

**Einfluss von Gebäudebegrünung auf das
Innenraumklima
- Simulationen mit einem mikroskaligen Modell**

Von der Fakultät für Mathematik und Physik
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des Grades

Doktor der Naturwissenschaften

Dr. rer. nat.

genehmigte Dissertation

von

M.Sc. Robert von Tils

geb. Günther

2020

Referent: Prof. Dr. rer. nat. Groß

Korreferenten: apl. Prof. Dr. rer. nat. Raasch & Prof. Dr. phil. Scherer

Tag der Promotion: 23.07.2020

Kurzzusammenfassung

Das Innenraumklima ist für Menschen von besonderer Bedeutung, da sie sich den Großteil ihrer Zeit in Gebäuden aufhalten. Die Raumtemperatur ist dabei für die Aufenthaltsqualität ein wichtiger Faktor, der sich unter anderem auf die Schlafqualität und die Gesundheit auswirken kann.

Das Innenraumklima kann auf vielfältige Weise beeinflusst werden. Urbane Begrünung hat dabei viele positive Einfluss nicht nur auf das Außen- und Innenraumklima, sondern unter anderem auch auf den Wasserkreislauf, die Freiraumqualität, die Biodiversität und die Reduktion von Abflussspitzen bei Starkniederschlägen.

Der Kühlungseffekt von Bäumen und Gebäuden ist vielfach untersucht worden, jedoch meist nur für einzelne Maßnahmen und nur für den Außen- oder den Innenraum. Im Falle der Studien mittels numerischer Simulation liegt dies oft an den verwendeten Modellen.

In Deutschland gibt es eine Handvoll etablierter mikroskaliger Stadtklimamodelle die unter anderem den Einfluss von urbaner Begrünung auf den Außenraum untersuchen können. Diese Modelle können jedoch meist nicht gekoppelt auch das Innenraumklima simulieren oder lassen die Simulation von realistischen Gebäudegrundrissen nicht zu.

Das hier beschriebene mikroskalige numerische Modell ermöglicht die gekoppelte Simulation des Außen- und Innenraumklimas, sowie des Einflusses von urbaner Begrünung. Es berücksichtigt den veränderlichen Bodenwassergehalt, der einer der Hauptfaktoren für die Verdunstungsleistung von Vegetation ist. Ein mehrschichtiger realistischer Fassadenaufbau, Fenster und die Heiz- und Kühlleistung können simuliert werden. Das Modell wurde mittels Messdaten auf Realitätsnähe überprüft.

Zur Untersuchung des Einflusses der Gebäudebegrünung auf das Innenraumklima wurde für einen kleinen Gebäudekomplex das Außenklima, sowie für das zentrale dreistöckige Flachdachgebäude das Innenraumklima simuliert. Das Modellsystem wurde mittels meteorologischer Stationsdaten (Berlin-Tempelhof) über drei Sommermonate angetrieben (1.6.-31.8.2003). Dieser Zeitraum zeichnete sich durch hohe sommerliche Temperaturen und eine längere Trockenperiode aus.

Die Lage und Ausrichtung der Innenräume und ihrer Fenster hat einen großen Einfluss auf die Temperaturen im Innenraum. Räume mit viel Sonneneinstrahlung haben den größten

Temperaturtagesgang und heizen sich am stärksten auf. Überhitzte Innenräume geben ihre Wärme an kühlere benachbarte Räume sowie über die Außenfassade ab. Die Temperaturen in südorientierten Dachgeschossräumen ist daher oftmals niedriger als eine Etage tiefer. Bei Simulation mit idealisierter Klimaanlage ist dies umgekehrt, da durch die Dachfläche mehr Wärme in den Innenraum gelangt als in der mittleren Etage.

Es wurde eine Vielzahl von Szenarien mit Bäumen, intensiver und extensiver Dachbegrünung mit und ohne Anstau, sowie bewässerter und unbewässerter Fassadenbegrünung durchgeführt.

Große Bäume, die die Fenster und die Fassade verschatten, zeigen die stärkste Kühlwirkung auf die Innenraumtemperaturen und die Kühllast, gefolgt von der großflächigen Fassadenbegrünung. Die Dachbegrünung wirkt sich vor allem auf die angrenzenden Räume im Dachgeschoss aus.

Die unterschiedlich gute Wasserversorgung der Gebäudebegrünungsarten zeigt sich besonders während mehrwöchiger Trockenperioden und wirkt sich auf die Verdunstung der Pflanzen, sowie die Kühlungswirkung aus.

Die Kühlungswirkung der Begrünungsmaßnahmen ist auf Grund der Nähe der Maßnahmen, des kleineren zu kühlenden Volumens, des geringeren Luftaustauschs und der hohen Temperaturen bzw. Kühllast im Innenraum größer als im Außenraum.

Schlagworte: Gebäudebegrünung, Innenraumklima, Stadtklima, numerische Simulation

Abstract

The indoor climate is of particular importance for people, as they spend most of their time in buildings. The room temperature is an important factor for the quality of living, as it can influence the quality of sleep and health.

The indoor climate can be influenced in many ways. Urban greening has many positive effects not only on the indoor and outdoor climate, but also on the water cycle, open space quality, biodiversity and the reduction of peak runoff during heavy rainfall.

The cooling effect of trees and buildings has been studied many times, but mostly only for individual measures and only for the exterior or interior. In the case of studies using numerical simulation, this is often due to the models used.

In Germany, there are a handful of established micro-scale urban climate models that can be used to investigate the influence of urban greening on the exterior. These models, however, cannot simulate the indoor climate or do not allow the simulation of realistic building layouts.

The micro-scale numerical model described here allows the coupled simulation of the indoor and outdoor climate as well as the influence of urban greening. It takes the variable soil water content into account, which is one of the main factors for the evaporation performance of vegetation. A multi-layered realistic facade construction, windows and the heating and cooling capacity can be simulated. The model was checked for realism using measurement data.

In order to investigate the influence of greenery on the indoor climate, the outdoor climate was simulated for a small building complex and the indoor climate for the central three-storey flat roof building. The model system was driven by meteorological station data (Berlin-Tempelhof) over three summer months (1.6.-31.8.2003). This period was characterized by high summer temperatures and a longer dry period.

The position and orientation of the interior rooms and their windows has a great influence on the temperatures in the interior. Rooms with a lot of sunshine have the highest daily temperature variation and heat up the most. Overheated interiors give off their heat to cooler neighboring rooms as well as via the external facade. The temperatures in south-facing attic rooms are therefore often lower than one floor below. This is reversed in

simulation with an idealized air conditioning system, since more heat enters the interior through the roof surface than in the middle floor.

Many scenarios with trees, intensive and extensive roof greening with and without water accumulation, as well as irrigated and unirrigated façade greening were carried out.

The windows and large trees shading the facade show the strongest cooling effect on the interior temperatures and the cooling load, followed by extensive facade greening. Green roofs have the greatest effect on the adjacent rooms in the attic.

The different good water supply of the building greening types is particularly apparent during dry periods lasting several weeks and influences the evaporation of the plants as well as the cooling effect.

The cooling effect of greening measures is greater in the interior than in the exterior due to the proximity of the measures, the smaller volume to be cooled, the lower air exchange and the high temperatures or cooling load.

Keywords: building greening, indoor climate, urban climate, numerical simulation

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	iii
Tabellenverzeichnis	vii
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	viii
1 Einleitung	1
1.1 Stand der Wissenschaft.....	2
1.2 Zielsetzung	5
2 Das Modell.....	6
2.1 Das Atmosphärenmodell	7
2.1.1 Grundgleichungen.....	7
2.1.2 Lösung der Bewegungsgleichung.....	8
2.1.3 Randbedingungen für Wind und Turbulenz	9
2.1.4 Numerische Verfahren	9
2.1.5 Modellablauf und Initialisierung	10
2.2 Das Rand- und Grenzflächenmodell in ASMUS_Green	12
2.2.1 Der kurzwellige Wärmestrom.....	12
2.2.2 Der langwellige Wärmestrom.....	17
2.2.3 Begrünte und unbegrünte Dach- und Bodenoberflächen.....	20
2.2.4 Begrünte und unbegrünte Wandoberflächen	21
2.2.5 Baumoberflächen	22
2.2.6 Lösung der Energiebilanzgleichung	23
2.2.7 Unterschiede der Temperatur von Gebäudefassaden bei unterschiedlich realisierter Ausrichtung ihrer Flächenelemente	23
2.3 Das Bodenmodell.....	28
2.4 Das Innenraummodell	31
2.4.1 Fenster.....	31
2.4.2 Innenraum	31
2.4.3 Heizen und Kühlen	32
2.4.4 Ventilation	33
2.4.5 Modellkopplung ASMUS_Green-ASMUS_Inside	33
3 Modelltest	35
3.1 Simulationssetup und Setup der Labormessungen.....	35
3.2 Vergleichende Simulationen.....	39
3.2.1 Versuch 0 – Auskühltest	39

3.2.2	Versuch 1 – Ohne solare Einstrahlung	40
3.2.3	Versuch 2 – Mit solarer Einstrahlung	42
4	Einfluss von Gebäudebegrünung auf das Innenraumklima	43
4.1	Simulationssetup	43
4.2	Verwendete Maßnahmen	47
4.3	Verdunstungsmenge der Gebäudebegrünungsmaßnahmen	50
4.4	Wirkung der Begrünungsmaßnahmen auf den Außenraum	52
4.5	Ergebnisse.....	54
4.5.1	Unbegrüntes Gebäude – Einfluss der Raumausrichtung und Etage auf das Innenraumklima	54
4.5.2	Gebäudebegrünung – Einfluss auf den Tagesgang der Temperatur	56
4.5.3	Gebäudebegrünung – Einfluss auf den Verlauf der Tagesmitteltemperatur	59
4.5.4	Gebäudebegrünung bei verbesserter Isolierung – Einfluss auf die Tagesmitteltemperatur.....	64
4.5.5	Gebäudebegrünung – Einfluss auf meteorologische Kenntage.....	66
4.5.6	Gebäudebegrünung – Einfluss auf die Energiebilanz und die benötigte Kühlenergie	70
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	78
	Literaturverzeichnis.....	82

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Anordnung der meteorologischen Variablen auf dem Rechengitter (Groß, 2010).....	10
Abb. 2.2: Definition des Winkels η zwischen der Richtung zur Sonne und der Normale der geneigten ebenen Fläche (nach Kasten, 1983)	13
Abb. 2.3: Modellaufbau des Dachs / Bodens mit Begrünung (Günther, 2012).....	20
Abb. 2.4: Modellaufbau der Fassade mit Begrünung (Günther, 2012)	22
Abb. 2.5: Simulierter kurzweiliger Wärmestrom der Fassadenoberflächen und Schattenwurf des Gebäudes um 10 Uhr am 20. Juni; links: Fassade deren Oberfläche einheitlich nach Süd-Ost (315°) ausgerichtet ist; rechts: Fassade mit abwechselnd nach Süden und Osten ausgerichteten Oberflächen (treppenförmig) (Günther, 2012).....	24
Abb. 2.6: Simulierte mittlere Oberflächentemperatur für eine nach Nord-West (135°) bzw. Süd-Ost (315°) ausgerichtete „glatte“ oder „Stufen“-Fassade (Günther, 2012).....	26
Abb. 2.7: Simulierte mittlere Oberflächentemperatur für eine nach Süd-West (45°) bzw. Nord-Ost (225°) ausgerichtete „glatte“ oder „Stufen“-Fassade (Günther, 2012).....	26
Abb. 2.8: Durchschnittliche, maximale positive und negative Abweichung der über die Fassade gemittelten Oberflächentemperatur der „glatten“ von der „Stufen“-Fassade für unterschiedliche Ausrichtungen (Günther, 2012).....	27
Abb. 2.9: Simulierter Verlauf des Bodenwassergehalts in zwei verschiedenen Bodenarten 5 cm unter Dachbegrünung beziehungsweise Rasen im Zeitraum 01.07.-15.08.2003. Zusätzlich ist der stündlich gemessene Niederschlag, sowie Feldkapazität und Welkepunkt der beiden Bodenarten angegeben (nach Günther, 2014).	30
Abb. 3.1: Grundriss des simulierten 3-stöckigen Flachdachgebäudes. Der Referenzraum (Ref.) befindet sich mittig auf der Südseite im 1. Obergeschoss. Die simulierte Raumhöhe und Fensterhöhe unterscheiden sich etwas von der des Modellraums und sind in Klammern angegeben.	36
Abb. 3.2: Frontansicht des simulierten Gebäudes. Der Referenzraum (rot markiert) befindet sich in der mittleren Etage im 1. Obergeschoss. Jeder Raum besitzt ein Fenster (blaue Flächen), welches nach Süden oder Norden orientiert ist.	36
Abb. 3.3: Versuch 0 - Temperaturverlauf im Modellraum und im simulierten Referenzraum nach Abschaltung der Heizung und bei konstanter Außentemperatur (10°C) und konstantem Außenluftwechsel ($0,5\text{ 1/h}$). Solare Einstrahlung auf das Fenster wurde in diesem Fall weder simuliert noch im Modellprüfstand künstlich erzeugt.....	40
Abb. 3.4: Versuch 1 - Verlauf der Außentemperatur, sowie gemessener und simulierter Raumtemperatur und Heizleistung. Solare Einstrahlung auf das Fenster wurde in diesem Fall nicht simuliert oder im Modellprüfstand künstlich erzeugt.....	41

Abb. 3.5: Versuch 2 - Verlauf von Außentemperatur und solarer Einstrahlung, sowie gemessener und simulierter Raumtemperatur und Heizleistung.....	42
Abb. 4.1: Idealisiertes Stadtquartier das mit ASMUS_Green simuliert wurde; schwarz: Gebäude, grau: versiegelte Fläche, hellgrün: Rasen, dunkelgrün: optionale Bäume. Im Zentrum befindet sich das mit ASMUS_Inside simulierte Gebäude	44
Abb. 4.2: Gebäudegrundriss mit drei idealisierten Wohnungen (unterschiedliche Rasterung); SW: Südwestraum, S: Südraum, N: Nordraum, O: Ostraum, Z: Zentrum..	44
Abb. 4.3: Lufttemperatur, Sonnenscheindauer (normiert über die maximal astronomisch mögliche Sonnenscheindauer) und Niederschlagsmenge gemessen an der DWD Station Berlin-Tempelhof (01.06.2003-31.08.2003).	46
Abb. 4.4: Schematischer Aufbau einer Dachbegrünung. Je nach Art der Dachbegrünung können die einzelnen Schichten unterschiedlich dick sein: Vegetationshöhe 3 – 150 cm, Substratdicke 6 – 80 cm, Dränschicht 4 – 15 cm, Trenn- und Schutzfließ 1 – 4 mm	48
Abb. 4.5: Tägliche Verdunstungsmenge der verschiedenen begrünten Gebäudeszenarien integriert über die gesamte Fassade bzw. Dachfläche vom 10.06.-31.08.2003.	51
Abb. 4.6: Verlauf der Maßnahmenwirkung der verschiedenen begrünten Gebäudeszenarien im Außenraum als Differenz der Tagesmitteltemperaturen zum unbegrünten Szenario (oB) in unmittelbarer Nähe zum untersuchten Gebäude (10 m Umkreis) im Zentrum des idealisierten Quartiers vom 10.06.-31.08.2003. Oben: in 2 m Höhe; Unten: auf Dachniveau in 11 m Höhe	53
Abb. 4.7: Tagesgang der Innenraumtemperaturen im Dachgeschoss für unterschiedliche Räume und im Vergleich dazu Messdaten von der DWD-Station Berlin-Tempelhof vom 17.-21.07.2003.....	55
Abb. 4.8: Tagesgang der Innenraumtemperaturen im 1. Obergeschoss für unterschiedliche Räume und im Vergleich dazu Messdaten von der DWD-Station Berlin-Tempelhof vom 17.-21.07.2003.....	55
Abb. 4.9: Temperaturverlauf der Tagesminimum-, Tagesmittel- und Tagesmaximumtemperaturen im SW-Raum im Dachgeschoss und 1. Obergeschoss vom 10.06.-31.08.2003.....	56
Abb. 4.10: Tagesgang der Innenraumtemperaturen im Dachgeschoss im SW-Raum für unterschiedlich begrünte Gebäudeszenarien vom 17.-21.07.2003.....	58
Abb. 4.11: Tagesgang der Innenraumtemperaturen im Dachgeschoss im N-Raum für unterschiedlich begrünte Gebäudeszenarien vom 17.-21.07.2003.....	58
Abb. 4.12: Tagesgang der Kühlleistung im Dachgeschoss im SW-Raum für unterschiedlich begrünte Gebäudeszenarien vom 17.-21.07.2003.....	59

- Abb. 4.13: Verlauf der Tagesmitteltemperatur im Dachgeschoss im SW-Raum für unterschiedlich begrünte Gebäudeszenarien vom 10.06.-31.08.2003. 61
- Abb. 4.14: Verlauf der Tagesmitteltemperatur im 1. Obergeschoss im N-Raum für unterschiedlich begrünte Gebäudeszenarien vom 10.06.-31.08.2003. 61
- Abb. 4.15: Boxplot der Differenz der Tagesmitteltemperatur zum unbegrünten Gebäude im 1. Obergeschoss im SW- und N-Raum für Gebäude mit unterschiedlicher Begrünung vom 10.06.-31.08.2003. Die Whisker geben das Minimum/ Maximum an, die Box das 25 %, 50 % und 75 % Quantil. 62
- Abb. 4.16: Boxplot der Differenz der Tagesmitteltemperatur zum unbegrünten Gebäude im Dachgeschoss im SW- und N-Raum für Gebäude mit unterschiedlicher Begrünung vom 10.06.-31.08.2003. Die Whisker geben das Minimum/ Maximum an, die Box das 25 %, 50 % und 75 % Quantil. 62
- Abb. 4.17: Korrelation der Tagesmitteltemperatur ohne Begrünung mit der Tagesmitteltemperatur mit einer Begrünungsmaßnahme im Dachgeschoss. Links: SW-Raum, Rechts: N-Raum. Mit Korrelationskoeffizient r , linearer Regressionsgerade und deren Steigung m 63
- Abb. 4.18: Korrelation der Tagesmitteltemperatur ohne Begrünung mit der Tagesmitteltemperatur mit einer Begrünungsmaßnahme im 1. Obergeschoss. Links: SW-Raum, Rechts: N-Raum. Mit Korrelationskoeffizient r , linearer Regressionsgerade und deren Steigung m 63
- Abb. 4.19: Differenz der Tagesmitteltemperatur zum unbegrünten Gebäude (oB) im SW- und N-Raum vom 10.06.-31.08.2003 für unterschiedliche Gebäudeszenarien: iDB, iDB_DP, oB_DP (s. Tabelle 4.2). 64
- Abb. 4.20: Boxplot der Differenz der Tagesmitteltemperatur zum unbegrünten Gebäude (oB) im Dachgeschoss im SW- und N-Raum vom 10.06.-31.08.2003 für unterschiedliche Gebäudeszenarien: iDB, iDB_DP, oB_DP (s. Tabelle 4.2). Die Whisker geben das Minimum/ Maximum an, die Box das 25 %, 50 % und 75 % Quantil. 65
- Abb. 4.21: Boxplot der Differenz der Tagesmitteltemperatur zum unbegrünten Gebäude (oB) im 1. Obergeschoss im SW- und N-Raum vom 10.06.-31.08.2003 für unterschiedliche Gebäudeszenarien: FBmB und oB_DP. Die Whisker geben das Minimum/ Maximum an, die Box das 25 %, 50 % und 75 % Quantil. 66
- Abb. 4.22: Anzahl an Überschreitungstagen nach Simulationsszenarien als überlappendes Säulendiagramm. Orange: Tagesmitteltemperatur ≥ 25 °C, Rot: Tagesmaximumtemperatur ≥ 30 °C, Linke Seite: N-Raum, Rechte Seite: SW-Raum, Oben: Dachgeschoss, Unten: 1. Obergeschoss, Basisszenario (ohne Begrünung): schwarz umrandet. Zeitraum: 1.6.-31.8.2003 69
- Abb. 4.23: Energiebilanz für den SW-Raum im Dachgeschoss mit Klimaanlage über den gesamten Simulationszeitraum u. a. mit Bodenwärmestrombilanz (B) und langwellige Strahlungsbilanz (L) getrennt nach Innenwänden, Fassade und Innendachflächen. 74

- Abb. 4.24: Energiebilanz für den N-Raum im Dachgeschoss mit Klimaanlage über den gesamten Simulationszeitraum u. a. mit Bodenwärmestrombilanz (B) und langwellige Strahlungsbilanz (L) getrennt nach Innenwänden, Fassade und Innendachflächen.....74
- Abb. 4.25: Energiebilanz für den SW-Raum im 1. Obergeschoss mit Klimaanlage über den gesamten Simulationszeitraum u. a. mit Bodenwärmestrombilanz (B) und langwellige Strahlungsbilanz (L) getrennt nach Innenwänden und Fassade.75
- Abb. 4.26: Energiebilanz für den N-Raum im 1. Obergeschoss mit Klimaanlage über den gesamten Simulationszeitraum u. a. mit Bodenwärmestrombilanz (B) und langwellige Strahlungsbilanz (L) getrennt nach Innenwänden und Fassade.75
- Abb. 4.27: Energiebilanz für den SW-Raum im Dachgeschoss ohne Klimaanlage über den gesamten Simulationszeitraum u. a. mit Bodenwärmestrombilanz (B) und langwellige Strahlungsbilanz (L) getrennt nach Innenwänden, Fassade und Innendachflächen.76
- Abb. 4.28: Energiebilanz für den N-Raum im Dachgeschoss ohne Klimaanlage über den gesamten Simulationszeitraum u. a. mit Bodenwärmestrombilanz (B) und langwellige Strahlungsbilanz (L) getrennt nach Innenwänden, Fassade und Innendachflächen.....76
- Abb. 4.29: Energiebilanz für den SW-Raum im 1. Obergeschoss ohne Klimaanlage über den gesamten Simulationszeitraum u. a. mit Bodenwärmestrombilanz (B) und langwellige Strahlungsbilanz (L) getrennt nach Innenwänden und Fassade.77
- Abb. 4.30: Energiebilanz für den N-Raum im 1. Obergeschoss ohne Klimaanlage über den gesamten Simulationszeitraum u. a. mit Bodenwärmestrombilanz (B) und langwellige Strahlungsbilanz (L) getrennt nach Innenwänden und Fassade.77

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Effekte von Bäumen und Gebäudebegrünung auf die Außen- und Innentemperatur, sowie Einsparung der zur Kühlung notwendigen Energie in warmgemäßigten Klimaten (zum Teil nach Wang et al., 2014).....	3
Tabelle 2.1: Wärmeübergangswiderstände [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$] (nach DIN EN ISO 6946:2018-03, 2018)	32
Tabelle 3.1: Simulationsparameter	37
Tabelle 3.2: Materialkennwerte und Dämmeigenschaften der Wände und Fenster des Referenzraums wie sie im Laborexperiment und der Simulation angewendet wurden (nach Eiband, 2004).....	38
Tabelle 3.3: Überblick über die Simulationsszenarien (nach Eiband, 2004).....	39
Tabelle 4.1: Zusammenfassung der Maßnahmeneigenschaften	47
Tabelle 4.2: Simulierte Szenarien	49
Tabelle 4.3: Mittlere Effekte der Begrünungsmaßnahmen auf die Außentemperatur in 10 m Umkreis um das begrünte Gebäude in verschiedenen Höhen für den gesamten Simulationszeitraum und die Trockenperiode 7.8.-14.8.2003.....	52
Tabelle 5.1: Wertespanne der mittleren Effekte der Begrünungsmaßnahmen im simulierten Zeitraum auf die Außentemperatur bzw. die Innentemperatur und die Kühlenergieeinsparung je Raum. Berücksichtigt wurden nur Räume mit Außenfassade	80

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Lateinische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
a		Konstante der Prandtl-Kolmogorov Beziehung
a		Konstante zur Anpassung der Globalstrahlung
a_0		Konstante der Beziehung zur turbulenten kinetischen Energie
A_{eff}	[m ²]	effektive Gesamtoberfläche
a_k		Absorptionskoeffizient des Menschen
A_p	[m ²]	Projektionsfläche
ASMUS		Ausbreitungs- und Strömungsmodell für urbane Strukturen
ASMUS_Green		ASMUS mit Berechnung der Oberflächentemperatur für begrünte und unbegrünte Gebäude- und Bodenoberflächen
ASMUS_Inside		ASMUS_Green mit Erweiterungen zur Berechnung des Innenraumklimas
b		Konstante zur Anpassung der Globalstrahlung
B		Konstante zur Berechnung des Verdunstungswärmestroms
B_r		Brunt Zahl
c_p	[J/(kg K)]	spezifische Wärme der Luft bei konstantem Druck
D_{K+L}	[K]	mittlere Strahlungstemperatur ohne direkte Strahlung
DWD		Deutscher Wetterdienst
E	[m ² /s ²]	turbulente kinetische Energie
F_i		Winkelfaktoren
f_p		Flächenprojektionsfaktor
FITNAH		Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenic Heatsource
h		quantitative thermische Effekte durch den Wind
H	[m]	Geländehöhe
I_0	[W/m ²]	extraterrestrische direkte Sonneneinstrahlung
\bar{I}_0	[W/m ²]	Solarkonstante
J		Tag des Jahres
k		Extinktionskoeffizient

Fortsetzung Lateinische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
L		Blattflächenindex
L	[J/(kg K)]	spezifische Verdampfungswärme von Wasser
L_A	[W/(m ² sr)]	Strahldichte der Atmosphäre aus dem oberen Halbraum
l_g	[m]	Mischungsweg
$L_{Umgebung}$	[W/(m ² sr)]	Strahldichte aus der Umgebung
m		relative optische Luftmasse
N		Wolkenbedeckungsgrad in Achteln
p	[hPa]	Luftdruck
p'	[Pa]	dynamischer Stördruck
p_0	[hPa]	Normaldruck
P_s	[1/s]	Quelle / Senke von spezifischer Feuchte
P_θ	[K/s]	Quelle / Senke von Wärme
PET	[°C]	Physiological Equivalent Temperature
PSA		Anteil der partiell beschatteten Fläche
Q_B	[W/m ²]	Bodenwärmestrom
Q_{BObert}	[W/m ²]	Bodenwärmestrom der Gebäudeoberfläche
Q_{diffus}	[W/m ²]	diffuser Anteil des kurzwelligigen solaren Wärmestroms
$Q_{diffus+Reflek}$	[W/m ²]	kurzwellige diffuse und reflektierte Strahlung
$Q_{diffus,anisotrop}$	[W/m ²]	Diffuse anisotrope Strahlung
$Q_{diffus,isotrop}$	[W/m ²]	Diffuse isotrope Strahlung
Q_{direkt}	[W/m ²]	direkter Anteil des kurzwelligigen solaren Wärmestroms
Q_{global}	[W/m ²]	globale Bestrahlungsstärke
Q_H	[W/m ²]	turbulenter fühlbarer Wärmestrom
Q_{HVeget}	[W/m ²]	fühlbarer Wärmestrom über der Vegetation
Q_L	[W/m ²]	langwelliger Wärmestrom
Q_{LVeget}	[W/m ²]	langwelliger Wärmestrom der Vegetation
$Q_{LUmgebung}$	[W/m ²]	langwellige Einstrahlung aus der Umgebung
$Q_{Reflektion Erde}$	[W/m ²]	von der Erdoberfläche reflektierte Strahlung
Q_S	[W/m ²]	kurzwelliger Wärmestrom
Q_{SVeget}	[W/m ²]	kurzwellige Einstrahlung auf die Vegetation

Fortsetzung Lateinische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
Q_V	[W/m ²]	Verdunstungswärmestrom
r	[m]	Abstand Erde – Sonne
\bar{r}	[m]	mittlerer Abstand Erde – Sonne
s	[kg/kg]	spezifische Feuchte
$S + D_{K+L}$	[K]	mittlere Strahlungstemperatur inklusive direkter Strahlung
S_{Atm}	[kg/kg]	spezifische Feuchte der Atmosphäre
S_S	[kg/kg]	spezifische Feuchte der Oberfläche
SVF		Sky View Factor
STORM		Software für die Modellierung wasserwirtschaftlicher Systeme
t	[h]	Zeit
T	[K]	Temperatur
T_{2m}	[K]	Lufttemperatur in 2 m Höhe
T_a	[K]	Lufttemperatur
T_{Atm}	[K]	Temperatur der Atmosphäre
T_{Baum}	[K]	Kerntemperatur des Baums
T_{Bod}	[K]	Bodentemperatur
T_i	[K]	Oberflächentemperatur des i-ten Elements
T_{Innen}	[K]	Gebäudeinnentemperatur
T_L		Linke-Trübungsfaktor
$T_{m,n}$	[K]	Oberflächentemperatur der m, n-ten Oberfläche
T_{mrt}	[K]	mittlere Strahlungstemperatur ohne direkte Strahlung
T_{mrt}^*	[K]	mittlere Strahlungstemperatur inklusive direkter Strahlung
t_{min}	[h]	Zeitpunkt der Minimumtemperatur
T_{Ober}	[K]	Temperatur der Gebäudeoberfläche
T_S	[K]	Temperatur der Oberfläche
T_{Surf}	[K]	Temperatur der Vegetationsoberfläche
T_{Wand}	[K]	Temperatur der Wand
u	[m/s]	Windkomponente in X-Richtung
u'	[m/s]	Schubspannungsgeschwindigkeit
u^{aux}	[m/s]	dreidimensionaler Windvektor des Hilfswindfelds

Fortsetzung Lateinische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
u_i	[m/s]	i-te Windkomponente
u_i^{aux}	[m/s]	i-te Windkomponente des Hilfswindfelds
u_i^{n+1}	[m/s]	i-te Windkomponente des resultierenden Hilfswindfeldes
UTCI	[°C]	Universal Thermal Climate Index
v	[m/s]	Windkomponente in Y-Richtung
V_M	[km]	meteorologische Sichtweite
w	[m/s]	Windkomponente in Z-Richtung
WOZ	[h]	Wahre Ortszeit
z_0	[m]	Rauhigkeitslänge
$z_{0,global}$	[m]	Rauhigkeitslänge des 1D-Grenzschichtprofils
z_{veg}	[m]	Vegetationsdicke
z_{surf}	[m]	Dicke der Oberflächenschicht

Griechische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
a	[°]	Azimutwinkel der Fläche
a_k		Absorptionskoeffizient des Menschen
α_{kt}		effektiver langwelliger Absorptionsgrad
α_n	[°]	n-ter Azimutwinkel
β	[°]	Neigung der Fläche
γ	[°]	Sonnenhöhenwinkel
γ_{Fi}	[°]	Höhenwinkel der Oberfläche
γ_{He}	[°]	Höhenwinkel der Horizonteinschränkung
δ	[°]	Deklinationwinkel der Sonne
Δ	[m]	Gitterweite
Δ^w	[m]	Abstand zum nächsten Gitterpunkt in der Atmosphäre
δ_{RO}		optische Dicke der Normatmosphäre
ΔI_{pen}	[W/m ²]	mittlere effektive solare Einstrahlung auf die Bodenoberfläche
ΔT	[K]	Änderung der Lufttemperatur
ΔT_{AHR}	[K]	anthropogener Anteil an der Lufttemperaturänderung

Fortsetzung Griechische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
ΔT_{mrt}	[K]	Abweichung der mittleren Strahlungstemperatur von der Lufttemperatur
ΔT_{NLWR}	[K]	Anteil der langwelligen Nettoausstrahlung an der Temperaturänderung
ΔT_{SOLAR}	[K]	Beitrag der solaren Einstrahlung an der Temperaturänderung
Δz_1	[m]	Dicke der Wandschicht
$\Delta \alpha$	[°]	Azimutwinkelintervall
$\Delta \vartheta$	[°]	Zenitwinkelintervall
ϵ		Emissionsfaktor
ϵ_{eff}		effektiver Emissionsgrad der Atmosphäre
ϵ_K		effektiver langwelliger Emissionsgrad
ϵ_p		Emissionskoeffizient des Menschen
ϵ_{mn}		effektiver gerichteter Emissionsgrad der m-, n-ten Fläche
η	[°]	Winkel zwischen Sonnenrichtung und Ebenennormale
η_{mn}	[°]	Winkel zwischen Sonnenrichtung und der Normalen der m-, n-ten Fläche
ϑ	[°]	Zenitwinkel
ϑ_m	[°]	m-ter Zenitwinkel
ϑ_n	[°]	n-ter Zenitwinkel
θ	[K]	potenzielle Temperatur
κ		von-Kármán-Konstante
λ	[h]	frühere Zeit
λ	[W/(m K)]	Wärmeleitfähigkeit des Bodens
λ_2	[W/(m K)]	Wärmeleitfähigkeit der Wandschicht
λ_{veg}	[W/(m K)]	Wärmeleitfähigkeit der Vegetation
ρ	[kg/m ³]	Luftdichte
σ	[W/(m ² K ⁴)]	Stefan-Boltzmann-Konstante
σ_{He}		Albedo der Horizonteinschränkung
σ_{Ks}		Albedo der Fläche für kurzwellige Strahlung
σ_{Kt}		langwelliger Reflexionsgrad

Fortsetzung Griechische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
σ_r		Albedo der Erdoberfläche
τ		optische Dicke
τ_{Kt}		effektiver langwelliger Transmissionsgrad
ϕ	[°]	geographische Breite
ψ	[°]	Azimutwinkel der Sonne
ω		Relaxationsparameter
ω	[°]	Stundenwinkel
Ω_0	[sr]	Einheitsraumwinkel
Ω_B		Raumwinkelanteil ohne Erdoberfläche
Ω_D		Raumwinkelanteil für diffuse Strahlung
Ω_{He}		Raumwinkelement der Horizonteinschränkung

Wenn möglich wurde eine Doppelbelegung der Symbole vermieden, sie tritt dennoch in wenigen Fällen auf und wurde dementsprechend in dieser Liste vermerkt. Die Temperaturwerte werden in dieser Arbeit zuweilen statt in [K] in [°C] angegeben.

1 Einleitung

Klima ist die statistische Beschreibung von relevanten meteorologischen Größen über einen längeren Zeitraum (World Meteorological Organization, 2019). Der klassische Referenzzeitraum beträgt 30 Jahre. Üblicherweise bezieht sich der Begriff Klima auf die bodennahe Meteorologie der unteren Atmosphäre, also den Lebensraum des Menschen (Hupfer & Kuttler, 2005). Gemeint ist dabei das Klima im Außenraum, wo es durch natürliche Effekte auf unterschiedlichen Zeitskalen dominiert wird (Orlanski, 1975). Jedoch ist auch der Einfluss des Menschen auf das mikroskalige Klima sichtbar, wie beispielsweise bei der städtischen Wärmeinsel. Auf Grund von Änderungen in der Energiebilanz der urbanen Oberflächen kann dieser Wärmeinseleffekt Temperaturänderungen um mehr als 10 K im Verhältnis zum Umland hervorrufen (Kuttler, 2011). Erklärtes politisches Ziel ist, beispielsweise in Berlin, den anthropogenen Einfluss auf das Stadtklima zu reduzieren (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, 2011).

Beim Innenraumklima werden im allgemeinen sehr viel kürzere Zeitspannen betrachtet. Es geht dabei eher um kurzfristige Zustände. Je nach Raumnutzung und -lage kann das Innenraumklima in einem Gebäude stark variieren, beispielsweise zwischen Keller, Räumen mit großer Fensterfront Richtung Süden und dem Dachgeschoss. Der anthropogene Einfluss auf das Innenraumklima ist hier erwünscht, um ein möglichst angenehmes Raumklima zu schaffen. Dies ist vor allem deshalb wichtig, weil viele Menschen sich den weitaus überwiegenden Teil ihrer Zeit in geschlossenen Räumen aufhalten: in Deutschland im Sommer zu 79 % im Winter zu 88 % (Krause & Schulz, 1998). Die Raumtemperatur ist dabei für die Aufenthaltsqualität ein wichtiger Faktor. In Deutschland wird zum Beispiel, abhängig von der Nutzung des Raumes, eine Raumtemperatur von um die 20 °C empfohlen (Umweltbundesamt, 2019). Höhere Temperaturen können sich unter anderem negativ auf die Schlafqualität und die Gesundheit auswirken (Franco, et al., 2000).

Beeinflusst wird die Innentemperatur durch den Menschen zu einem Großteil durch Heizen und Kühlen und dies sind auch die Hauptfaktoren der in Privathaushalten verwendeten Energie, die zudem einen der größten Verbrauchssektoren des gesamten Energiebedarfs in Deutschland ausmachen (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2019). 2015 lag der Anteil an Haushalten mit Klimaanlage in Deutschland noch

bei 3 % (Institut für sozial ökologische Forschung, 2017), nimmt jedoch stetig seit 1990 zu (Pout & Hitchin, 2009).

