



Bachelorarbeit

im Fachbereich  
Elektrotechnik und Informationstechnik

# Untersuchung des Einflusses eines be- pflanzten Turms auf die Umgebungstem- peratur

Vorgelegt von: Lara Ostermeyer  
Studienbereich: Mechatronik  
Matrikelnummer: 1227899  
Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Tobias Müller  
Zweitgutachter: Frank Hartmann  
Datum der Abgabe: 27.03.2025



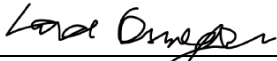
## Eidesstattliche Erklärung

Ich, Lara Ostermeyer, Matrikelnummer 1227899, versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit zum Thema

*Untersuchung des Einflusses eines bepflanzten Turms auf die Umgebungstemperatur*

eigenständig und nur unter Zuhilfenahme der angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst habe. Alle Zitate habe ich als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Fulda, den 27.03.2025

  
\_\_\_\_\_  
Lara Ostermeyer



## Kurzfassung

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde der Einfluss eines bepflanzten Turms auf die Umgebungstemperatur untersucht. Dies geschah durch analytische Berechnungen und anschließenden numerischen Simulationen. Außerdem wurde die mögliche Feinstaubaufnahme durch diesen Turm berechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass der bepflanzte Turm die Umgebungstemperatur nur sehr wenig beeinflusst. Die Feinstaubaufnahme hingegen kann einen größeren Effekt auf die Umgebung bewirken.



## Inhalt

Kurzfassung .....	3
Abkürzungsverzeichnis .....	6
1. Zielstellung .....	7
2. Einleitung.....	8
3. Grundlagen der Verdunstung.....	8
3.1 Berechnung der Verdunstung .....	8
3.2 Anwendung der Verdunstungsberechnung .....	10
4. Berechnung der Temperatur am „Greentower“ .....	11
4.1 Temperatur am „Greentower“ .....	11
4.2 Temperaturänderung um den „Greentower“ .....	12
4.3 Berechnungsschablonen .....	12
5. Ergebnisse.....	13
5.1 Einflüsse von verschiedenen Parametern .....	13
5.2 Beispielrechnungen .....	14
5.2.1 Werte vom 07.07.2023 .....	14
5.2.2 Werte vom 12.07.2023 .....	15
5.2.3 Werte vom 30.07.2023 .....	15
5.3 Temperaturangleichung im Abstand vom „Greentower“ .....	16
5.4 Berechnung mit einem Pflanzenkoeffizienten .....	17
5.5 Vergleich der berechneten Verdunstung mit Messdaten .....	18
5.6 Wind durch den „Greentower“ .....	19
6. Simulation mit OpenFOAM .....	21
6.1 Einführung .....	21
6.2 Berechnung mit dem „Greentower“ .....	22
6.2.1 Pre-processing .....	22
6.2.2 Solving.....	22
6.2.3 Post-processing.....	23
6.3 Auswertung der Ergebnisse.....	23
6.3.1 Wahl des Solvers.....	23
6.3.2 Verlauf der Geschwindigkeit .....	24
6.3.3 Berechnungen mit einem „Greentower“ .....	25
6.3.4 Berechnungen mit mehreren „Greentowern“ .....	26
7. Weitere Einflüsse des „Greentowers“ auf die Umgebung .....	29
7.1 Aufnahme von CO <sub>2</sub> durch den „Greentower“ .....	29
7.2 Aufnahme von Feinstaub durch den „Greentower“ .....	30



7.2.1	Allgemeine Informationen.....	30
7.2.2	Beispielrechnung .....	30
8.	Fazit .....	33
I.	Literaturverzeichnis.....	34
II.	Internetquellen.....	36
A	Anhang.....	37
A.1	Tabellen.....	37
A.2	Herleitung für die Temperaturgleichung .....	41



## Abkürzungsverzeichnis

a	Albedo/Reflexionswert
$A_{\text{Verd}}$	Verdunstungsfläche
B	Bodenwärmestrom
c	Verschiebung auf der x-Achse
$cf(z)$	Umrechnungsfaktor für die Windgeschwindigkeit
$c_L$	Spezifische Wärmekapazität der Luft
$c_p$	Spezifische Wärme der Luft
d	Verschiebung auf der y-Achse
$e_a$	Tatsächlicher Dampfdruck
EH	Nettostrahlungsäquivalent
$E_{\text{Lufterw}}$	Verfügbare Energie zur Lufterwärmung
$e_s$	Sättigungsdampfdruck
$ET_a$	Reale Evapotranspiration
$ET_p$	Potenzielle Evapotranspiration
$f(v)$	Windfunktion
GT	„Greentower“
h	Höhe der Bepflanzung
H	Höhe des Standorts über Normal-Null
I	Effektive Abstrahlung
$k_c$	Pflanzenkoeffizient
$L^*$	Übergangswärme
LAI	Blattflächenindex
$P_w$	Bewölkungsgrad
$Q^*$	Wärmestrom
$Q_m$	Massenstrom
r	Radius vom Mittelpunkt des Greentowers
$r_a$	Aerodynamischer Widerstand
RG	Globalstrahlung
$r_i$	Radius des Greentowers
$R_n$	Nettostrahlung
$r_s$	Bestandswiderstand
$S_{\text{max}}$	Maximal mögliche Sonnenscheindauer
$S_t$	Tatsächliche Sonnenscheindauer
t	Uhrzeit
$T(r)$	Temperatur in Abhängigkeit vom Radius
$T_L$	Lufttemperatur in 2m Höhe
$T_O$	Oberflächentemperatur
u	Relative Luftfeuchtigkeit
$v_{2m}$	Windgeschwindigkeit in 2m Höhe
z	Höhe der Windgeschwindigkeit über Bepflanzung oder Substrat
$\Delta$	Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve
$\Delta T_{\text{Luft}}$	Differenz zur Lufttemperatur
$\lambda_L$	Wärmeleitfähigkeit der Luft
$\lambda_w$	Latente Wärme von Wasser
$\rho_L$	Dichte der Luft
Y	Psychrometerkonstante
$Y_{\text{mod}}$	Modifizierter Wert der Psychrometerkonstante



