, 67], García et al. [22] und Arenghi et al. [68] beschrieben.

Dahanayake und Chow [67] untersuchten die Auswirkungen von Fassadenbegrünungen auf die Energiebilanz von Gebäuden in warmen Klimaregionen. Ihre Wärmebilanzgleichungen orientieren sich an dem FASST- [54, 74] aber auch an dem von Malys et al. [20] entwickelten Modell. Beide wurden bereits validiert. Der zusätzliche Code wurde in der in EnergyPlus integrierten einfachen Programmiersprache Erl verfasst und mit Hilfe des sogenannten *EMS Actuators* eingebettet. Er berechnet die Laubtemperatur  $T_f$  und die Boden- bzw. Substrattemperatur  $T_g$  für jeden Zeitschritt und überschreibt die durch das FASST-Modell berechneten Werte. Dahanayake und Chow [67] berechneten die latente Wärmestromdichte an Laub und Substrat nach Malys et al. [20]. Diese Autor:innen verwendeten für die Evapotranspiration den Penman-Monteith-Ansatz, der von der Food and Agriculture Organisation (FAO) [84] empfohlen wird. Dieser Ansatz beschreibt das Laub ebenfalls als eine einzige homogene Schicht und verbindet die für die Evaporation verantwortlichen Strahlungseinflüsse mit dem aerodynamischen Widerstand in einer Gleichung. Der stomatäre Widerstand wurde unter Annahme idealer Wasserverfügbarkeit als konstant angesetzt, während er im Modell von Sailor [74] von der einfallenden Solarstrahlung und der Luftfeuchte abhängt. Darüber hinaus verwendeten Malys et al. [20] einen Faktor, der das Auftreten von Wasserstress im Substrat berücksichtigt. Das modifizierte Modell wurde anhand der Außenoberflächentemperatur der Fassade validiert. Die Validierung zeigte gute Ergebnisse (Bestimmtheitsmaß  $R^2 = 0,80$ ).

Die Autor:innen García et al. [22] passten gleich zwei Module von Gründächern für die vertikale Anwendung an, um die Energiebilanz von Gebäuden am Beispiel eines Supermarktes zu untersuchen. Neben dem Modell von Sailor [74] modifizierten sie auch das von Tabares-Velasco und Srebric [75]. Mit Hilfe des Tools MLE+, das den Austausch von Variablen zwischen Matlab und EnergyPlus ermöglicht, ersetzten García et al. [22] die Temperatur der Außenwand durch die Oberflächentemperatur der Substratrückseite. Die Autor:innen heben den Sichtfaktor als bedeutende Variable hervor. Dieser Faktor beschreibt die geometrischen Sichtverhältnisse zwischen verschiedenen Oberflächen und ist für Berücksichtigung reflektierter Strahlung relevant. Dachbegrünungen werden in der Regel nicht von reflektierter Strahlung aus der Umgebung getroffen, Fassadenbegrünungen aufgrund ihrer vertikalen Ausrichtung jedoch schon. He et al. [81] berücksichtigten die vom Erdboden reflektierte langwellige Strahlung über einen Sichtfaktor, ebenso wie die Strahlung, die vom Himmel ausgeht. Diesen Ansatz übernahmen García et al. [22] für die Strahlungsbilanz des Blätterdachs. Des Weiteren passten die Autor:innen den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten des Laubs an, da dieser sich mit dem Winkel der Blattoberfläche ändert. Dabei orientierten sie sich an Churchill [85], der Luftströmungen an vertikalen Oberflächen untersuchte und die Nußelt-Zahl für natürliche, erzwungene und Mischkonvektion ermittelte. Beide erwähnten Modelle wurden unter halbtrockenen Klimabedingungen anhand der Laub- und Substrattemperatur validiert und zeigten ebenfalls gute Ergebnisse (Substrat:  $R^2 \leq 0,90$ ).

Weitere mögliche Anpassungen des GR-Modells präsentierten die Autor:innen Arenghi et al. [68]. Wie auch Dahanayake und Chow [67] und García et al. [22], widmeten sie sich zu Beginn vorangegangenen Studien – mit dem Ziel aus diesen die besten Anpassungen auszuwählen und anzuwenden. In dem Modell von Sailor [74] beschreibt  $1 - \alpha_f$  den Absorptionsgrad des Laubes. Wie bereits erwähnt, wird die Transmission vernachlässigt. Arenghi et al. [68] haben zur Berechnung des Absorptionsgrades für kurzwellige Strahlung einen Transmissionsgrad nach Del Barrio [77] eingeführt, der von der Blattflächendichte und der Orientierung des Blattes abhängt. Somit verringert sich einerseits der Absorptionsgrad des Laubs und andererseits erhöht sich der Anteil der kurzwelligen Strahlung, die auf das Substrat trifft. Auch Arenghi et al. [68] änderten den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten. Dafür verwendeten sie die Gleichung der FAO [84] zur Berechnung der Nußelt-Zahl. Die latente Wärmestromdichte für Laub und Substrat wurde in einem Term nach Davis und Hirmer [9] zusammengefasst und berücksichtigt den gesamten Evapotranspirationsprozess. Davis und Hirmer gingen ebenfalls von der Penman-Monteith-Gleichung [84] aus und passten diese für vertikale Systeme an. Hier sei betont, dass sich die Anpassungen von Arenghi et al. [68] und Dahanayake und Chow [67] auf Grundlage der Penman-Monteith-Gleichung dennoch unterscheiden. Validiert wurde das zuletzt beschriebene Modell nicht.

Ein:e Autor:in, Carlos [23], simulierte das Green-Roof-Modell von EnergyPlus als Grünfassade, ohne es zu modifizieren. Auch diese Studie enthält keine Validierung, lediglich einen Abgleich mit Wong et al. [86], welche Simulationen einer vertikalen Begrünung mit anderen Softwares (TAS, STEVE) durchführten.

Tabelle 4 stellt eine allgemeine Zusammenfassung der vorgenommenen Modifikationen am Green-Roof-Modell von Sailor [74] durch die genannten Autor:innen dar.

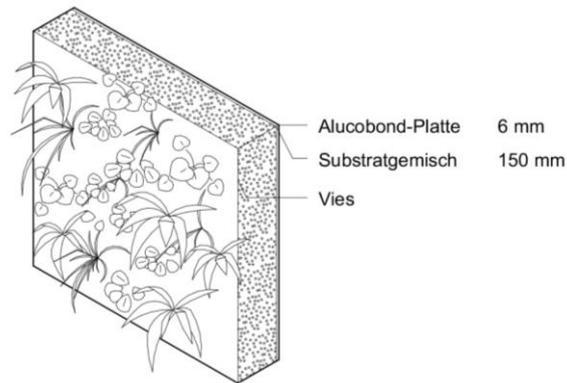
**Tabelle 4** Modifikationen des Green-Roof-Modells von EnergyPlus durch verschiedene Autor:innen zur vertikalen Anwendung

Modifikation des Green-Roof-Modells	Dahanayake und Chow 2017	García et al. 2020	Arengi et al. 2021
Anpassung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten mit Berücksichtigung der Blatorientierung	✓	✓	✓
Anpassung der Evapotranspiration von Laub und Substrat		✓	✓
Berücksichtigung von Wasserstau im Substrat	✓		
Berücksichtigung der Transmission durch das Laub abhängig von der Blatorientierung			✓
Berücksichtigung der vom Boden reflektierten langwelligen Strahlung		✓	

Diese Zusammenfassung demonstriert die Unterschiede zwischen Gründach und Grünfassade, die hinsichtlich der zu simulierenden Effekte bestehen. Hier sei erwähnt, dass die Autor:innen gleiche Problematiken, die mit der vertikalen Anwendung des Green-Roof-Modells auftauchen, unterschiedlich lösten: Zum einen unterscheiden sich die numerischen Ansätze und zum anderen die Methoden zum Austausch der Variablen im Quellcode. Darüber hinaus handelt es sich noch immer um Näherungen zur Abbildung der komplexen biologischen und physikalischen Prozesse. In den Quellcode der Software EnergyPlus einzugreifen, ist eine umfassende Aufgabe und hält viele potenzielle Fehlerquellen bereit. Eine Validierung, wie sie die Autor:innen Dahanayake und Chow [67] und García et al. [22] durchgeführt haben, ist daher essenziell. Um die Vorgehensweise einer der Autor:innen zu adaptieren, ist die Datenlage nicht ausreichend. Daher wurde das Green-Roof-Modell in dieser Arbeit nicht modifiziert. Durch dieses Kapitel sollten Lesende für die damit einhergehenden Problematiken sensibilisiert und darauf hingewiesen werden, dass die Ergebnisse der Simulationen entsprechend relativiert werden müssen.

### 2.3.4 Aufbau der hinterlüfteten VertiKKA und Umsetzung in EnergyPlus

Zunächst soll es um die bestmögliche Abbildung der VertiKKA durch das Green-Roof-Modell gehen. In EnergyPlus wird dieses Modell durch das Material *Roof Vegetation* angewandt und bildet die äußerste Schicht einer Dach- oder auch Wandkonstruktion. Die Eigenschaften, aufgelistet in Tabelle 5, spezifizieren Begrünung und Substrat. Allerdings sieht EnergyPlus nur eine Substratschicht vor. Die VertiKKA setzt sich jedoch aus mehreren Schichten zusammen, wie Abbildung 21 zeigt.



**Abbildung 21** Aufbau der VertiKKA

Aus diesem Grund wurde die Fassadenbegrünung als separate – das heißt, von der Außenwand unabhängige – Wandkonstruktion erstellt. So konnte die Alucobond-Platte auf der Rückseite als weitere Materialschicht hinzugefügt werden. Der Plattenwerkstoff wurde ursprünglich zur Fassadenbekleidung entwickelt und setzt sich aus zwei Aluminiumschichten und einem Polyethylen-Kern zusammen [87]. Die äußerste Schicht des Green-Roof-Modells bleibt dem Substrat vorbehalten. Daher musste das Vlies auf der Vorderseite vernachlässigt werden. Für das Substrat wurde die Rauigkeit „Glatt“ gewählt, um dennoch die Oberflächenbeschaffenheit des Vlieses einzubeziehen.

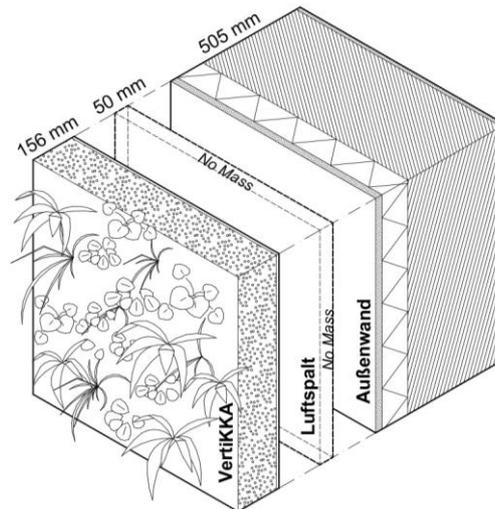
**Tabelle 5** Übersicht der Einstellungen der Grünfassade in EnergyPlus

Parameter	Wert
<b>Laub</b>	
Höhe / Dicke der Bewuchsschicht [16]	0,15 m
LAI [67]	3,0
Reflexionsgrad des Laubes [67]	0,2
Emissionsgrad des Laubes [67]	0,9
Minimaler stomatärer Widerstand [23]	180 s/m
<b>Substrat</b>	
Rauigkeit	Glatt
Dicke [16]	0,15 m
Wärmeleitfähigkeit (trocken) [88]	0,07 W/mK
Dichte (trocken) [16]	153 kg/m <sup>3</sup>
Spezifische Wärmekapazität (trocken) [88]	1000 J/kgK
Thermischer Absorptionsgrad [23]	0,95
Solarer Absorptionsgrad	0,8
Lichtabsorptionsgrad	0,75
Volumetrischer Sättigungsfeuchtegehalt	0,3
Volumetrischer Restfeuchtegehalt	0,01
Ursprünglicher volumetrischer Feuchtegehalt	0,1
Berechnungsmethode für die Feuchtigkeitsdiffusion	Einfach

Parameter	Wert
<b>Alucobond-Platte</b>	
Rauigkeit	Sehr glatt
Plattenstärke [87]	0,006 m
Wärmeleitfähigkeit [87]	0,35 W/mK
Dichte (Mittelwert für Aluminium und Polyethylen [88])	1890 kg/m <sup>3</sup>
Spezifische Wärmekapazität (Mittelwert für Aluminium und Polyethylen [88])	1340 J/kgK
Thermischer Absorptionsgrad	0,9
Solarer Absorptionsgrad	0,7
Lichtabsorptionsgrad	0,7

Sind in Tabelle 5 keine Quellenangaben vorhanden, wurden aufgrund mangelnder Datenlage die Standardwerte von EnergyPlus verwendet. Als Berechnungsmethode für die Feuchtigkeitsdiffusion wurde die einfache Methode (*Simple*) gewählt. Die erweiterte Methode (*Advanced*) wird derzeit noch nicht von EnergyPlus unterstützt. Das einfache Modell simuliert eine konstante Feuchtediffusion durch das Substrat, für das ein zweischichtiger Aufbau angenommen wird. Jeder Berechnungsschritt aktualisiert die Bodeneigenschaften und überprüft die Feuchtigkeit beider Schichten. Anhand des Ergebnisses wird die Diffusionsrichtung für den nächsten Berechnungsschritt festgelegt [46].

Wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben, kommt es in dem vorgesehenen Luftspalt zwischen der VertiKKA und der Außenwand zum Austausch langwelliger Strahlung sowie zu Mischkonvektion. Auch diese Effekte beeinflussen die Energiebilanz der Außenwand maßgeblich und müssen daher berücksichtigt werden. EnergyPlus bietet die Möglichkeit, eine hinterlüftete Fassade zu simulieren. Allerdings wird bei diesem Fassadenmodell davon ausgegangen, dass die Wärmekapazität der äußersten Schicht vernachlässigt werden kann, da sie viel geringer ist als die der deutlich dickeren Wand [46]. Diese Option ist demnach nicht zielführend. Nur eine Studie beschreibt die Simulation einer hinterlüfteten Grünfassade mit EnergyPlus: Arengi et al. [68]. Die Autor:innen verwendeten einen anderen Ansatz und simulierten den belüfteten Hohlraum hinter der Fassade als eigenständige thermische Zone. Wie bereits in Kapitel 2.2.2 beschrieben, müssen thermische Zonen, auch wenn sie nicht als geometrisches Konzept zu verstehen sind, über ein umschlossenes Volumen definiert werden. Die VertiKKA und der Ausschnitt der Außenwand, auf den das Fassadenmodul orthogonal projiziert wird, bilden bereits zwei Begrenzungsflächen, wie in Abbildung 22 dargestellt.

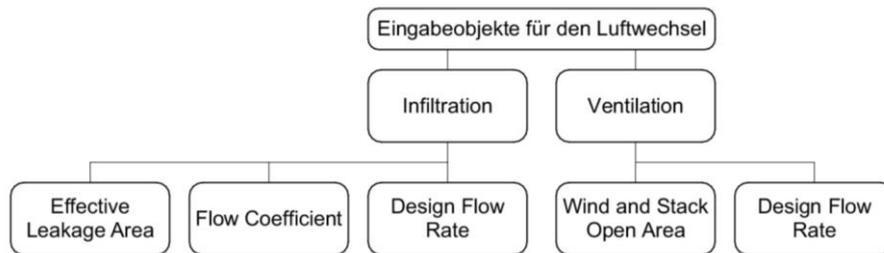


**Abbildung 22** Umschließungsflächen der thermischen Zone der VertiKKA

Die übrigen vier Grenzflächen des Volumens sind in der Realität nicht vorhanden, müssen jedoch im Modell dargestellt werden. Dafür kann das masselose Material *No Mass* von EnergyPlus gewählt werden. Es wird allein über den Wärmeübergangswiderstand (R-Wert) definiert und besitzt die Dichte, spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit von Luft. Die Schichtdicke passt sich dem angegebenen R-Wert automatisch an. Konstruktionen bestehen üblicherweise aus mehreren Materialschichten. Deren Schichtgrenzen werden durch Knoten beschrieben. Das Material *No Mass* verfügt über nur einen Knoten der gleichzeitig an innen und außen grenzt [54]. Um eine infinitesimal dünne Luftschicht zu simulieren, wurde der kleinstmögliche R-Wert von  $0,001 \text{ m}^2\text{K/W}$  gewählt.

### 2.3.5 Testsimulationen – Belüftung des Luftspalts

Zwischen dem geschlossenen Volumen der thermischen Zone (Luftspalt) und der Umgebung soll weiterhin ein Luftaustausch stattfinden. Dieser kann in EnergyPlus, wie bereits in Kapitel 2.2.4 erwähnt, über die Infiltration oder Ventilation definiert werden. Beide Optionen kommen für die Belüftung der VertiKKA in Frage. Somit stehen die in Abbildung 23 dargestellten Berechnungsverfahren zur Verfügung. Zwei der Verfahren – *Design Flow Rate* und *Wind and Stack Open Area* – wurden mit Hilfe von Testsimulationen untersucht. Vorbereitend auf die Auswertung dieser Testsimulationen, werden beide Verfahren zunächst näher betrachtet.



**Abbildung 23** Berechnungsverfahren der Infiltration und Ventilation

Die Option *Design Flow Rate* wurde bereits verwendet, um den Luftwechsel im Referenzgebäude zu simulieren. Sie steht sowohl für die Berechnung der Ventilation als auch der Infiltration zur Verfügung (Abbildung 23). Die Berechnungsvorschrift für den Volumenstrom lautet:

$$Infiltration, Ventilation = I_{design} F_{schedule} [A + B |T_{zone} - T_{odb}| + CW + DW^2] \quad 13$$

Der Auslegungs-Volumenstrom  $I_{design}$ , nach dem das Eingabeobjekt benannt ist, kann in Form einer Luftwechselrate angegeben werden. Werden für die Koeffizienten  $A$ ,  $B$ ,  $C$  und  $D$  die Werte 1, 0, 0, 0 verwendet, simuliert EnergyPlus einen konstanten Volumenstrom, bei dem Temperaturdifferenz und Wind nicht berücksichtigt werden. Wie bereits in Kapitel 2.2.4 beschrieben, verwendete das Programm BLAST die Werte 0,606, 0,03636, 0,1177, 0. Dadurch wird der Auslegungs-Volumenstrom abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen Zone und Außenraum  $T_{zone} - T_{odb}$  und der Windgeschwindigkeit  $W$  modifiziert. Wenn  $|T_{zone} - T_{odb}| = 0 \text{ K}$  und  $W = 3,35 \text{ m/s}$  gilt, entspricht der resultierende Volumenstrom dem Auslegungs-Volumenstrom. Diese Angaben entsprechen laut DOE [54] typischen Sommerbedingungen. Winterbedingungen führen zu höheren Temperaturdifferenzen und Windgeschwindigkeiten: Bei  $|T_{zone} - T_{odb}| = 40 \text{ K}$  und  $W = 6 \text{ m/s}$  steigt der resultierende Volumenstrom um den Faktor 2,75. Der zweite Vorgängerprogramm von EnergyPlus, DOE-2, verwendete stattdessen die Werte 0, 0, 0,224, 0, unter denen ausschließlich der Einfluss der Windgeschwindigkeit berücksichtigt wird. Demzufolge wird der Auslegungs-Volumenstrom unter den beschriebenen Sommerbedingungen um den Faktor 0,75 reduziert und unter den Winterbedingungen um den Faktor 1,34 erhöht [54]. Andere Koeffizienten können durch ein detailliertes Verfahren nach Kapitel 26 des ASHRAE Handbook of Fundamentals ermittelt werden [54]. Da es keine Empfehlungen für die Verwendung der Koeffizienten gibt, wurden die Standardeinstellungen von OpenStudio – das heißt, die BLAST-Koeffizienten – für die folgenden Testsimulationen verwendet, um zunächst die *Design Flow Rate* mit *Wind and Stack Open Area* zu vergleichen.

Die Windgeschwindigkeit  $W$  entspricht den implementierten Wetterdaten und hängt nicht von der Höhe des Zonenzenrums ab. Für die Art der Belüftung stehen die natürliche Belüftung (*Natural*), die Zuluft (*Intake*), die Abluft (*Exhaust*) und die ausgeglichene Belüftung (*Balanced*) zur Auswahl. Hier wurde die erste Option gewählt. Der Luftwechsel hinter einer Fassade hängt von vielen verschiedenen Faktoren ab. Zu den wichtigsten zählen [89]:

- die Breite des Luftspalts

- die Abmaße der Fassadenfläche
- die Anordnung und Größe der Lüftungsöffnungen
- die Beschaffenheit der Konstruktion, bspw. hinterlüftete Holz-, Wellblech- oder Ziegelfassade
- die Fügungsrichtung (horizontal oder vertikal)
- die Oberflächenrauigkeit
- die Windgeschwindigkeit und -richtung

Ergänzend zum letzten Punkt sei erwähnt, dass die Windrichtung laut Finch und Staube [90] einen größeren Einfluss auf den Luftwechsel als die Windgeschwindigkeit hat. Es liegt auf der Hand, dass die Vielzahl von Einflussfaktoren die Auswahl eines adäquaten Luftwechsels erschwert. Diverse Studien untersuchten bereits den Luftwechsel von hinterlüfteten Fassaden entweder anhand von CFD-Simulationen [29, 91], Messungen [92, 93] oder beiden Methoden (Validierung) [94–96]. Dabei fielen die Luftwechselraten der Messungen tendenziell geringer als die von Simulationen aus [89]. Tabelle 6 zeigt eine Auswahl von Studien, die Luftwechselraten für eine Spaltbreite von 50 mm untersuchten.