1.1 Stand der Wissenschaft

Urbane Begrünung, wie zum Beispiel Dachbegrünung, Fassadenbegrünung und Bäume können einen kühlenden Effekt auf das lokale Stadtklima haben und insbesondere sommerliche Maxima der Temperatur im Außenraum reduzieren (Gill, et al., 2007). Erzielt wird diese Wirkung vor allem durch Verschattung und der Verdunstung von Wasser, vorzugsweise Regenwasser. Dadurch kann der natürliche Wasserkreislauf geschlossen werden und der Niederschlagsabfluss wird reduziert. Gebäudebegrünung ist eine relativ einfache Maßnahme der Regenwasserbewirtschaftung die, neben der vor allem kühlenden Wirkung, auch positiven Einfluss auf die Freiraumqualität, Biodiversität und Oberflächengewässer durch Reduktion der Abflussspitzen hat (Matzinger, et al., 2017). Wang et al. (2014) haben die Effekte von grüner Infrastruktur auf die wichtigsten klimatologischen Größen in einer Literaturübersicht zusammengefasst. In Bezug auf den Kühlungseffekt für die Lufttemperatur im Außen- und Innenraum, sowie die Energieeinsparung zur Kühlung sind diese Ergebnisse für Bäume und Gebäudebegrünung in warmgemäßtem Klima zusammengefasst in Tabelle 1.1 dargestellt. Die einzelnen Untersuchungen umfassen Messungen, Experimente und Simulationen. Die Effekte sind sehr unterschiedlich ausgeprägt auf Grund der Größe der Maßnahmen, der mikroklimatischen Situation und nicht zuletzt der genauen Definition des Indikators (u. a. Mittelungszeitraum und Gebietsgröße). Meist zeigten erst größere Maßnahmenkombinationen von Grünelementen signifikante Temperaturreduktionen von mehr als 1 K (Groß, 2012). Ihre Wirkung ist zudem in großem Maße abhängig von der zur Verdunstungskühlung zur Verfügung stehenden Bodenfeuchte (Günther, 2014).

Des Weiteren treffen die meisten Untersuchungen lediglich Aussagen zum Effekt der Begrünungsmaßnahmen auf den Außen- oder den Innenraum oder untersuchen nur einzelne Gebäudebegrünungsarten, so dass deren Wirkung nicht ohne weiteres ins Verhältnis zueinander gesetzt werden kann. Dies liegt bei den numerischen Simulationen

auch daran, dass es nur wenige Modelle gibt, die eine gekoppelte Betrachtung von Außen- und Innenraumklima ermöglichen.

Da sich die meisten Menschen den überwiegenden Teil ihrer Zeit in Innenräumen aufhalten, vor allem nachts, wäre es von Vorteil verstärkt die mikroklimatischen Stadtklimaeffekte von Begrünungsmaßnahmen auf das Innenraumklima zu untersuchen, anstatt diese beispielsweise über die Außenlufttemperatur zu abstrahieren.

Tabelle 1.1: Effekte von Bäumen und Gebäudebegrünung auf die Außen- und Innentemperatur, sowie Einsparung der zur Kühlung notwendigen Energie in warmgemäßigten Klimaten (zum Teil nach Wang et al., 2014)

Maßnahme	Kühlungseffekt [K]		Kühl- energie- einsparung [%]	Quelle
	Außen- temperatur	Innen- temperatur		
Bäume	0,9 - 1,2			Heissler, 1986
	0,9 - 3,8			Shashua-Bar & Hoffman, 2002
	0,9 - 4,0			Günther, 2012
	≤ 0,5			Groß, 2012
	0,9 - 2,0		20 - 30	McPherson, et al., 1989
		≤ 3		Morakinyo, et al., 2013
			10 - 40	Akbari & Taha, 1992
			53 - 61	McPherson, et al., 1988
Gebäude- begrünung	0,3			Wong, et al., 2009
	2,0			Susca, et al., 2011
	1,0			Blanusa, et al., 2013
	0,4 - 1,7			Ouldboukhitine, et al., 2014
	≤ 0,5			Groß, 2012
		1	2 - 48	Niachou, et al., 2001
		1,4 - 2,6	52 - 96	Jaffal, et al., 2012
		0,5		Eumorphoulou & Kontoleon, 2009
			30	Zinzi & Agnoli, 2012
			> 60	Hien, et al., 2007

Wie von Maronga et al. (2018) aufgeführt, gibt es in Deutschland eine Reihe von etablierten mikroskaligen gebäudeauflösenden Modellen zur Simulation des Stadtklimas:

- MUKLIMO_3 (Früh, et al., 2011)
- MITRAS (Schlünzen, et al., 2003; Salim, et al., 2018)
- ENVI-met (Bruse & Fleer, 1998)
- ASMUS_Green (Groß, 2012)

Des Weiteren wurde im Rahmen der Fördermaßnahme „Stadtklima im Wandel“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Projekt MOSAIK (Modellbasierte Stadtplanung und Anwendung im Klimawandel) das Grobstruktur-simulationsmodell PALM (Raasch & Schröter, 2001) um Komponenten eines Stadtklimamodells (PALM-4U = PALM for urban applications) erweitert (Maronga, et al., 2020). Die neuen Komponenten erlauben es nicht nur hochauflösende mikroskalige Stadtklimasimulationen durchzuführen und den Einfluss von Bäumen, bodennahe Vegetation, sowie Dach- und Fassadenbegrünung zu berücksichtigen, sondern auch den Einfluss des Außenklimas auf die Innenraumtemperaturen und den Energiebedarf zum Heizen und Kühlen zu untersuchen.

Mit seinen zahlreichen weiteren Simulationsmodulen ist PALM in der Lage eine Vielzahl von meteorologischen Fragestellungen zu beantworten und ist eines der wenigen Modelle, die das Außen- und Innenraumklima gekoppelt simulieren können. Das Modell ist jedoch nicht in der Lage individuelle Gebäudegrundrisse und Wechselwirkungen zwischen angrenzenden Innenräumen zu berücksichtigen. Die Untersuchung des Einflusses des lokalen Stadtklimas, sowie von urbaner Begrünung auf das Innenraumklima, ist daher nicht auf Ebene eines einzelnen Raumes mit individueller Größe und Fensterausrichtung und seiner Wechselwirkung mit dem Rest des Gebäudes möglich.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es ein gekoppeltes mikroskaliges Modellsystem zu entwickeln, das sowohl das Stadtklima als auch das Innenraumklima modellieren kann. Insbesondere soll der Einfluss von Bäumen und Gebäudebegrünung und deren kühlende Wirkung auf das Gebäude und die Lufttemperatur, auch im längerfristigen Verlauf bei unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit, simuliert werden können. Das Innenraummodell soll in der Lage sein realitätsnahe Ergebnisse nicht nur für die Lufttemperatur im Innenraum, sondern auch für den Energiebedarf zum Heizen und Kühlen zu berechnen. Dabei sollen Gebäudekonfigurationen mit individuellen Grundrissen und mehrschichtige Wand- sowie Dachaufbauten, bestehend aus Materialien mit unterschiedlichen Wärmeleiteigenschaften, berücksichtigt werden können.

Der Einfluss von Gebäudebegrünung auf das Außen- und Innenraumklima soll für unterschiedliche Dach- und Fassadenbegrünungen studiert werden und auch in seinen Auswirkungen im Vergleich zu einer verbesserten Gebäudedämmung verglichen werden.

Aufbau der Arbeit

Zuerst wird in dieser Arbeit in Kapitel 2 die Grundlagen des mikroskaligen Modells, sowie die Kopplung und Erweiterung zu einem Innenraumklimamodell beschrieben. Anschließend folgt in Kapitel 3 eine Prüfung der Simulationsergebnisse des Innenraumklimamodells auf Realitätsnähe mittels Messdaten. In Kapitel 4 werden die Ergebnisse der Simulationen zum Einfluss von Bäumen und Gebäudebegrünung auf das Innenraumklima vorgestellt. Abschließend werden die Ergebnisse in Kapitel 5 zusammengefasst, Schlussfolgerungen gezogen und Möglichkeiten für weitere Untersuchungen aufgezeigt.

2 Das Modell

Das mikroskalige Modell ASMUS_Green wurde von Groß (2010) aus ASMUS (Ausbreitungs- und Strömungsmodell für urbane Strukturen) weiterentwickelt. Es ermöglicht die numerische Betrachtung von urbanen, insbesondere kleinskaligen Strukturen. Zum Beispiel können unterschiedliche physikalische Eigenschaften für begrünte und unbegrünte Gebäudefassaden angenommen werden, sowie der Einfluss von Bäumen auf den Außen- und Innenraum simuliert werden. Die Modellgrundlagen dieser Weiterentwicklung wurden in Groß (2012) beschrieben.

Das Modell wurde kontinuierlich weiterentwickelt:

- Implementierung eines komplexeren Strahlungsmodells (s. Abschnitt 2.2.1 u. 2.2.2) (nach VDI 3789 Blatt 2, 1994) und Berechnung der Strahlungstemperatur (nach VDI 3787 Blatt 2, 2008) und des Universal Thermal Climate Index (UTCI); (Günther, 2012)
- Implementierung eines gekoppelten Verdunstungs- und Bodenfeuchtemodells für Langzeitsimulationen (s. Abschnitt 2.3); (Günther, 2014)
- Entwicklung von Komponenten für ein Innenraummodell (s. Abschnitt 2.4); (von Tils, 2017)

Die Beschreibung dieses Modells unterteilt sich in:

- das allgemeine Atmosphärenmodell (s. Abschnitt 2.1)
- und das Rand- und Grenzflächenmodell (s. Abschnitt 2.2) basierend auf Günther (2012),
- das Bodenmodell (s. Abschnitt 2.3)
- die Erweiterungen für das Innenraummodell ASMUS_Inside (s. Abschnitt 2.4).

2.1 Das Atmosphärenmodell

Im Atmosphärenmodell werden alle Prozesse zusammengefasst, die oberhalb der Bodenoberfläche und außerhalb der Gebäude ablaufen. Aus ihnen resultieren unter anderem die Strömungsverhältnisse und die Verteilung der Temperatur und der Feuchte.

2.1.1 Grundgleichungen

Die Grundgleichungen für dieses Modell bestehen aus den Navier-Stokes Gleichungen (2.1), der Kontinuitätsgleichung (2.2) und dem Ersten Hauptsatz der Thermodynamik (2.3). Diese Gleichungen für die drei Windkomponenten u_i , für die potenzielle Temperatur θ und die Bilanzgleichung für die spezifische Feuchte s (2.4) werden Reynolds-gemittelt und die resultierenden Korrelationsprodukte der Fluktuationen werden mit Hilfe eines Gradientansatzes bestimmt. Der durch diese Vorgehensweise eingeführte turbulente Diffusionskoeffizient (K_m und K_h für Impuls und Wärme), wird über die Prandtl-Kolmogorov Beziehung (2.6) aus der turbulenten kinetischen Energie E berechnet (Groß, 1994). Daher muss für diese Größe ebenfalls eine prognostische Gleichung gelöst werden (2.5). Für den Mischungsweg l_g (2.6) wird die charakteristische Gitterweite benutzt.

$$\frac{du_i}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[K_m \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) \right], \quad (2.1)$$

$$\frac{du_i}{dx_i} = 0, \quad (2.2)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_k} K_h \frac{\partial \theta}{\partial x_k} + P_\theta, \quad (2.3)$$

$$\frac{ds}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_k} K_s \frac{\partial s}{\partial x_k} + P_s, \quad (2.4)$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_k} K_m \frac{\partial E}{\partial x_k} + K_m \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_k} - K_h \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \delta_{i3} - \frac{E^{3/2}}{l_g}, \quad (2.5)$$

$$K_m = a l_g \sqrt{E}, \quad (2.6)$$

mit $a = 0,2$ und $l_g = \sqrt[3]{\Delta x \Delta y \Delta z}$.

ρ ist hierbei die Dichte der Luft, p' die Druckstörung, t die Zeit, g die Erdbeschleunigung und $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ die Gitterweiten in die drei Raumrichtungen. Vereinfachend wird angenommen, dass die turbulenten Diffusionskoeffizienten für Impuls, Wärme und Feuchte gleich groß sind: $K_m = K_h = K_s = K$.

Mit P_s und P_θ werden die Quellen und Senken von Feuchte und Temperatur bezeichnet.

2.1.2 Lösung der Bewegungsgleichung

Die Bewegungsgleichungen und der Stördruck p' werden mit Hilfe des Splitting Verfahrens nach Patrinos und Kistler (1977) gelöst bzw. bestimmt. Dabei werden die Navier-Stokes Gleichungen (2.1) in ein Hilfsstromfeld und einen Druckterm aufgesplittet:

$$\frac{\partial u_i^n}{\partial t} = \frac{\partial u_i^{aux}}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial x_i}. \quad (2.7)$$

Im Hilfsstromfeld u_i^{aux} wird die Druckstörung p' nicht berücksichtigt. Es erfüllt nicht notwendigerweise die Kontinuitätsgleichung (2.2) und ist Divergenz behaftet. Setzt man diese Gleichung in die gesplitteten Navier-Stokes Gleichungen (2.7) ein, ergibt sich nach zeitlicher Diskretisierung als Zusammenhang zwischen u_i^{aux} und dem Druckstörungsfeld p' die Poisson-Gleichung:

$$\frac{\partial^2}{\partial x_i^2} p' = \frac{\rho}{\Delta t} \frac{\partial}{\partial x_i} u_i^{aux}. \quad (2.8)$$

Diese wird mit einer 2D-spektralen Methode gelöst. Das bedeutet, dass das Feld u_i^{aux} in X- und Y- Richtung Fast-Fourier transformiert (FFT) wird. Anschließend wird es in diesen Richtungen im Fourierraum und in Z- Richtung im Ortsraum gelöst. Danach erfolgt die inverse Fouriertransformation.

Für die Windfeldkomponenten ergibt sich schließlich:

$$u_i^{n+1} = u_i^{aux} - \frac{\Delta t}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial x_i}. \quad (2.9)$$

Das Windfeld wird zum Divergenz ärmeren Windfeld u_i^{n+1} korrigiert, ist jedoch, insbesondere in der Nähe von Hindernissen, nicht vollständig divergenzfrei.

2.1.3 Randbedingungen für Wind und Turbulenz

Am unteren Rand, an Erdboden oder an Gebäudeoberflächen, werden die Geschwindigkeitskomponenten in Normal- und Tangentialrichtung Null gesetzt:

$$u = 0, v = 0, w = 0.$$

Für die turbulente kinetische Energie wird dort folgende Beziehung angenommen (Groß, 1997):

$$E(z = 0) = \frac{(u'_{tang})^2}{a_0}. \quad (2.10)$$

Dabei ist u'_{tang} die Schubspannungsgeschwindigkeit und $a_0 = 0,2$ eine Konstante.

Bäume sind für den Wind teilweise durchlässig und haben daher, in Abhängigkeit von ihrem Blattflächenindex, einen Porositätsfaktor, der zwischen Null und Eins liegt. Mit diesem Wert werden die Windgeschwindigkeit und die turbulenten Größen gewichtet. Ein komplett undurchlässiger Baum (z. B. ein Baumstamm) besitzt eine Porosität von Null.

Der Modelloberrand wird in mindestens 3- bis 4-facher Hindernishöhe festgelegt. In dieser Höhe kann angenommen werden, dass alle kleinskaligen Störungen abgeklungen sind und die größerskalige Situation dominiert. Die meteorologischen Variablen werden am Modelloberrand auf die Werte dieser angenommenen Situation gesetzt.

An den seitlichen Rändern wird zwischen Ein- und Ausströmrändern unterschieden. Bei Letzteren werden in der Regel für alle Variablen Neumannsche Randbedingungen gesetzt, während an den Einströmrändern für die horizontalen Geschwindigkeitskomponenten Dirichlet-Bedingungen angenommen werden und für die übrigen Größen ebenfalls Neumannsche Bedingungen. Je nach den Spezifikationen des zu Grunde liegenden Problems können auch andere Kombinationen gewählt werden.

2.1.4 Numerische Verfahren

Für gewöhnlich gibt es keine analytische Lösung für die Grundgleichungen eines mikroskaligen Modells und es müssen numerische Verfahren verwendet werden. Als Lösungstechnik werden hier finite Differenzen angewendet, die die räumlichen und

zeitlichen Differentialquotienten in Differenzenquotienten überführen. Infolgedessen ergeben sich aus einem kontinuierlichen Feld nur noch Werte an diskreten Punkten eines Rechengitters. In der Horizontalen ist bei mikroskaligen Modellen eine Maschenweite von 1 m bis 10 m üblich. In der Vertikalen haben die untersten Rechenflächen typischerweise eine Gitterweite von 1 m bis 2 m über dem Boden und ihre Abstände zueinander wachsen mit der Höhe an.

Abb. 2.1 zeigt die Anordnung der meteorologischen Variablen im mehrfach geschachtelten Arakawa-C Rechengitter. In einem Volumenelement des Gitters ist auf den Rändern jeweils die senkrecht stehende Windkomponente definiert. Der Mitte dieses Elements werden die skalaren Größen (Temperatur, Druck, turbulente kinetische Energie, etc.) zugeordnet.

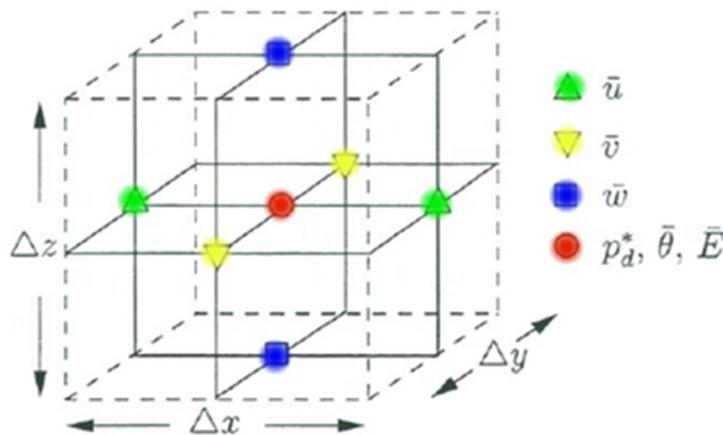


Abb. 2.1: Anordnung der meteorologischen Variablen auf dem Rechengitter (Groß, 2010).

2.1.5 Modellablauf und Initialisierung

Zunächst erfolgt die Festlegung der Gebietsgröße und der räumlichen Auflösung. Anschließend wird das Rechengitter mit Gebäuden und Bäumen in Form von Porositätswerten belegt und den Oberflächen ihre physikalischen Eigenschaften zugewiesen.

Mit ASMUS_Green wird die lokale Verteilung der meteorologischen Variablen in der Atmosphäre und auf den verschiedenen Oberflächen berechnet. Um den Einfluss des großskaligen Wettergeschehens auf der lokalen Ebene berücksichtigen zu können, wird die meteorologische Situation, die simuliert werden soll, unter anderem mit einem

Startprofil aus einem 1D-Grenzschichtmodell festgelegt. Dafür wurde die 1D-Version des nicht-hydrostatischen mesoskaligen Modells FITNAH (Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenic Heatsource) verwendet. Es wird nur mit stationären, aus Stabilitätsgründen, stark bis leicht stabilen 1D-Temperaturprofile gerechnet. Neutrale und labile Profile werden zu leicht stabilen korrigiert und als Basis dafür die Temperatur der untersten Rechenfläche verwendet.

Nach der Festlegung der Anzahl von Iterationen und den Randbedingungen, kann die Berechnung der lokalen 3D-Verteilung der meteorologischen Größen mit ASMUS_Green gestartet werden. In Abhängigkeit von der Aufgabenstellung erfolgt abschließend die Auswertung der berechneten Größe, um zum Beispiel die mittlere Strahlungstemperatur und den UTCI zu bestimmen.

Über den gesamten Simulationszeitraum werden stündlich 1D-Profile u.a. der Windgeschwindigkeit und Temperatur am Modelloberrand vorgegeben. Zusätzlich kann der Bewölkungsgrad sowie die Niederschlagsmenge stündlich in das Modell eingelesen werden. Diese Daten können beispielsweise aus Aufzeichnungen von Messstationen gewonnen werden. Somit können meteorologische Szenarien definiert werden und reale Wetterereignisse nachsimuliert werden.

2.2 Das Rand- und Grenzflächenmodell in ASMUS_Green

Um die Wechselwirkung zwischen Unterlage und Atmosphäre zu erfassen, wird die Temperatur an der Bodenoberfläche, an den Wänden und Dächern der Gebäude und die der Vegetation benötigt. Für die Berechnung dieser Temperaturen werden Energiebilanzen aufgestellt und unterschiedliche Ansätze für den Fall der Dach- und Fassadenbegrünung, sowie für glatte Oberflächen verwendet.

Die Energiebilanz spaltet sich auf in die Komponenten des solaren, latenten, fühlbaren, langwelligen und des Bodenwärmestroms:

$$Q_S + Q_V + Q_H - Q_L - Q_B = 0. \quad (2.11)$$

Ein positives Vorzeichen bedeutet dabei, dass der Energiefluss zu der Oberfläche hingerrichtet ist und ein negatives Vorzeichen, dass er von der Oberfläche weggerichtet ist.

Als erstes wird in diesem Abschnitt auf den kurz- und den langwelligen Wärmestrom eingegangen (s. Abschnitt 2.2.1 und 2.2.2). Die Berechnungen mit den notwendigen Parametrisierungen und deren Beschreibung halten sich stark an die VDI Richtlinie 3789 Blatt 2 „Umweltmeteorologie – Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Oberflächen – Berechnung der kurz- und langwelligen Strahlung“.

Anschließend folgt die Beschreibung der restlichen Wärmeströme für die verschiedenen Oberflächenaufbauten (begrünte und unbegrünte / glatte Dächer bzw. Wände und Bäume, s. Abschnitt 2.2.3-2.2.5) um abschließend daraus die Oberflächentemperatur zu berechnen (s. Abschnitt 2.2.6).

2.2.1 Der kurzwellige Wärmestrom

Der solare kurzwellige Wärmestrom berechnet sich über die geometrische und astronomische Ausrichtung der bestrahlten Fläche zur Sonne. Sein Betrag ist zudem abhängig von der Albedo der bestrahlten Fläche und von reflektierenden und / oder die kurzwellige Strahlung abschirmenden Hindernissen. Er setzt sich zusammen aus der direkten und der diffusen Sonnenstrahlung (isotroper und anisotroper Anteil), sowie der diffus reflektierten Globalstrahlung an Gebäude- und Erdbodenoberflächen.

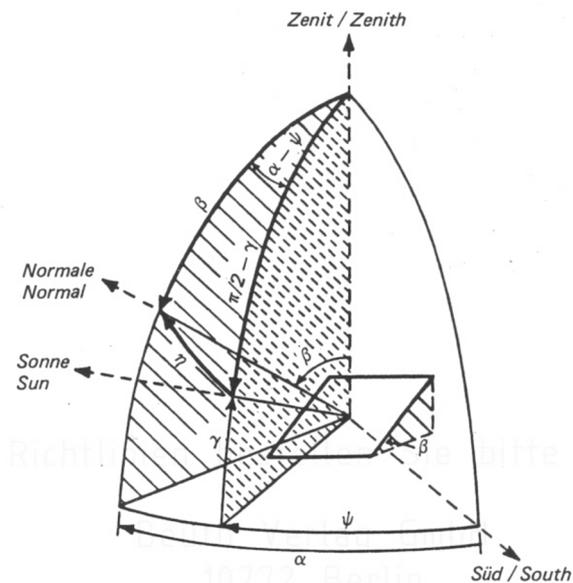


Abb. 2.2: Definition des Winkels η zwischen der Richtung zur Sonne und der Normale der geneigten ebenen Fläche (nach Kasten, 1983)

2.2.1.1 Direkte Sonnenstrahlung

Die direkte Sonnenstrahlung Q_{direkt} ist das Produkt aus Solarkonstante, Sonnenhöhenwinkel bezogen auf die betrachtete Fläche und Gesamtextinktion der Strahlung in der Atmosphäre, die über den Linke Trübungsfaktor berechnet wird.

$$Q_{\text{direkt}} = I_0 \cos(\eta) \exp(-T_L \cdot \delta_{RO} \cdot m \cdot p/p_0) \quad (2.12)$$

mit:

I_0 : Extraterrestrische Sonneneinstrahlung in Abhängigkeit vom Abstand zur Sonne die sich aus der Solarkonstanten \bar{I}_0 berechnet:

$$I_0 = \bar{I}_0 \cdot (\bar{r}/r)^2 = \bar{I}_0 \cdot (1 + 0.03344 \cdot \cos(0.9856^\circ \cdot J - 2.72^\circ)),$$

mit J = Nummer des Tages im Jahr und $\bar{I}_0 = 1367 \text{ W/m}^2$.

η : Der Winkel zwischen der Flächennormalen und der Richtung der Sonne (s. Abb. 2.2)

$$\cos(\eta) = \sin(\gamma) \cos(\beta) + \cos(\gamma) \sin(\beta) \cos(\alpha - \psi), \quad (2.13)$$

dabei ist ψ der Azimut der Sonne und γ der Sonnenhöhenwinkel der sich wie folgt berechnen lässt:

$$\sin(\gamma) = \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega)$$

ϕ : Geographische Breite

α : Azimutwinkel = Ausrichtung der Fläche gegenüber Süd

Daraus ergeben sich folgende Azimutwinkel für die Haupthimmelsrichtungen:

Süd = 0°, West = 90°, Nord = 180°, Ost = 270°

ω : Stundenwinkel; $\omega = -(12\text{Uhr} - \text{WOZ}) \cdot \frac{\pi}{12\text{Uhr}}$, (WOZ = wahre Ortszeit)

δ : Deklination der Sonne für die astronomische Formeln ergeben:

$$\sin(\delta) = 0.3978\sin(x - 77.51^\circ + 1.92^\circ\sin(x)),$$

$x = 0.9856^\circ \cdot J - 2.72^\circ$, J = Nummer des Tages im Jahr.

β : Neigung der Fläche

Für horizontale Flächen vereinfacht sich Gleichung 2.13 zu:

$$\cos(\eta)_{\beta=0^\circ} = \sin(\gamma),$$

δ_{RO} : Vertikale optische Dicke der reinen und trockenen Normatmosphäre (Rayleigh-Atmosphäre) einschließlich Ozonabsorption. Sie wird nach Kasten (1980) über $\delta_{RO} = 1/(0,9 \cdot m + 9,4)$ parametrisiert

m : Relative optische Luftmasse, die sich nach Kasten und Young (1989) nähern lässt für $\gamma > 10^\circ$ mit weniger als 3 % Fehler über $m = 1/\sin(\gamma)$

p/p_0 : Druckkorrektur zur Reduktion der optischen Dicke (bei allen Simulationen wird von $p = p_0$ ausgegangen).

T_L : „Der Linke-Trübungsfaktor gibt die optische Dicke einer getrüben und feuchten Atmosphäre als vielfaches der reinen trockenen Atmosphäre (Rayleigh-Atmosphäre) an. Für den Linke-Trübungsfaktor können folgende Richtwerte benutzt werden:

sehr saubere Kaltluft $T_L = 2$

saubere Warmluft $T_L = 3$

feuchtwarme oder stagnierende Luft $T_L = 4$ bis 6

verunreinigte Luft $T_L > 6$

In grober Näherung kann der Linke-Trübungsfaktor über die meteorologische Sichtweite V_M berechnet werden.“ (VDI 3789 Blatt 2, 1994, p. 32):

$$T_L = 0,84 + 39/(V_M/km).$$

Mit den beschriebenen Näherungen vereinfacht sich (Gl. 2.12) zu:

$$Q_{\text{direkt}} = I_0 \cos(\eta) \exp(-T_L/(0,9 + 9,4 \cdot \sin(\gamma))). \quad (2.14)$$

Bei bewölktem Himmel mit Bedeckungsgrad N wird eine mittlere Reduktion der direkten Einstrahlung angenommen:

$$Q_{\text{direkt}}(N) = Q_{\text{direkt}}(\beta, \alpha) \cdot (1 - N/8). \quad (2.15)$$

Abschattungen durch Gebäude und Bäume werden im Modell berücksichtigt und schirmen die direkte Einstrahlung vollständig ab.

Die direkte Sonneneinstrahlung ist immer größer oder gleich Null und wird daher für negative Sonnenhöhenwinkel auf Null gesetzt. Das gleiche erfolgt, wenn der Sonnenhöhenwinkel einer horizontalen Fläche zu diesem Zeitpunkt kleiner als Null wäre (die Sonne also nicht über dem Horizont steht).

2.2.1.2 Diffuse Sonnenstrahlung

Die diffuse Sonnenstrahlung wird über die Globalstrahlung berechnet. Diese wird über die Kenntnis des Linke-Trübungsfaktors für wolkenlosen Himmel parametrisiert (Kasten, 1983) und davon die direkte Sonnenstrahlung auf eine ebene Fläche subtrahiert, um die diffuse Sonnenstrahlung auf eine solche zu erhalten.

Für die Globalstrahlung bei wolkenlosem Himmel auf eine ebene Fläche wurde folgende Parametrisierung verwendet:

$$Q_{\text{global}} = 0.84 \cdot I_0 \cdot \sin(\gamma) \cdot \exp(-0.027(p/p_0) T_L / \sin(\gamma)). \quad (2.16)$$

Bei bewölktem Himmel reduziert sich die Globalstrahlung auf:

$$Q_{\text{global}}(N) = Q_{\text{global}}(0) \cdot [1 - a(N/8)^b], \quad (2.17)$$

mit den empirischen Konstanten $a = 0,72$ und $b = 3,2$.

Damit folgt für die gesamte diffuse Sonnenstrahlung auf eine ebene Fläche bei bewölktem Himmel:

$$Q_{\text{diffus}}(N) = Q_{\text{global}}(N) - I_0 \sin(\gamma) \exp(-T_L / (0,9 + 9,4 \sin \gamma)) \cdot (1 - N/8). \quad (2.18)$$

Die diffuse Sonnenstrahlung ist nur bei bedecktem Himmel näherungsweise isotrop. Bei wolkenlosem Himmel ist sie in der Sonnenumgebung stark anisotrop. Hinzu kommt, dass geneigte Flächen nur einen Teil der diffusen Sonnenstrahlung empfangen. Daher wird sie als Summe aus einem anisotropen und einem isotropen Anteil parametrisiert (Hay & McKay, 1985):

$$Q_{\text{diffus}}(N = 0) = Q_{\text{diffusanisotrop}}(N = 0) \cdot \tau + Q_{\text{diffusisotrop}}(N = 0) \cdot (1 - \tau), \quad (2.19)$$

$$Q_{diffus}(N = 0) = Q_{diffus}(N = 0)[\tau \cdot \cos \eta / \sin \gamma + (1 - \tau) \cdot \cos^2(\beta/2)], \quad (2.20)$$

mit $\tau = \sin(\gamma) \cdot \exp(-0.027(p/p_0) T_L / \sin(\gamma))$.

Insbesondere geneigte Flächen erfahren Horizonteinschränkungen oder -erweiterungen. Diese Hindernisse können Erdboden, Gebäude oder Bäume sein und werden von der Globalstrahlung beleuchtet. Die diffuse Sonnenstrahlung kann von ihnen vermindert und damit der Anteil der von diesen Hindernissen (Erdboden, Gebäuden oder Bäumen) auf die betrachtete Fläche reflektierte diffuse Strahlung erhöht werde oder umgekehrt. Auf die Bestimmung der Raumwinkelbereiche, in denen eine Horizonteinschränkung bzw. -erweiterung vorliegt wird hier nicht explizit eingegangen. Sie werden ausführlich in der VDI Richtlinie 3789 Blatt 2 Anhang F beschrieben. Die Raumwinkelbereiche ändern nur den isotropen Anteil der diffusen Sonnenstrahlung, der anisotrope wird, wie die direkte Sonnenstrahlung, gar nicht oder vollständig abgeschattet:

$$Q_{diffus}(\Omega_D; N = 0) = Q_{diffus}(N = 0)[\tau \cdot \cos \eta / \sin \gamma + (1 - \tau) \cdot \Omega_D], \quad (2.21)$$

mit dem Raumwinkelanteil Ω_D aus dem diffuse isotrope Sonnenstrahlung auf die geneigte Fläche gelangt.

Bei bewölktem Himmel hängt der Anteil an anisotroper und isotroper diffuser Sonnenstrahlung von der augenblicklichen Verteilung der Bewölkung am Himmel ab. Im zeitlichen Mittel kann die diffuse Sonnenstrahlung näherungsweise in einen wolkenlosen und einen bedeckten Anteil aufgespalten werden. Mit der Näherung, dass die diffuse Strahlung bei bedecktem Himmel isotrop ist ergibt sich folgendes:

$$Q_{diffus}(\Omega_D; N) = Q_{diffus}(\Omega_D) \cdot (1 - N/8) + N/8 \cdot Q_{global}(N = 8) \cdot \Omega_D. \quad (2.22)$$

Wie auch bei der direkten Sonnenstrahlung, wird die diffuse Einstrahlung für negative Sonnenhöhenwinkel auf null gesetzt.

2.2.1.3 Reflektierte Globalstrahlung

Die Globalstrahlung wird von der Erdoberfläche, Gebäuden und Bäumen in Abhängigkeit von ihrer Albedo reflektiert und kann auf die betrachtete (geneigte) Fläche treffen. Es wird angenommen, dass die Globalstrahlung ausschließlich diffus isotrop reflektiert wird. Mit einem von der geneigten Fläche ausgehenden scannendem Verfahren werden alle Reflektionen iterativ berechnet.

Die reflektierte Strahlung wird dabei über eine Doppelsumme angenähert, in dem $\Delta\alpha = \Delta\vartheta = 10^\circ$ breite und hohe Azimut- und Zenitwinkelintervalle gebildet werden und die Anteile der Strahlung $Q_{Reflektion}(i, j)$, für alle Bereiche, die auf der Erdoberfläche bzw. auf einer Horizonteinschränkung liegen, aufsummiert:

$$Q_{Reflek} = \sum_i \sum_j Q_{Reflek}(i, j) \cdot \Delta\alpha \cdot \Delta\vartheta \cdot \cos\eta_{ij} \cdot \sin\vartheta_j. \quad (2.23)$$

Die reflektierte Strahlung eines Flächenintervalls ist dabei die reflektierte kurzwellige Einstrahlung auf diese Fläche im letzten Zeitschritt multipliziert mit dessen Albedo σ_{KS} :

$$Q_{Reflektion}(i, j) = Q'_S \sigma_{KS}. \quad (2.24)$$

2.2.1.4 Kurzwellige Strahlungsbilanz einer Oberfläche

Die Summe der reflektierten, diffusen und direkten Einstrahlung, in Abhängigkeit von der Albedo σ_{KS} , der Neigung und Ausrichtung der betrachteten Fläche, ergeben schließlich, unter der Berücksichtigung der Wolkenbedeckung, der atmosphärischen Trübung und des Sonnenhöhenwinkel in einer definierten Umgebung, den solaren Wärmestrom für eine Oberfläche:

$$Q_S = (1 - \sigma_{KS}) \cdot (Q_{direkt} + Q_{diffus} + Q_{Reflektion}). \quad (2.25)$$

2.2.2 Der langwellige Wärmestrom

Der langwellige Wärmestrom berechnet sich nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz über die Temperatur einer Fläche und über die geometrische und astronomische Ausrichtung der bestrahlten Fläche zur Umgebung die ebenfalls Wärmestrahlung emittiert. Sein Betrag ist zudem abhängig von der langwelligen Emissivität der bestrahlten Fläche. Er setzt sich zusammen aus der Wärmestrahlung der Fläche, sowie der der Atmosphäre, Erdoberfläche, Gebäude und der Bäume in der Umgebung.

Der effektive langwellige Reflexionsgrad σ_{Kt} , Absorptionsgrad α_{Kt} und Transmissionsgrad τ_{Kt} stehen unter folgender Beziehung zueinander:

$$\sigma_{Kt} + \alpha_{Kt} + \tau_{Kt} = 1. \quad (2.26)$$

α_{Kt} ist gleich dem effektiven langwelligen Emissionsgrad ϵ_K der Oberfläche. Für die meisten Körper gilt $\tau_{Kt} \approx 0$, so dass sich Gleichung 2.26 vereinfacht zu

$$\sigma_{Kt} = 1 - \alpha_{Kt} = 1 - \epsilon_K. \quad (2.27)$$

Die reflektierte Wärmestrahlung ist somit:

$$Q_{lreflek} = (1 - \epsilon_K) \cdot Q_l. \quad (2.28)$$

Natürliche Bodenoberflächen, Gebäude und Vegetation haben typischerweise einen effektiven Emissionsgrad der nur wenig kleiner als Eins ist. Daher lässt sich der Anteil, der auf eine Fläche reflektierten langwelligen Strahlung, gegenüber dem emittierten Anteil von und auf eine Fläche, vernachlässigen.