## 1. Zielstellung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Auswirkungen eines bepflanzten Turms, „Greentower“ genannt, in einer städtischen Umgebung zu untersuchen. Insbesondere die Lufttemperatur wird betrachtet. Dazu wird nach der ersten Recherche in Kapitel 3 zur Verdunstung an Pflanzenoberflächen in Kapitel 4 eine Rechenmethode entwickelt, die mithilfe von „Microsoft Excel“ im 5. Kapitel für einige Beispielrechnungen genutzt wird. In Kapitel 6 werden die berechneten Werte in das Simulationsprogramm „OpenFOAM“ übertragen, um die Ergebnisse in einem zeitlichen Verlauf visuell darstellen zu können.

Der „Greentower“ besteht aus einem 1,8m hohen Unterbau, der einen Wassertank beherbergt und einem 3,7m hohen Aufbau, der mit modularer Bepflanzung der Firma „Gefässerie“ umrandet ist. Der Aufbau hat einen Durchmesser von 1,5m. Als Größe der Verdunstungsfläche wurden 20m<sup>2</sup> angenommen.

Die Temperaturänderung, die der „Greentower“ bewirkt, wurde mit der Energie berechnet, die durch die Verdunstung der Pflanzen der Luft entzogen wird. Während bei bepflanzten Dächern oder Wänden ein großer Anteil der Abkühlung unter beziehungsweise hinter den Pflanzen durch den Schattenwurf entsteht (Hoelscher et al. 2016, S. 101), muss der „Greentower“ diese vor allem durch die Verdunstung erreichen. Der Schatten, der geworfen wird, wurde für die Berechnung vernachlässigt.

Für die Simulation mit OpenFOAM werden die Ergebnisse aus der analytischen Rechnung übertragen und können so visuell dargestellt werden. Außerdem kann der Einfluss von Wind auf die Verteilung der Temperaturänderung untersucht werden.

Auch weitere Auswirkungen des bepflanzten Turms, insbesondere die Aufnahme von Feinstaub, werden in Kapitel 7 untersucht. Am Schluss wird ein Fazit gezogen, unter welchen Gesichtspunkten sich die Installation eines „Greentowers“ lohnen könnte.



## 2. Einleitung

Mit der Fortschreitung des Klimawandels steigt die durchschnittliche Temperatur der Erde. Diese Entwicklung trifft im besonderen Maße die Städte, die durch ebenfalls fortschreitende Urbanisierung außerdem stetig wachsen. In den Städten sorgt der Effekt der „Urban heat island“ – also der städtischen Hitzeinsel – für höhere Luft- und Oberflächentemperaturen (Akbari et al. 2015, S. 2). Diese können für Menschen gesundheitsgefährdend wirken. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, können verschiedene Maßnahmen getroffen werden. So kann versucht werden, den Energieverbrauch zu senken oder bei der Bebauung auf helle und damit gut reflektierende Materialien zu achten. Eine weitere Maßnahme ist die Bereitstellung von Verdunstungsflächen. Dabei kann es sich um Wasser- oder Grünflächen handeln. Über die Verdunstung kann der Luft Energie entzogen werden, die anschließend nicht mehr für Erwärmung zur Verfügung steht. Werden diese Flächen geschickt und großflächig eingesetzt, können sie zur Abkühlung der Städte dienen (Žuvela-Aloise et al. 2016, S. 433ff). Bei der Einrichtung von Grünflächen stehen neben der Errichtung von Parkanlagen, die allerdings den nötigen freien Platz voraussetzen, die Begrünung von Gebäuden durch Gründächer oder bepflanzte Wände im Vordergrund. Dabei müssen die jeweiligen Eigentümer der Gebäude die Bepflanzung genehmigen, installieren und pflegen. Die Kommunen können nur, zum Beispiel durch Förderungen, Anreize zur Begrünung schaffen. Der „Greentower“ kann auch von den Kommunen selbst errichtet werden. Da er um vorhandene Masten und Laternenpfähle gebaut wird und mit etwa 1,8m<sup>2</sup> eine kleine Grundfläche besitzt, werden auch beim Bau in breiten Straßen, zum Beispiel Fußgängerzonen, keine zusätzlichen Flächen benötigt.

## 3. Grundlagen der Verdunstung

Die Verdunstung teilt sich in mehrere Komponenten auf (Fohrer 2016, S. 112f.). Die Evaporation beschreibt die Verdunstung von Oberflächen nach physikalischen Gesetzen. Dazu zählt zum Beispiel die Verdunstung über einer Wasseroberfläche oder dem Erdboden.

Die Transpiration beschreibt die Verdunstung von Pflanzenoberflächen nach biotischen Gesetzen. Sie ist von den Pflanzen regelbar.

Bei der Interzeptionsverdunstung geht es um die Verdunstung von Niederschlag auf Pflanzenoberflächen, der in Form von Regen, Schnee oder Tau auftritt. Die Interzeptionsverdunstung folgt wie die Evaporation physikalischen Gesetzen.