**Tabelle 6** Studien zum Luftwechsel von hinterlüfteten, opaken Fassaden mit 50 mm Luftspaltbreite

Autor:in, Jahr	Methode	Fassade	Öffnungen	LWR [h <sup>-1</sup> ]
Stovall und Karagiozis 2004 [97]	Simulationen und Validierung	Ziegel	oben, unten, in Fassade	175 - 350
Hauswirth und Kehl 2010 [98]	Simulationen (WUFI)	Holz	oben, unten	30
López et al. 2012 [94]	Simulationen (TRNSYS) und Validierung	Blech	oben, unten	132
Bellegheem et al. 2015 [91]	Simulationen (WUFI)	Ziegel	oben, unten	144 288 432

Für die Testsimulationen der *Design Flow Rate* wurden zwei verschiedene Luftwechselraten aus Tabelle 6 angenommen: Einerseits der von Hauswirth und Kehl [98] prognostizierte Luftwechsel von 30 h<sup>-1</sup> für freies Gelände ohne Windabschirmung und andererseits der von Bellegheem et al. [91] ermittelte Luftwechsel von 288 h<sup>-1</sup> für eine hinterlüftete Ziegelwand.

Die Autor:innen Arengi et al. [68] verwendeten statt der *Design Flow Rate* das bereits mehrfach erwähnte Eingabeobjekt *Wind and Stack Open Area*, mit dem eine kombinierte Wind- und Kaminwirkung simuliert wird. Dazu wird das Verhalten des Windes zu einer angenommenen Öffnung in der Geometrie abgeschätzt. Die Öffnung wird über eine Öffnungsfläche  $A_{opening}$  und eine Flächennormale beschrieben. Für eine thermische Zone können auf diese Weise mehrere Belüftungen definiert werden. Der zu allen vier Seiten geöffnete Luftspalt der VertiKKA wurde daher gleichsam über vier Belüftungsflächen beschrieben. Für jede Belüftung wird der Volumenstrom –

verursacht durch den Winddruck und die Kaminwirkung – nach Gleichung 14 und 15 berechnet [54], wobei die Kaminwirkung durch Druck- und Temperaturunterschiede der Luft entsteht.

$$Q_w = C_w A_{\text{opening}} F_{\text{schedule}} W_{\text{local}} \quad 14$$

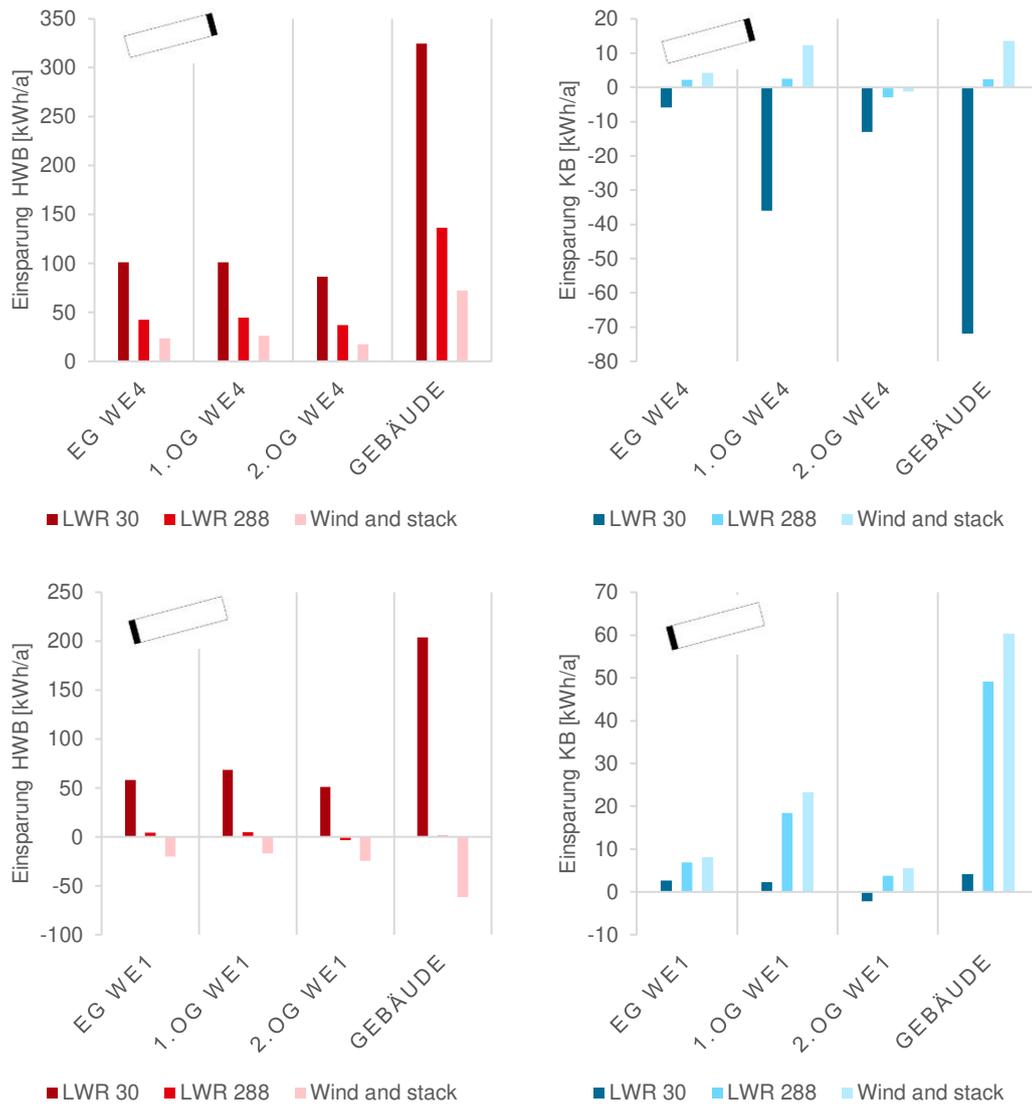
$$Q_s = C_D A_{\text{opening}} F_{\text{schedule}} \sqrt{2g\Delta H_{NPL} \left( \frac{|T_{\text{zone}} - T_{\text{odbl}}|}{T_{\text{zone}}} \right)} \quad 15$$

Schließlich resultiert der Gesamt-Volumenstrom aus:

$$\text{Ventilation} = \sqrt{Q_s^2 + Q_w^2} \quad 16$$

$W_{\text{local}}$  ist hier die lokale Windgeschwindigkeit, denn anders als bei der Auslegungs-Durchflussrate hängt die Belüftung nun von der Höhe des Zonenzentrums ab. Da die Öffnungsflächen nicht geometrisch abgebildet werden, muss der Winkel zwischen Flächennormale und Norden eingegeben werden.  $C_w$  ist die Wirksamkeit der Öffnungsfläche. Sie beschreibt die Orientierung des Windvektors zur Flächennormalen. In den Testsimulationen wurde der Wert durch EnergyPlus automatisch berechnet. Das heißt,  $C_w$  wurde für jeden Zeitschritt zwischen 0,3 (senkrechte Windrichtung) und 0,55 (parallele Windrichtung) linear interpoliert [46]. Während  $C_w$  beschreibt, wie viel Luft aufgrund des Windes in die thermische Zone einströmt, steht der Auslasskoeffizient  $C_D$  für die Luft, welche die Zone zum Ausgleich durch die gleiche angenommene Öffnung verlässt. Auch dieser Wert wurde in den Testsimulationen automatisch berechnet.  $H_{NPL}$  ist die Höhe des neutralen Druckniveaus ausgehend von der Unterkante der Öffnung. Auf dieser Höhe ist die Druckdifferenz zwischen innen und außen ausgeglichen. Das DOE empfiehlt, die kombinierte Wind- und Kaminwirkung mit Vorsicht zu verwenden, da diese Höhendifferenz nur schwer ermittelt werden kann [54]. Für die Testsimulationen wurde eine Abschätzung aus Kapitel 16 des ASHRAE Handbook of Fundamentals verwendet. Demnach liegt  $H_{NPL}$  auf der halben Öffnungshöhe, wenn davon ausgegangen wird, dass warme Luft unter den gleichen Bedingungen durch den oberen Teil der Öffnung von innen nach außen strömt, wie kalte Luft durch den unteren Teil von außen nach innen.

Die Testsimulationen wurden mit Begrünung der Nordost- bzw. der Südwestfassade durchgeführt und die Ergebnisse mit dem Referenzmodell verglichen. Diese beiden Fassadenflächen sind nicht durchfenstert und können daher mit einer einzigen thermischen Zone vollflächig begrünt werden. Zudem haben beide Fassaden eine genau gegensätzliche Orientierung zur Sonne und zur dominierenden Windrichtung. Die Südwestfassade befindet sich im Luv, die Nordostfassade im Lee. Die durchschnittliche Windgeschwindigkeit und -richtung des verwendeten Testreferenzjahres beträgt 4,24 m/s und 208,17°. Diese ersten Testsimulationen wurden außerdem mit der Berechnungsmethode *TARP* für den konvektiven Wärmeübergang durchgeführt, die im folgenden Kapitel 2.3.6 beschrieben wird.



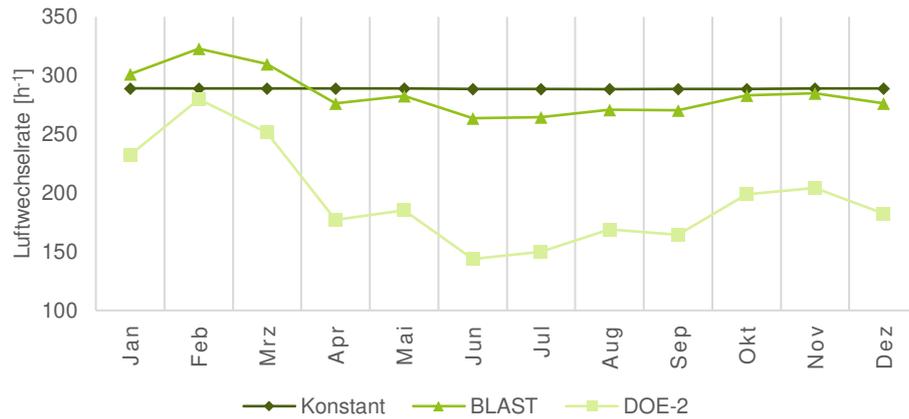
**Abbildung 24** Nutzenergieeinsparungen an der Nordostfassade (oben) und der Südwestfassade (unten) mit *Design Flow Rate* (LWR 30, 288) und *Wind and Stack Open Area*

In Abbildung 24 dargestellt sind die Einsparungen des Heizwärmebedarfs in Rot bzw. des Kühlbedarfs in Blau der thermischen Zonen, deren Außenwände begrünt wurden, und schließlich des gesamten Gebäudes. Die Anwendung von *Wind and Stack Open Area* führte zu einer sehr hohen Luftwechselrate von durchschnittlich 2024 bzw. 2025  $\text{h}^{-1}$  an den Fassadenseiten. Die annähernd gleiche Luftwechselrate ist durch die Symmetrie der Fassadenbegrünung am Gebäude und dessen Position zur Windrichtung zu erklären. Die Luftwechselraten 30 und 288  $\text{h}^{-1}$  variierten durch die BLAST-Koeffizienten des Eingabeobjekts *Design Flow Rate* um maximal  $\pm 5 \text{ h}^{-1}$ . Die Testsimulationen zeigten: Je stärker die Hinterlüftung, umso weniger konnte der Heizwärmebedarf im Winter gesenkt werden. Gleichzeitig wurde mit zunehmender Hinterlüftung der Kühlbedarf stärker reduziert. Bei der geringsten Luftwechselrate von 30  $\text{h}^{-1}$  mussten die an der begrünter Nordostfassade gelegenen thermischen Zonen sogar stärker als im Referenzmodell gekühlt werden. Dieses Ergebnis deutet auf einen Wärmestau an der Fassade hin. Die Verschattung durch die VertiKKA hat an der sonnenabgewandten Fassade keinen Einfluss, weshalb die Kühlwirkung ohnehin

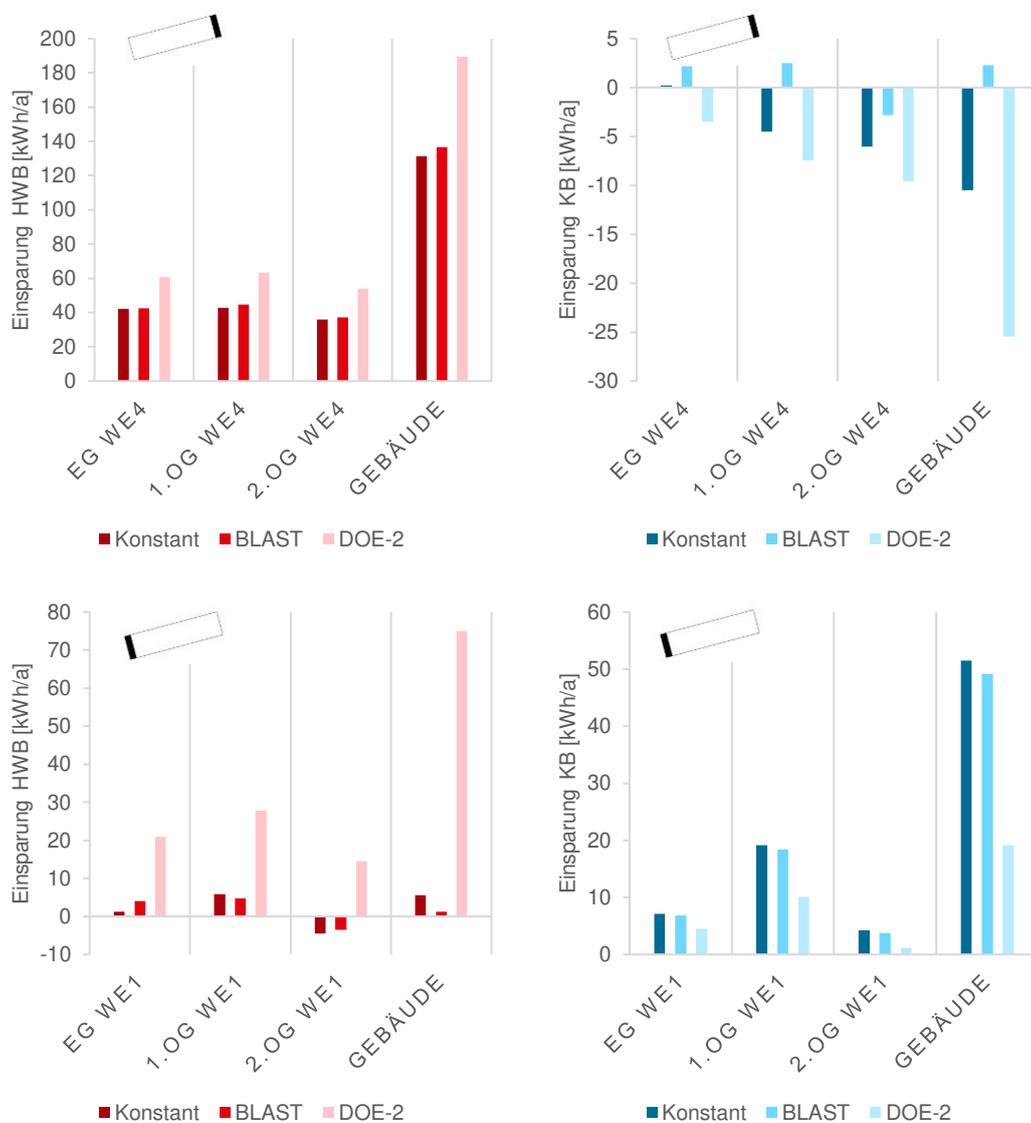
entfällt. Eine Ursache für den Wärmestau könnten die inneren Wärmequellen sein, deren Wärme durch die VertiKKA schlechter nach außen abgeführt werden konnte. An der Südfassade war dieser Effekt nicht zu beobachten, da die Verschattungswirkung dort überwog. Allerdings mussten die begrünten thermischen Zonen bei einem hohen Luftwechsel (*Wind and Stack Open Area*) stärker beheizt werden als im Referenzmodell. Die VertiKKA verschattet die besonnte Gebäudeseite auch im Winter, wodurch sich diese weniger aufheizen kann. Durch die Sonneneinstrahlung erwärmt wird nur das Substrat. Ist der Luftwechsel sehr hoch, wird die Wärmeenergie unmittelbar abtransportiert und die Pufferwirkung stark verringert. An der Nordfassade, die ohnehin nicht durch die Sonne aufgeheizt wird, war diese Pufferwirkung noch erkennbar.

Festgehalten werden kann: Die Luftwechselrate hat offensichtlich einen Einfluss auf die Nutzenergiebilanz des Gebäudes. Dieser Einfluss relativiert sich jedoch, wenn die Einsparungen (und erhöhten Bedarfe) mit dem Heizwärme- und Kühlbedarf des Referenzgebäudes von 81035 kWh/a und 660 kWh/a verglichen werden. Trotzdem bilden sehr niedrige oder sehr hohe Luftwechselraten die Energiebilanzen, die in anderen Studien [22, 26, 67, 99] beobachtet wurden, nicht richtig ab. Deshalb wurde für alle folgenden Simulationen das Eingabeobjekt *Design Flow Rate* mit einem Luftwechsel (Auslegungs-Volumenstrom) von  $288 \text{ h}^{-1}$  nach Belleghem et al. [91] verwendet.

Da sich das erwähnte Eingabeobjekt als das geeignetere herausstellte, wurden die eingangs beschriebenen und verwendeten Koeffizienten mit Hilfe weiterer Testsimulationen überprüft. Abbildung 25 zeigt die durchschnittlichen Luftwechselraten, die im Luftspalt der Nordostfassade durch die Koeffizienten für einen konstanten Luftwechsel, die BLAST- sowie die DOE-2-Koeffizienten erzeugt wurden. Deutlich wird, dass die Variante DOE-2 den Luftwechsel hinter der VertiKKA ganzjährig reduzierte. Durch die BLAST-Koeffizienten wich der durchschnittliche Luftwechsel nur geringfügig vom Auslegungs-Volumenstrom von  $288 \text{ h}^{-1}$  ab. Diese Beobachtungen lassen bereits die Ergebnisse der Nutzenergieeinsparungen, dargestellt in Abbildung 26, vermuten. An der Nord- und Südfassade wurde der Heizwärmebedarf unter Verwendung der DOE-2-Koeffizienten am stärksten reduziert. Hingegen wurde durch diese Koeffizienten auch am wenigsten Kühlenergie eingespart. Unter Berücksichtigung der Windgeschwindigkeiten sowie der Temperaturdifferenz zwischen Luftspalt und Außenraum bilden die BLAST-Koeffizienten die Luftwechselrate von  $288 \text{ h}^{-1}$  am besten ab. Daher wurden diese Koeffizienten für alle weiteren Simulationen der VertiKKA verwendet.



**Abbildung 25** Durch verschiedene Algorithmen erzeugte Luftwechselraten im Luftspalt der VertiKKA an der Nordostfassade



**Abbildung 26** Nutzenergieeinsparungen an der Nordostfassade (oben) und der Südwestfassade (unten) mit den Koeffizienten für einen konstanten Volumenstrom, den BLAST- und den DOE-2-Koeffizienten

### 2.3.6 Testsimulationen – Konvektiver Wärmeübergang im Luftspalt

Wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben, spielt der konvektive Wärmeübergang an den Grenzflächen im Luftspalt neben der Belüftung auch eine Rolle für die dortige Wärmeübertragung. EnergyPlus berechnet die Wärmestromdichte nach Gleichung 4 in Kapitel 2.3.1. Für die Berechnung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten stehen verschiedene Algorithmen laut Tabelle 7 zur Auswahl [54]. Diese können auf das gesamte Modell oder einzelne thermische Zonen angewandt werden.