2.2.2.1 Die atmosphärische Gegenstrahlung

„Die Bestrahlungsstärke einer horizontalen ebenen Fläche durch die Gegenstrahlung erhält man durch Integration der Strahldichten $L_A(\vartheta, \alpha)$ über den Halbraum. Man erhält folgende Gleichung:

$$Q_{lAtmos} = \int_{\alpha=0}^{2\pi} \int_{\vartheta=0}^{\pi/2} L_A(\vartheta, \alpha) \cdot \cos\vartheta \cdot \sin\vartheta \cdot d\vartheta \cdot d\alpha \cdot \Omega_0. \quad (2.29)$$

Die Strahldichtevertelung kann als rotationssymmetrisch zum Zenit angesetzt werden, d.h. L_A ist unabhängig vom Azimutwinkel α .“ (VDI 3789 Blatt 2, 1994, p. 28) Des Weiteren kann die Atmosphäre als grauer Strahler angenommen werden, dessen effektiver gerichteter Emissionsgrad abhängig vom Zenitwinkel ist (seine Berechnung wird ausführlich in VDI Richtlinie 3789 Blatt 2 beschrieben) und die Strahldichte eines schwarzen Strahlers der Lufttemperatur T_{2m} in 2m Höhe hat:

$$L_A(\vartheta) = \epsilon_{eff}(\vartheta) \cdot \sigma T_{2m}^4 / \pi \Omega_0. \quad (2.30)$$

Eine etwaige Wolkenbedeckung wird nicht explizit berücksichtigt, sondern nur indirekt über eine oftmals niedrigere Lufttemperatur.

Eine geneigte Fläche empfängt nur aus einem Teil des oberen Halbraums Gegenstrahlung. Die Integrationsgrenzen sind daher vom Azimutwinkel abhängig. „Da die Abhängigkeit des effektiven gerichteten Emissionsgrades $\epsilon_{eff}(\vartheta)$ von ϑ und damit die Abhängigkeit der Funktion $L_A(\vartheta)$ von ϑ zu einem analytisch nicht mehr lösbaarem Integral führt, ist es zweckmäßig das Doppelintegral (Gl. 2.28) auf eine Doppelsomme zurückzuführen.“ (VDI 3789 Blatt 2, Seite 29)

Es werden 10° breite und hohe Azimut- und Zenitwinkelintervalle gebildet und die Anteile der Strahlung $Q_{lAtmos}(i, j)$, für alle Bereiche, die oberhalb der Erdoberfläche bzw. oberhalb einer Horizonteinschränkung liegen, aufsummiert:

$$Q_{lAtmos}(i, j) = \Delta\alpha \cdot \Delta\vartheta \cdot L_A(\vartheta_j) \cdot \cos\eta_{ij} \cdot \sin\vartheta_j, \quad (2.31)$$

$$\vartheta_j < 90^\circ - \gamma_{Fi} \text{ mit } \gamma_{Fi} \geq 0^\circ \text{ bzw. } \vartheta_j < 90^\circ - \gamma_{He},$$

wobei jeweils das Maximum von γ_{Fi} und γ_{He} genommen werden muss.

Die Berechnung dieser Winkel wird ausführlich in der VDI Richtlinie 3789 Blatt 2 Anhang F beschrieben.

2.2.2.2 Die langwellige Einstrahlung aus der Umgebung

Die langwellige Einstrahlung von emittierenden Flächen in der Umgebung berechnet sich ähnlich wie die der atmosphärischen Gegenstrahlung. Auch hier erfolgt eine Aufsummierung der $10^\circ \times 10^\circ$ Winkelemente, nun allerdings für die Bereiche, die bei der atmosphärischen Gegenstrahlung noch ausgeschlossen wurden (zum Beispiel unterhalb des Horizonts liegen). Des Weiteren wird die Strahldichte eines Winkelements über die Strahlung eines schwarzen Körpers mit der aktuellen Temperatur des nächsten Flächenelements berechnet und für alle Summanden der individuelle Wert der effektiven langwelligen Emissivität verwendet:

$$Q_{LUmg}(m, n) = \Delta\alpha \cdot \Delta\vartheta \cdot L_{Umig}(\vartheta_m, \alpha_n) \cdot \cos\eta_{mn} \cdot \sin\vartheta_n, \quad (2.32)$$

$$L_{Umig}(\vartheta_n, \alpha_m) = \epsilon_{mn}(\vartheta) \cdot \sigma T_{mn}^4 / \pi \Omega_0. \quad (2.33)$$

2.2.2.3 Langwellige Strahlungsbilanz einer Grenzfläche

Abschließend ergibt sich somit als langwellige Strahlungsbilanz einer Oberfläche die Summe aller auf sie einfallenden (positiven) und aller von ihr ausgehenden (negativen) langwelligen Strahlungsflussdichten. Die langwellige Strahlungsbilanz einer Grenzfläche ist demnach:

$$Q_L = \epsilon_K \cdot \left(\sum_i \sum_j Q_{lAtmos}(i, j) + \sum_m \sum_n Q_{LUmg}(m, n) - \sigma T^4 \right). \quad (2.34)$$

2.2.3 Begrünte und unbegrünte Dach- und Bodenoberflächen

Für den Dachaufbau können verschiedene Schichten mit unterschiedlichen Stoffeigenschaften vorgegeben werden (s. Abb. 2.3). So ist beispielsweise der Einfluss unterschiedlicher Materialien beim Dachaufbau, Dämmschichten oder verschiedene Dicken des Bodensubstrats studierbar. Im vorliegenden Fall werden fünf Schichten verwendet. Der Aufbau der Bodenoberfläche verläuft nach einem sehr ähnlichen Schema.

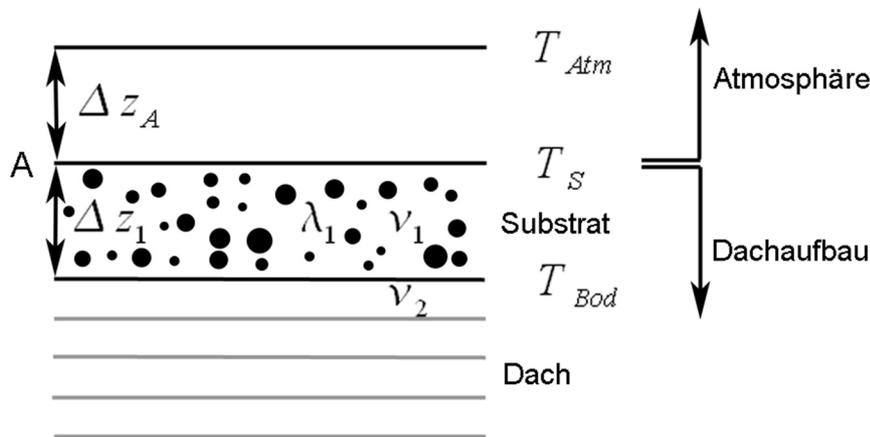


Abb. 2.3: Modellaufbau des Dachs / Bodens mit Begrünung (Günther, 2012)

Für die Fläche A in Abb. 2.3 wird eine Energiebilanz aufgestellt:

$$Q_S + Q_V + Q_H + Q_L + Q_B = 0. \quad (2.35)$$

Der solare Wärmestrom Q_S und der langwellige Wärmestrom Q_L werden gemäß Abschnitt 2.2.1 und 2.2.2 berechnet. Der Bodenwärmestrom Q_B ist abhängig vom Temperaturgradienten zwischen Boden-/ Gebäudekerntemperatur T_{Bod} und Oberflächentemperatur T_S , sowie von der Wärmeleitfähigkeit λ der Zwischenschicht. Bei Gebäuden ist T_{Bod} mit 20 °C unveränderlich.

$$Q_B = \lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \lambda \frac{T_S - T_{Bod}}{\Delta z_1} \quad (2.36)$$

$$Q_H = c_p \rho K \frac{\partial T}{\partial z} = c_p \rho K \frac{T_{Atm} - T_S}{\Delta z_A} \quad (2.37)$$

Der fühlbare Wärmestrom Q_H (Gl. 2.36) berechnet sich über den Temperaturgradienten der Luft an der untersten Schicht der Atmosphäre und der Oberflächentemperatur. Weitere Faktoren sind die Luftdichte ρ und die spezifische Wärme der Luft $c_p = 1005\text{ J}/(\text{kgK})$.

Der Verdunstungswärmestrom wird in Abhängigkeit vom Bodenwassergehalt, der solaren Einstrahlung und des Stomatawiderstands der Vegetation nach Bruse (1999) berechnet:

$$Q_V = L_s \rho J_{f,trans}, \quad (2.38)$$

dabei ist L_s die spezifische Verdampfungswärme und $J_{f,trans}$ der Transpirationsanteil der Wasserdampf Flüsse. Die Verdunstung von Wasser von unbegrünter Oberflächen wird vernachlässigt und Niederschlag interagiert ausschließlich mit dem Bodenwassergehalt des Substrats.

$$J_{f,trans} = \begin{cases} (r_a + r_s)^{-1} \Delta q, & \Delta q \geq 0 \\ 0, & \Delta q < 0 \end{cases} \quad (2.39)$$

mit dem Strömungswiderstand r_a , dem Stomatawiderstand r_s und dem Wasserdampf-sättigungsdefizit Δq .

Der Stomatawiderstand wird wie folgt berechnet (Deardorff, 1987):

$$r_s = r_{s,min} \left[\frac{Q_{s,max}}{0,03 Q_{s,max}} + f_{wilt} \right] \quad (2.40)$$

und hängt vom Tagesmaximum der kurzwelliger Einstrahlung $Q_{s,max}$, der Wasserverfügbarkeit f_{wilt} und dem minimalen Stomatawiderstand $r_{s,min}$, der vegetations-spezifisch ist ab (Gras: $r_{s,min} = 200$, Laubbäume: $r_{s,min} = 400$; (Tjernström, 1989)).

$$f_{wilt} = \left(\frac{\theta_{wilt}}{\theta} \right)^2 \quad (2.41)$$

ist das Verhältnis von Bodenwassergehalt beim substratspezifischen Welkepunkt und dem tatsächlichen Bodenwassergehalt im Wurzelbereich (Deardorff, 1987).

2.2.4 Begrünte und unbegrünte Wandoberflächen

Für den Fassadenaufbau können verschiedene Schichten mit unterschiedlichen Stoffeigenschaften vorgegeben werden. So ist beispielsweise der Einfluss unterschiedlicher Vegetationsformen, Wandmaterialien oder Dämmschichten studierbar. Im vorliegenden Fall werden fünf Schichten verwendet.

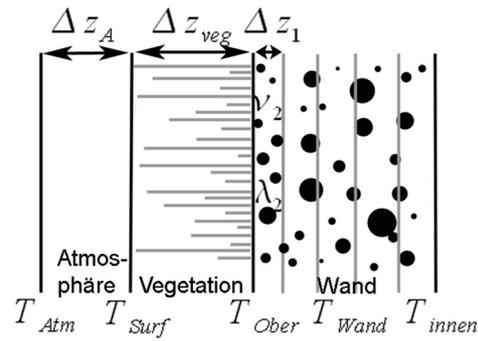


Abb. 2.4: Modellaufbau der Fassade mit Begrünung (Günther, 2012)

Die Berechnung der einzelnen Wärmeströme der Energiebilanz an der Grenzfläche zwischen Vegetation und Atmosphäre für die Fläche T_{Surf} erfolgt wie bei den begrünten Dach- und Bodenoberflächen, mit der Ausnahme des Bodenwärmestroms:

$$Q_B = \lambda_{Veg} \frac{T_{Surf} - T_{Ober}}{\Delta z_{Veg}} \quad (2.42)$$

Die Berechnung der Oberflächentemperatur der Wand T_{Ober} erfolgt durch folgende

$$\text{Energiebilanz: } Q_{SVeg} - Q_{BOber} + Q_{H Veg} = 0. \quad (2.43)$$

Die Vegetationsschicht wird als einheitlich feucht betrachtet und den gleichen Bedingungen, wie die für die Dach- und Bodenoberflächen unterworfen.

Die langwellige Ausstrahlung der Wand entspricht der entgegengesetzten langwelligen Ausstrahlung der Vegetation: $Q_L = -Q_{LVeg}$

$$Q_{SVeg} = Q_S(z = z_{Surf}) e^{-kL}, \quad (2.44)$$

mit dem Extinktionskoeffizient k und dem Blattflächenindex L .

$$Q_{BOber} = \lambda_2 \frac{T_{Ober} - T_{Wand}}{\Delta z_1} \quad (2.45)$$

$$Q_{H Veg} = \lambda_{Veg} \frac{T_{Surf} - T_{Ober}}{\Delta z_{Veg}} \quad (2.46)$$

2.2.5 Baumoberflächen

Bäume werden in ASMUS_Green für den Wind als teilweise durchlässig angenommen und haben einen Porositätskoeffizienten, der in der Regel kleiner als Eins ist. Für die kurz- und langwellige Strahlung sind die Bäume undurchlässig. Wie bei den anderen

Grenzflächen auch, wird eine Energiebilanz für die idealisierte Oberfläche der Bäume gitterpunktweise aufgestellt und ihre Temperatur berechnet.

Die Berechnung der einzelnen Wärmeströme unterscheidet sich im Prinzip nicht von denen für die anderen Grenzflächen. Lediglich der Bodenwärmestrom Q_B berechnet sich nicht mehr über eine Bodentemperatur, sondern über eine zeitlich nicht variable Baumkerntemperatur $T_{Baum} = 20^\circ\text{C}$.

$$Q_B = \lambda_{veg} \frac{T_S - T_{Baum}}{\Delta z_{veg}} \quad (2.47)$$

2.2.6 Lösung der Energiebilanzgleichung

Die Energiebilanzgleichung für eine Oberfläche wird explizit über folgende Gleichung gelöst:

$$T_S = \left[Q_S + \epsilon_K \cdot \left(\sum_i \sum_j Q_{lAtmos}(i,j) + \sum_m \sum_n Q_{lUmg}(m,n) \right) \right] / F - [Q_V + c_p \cdot \rho \cdot K \cdot T_{\Delta w} / \Delta^w + S] / F, \quad (2.48)$$

mit $S = 3 \cdot \epsilon_K \cdot (285\text{K})^4 + T_{Bod} \cdot \lambda / \Delta z_1$

und $F = 4 \cdot \epsilon_K \cdot (285\text{K})^3 + \lambda / \Delta z_1 + c_p \cdot \rho \cdot K / \Delta^w$.

Anhand dieser Oberflächentemperatur werden der langwellige, der fühlbare und der Bodenwärmestrom berechnet.

2.2.7 Unterschiede der Temperatur von Gebäudefassaden bei unterschiedlich realisierter Ausrichtung ihrer Flächenelemente

Die Ausrichtung von Oberflächen spielt bei der Berechnung des kurzwelligen Wärmestroms eine maßgebliche Rolle. Wie in Günther (2010) gezeigt wurde, hat die Neigung der Dachfläche im Lee des Gebäudes bei niedrigem Sonnenstand Auswirkung auf die Lufttemperatur in 2 m Höhe (Änderung bis zu 4 K möglich).

Nicht nur bei Dachflächen spielt die Ausrichtung eine Rolle, sondern auch bei senkrechten Wandflächen (Günther, 2012). Nicht immer stehen Gebäude in einem Modellgebiet parallel zu den kartesischen Gitterachsen. Wenn diese Fassaden an einem Gitter gerastert werden, entsteht keine "glatte" Fläche von gleich ausgerichteten Oberflächenelementen wie in der Realität, sondern die Gebäudefassade besteht aus einer Ansammlung von orthogonalen Oberflächen die parallel zum numerischen Gitter stehen. Über die gesamte Wandfläche gemittelt geht die Ausrichtung der Wandelemente für breite Fassaden gegen ihre exakte Ausrichtung. Die kurzwelligen Wärmeströme, die auf die gesamte Fassade einwirken, können jedoch trotzdem sehr unterschiedlich sein (s. Abb. 2.5) und die Oberflächentemperaturen müssen sich nicht unbedingt im Mittel über die Fassade ausgleichen.

Wie groß der Einfluss der exakten Ausrichtung der Wände für die Strahlung gegenüber einer nicht "glatten", sondern stufenförmigen Fassade auf die Oberflächentemperatur ist, wurde mit ASMUS_Green für unterschiedlich ausgerichtete einzelstehende Gebäude simuliert. Das unbegrünte Flachdach-Gebäude hat eine Grundfläche von ca. 6 m x 12 m, eine Höhe von 10 m und steht in der Mitte des Modellgebiets (Länge: 120 m, Breite: 120 m, Höhe: 180 m) auf einer Rasenfläche. Es wird mit einer regelmäßigen Gitterweite von 2 m in der Horizontalen und 2 m in der Vertikalen in Bodennähe gerechnet. Die Oberflächen des Gebäudes bestehen aus roten Ziegelsteinen und roten Dachziegeln mit einer kurzwelligen Albedo (gemäß VDI 3789 Blatt 2) von 0,32 bzw. 0,33 und einem effektiven langwelligen Emissionsgrad von 0,86. Die Grasoberfläche wird als durchgehend feucht mit einer kurzwelligen Albedo von 0,2 und einem effektiven

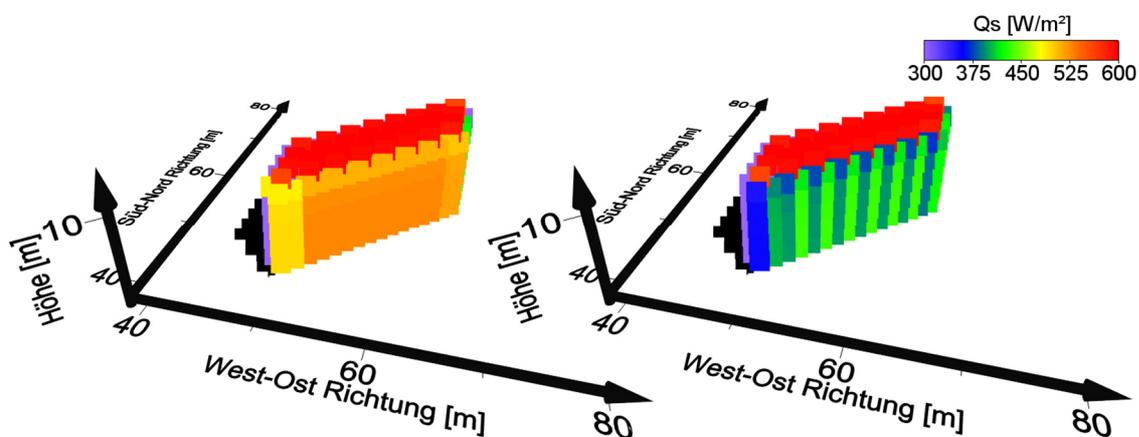


Abb. 2.5: Simulierter kurzwelliger Wärmestrom der Fassadenoberflächen und Schattenwurf des Gebäudes um 10 Uhr am 20. Juni; links: Fassade deren Oberfläche einheitlich nach Süd-Ost (315°) ausgerichtet ist; rechts: Fassade mit abwechselnd nach Süden und Osten ausgerichteten Oberflächen (treppenförmig) (Günther, 2012)

langwelligen Emissionsgrad von 0,93 angenommen. Simuliert wurde für einen Strahlungstag am 20. Juni ohne Wolkenbedeckung mit einem Linke-Trübungsfaktor von 3. Der Wind weht mit durchschnittlich 2 m/s in 10 m Höhe aus Westen und die Luftfeuchtigkeit beträgt über den Tag gemittelt 70 %.

Ausgewertet wurden 24 unterschiedliche orientierte Fassaden deren Oberflächenelemente parallel zum numerischen Gitter oder aber entlang der Gebäudeachse ausgerichtet sind. Die Abb. 2.7 und Abb. 2.6 zeigen den Tagesgang der über die Wandfläche gemittelten Oberflächentemperatur der vier zum numerischen Gitter diagonalen Wandausrichtungen, an denen die größten Unterschiede durch unterschiedliche Wandflächenausrichtungen berechnet werden.

Zu erkennen ist, dass die Differenz der Temperatur zu den meisten Tageszeiten zwischen den verschiedenen realisierten Wänden gering ist. Größere Unterschiede ergeben sich zu den Zeiten maximaler Einstrahlung auf die Oberflächen. Wenn die Sonne nahezu senkrecht zur Ausrichtung der „glatten“ Fassade oder zu einem Teil der parallel am Gitter ausgerichteten Elemente steht, ergeben sich, über die ganze Wandfläche gemittelt, Oberflächentemperaturdifferenzen von bis zu +/- 5 K. In Abb. 2.8 ist Differenz der mittleren Oberflächentemperatur der „glatten“ von der „Stufen“-Fassade für unterschiedliche Ausrichtungen dargestellt. Über den Tag gemittelt ist der Einfluss der unterschiedlichen Fassaden-Realisierungen zu vernachlässigen. Jedoch kommt es zu den oben erwähnten Tageszeiten kurzfristig zu positiven wie negativen Differenzen, die mehrere Kelvin betragen können. Die größten Effekte werden bei den diagonal zum Gitter ausgerichteten Fassadenoberflächen beobachtet.

Wenn die Oberflächentemperatur von Gebäuden untersucht werden soll, macht es Sinn die genaue Ausrichtung der Fassaden zu erfassen. Ist dies nicht möglich, sollte das numerische Gitter parallel zur vorherrschenden Gebäudeausrichtung gedreht werden.

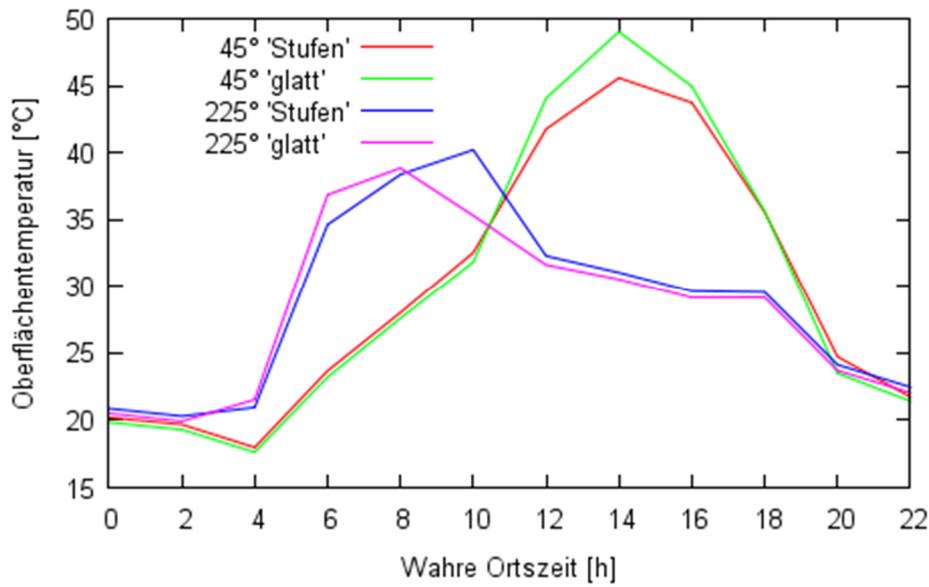


Abb. 2.7: Simulierte mittlere Oberflächentemperatur für eine nach Süd-West (45°) bzw. Nord-Ost (225°) ausgerichtete „glatte“ oder „Stufen“-Fassade (Günther, 2012).

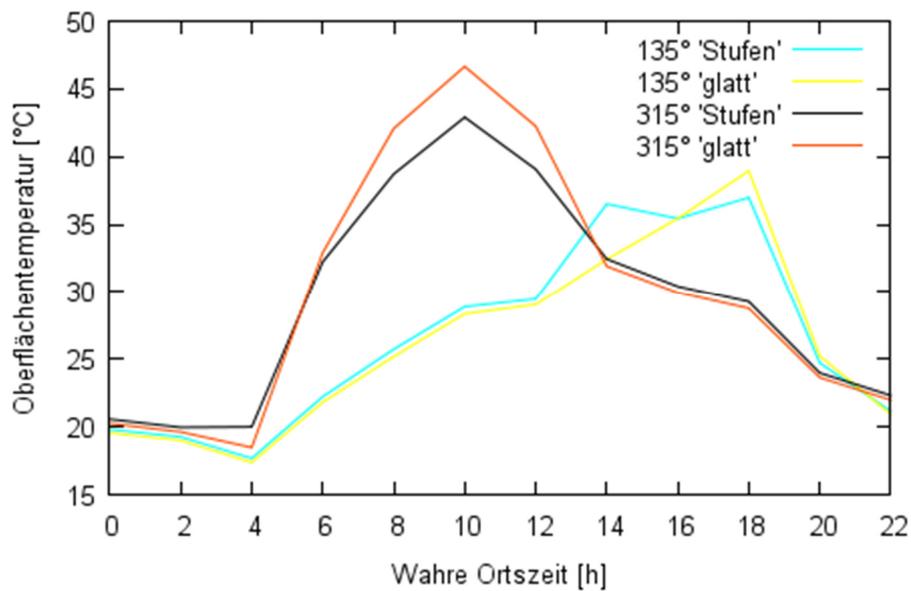


Abb. 2.6: Simulierte mittlere Oberflächentemperatur für eine nach Nord-West (135°) bzw. Süd-Ost (315°) ausgerichtete „glatte“ oder „Stufen“-Fassade (Günther, 2012).

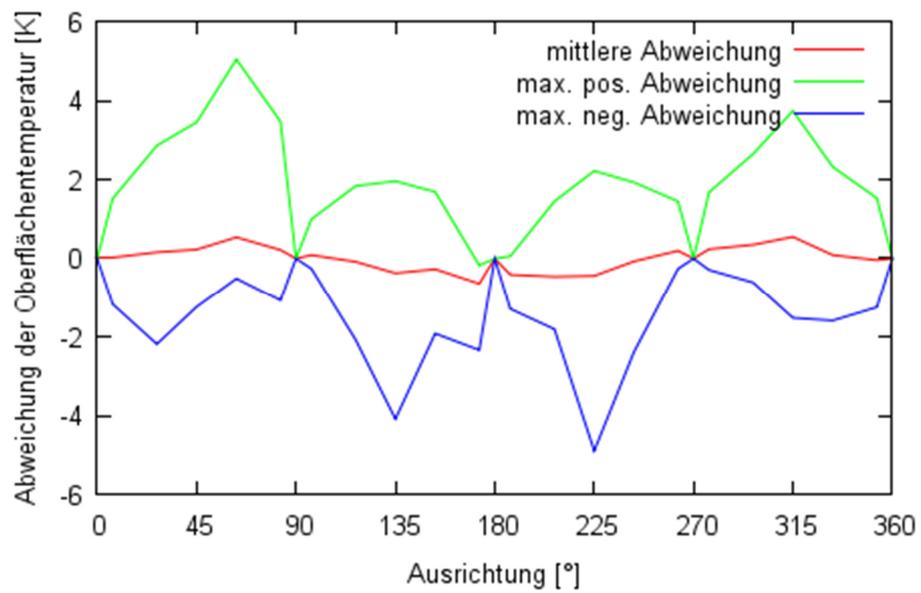


Abb. 2.8: Durchschnittliche, maximale positive und negative Abweichung der über die Fassade gemittelten Oberflächentemperatur der „glatten“ von der „Stufen“-Fassade für unterschiedliche Ausrichtungen (Günther, 2012).

2.3 Das Bodenmodell

Im Bodenmodell wird zum einen die Wärme- und Temperaturleitung durch eine beliebige Anzahl von Boden-, Dach- und Wandschichten mit und ohne Substrat berechnet. Zum anderen werden die Änderungen des Bodenwassergehalts auf Grund von Niederschlag und Transpiration von Wasser durch Pflanzen bestimmt, das diese aus unterschiedlich tiefen Schichten entnehmen.

$$\frac{\partial T_B}{\partial t} = v_B \frac{\partial^2 T_B}{\partial z_B^2}, \quad (2.49)$$

(Groß, 2012) mit der zeitlich konstanten, nicht vom Bodenwassergehalt abhängigen, Temperaturleitfähigkeit v_B .

Das Bodenfeuchtemodell ist implementiert nach Chen und Dudhia (2001) und wird dort im Detail beschrieben. Es berechnet die Änderung des volumetrischen Bodenwassergehalts Θ :

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right) + \frac{\partial K}{\partial z} + F_\Theta, \quad (2.50)$$

mit der Bodenwasserleitfähigkeit D und der hydraulischen Leitfähigkeit K , die beide von Θ abhängen, und den Quellen und Senken F_Θ (Niederschlag und Verdunstung).

Wie in Günther (2014) gezeigt, hat ein unterschiedlicher Bodenwassergehalt einen starken Einfluss auf die Verdunstung und damit auf die Oberflächentemperatur und Lufttemperaturen die in ASMUS_Green simuliert werden. Die Effekte variieren je nachdem auf welche Schichttiefen die Vegetation auf Wasser zur Verdunstung zugreifen kann. Die Wasserverfügbarkeit für Bäume unterliegt somit im Allgemeinen weniger Schwankungen als der für niedrigere Vegetation.

In Abb. 2.9 ist exemplarisch der simulierte Verlauf des Bodenwassergehalts für einen sandigen Lehmboden einer extensiven Dachbegrünung, sowie einen Sandboden, der mit Gras bewachsen ist, gezeigt. Auf Grund der unterschiedlichen Feldkapazität der beiden Böden, können sie langfristig verschieden große Mengen an Wasser speichern. Kurzfristig kann der Bodenwassergehalt in der oberflächennahen Schicht nach einem Niederschlag auch höher als die Feldkapazität sein, da es etwas dauert bis das Wasser in den tieferen Schichten weiter nach unten gesickert ist. Die Begrünung entzieht dem Boden Wasser durch Evapotranspiration. Dies ist abhängig von den meteorologischen

Randbedingungen (s. Abb. 4.3), sowie den Vegetationseigenschaften. Hier verdunstet die extensive Dachbegrünung pro Tag weniger Wasser als die Rasenfläche auf Grund des kleineren Blattflächenindex. Der regelmäßige Niederschlag kann die Verluste an Bodenwasser in der obersten Bodenschicht bis zu der längeren Trockenperiode ab Anfang August immer wieder ausgleichen, ab dann reduziert sich der Bodenwassergehalt bis zum Welkepunkt und die Verdunstung des Rasens und der Dachbegrünung kommt zum Erliegen.

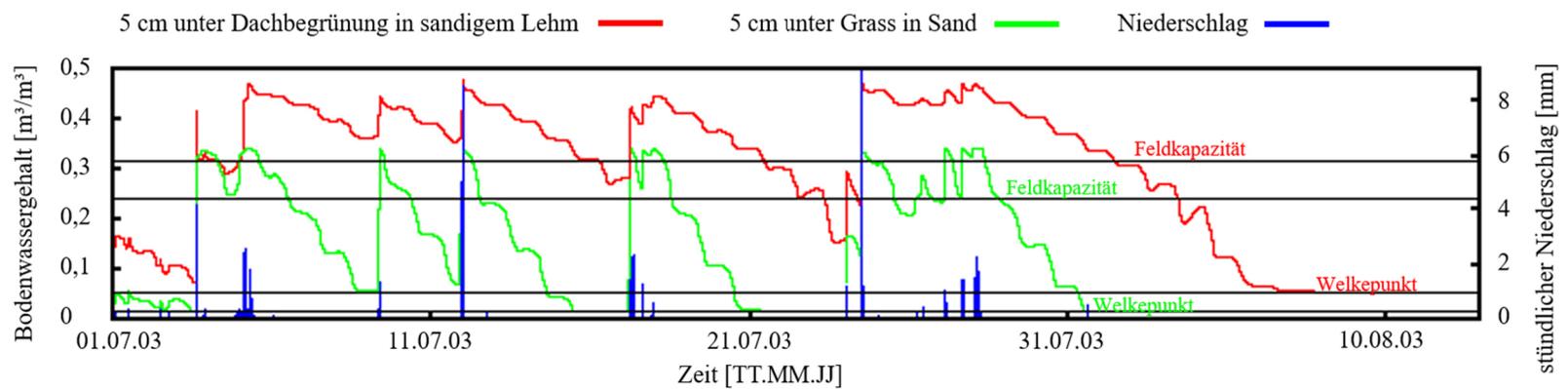


Abb. 2.9: Simulierter Verlauf des Bodenwassergehalts in zwei verschiedenen Bodenarten 5 cm unter Dachbegrünung beziehungsweise Rasen im Zeitraum 01.07.-15.08.2003. Zusätzlich ist der stündlich gemessene Niederschlag, sowie Feldkapazität und Welkepunkt der beiden Bodenarten angegeben (nach Günther, 2014).

2.4 Das Innenraummodell

Das Innenraummodell ASMUS_Inside ist eine Abwandlung von ASMUS_Green. Es ist um einige Eigenschaften erweitert und unterliegt ein paar Einschränkungen, die in den folgenden Abschnitten erläutert werden. Ansonsten ist es identisch mit ASMUS_Green und arbeitet lediglich mit einer deutlich feineren Gitterauflösung von 0,5 m in allen drei Raumrichtungen.

2.4.1 Fenster

Fensterflächen sind ein elementarer Bestandteil jedes Wohngebäudes. Ihre Größe und Anordnung hat einen großen Einfluss auf den Wärmeeintrag in den Innenraum (s. Abschnitt 4.5). Für die Innenraumsimulationen werden daher anders als in ASMUS_Green Fenster berücksichtigt. Für Fenster wird wie für Wandflächen die Energiebilanz der Oberfläche gelöst und der Wärmetransport durch die einzelnen Fensterschichten simuliert. Die Fensterschichten haben dabei nicht die physikalischen Eigenschaften von realen Mehrfachverglasungen mit/ ohne Edelgas in den Zwischenräumen, sondern alle Schichten haben die gleiche Wärmeleitfähigkeit und Temperaturleitfähigkeit, die so gewählt ist, dass das Fenster insgesamt den angestrebten Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) erreicht.

Die Fensteroberflächen sind für langwellige Strahlung nicht durchlässig. Die kurzwellige Einstrahlung wird entsprechend des Sonneneintragskennwerts g durch die Fensterschichten transmittiert. Der Sonneneintragskennwert ist dabei der Gesamtenergie-durchlassgrad des Glases für senkrechten Strahlungseinfall.

2.4.2 Innenraum

Wärme wird durch Fassaden, Dächer und Wände relativ langsam geleitet im Vergleich zu sich bewegender Luft in der freien Atmosphäre. Ziel ist es daher möglichst lange Zeitreihen des Innenraumklimas zu simulieren. Auf Grund der relativ kleinen Gitterweite

von 0,5 m ist die Berechnung der Lufttemperaturen im Innenraum besonders rechenzeitintensiv.

Es wird daher, um Rechenzeit einzusparen, angenommen, dass die Lufttemperatur im Innenraum je Raum homogen ist. Die Lufttemperatur wird je Raum nach jedem Zeitschritt gemittelt und wird nur an den Innenoberflächen direkt beeinflusst. Es werden außerdem keine Windgeschwindigkeiten und keine Wärmeübergangswiderstände im Innenraum berechnet. Für die Innenoberflächen von Wänden, Decken, Böden und Fenstern wird ein konstanter Widerstand für Wärme R_{si} angenommen (DIN EN ISO 6946:2018-03, 2018). Dieser ist abhängig von der Ausrichtung der Oberfläche (s. Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1: Wärmeübergangswiderstände [m^2K/W] (nach DIN EN ISO 6946:2018-03, 2018)

	Richtung des Wärmestroms		
Wärmeübergangswiderstand	Aufwärts	Horizontal	Abwärts
R_{si}	0,10	0,13	0,17

2.4.3 Heizen und Kühlen

Das aktive Heizen und Kühlen des Innenraums ist für Bewohner eine wichtige Maßnahme zur Beeinflussung der Innenraumtemperatur. Es wird hier lediglich idealisiert simuliert. Für jeden Raum wird individuell berechnet wieviel Energie Q_{Anth} der gemittelten Lufttemperatur \bar{T}_{Raum} hinzugefügt bzw. entzogen werden muss, um die Zieltemperatur zu erreichen:

$$Q_{Anth} = (T_{Ziel} - \bar{T}_{Raum}) V_{Raum} c_{p,Luft} \rho_{Luft}, \quad (2.51)$$

mit $c_{p,Luft} = 1005 \text{ kJ}/(\text{kg K})$, $\rho_{Luft} = 1,293 \text{ kg}/\text{m}^3$.