Die Summe aus diesen drei Komponenten bildet die Evapotranspiration. Im Folgenden wird sowohl der Begriff der Verdunstung als auch der Evapotranspiration genutzt.

### 3.1 Berechnung der Verdunstung

Für die Berechnung der Verdunstung gibt es verschiedene Verfahren. Diese reichen von einfachen Formeln wie der nach Blaney-Criddle (Zenker 2003, S. 22), die nur die mittlere Tagestemperatur, die Sonnenscheindauer und die Jahressumme der möglichen Sonnenscheindauer berücksichtigt, über Formeln, zum Beispiel die nach Turc (ebd. S. 23), die Strahlung, Temperatur und Luftfeuchtigkeit beachten, bis hin zum Kombinationsverfahren nach Penman (ebd. S.26), das eine Vielzahl an Faktoren zusammenführt.

Penman-Gleichung aus Zenker (S. 26):

$$ET_p = \frac{\Delta * \frac{R_n}{L} + \gamma * f(v) * (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma}$$

- L = Verdampfungswärme des Wassers, Strahlungsäquivalent für die Verdunstung von 1 mm/d = 28,4 W/(m<sup>2</sup>\*mm\*d) [W/m<sup>2</sup>]
- Δ = Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve [hPa/K]



- $R_n$  = Strahlungsbilanz [ $W/m^2$ ]
- $R_n/L$  = Verdunstungsäquivalent [ $W/m^2$ ]
- $(e_s(T) - e_a)$  = Sättigungsdefizit der Luft [hPa]
- $\gamma$  = Psychrometerkonstante [hPa/K]
- $f(v)$  = Windfunktion nach Dalton [m/s]

Das Penman-Verfahren gilt vor allem für die Verdunstung über freien Wasserflächen und wurde von Monteith für die Verdunstung über Pflanzen weiterentwickelt (Zenker 2003, S.26ff). Dabei basiert das Penman-Monteith-Verfahren auf der Idee, die Widerstände, die das Wasser von der Wurzel bis in die Blätter überwinden muss, ähnlich zu elektrischen Widerständen, als Faktoren zu berücksichtigen (Fohrer 2016, S. 122). Diese Widerstände sind jedoch standort- und pflanzenbezogen und lassen sich schwer festlegen.

Penman-Monteith-Gleichung aus Fohrer (S. 122ff):

$$ET_a = \frac{1}{L^*} * \frac{\Delta * (R_n - B) + \frac{\rho_L * c_p}{r_a} * (e_s * e_a)}{\Delta + \gamma * \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$

- $L^*$  = Übergangswärme für 1mm Verdunstungshöhe [J/kg]
- $\Delta$  = Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve [hPa/K]
- $R_n$  = Nettostrahlung [ $W/m^2$ ]
- $B$  = Bodenwärmestrom [ $W/m^2$ ]
- $\rho_L$  = Luftdichte [ $kg/m^3$ ]
- $c_p$  = spezifische Wärme der Luft [J/(kg\*K)]
- $r_a$  = aerodyn. Widerstand; abhängig von Wind, Höhe und Struktur [s/m]
- $e_s - e_a$  = Sättigungsdampfdruck – Dampfdruck = Sättigungsdefizit der Luft [hPa]
- $\gamma$  = Psychrometerkonstante = 0,65 [hPa]
- $r_s$  = Bestandswiderstand; abhängig von Strahlung und Wasserversorgung [s/m]

Auf dieser Grundlage wurde von Allen die Gras-Referenzverdunstung  $ET_0$  entwickelt, die der Verdunstung über einer Grasfläche mit 12cm Wuchshöhe und einem Reflexionswert von 23% entspricht (Fohrer 2016, S. 123f).

Gras-Referenzverdunstung aus Fohrer (S. 123)

$$ET_p = \frac{\Delta * R_n}{\Delta + \gamma_{mod}} + \frac{90 * \gamma}{\Delta + \gamma_{mod}} * v_{2m} * \frac{e_s}{T+273} * \left(1 - \frac{u}{100}\right) \text{ [l/mm}^2\text{] oder [mm/Tag]}$$

- $R_n$  = Nettostrahlung als Verdunstungsäquivalent [mm/d]
- $\gamma_{mod}$  = modifizierter Wert der Psychrometerkonstante  $\gamma$  mit  $\gamma_{mod} = \gamma * (1 + 0,34 * v_{2m})$  [hPa/K]
- $v_{2m}$  = Windgeschwindigkeit in 2m Höhe [m/s]
- $T_L$  = Lufttemperatur [°C]
- $u$  = rel. Luftfeuchtigkeit [%]

Damit fallen vor allem die Angaben von pflanzenspezifischen Widerständen weg. Bei der Gras-Referenzverdunstung handelt es sich um die sogenannte potenzielle Evapotranspiration  $ET_p$ , die zwar die meteorologischen und geografischen – Höhe über Normalnull und geografische Breite – Gegebenheiten berücksichtigt, aber den Faktor Wasserversorgung außen vorlässt. Bei der realen Evapotranspiration  $ET_a$  muss auch dieser beachtet werden. Mithilfe eines crop-Faktors  $k_c$  kann aus der Gras-Referenzverdunstung die potenzielle Verdunstung für andere Pflanzen ermittelt werden. Dabei spielt für dessen Auswahl je nach Situation nicht nur die Pflanzenart, sondern auch die aktuelle Entwicklungsphase eine Rolle. Bei ausreichender Wasserversorgung entspricht das Ergebnis auch der realen Verdunstung (Fohrer 2016, S.125). Es gibt Tabellen, beispielsweise bei Allen et al. In Chapter 6, in denen für verschiedene Pflanzen und Wachstumsphasen die  $k_c$ -Faktoren aufgelistet sind. Bei diesen Tabellen werden meist nur die Werte für Nutzpflanzen wie Getreide und Gemüse dargestellt, da sie vor allem zur Berechnung des



Wasserbedarfs in der Landwirtschaft verwendet werden. Werte für Zierpflanzen, die für die Berechnung für den „Greentower“ benötigt werden, findet man nicht oder nur verallgemeinert für Blumen im Freiland mit Werten zwischen 0,3 und 1,1 (Bernhardt et al. 2022, S. 94).