**Tabelle 7** Algorithmen für die Berechnung der Oberflächenkonvektion

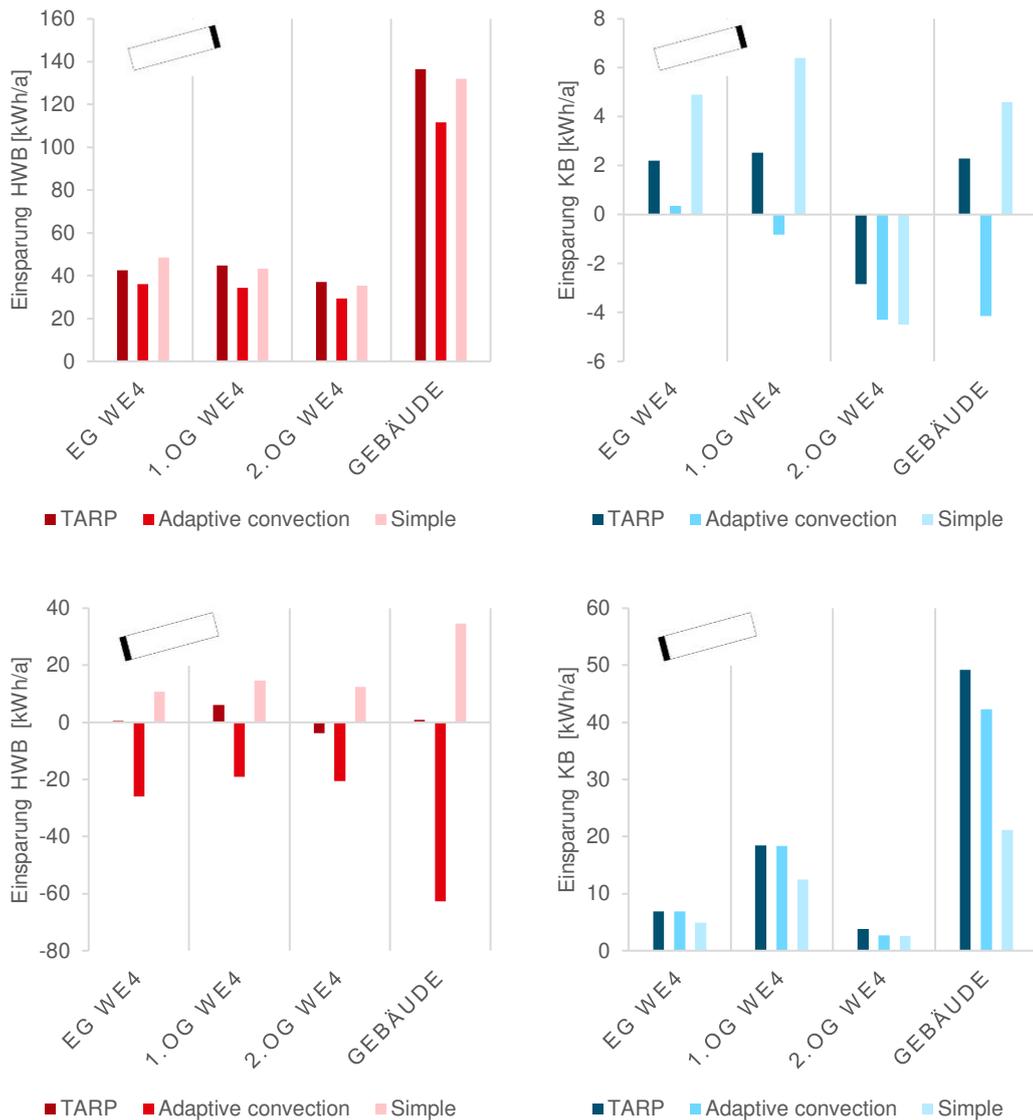
Konvektion an Innenoberflächen	Konvektion an Außenoberflächen
<i>Simple</i>	<i>Simple Combined</i>
<i>TARP</i>	<i>TARP</i>
<i>Ceiling Diffuser</i>	<i>MoWitt</i>
<i>ASTMC1340</i>	<i>DOE-2</i>
<i>Adaptive Convection Algorithm</i>	<i>Adaptive Convection Algorithm</i>

Der Algorithmus *Simple* bzw. *Simple Combined* errechnet den Wärmeübergangskoeffizienten über die Oberflächenrauigkeit und die lokale Windgeschwindigkeit (abhängig von der Höhe des Zonenzentrums). Er vereinfacht den Wärmeübergang stark, indem er den konvektiven und den Strahlungswärmeanteil in einem kombinierten Übergangskoeffizienten zusammenfasst. Dieser berücksichtigt die Strahlung in Richtung Himmel, Untergrund und Umgebungsluft. Alle anderen Algorithmen berechnen nur den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten, während der Strahlungsanteil an anderer Stelle durch EnergyPlus kalkuliert wird [54, 100].

Der Algorithmus *TARP* (Thermal Analysis Research Program) wählt den passenden Wärmeübergangskoeffizienten abhängig von der Orientierung der Oberfläche und der durchschnittlichen Temperaturdifferenz zur Umgebungsluft aus [101]. Dieser Algorithmus ist für Innen- und Außenoberflächen anwendbar. Für die natürliche Konvektion werden geometrische Merkmale der Oberfläche, Rauigkeit sowie Windgeschwindigkeit und -richtung einbezogen. Die freie Konvektion wird nach drei verschiedenen Gleichungen für vertikale sowie nach oben oder unten gerichtete horizontale Oberflächen berechnet [102].

Der adaptive Konvektionsalgorithmus, *Adaptive Convection Algorithm*, wählt aus den zur Verfügung stehenden Berechnungsmethoden für jede Oberfläche die optimale aus.

Der einfache und der adaptive Konvektionsalgorithmus bilden ein Spektrum von ‚grundlegend‘ zu ‚komplex‘ ab. Der Algorithmus *TARP* wurde bereits in mehreren EnergyPlus-Simulationen verwendet [10, 101, 102]. Aus diesen Gründen wurden die beschriebenen drei Algorithmen testsimuliert.



**Abbildung 27** Nutzenergieeinsparungen an der Nordostfassade (oben) und der Südwestfassade (unten) mit *TARP*, *Adaptive Convection Algorithm* und *Simple*

An der Nordostfassade stieg der Kühlbedarf unter Verwendung des adaptiven Konvektionsalgorithmus über den des Referenzmodells, an der Südwestfassade der Heizwärmebedarf (Abbildung 27). Diese Ergebnisse sind schwer zu erklären und wenig sinnvoll. Tabelle 8 zeigt einen Vergleich von Testsimulation, in denen jede der vier Gebäudesseiten jeweils vollflächig begrünt wurde. Auch hier sind die Heizwärme- und Kühleinsparungen verglichen mit dem Nutzenergiebedarf des Referenzgebäudes immer noch sehr gering.

**Tabelle 8** Nutzenergieeinsparungen von vier Testsimulationen mit *TARP* und *Simple* im Vergleich

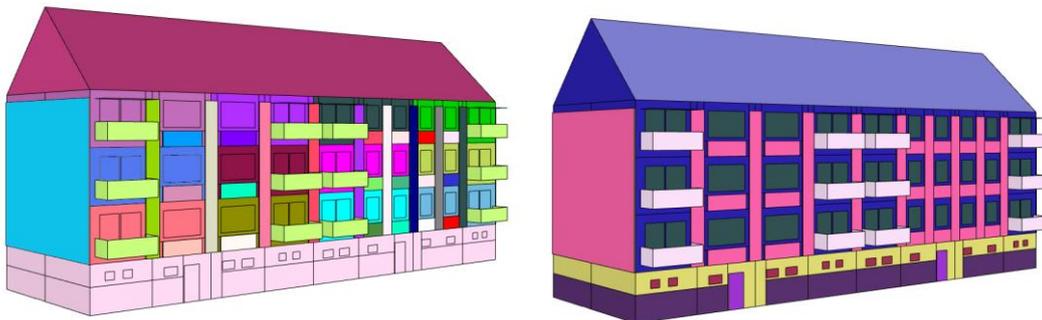
Einsparung	Nordost 	Südost 	Südwest 	Nordwest 
<b><i>TARP</i></b>				
HWB	137 kWh/a	135 kWh/a	1 kWh/a	-69 kWh/a
KB	2 kWh/a	123 kWh/a	49 kWh/a	70 kWh/a
<b><i>Simple</i></b>				
HWB	132 kWh/a	354 kWh/a	35 kWh/a	112 kWh/a
KB	5 kWh/a	49 kWh/a	21 kWh/a	49 kWh/a

Dieser Vergleich zeigt, dass sich unter Verwendung des Algorithmus *TARP* an der Nordwestfassade eine negative Energiebilanz beim Heizen ergab. Auch dieses Ergebnis ist wenig sinnvoll, da der konvektive Wärmeübergang an dieser Gebäudeseite durch *TARP* offenbar überschätzt wurde. Deshalb wurde für alle weiteren Simulationen der einfache Algorithmus *Simple (Combined)* verwendet.

## 2.4 Vorgehensweise zur Simulation der VertiKKA

Nach den umfangreichen Voruntersuchungen und Einstellungen, steht die Frage im Raum, wie die Fassadenflächen für die Simulation der VertiKKA schließlich begrünt werden können. Dabei spielen Fensteröffnungen und Balkone – anders als bei einem fiktiven Gebäude mit vereinfachter und regelmäßiger Geometrie – eine Rolle. Die Abmessungen des VertiKKA-Moduls betragen in der Höhe 1,60 m und in der Breite 0,80 m [16]. Aufgrund der Fensterabstände wäre dieses Maß nur begrenzt an dem Referenzgebäude anwendbar. Daher wurde das Modul in der Höhe halbiert. Somit beträgt die Fläche eines Moduls 0,64 m<sup>2</sup>. Begrünt wurde nach folgenden Grundregeln, deren Anwendung in Abbildung 28 dargestellt ist:

1. Begrünt wurden nur die Fassadenflächen der Wohneinheiten und Treppenträume.
2. Begrünt wurde unter und zwischen den Fensterflächen. Nicht begrünt wurde unter Balkonen.
3. Die Seitenlängen der VertiKKA-Elemente entsprechen ganzen Vielfachen des Grundmaßes von 0,80 m.
4. Jedem VertiKKA-Element wurde eine thermische Zone zugewiesen. Die Thermischen Zonen von übereck angrenzenden Elementen wechselwirken miteinander.



**Abbildung 28** Separate thermische Zonen der VertiKKA-Flächen (links) und VertiKKA-Flächen dargestellt anhand des Grünfach-Materials (rechts)

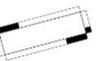
Um den Einfluss der VertiKKA auf den Heizwärme- und Kühlbedarf in verschiedenen Begrünungsszenarien zu untersuchen, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Diese besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen. Im ersten Teil wurde die Orientierung der begrünter Fassade untersucht. Das bedeutet, jede Fassadenseite wurde einzeln unter Anwendung der beschriebenen Regeln vollständig mit VertiKKA bedeckt. Tabelle 9 gibt einen Überblick über die Anzahl der VertiKKA-Module (0,80 x 0,80 m) pro Gebäudeseite. Die Frage nach der optimalen Belichtung der Module spielte dabei keine Rolle.

**Tabelle 9** Anzahl der VertiKKA-Module pro Gebäudeseite

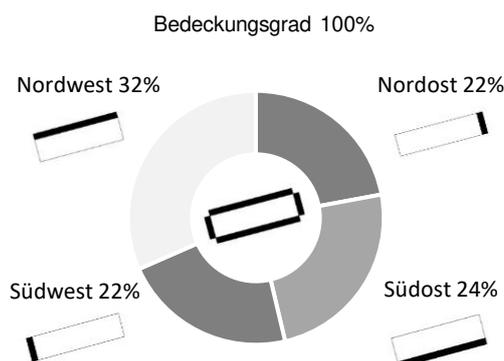
Nordost	Südost	Südwest	Nordwest
120	132	120	172

Im zweiten Teil der Sensitivitätsanalyse wurden unterschiedliche Bedeckungsgrade angewandt. 100% Bedeckung entsprechen der vollständigen Begrünung aller Gebäudeseiten. Diese wurde anschließend auf 75, 50 und 25% reduziert. Die anteilige Begrünung – dargestellt in Tabelle 10 – gilt für alle Fassadenseiten und jede begrünte thermische Zone gleichermaßen. Somit wurde sichergestellt, dass sich die VertiKKA gleichmäßig auf das Gebäude auswirkte. Die Umsetzung im Simulationsmodell zeigt Anhang D.2 am Beispiel der Südostfassade.

**Tabelle 10** Anzahl der VertiKKA-Module pro Bedeckungsgrad

100%	75%	50%	25%
			
544	408	272	136

Die kürzeren und geschlossenen Querseiten des Gebäudes konnten bei einem Bedeckungsgrad von 100% fast vollflächig begrünt werden. Das traf nicht auf die großflächigen, aber stark durchfensterten Längsseiten zu, zudem die Südostfassade zusätzlich mit Balkonen versehen ist. Deshalb verteilte sich die Gesamtanzahl von Modulen bei 100% Bedeckung (544 Module) nahezu gleichmäßig auf alle Fassadenseiten. Die Verteilung zeigt Abbildung 29.



**Abbildung 29** Verteilung der VertiKKA auf die Fassadenseiten bei 100% Bedeckung

Darüber hinaus wurde die VertiKKA bewertet, indem ihre Nutzenergie-Einsparpotentiale mit denen energetischer Sanierungsmaßnahmen verglichen wurden. Der errechnete U-Wert der Außenwand des Beispielgebäudes liegt bei 0,33 W/m<sup>2</sup>K. Bei Erneuerung der Dämmschicht ist der vom GEG geforderte U-Wert von 0,24 W/m<sup>2</sup>K für Außenwände gegen Außenluft zu erreichen [49]. Nach Reinhardt et al. [103] sind die folgenden zwei Sanierungsmaßnahmen auf unterschiedliche Weisen wirtschaftlich und ökologisch sinnvoll. Erstens: Da das vorhandene WDVS intakt ist, kann dessen Dämmschicht – bestehend aus Polystyrolschaumplatten – mit demselben Material verstärkt werden. Zum Erreichen des geforderten U-Wertes muss die Schichtdicke von 10 cm (Bestand) auf 15 cm erhöht werden. Diese sogenannte Aufdopplung erfolgt mit dem gleichen (kunststoffbasierten) Material, um den Verbund zwischen beiden Schichten zu gewährleisten. Diese Maßnahme verlängert die Lebensdauer der ursprünglichen Dämmschicht, deren Weiternutzung Ressourcen schont. Erfolgt nach dem Rückbau eine stoffliche Verwertung als gleicher Wertstoff (und nicht durch Verbrennung), verfügen Polystyrolschaumplatten über eine gute

Ökobilanz verglichen mit anderen Plattendämmstoffen [103]. Zweitens: Die vorhandene Polystyrolschaumdämmung wird entfernt und durch eine Hanffaserdämmung (trocken produziert) ersetzt. Diese eignet sich in Plattenform ebenfalls als WDVS [104] und muss mit einer Stärke von 14 cm auf das Mauerwerk aufgebracht werden, um den erforderlichen U-Wert zu erfüllen. Dieser Plattendämmstoff schneidet in der Ökobilanz besser ab, sofern die stoffliche Verwertung durch die Verbrennung erfolgt [103]. Beide Varianten werden durch viele weitere Vor- und Nachteile ausgezeichnet, auf die an dieser Stelle jedoch nicht weiter eingegangen wird.

Die zwei sanierten Modelle sowie das Referenzmodell wurden ohne und mit 100% Bedeckung durch die VertiKKA simuliert. Alle Verbräuche wurden dem Referenzmodell gegenübergestellt, um erstens die Wirkung der VertiKKA gegenüber den verbesserten Dämmungen und zweitens die Wirkung der VertiKKA in Kombination mit diesen verbesserten Dämmungen zu zeigen. Die Wandaufbauten zeigt Tabelle 11. P steht für das WDVS mit Polystyrolschaumplatten, H für das WDVS mit Hanffaserdämmplatten und V für die VertiKKA. Die Zahlen geben die Dicke der Dämmschicht an. 10P entspricht dem Wandaufbau des Beispielgebäudes.

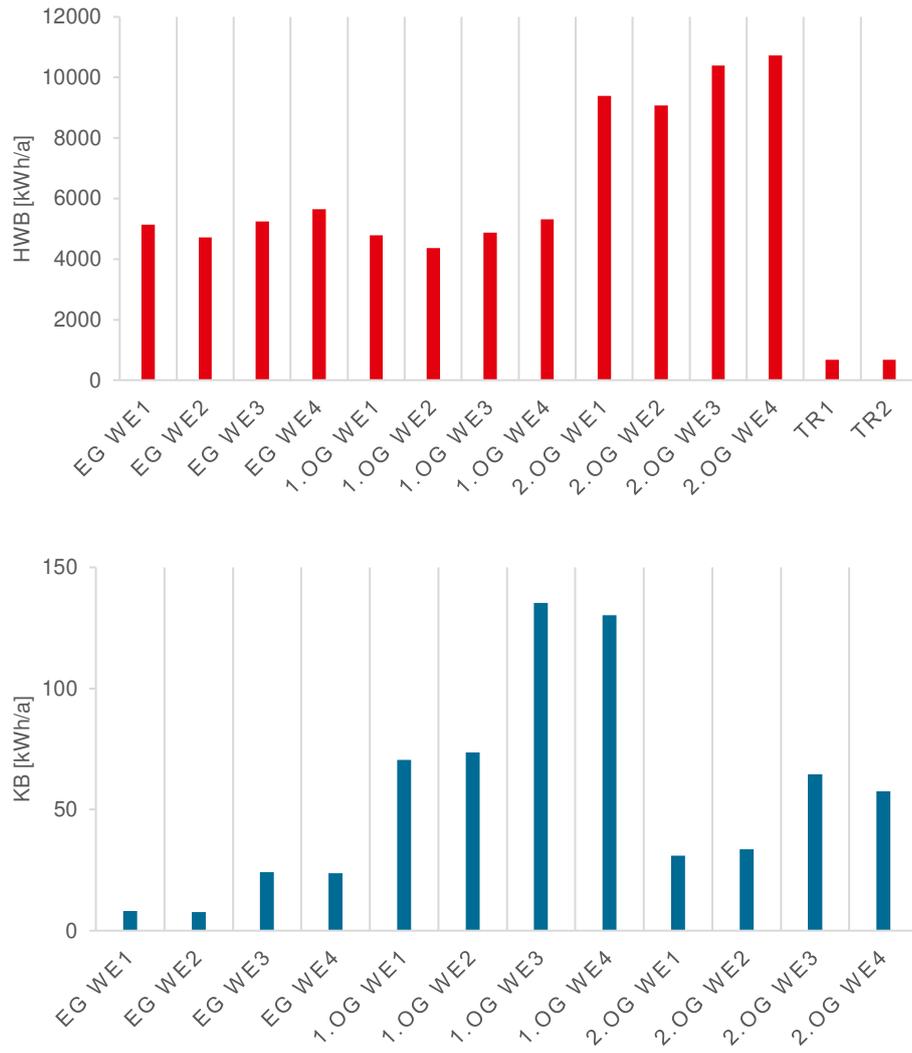
**Tabelle 11** Simulierte Wandaufbauten verschiedener Sanierungsmaßnahmen

Wandaufbau	15P	14H	15P + V	14H + V	10P + V
15 cm VertiKKA			✓	✓	✓
5 cm Luftspalt			✓	✓	✓
2,5 cm Außenputz	✓	✓	✓	✓	✓
10 cm Polystyrolschaumplatte					✓
15 cm Polystyrolschaumplatte	✓		✓		
14 cm Hanffaserdämmplatte		✓		✓	
1,5 cm Innenputz	✓	✓	✓	✓	✓

Wird die VertiKKA in Kombination mit den beschriebenen Sanierungsmaßnahmen simuliert und gegen das Referenzmodell verglichen, kann ihre alleinige Wirkung noch nicht beurteilt werden. Dazu wurde die VertiKKA am sanierten Gebäude in einem zweiten Vergleich der gleichermaßen sanierten Referenz ohne VertiKKA gegenübergestellt.