Die Lufttemperatur wird auf die Zieltemperatur angehoben/ abgesenkt und die hinzugefügte/ entzogene Energie aufsummiert. Während das simulierte Heizen und die benötigte Energie dazu relativ gut mit der Verwendung eines elektrischen Heizlüfters vergleichbar ist, ist die Energiereduktion der Raumluft beim simulierten Kühlen nicht direkt mit einer Klimaanlage vergleichbar. Klimaanlagen transportieren Wärme mittels

eines Kältemittels unter Verwendung eines Kompressors. Dabei ist die Antriebsleistung nicht identisch mit der sich ergebenden Kühlleistung, sondern hängt von der Leistungszahl ab, die bei modernen technischen Anlagen heutzutage bei ca. 4 liegt. Die hier berechnete nötige Kühlleistung muss somit erst umgerechnet werden, um den elektrischen Verbrauch der Klimaanlage zu erhalten.

2.4.4 Ventilation

Die Ventilation eines Raumes, zum Beispiel durch Öffnen eines Fensters ist eine weitere wichtige Maßnahme für Bewohner zur Änderung der Innenraumtemperatur. Im Modell wird über die Simulation der Ventilation nicht nur das Öffnen eines Fensters, sondern auch Undichtigkeiten an Fenstern oder Wänden berücksichtigt. Dazu wird für die Dauer der Lüftung ein konstanter Luftwechsel an allen Fensterflächen und Außenfassadengitterpunkten simuliert. Dabei wird die Lufttemperatur direkt angrenzend an eine Außenfassade auf beiden Seiten gemäß der vorgegebenen Luftwechselrate prozentual in regelmäßigen Intervallen mit der anderen Seite gewichtet. Die Windgeschwindigkeit vor der Fassade, sowie die Lufttemperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenraum haben keinen direkten Effekt auf die Luftwechselrate und könnten höchstens parametrisiert vorgegeben werden.

2.4.5 Modellkopplung ASMUS_Green-ASMUS_Inside

Das mikroskalige Klima in einem Stadtquartier hat einen direkten Einfluss auf das Innenraumklima. Bäume und Gebäude in der Umgebung verändern das Windfeld und werfen Schatten. Oberflächen heizen sich unterschiedlich stark auf und geben Wärme an die Luft ab. Die Umgebung wird in ASMUS_Inside über zwei verschiedene Methoden bei den Simulationen berücksichtigt.

ASMUS_Inside kann entweder direkt durch Vorgabe eines 1D-Profiles von Wind-, Temperatur und Feuchte im Zusammenspiel mit Wolkenbedeckungsgrad- und

Niederschlagszeitreihen angetrieben werden. In dem Fall wird auf Grund der kleinen Gitterweite von 0,5 m um das Gebäude herum nur ein relativ kleiner Ausschnitt eines Stadtquartiers simuliert.

Anderenfalls kann ASMUS_Inside mit Ergebnissen von ASMUS_Green angetrieben werden. Dazu werden die Simulationsergebnisse des gröberen Modells für ein bestimmtes Gebäude auf die feinere ASMUS_Inside Gitterauflösung linear interpoliert. Im Einzelnen ist dies die lang- und kurzweilige Strahlung, sowie optional der Verdunstungswärmestrom und die Bodenfeuchte des Dachsubstrats auf der Gebäudehülle und die Windgeschwindigkeit und die Lufttemperatur direkt angrenzend an die Gebäudehülle. Die Modellkopplung wird nur in eine Richtung durchgeführt, die Innenraumsimulationen haben daher keine Auswirkungen auf das mikroskalige Stadtklima und vor allem auf die Außentemperatur.

3 Modelltest

Um die Ergebnisse des Innenraummodells zu überprüfen, wurden vergleichende Simulationen zu Messergebnissen aus einem Laborraumprüfstand durchgeführt. Das Experiment an einem in realer Größe nachgebautem einzeltem Wohnraum wurde von Eiband (2004) detailliert beschrieben. Die künstliche solare Einstrahlung, das Außenklima und die Raumlüftung wurden für unterschiedliche Wintertage explizit vorgegeben und die Raum- und Wandtemperaturen, sowie die nötige Heizleistung, um eine Mindesttemperatur von 20 °C zu halten, gemessen.

3.1 Simulationssetup und Setup der Labormessungen

Im Folgenden ist das Simulationssetup beschrieben, dass sich soweit wie möglich nach dem Aufbau der Labormessungen richtet, soweit er bekannt ist und anderenfalls sinnvoll ergänzt wurde. Die größten Unterschiede beruhen vor allem auf der leicht unterschiedlichen Raum- und Fensterdimensionierung, die der gewählten Gitterweite geschuldet ist (s. Abb. 3.1 u. Tabelle 3.1). Der Aufbau der Fassade, Innenwände und deren Isolationseigenschaften sind in aufgelistet. Für die Simulationen wurde ein Gebäude definiert, in das der Referenzraum in der mittleren Etage in der Mitte der südlichen Fassade eingebettet ist (s. Abb. 3.2). Dadurch, dass die Innenraumtemperaturen nahezu konstant gehalten werden, beeinflussen sich die Räume gegenseitig nur unwesentlich und der Wärmetransport durch die Außenfassade, sowie die Einstrahlung durch die Fenster dominieren den Einfluss auf das Innenraumklima.

Die Innenraumtemperaturen werden in den benachbarten Räumen genauso simuliert wie für den Referenzraum. Im Laborprüfstand von Eiband ist der Referenzraum mittels 40 cm dicker Polystyrol-Isolierung von den Temperaturen im übrigen Labor abgeschottet. In beiden Fällen werden die Innenraumtemperaturen hauptsächlich durch die Fassade, solare Einstrahlung und Raumlüftung bestimmt. Die Wärmeströme durch die Gebäudeinnenwände sind im Verhältnis dazu sehr gering.

Im Laborprüfstand werden die Außenraumtemperaturen vor der Fassade innerhalb einer ventilerten Glaskuppel mit zwei Schichten vorgegeben und die solare Einstrahlung wird mittels Scheinwerfer simuliert. Für die Simulationen wird das Außenklima entsprechend der Daten aus dem Labor vorgegeben. In allen Versuchen wird dabei eine Windgeschwindigkeit von 1,5 m/s in 2 m Abstand zur Fassade vorgegeben, die von der Größenordnung her der Ventilation unter der Glaskuppel im Labor entspricht. Der Sonnenverlauf entspricht dem des 20. Februar für die geographische Breite von München, Deutschland.

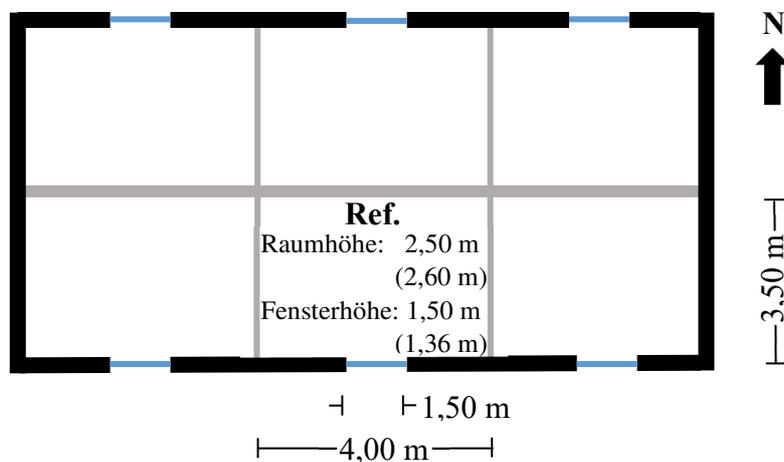


Abb. 3.1: Grundriss des simulierten 3-stöckigen Flachdachgebäudes. Der Referenzraum (Ref.) befindet sich mittig auf der Südseite im 1. Obergeschoss. Die simulierte Raumhöhe und Fensterhöhe unterscheiden sich etwas von der des Modellraums und sind in Klammern angegeben.

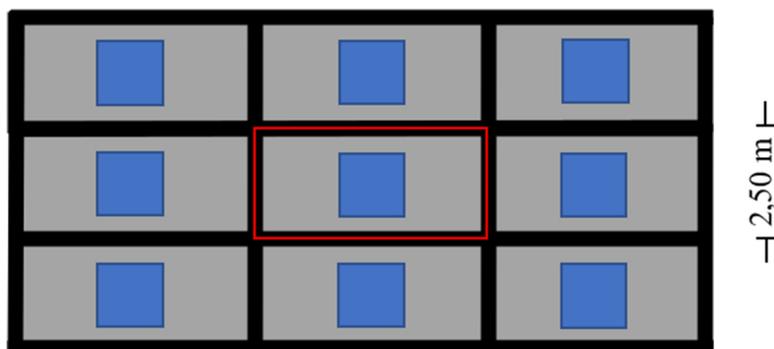


Abb. 3.2: Frontansicht des simulierten Gebäudes. Der Referenzraum (rot markiert) befindet sich in der mittleren Etage im 1. Obergeschoss. Jeder Raum besitzt ein Fenster (blaue Flächen), welches nach Süden oder Norden orientiert ist.

Im Labor wie in der Simulation wird eine Lüftungsrate des Referenzraums durch die Außenfassade von 0,5 1/h vorgegeben um Undichtigkeiten von Wänden und Fensterdichtungen sowie bautechnische Vorgaben zu berücksichtigen (Eiband, 2004).

Als Heizung wird im Labor ein elektrischer Heizlüfter verwendet, der stufenweise gesteuert wird, um eine Mindesttemperatur von 20 °C zu halten. Auch bei abgeschalteter Heizung sorgt ein Ventilator für eine homogene Lufttemperatur im Raum. In den Simulationen wird der Raumluft in jedem Zeitschritt die fehlende Energie hinzugefügt, um die Mindesttemperatur zu halten. Außerdem werden die Innenraumtemperaturen räumlich gemittelt (s. Abschnitt 2.4.2).

Tabelle 3.1: Simulationsparameter

Parameter	Wert
Gitterweite	0,5 m
Simulationsgebietsgröße	187 m ²
Albedo Fassade/ Dach	0,3
Albedo Fußboden	0,3
Albedo Innenwände / Decke	0,6
Transmissivität Fenster (g-value)	0,67

Tabelle 3.2: Materialkennwerte und Dämmeigenschaften der Wände und Fenster des Referenzraums wie sie im Laborexperiment und der Simulation angewendet wurden (nach Eiband, 2004)

Wandaufbau	Schichtdicke [cm]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m * K)]	Temperaturleitfähigkeit [m ² /s * 10 ⁻⁶]	U-Wert [W/(m ² * K)]
Fassade				0,44
Gips-Kalk-Putz	0,5	0,7	0,5	
Leicht-Hochlochziegel	36,5	0,18	0,2	
Dämmputz	1,5	0,22	0,3	
Edelputz	0,5	0,7	0,7	
Fenster				1,4
4 Idealisierte Fensterschichten	2,0	0,06	0,06	
Seitenwände				0,74
Gips-Kalk-Putz	0,5	0,7	0,5	
Leicht-Hochlochziegel 2	17,0	0,16	0,25	
Gips-Kalk-Putz	0,5	0,7	0,5	
Rückwand				0,56
Gips-Kalk-Putz	0,5	0,7	0,5	
Leicht-Hochlochziegel 2	24,0	0,16	0,25	
Gips-Kalk-Putz	0,5	0,7	0,5	
Decke/ Boden				0,46
Trockenestrich	2,5	0,29	2,4	
Polystyrol-Trittschalldämmung	7,0	0,04	0,9	
Stahlbeton	16,0	2,1	0,9	

3.2 Vergleichende Simulationen

Im Folgenden werden drei von vier der von Eiband (2004) veröffentlichten Labormessungen im Vergleich zu den Ergebnissen der Simulationen dargestellt (s. Tabelle 3.3). Ziel ist es die Ergebnisse der Simulation mit den Labormessungen bei unterschiedlichen Randbedingungen zu vergleichen, um damit allgemein auf die Fähigkeit des Innenraummodells zu schließen die Innenraumtemperatur und Heiz-/Kühlleistung simulieren zu können. Zum einen werden Messung und Modell bei konstanten Außentemperaturen über einen längeren Zeitraum (Versuch 0) und bei einem natürlichen winterlichen Tagesgang der Temperatur ohne (Versuch 1) und mit solarer Einstrahlung (Versuch 2) verglichen.

Tabelle 3.3: Überblick über die Simulationsszenarien (nach Eiband, 2004)

Parameter	Versuch 0	Versuch 1	Versuch 2
Außentemperatur	10 °C	Tagesgang „Wintertag sonnig“ Tagesmitteltemperatur -0,53 °C	
Sonneneinstrahlung	keine		Tagesgang „Wintertag sonnig“
Außenluftwechsel	0,5 h ⁻¹		
Raumheizung	keine	20 °C	

3.2.1 Versuch 0 – Auskühltest

In Versuch 0 wird der Referenzraum / das simulierte Gebäude auf einen stationären Zustand mit einer Innenraumtemperatur von 25 °C geheizt und im Anschluss die Heizung abgeschaltet und der Verlauf der Auskühlung des Gebäudes über mehrere Tage verglichen. Die Außentemperatur beträgt dabei konstant 10 °C. Die solare Einstrahlung wird hier nicht simuliert. Innerhalb der ersten Stunde nach Abschalten der Heizung sinkt die Temperatur bei der Messung als auch bei der Simulation relativ schnell um 1,2 K bzw. 1,4 K (s. Abb. 3.3). Dies liegt daran, dass die Wände eine etwas niedrigere Temperatur als die Luft und eine höhere Wärmekapazität haben. Danach reduziert sich die Temperatur mit gut 2 K in den ersten knapp 24 Stunden und 1,5 K am 2. Tag nach

Abschaltung der Heizung. Nach 48 Stunden liegt die Temperaturdifferenz zwischen Messung und Simulation bei 0,2 K. Es fällt auf, dass innerhalb der ersten Stunde die Temperatur bei der Simulation schneller sinkt, danach hingegen die der Messung. Ursachen können die unterschiedlichen Raum und Fenstergrößen zwischen Laborraum und Simulation sein, die sich auf Grund der Gitterweite unterscheiden, sowie die unterschiedlich starke Ventilation vor der Fassade und im Innenraum die sich auf die Wärmeübergangswiderstände auswirken und von den konstanten Werten die in der Simulation verwendet werden abweichen.

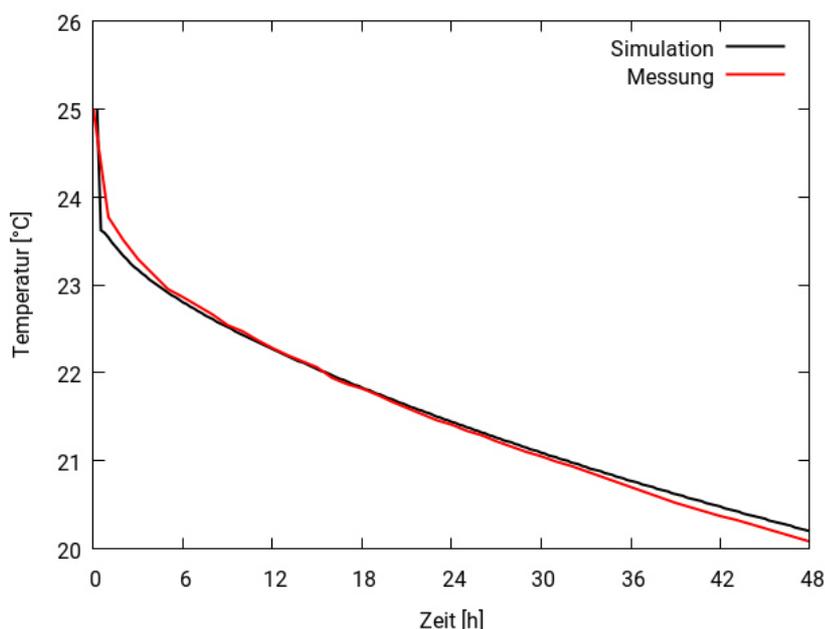


Abb. 3.3: Versuch 0 - Temperaturverlauf im Modellraum und im simulierten Referenzraum nach Abschaltung der Heizung und bei konstanter Außentemperatur (10 °C) und konstantem Außenluftwechsel (0,5 1/h). Solare Einstrahlung auf das Fenster wurde in diesem Fall weder simuliert noch im Modellprüfstand künstlich erzeugt.

3.2.2 Versuch 1 – Ohne solare Einstrahlung

Versuch 1 und 2 werden mit einem Temperaturtagesgang für einen sonnigen Wintertag angetrieben. Die Außentemperatur liegt dabei zwischen -5 °C und +5 °C und die Raumheizung ist aktiv. Versuch 1 wird im Gegensatz zu Versuch 2 ohne solare Einstrahlung auf das Fenster durchgeführt.

Die Labormessung wie auch die Simulation ging über mehrere Tage bis sich die Temperaturen der umschließenden Wände auf einen quasi stationären Zustand eingependelt hatten. Die Heizleistung im Innenraum hat einen leichten Tagesgang auf Grund dem erzwungenen Luftaustausch mit der Außenluft und der relativ schnellen Temperaturleitung durch die Fensterfläche.

Die Heizung muss in Versuch 1 kontinuierlich mit einer Leistung im Mittel von 350 W bei der Simulation bzw. 320 W im Labor arbeiten um die Raumtemperatur auf mindestens 20 ° C zu halten (s. Abb. 3.4). Die Heizleistung in der Simulation ist somit ca. 10 % größer als in der Messung. Ursache für die Abweichungen sind vermutlich ebenso die Raumdimensionierung und die angenommenen Wärmeübergangswiderstände innen und außen (s. Abschnitt 3.2.1).

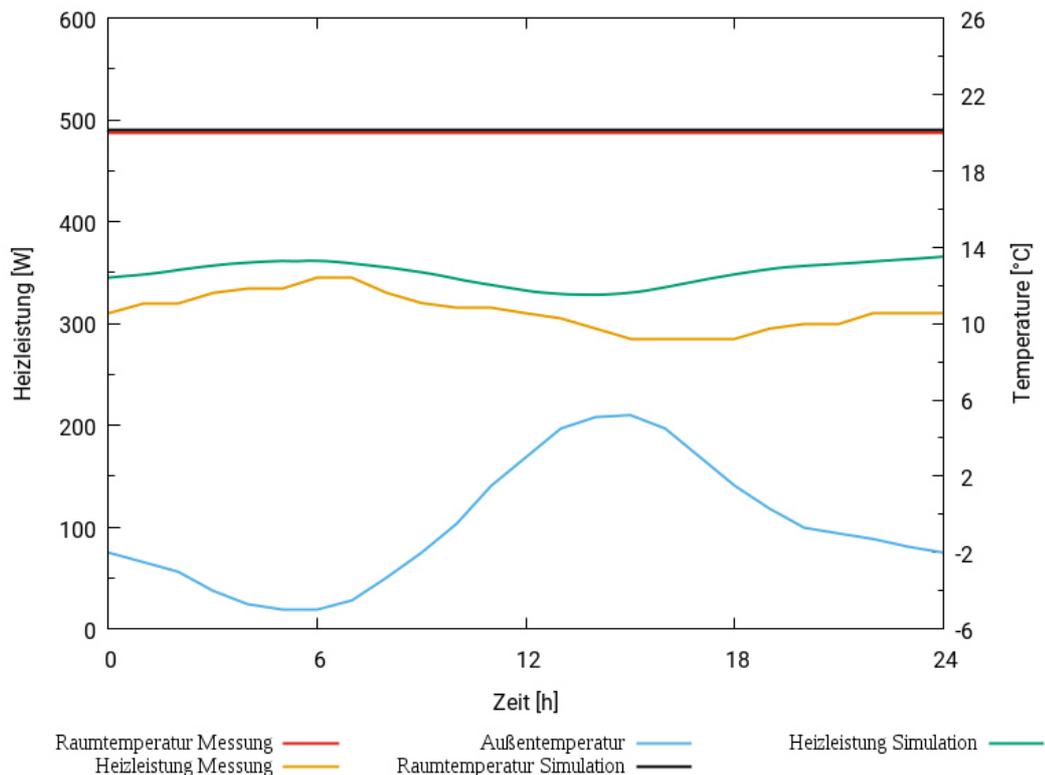


Abb. 3.4: Versuch 1 - Verlauf der Außentemperatur, sowie gemessener und simulierter Raumtemperatur und Heizleistung. Solare Einstrahlung auf das Fenster wurde in diesem Fall nicht simuliert oder im Modellprüfstand künstlich erzeugt.

3.2.3 Versuch 2 – Mit solarer Einstrahlung

Versuch 2 ist eine Erweiterung von Versuch 1 und wird mit solarer Einstrahlung durchgeführt. Im Tagesverlauf ist es unterschiedlich stark „bewölkt“ und am frühen Nachmittag wird die größte Bestrahlungsstärke mit knapp 500 W/m² erreicht. Bei diesem Versuch sieht man einen deutlich stärkeren Tagesgang als bei Versuch 1 (s. Abb. 3.5). Auf Grund der solaren Einstrahlung kann die Heizleistung am Vormittag reduziert werden und am Nachmittag sogar ganz abgeschaltet werden. Es kommt sogar zu einer Erwärmung der Innenraumlufttemperatur auf ca. 21 °C bei der Simulation und ca. 20,5 °C bei der Labormessung. Ursache für den Temperaturunterschied kann die unterschiedliche Fensterdimensionierung auf Grund der gewählten Gitterweite sein (Simulation: 2,25 m², Labor: 2,04 m²). Die Heizleistung ist im Mittel bei der Simulation 15 W oder ca. 7 % niedriger als bei der Labormessung.

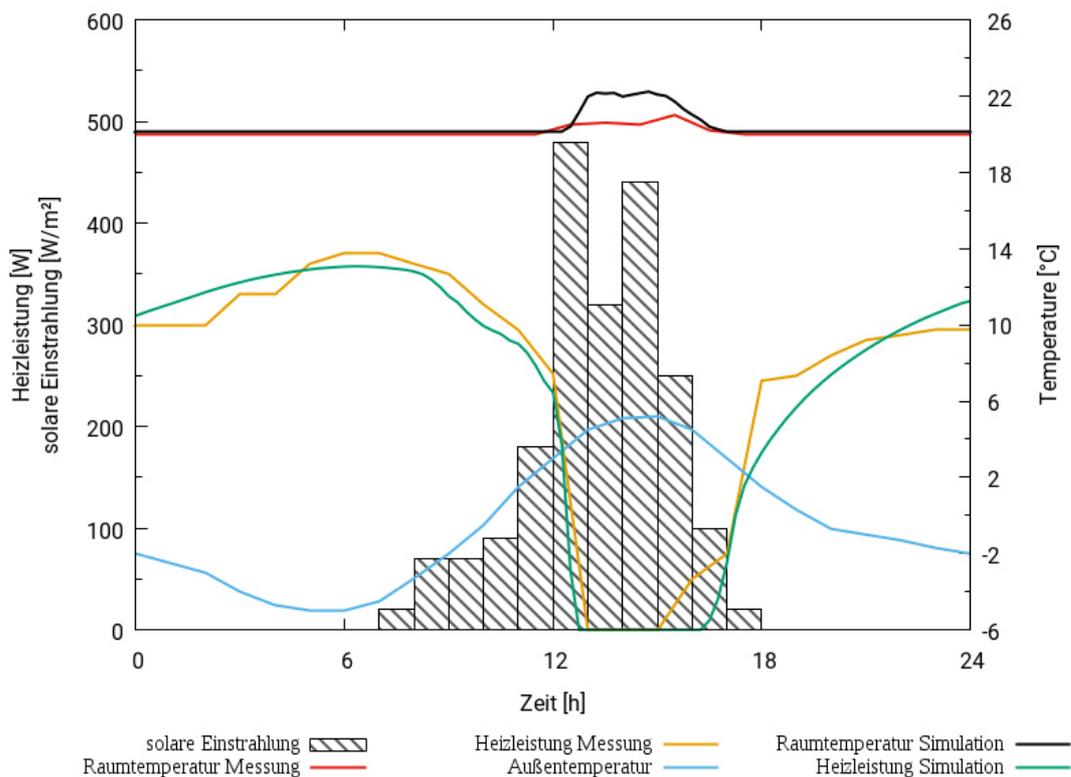


Abb. 3.5: Versuch 2 - Verlauf von Außentemperatur und solarer Einstrahlung, sowie gemessener und simulierter Raumtemperatur und Heizleistung.

4 Einfluss von Gebäudebegrünung auf das Innenraumklima

Im Rahmen des vom Umweltbundesamt (UBA) finanzierten Forschungsprojekts „Untersuchung der Potentiale für die Nutzung von Regenwasser zur Verdunstungskühlung in Städten“ (Sieker, et al., 2019) wurde der Einfluss von Begrünung in Städten und insbesondere an Gebäuden auf verschiedenen Ebenen untersucht: Gebäude, Quartier und Gesamtstadt. Von besonderem Interesse war, in wie weit diese Begrünungsmaßnahmen einen Beitrag für ein verbessertes Stadtklima und zur Hitzevorsorge leisten. Im Rahmen der „Fallstudie 1: Gebäudeebene“ wurde von den Projektpartnern eine Grundstruktur (Gebäudeauswahl, Auswahl der Begrünungsszenarien, Simulationszeitraum) für die Untersuchung entwickelt. In dem Forschungsprojekt wurde das Innenraummodell ASMUS_Inside weiterentwickelt. Die Simulationsszenarien sollen den Einfluss verschiedener Gebäudebegrünung auf das Innenraumklima bei Verwendung realitätsnaher meteorologischer Randbedingungen zeigen.

4.1 Simulationssetup

Das Simulationssetup soll ein vereinfachtes idealisiertes Stadtquartier widerspiegeln innerhalb dessen an einem realitätsnahen Gebäude die Wirkung von Gebäudebegrünung und Bäumen auf das Innenraumklima untersucht wird. Das Stadtgebiet wurde mit einer Größe von 120 m x 120 m und einer Gitterauflösung von 4 m horizontal und 2 m vertikal mit ASMUS_Green simuliert (s. Abb. 4.1). Im Zentrum des Modellgebiets befindet sich ein freistehendes ca. 10 m hohes Flachdachgebäude. Mittels der meteorologischen Größen vor und an den Außenoberflächen des Gebäudes (Windgeschwindigkeit, Strahlung, Lufttemperatur, latenter Wärmestrom, Bodenwassergehalt des Substrats der Dachbegrünung und Fassadenbegrünung) wurde die Gebäude- und Innenraumsimulation mit ASMUS_Inside angetrieben (s. Abschnitt 2.4.5).

Das Gebäude hat drei Etagen und ist auf jeder Etage in drei Wohnungen mit je drei Räumen aufgeteilt (s. Abb. 4.2). Die Wohnungen sind mit jeweils ca. 100 m² ungefähr gleich groß und die Raumhöhe beträgt in den Wohnungen 2,5 m. Die Räume haben

unterschiedlich große Fenster und einen unterschiedlich großen Fassadenflächenanteil. Der Innenraum des Gebäudes wurde mit einer Auflösung von 0,5 m in alle drei Raumrichtungen simuliert. Wände, Decken und Fenster bestehen aus acht Schichten mit einer individuellen realistischen Dicke.

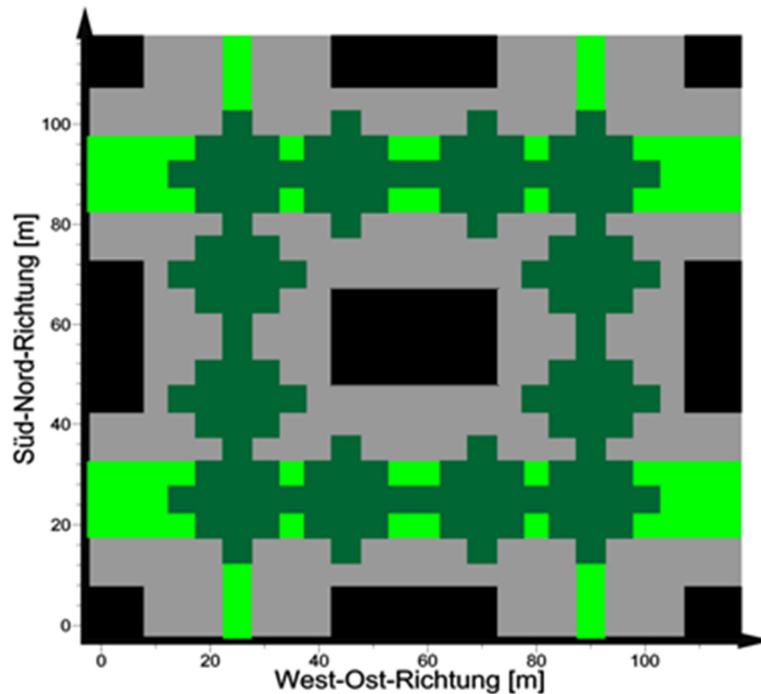


Abb. 4.1: Idealisiertes Stadtquartier das mit ASMUS_Green simuliert wurde; schwarz: Gebäude, grau: versiegelte Fläche, hellgrün: Rasen, dunkelgrün: optionale Bäume. Im Zentrum befindet sich das mit ASMUS_Inside simulierte Gebäude

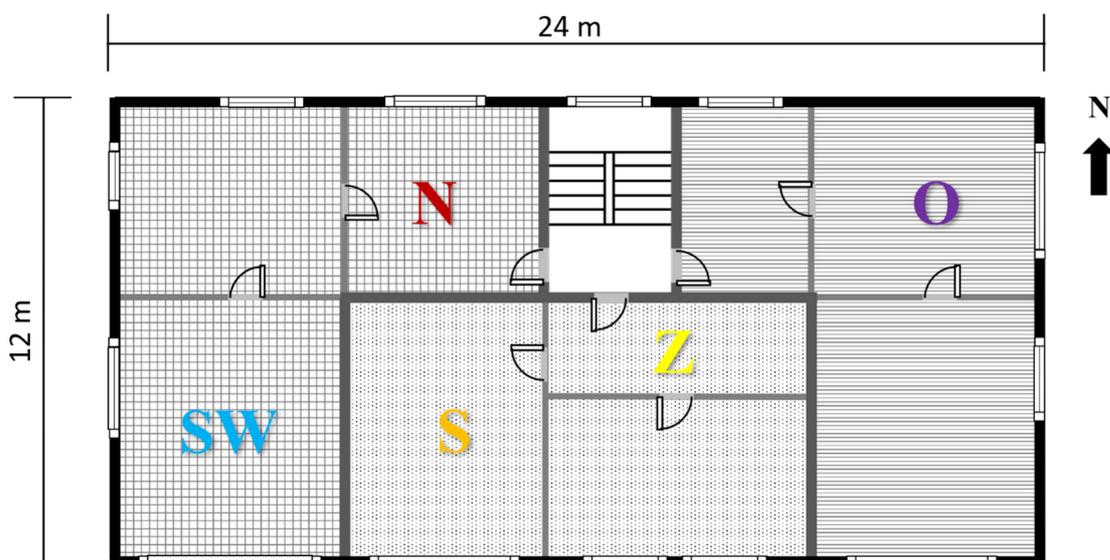


Abb. 4.2: Gebäudegrundriss mit drei idealisierten Wohnungen (unterschiedliche Rasterung); SW: Südwestraum, S: Südraum, N: Nordraum, O: Ostraum, Z: Zentrum.

Die Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) der Fassade und der Fenster richten sich nach den typischen Werten eines nicht nachträglich gedämmten Gebäudes mit Baujahr 1970 (U-Wert Außenwände/Dach $0,6 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, Fenster $2,8 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$; (Pfafferott & Becker, 2008). Der Aufbau der Außen-, Innenwände, Fenster, Geschossdecken, Bodenplatte und des Dachs orientiert sich an Werten von Eiband (2004) (s. Tabelle 3.2), dabei wurden die Schichtdicken entsprechend skaliert um die U-Werte zu erreichen. Die Räume sind mit nicht isolierten Innenwänden und verschlossenen Türen voneinander getrennt. Die Albedo der Oberflächen und die Transmissivität der Fenster deckt sich mit denen aus dem Modelltest (s. Tabelle 3.1).

Jeder Raum wurde über die Außenfassade belüftet ($1,75 \text{ m}^3(\text{m}^{-2}\text{h}^{-1})$), um Undichtigkeiten von Fenstern und bautechnische Vorgaben zu berücksichtigen. Die Luftwechselrate beträgt je nach Raumgröße 0,2 bis $0,6 \text{ h}^{-1}$ und lehnt sich an Eiband (2004) an.

Es wurden keine anthropogenen Wärmequellen im Innenraum sowie Fensterverschattung durch Jalousien oder ähnliches und das Öffnen von Fenstern zur Lüftung berücksichtigt. Zeitlich variable anthropogene Wärmequellen und von der Innenraumtemperatur abhängiges Lüften würden es schwierig machen die Effekte der Gebäudebegrünung genauer zu quantifizieren.

Das Gebäude wurde jeweils mit und ohne virtuelle Klimaanlage (Zieltemperatur: $20 \text{ }^\circ\text{C}$) simuliert. Klimaanlagen sind in Deutschland gerade in älteren Gebäuden nicht Standard, jedoch nimmt der Anteil klimatisierter Wohngebäude immer mehr zu (s. Kapitel 1). Es ist zu erwarten, dass sich bei den Simulationen ohne Klimatisierung eine höhere Mitteltemperatur in den einzelnen Räumen einstellen wird. Die Effekte der verschiedenen Begrünungsmaßnahmen werden sich daher anders auswirken als bei konstant niedrigerer Innenraumtemperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Wie in Abschnitt 2.4.3 beschrieben, entzieht die virtuelle Klimaanlage der Luft in jedem Raum individuell Energie bis die Zieltemperatur erreicht ist.

Die gekoppelten Simulationen wurden für 90 Tage durchgeführt und mit den Messdaten der DWD-Station Berlin-Tempelhof (s. Abb. 4.3) und den Simulationsergebnissen aus dem Modell STORM (Sieker, et al., 2019) für die Bodenfeuchte und die Verdunstung der Dachbegrünung vom 01.06.2003 bis 31.08.2003 angetrieben. Der Sommer 2003 in Berlin war von relativ hohen Temperaturen mit bis zu 34 °C, einer Mitteltemperatur von 20,6 °C, vielen Sonnenstunden und einer zweiwöchigen Trockenperiode im August geprägt. Diese Periode wurde ausgewählt, um die Effekte der Gebäudebegrünung über einen ausreichend langen Zeitraum bei hohen Temperaturen und zeitweisem Trockenstress mit geringer Wasserverfügbarkeit für die Pflanzen zu untersuchen.

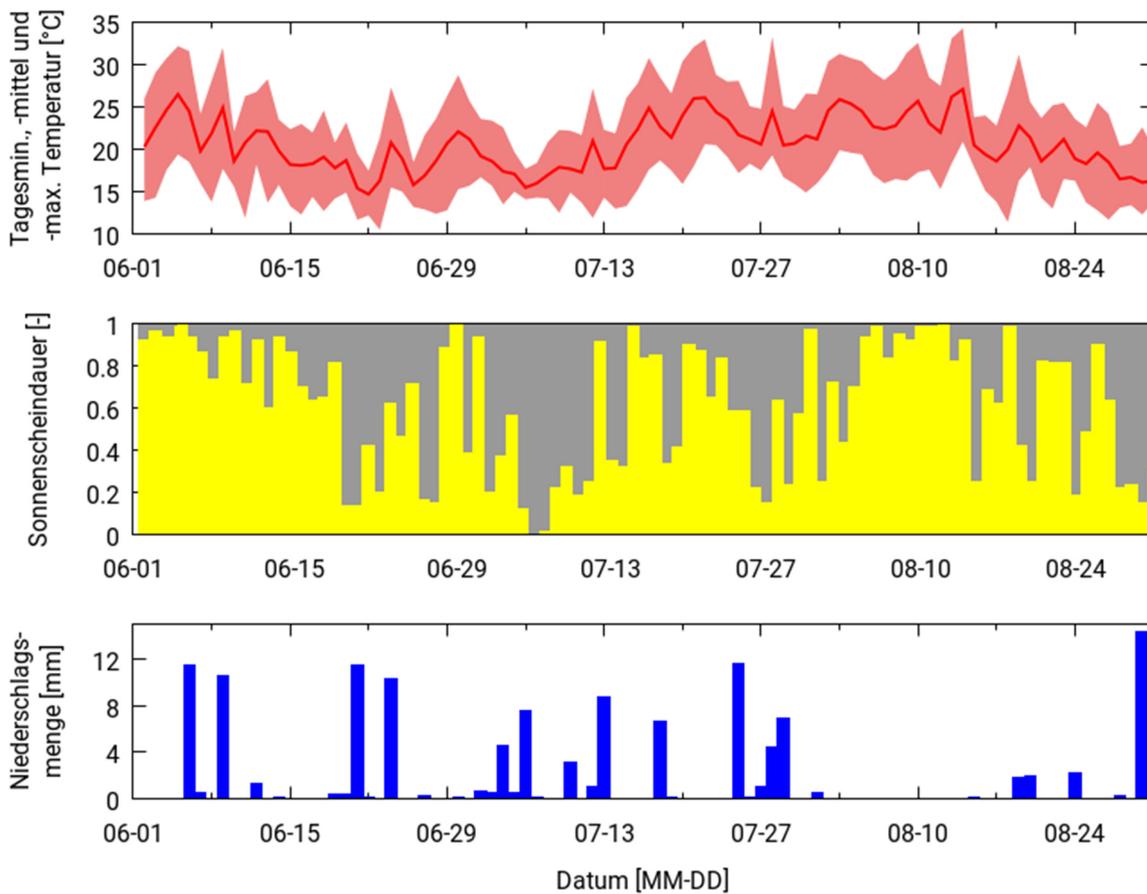


Abb. 4.3: Lufttemperatur, Sonnenscheindauer (normiert über die maximal astronomisch mögliche Sonnenscheindauer) und Niederschlagsmenge gemessen an der DWD Station Berlin-Tempelhof (01.06.2003-31.08.2003).