### 3.2 Anwendung der Verdunstungsberechnung

Für die Berechnung der potenziellen Verdunstung über eine Pflanzenoberfläche wurde hier auf das Verfahren nach Penman zurückgegriffen, das bei Schöniger (2008, S. 3ff) beschrieben wird. Das ist grundsätzlich zur Berechnung der Verdunstung über Wasseroberflächen gedacht. Es zeigt sich aber in Berechnungen mit aktuellen Wetterdaten in Kapitel 5.5, dass dieses Verfahren sehr ähnliche Ergebnisse zu den ausgegebenen Verdunstungshöhen des Deutschen Wetterdienstes liefert. Außerdem werden hier im Gegensatz zum kombinierten Verfahren nach Penman-Monteith keine aktuellen Werte der Globalstrahlung benötigt, die nur für einige Standorte und auch nicht für Fulda vorliegen. Statt aktueller Strahlungswerte wird hierbei mit durchschnittlichen Monatswerten für die extraterrestrische Strahlung  $RE$  (Tabelle 4) und den maximal möglichen Sonnenstunden pro Tag  $s_{max}$  (Tabelle 5) gerechnet, die in Tabellenform für verschiedene Breitengrade angegeben sind. Als Eingaben werden die geografische Breite, der Monat, die Lufttemperatur  $T_L$ , die relative Luftfeuchtigkeit  $u$ , die Windgeschwindigkeit in 2m Höhe über dem Boden  $v_{2m}$  und die tatsächliche Sonnenscheindauer für den Tag  $s_t$  benötigt. Anschließend werden in mehreren Zwischenschritten die einzelnen Komponenten berechnet und zum Schluss zusammengefügt. Als Albedo- oder Reflexionswert wurde 0,23 angenommen, was dem Wert für die Gras-Referenzverdunstung entspricht. Dieser Wert beschreibt den Anteil der Strahlung, der von der Oberfläche zurückgestrahlt wird.

Penman-Gleichung aus Schöniger (S. 3):

$$ET_p = \frac{\Delta * EH + \gamma * f(v) * (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma}$$

- $\Delta$  = Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve [hPa/K]
- EH = Nettostrahlungsäquivalent [mm/d]
- $\gamma$  = Psychrometerkonstante [hPa/K]
- $f(v)$  = Windfunktion [mm/d\*hPa]
- $e_s$  = Sättigungsdampfdruck [hPa]
- $e_a$  = tatsächlicher Dampfdruck [hPa]
  
- Berechnung Sättigungsdampfdruck  $e_s$  [hPa]
  - o  $e_s = 6,11 * 10^{\frac{7,48 * T}{237 + T}}$
  - o  $T_L$  = Temperatur [°C]
- Berechnung tatsächlicher Dampfdruck  $e_a$  [hPa]
  - o  $e_a = \frac{u}{100} * e_s$
  - o  $u$  = relative Luftfeuchtigkeit [%]
- Berechnung der Globalstrahlung RG [W/m<sup>2</sup>]
  - o  $RG = \left(0,19 + 0,55 * \frac{s_t}{s_{max}}\right) RE$
  - o  $s_t$  = tatsächliche Sonnenstunden [h/d]
  - o  $s_{max}$  = maximale Sonnenstunden [h/d]
  - o RE = Extraterrestrische Strahlung [W/m<sup>2</sup>]
- Berechnung der effektiven Abstrahlung I [W/m<sup>2</sup>]
  - o  $I = 5,67 * 10^{-8} * (T + 273)^4 * (0,56 - 0,08 * \sqrt{e_a}) * \left(0,1 + 0,9 * \frac{s_t}{s_{max}}\right)$
- Berechnung der Nettostrahlung als Strahlungsäquivalent EH [mm/d]
  - o  $EH = \frac{RG * (1 - a) - I}{28,3}$
  - o  $a$  = Albedowert/Reflexionswert
- Berechnung der Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve  $\Delta$  [hPa/K]



- $\Delta = \frac{e_s \cdot 4032}{(237 + T)^2}$
- Berechnung der Windfunktion  $f(v)$  [mm/(d\*hPa)]
  - $f(v) = 0,13 + 0,14 \cdot v_{2m}$
  - $v_{2m}$  = Windgeschwindigkeit in 2m Höhe über dem Boden
- Berechnung der potenziellen Evapotranspiration  $ET_p$  [mm/d]
  - $ET_p = \frac{\Delta \cdot EH + 0,65 \cdot f(v) \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + 0,65}$