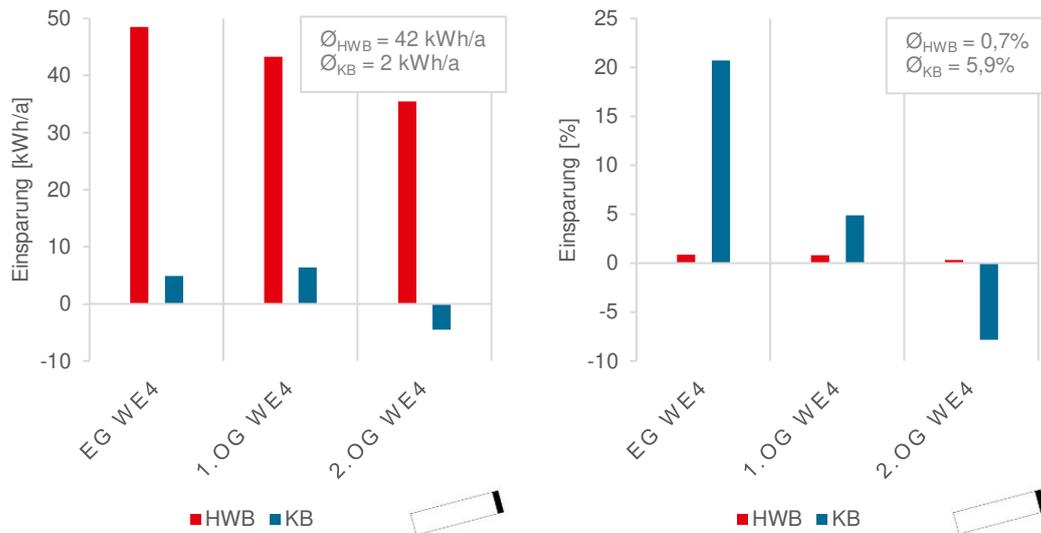
## 3 Ergebnisse

Mehrere Testsimulationen dienen als Voruntersuchungen für die Hauptsimulationen der VertiKKA am Beispielgebäude. Schließlich verwendet wurden folgende Einstellungen: die Klimadaten des Testreferenzjahres 1995 bis 2012 (51,0291° N, 11,3360° O) [65], eine Luftwechselrate von 288 h<sup>-1</sup> für alle thermischen Zonen einer VertiKKA, simuliert durch das Eingabeobjekt *Design Flow Rate* mit den BLAST-Koeffizienten *A*; *B*; *C*; *D* gleich 0,606; 0,03636; 0,1177; 0. Der konvektive Wärmeübergang an Innen- und Außenoberflächen wurde durch den Algorithmus *Simple (Combined)* beschrieben. Auch das Referenzmodell (zuvor mit *TARP*) wurde noch einmal mit *Simple (Combined)* simuliert, um die Vergleichbarkeit zu erhalten. Unter diesen Bedingungen liegt der Heizwärmebedarf des Referenzmodells bei 81035 kWh/a und der Kühlbedarf bei 660 kWh/a. Die Verteilung auf die thermischen Zonen zeigt Abbildung 30. Damit fallen 99,2 % des Nutzenergiebedarfs in die winterliche Heizperiode. Dieses Verhältnis zeichnet sich auch in den Ergebnissen ab, in denen einerseits die quantitativen Einsparungen in Kilowattstunden pro Jahr und andererseits die anteiligen Einsparungen in Prozent dargestellt werden. Zur besseren Übersicht werden, wie bisher, nur die begrünten thermischen Zonen dargestellt. Alle übrigen, nur sehr gering beeinflussten Zonen werden in der Nutzenergiebilanz berücksichtigt. Die Piktogramme dienen der leichteren Verortung der Begrünung am Gebäude.



**Abbildung 30** Jährlicher Heizwärme- (oben) und Kühlbedarf (unten) der thermischen Zonen im verwendeten Referenzmodell

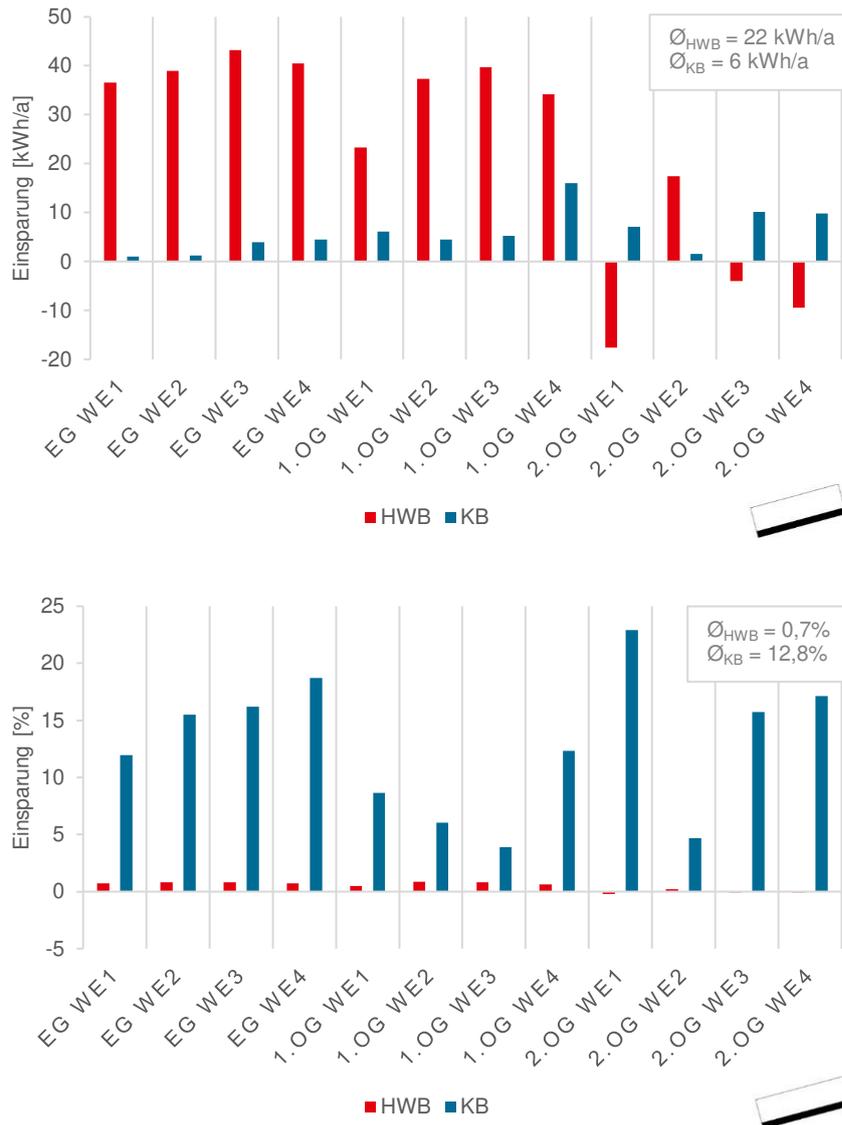
### 3.1 Orientierung der Grünfassade



**Abbildung 31** Nutzenenergieeinsparungen durch Begrünung der Nordostfassade

Abbildung 31 zeigt die Auswirkungen der nordöstlichen Begrünung in den betreffenden thermischen Zonen. In der quantitativen Betrachtung links ist erkennbar, dass die Einsparungen des Heizwärmebedarfs mit durchschnittlich 42 kWh pro begrünte Zone und Jahr im Vergleich zu denen des Kühlbedarfs mit 2 kWh deutlich höher ausfallen. Dieses Verhältnis ist auf die Zusammensetzung der Nutzenergie aus Heizwärme- und Kühlbedarf der Referenzgebäudes zurückzuführen. Die prozentuale Betrachtung in Abbildung 31, rechts zeigt jedoch, dass das Einsparpotential der VertiKKA im Sommer deutlich höher als im Winter ist. Durchschnittlich konnten in den begrünten thermischen Zonen 0,7% beim Heizen und 5,9% beim Kühlen eingespart werden – trotz Begrünung der Nordostseite, die der Sonne lediglich in den Morgenstunden ausgesetzt ist. Mit anderen Worten kann das Einsparpotential deshalb nicht maßgeblich auf die Verschattungswirkung der VertiKKA zurückzuführen sein. Das Ergebnis lässt vermuten, dass die Evapotranspiration auch ohne direkte Sonneneinstrahlung groß genug ist, um sich kühlend auszuwirken. Wohneinheit 4 im zweiten Obergeschoss weist eine negative Einsparung auf. Sie musste also stärker gekühlt werden als im Referenzmodell. Diese Auffälligkeit in den Ergebnissen könnte auf numerische Ungenauigkeiten der Simulation zurückzuführen sein. Alle aneinander liegenden thermischen Zonen wechselwirken miteinander, sodass sich kleinste Abweichungen zu fehlerhaften Ergebnissen in einer Zone aufsummieren können.

Aufgrund dieser Wechselwirkungen wird auch die Summe der (positiven und negativen) Einsparungen aller thermischen Zonen betrachtet. Insgesamt konnte der Heizwärmebedarf um 132 kWh/a bzw. 0,2% und der Kühlbedarf um 5kWh/a bzw. 0,7% im Vergleich zum Referenzmodell gesenkt werden.



**Abbildung 32** Nutzenenergieeinsparungen durch Begrünung der Südostfassade

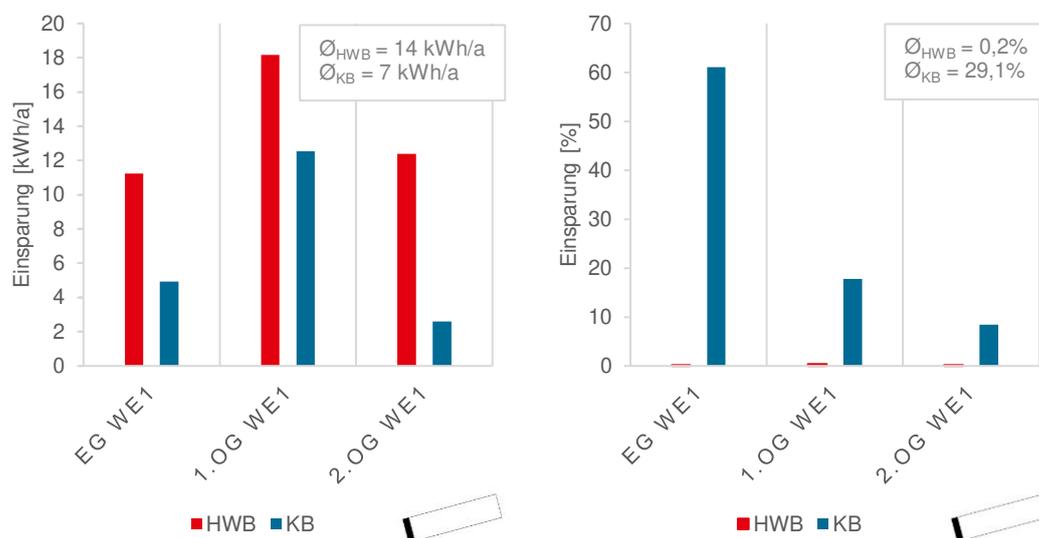
Durch die Begrünung der Südostfassade konnte der Heizwärmebedarf im Erdgeschoss am stärksten gesenkt werden – am geringsten hingegen im zweiten Obergeschoss (Abbildung 32, oben). Das kann folgende Gründe haben: Erstens konnte zweite Obergeschoss aufgrund der Geometrie nur mit 41 Modulen begrünt werden, die beiden anderen Geschosse mit 45,5 Modulen. Zweitens traten im zweiten Obergeschoss vermehrt numerische Ungenauigkeiten auf, die zu negativen Einsparungen des Heizwärmebedarfs führten und drittens verliert das zweite Obergeschoss deutlich mehr Wärme über die Geschossdecke, als die übrigen Geschosse (Abbildung 30, oben in Kapitel 3), während die VertiKKA nur die Außenwände beeinflusst. Diese Beobachtung gilt auch für die Simulationen der übrigen Begrünungsszenarien.

Die durchschnittliche Einsparung des Heizwärmebedarfs aller begrünzten thermischen Zonen liegt bei 22 kWh/a bzw. wie bei der Nordostfassade bei 0,7%. Das heißt, der Heizwärmebedarf der begrünzten Zonen konnte zu gleichen Anteilen reduziert werden.

Allerdings wird dieser Effekt an der Südostfassade mit drei- bis viermal weniger Modulen pro thermische Zone erreicht.

Die Einsparung des Kühlbedarfs ist zwar quantitativ im Erdgeschoss am geringsten, doch prozentual betrachtet deutlich höher als bspw. im ersten Obergeschoss. Dem zugrunde liegt, dass das Erdgeschoss im Referenzmodell am wenigsten und das erste Obergeschoss am stärksten gekühlt werden musste. Im Durchschnitt wurde der Kühlbedarf in den begrünten thermischen Zonen um 6 kWh/a bzw. 12,8% gesenkt. Das heißt, das Einsparpotential ist mehr als doppelt so hoch als bei Begrünung der Nordostfassade und in Anbetracht der verwendeten Anzahl von Modulen noch wesentlich höher. Einerseits kommt der Verschattungseffekt an der Südostfassade zum Tragen, andererseits wird die Verdunstung an Substrat- und Lauboberfläche durch die südliche Ausrichtung deutlich erhöht.

Die Einsparungen (und -verluste) summieren sich auf zu 303 kWh/a bzw. 0,4% des Heizwärmebedarfs und 71 kWh/a bzw. 10,8% des Kühlbedarfs bezogen auf das gesamte Gebäude.



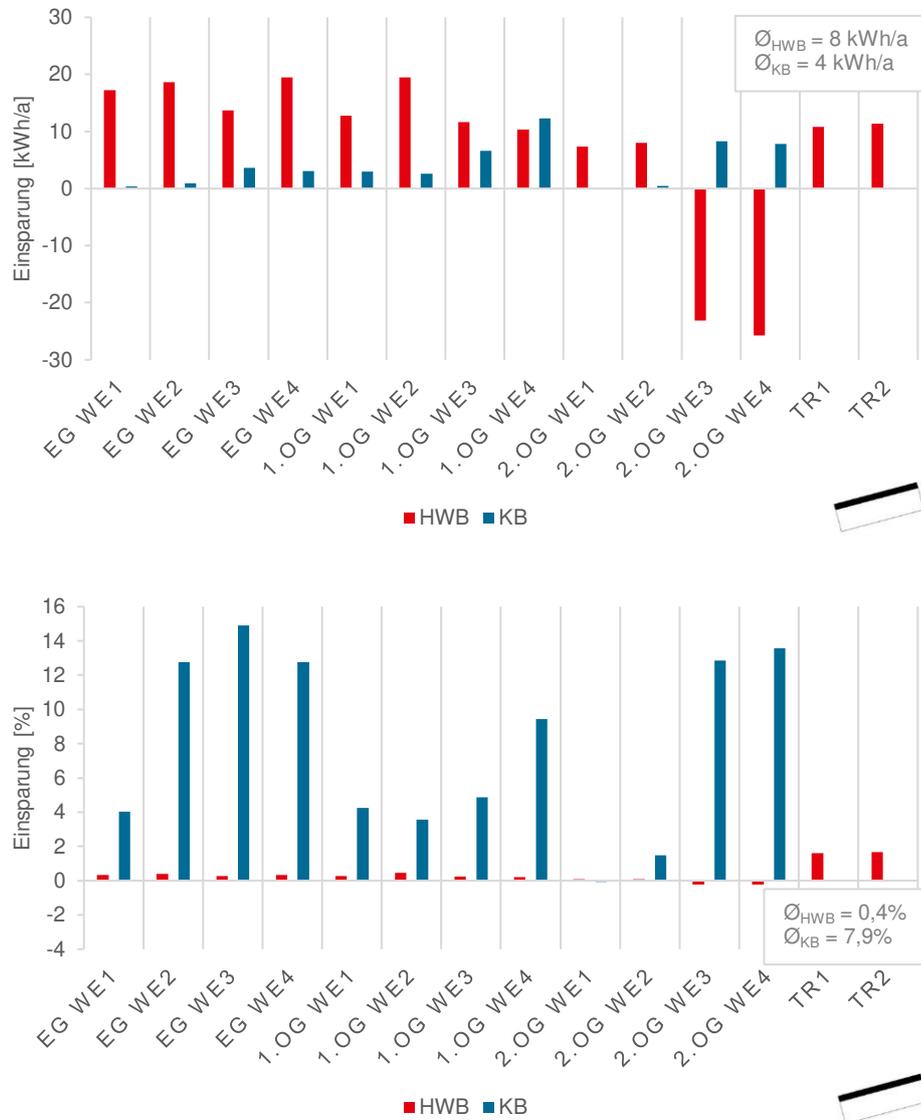
**Abbildung 33** Nutzenergieeinsparungen durch Begrünung der Südwestfassade

Bei Begrünung der Südwestfassade (Abbildung 33) fällt die Einsparung des Heizwärmebedarfs in den thermischen Zonen geringer als bei Begrünung der Nordost- und Südostfassade aus. Sie liegt im Durchschnitt bei 14 kWh/a bzw. 0,2%. In den Wintermonaten werden die wertvollen solaren Energieeinträge, welche die Energiebilanz einer thermischen Zone verbessern, durch die VertiKKA abgeschirmt. Dieser Effekt wurde dadurch verstärkt, dass die Fassadenseite nahezu vollständig mit VertiKKA bedeckt werden konnte, während die Südostseite weniger Platz für Module an der Fassade bot.

Die Einsparung des Kühlbedarfs der begrünten thermischen Zonen liegt mit durchschnittlich 7 kWh/a zwar nur leicht über denen bisheriger Begrünungsszenarien, doch prozentual betrachtet fiel sie mit 29,1% am höchsten aus. Sie beträgt damit mehr als das Doppelte im Vergleich zur Begrünung der Südostfassade mit 12,8%. Doch da auf eine südwestlich begrünte thermische Zone das Drei- bis Vierfache an Modulen

verglichen mit einer im Südosten begrünter Zone kommt, reduziert die VertiKKA den Kühlbedarf im Südosten weiterhin am stärksten.

Bezogen auf die Heizwärme- und Kühlbedarfe des gesamten Gebäudes liegen die Einsparungen bei 39 kWh/a bzw. 0,1% und 21 kWh/a bzw. 3,3%.



**Abbildung 34** Nutzenenergieeinsparungen durch Begrünung der Nordwestfassade

Bei der Simulation der VertiKKA an der Nordwestfassade fällt die Einsparung des Heizwärmebedarfs ähnlich niedrig wie in den bisherigen Begrünungsszenarien aus. Auch hier treten wieder Abweichungen von den zu erwartenden Ergebnissen im zweiten Obergeschoss auf. In den begrünter thermischen Zonen konnte der Heizwärmebedarf im Durchschnitt um 8 kWh/a bzw. 0,4% gesenkt werden. Diesbezüglich liegt die Einsparung in der prozentualen Betrachtung über der, die durchschnittlich durch die Begrünung der Südwestfassade erreicht wurde. Das liegt daran, dass die Nordwestseite durch die VertiKKA nicht noch stärker verschattet wird, als sie es ohnehin ist, weshalb sich die VertiKKA dort auch nicht negativ auf den Heizenergiebedarf auswirkte.

Wie Abbildung 34, unten zeigt, ist die Einsparung des Kühlbedarfs im ersten Obergeschoss prozentual betrachtet am niedrigsten, da der Kühlbedarf des Referenzmodells dort deutlich erhöht war. Die durchschnittliche Einsparung aller begrünten thermischen Zonen liegt bei 4 kWh/a bzw. 7,9% und damit leicht über der Einsparung an der Nordostfassade, die mit weniger Modulen begrünt werden konnte.

Bezogen auf das gesamte Gebäude konnte der Heizwärmebedarf schließlich um 112 kWh/a bzw. 0,1% und der Kühlbedarf um 49 kWh/a bzw. 7,4% gesenkt werden.

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die bereits beschriebenen Ergebnisse und stellt die Heizwärme- und Kühleinparungen, die im gesamten Gebäude auftraten, in Summe als Nutzenergieeinsparungen dar. Der Einfluss der Modulzahl, mit der die thermischen Zonen begrünt werden konnten, wurde schon mehrfach erwähnt und abgeschätzt. Um konkrete Aussagen treffen zu können, wurden die Einsparungen des Heizwärme- und Kühlbedarfs in Tabelle 12 zusätzlich jeweils auf ein Modul (0,80 x 0,80 m) bezogen.