4.2 Verwendete Maßnahmen

Es wurden elf Gebäudeszenarien mit und ohne Begrünung und mit unterschiedlicher Wärmeisolation entwickelt, um die Effekte auf das Innenraumklima und den Kühlenergiebedarf zu vergleichen. Die charakteristischen Eigenschaften der verwendeten Maßnahmen sind in Tabelle 4.1 beschrieben. Die Gebäudebegrünungsmaßnahmen unterscheiden sich insbesondere durch eine etwaige Bewässerung / Wasseranstauung. Die drei Dachbegrünungsmaßnahmen haben unterschiedlich dicke Vegetations-, Substrat- und Dränschichten, die sich auf die Verdunstungsmengen der Pflanzen und die Wasserverfügbarkeit bei längerer Trockenheit auswirken. Ein schematischer Aufbau einer Dachbegrünung wurde in Abb. 4.4 dargestellt. Die nur wenige Millimeter dünne Filterschicht und die Trenn- und Schutzfliese wurden bei den thermischen Berechnungen vernachlässigt.

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der Maßnahmeneigenschaften

Maßnahme	Abkürzung	Beschreibung
Intensive Dachbegrünung	iDB	Vegetationshöhe 150 cm, Substratdicke 80 cm, Dränschicht 15 cm
Extensive Dachbegrünung	eDB	Vegetationshöhe 3 cm, Substratdicke 6 cm, Dränschicht 4 cm
Extensive Dachbegrünung mit Anstau	eDBmA	mit Retention, Ablaufdrossel und permanentem Anstau, Vegetationshöhe 3 cm, Substratdicke 6 cm, Dränschicht 8,5 cm
Fassadenbegrünung	FB	bodengebundener Efeu, gesamte Fassade ausgenommen Fensterflächen
Fassadenbegrünung mit Bewässerung	FBmB	bodengebundener Efeu, durchgehend bewässert, gesamte Fassade ausgenommen Fensterflächen
Bäume	B	Gebäude ist umgeben von 16 m hohen Bäumen, die die Fassade voll verschatten
Verbesserte Isolierung Dach Passivhausstandard	DP	anstatt U-Wert: $0,6 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ (70er Jahre) → U-Wert: $0,15 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ (Passivhaus) (Pfafferott & Becker, 2008)
Verbesserte Isolierung Fassade und Fenster Passivhausstandard	FP	anstatt U-Wert $0,6 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ (70er Jahre) → U-Wert: $0,15 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ (Passivhaus) (Pfafferott & Becker, 2008)

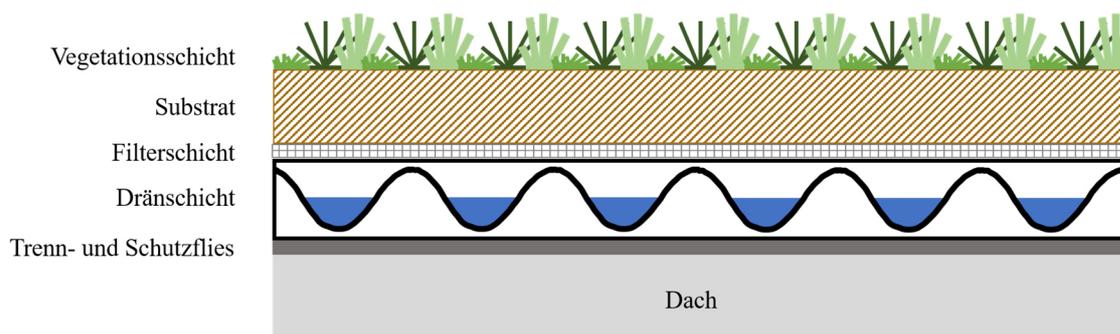


Abb. 4.4: Schematischer Aufbau einer Dachbegrünung. Je nach Art der Dachbegrünung können die einzelnen Schichten unterschiedlich dick sein: Vegetationshöhe 3 – 150 cm, Substratdicke 6 – 80 cm, Dränschicht 4 – 15 cm, Trenn- und Schutzfließ 1 – 4 mm

Die Simulationsszenarien (s. Tabelle 4.2) setzen sich als Kombination aus den verschiedenen Maßnahmen zusammen und basieren auf dem Basisgebäude (s. Abb. 4.2) im idealisierten Stadtquartier (s. Abb. 4.1). Der Aufbau der drei Dachbegrünungsformen (intensive Dachbegrünung, extensive Dachbegrünung mit und ohne Anstau von Wasser) wurde von SIEKER im Rahmen des UBA Projekts Verdunstungskühlung erarbeitet.

Die Bodenfeuchte des Dachsubstrats und die Verdunstung der Dachbegrünungsmaßnahmen wurden mit dem Modell STORM (Sieker, et al., 2019) berechnet und in ASMUS_Green verwendet. Der Wassergehalt der Böden, auf die die Fassadenbegrünung zugreift, wurde mit ASMUS_Green berechnet (s. Abschnitt 2.3).

Tabelle 4.2: Simulierte Szenarien

Abkürzung	Verbesserte Isolierung Dach	Verbesserte Isolierung Fassade und Fenster	Bäume	Dachbegrünung	Fassadenbegrünung
oB	-	-	-	-	-
oB_DP	X	-	-	-	-
oB_DP_FP	X	X	-	-	-
B	-	-	X	-	-
iDB	-	-	-	Intensiv	-
iDB_DP	X	-	-	Intensiv	-
eDB	-	-	-	Extensiv	-
eDBmA	-	-	-	Extensiv mit Anstau	-
FB	-	-	-	-	X
FBmB	-	-	-	-	X (mit Bewässerung)
iDB_FBmB_B	-	-	X	Intensiv	X (mit Bewässerung)

4.3 Verdunstungsmenge der Gebäudebegrünungsmaßnahmen

Die Verdunstungsmenge der Gebäudebegrünungsmaßnahmen ist einer der Hauptfaktoren für deren Maßnahmenwirkung. In diesen Simulationsszenarien hängt sie neben der Größe der Fläche insbesondere von der nutzbaren Feldkapazität des Substrats und von der Niederschlagsmenge ab beziehungsweise ob die Maßnahme bewässert wird oder einen zusätzlichen Wasserspeicher hat. Die Flächen mit Fassadenbegrünung sind mit gut 600 m² etwa doppelt so groß wie die der Dachbegrünungsmaßnahmen und tragen dadurch zu einer deutlich größeren täglichen Verdunstungsmenge bei, wenn genügend Wasser zur Verfügung steht (s. Abb. 4.5). Die zweiwöchige Trockenperiode Anfang bis Mitte August schlägt sich auch in einer verringerten Verdunstungsmenge bei den unbewässerten Maßnahmen nieder und fällt besonders bei der extensiven Dachbegrünung und unbewässerten Fassadenbegrünung auf. Die Verdunstungsmenge der Gebäudebegrünung des Simulationsszenarios mit der Maßnahmenkombination aus intensiver Dachbegrünung, Fassadenbegrünung mit Bewässerung und Bäumen ist auf Grund der großflächigen Verschattung der gesamten Fassade reduziert.

In der simulierten Periode fielen insgesamt 137 l/m². Dies entspricht knapp 40.000 l auf der Dachfläche. Im Mittel stehen somit knapp 450 l Niederschlagswasser pro Tag zur Evapotranspiration der Dachbegrünung zur Verfügung. Die bodengebundene Fassadenbegrünung greift zusätzlich auf das Niederschlagswasser der Dachfläche zu, sowie auf das verhältnismäßig große Speichervolumen des Bodens zu. Im Mittel verdunsten die Gebäudebegrünungsmaßnahmen mehr Wasser als durch den Niederschlag ersetzt wird. Zu Beginn des simulierten Zeitraums wird das Dach- und Bodensubstrats mit einem Bodenwassergehalt bei Feldkapazität initialisiert. Am Ende der Simulation liegt der Bodenwassergehalt nahe des Welkepunkts. Die Wasserbilanz der Gebäudebegrünungsflächen ist somit stark negativ.

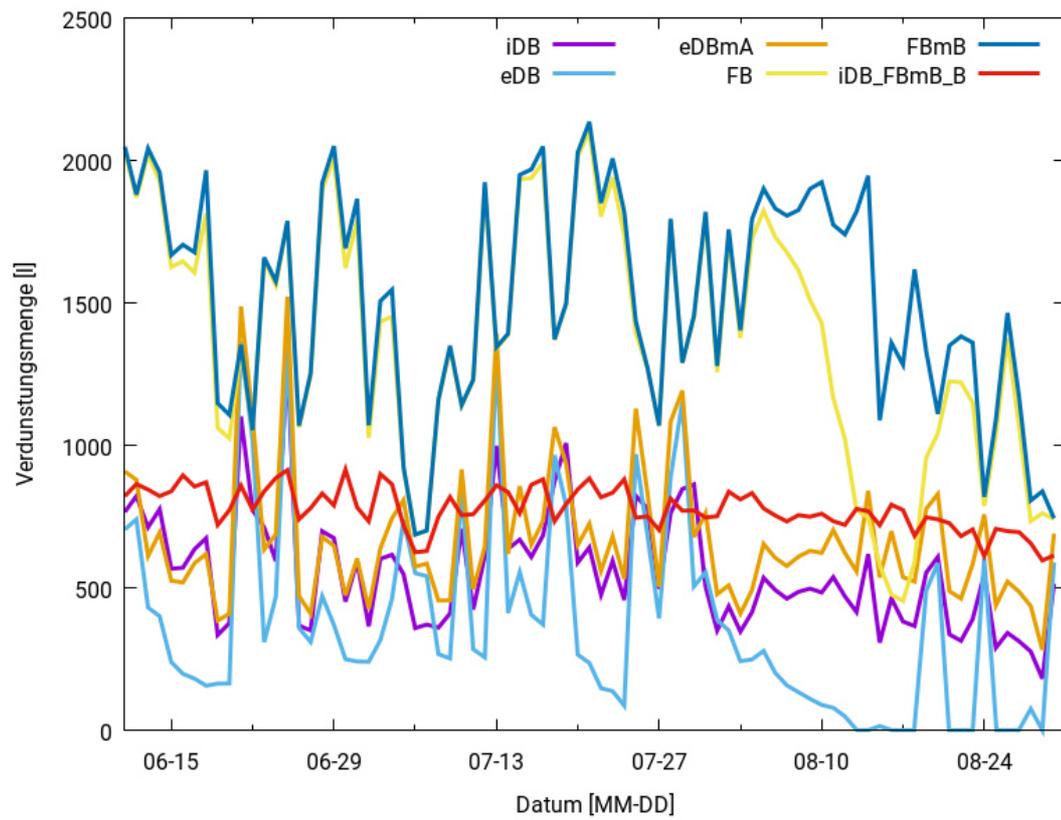


Abb. 4.5: Tägliche Verdunstungsmenge der verschiedenen begrünten Gebäudeszenarien integriert über die gesamte Fassade bzw. Dachfläche vom 10.06.-31.08.2003.

4.4 Wirkung der Begrünungsmaßnahmen auf den Außenraum

Die Begrünungsmaßnahmen wirken sich nicht nur auf das Gebäudeinnere aus indem die Oberflächentemperatur beeinflusst wird und die Bäume die Fassade und das Dach beschatten, sondern auch indem sie einen Einfluss auf die Lufttemperatur im Außenraum im idealisierten Stadtquartier haben. Dadurch wird der Wärmetransport durch den simulierten Luftaustausch zwischen Außen- und Innenraum modifiziert und trägt oft zur Kühlung des Innenraums bei.

Der Einfluss der Begrünungsmaßnahmen auf die Außentemperaturen ist abhängig von der Art der Maßnahme, ihrer Größe und Lage, sowie ihrer Effektivität im zeitlichen Verlauf (s. Abb. 4.6). Die Dachbegrünungsvarianten auf dem gut 10 m hohem simulierten Gebäude haben einen geringeren Einfluss auf die Lufttemperatur in 2 m Höhe als auf die auf Dachniveau. Der Effekt der Fassadenbegrünungen ist auf Grund der größeren Fläche stärker als der der Dachbegrünungen und auf Fußgängerniveau stärker ausgeprägt als auf Dachhöhe. Die mittleren Abkühlungseffekte sind in Tabelle 4.3 dargestellt. Während der gut einer Woche andauernden relativ warmen und sonnigen Trockenperiode Anfang bis Mitte August ist die Verdunstungskühlung der weniger gut mit Wasser versorgten Begrünungsmaßnahmen reduziert (eDB) oder im Verhältnis zu den bewässerten Varianten weniger stark (FB). Die Maßnahmen mit mächtigerer Speicherschicht (iDB), Anstau (eDBmA) oder Bewässerung (FBmB) zeigen eine ungefähr gleich große oder, auf Grund der im Mittel erhöhten Verdunstungsleistung, größere Kühlungswirkung während dieser Zeit.

Tabelle 4.3: Mittlere Effekte der Begrünungsmaßnahmen auf die Außentemperatur in 10 m Umkreis um das begrünte Gebäude in verschiedenen Höhen für den gesamten Simulationszeitraum und die Trockenperiode 7.8.-14.8.2003

Szenario	$\Delta\overline{T}_{2m}$	$\Delta\overline{T}_{11m}$	$\Delta\overline{T}_{2m}(7.8-14.8)$	$\Delta\overline{T}_{11m}(7.8-14.8)$
iDB	-0,10	-0,32	-0,07	-0,22
eDB	-0,09	-0,30	-0,01	-0,05
eDBmA	-0,16	-0,45	-0,11	-0,31
FB	-1,79	-1,02	-2,68	-1,20
FBmB	-1,91	-1,09	-2,74	-1,61
B	-0,43	-0,35	-0,49	-0,37
iDB_FBmB_B	-1,48	-1,10	-1,57	-1,12

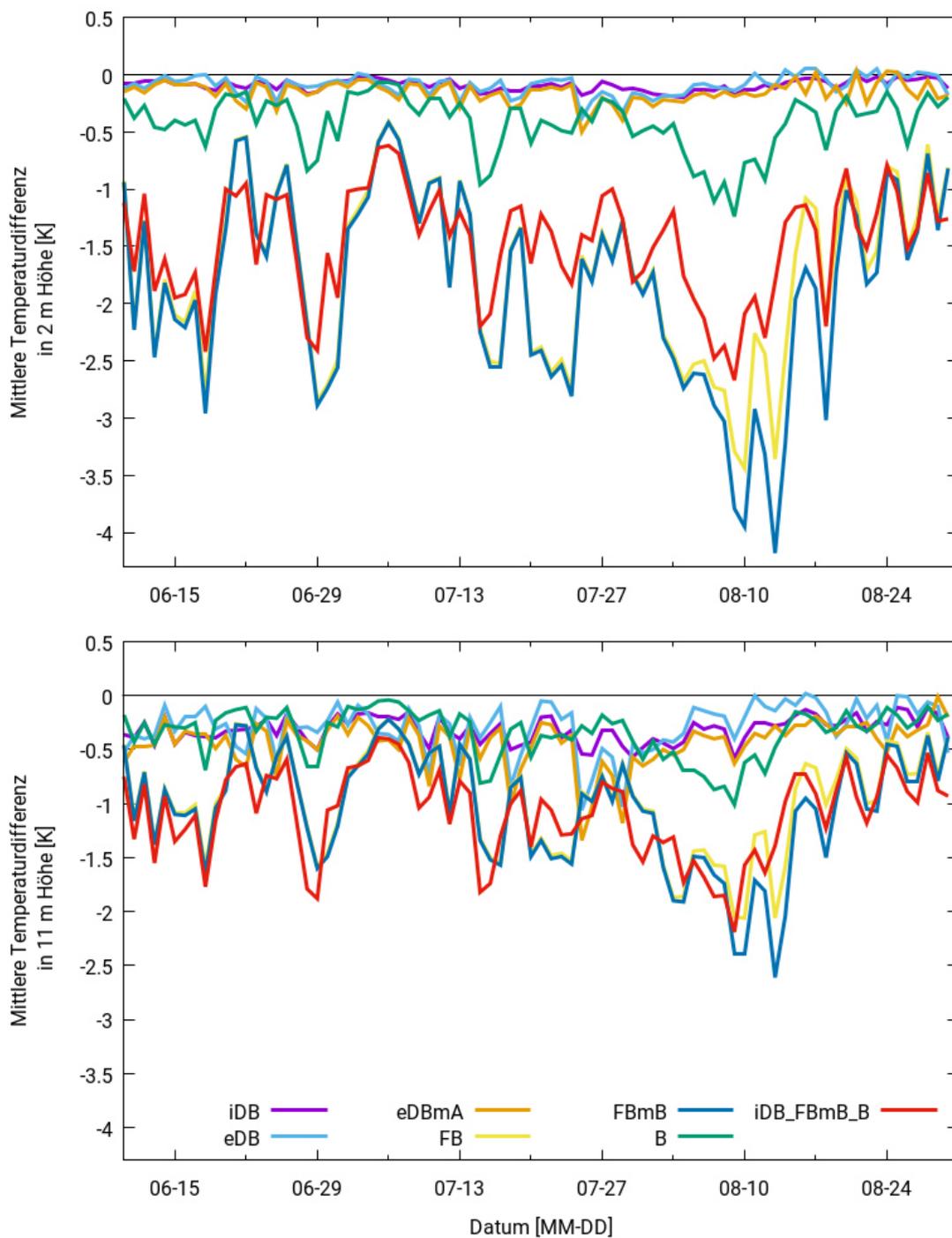


Abb. 4.6: Verlauf der Maßnahmenwirkung der verschiedenen begrünten Gebäudeszenarien im Außenraum als Differenz der Tagesmitteltemperaturen zum unbegrünten Szenario (oB) in unmittelbarer Nähe zum untersuchten Gebäude (10 m Umkreis) im Zentrum des idealisierten Quartiers vom 10.06.-31.08.2003. Oben: in 2 m Höhe; Unten: auf Dachniveau in 11 m Höhe

4.5 Ergebnisse

In den folgenden Unterkapiteln sind für ausgewählte Räume des Gebäudes die Simulationsergebnisse dargestellt. Die größten Unterschiede innerhalb eines Simulationsszenarios treten zwischen Räumen mit unterschiedlicher Fensterausrichtung auf und ob sie im Dachgeschoss oder in einem darunter liegenden Geschoss liegen. Daher werden insbesondere die unterschiedlichen Ergebnisse für den SW-Raum und den N-Raum im Dachgeschoss und im 1. Obergeschoss dargestellt.

4.5.1 Unbegrüntes Gebäude – Einfluss der Raumausrichtung und Etage auf das Innenraumklima

Der Tagesgang der Innenraumtemperatur ist maßgeblich abhängig von der Ausrichtung der Fenster (s. Abb. 4.7 und Abb. 4.8, für das unbegrünte Szenario oB (s. Tabelle 4.2)). Der nach Osten ausgerichtete Raum wird am frühesten von direkter Sonnenstrahlung bestrahlt, im Anschluss folgen der S-Raum und SW-Raum. Der N-Raum und Zentral-Raum erhalten keine direkte, sondern lediglich diffuse und von Oberflächen reflektierte Sonnenstrahlung. Ihr Tagesgang ist deutlich geringer und hängt mehr von der Flächengröße der Außenfassade ab. Auf Grund der direkten solaren Einstrahlung ist die Temperatur in den stark von der Sonne beschienenen, nicht verschatteten Räumen oftmals deutlich höher als die Außentemperatur. Im in den Abbildungen gezeigten Zeitraum Mitte Juli ist die Temperaturamplitude im SW-Raum mit 5-6 K deutlich größer als beispielsweise im N-Raum mit 0,5- 1 K.

Im Dachgeschoss ist durch die Decke ein Wärmeaustausch mit der Atmosphäre möglich, die eine deutlich größere Temperaturamplitude als der Innenraum im Dachgeschoss und 1. Obergeschoss hat, aber im Mittel kühler ist. Auf Grund dessen ist die Temperatur im mittleren Geschoss auch im längeren Verlauf (s. Abb. 4.9) im Tagesmittel höher als im Dachgeschoss für gleich ausgerichtete Räume. Bei wärmer werdender Witterung (Mitte Juli bis Mitte August) führt der größere Wärmeaustausch mit der Atmosphäre zu einem

höheren Tagesmaximum im Dachgeschoss und bei einer kühler werdenden Witterung (ab Ende August) zu kleineren Temperaturmaxima im Dachgeschoss als im 1. Obergeschoss.

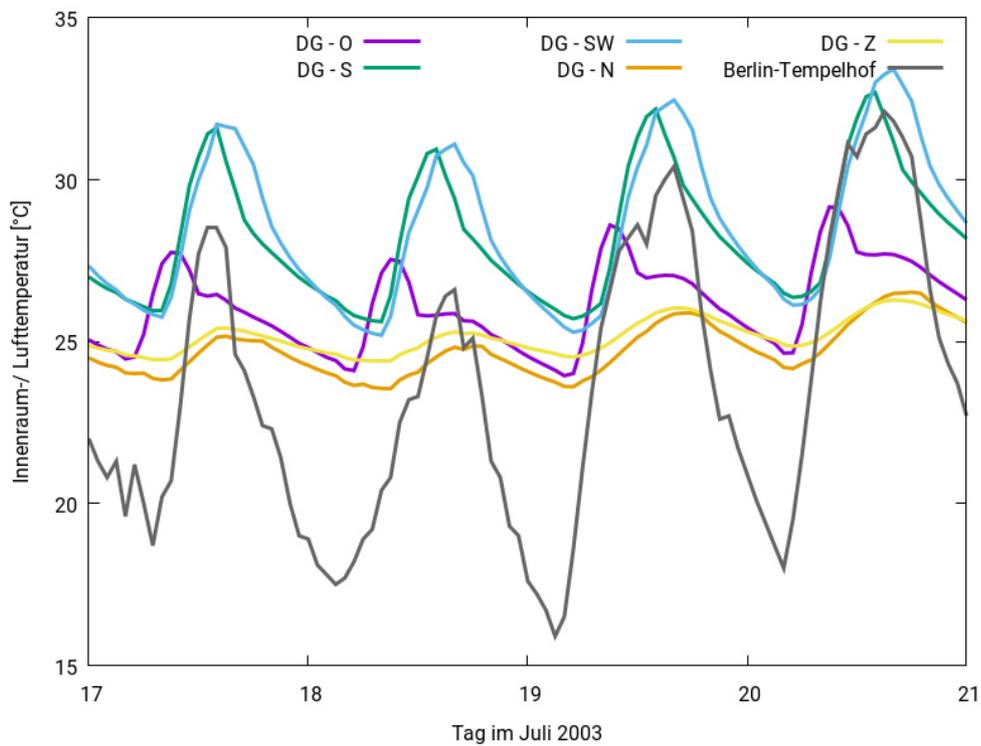


Abb. 4.7: Tagesgang der Innenraumtemperaturen im Dachgeschoss für unterschiedliche Räume und im Vergleich dazu Messdaten von der DWD-Station Berlin-Tempelhof vom 17.-21.07.2003.

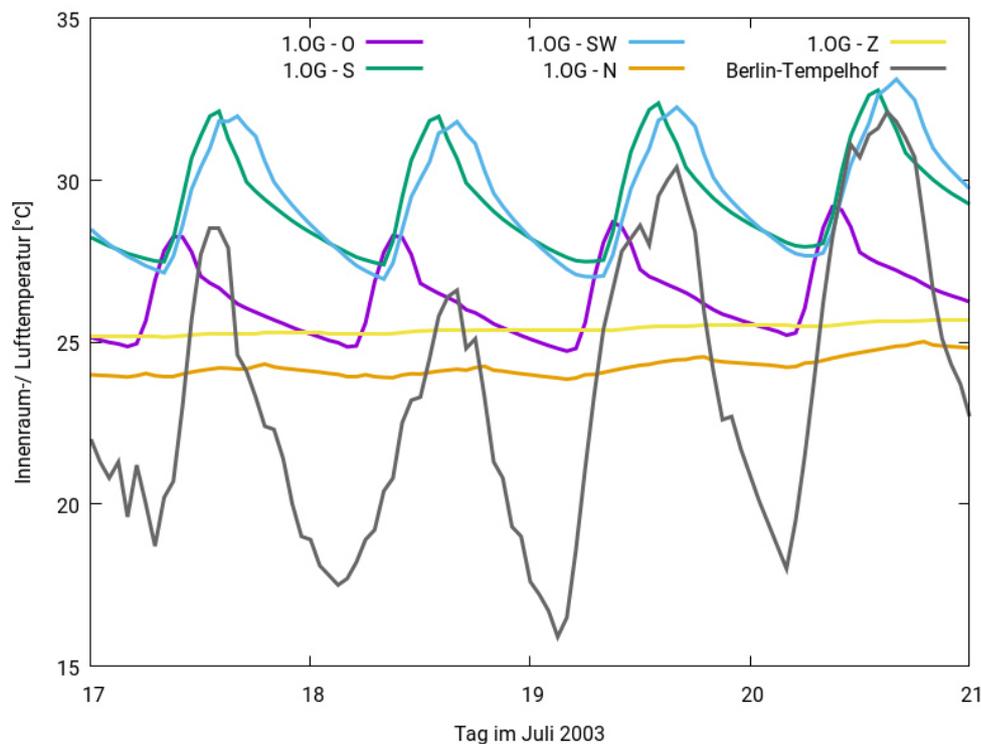


Abb. 4.8: Tagesgang der Innenraumtemperaturen im 1. Obergeschoss für unterschiedliche Räume und im Vergleich dazu Messdaten von der DWD-Station Berlin-Tempelhof vom 17.-21.07.2003.

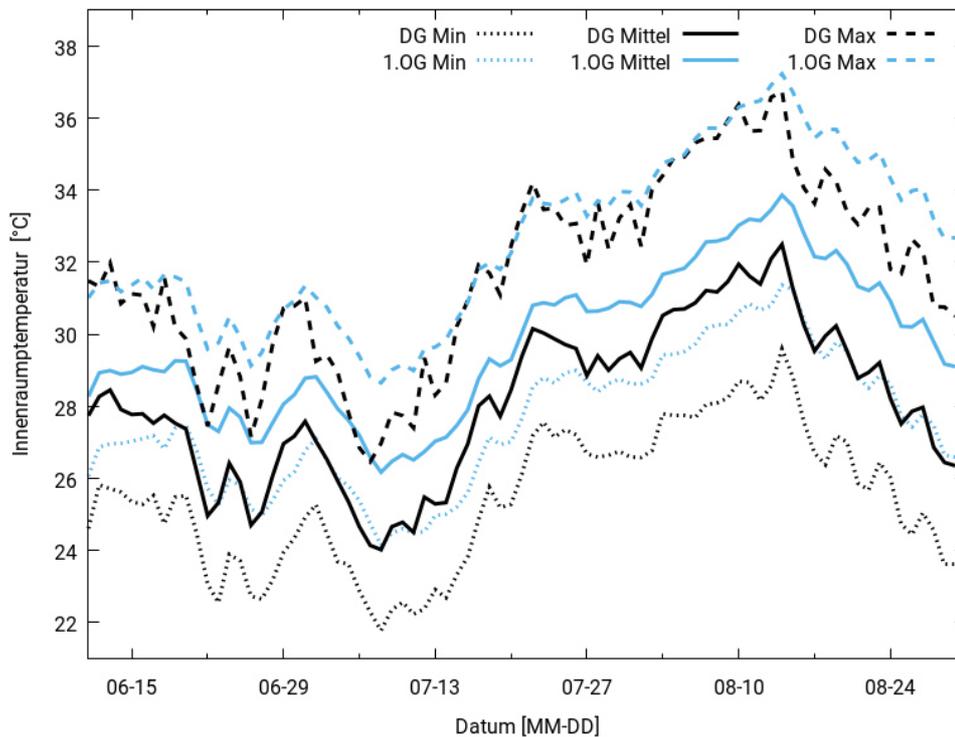


Abb. 4.9: Temperaturverlauf der Tagesminimum-, Tagesmittel- und Tagesmaximumtemperaturen im SW-Raum im Dachgeschoss und 1. Obergeschoss vom 10.06.-31.08.2003.

4.5.2 Gebäudebegrünung – Einfluss auf den Tagesgang der Temperatur

Die Begrünungsmaßnahmen wirken sich unterschiedlich stark auf die Temperatur im Innenraum aus (s. Abb. 4.10 und Abb. 4.11). Dies ist abhängig von der Art der „grünen“ Maßnahme. Die vollständige Verschattung der Fenster und Fassade durch Bäume hat einen größeren kühlenden Effekt als die Gebäudebegrünung und reduziert typischerweise die Temperaturamplitude im Innenraum von ca. 6 K auf 3 K. Im Dachgeschoss bewirkt die Dachbegrünung und noch mehr die größer flächige Fassadenbegrünung einen kühlenden Effekt und senkt die Temperaturen im gezeigten Ausschnitt um knappe 2 K am Tage ab. Nachts zeigen ebenso die Fassadenbegrünungen einen stärkeren Effekt als die Dachbegrünungen, da durch das unbegrünte Dach mehr Wärme die Räume verlassen kann als durch ein begrüntes, das mit einer zusätzlichen Wärme isolierenden Substratschicht versehen ist.

Die bewässerten oder mit mehr Speichervolumen versehenen Gebäudebegrünungsmaßnahmen verdunsten nicht nur mehr Wasser, sondern haben auch einen stärkeren

kühlenden Effekt auf die Innenraumtemperatur. Bei der extensiven Dachbegrünung zeigt sich dies bereits in der ersten Hälfte des Simulationszeitraumes, bei der Fassadenbegrünung ohne Bewässerung erst im Verlauf der Trockenperiode ab Mitte August (s. Abschnitt 4.5.3).

Die Wirkung ist abhängig von der Lage des Raums. Der sonnenbeschienene SW-Raum erfährt naturgemäß einen stärkeren Kühlungseffekt durch die verschattenden Bäume als der N-Raum. Ebenso verdunstet die Fassadenbegrünung auf der Nordfassade des Gebäudes weniger Wasser und kühlt daher auch weniger den Innenraum, auch im Vergleich zur Dachbegrünung. Außerdem ist der Tagesgang der Temperatur im N-Raum mit Dachbegrünung geringer als beim unbegrünten Gebäude, da die Dachbegrünung mit ihrer Substratschicht und weiteren Schichten einen zusätzlichen dämmenden Effekt aufweist.

Bei den Simulationen mit Klimaanlage (s. Abb. 4.12) ist die Reihenfolge der Wirksamkeit der verschiedenen Begrünungsmaßnahmen die gleiche wie bei den Simulationen ohne Klimaanlage. Die direkte solare Einstrahlung in den SW-Raum verursacht einen sprunghaften Anstieg der nötigen Kühlleistung um den Raum auf 20 °C zu halten. Im gezeigten Zeitraum Mitte Juli ist die maximale Kühlleistung im SW-Raum auf Grund der Beschattung der Bäume nahezu halbiert im Vergleich zu den Szenarien ohne Verschattung.

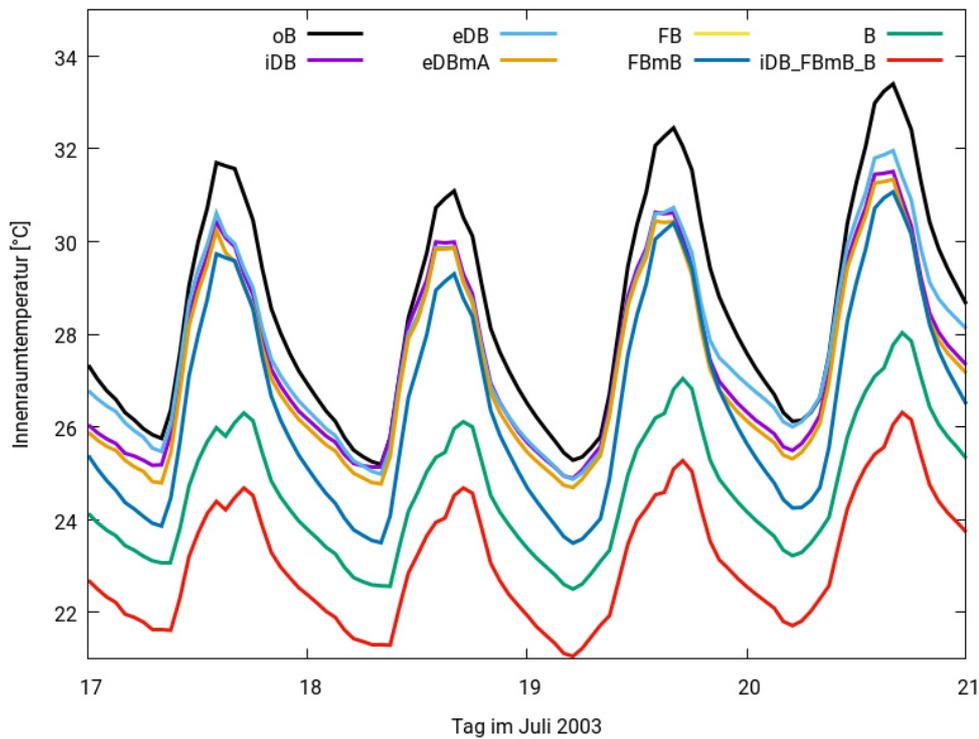


Abb. 4.10: Tagesgang der Innenraumtemperaturen im Dachgeschoss im SW-Raum für unterschiedlich begrünte Gebäudeszenarien vom 17.-21.07.2003.

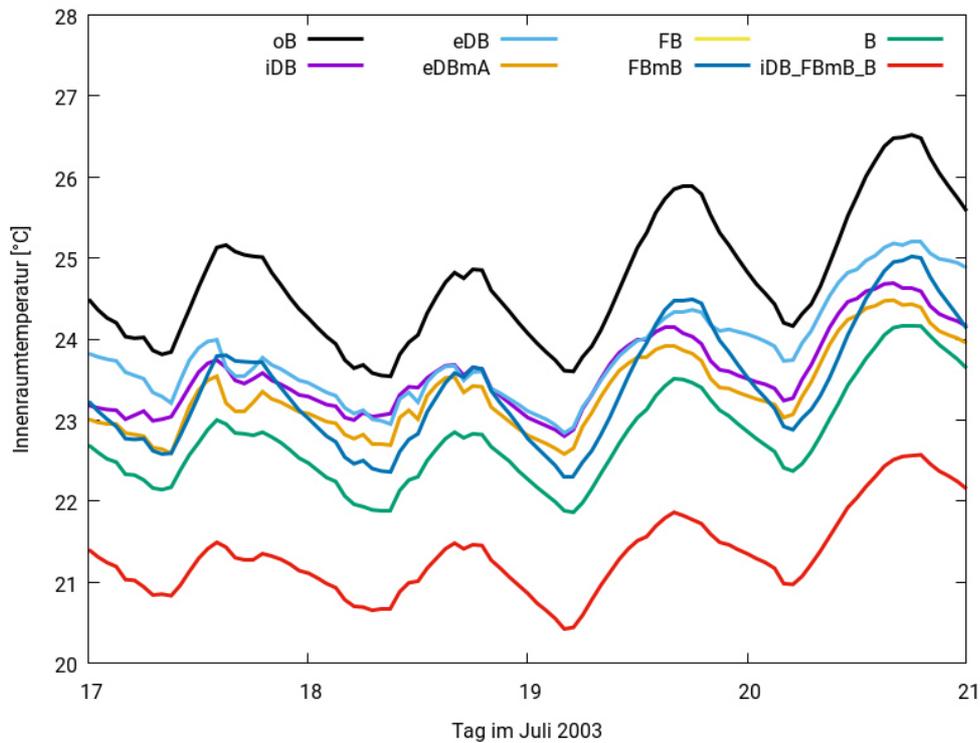


Abb. 4.11: Tagesgang der Innenraumtemperaturen im Dachgeschoss im N-Raum für unterschiedlich begrünte Gebäudeszenarien vom 17.-21.07.2003.