Die Verdunstung wird stets in mm pro Tag angegeben. Diese Angabe bedeutet, dass bei einer Verdunstung von 1mm/d ein Volumen an Wasser verdunstet, das einem 1mm hohen Wasserfilm auf einer Fläche von 1m<sup>2</sup> entspricht. Das ist gleichbedeutend mit einem Volumen von 1dm<sup>3</sup> oder 1l. Mit diesen Angaben kann die Energie ermittelt werden, die zur Verdunstung des Wassers benötigt wird. Bei 20°C kann mit einer Energie von 2450J ein Gramm Wasser vom flüssigen in den gasförmigen Zustand umgewandelt werden (Hoelscher et al. 2016, S. 6; nach Schopfer und Brennicke). Um die Rechnung zu vereinfachen, wurde dieser Wert für alle Temperaturen übernommen. Dieser Energieverbrauch kühlt indirekt die Luft, indem die Energie dieser entzogen wird und so nicht mehr zur Erwärmung genutzt werden kann. Bei 20°C besitzt Wasser eine Dichte von 1000kg/m<sup>3</sup>. Als Umrechnung des verdunsteten Wassers in die entsprechende Energie in Joule, wird die Verdunstungshöhe demzufolge mit 2450kJ/mm multipliziert. Zu beachten ist dabei, dass dieser Wert pro Quadratmeter gilt. Bei größeren bepflanzten Flächen muss die Verdunstung also mit dem Flächeninhalt multipliziert werden.

## 4. Berechnung der Temperatur am „Greentower“

### 4.1 Temperatur am „Greentower“

Die Temperatur, die durch die Differenz der Energie aus der Nettostrahlung und der benötigten Energie für die Verdunstung direkt am „Greentower“ entsteht, wird nach der Sonnenlufttemperatur in Glück (2007, S. 25f) berechnet. Die verfügbare Energie zur Lufterwärmung  $E_{Lufterw}$  wird gebildet aus der Differenz zwischen Nettostrahlung  $EH$  und der Energie, die für die reale Verdunstung benötigt wird. Außerdem wird der Wärmestrom der oberen Platte des „Greentowers“ abgezogen. Diese besteht aus Stahl S235JR, besitzt damit eine Wärmeleitfähigkeit von 54W/(m\*K) und ist 1cm dick. Es wurde eine Temperaturänderung von 0,1% der Lufttemperatur angenommen. An heißen Sommertagen ist die verfügbare Energie zur Lufterwärmung  $E_{Lufterw}$  negativ und die Temperatur an der Oberfläche des „Greentowers“ ist kleiner als die umgebende Lufttemperatur.

$$T_O = T_{Luft} + \frac{(1 - a) \cdot \left( \frac{E_{Lufterw}}{A_{Verd}} \right)}{15 \frac{W}{m^2K}}$$

- $T_O$  = Oberflächentemperatur am „Greentower“ [°C]
- $T_L$  = Lufttemperatur in 2m Höhe [°C]
- $a$  = Albedo/Reflexionskoeffizient der Bepflanzung
- $E_{Lufterw}$  = verfügbare Energie zur Lufterwärmung [W]
- $A_{Verd}$  = Verdunstungsfläche [m<sup>2</sup>]
- $15 \frac{W}{m^2K}$  = Gesamtwärmeübergangskoeffizient (Glück 2007, S. 26)



## 4.2 Temperaturänderung um den „Greentower“

Die Temperatur am „Greentower“ wird als Ausgangspunkt zur Berechnung der Temperaturänderung genommen. Dafür wird eine Modifikation der Fourier-Gleichung für ein Rohrvolumen verwendet. Dabei bildet die Oberfläche des „Greentowers“ die „Innenwand“ des Rohres und die Luft außen herum das Rohr selbst.

$$T(r) = T_i - \frac{\dot{Q}}{\lambda * 2\pi * h} * \ln\left(\frac{r}{r_i}\right)$$

- $T(r)$  = Temperatur in Abhängigkeit vom Radius [°C]
- $T_i$  = Oberflächentemperatur am „Greentower“ [°C]
- $\dot{Q} = Q^*$  = Wärmestrom; hier wird die verfügbare Energie zur Lufterwärmung  $E_{Lufterw}$  pro Stunde verwendet [W/h]
- $\lambda_L$  = Wärmeleitfähigkeit der Luft = 0,0262 [W/(m\*K)]
- $h$  = Höhe der Bepflanzung des „Greentowers“ [m]
- $r$  = Radius vom Mittelpunkt des „Greentowers“ aus [m]
- $r_i$  = Radius des „Greentowers“ [m]

Die Temperatur wird mit der verfügbaren Energie pro Stunde berechnet. Das bedeutet, dass die ausgerechnete Temperatur nach einer Stunde mit den vorgegebenen meteorologischen Bedingungen vorliegt. Wenn die Temperatur am „Greentower“ kleiner als die gemessene Lufttemperatur ist, steigt die Temperatur um ihn mit zunehmendem Radius an und überschreitet die Lufttemperatur auch bei einem gewissen Radius. Bei höherer Temperatur am „Greentower“ als in der Umgebung passiert der umgekehrte Prozess und die Temperatur unterschreitet die gemessene Lufttemperatur bei diesem Radius.

## 4.3 Berechnungsschablonen

Im nächsten Schritt wurde für eine einfache und übersichtliche Bedienung jeweils eine Berechnungsschablone für die Berechnung von Verdunstungswerten für einen gesamten Tag und für die Berechnung von Werten innerhalb einer Stunde in „Microsoft Excel“ erstellt. Diese Schablonen gelten für Standorte, die auf dem gleichen Breitengrad wie Fulda liegen (50,56° nördliche Breite), da die extraterrestrische Strahlung (Tabelle 5) und die maximal möglichen Sonnenstunden (Tabelle 6) von diesem abhängig sind.