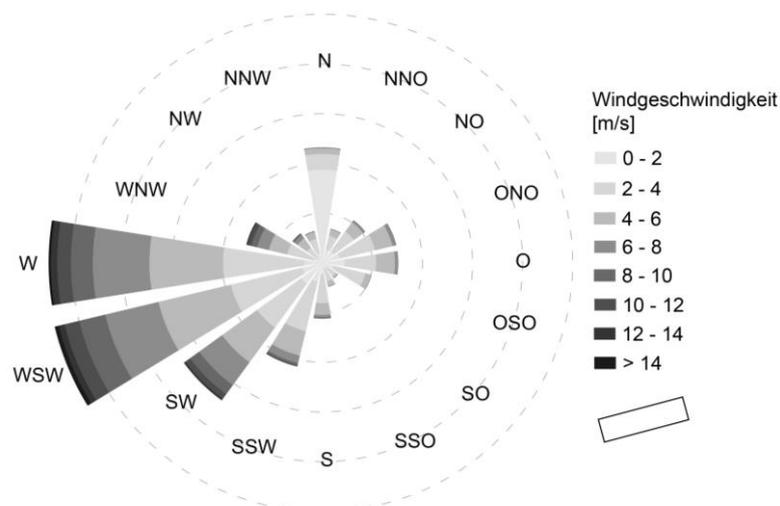
**Tabelle 12** Nutzenergieeinsparungen des gesamten Gebäudes bei Begrünung unterschiedlicher Gebäudeseiten im Vergleich zum Referenzmodell

Einsparung	Nordost 	Südost 	Südwest 	Nordwest 
HWB	132 kWh/a	303 kWh/a	39 kWh/a	112 kWh/a
	1,10 kWh/aMod	2,30 kWh/aMod	0,33 kWh/aMod	0,65 kWh/aMod
	0,2%	0,4%	0,1%	0,1%
KB	5 kWh/a	71 kWh/a	21 kWh/a	49 kWh/a
	0,04 kWh/aMod	0,54 kWh/aMod	0,18 kWh/aMod	0,28 kWh/aMod
	0,7%	10,8%	3,3%	7,4%
NEB	137 kWh/a	374 kWh/a	61 kWh/a	161 kWh/a
	1,14 kWh/aMod	2,83 kWh/aMod	0,51 kWh/aMod	0,94 kWh/aMod
	0,2%	0,5%	0,1%	0,2%

Ersichtlich wird, dass bei Begrünung der Südostfassade die meiste Nutzenergie eingespart werden konnte - insgesamt 374 kWh/a bzw. 0,5% und pro Modul durchschnittlich 2,83 kWh/a. Bei Begrünung der Nordost- und Südwestfassaden fielen die Nutzenergieeinsparungen am geringsten aus. In diesen Fällen verteilten sich die Module an der Fassade lediglich auf drei thermische Zonen. Bezogen auf das Einsparpotential pro Modul schnitt die Südwestfassade in der Heizperiode und die Nordostfassade in der Kühlperiode am schlechtesten ab. Da die Bedarfe in der Heizperiode jedoch schwerer wiegen, fiel die Einsparung pro Modul mit nur 0,51 kWh/a an der Südwestfassade am niedrigsten aus. Hinsichtlich des Nutzenergie-Einsparpotentials empfiehlt es sich, die VertiKKA nicht nur im Südosten, sondern auch im Nordosten anzubringen, wo die Nutzenergieeinsparung pro Modul bei 1,14 kWh/a lag. Allerdings konnten mit der VertiKKA an der Nordwestfassade insgesamt höhere Einsparungen erzielt werden (161 kWh/a). Eine dortige Begrünung wäre also dann sinnvoll, wenn die Anzahl der notwendigen Module eine

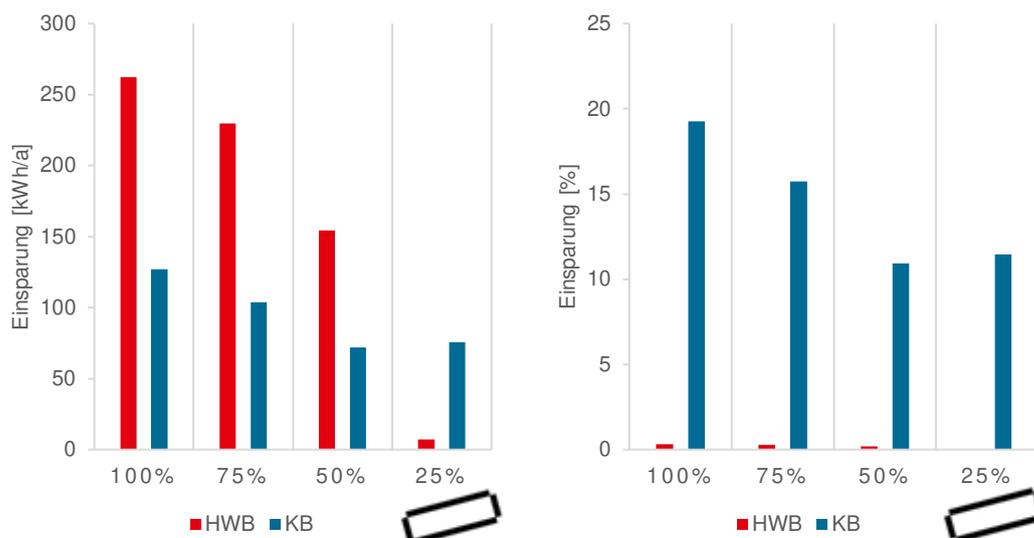
untergeordnete Rolle spielte. Wie bereits erwähnt, wurde die Pflanzenvitalität nicht in die Überlegungen einbezogen.

Die Ursachen der Ergebnisse sind nicht immer vollkommen ersichtlich. Viele Faktoren – darunter die Größe und Lage der thermischen Zonen und die klimatischen Bedingungen – spielten in den Simulationen eine Rolle. Nicht zuletzt beeinflussten numerische Ungenauigkeiten die Ergebnisse. Einer der bereits mehrfach genannten Haupteffekte ist besonders schwierig einschätzbar: die Evapotranspiration bzw. Verdunstungskühlung. Wie stark die Evapotranspiration die Kühlwirkung der Grünfassade beeinflusst, hängt unter anderem von der Windgeschwindigkeit im Blätterdach ab. Je höher diese ist, umso stärker ist die Verdunstung an Substrat- und Blattoberfläche. Der Wind kommt überwiegend auf west-südwestlicher Richtung (Abbildung 35), weshalb die Luft nahezu parallel entlang der nordwestlichen oder südöstlichen Grünfassade strömt und frontal auf die Südwestfassade stößt. Dadurch kann die Evapotranspirationsrate an diesen Seiten höher als an der windgeschützten Nordostfassade ausfallen und die Ergebnisse zusätzlich beeinflussen. Der Luftwechsel im Luftspalt wird hingegen nicht durch die lokale, sondern die allgemeine Windgeschwindigkeit aus der Klimadatei beeinflusst. Das bedeutet, die Hinterlüftung der VertiKKA ist unabhängig von deren Orientierung und Position gleich und damit auch die Wirkung des Luftspalts.



**Abbildung 35** Verteilung der Windgeschwindigkeit und -richtung des Testreferenzjahres

## 3.2 Bedeckungsgrad



**Abbildung 36** Nutzenenergieeinsparungen bei verschiedenen Bedeckungsgraden

Die Untersuchung der Bedeckungsgrade gibt Aufschluss darüber, ob zwischen Bedeckungsgrad und Energieeinsparpotential ein linearer Zusammenhang besteht und damit, ob bestimmte Bedeckungsgrade energetisch betrachtet effektiver wirken als andere. In Abbildung 36, links ist bei der Einsparung des Heizwärmebedarfs ein annähernd linearer Zusammenhang von 100 bis 50% erkennbar. Bei 25% Bedeckung fällt die Einsparung bezogen auf den gesamten Heizwärmebedarf nur noch sehr gering aus. 50 und 75% Bedeckung entsprechen mehr als 50 und 75% der Einsparungen des Heizwärmebedarfs im Vergleich zur vollen Bedeckung. Daraus folgt, dass diese Bedeckungsgrade den Heizenergiebedarf bezogen auf die Anzahl der VertiKKA-Module am effizientesten senkten. Auch bei der Einsparung des Kühlbedarfs besteht ein annähernd linearer Zusammenhang von 100 bis 50% Bedeckung. Doch bei 25% kommt die Einsparung immer noch etwa der des doppelten Bedeckungsgrades gleich und sinkt nicht weiter ab. Sie ist sogar geringfügig höher. Dieses Ergebnis ist zum Teil auf das Auftreten numerischer Ungenauigkeiten in einzelnen Wohneinheiten zurückzuführen. Doch auch ohne diese wäre die Kühlwirkung bei 25% Bedeckung noch signifikant erhöht. Diese Beobachtung deutet auch hier darauf hin, dass sich Verschattung und Evaporation deutlich stärker als die Dämmwirkung und Windbarriere der VertiKKA auswirkte. Insgesamt zeigen die Ergebnisse: Die volle Bedeckung des Gebäudes mit VertiKKA sparte mit 262 kWh/a bzw. 0,3% die meiste Heizwärme aber auch der Kühlbedarf konnte mit 127 kWh/a bzw. 19,3% am stärksten gesenkt werden. Die Nutzenenergieeinsparung von 389 kWh/a entspricht 0,5% des Nutzenenergiebedarfs des Referenzmodells. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten wäre eine Bedeckung mit VertiKKA von 50 bis 75% sinnvoller. Das zeigt Tabelle 13 deutlicher, in der die jährlichen Einsparungen des Heizwärme- und Kühlbedarfs aller thermischer Zonen summiert und in Kilowattstunden pro Jahr und Modul angegeben sind. Bei 50 bzw. 75% Bedeckung liegt die Nutzenenergieeinsparung zwar nur bei 0,3 bzw. 0,4%, die Einsparungen pro Modul jedoch bei 0,83 bzw. 0,82 kWh/a und damit höher als bei voller Bedeckung. Erwähnenswert ist darüber hinaus, dass bei vollständiger Bedeckung aller

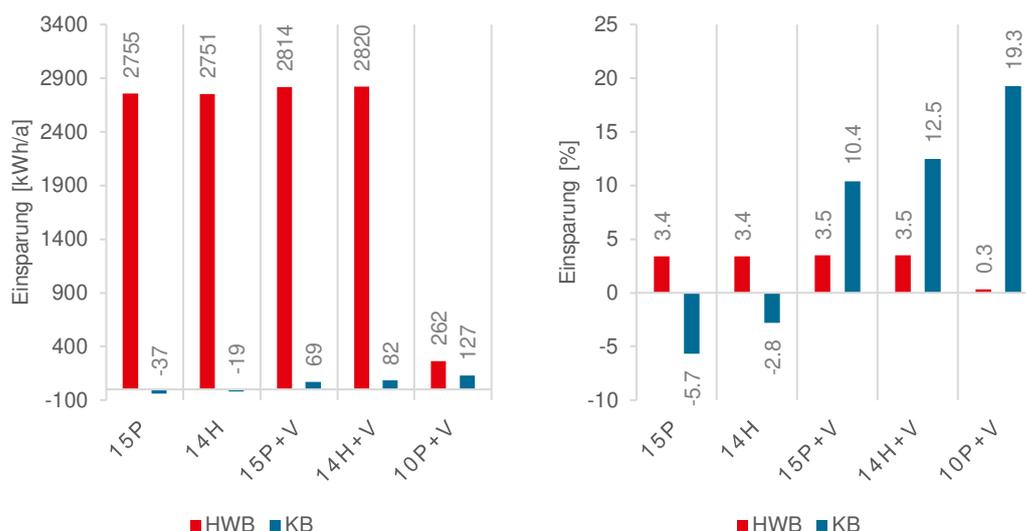
Gebäudeseiten nur 56 kWh/a bzw. 0,02% mehr Energie eingespart werden können als bei alleiniger Bedeckung der Südostfassade (Kapitel 3.1). Mit anderen Worten wäre eine 25%ige Bedeckung, bei der die Module nur an der Südostfassade befestigt wären, deutlich effizienter als eine gleichmäßige Verteilung der Module auf alle Gebäudeseiten.

**Tabelle 13** Nutzenergieeinsparungen unterschiedlicher Bedeckungsgrade

Einsparung	100%	75%	50%	25%
				
HWB	262 kWh/a	229 kWh/a	154 kWh/a	7 kWh/a
	0,48 kWh/aMod	0,56 kWh/aMod	0,57 kWh/aMod	0,05 kWh/aMod
	0,3%	0,3%	0,2%	0,0%
KB	127 kWh/a	104 kWh/a	72 kWh/a	76 kWh/a
	0,23 kWh/aMod	0,25 kWh/aMod	0,26 kWh/aMod	0,56 kWh/aMod
	19,3%	15,7%	10,9%	11,5%
NEB	389 kWh/a	333 kWh/a	226 kWh/a	83 kWh/a
	0,72 kWh/aMod	0,82 kWh/aMod	0,83 kWh/aMod	0,61 kWh/aMod
	0,5%	0,4%	0,3%	0,1%

### 3.3 Vergleich mit Sanierungsmaßnahmen

Das Beispielgebäude wurde erstens mit den Sanierungsmaßnahmen (15P und 14H), zweitens mit den Sanierungsmaßnahmen und VertiKKA (15P + V und 14H + V) und drittens mit VertiKKA ohne Sanierungsmaßnahmen (10P + V) simuliert und gegen das Referenzmodell verglichen. Unter Anwendung der VertiKKA wurden alle Gebäudeseiten vollständig bedeckt. Deshalb entspricht die letzte Variante der Simulation des Bedeckungsgrades von 100% im vorherigen Kapitel. Abbildung 37 zeigt, wie stark der Heizwärme- und Kühlbedarf durch die Sanierungsmaßnahmen reduziert werden konnte.



**Abbildung 37** Nutzeinsparungen bei verschiedenen Sanierungsmaßnahmen (mit VertiKKA) im Vergleich zum Referenzgebäude

Durch die erhöhten Dämmschichtdicken und die zusätzliche VertiKKA konnte der Heizwärmebedarf am stärksten reduziert werden. Allerdings sind diese Einsparungen mit je 3,5% nur geringfügig höher als bei den Varianten ohne die VertiKKA. Wird die VertiKKA ohne zusätzliche Dämmschicht am Beispielgebäude angebracht, fällt die Einsparung des Heizwärmebedarfs mit 0,32% im Vergleich am geringsten aus (Abbildung 37, rechts). Während bei den Heizwärmebedarfen in allen Varianten Einsparungen erzielt werden konnten, stieg der Kühlbedarf bei den zusätzlich gedämmten Varianten ohne VertiKKA an. Durch die aufgedoppelte Polystyrolämmung (15P) wurde er um 5,7% erhöht, durch die Hanffaserdämmung (14H) um 2,8%. In der Regel schützen energetische Sanierungsmaßnahmen das Gebäude nicht nur vor Auskühlung, sondern auch vor Überhitzung, da die Wärmestromdichte durch die Außenwand reduziert wird. Werden die Fenster und weitere Bestandteile der thermischen Gebäudehülle nicht auch energetisch saniert, kann über diese Flächen weiterhin ein erhöhter Wärmeeintrag während der Sommermonate erfolgen. Gleichzeitig wird dieser Wärmegewinn stärker im Gebäude gehalten, das in der Nacht langsamer auskühlt, als es sich während des längeren Tages aufheizt. Wurde die VertiKKA zusätzlich auf die verbesserten Dämmungen aufgebracht, konnten diese negativen Effekte im Sommer umgekehrt werden. Bei der Aufdopplung mit VertiKKA (15P + V) wurde der Kühlbedarf um 10,4% reduziert, bei

der Hanffaserdämmung mit VertiKKA (14H + V) sogar um 12,5% verglichen mit dem Referenzmodell. Allerdings wurde mit der VertiKKA an der Bestandsfassade (10P + V) die größte Kühleinparung mit 19,3% erzielt. Dennoch senkte die VertiKKA ohne Sanierungsmaßnahme die Nutzenergiebedarfe des ganzen Jahres mit 389 kWh/a bzw. 0,5% am wenigsten, wie Tabelle 14 zeigt. Um größtmögliche Nutzenergieeinsparungen zu erzielen, ist aus rein energetischer Sicht eine Hanffaserdämmung mit zusätzlicher VertiKKA zu empfehlen. Diese Option schnitt mit 2902 kWh/a bzw. 3,6% Reduktion Nutzenergiebedarfs im Vergleich zum Referenzmodell am besten ab. Darüber hinaus sollten auch die Fensterflächen energetisch saniert werden.

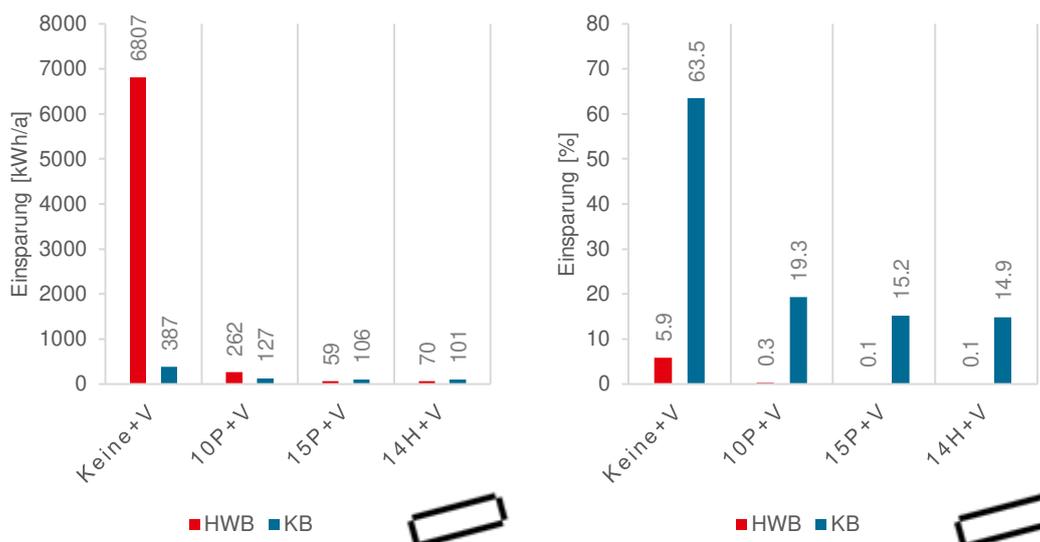
**Tabelle 14** Nutzenergieeinsparungen unterschiedlicher Wandaufbauten im Vergleich zum Referenzgebäude

15P	14H	15P + V	14H + V	10P+ V
2718 kWh/a	2732 kWh/a	2883 kWh/a	2902 kWh/a	389 kWh/a
3,3%	3,3%	3,5%	3,6%	0,5%

Die Ergebnisse zeigten bereits, dass die VertiKKA – je nach dahinter befindlichem Wandaufbau – die Nutzenergiebedarfe unterschiedlich stark senkte. Die Varianten 15P und 15P + V unterscheiden sich um 0,2%, die Varianten 14H und 14H + V um 0,3% und die Variante 10P + V zum Bestand (10P) um 0,5% (Tabelle 14). Das heißt, je schlechter die Dämmung, umso höher scheint der Einfluss der VertiKKA zu sein. Um diesen Einfluss isoliert zu betrachten, wird im Folgenden der Bedeckungsgrad von 100% an verschiedenen Wandaufbauten mit jeweils den gleichen Wandaufbauten ohne VertiKKA verglichen. Verwendet wurden die bisherigen Dämmungen sowie in einer Variante keine Dämmung. Die Verbräuche der Referenzmodelle ohne VertiKKA sind in Tabelle 15 dargestellt. Hinsichtlich der Dämmleistung sind zwei Abstufungen erkennbar, denn die sanierten Varianten 15P und 14H können als gleichwertig verstanden werden. Abbildung 38 zeigt die Heizwärme- und Kühleinparungen durch die VertiKKA an den beschriebenen Referenzmodellen.

**Tabelle 15** Nutzenergiebedarfe von Referenzgebäuden mit unterschiedlichen Wandaufbauten

Bedarf	Keine	10P	15P	14H
HWB	116146 kWh/a	81035 kWh/a	78279 kWh/a	78287 kWh/a
KB	609 kWh/a	660 kWh/a	697 kWh/a	678 kWh/a



**Abbildung 38** Nutzenergieeinsparungen mit 100% Bedeckung bezogen auf verschiedene Wandaufbauten

Ohne Dämmung war die Wirkung der VertiKKA am größten. In dem Fall konnten 6807 kWh/a bzw. 5,9% der Heizwärme bezogen auf das ungedämmte Gebäude eingespart werden. Die geringsten Heizwärmeeinsparungen wurden mit der Aufdopplung (59 kWh/a) und der nahezu gleichwertigen Hanffaserdämmung (70 kWh/a) erzielt. Sie lagen jeweils bei nur 0,1%. Auf die Kühleinsparungen treffen die Beobachtungen gleichermaßen zu. Die höchste Einsparung konnte am Beispielgebäude ohne Dämmung mit 387 kWh/a bzw. 63,5% erzielt werden, die geringste am Beispielgebäude mit Hanffaserdämmung, die im Sommer am besten abschnitt. In dem Fall lag die Kühleinsparung durch die VertiKKA bei nur 101 kWh/a bzw. 14,9%. Tabelle 16 fasst die Ergebnisse zur Nutzenergieeinsparung zusammen.