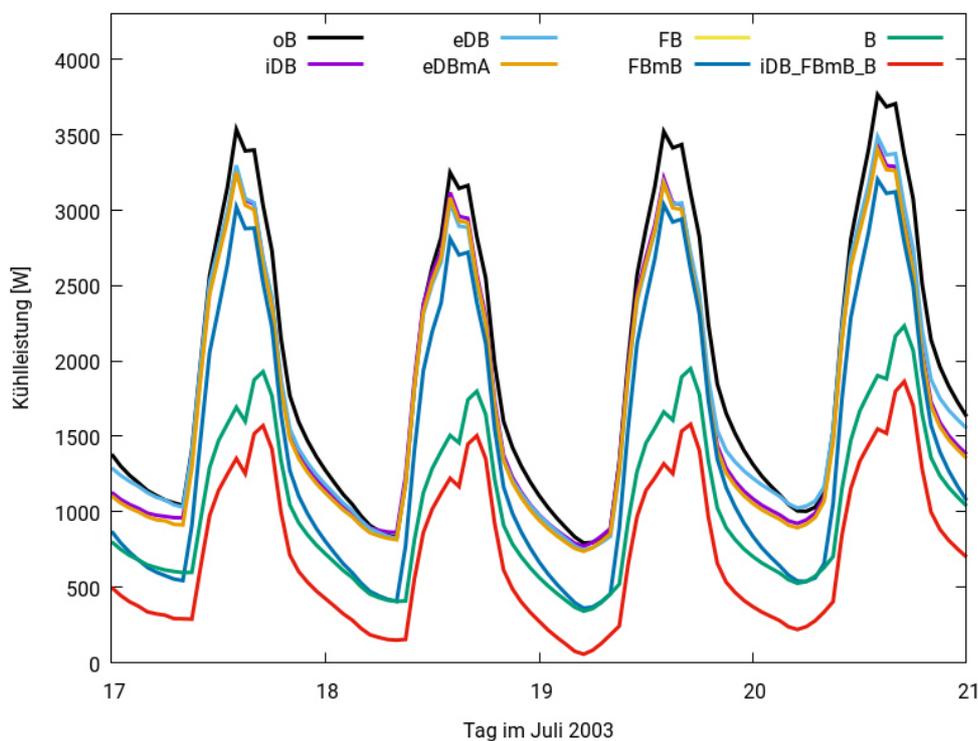


Abb. 4.12: Tagesgang der Kühlleistung im Dachgeschoss im SW-Raum für unterschiedlich begrünte Gebäudeszenarien vom 17.-21.07.2003.

4.5.3 Gebäudebegrünung – Einfluss auf den Verlauf der Tagesmitteltemperatur

Auch im längerfristigen Verlauf (s. Abb. 4.13 und Abb. 4.14) über alle drei Sommermonate hat die verschattende Wirkung der Bäume den am stärksten kühlenden Einfluss auf den Innenraum von sonnenbeschienenen Räumen (SW-Raum Median -4 K) (s. Abb. 4.16 und Abb. 4.15). Der Maßnahmeneffekt der Bäume hängt stark von der solaren Einstrahlung ab und ist daher im Verlauf am stärksten variable. In Nord-Räumen ist die Wirkung deutlich geringer (Median ca. -2 K), da hier nur früh morgens und am Abend die solare Einstrahlung durch die Bäume reduziert wird. Die geringste Wirkung zeigen die unterschiedlichen Dachbegrünungsmaßnahmen, wobei die Maßnahmen mit der mächtigeren Speicherschicht (intensive Dachbegrünung und extensive Dachbegrünung mit Anstau) und damit größeren Wasserverfügbarkeit, etwas mehr kühlen im Dachgeschoss (Median -0,7 bis -1 K) als die unbewässerte extensive Dachbegrünung (Median -0,5 K). Bei der Kombination von Bäumen, Fassadenbegrünung

mit Anstau und intensiver Dachbegrünung lässt sich der Kühlungseffekt noch weiter steigern, so dass die Innentemperatur je nach Raumausrichtung um 3 bis knapp 6 K kühler ist.

Die Tagesmitteltemperatur in Räumen mit Außenfassade bei Simulationen mit Begrünung korreliert fast immer sehr gut mit der Tagesmitteltemperatur in Räumen aus der Basissimulation ohne Begrünung ($r \geq 0,92$) (s. Abb. 4.17 und Abb. 4.18). Je nach Ausrichtung des Raumes und Etage weißt die lineare Regressionsgerade eine unterschiedliche Steigung kleiner 1 auf. Die Maßnahmenwirkung gegenüber der Simulation ohne Begrünung nimmt also mit steigender Innenraumtemperatur zu. Ursache ist, dass höhere Innenraumtemperaturen mit höheren Außentemperaturen und damit auch meistens mit mehr solarer Einstrahlung verbunden sind. Die Wirkung der Gebäudebegrünungsmaßnahmen beruht in hohem Maße auf der Verdunstungsmenge und diese ist ebenso höher bei größerer solarer Einstrahlung als auch bei niedrigerer relativer Luftfeuchte beziehungsweise hohem Wasserdampfsättigungsdefizit (s. Formel 2.39), die mit höheren Außentemperaturen in den Simulationen einhergeht. Die Bäume haben bei höheren Temperaturen mit mehr solarer Einstrahlung eine stärkere Wirkung, da sie mehr kurzweilige Strahlung durch Verschattung der Fassade abschirmen.

Mittels der Beziehung zur Maßnahmenwirkung aus der Regressionsgeradengleichung und der Basissimulation ohne Begrünung ließe sich auch für andere sommerliche Wettersituationen die Innenraumtemperatur mit den unterschiedlichen Begrünungsmaßnahmen abschätzen.

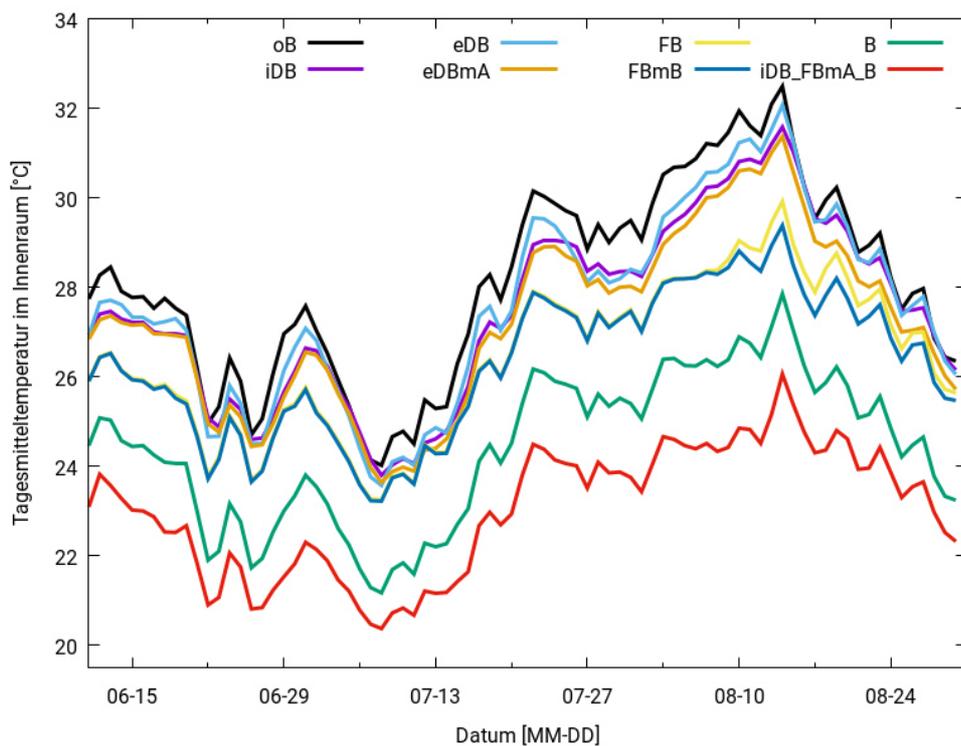


Abb. 4.13: Verlauf der Tagesmitteltemperatur im Dachgeschoss im SW-Raum für unterschiedlich begrünte Gebäudeszenarien vom 10.06.-31.08.2003.

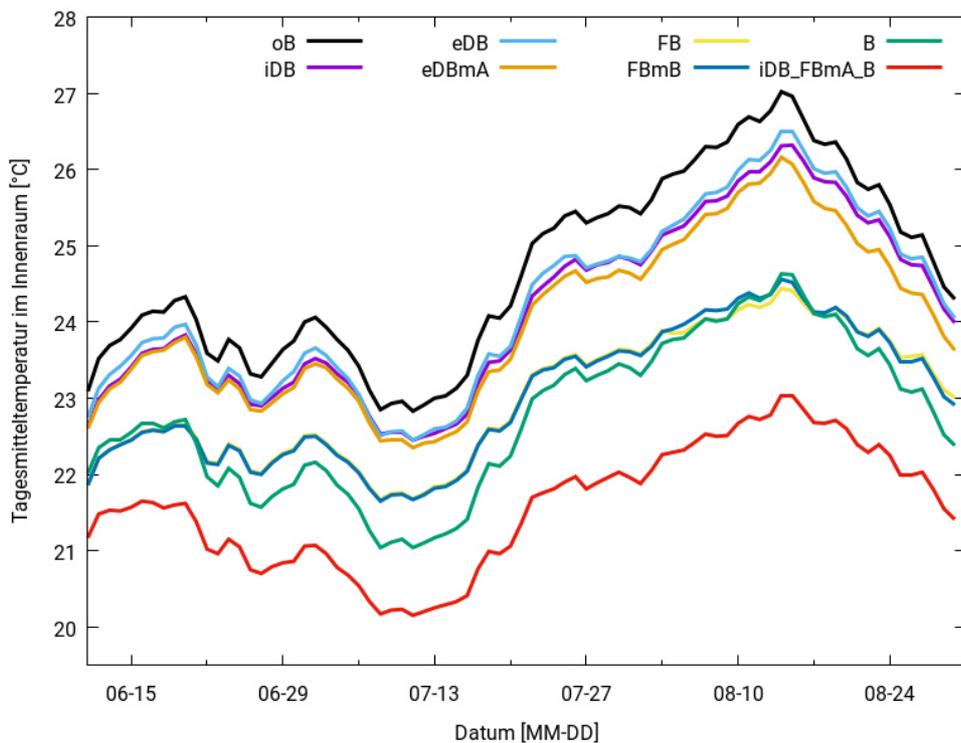


Abb. 4.14: Verlauf der Tagesmitteltemperatur im 1. Obergeschoss im N-Raum für unterschiedlich begrünte Gebäudeszenarien vom 10.06.-31.08.2003.

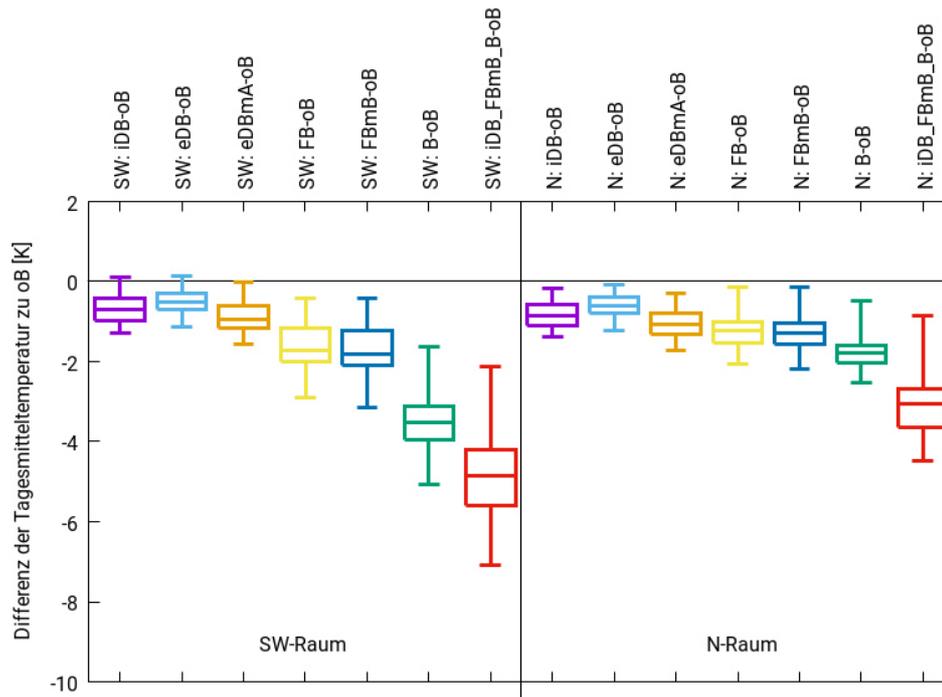


Abb. 4.16: Boxplot der Differenz der Tagesmitteltemperatur zum unbegrünten Gebäude im Dachgeschoss im SW- und N-Raum für Gebäude mit unterschiedlicher Begrünung vom 10.06.-31.08.2003. Die Whisker geben das Minimum/ Maximum an, die Box das 25 %, 50 % und 75 % Quantil.

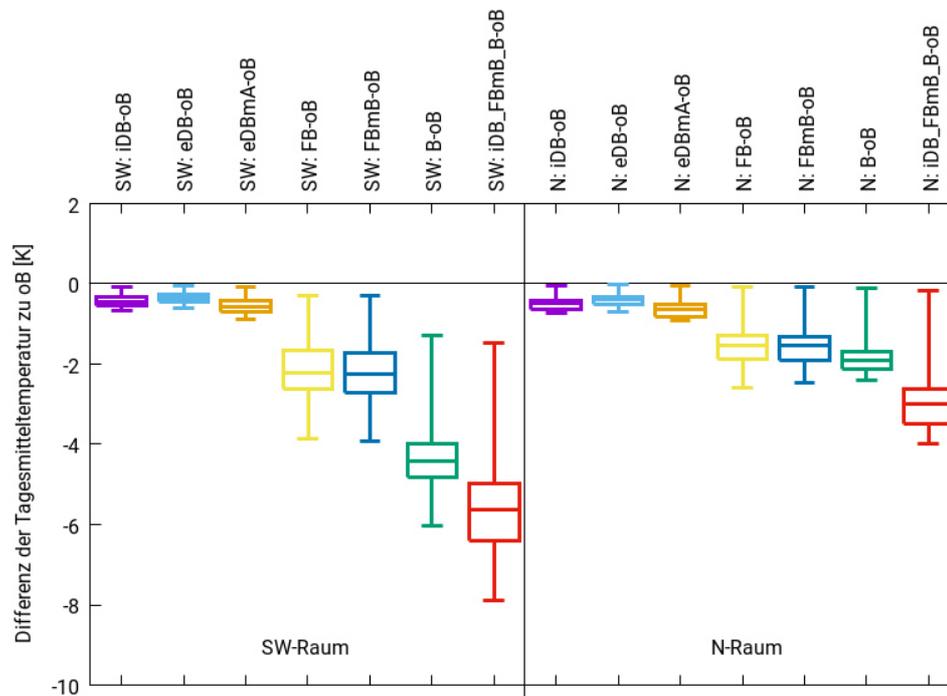


Abb. 4.15: Boxplot der Differenz der Tagesmitteltemperatur zum unbegrünten Gebäude im 1. Obergeschoss im SW- und N-Raum für Gebäude mit unterschiedlicher Begrünung vom 10.06.-31.08.2003. Die Whisker geben das Minimum/ Maximum an, die Box das 25 %, 50 % und 75 % Quantil.

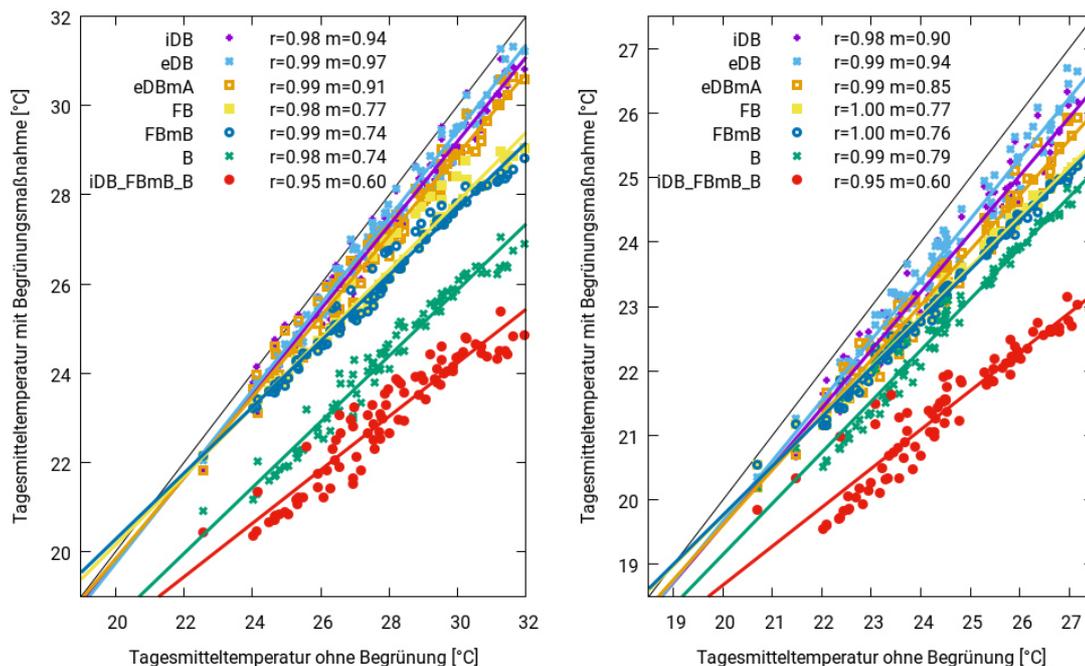


Abb. 4.17: Korrelation der Tagesmitteltemperatur ohne Begrünung mit der Tagesmitteltemperatur mit einer Begrünungsmaßnahme im Dachgeschoss. Links: SW-Raum, Rechts: N-Raum. Mit Korrelationskoeffizient r , linearer Regressionsgerade und deren Steigung m .

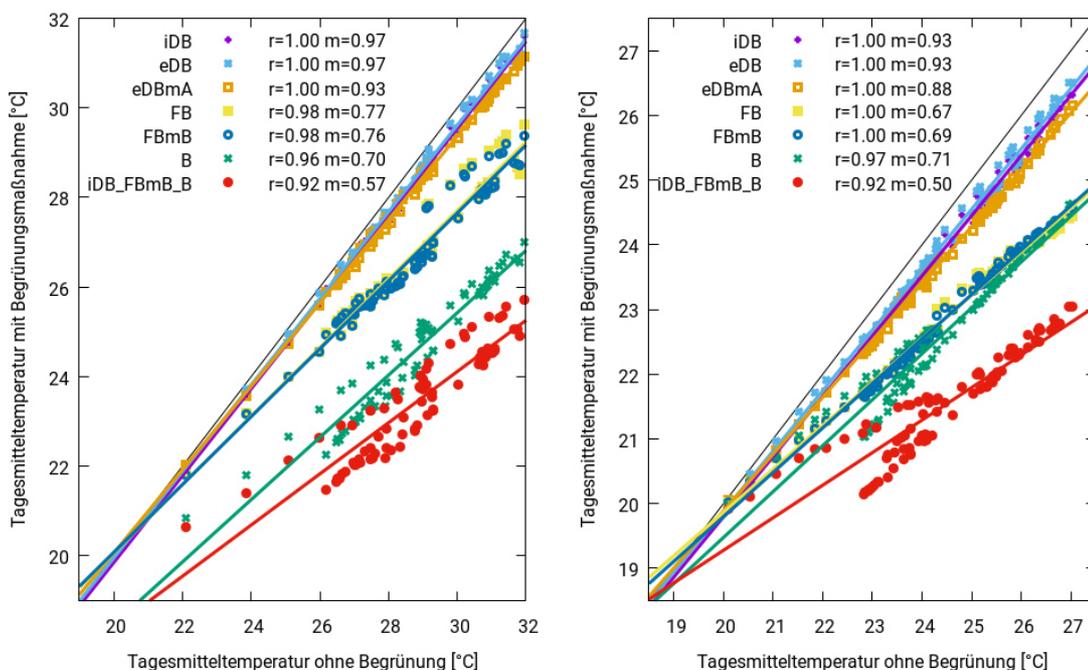


Abb. 4.18: Korrelation der Tagesmitteltemperatur ohne Begrünung mit der Tagesmitteltemperatur mit einer Begrünungsmaßnahme im 1. Obergeschoss. Links: SW-Raum, Rechts: N-Raum. Mit Korrelationskoeffizient r , linearer Regressionsgerade und deren Steigung m .

4.5.4 Gebäudebegrünung bei verbesserter Isolierung – Einfluss auf die Tagesmitteltemperatur

Bei Bestandsgebäuden ohne Gebäudebegrünung ist es möglich, dass eine zusätzliche Dach-, oder Fassadenbegrünung mit einer verbesserten Isolierung des Dachs, der Fassade oder beidem einhergeht. Wie sich eine verbesserte Gebäudeisolierung nach Passivhaus-Standard auf die Innenraumtemperaturen und in Kombination mit Gebäudebegrünungsmaßnahmen auswirkt wird hier beispielhaft gezeigt.

In einem Raum im Dachgeschoss kann es je nach Sonnenexposition im Sommer im Innenraum heißer sein als draußen. Insbesondere tagsüber ist dann der Wärmestrom in Dach und Fassade von innen nach außen gerichtet. Eine zusätzliche Dämmung des Dachs ohne Gebäudebegrünung kann in diesem Fall bei kühler werdender Witterung zu höheren Innenraumtemperaturen führen, da die zusätzliche Dämmung ein auskühlen des Raums verlangsamt (s. Abb. 4.19 und Abb. 4.20). Mit verbesserter Dachisolierung und kühlender intensiver Dachbegrünung stellt sich in den Simulationen wiederum eine ähnliche Maßnahmenwirkung wie mit reiner intensiver Dachbegrünung ein und im

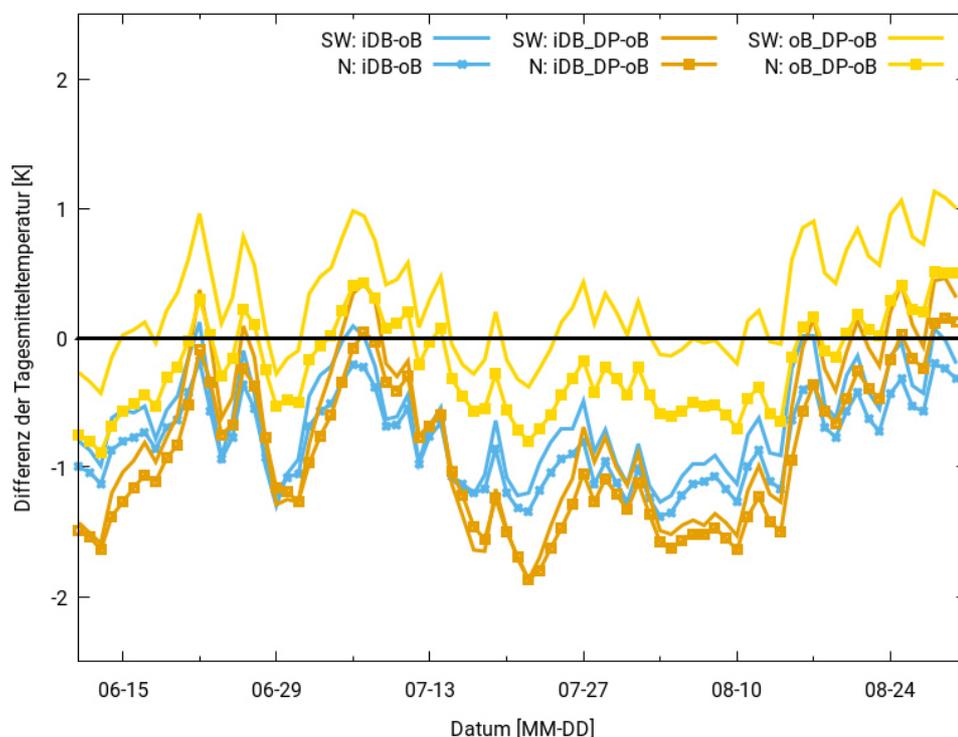


Abb. 4.19: Differenz der Tagesmitteltemperatur zum unbegrüntem Gebäude (oB) im SW- und N-Raum vom 10.06.-31.08.2003 für unterschiedliche Gebäudeszenarien: iDB, iDB_DP, oB_DP (s. Tabelle 4.2).

Simulationszeitraum sind die Innenraumtemperaturen im Median um 0,7-1,1 K niedriger. Bei kühler werdender Witterung kühlen auch diese Räume langsamer aus als Räume ohne verbesserte Dachisolierung und Dachbegrünung, jedoch ist das Ausgangstemperaturniveau im Raum niedriger. Besonders auffällig ist dieses Verhalten ab Mitte August: Im Szenario mit intensiver Dachbegrünung und Dämmung nach Passivhausstandard ist es im SW- und N-Raum kühler als im Szenario mit alleiniger intensiver Dachbegrünung. Jedoch kühlt das Gebäude mit Dachbegrünung und Isolierung in der kühleren Witterung (s. Abb. 4.3) langsamer aus und die Räume sind Ende August wärmer als beim der Standardisolierung mit intensiver Dachbegrünung.

Die kühlende Wirkung der Fassadenbegrünung ist stärker als die zusätzliche Isolierung des gesamten Gebäudes nach Passivhaus-Standard (s. Abb. 4.21). Hier kann es beispielsweise im SW-Raum bei kühler/ bewölkter werdender Witterung vorkommen, dass die Wärme mehr im Gebäude gehalten wird als es im Basisgebäude mit Dämmung nach 70er Jahre Standard der Fall war und es daher im Innenraum länger wärmer ist.

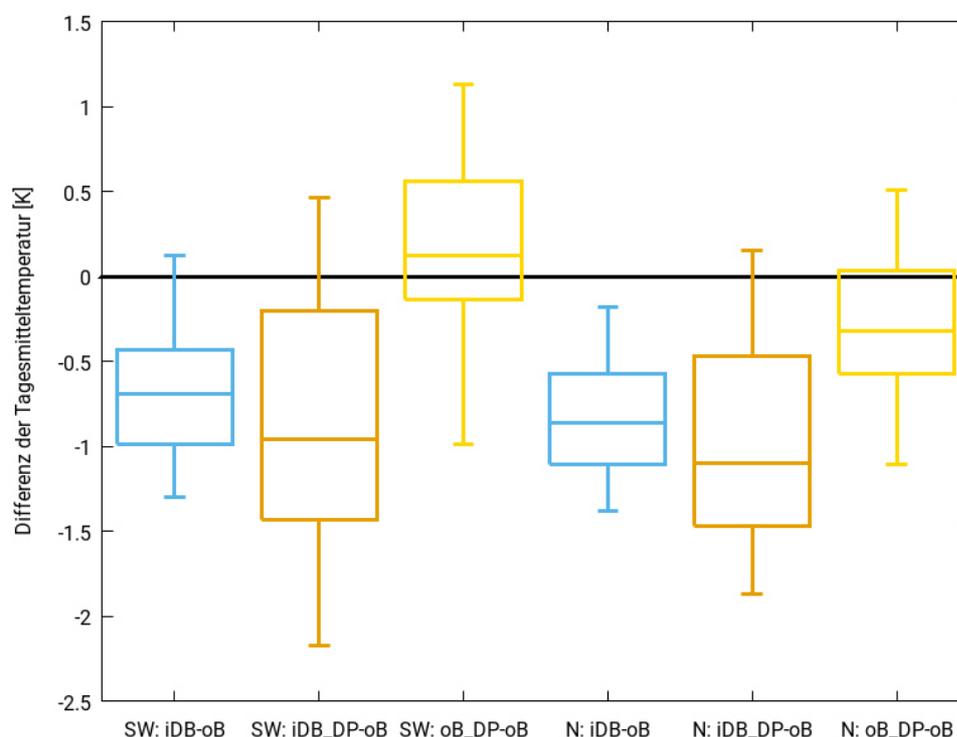


Abb. 4.20: Boxplot der Differenz der Tagesmitteltemperatur zum unbegrüntem Gebäude (oB) im Dachgeschoss im SW- und N-Raum vom 10.06.-31.08.2003 für unterschiedliche Gebäudeszenarien: iDB, iDB_DP, oB_DP (s. Tabelle 4.2). Die Whisker geben das Minimum/ Maximum an, die Box das 25 %, 50 % und 75 % Quantil.

Gebäudebegrünung, sowie eine verbesserte Isolierung bewirken beide in einer heißen sommerlichen Witterung eine oftmals kühlere Raumklima als sich ohne diese Maßnahmen einstellen würde, jedoch wirken sie auf unterschiedliche Weise. Die Gebäudebegrünung reduziert hauptsächlich die Temperatur der Außenoberfläche am Tage und verringert so den Wärmeeintrag in die Bausubstanz. Die verbesserte Isolierung verzögert hingegen den Wärmetransport durch Dach und Fassade und das in beide Richtungen.

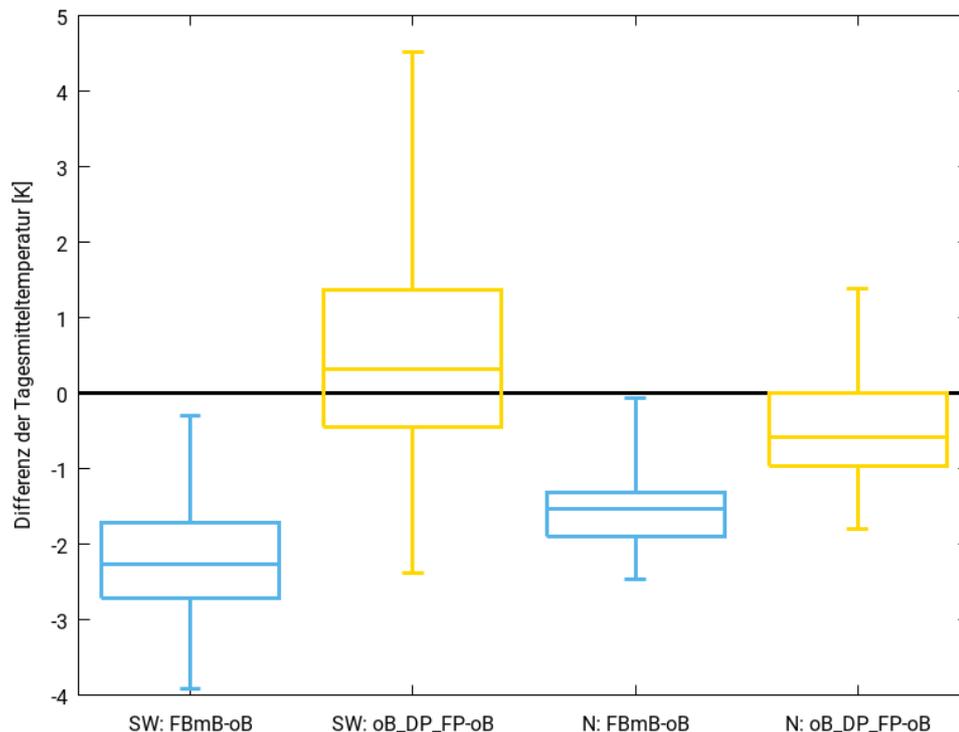


Abb. 4.21: Boxplot der Differenz der Tagesmitteltemperatur zum unbegrünten Gebäude (oB) im 1. Obergeschoss im SW- und N-Raum vom 10.06-31.08.2003 für unterschiedliche Gebäudeszenarien: FBmB und oB_DP. Die Whisker geben das Minimum/ Maximum an, die Box das 25 %, 50 % und 75 % Quantil.

4.5.5 Gebäudebegrünung – Einfluss auf meteorologische Kenntage

Meteorologische Kenntage sind solche Tage, an denen ein bestimmter Schwellwert eines meteorologischen Parameters über- oder unterschritten wird. Für heiße sommerliche Witterungen sind das beispielsweise Tropennächte (Minimum der Lufttemperatur ≥ 20 °C) oder Heißer Tag (Maximum der Lufttemperatur ≥ 30 °C). Für

winterliche Witterungen sind zum Beispiel die Anzahl an Heiztagen (Tagesmitteltemperatur $< 15\text{ °C}$) relevant. Die Lufttemperatur bezieht sich dabei auf den Außenraum in 2 m Höhe. Es sind keine solchen Kenntage bekannt, die sich auf die Lufttemperatur im Innenraum beziehen. Außerdem lassen sie sich im Falle der Tropennächte nicht sinnvoll auf den Innenraum übertragen, da dort die Lufttemperatur für gewöhnlich größer als 20 °C ist und dies nicht als tropische Nacht im Allgemeinen empfunden wird.

Auf Grund dessen wurden zwei Kenntage für den Innenraum definiert, um die Maßnahmenwirkung über deren Änderung zu klassifizieren:

- Kühltag: Tagesmitteltemperatur im Innenraum $\geq 25\text{ °C}$
- Hitzetag: Maximum der Lufttemperatur im Innenraum $\geq 30\text{ °C}$

Alternativ gibt es auch die Möglichkeit thermische Indizes, wie die PET (Physiological Equivalent Temperature) oder den UTCI (Universal Thermal Climate Index) zu verwenden. Beide Größen quantifizieren die Wärmebelastung für den Menschen. Sie können nicht direkt gemessen werden, sondern berechnen sich über die Luftgeschwindigkeit, die relative Luftfeuchte, die Lufttemperatur, die Strahlungstemperatur so wie die Metabolismusrate und beziehen auch den Wärmedurchgangswiderstand der Bekleidung mit ein. In dieser Untersuchung jedoch wurde der Fokus auf die Temperatur gelegt, auch weil der Luftaustausch nur parametrisiert berechnet wird und die Luftfeuchte im Innenraum nicht simuliert wurde.

Auf Grund der fehlenden direkten solaren Einstrahlung auf der Nordseite des Gebäudes ist die Anzahl an Kühltagen im N-Raum sehr viel geringer als im SW-Raum und Hitzetage treten im simulierten Zeitraum gar nicht auf (s. Abb. 4.22). In den SW-Räumen ohne Begrünung im Dachgeschoss und 1. Obergeschoss hingegen wurden fast über den ganzen Simulationszeitraum Kühltage und zur Hälfte der Zeit Hitzetage beobachtet.

Im Vergleich zwischen den beiden ausgewerteten Etagen fällt auf, dass die Anzahl an Kühltagen im N-Raum im Dachgeschoss größer ist als im 1. Obergeschoss, für den SW-Raum ist hingegen das Gegenteil der Fall. Das liegt daran, dass die direkte Sonneneinstrahlung häufiger dazu führt, dass die SW-Räume wärmer sind als der Außenraum und diese Wärme im Dachgeschoss durch die Decke besser nach außen abgegeben werden kann als im 1. Obergeschoss. Bei den N-Räumen hingegen werden Kühltage durch hohe Außentemperaturen bei niedrigeren Innenraumtemperaturen

hervorgerufen, die sich stärker auf das Dachgeschoss auswirken, da dort durch das Dach zusätzlich Wärme den Innenraum erreicht.

Die Begrünungsszenarien bewirken für die N-Räume eine deutliche Reduktion der Kühltage um 40-100 % bzw. 18-38 Tagen. Bei den SW-Räumen wirken sich die Dachbegrünungsmaßnahmen im 1. Obergeschoss fast gar nicht aus, im Dachgeschoss liegt die Reduktion bei ca. 10-15 % bzw. 8-15 Tagen. Fassadenbegrünung mit Bewässerung und Bäume sowie die Maßnahmenkombination aus allen Begrünungsmaßnahmen zeigen die stärksten Effekte, wobei die Wirkung der beschattenden Maßnahmen deutlich stärker ist und die Anzahl an Kühl- und Hitzetagen auf ein Niveau bringt, wie es für den N-Raum charakteristisch ist.

Die Simulation mit verbesserter Isolierung nach Passivhaus-Standard erzeugen unterschiedliche Ergebnisse. Während eine zusätzliche Isolierung des Dachs in Verbindung mit einer intensiven Dachbegrünung die Anzahl an Kenntagen gegenüber dem Standardgebäude mit intensiver Dachbegrünung weiter reduziert, bewirkt eine reine stärkere Dachsisolierung keine deutliche Verbesserung oder eine leichte Zunahme der Kenntage (vgl. 4.5.4) und eine vollständige Isolierung nach Passivhaus-Standard sogar eine deutliche Zunahme der Anzahl an Hitzetagen für die SW-Räume. Wenn die Innenraumtemperatur höher ist als die Außentemperatur, typischer Weise nachts oder bei starker Sonneneinstrahlung durch die Fenster, wird durch die verbesserte Isolierung die Wärmeabgabe durch die Fassade reduziert und führt so im Verhältnis zu einer Fassade mit normaler Isolierung zu höheren Temperaturen im Innenraum. Die verbesserte Isolierung verhindert natürlich auch ein Eindringen von Wärme bei höheren Außentemperaturen in den Innenraum, jedoch wird der Wärmeeintrag durch Sonneneinstrahlung nicht reduziert. Die Transmissivität der Fenster ist in beiden Fällen die gleiche, daher tritt die erhöhte Anzahl an Kühl- und Hitzetagen besonders bei den SW-Räumen auf.