Die Schablone für die Tageswerte benötigt als Eingaben Datum, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, tägliche Sonnenstunden und den Pflanzenkoeffizienten. Das Datum wird verwendet, um die durchschnittlichen Werte der extraterrestrischen Strahlung und der maximal möglichen Sonnenstunden im Monat anzugeben. Bei den Eingaben zur Temperatur, Feuchtigkeit und Windgeschwindigkeit sollten möglichst Tagesmittelwerte genommen werden, idealerweise Werte, die zwischen Sonnenaufgang und Sonnenuntergang gemessen werden. So können die genauesten Ergebnisse berechnet werden. Ausgegeben werden die potenzielle und reale Verdunstung sowie die bei der Verdunstung verbrauchte Energie. In einem zweiten Abschnitt wird die reale Verdunstung über die Verdunstungsfläche des „Greentower“ ausgegeben.

Die Schablone für die Stundenwerte benötigt als Eingaben Datum, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Uhrzeit, Bewölkungsgrad und Pflanzenkoeffizient. Mit diesen Werten wird die potenzielle und die reale Verdunstung ausgerechnet und mit der entsprechenden verbrauchten Energie sowie mit der gefühlten Temperatur ausgegeben. Dabei wird die berechnete Verdunstung, die normalerweise pro Tag berechnet wird, durch 24 Stunden geteilt, um den entsprechenden Stundenwert zu erhalten. In einem zweiten Abschnitt wird die Temperatur direkt am „Greentower“ und ihre Differenz zur Lufttemperatur ausgegeben. Außerdem kann mit der Eingabe einer Distanz vom „Greentower“ die Temperatur in dieser und deren Differenz zur Lufttemperatur abgelesen werden.



Bei der Berechnung der Evapotranspiration nach Schöniger wird die Anzahl der täglichen Sonnenstunden benötigt. Das stellt ein Problem dar, wenn die Verdunstung pro Stunde ausgerechnet werden soll. Die tatsächliche Sonnenscheindauer wird im Verhältnis mit den maximal möglichen Sonnenstunden für die Berechnung der Globalstrahlung und der effektiven Abstrahlung verwendet. Die Globalstrahlung hängt von der Jahres- und Tageszeit ab sowie vom Bewölkungsgrad des Himmels. Sie hat an einem wolkenlosen Tag einen annähernd sinusförmigen Verlauf und ist nachts gleich null. Mit diesen Annahmen wurde eine Funktion bestimmt, die die Sonnenstunden ausrechnet, sodass die Globalstrahlung von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang positiv ist. Durch mehrfaches Ausprobieren wurden Faktoren für diese Sinus-Funktion festgelegt, die einen plausiblen Verlauf der Globalstrahlung ermöglichen.

Funktion zur Berechnung der Sonnenstunden:

$$s_t = 12 * \left(1 - \frac{P_W}{100}\right) * \sin(0,2618 * t - c) + d$$

- $P_W$  = Bewölkungsgrad [%]
- $t$  = Uhrzeit [h]
- $c$  = Verschiebung auf der x-Achse
- $d$  = Verschiebung auf der y-Achse

Der Faktor 12 entspricht der mittleren Tagesdauer im Jahr von 12 Stunden. Multipliziert mit dem Grad des wolkenfreien Himmels ergibt sich die Amplitude der Funktion. Der Faktor 0,2618 bestimmt die Periodendauer von 24 Stunden. Mit dem Faktor  $c$  kann die Funktion auf der x-Achse verschoben werden. So wird der Zeitpunkt des Sonnenaufgangs und des Sonnenuntergangs – also die Zeitpunkte, zwischen denen die Globalstrahlung positiv ist – verschoben.  $c$  hängt nur davon ab, ob Sommer- ( $c = 1,8326$ ) oder Winterzeit ( $c = 1,5708$ ) gilt. Zur Vereinfachung wurde in den Berechnungsschablonen die Sommerzeit auf April bis einschließlich Oktober festgelegt, die Winterzeit (und damit „Normalzeit“) auf November bis März. Der Faktor  $d$  wird abhängig vom Monat gewählt und verschiebt die Funktion entlang der y-Achse, sodass Sonnenaufgang und Sonnenuntergang und die maximal möglichen Sonnenstunden zu den mittleren Monatswerten passen. Mit der Eingabe von Datum, Uhrzeit und Bewölkungsgrad in die Berechnungsschablone für Stundenwerte wird die Anzahl der Sonnenstunden automatisch ausgerechnet.

## 5. Ergebnisse

### 5.1 Einflüsse von verschiedenen Parametern

Bei zunehmender Bewölkung an Sommertagen steigt die Temperatur nicht so stark wie an sonnigen Tagen. Im Gegensatz dazu führt eine zunehmende Bewölkung in der Nacht oder an Wintertagen zu einem Temperaturanstieg. Das liegt am hohen Reflexionsvermögen der Wolken, die zu Zeitpunkten mit hoher extraterrestrischer Strahlung, wie Sommertagen, diese ins Weltall zurückwerfen und somit eine Erwärmung der Erdoberfläche verhindern. Zu Zeitpunkten mit geringer extraterrestrischer Strahlung, wie nachts oder im Winter, reflektieren Wolken die Abstrahlung der Erde und verhindern dadurch eine Absenkung der Temperatur. Da die Anzahl der Sonnenstunden auch nur eine andere Ausdrucksform für den Grad der Bewölkung ist, gilt für sie die gleichen Annahmen.