**Tabelle 16** Nutzenergieeinsparungen unterschiedlicher Wandaufbauten mit VertiKKA im Vergleich zu den Wandaufbauten ohne VertiKKA

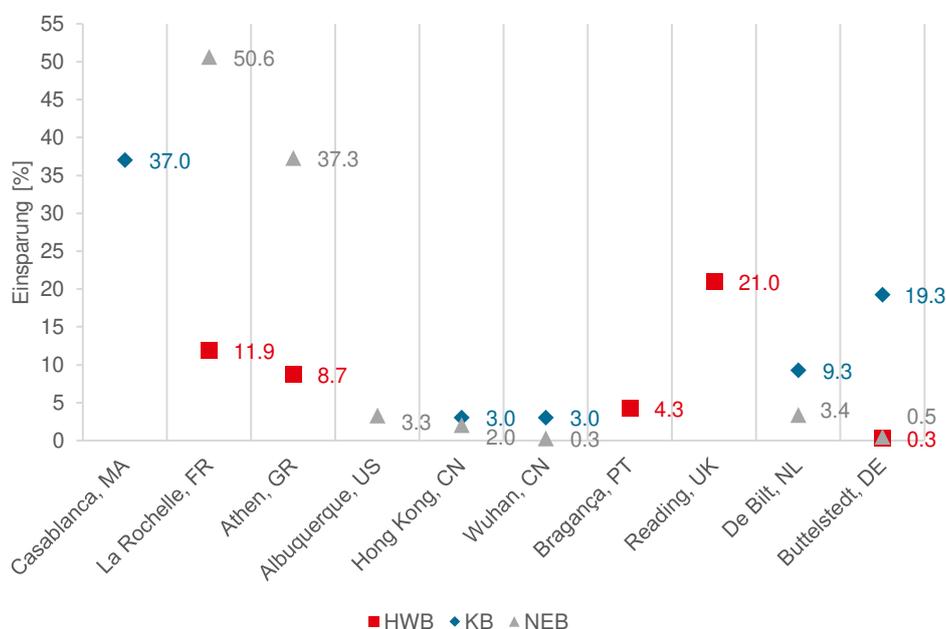
Keine + V	10P + V	15P + V	14H + V
7194 kWh/a	289 kWh/a	165 kWh/a	171 kWh/a
6,2%	0,5%	0,2%	0,2%

### 3.4 Zusammenfassung

Hinsichtlich der Orientierung der VertiKKA am Gebäude konnte sowohl der Heizwärme- als auch der Kühlbedarf am stärksten durch die Begrünung der Südostfassade gesenkt werden. Insgesamt lagen die Einsparungen bei 374 kWh/a bzw. 0,5%. Sie verteilten sich auf die einzelnen Module mit durchschnittlich 2,30 kWh/a in der Heizperiode und 0,54 kWh/a in der Kühlperiode. Die Gegenüberstellungen von quantitativer und prozentualer Betrachtung zeigte: Unter den verwendeten Klimabedingungen waren die Heizwärmeeinsparungen im Winter wesentlich höher als die Kühleinsparungen im Sommer, da der Kühlbedarf im Sommer ohnehin nur 0,8% des Nutzenergiebedarfs betrug. Dennoch war das Einsparpotential der VertiKKA während der Kühlperiode wesentlich höher, da die Verschattung und Evapotranspiration im Sommer stärker in den Vordergrund traten als die Windabschirmung und zusätzliche Dämmwirkung durch die VertiKKA im Winter. Diese Beobachtungen wurden während der Untersuchung der Bedeckungsgrade bestätigt. Bei einer Bedeckung von 100% konnten 262 kWh/a bzw. 0,3% Heizwärme und 127 kWh/a bzw. 19,3% des Kühlbedarfs im Vergleich zum Referenzgebäude eingespart werden. Mit der vollständigen Bedeckung wurden zwar die höchsten Einsparungen erzielt, doch die Bedeckungsgrade 50 und 75% reduzierten den Heizwärme- und Kühlbedarf am effizientesten. Pro Modul konnten bei 50 und 75% Bedeckung im Gesamt-Durchschnitt 0,83 und 0,82 kWh/a eingespart werden. Bei vollständiger Bedeckung aller Gebäudeseiten konnte der Gesamtenergiebedarf nur um weitere 0,02%, verglichen mit der alleinigen Bedeckung der Südostfassade, gesenkt werden. Mit anderen Worten steigt der mit Material, Kosten, Montage, Pflege, Wartung und Rückbau verbundene Mehraufwand erheblich und unverhältnismäßig zum energetischen Nutzen der VertiKKA. Deshalb stellt die alleinige Begrünung der Südostfassade die wirtschaftlichste Lösung dar. Das Nutzenergie-Einsparpotential der VertiKKA lag mit 0,5% bei 100% Bedeckung unter dem Potential üblicher Sanierungsmaßnahmen (3,3%). Aus rein energetischer Sicht stellte die Kombination aus einer 14 cm dicken Hanffaserdämmung als WDVS anstelle der vorhandenen Polystyrolämmung (10 cm) und der VertiKKA die beste Sanierungsmaßnahme dar. Mit 100% Bedeckung konnten so insgesamt 2902 kWh/a bzw. 3,6% verglichen mit dem Beispielgebäude eingespart werden. Die VertiKKA selbst sparte an der hanffasergedämmten Variante 0,2% des Nutzenergiebedarfs ein. An einem schlecht gedämmten Referenzgebäude wirkte sich die VertiKKA wiederum stärker aus. Das Extrembeispiel ohne Dämmung zeigte eine jährliche Reduktion des Heizwärmebedarfs um 5,9% und des Kühlbedarfs um 63,5%.

## 4 Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse, die aus der vollständigen Bedeckung des Referenzgebäudes mit der VertiKKA hervorgingen, mit den Ergebnissen weiterer Studien verglichen. Butteltstedt in Thüringen – der Ort, auf den sich die Klimadaten des verwendeten Testreferenzjahres beziehen – gehört einem feuchtgemäßigten Klima mit warmen Sommern (Cfb) an [48]. Andere Studien haben bereits Simulationen und Messungen unter weiteren Klimabedingungen durchgeführt. Abbildung 39 gibt einen Überblick über die prozentualen jährlichen Heizwärme-, Kühl- oder Nutzenergieeinsparungen, die anderenorts numerisch ermittelt oder gemessen wurden. Die Einsparpotentiale variieren stark je nach Klimaregion. Zudem hängen sie von vielen verschiedenen Faktoren ab. Insbesondere der Aufbau der Außenwand und der Grünfassade beeinflussen den Wärmestrom von außen nach innen im Sommer bzw. von innen nach außen im Winter.



**Abbildung 39** Literaturvergleich der simulierten und gemessenen jährlichen Nutzenergieeinsparungen durch Fassadenbegrünung

Für Casablanca, Marokko, La Rochelle, Frankreich und Athen, Griechenland wurden Simulationen durch Djedjig et al. [19, 26, 80] durchgeführt. Die Autor:innen integrierten ein hygrothermisches Modell einer wandgebundenen Fassadenbegrünung in die Gebäudesimulationssoftware TRNSYS und validierten dieses anhand von Messungen in La Rochelle [80]. Für die Simulationen des Energiebedarfs wurden die Ost- und Westseite eines dreistöckigen, moderat gedämmten Gebäudes begrünt. Die 10 cm dicke Substratschicht wurde nicht hinterlüftet aber dennoch in einem Abstand von 2 bis 3 cm zur Fassade angebracht. Das Laub wurde durch einen LAI von 4 und einen Bedeckungsgrad von 1 charakterisiert. Die Thermostat-Temperatur betrug in der Kühlperiode 26°C und in der Heizperiode 19°C. Interne Lasten wurden nicht berücksichtigt und der Luftwechsel auf 0,6 h<sup>-1</sup> gesetzt [19]. Die Ergebnisse der Simulationen zeigten für Casablanca

einen leicht erhöhten Heizwärmebedarf, aber einen um 37% reduzierten Kühlbedarf. Für La Rochelle konnte sowohl der Heizwärme- als auch der Kühlbedarf gesenkt werden. Dort lagen die Nutzenergieeinsparungen bei 50,6%. Für Athen fielen die Einsparungen etwas geringer aus und betragen über das Jahr 37,3%. Dennoch berechneten die Autor:innen Djedjig et al. unter den beschriebenen Bedingungen die größten Einsparungen verglichen mit anderen und diesen Untersuchungen.

Die bereits in Kapitel 2.3.3 erwähnte Studie von García et al. [22] untersuchte mit zwei numerischen Modellen beispielhaft den Nutzenergiebedarf eines begrünten Supermarktes in Santiago de Chile, Chile. Das Gebäude entspricht einem ASHRAE-Prototyp, das in Albuquerque, Vereinigte Staaten steht und die gleiche Klimaklassifikation aufweist. Simuliert wurde eine gut gedämmte und eine ungedämmte Variante des Supermarktes, jeweils begrünt an der Nord-, Ost- und Westfassade. Das Laub wies die gleichen Eigenschaften wie bei Djedjig et al. auf und das Substrat hatte eine Schichtdicke von 20 cm. Bei der gedämmten Variante konnte der Nutzenergiebedarf im Vergleich zum unbegrünten Modell um 3,3% gesenkt werden, bei der ungedämmten Variante hingegen um 23,7%. Auch in García et al. wird deutlich: Die Größenordnung der Einsparungen, die durch eine Fassadenbegrünung erzielt werden können, ist stark von der thermischen Hülle des Gebäudes abhängig. Diese Erkenntnis belegte auch Vera et al. [105] bei der Untersuchung von Gründächern.

Die Untersuchungen für Hong Kong, China wurden durch die ebenfalls schon erwähnten Autor:innen Dahanayake und Chow [28] durchgeführt (vgl. Kapitel 2.3.3). Sie verwendeten ein selbstentwickeltes numerisches Modell, das sie in EnergyPlus integrierten und validierten. Begrünt wurde ein hypothetisches, 100m hohes Hochhaus mit einem Fensterflächenanteil von 50%. Die Autor:innen untersuchten – wie auch diese Arbeit – verschiedene Himmelsorientierungen und Bedeckungsgrade. Die Fassadenbegrünung wies eine Substratschichtdicke von 10 cm und einen LAI von 3 auf und wurde nicht hinterlüftet. Interne Lasten durch Personen, Geräte und Beleuchtung wurden berücksichtigt und die Thermostat-Temperatur auf 20°C im Sommer bzw. 24°C im Winter gesetzt. Durch die Verschattungswirkung der Begrünung wurde der Heizwärmebedarf im Winter leicht erhöht. Andererseits konnte im Sommer eine Einsparung des Kühlbedarfs erzielt werden, die durch die Begrünung der West- und Ostfassade mit 2,1 und 2,0% im Juli am höchsten war. Auf das ganze Jahr bezogen konnte der Kühlbedarf um 3,0% gesenkt werden [28, 67]. Aufgrund des erhöhten Heizwärmebedarfs lagen die Nutzenergieeinsparungen bei 2,0%.

Auch für das deutlich nördlicher als Hong Kong gelegene Wuhan, China führten Dahanayake und Chow Simulationen durch. Für diese Lage stellte sich ebenfalls ein erhöhter Heizwärmebedarf durch die Fassadenbegrünung heraus. Deshalb lag die Nutzenergieeinsparung, obwohl der Kühlbedarf wie in Hong Kong um 3,0% reduziert werden konnte, bei nur 0,3% [67]. Der Vergleich zwischen Hong Kong und Wuhan verdeutlicht: Je wärmer die Klimaregion, umso stärker überwiegen die positiven Effekte der Fassadenbegrünung.

Carlos et al. [23] simulierten nur die Winterbedingungen für ein Gebäude in Bragança, Portugal mit dem Green-Roof-Modell von EnergyPlus, ohne dieses zu modifizieren (vgl. Kapitel 2.3.3). Damit entspricht das Grünfassaden-Modell numerisch betrachtet

dem Modell dieser Arbeit. Die Autor:innen begrünt alle Fassaden zu 100% mit einem Aufbau bestehend aus einem 8 cm dicken Substrat und einer Laubschicht mit einem LAI von 3. Der zwischen Außenwand und Substrat befindliche, 5 cm tiefe Luftspalt wurde leicht belüftet. Beobachtet werden konnte ein erhöhter Wärmestrom an der verschatteten Südfassade und umgekehrt eine Abnahme des Wärmestroms an der sonnenabgewandten Nordfassade, an der die Pufferwirkung der Fassadenbegrünung überwog. Durch die Begrünung einer 12 cm dicken, ungedämmten Lochziegelfassade konnten schließlich 4,3% bzw. einer 4 cm dicken, ebenfalls ungedämmten Granitwand 6,2% des Heizwärmebedarfs eingespart werden.

In Reading, Großbritannien wurde die Nutzenergie nicht simuliert, sondern anhand eines sehr kleinen Volumens gemessen. Dazu wurde ein Wassertank in einem Bauvolumen von 0,25 m<sup>3</sup> aus Ziegelquadern auf 16°C konstant gehalten. Ein Quader diente als Referenzobjekt, ein weiterer wurde mit immergrünem Efeu bewachsen. Durch den Bewuchs konnte der Energieverbrauch zum Beheizen des Wassertanks im Winter des ersten Versuchsjahres um 21% und im zweiten Versuchsjahr um 37% gesenkt werden, da sich die Begrünung weiter verdichtet hatte [99].

Während die Gebäudeeinstellungen in dieser Arbeit denen von Djedjig et al. [19, 26, 80] am stärksten ähneln und die Sensitivitätsanalyse der von Dahanayake und Chow [106], sind die Klimabedingungen des Testreferenzjahres von Buttelstedt vergleichbar mit denen von De Bilt in den Niederlanden. Unter den dortigen Klimabedingungen von 1999 bis 2000 wurde mit der Simulationssoftware HAMBASE ein zweigeschossiges Bürogebäude simuliert und der Nutzenergiebedarf abhängig von drei verschiedenen Begrünungssystemen untersucht. Darunter war eine vorgehängte, hinterlüftete Grünfassade mit einer 13 cm dicken Substratschicht und einem LAI von 2. Bei vollständiger Bedeckung des gesamten Gebäudes mit dieser Begrünung konnte der Kühlbedarf um 9,3% und der Nutzenergiebedarf um 3,4% pro Jahr gesenkt werden [27].

Die Ergebnisse der Studien zeigen eine weite Verteilung des Nutzenergie-Einsparpotentials von 0,3 bis 50,6% abhängig von den Rahmenbedingungen. Bei diesen Studien handelt es sich fast ausschließlich um Simulationen. Die durch Cameron et al. [99] durchgeführte Messung in Reading fand an einem sehr kleinen, nicht mit einem Gebäude vergleichbaren Bauvolumen statt. Dass es keine weiteren Messungen gibt, liegt in der Komplexität der Sache begründet. Verglichen mit den beschriebenen Studien zeigten die Simulationen in dieser Arbeit mit rund 0,5% deutlich geringere Einsparungen des Nutzenergiebedarfs bei 100% Bedeckung mit der VertiKKA. Die Kühleinsparungen liegen mit rund 19,3% zwischen den für Hong Kong und Casablanca ermittelten. Da der Heizwärmeeinsparung in Verbindung mit Fassadenbegrünungen in den meisten Studien weniger Beachtung geschenkt wurde, ist eine Einordnung diesbezüglich schwieriger. Doch verglichen mit den berichteten positiven Auswirkungen fiel die Heizwärmeeinsparung im Winter für das Beispielgebäude in Großbringen mit rund 0,3% eher gering aus. Ein Grund dafür kann die bessere Dämmung im Vergleich zu den übrigen Untersuchungsobjekten sein. Darüber hinaus wandten die Autor:innen Djedjig et al. [19, 26, 80], García et al. [22] und Dahanayake und Chow [28, 67] ein selbsterstelltes Grünfassaden-Modell an,

das die Wärmetransportmechanismen exakter als das Green-Roof-Modell von EnergyPlus in der vertikalen Anwendung abbildete (vgl. Kapitel 2.3.3).

## 5 Fazit und Ausblick

Mit Hilfe der Anwendungen SketchUp und OpenStudio sind mehrere Simulationsmodelle des Beispielgebäudes in Großobringen, Thüringen erstellt worden: darunter das Referenzmodell ohne und mit verschiedenen Begrünungsszenarien durch die VertiKKA sowie mit zwei verschiedenen Außenwanddämmungen (und der VertiKKA). Die Modelle sind mit der Engine von EnergyPlus simuliert und die Varianten gegen das Referenzmodell verglichen worden. Die Vergleiche haben das ganzjährige Nutzenergie-Einsparpotential einer wandgebundenen Fassadenbegrünung unter gemäßigten Klimabedingungen gezeigt. Bei vollständiger Bedeckung aller Gebäudeseiten sind mit 0,5% nur geringe Einsparungen des Nutzenergiebedarfs erzielt worden. 0,3% sind auf die winterliche Heizperiode und 19,3% auf die Kühlperiode zurückzuführen. Die besonders in den Wintermonaten zutage tretende Pufferwirkung des Luftspalts und der Grünfassade haben sich geringer ausgewirkt, als für die simulierte Region erwartet. Die vielfach berichtete Erkenntnis anderer Studien, dass die Verschattung den größten Einfluss auf das Einsparpotential von Grünfassaden habe, hat diese Arbeit auch für mitteleuropäische Breitengrade bestätigt. Die Frage, ob eine wandgebundene Begrünung für die untersuchte Klimaregion nennenswerte energetische Vorteile mit sich bringt, kann nun für einen weitverbreiten Gebäudetypus beantwortet werden: An einem in Massivbauweise errichteten Bauwerk mit moderatem WDVS ( $U$ -Wert  $0,33 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) sind die energetischen Vorteile einer wandgebundenen Fassadenbegrünung für die Betreibenden und Nutzenden sehr gering. Hinzu kommt, dass unsanierte Wohngebäude, wie im Beispiel, in der Realität meist nicht ganzjährig klimatisiert werden. Damit entfallen die energetischen Einsparungen während der Kühlperiode und die Nutzenergieeinsparung für solche Wohngebäude sinkt auf 0,3%. Hinsichtlich des hohen Energieverbrauchs, der in Deutschland überwiegend auf diese unsanierten Wohngebäude entfällt, würde lediglich eine weite Verbreitung von Grünfassaden einen geringen Beitrag zur Energieeinsparung im Gebäudesektor und zur Klimaneutralität von Bestandsgebäuden bis 2050 leisten. Dennoch kann die Erkenntnis, dass wandgebundene Grünfassaden den Kühlbedarf erheblich senken können, in Zeiten den Klimawandels auch für Mitteleuropa an Relevanz gewinnen.

Mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse ist ein optimales Begrünungsszenario für das Beispielgebäude ermittelt worden. Die vollständige Begrünung der Südostfassade hat sich als die effektivste Begrünungsmaßnahme erwiesen. Durch die Begrünung mit 132 Modulen ist der Nutzenergiebedarf um 0,5% gesunken. Das entspricht einer Einsparung von 2,83 kWh/a pro VertiKKA-Modul. Nicht zuletzt die gleichmäßige Verteilung der Begrünung auf alle Wohneinheiten (thermische Zonen) hat sich positiv auf die Energiebilanz ausgewirkt. Die für das Beispielgebäude gewonnenen Erkenntnisse können nur begrenzt auf andere Gebäude angewandt werden, denn einen maßgeblichen Einfluss auf die Wirkung der VertiKKA haben Windgeschwindigkeit und -richtung. Allerdings herrscht in den mittleren Breitengraden, somit auch in Deutschland, überwiegend Wind aus westlicher Richtung. Insofern sind ähnliche Ergebnisse hinsichtlich der Orientierung der Grünfassade auch an anderen Standorten zu erwarten.

Weiterhin sind zwei verschiedene Sanierungsmaßnahmen simuliert worden, die für die Außenwand des Beispielgebäudes in Frage kommen. Durch das Anbringen einer neuen Dämmung aus Hanffaserdämmplatten mit 14 cm Plattenstärke ist der Nutzenergiebedarf um 3,3% gesunken. Die VertiKKA hat mit 0,5% nur ein Siebtel der energetischen Verbesserungen, die eine Sanierungsmaßnahme mit sich bringt, erzielen können. Die dämmende und kühlende Wirkung der VertiKKA sinkt mit zunehmendem energetischem Standard der Außenwand. Das haben die maximalen Nutzenergieeinsparungen durch die VertiKKA an der ungedämmten Wand mit 6,2% und die minimalen Einsparungen an der mit Polystyrol gedämmten Wand mit 0,2% gezeigt. Dennoch sind die größten Einsparungen durch die Kombination aus Sanierungsmaßnahme und vollständiger Bedeckung mit der VertiKKA erzielt worden. Da sich die vollständige Begrünung jedoch nicht als die wirtschaftlichste Maßnahme herausgestellt hat, wird für das Beispielgebäude ein Hanffaser-WDVS mit begrünter Südostseite vorgeschlagen.

Diese Arbeit ergänzt bisherige Untersuchungen an Grünfassaden um einen weiteren, in Mitteleuropa gelegenen Standort. Darüber hinaus grenzt sie sich durch die zusätzliche Simulation der Hinterlüftung zu anderen Studien ab. Aus diesen Gründen kann sie als ein weiteres Puzzleteil im Forschungsfeld der Fassadenbegrünungen gesehen werden. Im Speziellen enthält die vorliegende Arbeit neue Erkenntnisse über die VertiKKA. Neben der Wirkung der VertiKKA auf den U-Wert, die hygrothermischen Transportprozesse an der Außenwand und das Mikroklima ist nun auch ihr Nutzenergie-Einsparpotential unter bestimmten Bedingungen bekannt.