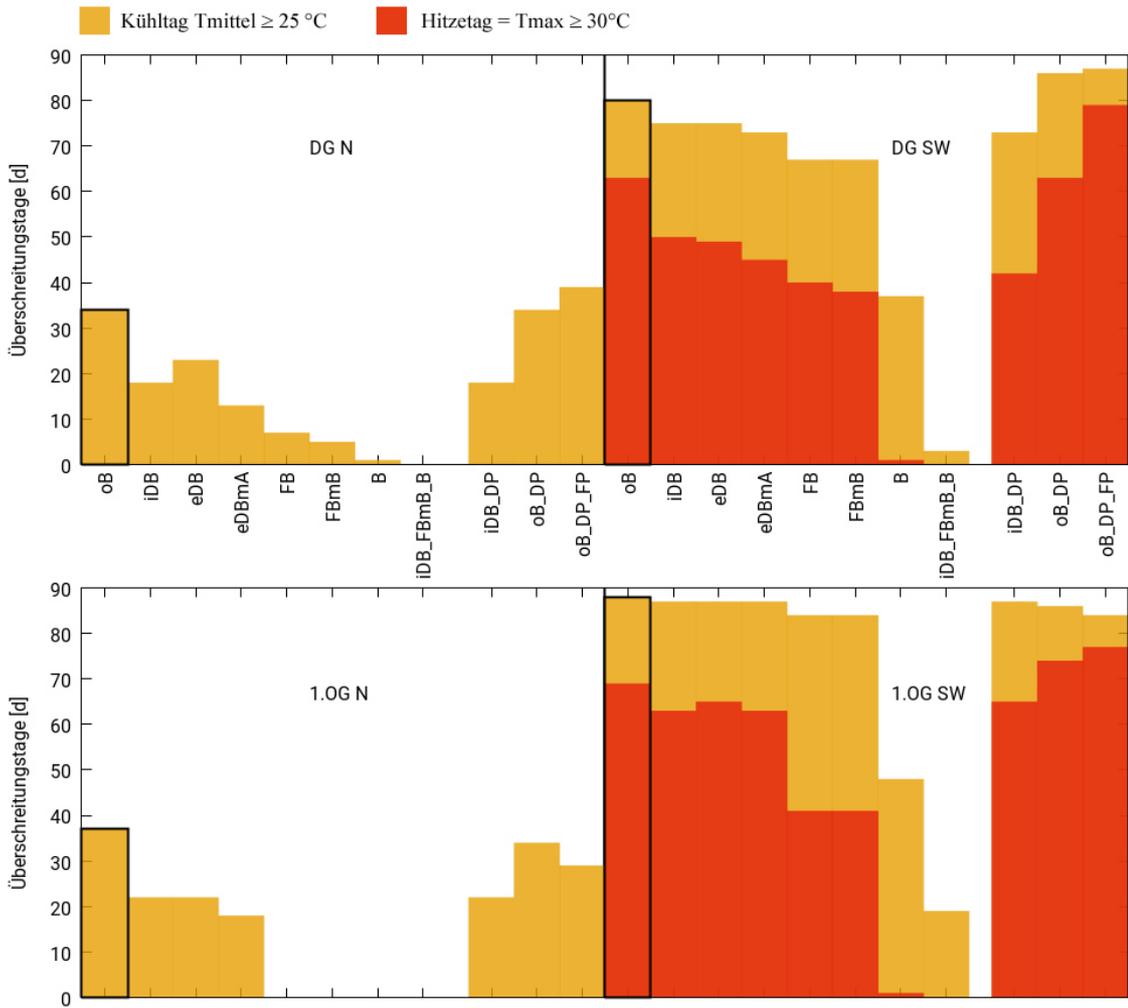


Abb. 4.22: Anzahl an Überschreitungstagen nach Simulationsszenarien als überlappendes Säulendiagramm. Orange: Tagesmitteltemperatur $\geq 25 \text{ °C}$, Rot: Tagesmaximumtemperatur $\geq 30 \text{ °C}$, Linke Seite: N-Raum, Rechte Seite: SW-Raum, Oben: Dachgeschoss, Unten: 1. Obergeschoss, Basisszenario (ohne Begrünung): schwarz umrandet. Zeitraum: 1.6.-31.8.2003

4.5.6 Gebäudebegrünung – Einfluss auf die Energiebilanz und die benötigte Kühlenergie

Die Lufttemperatur in den unterschiedlichen Innenräumen (I) wird in den Simulationen direkt beeinflusst durch:

- die Lüftung, und damit Energieaustausch mit dem Außenraum und angrenzenden Innenräumen (Lü)
- der Zugabe/ dem Entzug von Wärmeenergie durch eine optionale Heizung oder Klimaanlage (KA) und somit Begrenzung der Lufttemperatur auf einen maximalen/ minimalen Wert
- dem Austausch von Wärme mit den Raumwänden, -decke, -boden und Fensterflächen (H)

Die Änderung des Wärmeenergiegehalts der Luft im Innenraum im Verhältnis zum Ausgangszustand (20 °C) kann somit beschrieben werden als:

$$\Delta W_I = \Delta W_{Lü} + \Delta W_{KA} - \Delta W_H. \quad (4.1)$$

Die Temperatur der Innenraumbooberflächen wird berechnet über eine Energiebilanz:

$$Q_S + Q_L + Q_B + Q_H = 0 \text{ (s. Abschnitt 2.2)}. \quad (4.2)$$

Aufsummiert über die Innenoberfläche lässt sich die Änderung des Wärmeenergiegehalts der Luft je Innenraum auch ausdrücken als:

$$\Delta W_I = \sum Q_S + \sum Q_L + \sum Q_B + \sum Q_{Lü} + \sum Q_{KA}. \quad (4.3)$$

Während bei den Simulationen mit virtueller Klimaanlage die Innenraumtemperatur konstant bei 20 °C gehalten wird ($\Delta W_I = 0$), ist dies bei den Simulationen ohne virtuelle Klimaanlage nicht der Fall. Die Innenraumtemperaturen variieren in dem Fall mit der Zeit (s. Abschnitt 4.5.5) und unterscheiden sich je nach Raumausrichtung, Etage, Gebäudedämmung und Begrünungsszenario. Daher sind die Energiebilanzen für die Simulationen ohne virtuelle Klimaanlage nicht ohne weiteres direkt miteinander vergleichbar.

4.5.6.1 Simulationen mit virtueller Klimaanlage

In den Abb. 4.23 bis Abb. 4.26 sind die einzelnen Bilanzkomponenten über den gesamten Simulationszeitraum (1.6.-31.8.2003) für vier unterschiedliche Räume dargestellt. In den gestapelten Säulendiagrammen wird zusätzlich zwischen Innenwänden, der Fassade und ggf. der Innenseite des Dachs unterschieden. Die Summe der Bodenwärmeströme sowie die langwellige Strahlungsbilanz über die Innenoberflächen werden dafür separat dargestellt. Mittels dieser Energiebilanzen lassen sich detailliert die Effekte der Gebäudebegrünung darstellen, durch die es zu den Effekten auf die Lufttemperatur und damit der idealisierten Klimaanlage kommt (s. Abschnitt 4.5.2- 4.5.5).

Die Wärmemenge, die kurzwellig von der Sonne durch die Fenster einstrahlt und von den Innenoberflächen absorbiert und reflektiert wird, ist in den Südwest-Räumen um den Faktor 30 größer als in den Nord-Räumen, da dort lediglich diffuse und von der Umgebung des Gebäudes reflektierte Strahlung in die Räume einfällt. In den beiden Szenarien mit Bäumen wird die solare Einstrahlung um jeweils ca. 50 % reduziert.

Die Wärmemenge, die durch das Dach und die Fassade in die Räume eindringt, ist von der Größenordnung her ungefähr gleich groß und unabhängiger von der Raumausrichtung. Die Dachbegrünungsmaßnahmen reduzieren den Wärmeeintrag durch das Dach um ca. 40-60 % relativ zum unbegrünten Gebäude, das Gleiche gilt für das Szenario mit Bäumen und bei einer Verbesserung der Dachisolierung. Die Fassadenbegrünungsmaßnahmen reduzieren die Wärmemenge, die der Raumluft zugeführt wird, am Tage teils sehr deutlich, so dass die Fassadenußenoberfläche häufig kühler als die Wand ist und der Wärmestrom umgekehrt wird. In der Bilanz über den gesamten Simulationszeitraum verlässt mehr Wärme durch die Außenwände den Innenraum als hineingleitet wird und die Fassade trägt so zur Abkühlung bei.

Die Bilanz der langwelligen Strahlung ist in den nach Norden ausgerichteten Räumen positiv für die Rauminnenwände und negativ für die Innenseite der Fassade und Dachunterseite, was bedeutet, dass erstere meist eine niedrigere Oberflächentemperatur als die letzteren beiden haben und daher weniger Wärme abstrahlen als sie empfangen. Ursache dafür ist, dass die die N-Räume umgebenden Innenwände wärmer sind als die Außenwände auf Grund der solaren Einstrahlung, die auf der anderen Seite auf ihre Oberfläche trifft, sowie beispielsweise im S-Raum.

Für die zur Sonne ausgerichteten Räume ist die Bilanz der langwelligen Strahlung der Raumwände deutlich komplexer, da hier durch die zeitweilig starke solare Einstrahlung einzelne Wandflächen deutlich aufgeheizt werden können.

Der Eintrag an Wärme in die einzelnen Räume durch die fest vorgegebene Lüftung ist in der Bilanz sehr gering, da die Lufttemperatur draußen im Mittel über den gesamten Simulationszeitraum mit 20,6 °C nur geringfügig größer ist als die konstant gehaltene Innenraumtemperatur mit 20 °C (s. Abschnitt 4.1).

Die Summe der benötigten Kühlenergie über den gesamten Simulationszeitraum je Raum ist das Resultat der Wärmemengen durch die anderen Wärmeströme und der vorgegebenen Raumzieltemperatur. Sie ist stark von der Ausrichtung des Raumes und der Etage abhängig. Wie schon bei den Simulationen ohne Klimaanlage gezeigt: Je höher der Kühlenergiebedarf ohne Begrünung ist desto stärker wirken sich die Begrünungsmaßnahmen absolut aus. Anders als bei den Simulationen ohne Klimaanlage, bei denen die Anzahl an Kühltagen im 1. Obergeschoss größer ist als im Dachgeschoss auf Grund des Wärmeverlustes durch das Dach, ist dies mit Klimaanlage nicht der Fall, da die durchgehende Raumtemperatur von 20 °C meist niedriger ist als die mittlere Außentemperatur und dadurch der Wärmeeintrag durch das Dach eher zunimmt als abnimmt.

Bei Betrachtung des Kühlenergiebedarfs für das Haus insgesamt über alle Etagen und Räume, ist dieser mit Dachbegrünungsmaßnahmen im Verhältnis zum Basisgebäude ohne Begrünung um 10 % reduziert, mit Fassadenbegrünung ist der Kühlenergiebedarf ohne Bewässerung um 20 % und mit Bewässerung um 40 % geringer, Bäume bewirken eine Reduktion um ca. 50 % und eine Kombination aller Maßnahmen sogar um 75 %. Eine lediglich verbesserte Dämmung des Dachs bewirkt die geringste Reduktion mit ca. 5 %, bei einer Dämmung nach Passivhaus Standard für das gesamte Gebäude liegt die Reduktion bei ca. 30 % und bewegt sich dabei zwischen den unterschiedlich bewässerten Fassadenbegrünungsmaßnahmen.

Bei den Simulationen mit Bäumen wird der Kühlenergiebedarf durch die Verschattung für den SW-Raum um ca. 50 % reduziert und auf einen Betrag abgesenkt wie er ohne Begrünung für den N-Raum berechnet wird. Bei der Gebäudebegrünung zeigt die Fassadenbegrünung eine stärkere Reduktion des Kühlenergiebedarfs als die Dach-

begrünung. Die Dachbegrünung wirkt sich auf Grund der Entfernung nur schwach auf den Kühlenergiebedarf im 1. Obergeschoss aus.

4.5.6.2 Simulationen ohne virtuelle Klimaanlage

Im Vergleich zu den Simulationen mit Klimaanlage ist die Innenraumtemperatur im Mittel deutlich größer und liegt beim unbegrünten Szenario für die vier betrachteten Räume zwischen 25 und 30 °C (s. Abb. 4.27- Abb. 4.29). Da bei diesen Simulationen die Innenraumtemperatur mit der Zeit variiert und sich damit die Wärmemenge der Luft im Innenraum ändert, muss diese zur Schließung der Energiebilanz über die Simulationszeit mitberücksichtigt werden. Eine negative Wärmemenge ΔW_l bedeutet dabei, dass die Luft am Ende des Bilanz Zeitraums wärmer ist als zu Beginn, als die Simulation mit 20 °C Innenraumtemperatur gestartet wurde.

Die SW-Räume im Dachgeschoss und Obergeschoss erhalten den weitaus überwiegenden Anteil an Wärme durch solare Einstrahlung und geben diese Wärme über die ungedämmten Innenwände an die benachbarten Räume mit geringerer Innenraumtemperatur, als auch über die Außenfassade ab. Die N-Räume hingegen erhalten einen Großteil der Wärmeenergie durch die Innenwände aus den benachbarten wärmeren Räumen und geben diese über die Fassade wieder ab.

Auf Grund des sich ändernden Temperaturniveaus in den jeweiligen Räumen sind die Maßnahmenwirkungen der Gebäudebegrünungen schwerer anhand der Wärmemengen zu quantifizieren als bei den Simulationen mit Klimaanlage. Dort ist die Maßnahmenwirkung eindeutig an der Wärmemenge auszumachen, die die Klimaanlage dem Raum entzieht. Ohne Klimaanlage sind die Effekte der Maßnahmen noch am einfachsten bei den N-Räumen zu erkennen. Dort ist im Dachgeschoss der Wärmeeintrag durch die begrünten Dächer geringer, beziehungsweise die Abgabe von Wärme im Dach- und Obergeschoss bei Begrünung der dann kühleren Fassaden größer. Bei den SW-Räumen sind die systematischen Zusammenhänge die gleichen wie bei den N-Räumen, jedoch sind die relativen Änderungen geringer.

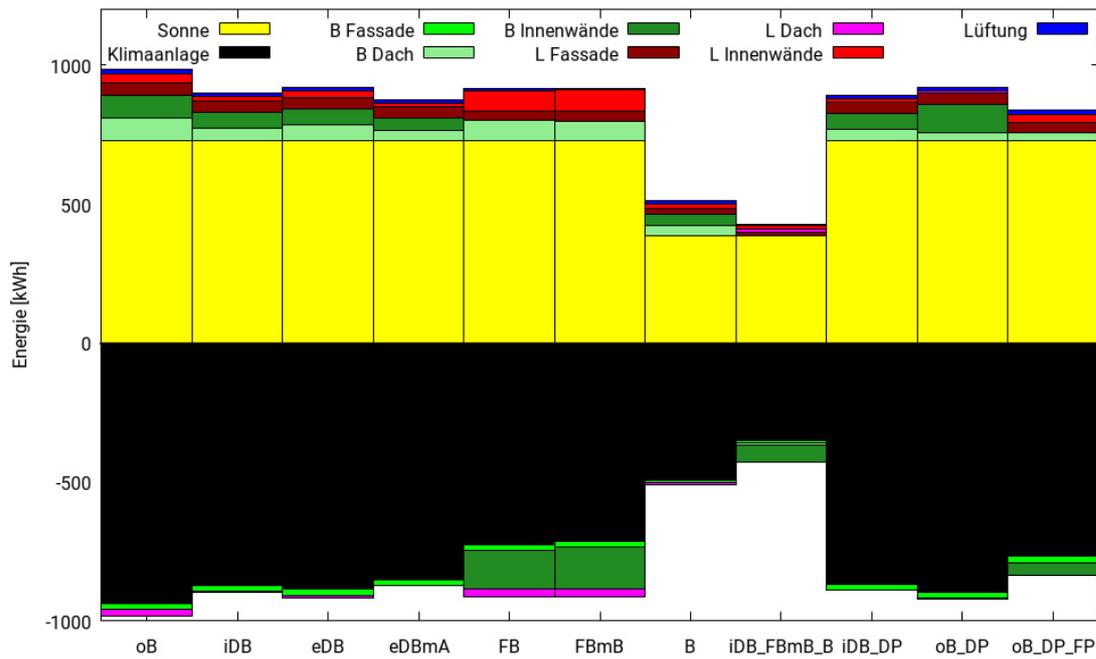


Abb. 4.23: Energiebilanz für den SW-Raum im Dachgeschoss mit Klimaanlage über den gesamten Simulationszeitraum u. a. mit Bodenwärmestrombilanz (B) und langwellige Strahlungsbilanz (L) getrennt nach Innenwänden, Fassade und Innendachflächen.

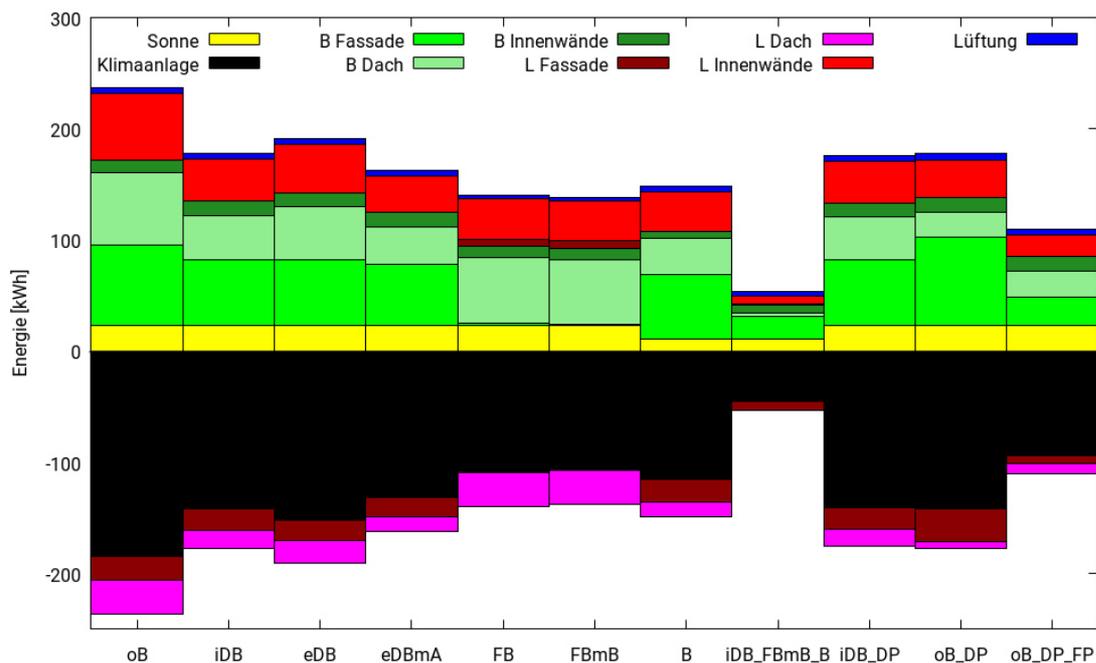


Abb. 4.24: Energiebilanz für den N-Raum im Dachgeschoss mit Klimaanlage über den gesamten Simulationszeitraum u. a. mit Bodenwärmestrombilanz (B) und langwellige Strahlungsbilanz (L) getrennt nach Innenwänden, Fassade und Innendachflächen.

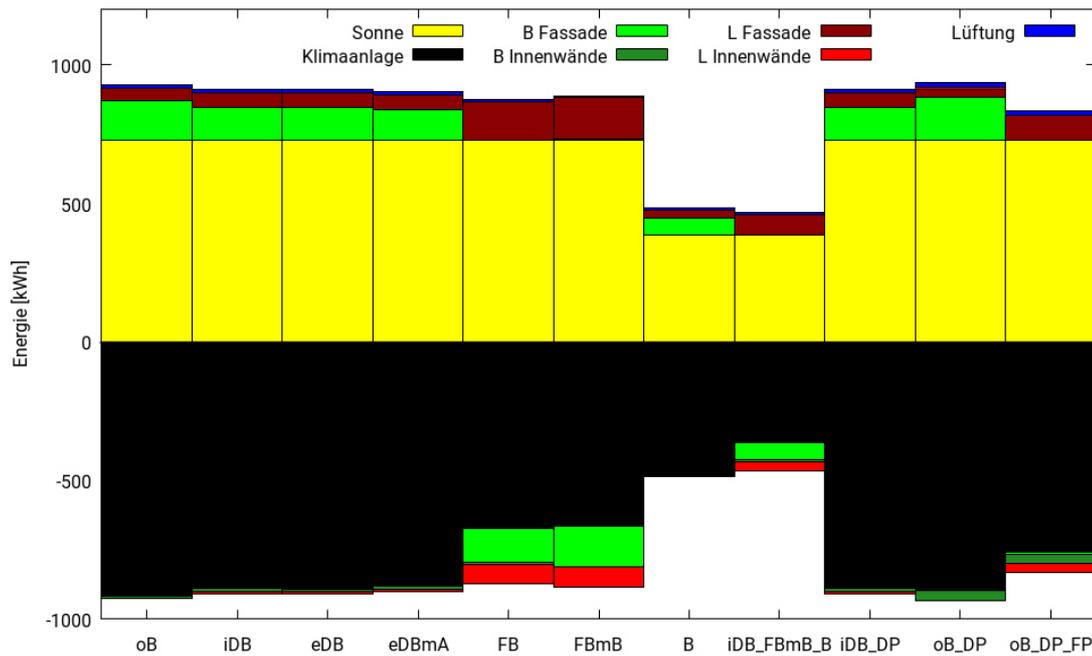


Abb. 4.25: Energiebilanz für den SW-Raum im 1. Obergeschoss mit Klimaanlage über den gesamten Simulationszeitraum u. a. mit Bodenwärmestrombilanz (B) und langwellige Strahlungsbilanz (L) getrennt nach Innenwänden und Fassade.

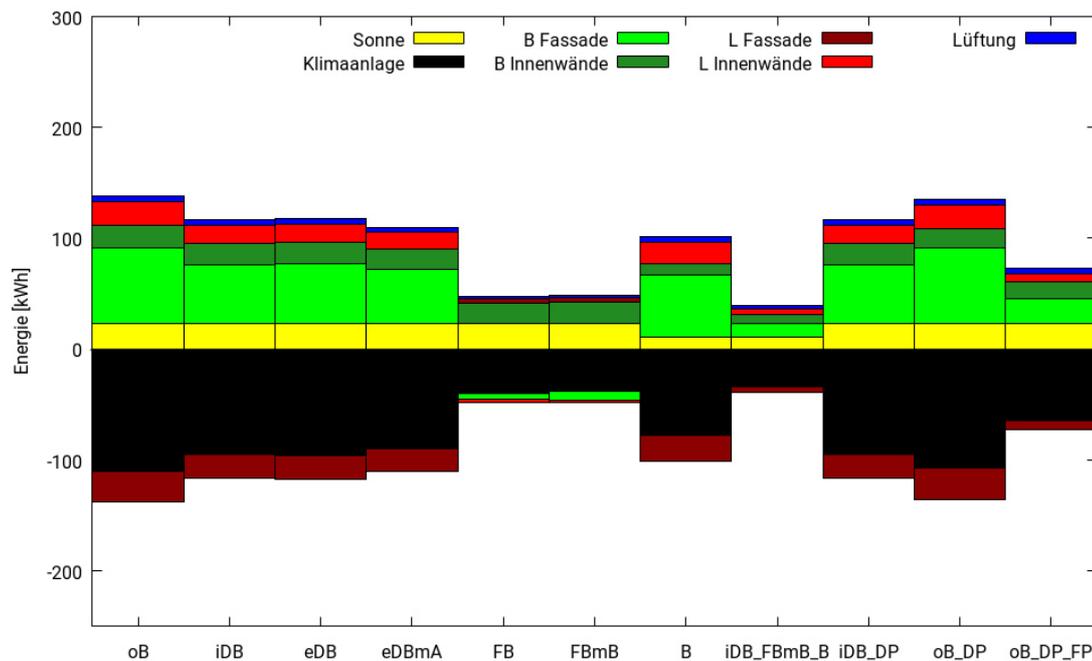


Abb. 4.26: Energiebilanz für den N-Raum im 1. Obergeschoss mit Klimaanlage über den gesamten Simulationszeitraum u. a. mit Bodenwärmestrombilanz (B) und langwellige Strahlungsbilanz (L) getrennt nach Innenwänden und Fassade.

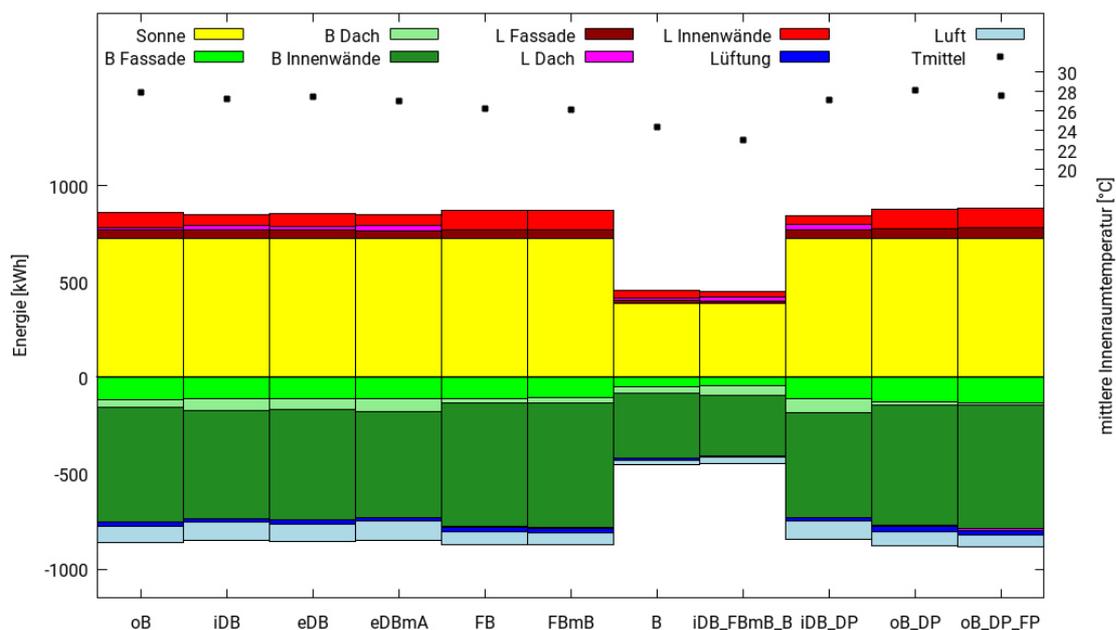


Abb. 4.27: Energiebilanz für den SW-Raum im Dachgeschoss ohne Klimaanlage über den gesamten Simulationszeitraum u. a. mit Bodenwärmestrombilanz (B) und langwellige Strahlungsbilanz (L) getrennt nach Innenwänden, Fassade und Innendachflächen.

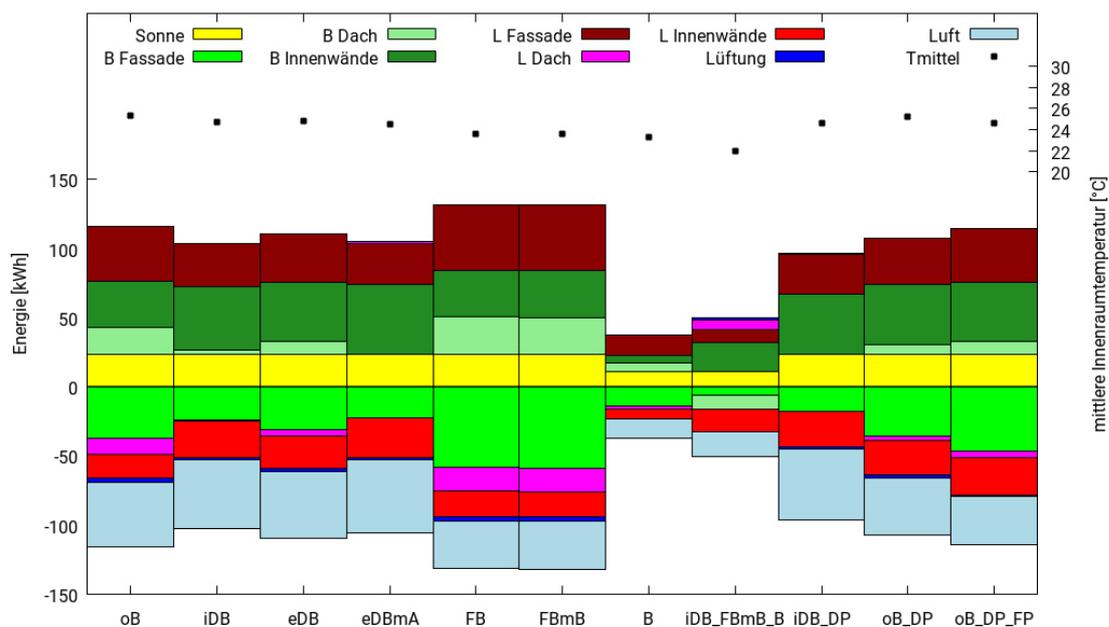


Abb. 4.28: Energiebilanz für den N-Raum im Dachgeschoss ohne Klimaanlage über den gesamten Simulationszeitraum u. a. mit Bodenwärmestrombilanz (B) und langwellige Strahlungsbilanz (L) getrennt nach Innenwänden, Fassade und Innendachflächen.

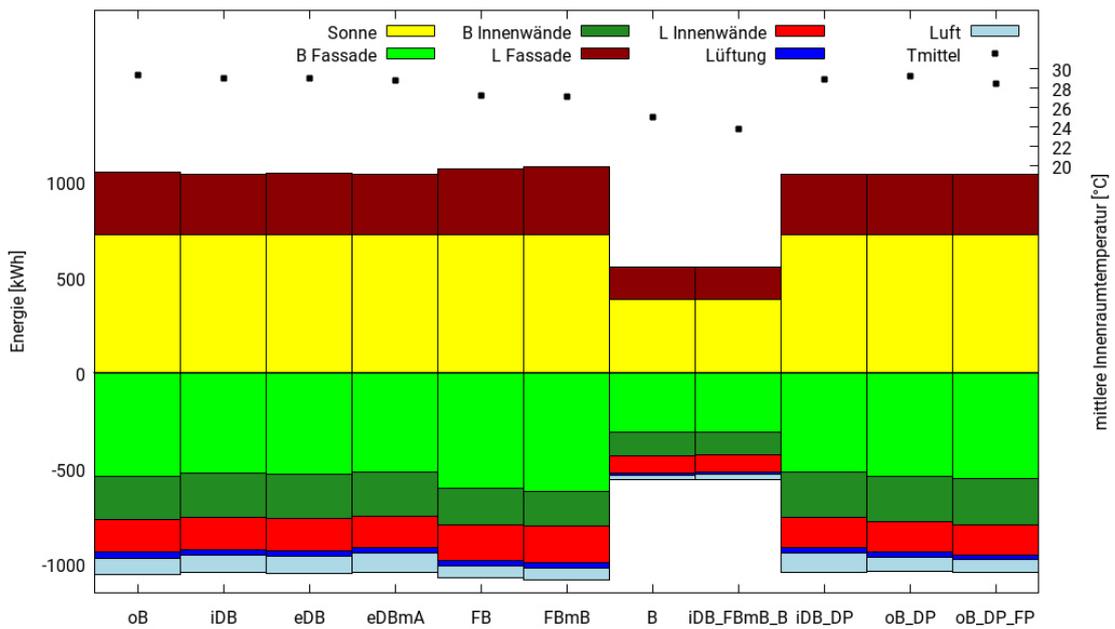


Abb. 4.29: Energiebilanz für den SW-Raum im 1. Obergeschoss ohne Klimaanlage über den gesamten Simulationszeitraum u. a. mit Bodenwärmestrombilanz (B) und langwellige Strahlungsbilanz (L) getrennt nach Innenwänden und Fassade.

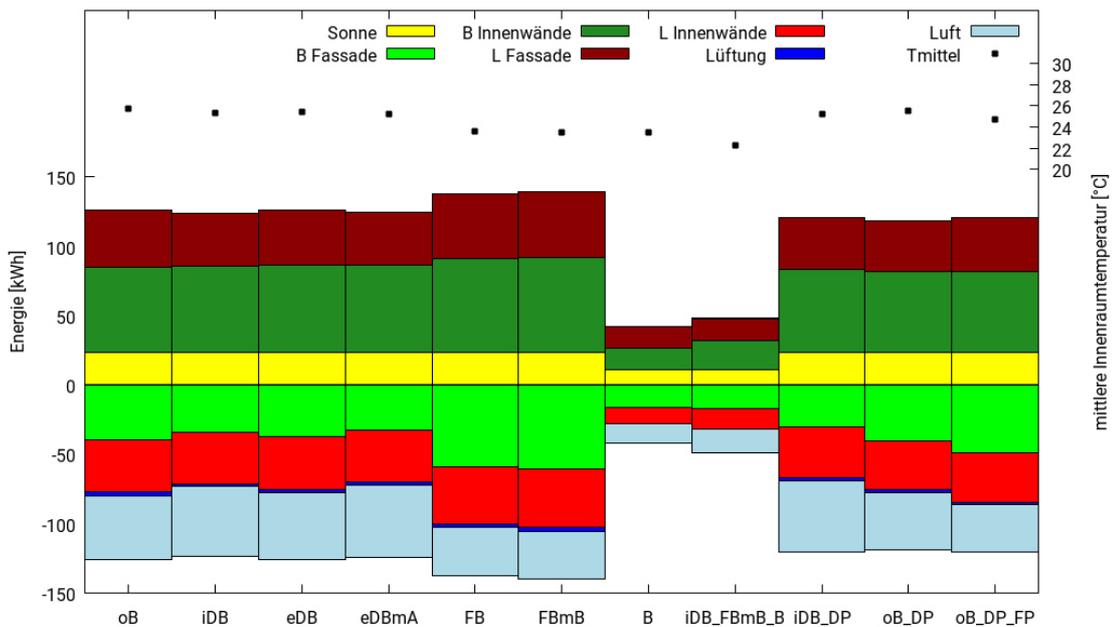


Abb. 4.30: Energiebilanz für den N-Raum im 1. Obergeschoss ohne Klimaanlage über den gesamten Simulationszeitraum u. a. mit Bodenwärmestrombilanz (B) und langwellige Strahlungsbilanz (L) getrennt nach Innenwänden und Fassade.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde der Einfluss von unterschiedlicher Gebäudebegrünung auf das Innenraumklima über eine drei monatige Sommerperiode in einem warm gemäßigten Klima untersucht. Dazu wurde das mikroskalige Modell ASMUS_Green weiterentwickelt, um unter anderem die zeitlichen Änderungen des Bodenwassergehalts bei Gebäudebegrünung zu simulieren (s. Kapitel 2). Mit dem Modell wurde ein idealisiertes Stadtquartier simuliert und mit dem neu entwickelten mikroskaligen Innenraummodell ASMUS_Inside gekoppelt. Diese Modell berechnet die Wärmeleitung durch Fassade, Dächer und Fenster, den Einfall von solarer Strahlung in den Innenraum, die Energiebilanz und Oberflächentemperatur für alle begrünten und unbegrünten Außen- und Innenoberflächen, sowie die Innenraumtemperatur. Es wird eine parametrisierte Raumlüftung und der Einfluss von Heizen und Kühlen auf die Innenraumtemperatur, sowie den Energieverbrauch berücksichtigt. ASMUS_Inside erlaubt die Simulation von individuellen Gebäudekonfigurationen mit unterschiedlichem Grundriss bei einer typischen Auflösung von 0,5 m und die Berücksichtigung von mehrschichtigen Wand- und Dachaufbauten mit unterschiedlichen Materialien und deren individuellen Wärmeleiteigenschaften.