Ein Anstieg der Temperatur führt zu einem Anstieg der Verdunstung und somit zu einem größeren Temperaturunterschied am „Greentower“, auch wenn dort ebenfalls die Temperatur steigt. Dies liegt daran, dass mit der Temperatur auch der Sättigungsdampfdruck, also die Masse Wasserdampf, die von der Luft aufgenommen werden kann, steigt.

Eine Absenkung der relativen Luftfeuchtigkeit führt ebenfalls zu einem Anstieg der Verdunstung und damit zu einer Vergrößerung der Kühlungswirkung, jedoch sinkt die Verdunstung bei sehr niedrigen



Luftfeuchtigkeitswerten auch wieder. Dieser Grenzwert ist auch von den anderen Wetterdaten wie Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit abhängig. Allgemein kann jedoch bei niedriger Luftfeuchtigkeit mehr Wasserdampf aus der Verdunstung aufgenommen werden.

Mit einer Erhöhung der Windgeschwindigkeit geht eine Erhöhung der Evapotranspiration und der Temperatursenkung am „Greentower“ einher. Bei Wind findet ein regelmäßiger Austausch der Luftschichten statt. Da die Luft, die direkt über den Pflanzen ist, mit der Zeit durch die Verdunstung mit Wasserdampf gesättigt wird, bewirkt ein schneller Austausch eine bessere Verdunstungsleistung.

Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse kann davon ausgegangen werden, dass die Effekte des „Greentowers“ zur Temperaturabsenkung dann besonders groß sind, wenn die Temperatur und die Windgeschwindigkeit hoch sowie die relative Luftfeuchtigkeit klein sind.

## 5.2 Beispielrechnungen

Um eine Aussage zur Wirkung des „Greentowers“ auf die Temperatur in der Umgebung zu treffen, wurden für drei verschiedene Juli-Tage mit den gemessenen Werten (kachelmannwetter.com) für jede Stunde die Temperaturänderung ausgerechnet. Dabei geht es um den 07.07.2023, ein heißer beinahe wolkenloser Tag. Ein weiterer Tag war der 12.07.2023, der ebenfalls hohe Temperaturen aber auch eine hohe Bewölkungsrate und hohe Windgeschwindigkeiten aufwies. Als drittes wurde der 30.07.2023 untersucht. Dieser Tag war kühler als die anderen beiden, ähnlich wolkenbedeckt wie der 12.07., hatte aber eine höhere Luftfeuchtigkeit und es gab um 14 Uhr einen Regenschauer woraufhin sich die Lufttemperatur absenkte und die Luftfeuchtigkeit anstieg. Die Durchschnitts- und einige Minimal- und Maximalwerte sind in Tabelle 1 angegeben. Die Übersicht über alle Messwerte findet sich im Anhang (Tabellen 2 bis 4). Diese Tage wurden ausgewählt, da vor allem die Wirkung des „Greentowers“ im Sommer untersucht werden sollte und diese Tage eine gute Variation an Wetterbedingungen boten. Die meisten Messwerte wurden von der Messstation in Fulda-Horas erfasst. Die Windgeschwindigkeit wurde aufgrund fehlender Werte für Fulda aus den Werten für die Wasserkuppe und Alsfeld gemittelt. Die Bewölkung wurde aus den Angaben der Wetterstation Wasserkuppe abgelesen und die Globalstrahlung, die zum Vergleich der Berechnungen der Penman- und der Penman-Monteith-Gleichung benötigt wird, entspricht dem Wert der Wetterstation Bad Hersfeld.

	7.7.23	12.7.23	30.7.23
Durchschnittstemperatur	19,1°C	23,7°C	17,8°C
Durchschnittsluftfeuchtigkeit	56,6%	56%	77,1%
Durchschnittswindgeschw.	9,8km/h	22km/h	17,4km/h
Durchschnittsbewölkung	0,5%	81,4%	82%
Minimaltemperatur	5,6°C	17,2°C	14,3°C
Maximaltemperatur	30,6°C	28,1°C	21,1°C
Minimalluftfeuchtigkeit	22%	32%	54%
Maximalluftfeuchtigkeit	98%	77%	98%

Tabelle 1 – Kennwerte an den verschiedenen Tagen

### 5.2.1 Werte vom 07.07.2023

Beim Berechnen der Temperaturänderung mit den Werten vom 07.07.2023 zeigt sich (siehe Abbildung 1), dass direkt am „Greentower“ eine Temperatursenkung von bis zu 6,2K im Tagesverlauf entsteht. Es



gibt aber auch einen Temperaturanstieg in den frühen Morgenstunden um bis zu 1,2K. Dieser entsteht wahrscheinlich aufgrund der niedrigen Temperaturen und Strahlungswerte zu diesen Zeitpunkten und der hohen Luftfeuchtigkeit.