Diese Arbeit hat nicht nur zu Ergebnissen, sondern auch zu weiteren Fragestellungen geführt, die in Zukunft bearbeitet werden können. Zu den größten Folgeaufgaben gehört einerseits die Validierung des Green-Roof-Modells in der vertikalen Anwendung und andererseits dessen Modifizierung zu einem Green-Wall-Modell. Letztere Aufgabe sollte ebenso mit einer Validierung einhergehen. Im einfachsten Fall können die theoretischen Grundlagen und Vorgehensweisen von anderen Autor:innen übernommen werden, die bereits ein modifiziertes Modell erstellt und validiert haben. Dennoch stellt die Implementierung der Änderungen in eine Gebäudesimulationssoftware eine Herausforderung dar.

Des Weiteren kann EnergyPlus bzw. OpenStudio eine Vielzahl von Outputs generieren, die diese Arbeit nicht einbezogen hat. Diese sind besonders in Bezug auf das Green-Roof-Modell interessant. Bspw. kann die Wärmestromdichte für das Laub ermittelt werden.

Die Testsimulationen, mit denen die Einstellungen für den Luftspalt überprüft worden sind, haben einen starken Einfluss des Luftwechsels auf die Dämmwirkung der Grünfassade gezeigt. Für diese Arbeit ist der Luftwechsel anhand anderer Studien mit vergleichbaren Rahmenbedingungen abgeschätzt worden. Diese Vorgehensweise kann verbessert werden, indem der Luftwechsel hinter der VertiKKA anhand von Messungen der Windgeschwindigkeit im Luftspalt berechnet wird. Solche Messungen könnten an dem geplanten Reallabor der VertiKKA in Stuttgart-Rot stattfinden. Weiterhin können die Koeffizienten des Eingabeobjekts *Design Flow Rate* detailliert bestimmt werden. Durch die Verwendung der *Design Flow Rate* hätte eine veränderte Luftspaltbreite die Simulationsergebnisse nicht beeinflusst – ebenso

wenig die flächige oder kleinteilige Verteilung der VertiKKA an der Fassade. Durch *Wind and Stack Open Area* können diese Parameter berücksichtigt werden, doch dafür sind die Eingaben für das Objekt erst auf ihre Sensitivität zu untersuchen und geeignete Werte zu ermitteln.

Die vor der VertiKKA befindlichen Photovoltaik-Module haben in dieser Arbeit ebenfalls nicht betrachtet werden können. Ihre verschattende und windabschirmende Wirkung kann eine weitere Fragestellung für künftige Untersuchungen sein.

## A Literaturverzeichnis

- [1] AIA, „2030 by the Numbers: The 2020 Summary of the AIA 2030 Commitment“, The American Institute of Architects, 2021.
- [2] A. B. C. Global, „Global Status Report for Buildings and Construction“, Global Alliance for Buildings and Construction, 2020.
- [3] Deutsche Energie-Agentur GmbH, *Gebäude energieeffizient gestalten*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dena.de/themen-projekte/energieeffizienz/gebaeude/> (Zugriff am: 21. März 2021).
- [4] J. Dettmar, N. Pfoser und S. Sieber, „Gutachten Fassadenbegrünung: Gutachten über quartiersorientierte Unterstützungsansätze von Fassadenbegrünungen für das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz (MKUNLV) NRW“, TU Darmstadt, Darmstadt, 2016.
- [5] A. Forouzandeh, „Numerical Modeling Validation for the Microclimate Thermal Condition of Semi-closed Courtyard Spaces between buildings“, *Sustainable Cities and Society*, Jg. 36, S. 327–345, 2018, doi: 10.1016/j.scs.2017.07.025.
- [6] B. Jänicke, F. Meier, M.-T. Hoelscher und D. Scherer, „Evaluating the Effects of Façade Greening on Human Bioclimate in a Complex Urban Environment“, *Advances in Meteorology*, Jg. 2015, 2015, doi: 10.1155/2015/747259.
- [7] F. Salata, I. Golasi, R. de Lieto Vollaro und A. de Lieto Vollaro, „Urban Microclimate and Outdoor Thermal Comfort. A Proper Procedure to Fit ENVI-met Simulation Outputs to Experimental Data“, *Sustainable Cities and Society*, Jg. 26, S. 318–343, 2016, doi: 10.1016/j.scs.2016.07.005.
- [8] N. H. Wong *et al.*, „Thermal Evaluation of Vertical Greenery Systems for Building Walls“, *Building and Environment*, Jg. 45, Nr. 3, S. 663–672, 2010, doi: 10.1016/j.buildenv.2009.08.005.
- [9] M. M. Davis und S. Hirmer, „The Potential for Vertical Gardens as Evaporative Coolers: An Adaptation of the ‘Penman Monteith Equation‘“, *Building and Environment*, Jg. 92, S. 135–141, 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.03.033.
- [10] X. Yang, L. Zhao, M. Bruse und Q. Meng, „An Integrated Simulation Method for Building Energy Performance Assessment in Urban Environments“, *Energy and Buildings*, Jg. 54, S. 243–251, 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.07.042.
- [11] M.-T. Hoelscher, T. Nehls, B. Jänicke und G. Wessolek, „Quantifying Cooling Effects of Facade Greening: Shading, Transpiration and Insulation“, *Energy and Buildings*, Jg. 114, S. 283–290, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.06.047.
- [12] W. J. Stec, A.H.C. van Paassen und A. Maziarz, „Modelling the Double Skin Façade with Plants“, *Energy and Buildings*, Jg. 37, Nr. 5, S. 419–427, 2005, doi: 10.1016/j.enbuild.2004.08.008.

- [13] D. Tudiwer, M. Vertal', A. Korjenic und K. Čakyová, „Abbildung der wärmedämmenden Wirkung eines fassadengebundenen Begrünungssystems in einem Simulationsmodell“, *Bauphysik*, Jg. 41, Nr. 3, S. 155–161, 2019, doi: 10.1002/bapi.201900009.
- [14] B. Scharf, U. Pitha und S. Oberarzbacher, „Living Walls: More than Scenic Beauties“, *IFLA World Congress Cape Town*. [http://www.academia.edu/6649534/Living\\_Walls\\_more\\_than\\_scenic\\_beauties](http://www.academia.edu/6649534/Living_Walls_more_than_scenic_beauties). Accessed., Jg. 24, 2016.
- [15] M. Scarpa, U. Mazzali und F. Peron, „Modeling the Energy Performance of Living Walls: Validation against Field Measurements in Temperate Climate“, *Energy and Buildings*, Jg. 79, S. 155–163, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.04.014.
- [16] Andreas Aicher, "Aufbau und Wirkungsweise der VertiKKA", Persönliches Gespräch im Rahmen des Forschungsprojekts VertiKKA.
- [17] L. Brackney, A. Parker, D. Macumber und K. Benne, *Building Energy Modeling with OpenStudio: A Practical Guide for Students and Professionals*. New York: Springer International Publishing, 2018.
- [18] K. Grabowieckia, A. Jaworski, T. Niewczas und A. Belleri, „Green Solutions - Climbing Vegetation Impact on Building - Energy Balance Element“, *Energy Procedia*, Jg. 111, S. 377–386, 2017.
- [19] R. Djedjig, M. El Ganaoui, R. Belarbi und R. Bennacer, „Thermal Effects of an Innovative Green Wall on Building Energy Performance“, *Mechanics & Industry*, Jg. 18, Nr. 1, S. 104, 2017, doi: 10.1051/meca/2016015.
- [20] L. Malys, M. Musy und C. Inard, „A Hydrothermal Model to Assess the Impact of Green Walls on Urban Microclimate and Building energy consumption“, *Building and Environment*, Jg. 73, S. 187–197, 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2013.12.012.
- [21] J. M. Blanco, A. Buruaga, E. Rojí, J. Cuadrado und B. Pelaz, „Energy Assessment and Optimization of Perforated Metal Sheet Double Skin Façades Through Design Builder; A Case Study in Spain“, *Energy and Buildings*, Jg. 111, S. 326–336, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.11.053.
- [22] M. García, S. Vera, F. Roualt und W. Bustamante, „Modelling and Validation of two Heat and Mass Transfer Model of Living Walls and Evaluation of Their Impact on the Energy Performance of a Supermarket in a Semiarid Climate“, *16th IBPSA International Conference and Exhibition*, 2020, doi: 10.26868/25222708.2019.211051.
- [23] J. S. Carlos, „Simulation Assessment of Living Wall Thermal Performance in Winter in the Climate of Portugal“, *Building Simulation*, Jg. 8, Nr. 1, S. 3–11, 2015.
- [24] Y. Stav und G. Lawson, „Vertical Vegetation Design Decisions and Their Impact on Energy Consumption in Subtropical Cities“, *The Sustainable City VII*:

- Urban Regeneration and Sustainability*, Jg. 155, S. 489–500, 2012, doi: 10.2495/SC120411.
- [25] T. Islam, „Living-Wall Integrated Facades: Incorporating Energy Performance Evaluation in the Design Process Using Digital Simulation“. Masterarbeit, The Pennsylvania State University, 2021.
- [26] R. Djedjig, E. Bozonnet und R. Belarbi, „Integration of a Green Envelope Model in a Transient Building Simulation Program and Experimental Comparison“, *Proceedings of BS2013*, 2013.
- [27] J.A. Oosterlee, „Green Walls and Building Energy Consumption“. Masterarbeit, Eindhoven University of Technology, 2013.
- [28] K.W.D. K. C. Dahanayake und C. L. Chow, „Comparing Reduction of Building Cooling Load Through Green Roofs and Green Walls by EnergyPlus Simulations“, *Build. Simul.*, Jg. 11, S. 421–434, 2018.
- [29] C. Sanjuan, M. J. Suárez, M. González, J. Pistono und E. Blanco, „Energy Performance of an Open-Joint Ventilated Façade Compared With a Conventional Sealed Cavity Façade“, *Solar Energy*, Jg. 85, Nr. 9, S. 1851–1863, 2011, doi: 10.1016/j.solener.2011.04.028.
- [30] C. Völker, „TRAIL2 - Transformation im ländlichen Raum 2: Teilvorhaben: dataTRAIL: Systemische und effiziente Datenerfassung und Verarbeitung energetischer Gebäudequalitätsstandards“, Professur Bauphysik, Bauhaus-Universität Weimar.
- [31] EnergieWerkStadt eG, *Trail*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.trail-energie.de/info/> (Zugriff am: 21. März 2022).
- [32] Björnsen Beratende Ingenieure GmbH, *VertiKKA Forschung & Förderung*. [Online]. Verfügbar unter: <https://vertikka.de/forschung-und-foerderung> (Zugriff am: 21. März 2022).
- [33] H. Alsaad, M. Hartmann und C. Voelker, „The Effect of a Living Wall System Designated for Greywater Treatment on the Hygrothermal Performance of the Facade“, *Energy and Buildings*, Jg. 255, S. 111711, 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111711.
- [34] H. Alsaad, M. Hartmann, R. Hilbel und C. Völker, „The Potential of Facade Greening in Mitigating the Effects of Heatwaves in Central European Cities Building and Environment“, *Building and Environment (Eingereicht)*, 2022.
- [35] A. H. Al Ka'bi, „Comparison of Energy Simulation Applications Used in Green Building“, *Ann. Telecommun.*, Jg. 75, Nr. 7, S. 271–290, 2020, doi: 10.1007/s12243-020-00771-6.
- [36] J. L. M. Hensen und R. Lamberts, „Introduction to Building Performance Simulation“ in *Building Performance Simulation for Design and Operation*, 2012, S. 25–38.
- [37] Psi Therm GmbH, *Psi-Therm 8*. [Online]. Verfügbar unter: [www.psi-therm.de](http://www.psi-therm.de) (Zugriff am: 21. März 2022).

- [38] Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP, *WUFI Pro*. [Online]. Verfügbar unter: <https://wufi.de/de/software/wufi-pro/> (Zugriff am: 21. März 2022).
- [39] Ladybug Tools LLC, *Honeybee*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ladybug.tools/honeybee.html> (Zugriff am: 21. März 2022).
- [40] Ladybug Tools LLC, *Ladybug*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ladybug.tools/ladybug.html> (Zugriff am: 21. März 2022).
- [41] U.S. Department of Energy, „EnergyPlus Version 9.6.0 Documentation: EnergyPlus Essentials“, 2021.
- [42] D. B. Crawley, L. K. Lawrie, C. O. Pedersen und F. C. Winkelmann, „EnergyPlus: Energy simulation program“, *ASHRAE Journal*, Jg. 42, Nr. 4, S. 49–56, 2000.
- [43] U.S. Department of Energy, „EnergyPlus Version 9.6.0 Documentation: Getting Started“, 2021.
- [44] Energy.gov, *EnergyPlus Overcomes (Computer) Language Barrier*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.energy.gov/eere/buildings/articles/energyplus-overcomes-computer-language-barrier> (Zugriff am: 21. März 2022).
- [45] M. Burkhardt, „Einsatz von maschinellen Lernmethoden zur Prognose der thermischen Energieverbräuche von Wohngebäuden in Abhängigkeit verschiedener Gebäude- und Nutzungsparameter“. Bachelorarbeit, Technische Universität Darmstadt, 2014.
- [46] U.S. Department of Energy, „EnergyPlus Version 9.6.0 Documentation: Input Output Reference“, 2021.
- [47] Trimble Inc., *SketchUp*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sketchup.com/de> (Zugriff am: 21. März 2022).
- [48] W. P. Köppen und R. Geiger, *Das geographische System der Klimate*. Berlin: Gebrüder Borntraeger, 1936.
- [49] „§47 Absatz 1 GEG“ in *Gesetz zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechts für Gebäude und zur Änderung weiterer Gesetze*, 2020.
- [50] Transsolar Energietechnik GmbH, „TRNSYS 18: A Transient System Simulation Program“.
- [51] P. Häupl *et al.*, *Lehrbuch der Bauphysik: Schall - Wärme - Feuchte - Licht - Brand - Klima*, 8. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.
- [52] *DIN V 18599-10: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten*, DIN Deutsches Institut für Normierung e.V., Berlin, Sep. 2018.
- [53] *DIN 4108-2: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*, DIN Deutsches Institut für Normierung e.V., Berlin, Feb. 2013.

- [54] U.S. Department of Energy, „EnergyPlus Version 9.6.0 Documentation: Engineering Reference“, 2021.
- [55] *DIN EN ISO 13789: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Transmissions- und Lüftungswärmetransferkoeffizient - Berechnungsverfahren*, DIN Deutsches Institut für Normierung e.V., Berlin, Apr. 2018.
- [56] M. Großklos und J. Knissel, *Bilanzierung und Belüftung von Treppenhäusern in Geschosswohnbauten bei der Bestandsanierung*. Darmstadt: IWU, 2011.
- [57] P. Kölsch, „Hygrothermische Simulation von hinterlüfteten Steildächern mit effektiven Übergangsparmetern“, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Holzkirchen, 2017.
- [58] Agrarmeteorologie Thüringen, *Wetterstation Buttstedt*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.wetter-th.de/Internet/AM/NotesTAM.nsf/thamweb/2207936106064950c1257f1700375deb?OpenDocument&TableRow=3.9#3>. (Zugriff am: 21. März 2022).
- [59] Landgericht Berlin, 64 S 266/97 vom 26.05.1998, *Heiz- und Warmwassertemperaturen während der Heizperiode*.
- [60] Mieterschutzbund Berlin e.V., *Heizperiode*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mieterschutzbund-berlin.de/news-lesen/items/heizperiode.html> (Zugriff am: 21. März 2022).
- [61] D. Kang und R. K. Strand, „A New Model for Calculating the Convective and Radiant Impact of Radiators and Baseboards in EnergyPlus“, *Proceedings of SimBuild*, Jg. 4, Nr. 1, 2010.
- [62] IBS Ingenieurbüro für Haustechnik Schreiner, *Heizung*. [Online]. Verfügbar unter: [http://energieberatung.ibs-hlk.de/grundl\\_wasys\\_hk&konv.htm](http://energieberatung.ibs-hlk.de/grundl_wasys_hk&konv.htm) (Zugriff am: 21. März 2022).
- [63] *DIN EN 15251: Einsparungsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik*, DIN Deutsches Institut für Normierung e.V., Berlin, Dez. 2012.
- [64] EnergyPlus, *Weather Data Download - Frankfurt am Main 106370 (IWEK)*. [Online]. Verfügbar unter: [https://energyplus.net/weather-location/europe\\_wmo\\_region\\_6/DEU/DEU\\_Frankfurt.am.Main.106370\\_IWEK](https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/DEU/DEU_Frankfurt.am.Main.106370_IWEK) (Zugriff am: 21. März 2022).
- [65] Deutscher Wetterdienst, *Ortsgenaue Testreferenzjahre (TRY) von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse über das Klimaberatungsmodul*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2013/testreferenzjahre/01-start.html;jsessionid=CB5DD87D146BCC0BE5A71875F1D98CC4.live21304?pos=2#doc2799182bodyText1> (Zugriff am: 21. März 2021).

- [66] C. Felsmann und J. Schmidt, „Auswirkungen der verbrauchsabhängigen Abrechnung in Abhängigkeit von der energetischen Gebäudequalität“, Technische Universität Dresden, 2013.
- [67] K.W.D. K. C. Dahanayake und C. L. Chow, „Studying the Potential of Energy Saving Through Vertical Greenery Systems: Using EnergyPlus Simulation Program“, *Energy and Buildings*, Jg. 138, S. 47–59, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.12.002.
- [68] A. Arengi, C. Perra und M. Caffi, „Simulating and Comparing Different Vertical Greenery Systems Grouped into Categories Using EnergyPlus“, *Applied Sciences*, Jg. 11, Nr. 11, S. 4802, 2021, doi: 10.3390/app11114802.
- [69] F. Olivieri, L. Olivieri und J. Neila, „Experimental Study of the Thermal-Energy Performance of an Insulated Vegetal Façade Under Summer Conditions in a Continental Mediterranean Climate“, *Building and Environment*, Jg. 77, S. 61–76, 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.03.019.
- [70] O. Kinnane und T. Prendergast, „Assessment of the Double-Skin Façade Passive Thermal Buffer Effect“, *30th International PLEA Conference: Sustainable Habitat for Developing Societies-Choosing the Way Forward*, S. 2749, 2014.
- [71] T. R. Oke, *Boundary Layer Climates*, 2. Aufl. London: Routledge, 1987.
- [72] N. Hannoschöck, *Wärmeleitung und -transport: Grundlagen der Wärme- und Stoffübertragung*, 1. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2018.
- [73] D. Mazzeo, P. Bevilacqua, M. de Simone und N. Arcuri, „A New Simulation Tool for the Evaluation of Energy Performances of Green Roofs“, *2nd IBPSA-Italy conference Bozen-Bolzano*, S. 313–321, 2015, doi: 10.13140/2.1.5099.6008.
- [74] D. J. Sailor, „A Green Roof Model for Building Energy Simulation Programs“, *Energy and Buildings*, Jg. 40, Nr. 8, S. 1466–1478, 2008, doi: 10.1016/j.enbuild.2008.02.001.
- [75] P. C. Tabares-Velasco und J. Srebric, „A Heat Transfer Model for Assessment of Plant Based Roofing Systems in Summer Conditions“, *Building and Environment*, Jg. 49, S. 310–323, 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.07.019.
- [76] I. Jaffal, S.-E. Ouldboukhitine und R. Belarbi, „A Comprehensive Study of the Impact of Green Roofs on Building Energy Performance“, *Renewable Energy*, Jg. 43, S. 157–164, 2012, doi: 10.1016/j.renene.2011.12.004.
- [77] E. P. Del Barrio, „Analysis of the Green Roofs Cooling Potential in Buildings“, *Energy and Buildings*, Jg. 27, Nr. 2, S. 179–193, 1998, doi: 10.1016/S0378-7788(97)00029-7.
- [78] V. Costanzo, G. Evola und L. Marletta, „Energy Savings in Buildings or UHI Mitigation? Comparison Between Green Roofs and Cool Roofs“, *Energy and Buildings*, Jg. 114, S. 247–255, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.04.053.