In Kapitel 3 wurden die Simulationsergebnisse des Innenraummodells mit denen aus Laborexperimenten verglichen und auf ihre Realitätsnähe überprüft. Dabei handelte es sich um Auskühlungsexperimente oder winterliche Szenarien. Die Abweichungen beim Auskühlversuch (Versuch 0, s. Abschnitt 3.2.1) lagen nach 48 Stunden bei ca. 0,2 K, die Heizleistung wurde in Versuch 1 ohne solare Einstrahlung (s. Abschnitt 3.2.2) um 10 % überschätzt und in Versuch 2 mit solarer Einstrahlung (s. Abschnitt 3.2.3) um 7 % unterschätzt. Auch wenn in Kapitel 4 das Innenraummodell auf sommerliche Situationen mit optionaler Kühlung statt Heizung angewendet wurde, kann davon ausgegangen werden, dass sich die Abweichungen innerhalb der gleichen Größenordnung bewegen würden wie bei den winterlichen Vergleichsexperimenten. Hinsichtlich der Berechnung der Wärmeleitung in das Gebäudeinnere, der kontrollierten Lüftung und Simulation der Strahlung ist diese Annahme vertretbar. Die Begrünungsmaßnahmen werden sich im Sommer im Gegensatz zum Winter hinsichtlich ihrer Evapotranspiration mit Sicherheit anders verhalten, wurden aber in Kapitel 3 nicht weiter berücksichtigt. Die Simulation

der Begrünungseffekte wurde in den Veröffentlichungen von Groß (2012) und Günther (2014) geprüft.

Der Einfluss der Gebäudebegrünung und Bäume auf die Außen- und Innentemperaturen sowie die Kühllast wurde für eine 90-tägige Periode vom 1.6.-31.8.2003 unter Verwendung realer meteorologische Messdaten der DWD-Station Berlin-Tempelhof untersucht. Die Auswirkungen der Dach- und Fassadenbegrünung sowie der verschattenden Bäume sind von vielen Faktoren abhängig.

Vor allem sind dies:

- die Art der Begrünungsmaßnahme,
- das Potential zur Evapotranspiration,
- die Wasserverfügbarkeit auch bei längerer Trockenheit,
- ihre Größe und Lage,
- die Ausgangssituation hinsichtlich des Mikroklimas und seines Verlaufs und
- die Baukörper- und Stadtquartiereigenschaften.

Die mittleren Maßnahmeneffekte über den simulierten Zeitraum sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst. Großflächigere und beschattende Maßnahmen und Maßnahmenkombinationen zeigen im Außen- wie im Innenraum stärkere Kühlungseffekte. Die Verschattung der Fenster durch Bäume blockiert den überwiegenden Anteil an direkter solarer Einstrahlung, der hauptsächlich für die Erwärmung der Innenräume verantwortlich ist. Die Dach- und Fassadenbegrünungen reduzieren lokal die Temperatur der Gebäudeaußenhülle durch Evapotranspiration und Verschattung. Dadurch gelangt weniger Wärme ins Gebäudeinnere und bei, im Verhältnis zum Außenraum, überhitzten Innenräumen gelangt schneller Wärme durch die Fassade und das Dach nach außen. Bei sommerlichen Temperaturen ist die kühlende Wirkung der Gebäudebegrünung von ähnlicher Größenordnung wie die einer verbesserten Gebäudeisolierung. Bei einer abkühlenden Witterung verlangsamt jedoch ein höherer Wärmedurchgangswiderstand eines Gebäudes das Auskühlen der Innenräume und wirkt hier schlechter als eine Gebäudebegrünung.

Im Außenraum führt die Verschattung von Böden, Dächern und Fassaden durch Bäume, sowie die Evapotranspiration der Gebäudebegrünung und Bäume zu niedrigeren Oberflächentemperaturen, die in der nahen Umgebung zu einer niedrigeren Lufttemperatur führen. Auf Grund der Vermischung mit wärmeren Luftmassen fällt der Kühlungseffekt auf die Außentemperatur deutlich geringer aus und wirkt auf ein größeres

Luftvolumen als auf das in erster Näherung abgeschlossene und deutlich kleinere Luftvolumen im Innenraum. Die Begrünungsmaßnahmen wirken sich dabei bis zu viermal so stark auf den Innenraum aus als auf die Lufttemperatur im Außenraum. Die Größenordnung der Kühlungseffekte liegen im Bereich der Literaturwerte (s. Tabelle 1.1).

Tabelle 5.1: Wertespanne der mittleren Effekte der Begrünungsmaßnahmen im simulierten Zeitraum 10.06.-31.08.2003 auf die Außentemperatur bzw. die Innentemperatur und die Kühleregieeinsparung je Raum. Berücksichtigt wurden nur Räume mit Außenfassade

Maßnahme	Kühlungseffekt [K]		Kühleregieeinsparung [%]
	Außen-temperatur	Innen-temperatur	
iDB	0,1-0,3	0,5-0,9	4-24
eDB	0,1-0,3	0,4-0,6	3-17
eDBmA	0,2-0,5	0,6-1,2	4-28
FB	1,0-1,8	1,3-2,2	23-63
FBmB	1,1-1,9	1,3-2,3	23-65
B	0,4	1,8-4,4	29-47
iDB_FBmB_B	1,1-1,5	3,0-5,6	61-76

Die Gebäudebegrünung wirkt sich kühlend auf die direkt angrenzenden Innenräume aus, zum Beispiel in Form der Dachbegrünung auf das Dachgeschoss. Für den Außenraum wird häufig der Kühlungseffekt der Maßnahmen auf das Fußgängerniveau als Kriterium herangezogen. Hier zeigt gerade die Dachbegrünung häufig nur geringe oder keine Kühlungseffekte auf Grund der größeren Distanz. Die Wirkung der Dachbegrünung sollte daher vielmehr auf das Dachniveau, zum Beispiel im Falle einer begehbaren Dachbegrünung, oder auf den Innenraum bezogen werden.

Einige Einflussfaktoren auf das Innenraumklima wurden hier nicht untersucht. Zum einen das bedarfsorientierte Lüften von Räumen und die Verschattung von Zimmern mit beispielsweise Rollläden und Jalousien, als auch der Einfluss von anthropogenen Wärmequellen. Die Effekte der Begrünungsmaßnahmen wären für die sonnenexponierten Räume im Falle der Verschattung und des Lüftens vermutlich kleiner und würden denen

der Räume annähern, die nicht von der Sonne beschienen werden oder durch Bäume verschattet sind. Zusätzliche anthropogene Wärmequellen würden wahrscheinlich eher zu stärkeren Maßnahmeneffekten führen, da sie sich ähnlich auswirken können wie eine verstärkte solare Einstrahlung. Bei Implementierung dieser drei genannten Einflussfaktoren könnten die Simulationen für ein breiteres Spektrum realer Situationen durchgeführt werden.

Eine Hauptunsicherheit bei den Simulationen liegt darin, dass die Luftströmungen im Innenraum nicht simuliert werden, sondern ein konstanter Austauschkoefizient für Wärme an den Innenwandoberflächen vorgegeben wird. Der Wärmeaustausch mit den Wandflächen könnte bei starken Luftbewegungen durch Lüften oder eine Klimaanlage auch stärker sein. Ebenso wird die unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit von trockenem und feuchtem Substrat im Bodenmodell bislang unzureichend berücksichtigt.

Es wäre von Vorteil das Modell in anderen Klimaten und ausführlicher mit Messdaten zu Innenräumen, als auch zum Verhalten von unterschiedlichen Gebäudebegrünungen und Baumarten zu vergleichen. Letzteres wird im laufenden Forschungsprojekt „Blue Green Streets“, gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der Fördermaßnahme "RES:Z – Ressourceneffiziente Stadtquartiere für die Zukunft", umgesetzt.

Literaturverzeichnis

Akbari, H. & Taha, H., 1992. The impact of trees and white surfaces on residential heating and cooling energy use in four Canadian cities. *Energy*, 17(2), pp. 141-149.

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2013. Anwendungsbilanzen für die Energiesektoren in Deutschland in den Jahren 2011 und 2012 mit Zeitreihen von 2008 und 2012. *Webseite: https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ageb_endbericht_anwendungsbilanzen_2011-2012_endg.pdf* [Zugriff am 04.05.2020].

Blanusa, T., Vaz Monteiro, M., Fantozzi, F., Vysini, E., Li, Y. & Cameron, R., 2013. Alternatives to Sedum on green roofs: can broad leaf perennial plants offer better 'cooling services'?. *Building and Environment*, 59, pp. 99-106.

Bröde, P., Fiala, D., Blazejczyk, K., Epstein, Y., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Richards, M., Rintamäki, H., Shitzer, A. & Havenith, G., 2009. Calculating UTCI Equivalent Temperature. *JW Castellani & TL Endrusick, eds. Proceedings of the 13th International Conference on Environmental Ergonomics, USARIEM, Natick, MA*, p. 5.

Bruse, M., 1999. Die Auswirkungen kleinskaliger Umweltgestaltung auf das Mikroklima. *Dissertation*, Ruhr Universität Bochum.

Bruse, M. & Fler, H., 1998. Simulating surface-plant-air-interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software*, 13, pp. 373-384.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2019. Energiedaten: Gesamtausgabe. *Webseite: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energie-daten-gesamtausgabe.html>* [Zugriff: 11.05.2020]

Bundesregierung, 1994. Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (idF v. 16.8.1994). *Bundesgesetzblatt, Bonn*, 55(Teil I), pp. 2121-2124.

Bundesregierung, 2007. Energieeinsparverordnung (EnEV), Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden. *Bundesgesetzblatt, Bonn*, 34(Teil I), pp. 1519-1563.

Chen, F. & Dudhia, J., 2001. Coupling an Advanced Land-Surface-Hydrology Model with the Penn State-NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity. *Monthly Weather Review*, 129, pp. 569-585.

Deardorff, J. W., 1987. Efficient prediction of ground surface temperature and moisture with inclusion of a layer of vegetation. *J. Geophys. Research*, 83, pp. 188-193.

DIN EN ISO 6946:2018-03, 2018. Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren (ISO 6946:2017).

Eiband, W., 2004. Modellraumprüfstand mit dynamischer Simulation klimatischer Einflussfaktoren zur Untersuchung von Raumheizsystemen. *Dissertation*, Technische Universität München.

- Eumorfopoulou, E. A. & Kontoleon, K. J., 2009. Experimental approach to the contribution of plant-covered walls to the thermal behaviour of building envelopes. *Building and Environment*, 44(5), pp. 1024-1038.
- Franco, P., Szliwowski, H., Dramaix, M. & Kahn, A., 2000. Influence of Ambient Temperature on Sleep Characteristics and Autonomic Nervous Control in Healthy Infants. *Sleep*, 23(3), pp. 401-407.
- Früh, B., Becker, P., Deutschländer, T., Hessel, J. D., Kossmann, M., Mieskes, I., Namyslo, J., Roos, M., Sievers, U., Steigerwald, T., Turau, H. & Wienert, U., 2011. Estimation of climate change impacts on the urban heat load using an urban climate model and regional climate projections. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50, pp. 167-184.
- Gill, S. E., Handley, J. F., Ennos, A. R. & Pauleit, S., 2007. Adapting cities for climate change: The role of green infrastructure. *Built Environment*, 33, pp. 115-133.
- Groß, G., 1994. ASMUS - Ein numerisches Modell zur Berechnung der Strömung und der Schadstoffverteilung im Bereich einzelner Gebäude - Teil 1: Das Strömungsfeld. *Meteorologische Zeitschrift*, 3, pp. 267-274.
- Groß, G., 1997. ASMUS - Ein numerisches Modell zur Berechnung der Strömung und der Schadstoffverteilung im Bereich einzelner Gebäude - Teil 2: Schadstoffausbreitung und Anwendung. *Meteorologische Zeitschrift*, 6, pp. 130-136.
- Groß, G., 2010. Modellbeschreibung von ASMUS. - Werkstattbericht des Instituts für Meteorologie und Klimatologie der Leibniz Universität Hannover, Nr. 7. *Webseite: http://cmsv057c.rrzn.uni-hannover.de/fileadmin/umwelt2/doku/ASMUS_7-2011.pdf* [Zugriff: 23.05.2012].
- Groß, G., 2012. Effects of different vegetation on temperature in an urban building environment. Micro-scale numerical experiments. *Meteorologische Zeitschrift*, 21, pp. 399-412.
- Günther, R., 2010. Ein mikroskaliges Modell: Aufbau - Eingangsdaten - Anwendung. *Bachelorarbeit; Leibniz Universität Hannover*.
- Günther, R., 2012. Einfluss von Bäumen auf das Stadtklima und die thermische Behaglichkeit - Simulationen mit einem mikroskaligen Modellsystem. *Masterarbeit, Leibniz Universität Hannover*.
- Günther, R., 2014. The role of soil water content for microclimatic effects of green roofs and urban trees - a case study from Berlin, Germany. *Journal of Heat Island Institute International*, 9(2), pp. 19-25.
- Hay, J. & McKay, D., 1985. Estimating solar irradiance on inclined surfaces: A review and assesment of methodologies. *International Journal of Solar Energy*, 3, pp. 203-240.
- Heissler, G. M., 1986. Effects of individual trees on the solar radiation climate of small buildings. *Urban Ecology*, 9(3-4), pp. 337-359.

- Hien, W. N., Yok, T. P. & Yu, C., 2007. Study of thermal performance of extensive rooftop greenery systems in the tropical climate. *Building and Environment*, 42(1), pp. 25-54.
- Hupfer, P. & Kuttler, W., 2005. *Witterung und Klima*. Wiesbaden: Teubner Verlag.
- Institut für sozial ökologische Forschung, 2017. Trotz Hitzewelle - Noch verzichtet die Mehrheit der deutschen auf Klimaanlage. *Webseite: <http://www.isoe.de/medien/news/news-single/trotz-hitzewelle-noch-verzichtet-die-mehrheit-der-deutschen-auf-klimaanlagen/>* [Zugriff am 23.01.2020].
- Jaffal, I., Ouldboukhitine, S.-E. & Belarbi, R., 2012. A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable Energy*, 43, pp. 157-164.
- Kasten, F., 1983. Parametrisierung der Globalstrahlung durch Bedeckungsgrad und Trübungsfaktor. *Annalen der Meteorologie*, 20, pp. 49-50.
- Kasten, F., 1980. A simple parametrization of the pyrheliometric formula for determining the Linke turbidity factor. *Meteorologische Rundschau*, 33, pp. 124-127.
- Kasten, F. & Young, A. T., 1989. Revised optical air mass tables and approximation formula. *Applied Optics*, 28, pp. 4735-4738.
- Köhler, M., Schmidt, M., Grimme, F. W., Laar, M., Paiva, V. & Tavares, S., 2002. Green roofs in temperate climates and in the hot-humid tropics – far beyond the aesthetics. *Environmental Management and Health*, 13(4), pp. 382-391.
- Krause, C. & Schulz, C., 1998. Aufenthaltszeiten der deutschen Bevölkerung im Innenraum, im Freien, im Straßenverkehr. *Umweltmedizinische Forschung Praxis*, 3(4), p. 249.
- Kuttler, W., 2011. Climate change in urban areas, Part 1, Effects. *Environmental Science Europe (ESEU)*, 23, pp. 1-12.
- Leech, J. A., Burnett, R., Nelson, W., Aaron, S. D. & Raizenne, M., 2000. Outdoor air pollution epidemiologic studies. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 161(3), p. 308.
- Maronga, B., Gross, G., Raasch, S., Banzhaf, S., Forkel, R., Heldens, W., Kanani-Sühring, F., Matzarakis, A., Mauder, M., Pavlik, D., Pfafferott, J., Schubert, S., Seckmeyer, G., Sieker, H. & Winderlich, K., 2018. Development of a new urban climate model based on the model PALM - Project overview, planned work, and first achievements. *Meteorologische Zeitschrift*, 28(2), pp. 105-109.
- Maronga, B., Banzhaf, S., Burmeister, C., Esch, T., Forkel, R., Fröhlich, D., Fuka, V., Gehrke, K. F., Geletic, J., Giersch, S., Gronemeier, T., Groß, G., Heldens, W., Hellsten, A., Hoffmann, F., Inagaki, A., Kadasch, E., Kanani-Sühring, F., Ketelsen, K., Khan, B. A., Knigge, C., Knoop, H., Krc, P., Kurppa, M., Maamari, H., Matzarakis, A., Mauder, M., Pallasch, M., Pavlik, D., Pfafferott, J., Resler, J., Rissmann, S., Russo, E., Salim, M., Schrempf, M., Schwenkel, J., Seckmeyer, G., Schubert, S., Sühring, M., von Tils, R., Vollmer, L., Ward, S., Witha, B., Wurps, H., Zeidler, J. & Raasch, S., 2020. Overview of the PALM model system 6.0. *Geoscientific Model Development*, 13, pp. 1335-1372.

- Matzinger, A., Riechel, M., Remy, C., Schwarzmüller, H., Rouault, P., Schmidt, M., Offermann, M., Strehl, C., Nickel, D., Pallasch, M., Sieker, H., Köhler, M., Kaiser, D., Möller, C., Büter, B., Leßmann, D., von Tils, R., Säumel, I., Pille, L., Winkler, A., Bartel, H., Heise, S., Heinzmann, B., Joswig, K., Rehfeld-Klein, M. & Reichmann, B., 2017. Zielorientierte Planung von Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung - Ergebnisse des Projekts KURAS. *Webseite: <http://www.kuras-projekt.de/index.php?id=76>* [Zugriff am 09.05.2020]
- McPherson, E. G., Herrington, L. P. & Heisler, G. M., 1988. Impact of vegetation on residential heating and cooling. *Energy and Buildings*, 12(1), pp. 41-51.
- McPherson, E. G., Simpson, J. R. & Livingston, M., 1989. Effects of three landscape treatments on residential energy and water use in Tucson, Arizona. *Energy and Buildings*, 13, pp. 127-138.
- Morakinyo, T. E., Balogun, A. A. & Adegun, O. B., 2013. Comparing the effect of trees on thermal conditions of two typical urban buildings. *Urban Climate*, 3, pp. 76-93.
- Niachou, A., Papakonstantinou, K., Santamouris, M., Tsangrassoulis, A. & Mihalakakou, G., 2001. Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and Buildings*, 33(7), pp. 719-729.
- Orlanski, I., 1975. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 56(5), pp. 527-530.
- Ouldboukhitine, S. E., Belarbi, R. & Sailor, D. J., 2014. Experimental and numerical investigation of urban street canyons to evaluate the impact of green roof inside and outside buildings. *Applied Energy*, 114, pp. 273-282.
- Patrinos, A. & Kistler, A., 1977. A numerical study of the Chicago lake breeze. - Boundary Layer Meteorology. *Boundary Layer Meteorology*, 12, pp. 93-123.
- Pfafferott, J. & Becker, P., 2008. Erweiterung des Hitzewarnsystems um die Vorhersage der Wärmebelastung in Innenräumen. *Bauphysik*, 30(4), pp. 237-243.
- Pout, C. & Hitchin, E. R., 2009. Future environmental impacts of room air-conditioners in Europe. *Building Research and Information*, 37, pp. 358-368.
- Raasch, S. & Schröter, M., 2001. A large-eddy simulation model performing on massive parallel computers. *Meteorologische Zeitschrift*, 10, pp. 363-372.
- Salim, M.H., Schlünzen, K.H., Grawe, D., Boettcher, M., Gierisch, A.M.U. & Fock, B., 2018. The microscale obstacle-resolving meteorological model MITRAS v2.0: model theory. *Geoscientific Model Development*, 11, pp. 3427-3445.
- Schlünzen, K.H., Hinneburg, D., Knoth, O., Lambrecht, M., Leitl, B., Lopez, S., Lüpkes, C., Pankus, H., Renner, E., Schatzmann, M., Schoenemeyer, T., Trepte, S. & Wolke, R., 2003. Flow and Transport in the Obstacle layer: First Results of the Micro-Scale Model MITRAS. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 44, pp. 113-130.
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, 2011. *Stadtentwicklungsplan Klima - Urbane Lebensqualität im Klimawandel sichern*. Berlin: Kulturbuch-Verlag GmbH.

- Shashua-Bar, L. & Hoffman, M. E., 2002. The Green CTTC model for predicting the air temperature in small urban wooded sites. *Building and Environment*, 37(12), pp. 1279-1288.
- Sieker, H., Steyer, R., Büter, B., Leßmann, D., von Tils, R., Becker, C. & Hübner, S., 2019. *Untersuchung der Potentiale für die Nutzung von Regenwasser zur Verdunstungskühlung in Städten, Abschlussbericht*. Berlin: Umweltbundesamt.
- Stull, R. B., 1998. *An introduction to boundary layer meteorology*. London: Kluwer Academic.
- Susca, T., Gaffin, S. R. & Dell'Osso, G. R., 2011. Positive effects of vegetation: urban heat island and green roofs. *Environmenta Pollution*, 159(8-9), pp. 2119-2126.
- Tipler, P. A. & Mosca, G., 2006. *Physik*. 2. Auflage, München: Elsevier GmbH.
- Tjernström, M., 1989. Some tests with a surface energy balance scheme including a bulk parametrization for vegetation in a mesoscale model. *Boundary Layer Meteorology*, 48, pp. 36-68.
- Umweltbundesamt, 2019. Heizen, Raumtemperatur. *Webseite: <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/heizen-bauen/heizen-raumtemperatur#textpart-2>* [Zugriff am 08 12 2019].
- UNFCCC COP21, 2015. Adoption of the Paris Agreement, United Nations Framework Convention on Climate Change, *Webseite: <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>* [Zugriff: 09.05.2020].
- VDI 3787 Blatt 2, 2008. Umweltmeteorologie, Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung, Teil I: Klima. *Technischer Report, Verein Deutscher Ingenieure*, p. 32.
- VDI 3789 Blatt 2, 1994. Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Oberflächen Berechnung der kurz- und langwelligen Strahlung. *Technischer Report, Verein Deutscher Ingenieure*, p. 52.
- von Tils, R., 2017. Effect of trees and greening of buildings on the indoor heating and cooling load – microscale numerical experiment. *Journal of Heat Island Institute International*, 12(2), pp. 35-39.
- Wang, Z., Bou-Zeid, E. & Smith, J. A., 2013. A coupled energy transport and hydrological model for urban canopies evaluated using a wireless sensor network. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 139, pp. 1643-1657.
- Wang, Y., Bakker, F., Groot, R. d. & Wörtche, H., 2014. Effect of ecosystem services provided by urban green infrastructure on indoor environment: A literature review. *Building and Environment*, 77, pp. 88-100.
- Wong, N. H., Tan, A. Y., Tan, P. Y. & Wong, N. C., 2009. Energy simulation of vertical greenery systems. *Energy and Buildings*, 41(12), pp. 1401-1408.
- World Meteorological Organization, 2019. FAQs - Climate. *Webseite: <https://public.wmo.int/en/about-us/FAQs/faqs-climate>* [Zugriff am 08 12 2019].

Zinzi, M. & Agnoli, S., 2012. Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island technique for residential buildings in the Mediterranean region. *Energy and Buildings*, 55, pp. 66-76.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation wurde betreut von Prof. Dr. Günter Groß, dem ich sehr herzlich danken möchte. Seine professionelle Anleitung, als auch die Freiheit zum eigenständigen wissenschaftlichen Arbeiten habe ich sehr genossen, nicht nur während der Promotion, sondern auch schon während des Bachelor- und Masterstudiengangs. Es ist mir eine Freude, dass ich auch bei GEO-NET weiterhin auf seinen wissenschaftlichen Rat zählen kann.

Mein Dank gilt auch Prof. Dr. Siegfried Raasch und Prof. Dr. Dieter Scherer, die sich bereit erklärt haben, als Korreferenten zu fungieren.

Ich möchte mich bei Peter Trute, Dr. Björn Büter, Dominika Leßmann und meinen Kollegen bei GEO-NET bedanken. Ohne sie wäre die Weiterentwicklung des Innenraummodells in einem Forschungsprojekt nicht möglich gewesen. Ihre Anregungen und Kollegialität weiß ich sehr zu schätzen.

Ich danke Viola Hilger, Dr. Linda Voß, Gregor Meusel und Ina von Tils für das Korrektur lesen.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie bedanken. Meine Eltern haben mich immer sehr unterstützt und auf die Idee gebracht Meteorologie zu studieren. Meiner Ehefrau Ina von Tils möchte ich sehr herzlich danken. Ihr offenes Ohr für meine Probleme und ihre unermessliche Unterstützung seit vielen Jahren könnte größer nicht sein. Ich danke Dir.

Tabellarischer Lebenslauf

Name: Robert von Tils
geb. Günther

Geburtsdatum: 04.04.1984

Geburtsort: Duisburg

Familienstand: verheiratet

Berufliche Tätigkeit:

08/2014 – Heute GEO-NET Umweltconsulting GmbH
Wissenschaftlich-technischer Mitarbeiter

06/2013 – 02/2019 Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
Institut für Meteorologie und Klimatologie
Wissenschaftlicher Mitarbeiter

08/2012 – 05/2013 Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
ForWind – Zentrum für Windenergieforschung
Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Studium:

07/2013 – Heute Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
Promotionsstudiengang Meteorologie

10/2010 – 07/2012 Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
Studiengang Master Meteorologie mit Abschluss

10/2006 – 09/2010 Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
Studiengang Bachelor Meteorologie

10/2003 – 09/2006 Westfälische Wilhelms-Universität Münster
Studiengang Diplom Mathematik ohne Abschluss

Schulische Ausbildung:

2003 Gymnasium Otterndorf, Abitur

Seelze, den 14.05.2020

Veröffentlichungen Robert von Tils geb. Günther

- chronologisch nach Typ -

Begutachtete Zeitschriftenartikel

Günther, R., 2014. The role of soil water content for microclimatic effects of green roofs and urban trees - a case study from Berlin, Germany. *Journal of Heat Island Institute International*, 9(2), pp. 19-25.

von Tils, R., 2017. Effect of trees and greening of buildings on the indoor heating and cooling load – microscale numerical experiment. *Journal of Heat Island Institute International*, 12(2), pp. 35-39.

Maronga, B., Banzhaf, S., Burmeister, C., Esch, T., Forkel, R., Fröhlich, D., Fuka, V., Gehrke, K. F., Geletic, J., Giersch, S., Gronemeier, T., Groß, G., Heldens, W., Hellsten, A., Hoffmann, F., Inagaki, A., Kadasch, E., Kanani-Sühling, F., Ketelsen, K., Khan, B. A., Knigge, C., Knoop, H., Krc, P., Kurppa, M., Maamari, H., Matzarakis, A., Mauder, M., Pallasch, M., Pavlik, D., Pfaffertott, J., Resler, J., Rissmann, S., Russo, E., Salim, M., Schrempf, M., Schwenkel, J., Seckmeyer, G., Schubert, S., Sühling, M., von Tils, R., Vollmer, L., Ward, S., Witha, B., Wurps, H., Zeidler, J. & Raasch, S., 2020. Overview of the PALM model system 6.0. *Geoscientific Model Development*, 13, pp. 1335-1372.

Abschlussarbeiten und Projektberichte

Günther, R., 2010. Ein mikroskaliges Modell: Aufbau - Eingangsdaten - Anwendung. *Bachelorarbeit; Leibniz Universität Hannover*.

Günther, R., 2012. Einfluss von Bäumen auf das Stadtklima und die thermische Behaglichkeit - Simulationen mit einem mikroskaligen Modellsystem. *Masterarbeit, Leibniz Universität Hannover*.

Matzinger, A., Riechel, M., Remy, C., Schwarzmüller, H., Rouault, P., Schmidt, M., Offermann, M., Strehl, C., Nickel, D., Pallasch, M., Sieker, H., Köhler, M., Kaiser, D., Möller, C., Büter, B., Leßmann, D., von Tils, R., Säumel, I., Pille, L., Winkler, A., Bartel, H., Heise, S., Heinzmann, B., Joswig, K., Rehfeld-Klein, M. & Reichmann, B., 2017. Zielorientierte Planung von Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung - Ergebnisse des Projekts KURAS. *Webseite: <http://www.kuras-projekt.de/index.php?id=76>* [Zugriff am 09.05.2020]

Groß, G. & von Tils, R., 2017. INIS - Verbundprojekt KURAS: Konzepte für urbane Regenwasserbewirtschaftung und Abwassersysteme, Teilprojekt 9 : Schlussbericht : Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2013-31.10.2016, Fördermaßnahme: Intelligente und multifunktionelle Infrastruktursysteme für eine zukunftsfähige Wasserversorgung und Abwasserentsorgung – INIS. *Leibniz Universität, Institut für Meteorologie und Klimatologie*, Förderkennzeichen BMBF 033W013J, Verbund-Nummer 01134147.

Sieker, H., Steyer, R., Büter, B., Leßmann, D., von Tils, R., Becker, C. & Hübner, S., 2019. *Untersuchung der Potentiale für die Nutzung von Regenwasser zur Verdunstungskühlung in Städten, Abschlussbericht*. Berlin: Umweltbundesamt.

Konferenzbeiträge

Drüke, S., Steinfeld, S., Heinemann, S., Günther, R., 2014. Generation of a wind and stability atlas for the optimized utilization of offshore wind resources in the North Sea Region. *European Geosciences Union, General Assembly 2014, 27.04. – 02.05.2014, Wien, Österreich*, Poster.

Günther, R., 2014. Effects of multiple decentralized measures for stormwater management in urban areas in the city of Berlin on the urban climate and human thermal comfort. *7th Japanese-German-Meeting on Urban Climatology, 06. – 10.10.2014, Hannover, Deutschland*, Vortrag.

Matzinger, A., Schmidt, M., Riechel, M., Hein, A., Bräcker, J., Strehl, C., Nickel, D., Libbe, J., Sieker, H., Pallasch, M., Köhler, M., Kaiser, D., Brückmann, S., Möller, C., Büter, B., Groß, G., Günther, R., Säumel, I., Taute, T., Schwarzmüller, H., Bartel, H., Heise, S., Remy, C., Sonnenberg, H., Schmitt, T., Heinzmann, B., Joswig, K., Rehfeld-Klein, M., Reichmann, B. & Rouault, P., 2014. Quantifying the effects of urban stormwater management - towards a novel approach for integrated planning. *13th International Conference on Urban Drainage, 07.09. – 12.09.2014, Sarawak, Malaysia*, Vortrag.

Günther, R., 2015. Methoden zur Abschätzung der thermischen Belastung und des Potentials von Maßnahmen - eine Fallstudie für Berlin. *METTOOLS IX, 17.03. – 19.03.2015, Offenbach, Deutschland*, Poster.

Günther, R., 2015. Einfluss des Klimawandels auf das Stadtklima und die thermische Behaglichkeit - eine Fallstudie für Berlin. *10. Deutsche Klimatagung, 21.09. - 24.09.2015, Hamburg, Deutschland*, Poster.

von Tils, R. & Lessmann, D., 2016. Wasserwirtschaftliche Maßnahmen und das Stadtklima - Maßnahmenwirkung, *KURAS - Stakeholderworkshop, 14.09.2016, Berlin, Deutschland*, Poster.

Leßmann, D. & von Tils, R., 2016. Effekte von Regenwasserbewirtschaftung auf das Stadtklima. *KURAS - Abschlusskonferenz, 26.10.2016, Berlin, Deutschland*, Poster.

von Tils, R., 2017. Effect of trees and greening of buildings on the indoor heating and cooling load – microscale numerical experiment. *8th Japanese-German-Meeting on Urban Climatology, 25. – 29.03.2017, Osaka, Japan*, Vortrag.

Kanani-Sühring, F., Maronga, B., Groß, G., Raasch, S., Banzhaf, S., Büter, B., Esch, T., Forkel, R., Fröhlich, D., Gronemeier, T., Heldens, W., Lang, T., Kadasch, E., Khan, H., Maamari, H., Matzarakis, A., Mauder, M., Pallasch, M., Pavlik, D., Pfafferott, Russo, E., Salim, M., Schaap, M., Schneider, C., Schrempf, M., Seckmeyer, G., Schubert, S., Sieker, H., Sühring, M., Trusilova, K., von Tils, R., Ward, S. & Zeidler, J., 2017. Projekt MOSAIK: Modellbasierte Stadtplanung und Anwendung im Klimawandel –

Entwicklung des neuen Stadtklimamodells PALM-4U. 9. *BIOMET-Tagung*, 28.11 – 30.11.2017, Stralsund, Deutschland, Vortrag.

von Tils, R., 2017. Einfluss von Bäumen, Fassaden- und Dachbegrünung auf die Hitzebelastung in Innenräumen – mikroskaliges numerisches Experiment. 9. *BIOMET-Tagung*, 28.11. - 30.11.2017, Stralsund, Deutschland, Vortrag.

Maronga, B., Groß, G., Raasch, S., Kanani-Sühling, F., Sühling, M., Banzhaf, S., Belda, M., Büter, B., Esch, T., Forkel, R., Fröhlich, D., Gronemeier, T., Heldens, W., Hellsten, A., Lang, T., Kadasch, E., Ketelsen, K., Khan, H., Krč, P., Maamari, H., Matzarakis, A., Mauder, M., Meusel, G., Pallasch, M., Pavlik, D., Pfafferott, J., Resler, J., Russo, E., Salim, M., Schaap, M., Schneider, C., Schrempf, M., Schubert, S., Seckmeyer, G., Sieker, H., Trusilova, K., von Tils, R., Ward, S. & Zeidler, J., 2018. Building-resolving large-eddy simulations for entire Berlin (Germany) – first results using the high-performance urban microscale model PALM-4U. *10th International Conference on Urban Climate/14th Symposium on the Urban Environment*, 06.08. – 10.08.2018, New York, USA, Vortrag.

von Tils, R., 2018. Potential for the use of rainwater for evapotranspirative cooling of buildings and city quarters. *10th International Conference on Urban Climate/14th Symposium on the Urban Environment*, 06.08. – 10.08.2018, New York, USA, Vortrag.

Maronga, B., Groß, G., Raasch, S., Kanani-Sühling, F., Sühling, M., Banzhaf, S., Belda, M., Büter, B., Esch, T., Forkel, R., Fröhlich, D., Gronemeier, T., Heldens, W., Hellsten, A., Lang, T., Kadasch, E., Ketelsen, K., Khan, H., Krč, P., Maamari, H., Matzarakis, A., Mauder, M., Meusel, G., Pallasch, M., Pavlik, D., Pfafferott, J., Resler, J., Russo, E., Salim, M., Schaap, M., Schneider, C., Schrempf, M., Schubert, S., Seckmeyer, G., Sieker, H., Trusilova, K., von Tils, R., Ward, S. & Zeidler, J., 2018. Gebäudeauflösende Large-Eddy Simulation von Berlin: erste Ergebnisse des leistungsstarken mikroskaligen Stadtklimamodells PALM-4U. *METTOOLS X*, 25.09. – 27.09.2018, Braunschweig, Deutschland, Vortrag.

Maronga, B., Raasch, S., Groß, G., Kanani-Sühling, F., Sühling, M., Banzhaf, S., Belda, M., Büter, B., Esch, T., Forkel, R., Fröhlich, D., Gronemeier, T., Heldens, W., Hellsten, A., Lang, T., Kadasch, E., Ketelsen, K., Khan, H., Krč, P., Kurppa, M., Maamari, H., Matzarakis, A., Mauder, M., Meusel, G., Pallasch, M., Pavlik, D., Pfafferott, J., Resler, J., Rissmann, S., Russo, E., Salim, M., Schaap, M., Schneider, C., Schrempf, M., Schubert, S., Seckmeyer, G., Sieker, H., Trusilova, K., von Tils, R., Ward, S. & Zeidler, J., 2019. PALM-4U: Ein neues Stadtklimamodell zur Anwendung auf Hochleistungsrechnern: Modellüberblick und Leistungsfähigkeit. *DACH*, 18.03. – 22.03.2019, Garmisch-Partenkirchen, Deutschland, Vortrag.

Maronga, B., Raasch, S., Groß, G., Kanani-Sühling, F., Sühling, M., Banzhaf, S., Belda, M., Büter, B., Esch, T., Forkel, R., Fröhlich, D., Gronemeier, T., Heldens, W., Hellsten, A., Lang, T., Kadasch, E., Ketelsen, K., Khan, H., Krč, P., Kurppa, M., Maamari, H., Matzarakis, A., Mauder, M., Meusel, G., Pallasch, M., Pavlik, D., Pfafferott, J., Resler, J., Rissmann, S., Russo, E., Salim, M., Schaap, M., Schneider, C., Schrempf, M., Schubert, S., Seckmeyer, G., Sieker, H., Trusilova, K., von Tils, R., Ward, S. & Zeidler, J., 2019. PALM-4U: Ein neues Stadtklimamodell zur Anwendung auf Hochleistungsrechnern: Modellüberblick und Leistungsfähigkeit. *DACH*, 18.03. – 22.03.2019, Garmisch-Partenkirchen, Deutschland, Vortrag.

J., 2019. Gebäudeauflösende Simulationen von Berlin mit dem neuen Stadtklimamodell PALM-4U. *DACH, 1803*. – 22.03.2019, *Garmisch-Partenkirchen, Deutschland*, Vortrag.