- [79] D. Zirkelbach, „Green Roofs – Hygrothermal Simulation of Moisture and Energy Performance“, *Proceedings of the 1st International Conference on Construction Materials for Sustainable Future*, 2017.
- [80] R. Djedjig, E. Bozonnet und R. Belarbi, „Analysis of Thermal Effects of Vegetated Envelopes: Integration of a Validated Model in a Building Energy Simulation Program“, *Energy and Buildings*, Jg. 86, S. 93–103, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.09.057.
- [81] Y. He, H. Yu, A. Ozaki, N. Dong und S. Zheng, „An Investigation on the Thermal and Energy Performance of Living Wall System in Shanghai Area“, *Energy and Buildings*, Jg. 140, S. 324–335, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.12.083.
- [82] S. F. Larsen, C. Filippín und G. Lesino, „Modeling Double Skin Green Façades with Traditional Thermal Simulation Software“, *Solar Energy*, Jg. 121, S. 56–67, 2015, doi: 10.1016/j.solener.2015.08.033.
- [83] S. Frankenstein und G. G. König, „Fast All-Season Soil Strength (FASST)“, 2004.
- [84] Allen, Richard G., Pereira, Luis S., D. Raes und M. Smith, „Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56“, *Fao, Rome*, Jg. 300, D05109, 1998.
- [85] S. W. Churchill, „A Comprehensive Correlating Equation for Laminar, Assisting, Forced and Free Convection“, *AIChE Journal*, Jg. 23, Nr. 1, S. 10–16, 1977, doi: 10.1002/aic.690230103.
- [86] N. H. Wong, A. Y. K. Tan, P. Y. Tan und N. C. Wong, „Energy Simulation of Vertical Greenery Systems“, *Energy and Buildings*, Jg. 41, Nr. 12, S. 1401–1408, 2009, doi: 10.1016/j.enbuild.2009.08.010.
- [87] 3A Composites GmbH, „ALUCOBOND“.
- [88] *DIN EN ISO 10456: Baustoffe und Bauprodukte - Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte*, DIN Deutsches Institut für Normierung e.V., Berlin, Mai. 2010.
- [89] M. Rahiminejad und D. Khovalyg, „Review on Ventilation Eates in the Ventilated Air-Spaces Behind Common Wall Assemblies With External Cladding“, *Building and Environment*, Jg. 190, S. 107538, 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107538.
- [90] G. Finch und J. Straube, „Ventilated Wall Claddings: Review, Field Performance, and Hygrothermal Modeling“, *ASHRAE Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings X International Conference*, 2007.
- [91] M. van Belleghem, M. Steeman, A. Janssens und M. de Paepe, „Heat, Air and Moisture Transport Modelling in Ventilated Cavity Walls“, *Journal of Building Physics*, Jg. 38, Nr. 4, S. 317–349, 2015, doi: 10.1177/1744259114543984.

- [92] H. Künzel und E. Mayer, „Untersuchungen über die notwendige Hinterlüftung an Aussenwandbekleidungen aus grossformatigen Bauteilen“, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, 1983.
- [93] M. N. Sánchez, C. Sanjuan, M. J. Suárez und M. R. Heras, „Experimental Assessment of the Performance of Open Joint Ventilated Façades With Buoyancy-Driven Airflow“, *Solar Energy*, Jg. 91, S. 131–144, 2013, doi: 10.1016/j.solener.2013.01.019.
- [94] F. P. López, R. L. Jensen, P. Heiselberg und M. R. de Adana Santiago, „Experimental Analysis and Model Validation of an Opaque Ventilated Facade“, *Building and Environment*, Jg. 56, S. 265–275, 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.03.017.
- [95] J. Falk und K. Sandin, „Ventilated Rainscreen Cladding: Measurements of Cavity Air Velocities, Estimation of Air Change Rates and Evaluation of Driving Forces“, *Building and Environment*, Jg. 59, S. 164–176, 2013, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.08.017.
- [96] E. R. Burnett, J. F. Straube und A. N. Karagiozis, *Development and Design Strategies for Rainscreen and Sheathing Membrane Performance in Wood Frame Walls*, 2004.
- [97] T. K. Stovall und A. Karagiozis, „Airflow in the Ventilation Space Behind a Rain Screen Wall“, *Performance of exterior envelopes of whole buildings IX international conference*, 2004.
- [98] S. Hauswirth und D. Kehl, „Hinterlüftung bei Holzfassaden“, *Holzbautag Biel*, 2010.
- [99] R. W.F. Cameron, J. Taylor und M. Emmett, „A Hedera Green Façade – Energy Performance and Saving Under Different Maritime-temperate, Winter Weather Conditions“, *Building and Environment*, Jg. 92, S. 111–121, 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.04.011.
- [100] M. Blagojević, M. Bojić, N. Kostić, M. Miletić und D. Nikolić, „Influence of Surface Convection Algorithm to EnergyPlus Prediction of Net Zero Energy Building Behavior“, *6th International Quality Conference*, 2012.
- [101] N. M. Mateus, A. Pinto und G. C. Da Graça, „Validation of EnergyPlus Thermal Simulation of a Double Skin Naturally and Mechanically Ventilated Test Cell“, *Energy and Buildings*, Jg. 75, S. 511–522, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.02.043.
- [102] G. De Luca, F. Bianco Mauthe Degerfeld, I. Ballarini und V. Corrado, „Accuracy of Simplified Modelling Assumptions on External and Internal Driving Forces in the Building Energy Performance Simulation“, *Energies*, Jg. 14, Nr. 20, S. 6841, 2021, doi: 10.3390/en14206841.
- [103] J. Reinhardt *et al.*, „Ganzheitliche Bewertung von verschiedenen Dämmstoffalternativen“, Ifeu-Institut gmbH, 2019.
- [104] Capatect Baustoffindustrie GmbH, „Capatect Hanffaserdämmplatte“.

- [105] S. Vera *et al.*, „Influence of Vegetation, Substrate, and Thermal Insulation of an Extensive Vegetated Roof on the Thermal Performance of Retail Stores in Semiarid and Marine Climates“, *Energy and Buildings*, Jg. 146, S. 312–321, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.04.037.
- [106] K.W.D. K. C. Dahanayake und C. L. Chow, „Comparing reduction of building cooling load through green roofs and green walls by EnergyPlus simulations“, *Build. Simul.*, Jg. 11, Nr. 3, S. 421–434, 2018, doi: 10.1007/s12273-017-0415-7.

## B Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1</b>	Ein- und Ausgabe von Gebäudesimulationssoftwares.....	7
<b>Abbildung 2</b>	Bedienoberfläche der Anwendungen EnergyPlus (oben) und OpenStudio (unten).....	9
<b>Abbildung 3</b>	Lageplan (links) und Beispielgebäude in Großobringen, Thüringen (rechts).....	10
<b>Abbildung 4</b>	Grundriss eines Regelgeschosses mit Bezeichnung der Wohneinheiten .....	11
<b>Abbildung 5</b>	Schematischer Gebäudeaufbau mit Bezeichnung .....	12
<b>Abbildung 6</b>	Schrittweiser Aufbau des Referenzmodells in SketchUp..	12
<b>Abbildung 7</b>	Darstellung der 16 thermischen Zonen durch <i>Render by Thermal Zone</i> .....	13
<b>Abbildung 8</b>	Darstellung der Randbedingungen für den Wärmeübergang an den Grenzflächen durch <i>Render by Boundary Condition</i> .....	14
<b>Abbildung 9</b>	Wandaufbau der Außenwand (links) und Darstellung unterschiedlicher Konstruktionen durch <i>Render by Construction</i> (rechts).....	14
<b>Abbildung 10</b>	Heizkreislauf mit den Komponenten: Pumpe (1), Brennwertheizung (2), Sollwertgeber (3) und Sockenheizungen (4) .....	17
<b>Abbildung 11</b>	Kompaktes VRF-Kühlsystem mit zentralem Außengerät und Innengeräten .....	19
<b>Abbildung 12</b>	Bedienoberfläche der Hilfs-Anwendung Elements .....	20
<b>Abbildung 13</b>	Vergleich der simulierten Brennstoffbedarfe mit den tatsächlichen Brennstoffverbräuchen der Jahre 2018 bis 2020.....	22
<b>Abbildung 14</b>	Jahresverlauf des Heizwärmebedarfs von WE1 1.OG in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur .....	23

<b>Abbildung 15</b>	Luftwechselrate von WE1 1.OG in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit (oben) und Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Innenluft (unten) .....	24
<b>Abbildung 16</b>	Jährliche Wärmeeinträge durch interne Wärmequellen der thermischen Zonen.....	25
<b>Abbildung 17</b>	Jährlicher Heizwärmebedarf der thermischen Zonen.....	25
<b>Abbildung 18</b>	Jahresverlauf des Heizwärme- und Kühlbedarfs von WE1 1.OG in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur.....	26
<b>Abbildung 19</b>	Jährlicher Kühlbedarf der thermischen Zonen.....	26
<b>Abbildung 20</b>	Die für die Wärmebilanz wichtigsten physikalischen Prozesse an der Grünfassade und Außenwand.....	29
<b>Abbildung 21</b>	Aufbau der VertiKKA .....	37
<b>Abbildung 22</b>	Umschließungsflächen der thermischen Zone der VertiKKA .....	39
<b>Abbildung 23</b>	Berechnungsverfahren der Infiltration und Ventilation.....	40
<b>Abbildung 24</b>	Nutzenergieeinsparungen an der Nordostfassade (oben) und der Südwestfassade (unten) mit <i>Design Flow Rate</i> (LWR 30, 288) und <i>Wind and Stack Open Area</i> .....	43
<b>Abbildung 25</b>	Durch verschiedene Algorithmen erzeugte Luftwechselraten im Luftspalt der VertiKKA an der Nordostfassade .....	45
<b>Abbildung 26</b>	Nutzenergieeinsparungen an der Nordostfassade (oben) und der Südwestfassade (unten) mit den Koeffizienten für einen konstanten Volumenstrom, den BLAST- und den DOE-2-Koeffizienten.....	45
<b>Abbildung 27</b>	Nutzenergieeinsparungen an der Nordostfassade (oben) und der Südwestfassade (unten) mit <i>TARP</i> , <i>Adaptive Convection Algorithm</i> und <i>Simple</i> .....	47
<b>Abbildung 28</b>	Separate thermische Zonen der VertiKKA-Flächen (links) und VertiKKA-Flächen dargestellt anhand des Grünfach-Materials (rechts) .....	49
<b>Abbildung 29</b>	Verteilung der VertiKKA auf die Fassadenseiten bei 100% Bedeckung.....	50

<b>Abbildung 30</b>	Jährlicher Heizwärme- (oben) und Kühlbedarf (unten) der thermischen Zonen im verwendeten Referenzmodell.....	53
<b>Abbildung 31</b>	Nutzenergieeinsparungen durch Begrünung der Nordostfassade .....	54
<b>Abbildung 32</b>	Nutzenergieeinsparungen durch Begrünung der Südostfassade.....	55
<b>Abbildung 33</b>	Nutzenergieeinsparungen durch Begrünung der Südwestfassade .....	56
<b>Abbildung 34</b>	Nutzenergieeinsparungen durch Begrünung der Nordwestfassade.....	57
<b>Abbildung 35</b>	Verteilung der Windgeschwindigkeit und -richtung des Testreferenzjahres .....	59
<b>Abbildung 36</b>	Nutzenergieeinsparungen bei verschiedenen Bedeckungsgraden .....	60
<b>Abbildung 37</b>	Nutzenergieeinsparungen bei verschiedenen Sanierungsmaßnahmen (mit VertiKKA) im Vergleich zum Referenzgebäude.....	62
<b>Abbildung 38</b>	Nutzenergieeinsparungen mit 100% Bedeckung bezogen auf verschiedene Wandaufbauten .....	64
<b>Abbildung 39</b>	Literaturvergleich der simulierten und gemessenen jährlichen Nutzenergieeinsparungen durch Fassadenbegrünung .....	66

Alle Abbildungen sind eigene Darstellungen.

## C Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1</b>	Übersicht der Simulationseinstellungen des Referenzmodells.....	21
<b>Tabelle 2</b>	Jährlicher Brennstoffverbrauch der Gaszentralheizung mit Trinkwassererwärmung für das Bestandsgebäude .....	22
<b>Tabelle 3</b>	Übersicht der bisher entwickelten Grünfassaden-Modelle	31
<b>Tabelle 4</b>	Modifikationen des Green-Roof-Modells von EnergyPlus durch verschiedene Autor:innen zur vertikalen Anwendung .....	36
<b>Tabelle 5</b>	Übersicht der Einstellungen der Grünfassade in EnergyPlus .....	37
<b>Tabelle 6</b>	Studien zum Luftwechsel von hinterlüfteten, opaken Fassaden mit 50 mm Luftspaltbreite .....	41
<b>Tabelle 7</b>	Algorithmen für die Berechnung der Oberflächenkonvektion .....	46
<b>Tabelle 8</b>	Nutzenergieeinsparungen von vier Testsimulationen mit <i>TARP</i> und <i>Simple</i> im Vergleich.....	48
<b>Tabelle 9</b>	Anzahl der VertiKKA-Module pro Gebäudeseite .....	49
<b>Tabelle 10</b>	Anzahl der VertiKKA-Module pro Bedeckungsgrad.....	50
<b>Tabelle 11</b>	Simulierte Wandaufbauten verschiedener Sanierungsmaßnahmen .....	51
<b>Tabelle 12</b>	Nutzenergieeinsparungen des gesamten Gebäudes bei Begrünung unterschiedlicher Gebäudeseiten im Vergleich zum Referenzmodell.....	58
<b>Tabelle 13</b>	Nutzenergieeinsparungen unterschiedlicher Bedeckungsgrade.....	61
<b>Tabelle 14</b>	Nutzenergieeinsparungen unterschiedlicher Wandaufbauten im Vergleich zum Referenzgebäude .....	63
<b>Tabelle 15</b>	Nutzenergiebedarfe von Referenzgebäuden mit unterschiedlichen Wandaufbauten.....	63

<b>Tabelle 16</b>	Nutzenergieeinsparungen unterschiedlicher Wandaufbauten mit VertiKKA im Vergleich zu den Wandaufbauten ohne VertiKKA.....	64
-------------------	---	----

# D Anhang

## D.1 Konstruktionsdatenbank

Konstruktion	Material	Schicht- dicke [m]	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Wärmeleitf. [W/mK]	Spez. Wärme- kapazität [J/kgK]	Th. Absorp- tionskoeff. [ - ]
<b>Wände</b>						
Außenwand	Außenputz	0,025	2100	1,280	1000	0.9
	Polystyrolschaum	0,100	30	0,042	1450	0.9
	MZ 150 / MG II	0,365	1850	0,810	1000	0.9
	Innenputz	0,015	2100	1,280	1450	0.9
Innenwand tragend	Innenputz	0,015	2100	1,280	1450	0.9
	MZ 150 / MG II	0,240	1850	0,810	1000	0.9
	Innenputz	0,015	2100	1,280	1450	0.9
Innenwand nichttragend	Innenputz	0,015	2100	1,280	1450	0.9
	LLZ-A-50 / MG III	0,050	1850	0,810	1000	0.9
	Innenputz	0,015	2100	1,280	1450	0.9
Kellerwand gegen Außenluft	Außenputz	0,025	2100	1,280	1000	0.9
	Polystyrolschaum	0,040	30	0,042	1450	0.9
	MZ 150 / MG II	0,365	1850	0,810	1000	0.9
	Innenputz	0,015	2100	1,280	1450	0.9
Kellerwand gegen Erdreich	Außenputz	0,025	2100	1,280	1000	0.9
	MZ 150 / MG II	0,365	1850	0,810	1000	0.9
	Innenputz	0,015	2100	1,280	1450	0.9
<b>Böden, Decken und Dach</b>						
Kellerboden	Estrich B225	0,030	2200	1,400	1000	0.97
	1-Lage Dichtung	0,003	1100	0,175	1000	0.9
	Unterbeton B120	0,060	2300	1,540	1000	0.97
	1 Lage nackte Bitumenpappe	0,002	1100	0,175	1000	0.9
	Kiesschicht	0,100	1600	0,465	1000	0.9
Kellerdecke	PVC Bahnenbelag	0,005	650	0,075	900	0.9
	Anhydritausgleich	0,040	1400	0,750	1000	0.9
	1 Lage 350er Teersonder- dachpappe	0,001	1100	0,175	1000	0.9
	Kamilitplatten	0,010	200	0,045	830	0.9
	B160 Abgerieben	0,040	2350	1,470	1000	0.97
	2 Lage nackte Bitumenpappe	0,005	1100	0,175	1000	0.9
	Schlackensand lose	0,075	1700	0,540	920	0.97
	Stahlbeton Hohldiele- Rohdecke	0,080	1800	1,330	1000	0.9

Konstruktion	Material	Schichtdicke [m]	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Wärmeleitf. [W/mK]	Spez. Wärmekapazität [J/kgK]	Th. Absorptionskoeff. [-]
<b>Böden, Decken und Dach</b>						
Reguläre Geschossdecke	PVC Bahnenbelag	0,005	650	0,075	900	0,9
	Anhydritausgleich	0,040	1400	0,750	1000	0,9
	1 Lage 350er Teersonderdachp.	0,001	1100	0,175	1000	0,9
	Kamilitplatten	0,010	200	0,045	830	0,9
	B160 Abgerieben	0,020	2350	1,470	1000	0,97
	Stahlbeton Hohldiele- Rohdecke	0,190	2500	1,720	1000	0,97
Oberste Geschossdecke	Beton B225	0,035	1500	0,650	1000	0,97
	1 Lage Teersonderpappe	0,001	1100	0,175	1000	0,90
	Kamilitplatten	0,010	200	0,045	830	0,90
	Schlackensand lose	0,030	1700	0,540	920	0,97
	Stahlbeton Hohldiele- Rohdecke	0,190	2500	1,720	1000	0,97
Dach (TR gedämmt)	Falzkremper (Ton)	0,050	2000	1,000	800	0,90
	Holzlattung 30/50 Abstand 35 cm	0,001	450	0,120	1600	0,90
	1-Lage Dichtung	0,003	1100	0,175	1000	0,90
	Holzsparren 160 mm Achsabstand ø 83 cm	0,002	450	0,120	1600	0,90
	(Steinwolle 160 mm, 67 cm breit)	(0,129)	-60	(0,040)	(830)	(0,90)

#### Fenster und Türen

Konstruktion	U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]	Solarfaktor [-]
Raumfenster (2-fach)	1,7	0,30
Kellerfenster (1-fach)	5,0	0,50
Treppenhausfenster (1-fach)	4,0	0,50
Kellertür	1,7	0,01
Eingangstür	4,0	0,01

**Hinweise:** Die Schichtdicken der Materialien des Dachs beziehen sich unter Berücksichtigung des Sparrenabstandes von 83 cm auf die gesamte Breite. Die Konstruktionsdatenbank wurde überwiegend durch das Büro Reich Architekten aus Weimar, Thüringen erstellt. Ergänzt wurden die tragende und nichttragende Innenwand, die reguläre Geschossdecke, der reguläre Dachaufbau und der Dachaufbau in den Treppenräumen (gedämmt) anhand von Bestandsplänen und – falls keine Angaben vorhanden – aufgrund von Annahmen. Ergänzt wurden die Spezifische Wärmekapazität sowie der Thermische Absorptionskoeffizient für alle Materialien und der Solarfaktor für Fenster nach der DIN EN ISO 10456 [88], Ubakus.com und Produktdatenblättern.

## D.2 Bedeckungsgrade der Südostfassade



100% Bedeckung



75% Bedeckung



50% Bedeckung



25% Bedeckung

## E Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinem universitären und privaten Umfeld für die Unterstützung während der Bearbeitung dieser Abschlussarbeit bedanken.

Es ist mir ein Anliegen, einen besonderen Dank meinem Betreuer, Dr. Hayder Alsaad, auszusprechen, durch den ich zu Anfang meines Masterstudiums das erste Mal mit den Themen Fassadenbegrünungen und Simulationen in Kontakt gekommen bin. Vielen Dank für die kompetente Beantwortung meiner Fragen, das entgegengebrachte Vertrauen und die stets angenehme Zusammenarbeit.

Des Weiteren danke ich meinem Erstprüfer, Prof. Conrad Völker, durch den ich bereits während des Bachelorstudiums an der Professur Bauphysik mitwirken konnte. Neben der Betreuung möchte ich mich für die Möglichkeit bedanken, mich an einer so umfangreichen und für mich neuen Software ausprobiert haben zu können.

Dank gilt auch meinem Zweitprüfer, Prof. Jürgen Ruth, der mir mit seiner Betreuungszusage den Weg geebnet hat, ein für die Architektur untypisches theoretisches Abschlussthema zu bearbeiten.

Clemens Becker, der stets ein offenes Ohr für meinen Diskussionsbedarf gehabt hat, bin ich sehr für die emotionale Unterstützung während der vergangenen intensiven Bearbeitungszeit dankbar.

Auch meine Mutter, Cordula Hartmann, hat mir stets den Rücken freigehalten und meine Ziele unterstützt.

Außerdem möchte ich mich bei allen Mitwirkenden des Forschungsprojekts VertiKKA bedanken, ohne die dieses Thema niemals entstanden wäre.

Mein Dank geht auch an Mara Geske und Alexander Benz, für die Datenbereitstellung und die Organisation der Ortsbegehung in Großobringen, an Gerd Kiesel und Thomas Möller für die Beantwortung meiner Fragen und Jana Urban von der HuG GmbH Weimar für den weiteren Datenaustausch.

Schließlich gilt mein letzter aber ebenso großer Dank meinen Freunden, die diese Arbeit korrekturgelesen haben.

## Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich genannten Quellen und Hilfsmittel verwendet. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut sind als solches kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde weder in dieser oder einer ähnlichen Form noch in Auszügen bereits einer Prüfstelle vorgelegt.

Weimar, 22.03.2022

Ort, Datum



Unterschrift