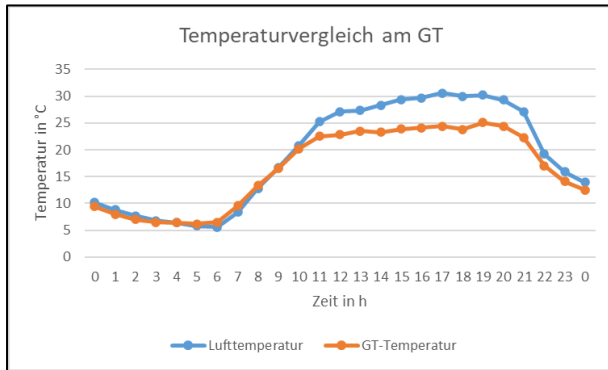


Abbildung 2 – Temperaturvergleich der Lufttemperatur mit der berechneten Temperatur am „Greentower“

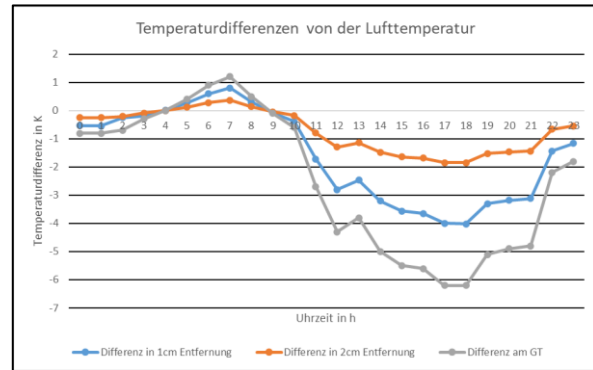


Abbildung 3 – Differenzen der berechneten Temperatur in verschiedenen Entfernungen vom „Greentower“ zur gemessenen Lufttemperatur

Beim Vergleich der Temperaturdifferenzen in unterschiedlichen Entfernungen vom „Greentower“ wird deutlich, dass die Differenz mit der Entfernung abnimmt (Abbildung 2). Auch die einzige Zeit mit Bewölkung um 13 Uhr ist mit einer Verkleinerung der Differenz gut erkennbar.

### 5.2.2 Werte vom 12.07.2023

Bei den Berechnungen für die Werte von diesem Tag fällt auf, dass zu jeder Uhrzeit eine Temperatursenkung am „Greentower“ stattfindet (Abbildung 3). Zu den Zeiten, bei denen am 07.07. die Temperatur anstieg, ist die Luftfeuchtigkeit am 12.07. teilweise niedriger und die Windgeschwindigkeit sowie die Lufttemperatur sind höher. Damit lässt sich das andere Verhalten erklären. Die maximale Temperaturdifferenz ist mit -7,63K auch größer als am 07.07. (Abbildung 4).

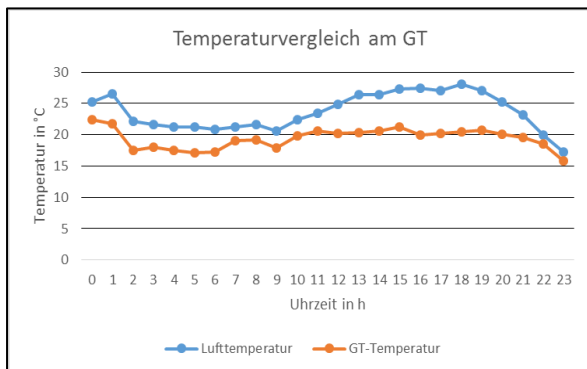


Abbildung 5 – Temperaturvergleich der Lufttemperatur mit der berechneten Temperatur am „Greentower“

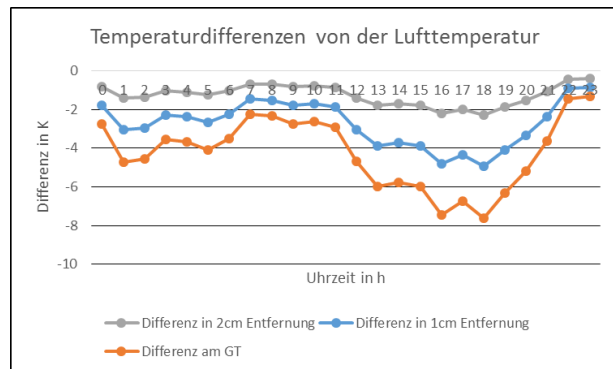


Abbildung 4 – Differenzen der berechneten Temperatur in verschiedenen Entfernungen vom „Greentower“ zur gemessenen Lufttemperatur

### 5.2.3 Werte vom 30.07.2023

An diesem Tag sind die Temperaturänderungen am „Greentower“ kleiner als an den beiden anderen Tagen. Der „Greentower“ besitzt hier schon von Mitternacht an bis 8 Uhr eine höhere Temperatur als die Umgebung (Abbildung 5), die sich durch den hohen Bewölkungsgrad im Gegensatz zum 07.07. und die geringere Temperatur und Windgeschwindigkeit im Vergleich zum 12.07. erklären lässt. Um 14 Uhr kam es zu einem Regenschauer, der die Lufttemperatur fallen und die Luftfeuchtigkeit steigen ließ. Daher ist zu diesem Zeitpunkt die Temperaturdifferenz minimal (Abbildung 6).

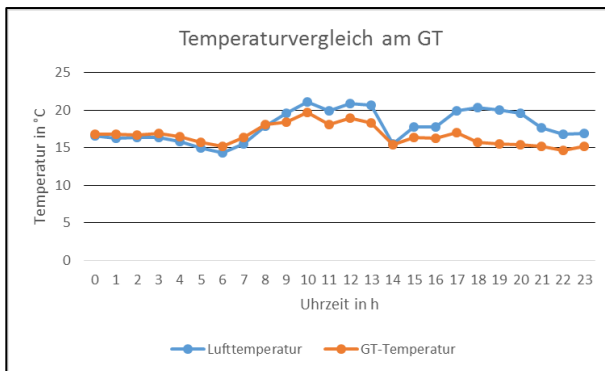


Abbildung 6 – Temperaturvergleich der Lufttemperatur mit der berechneten Temperatur am „Greentower“

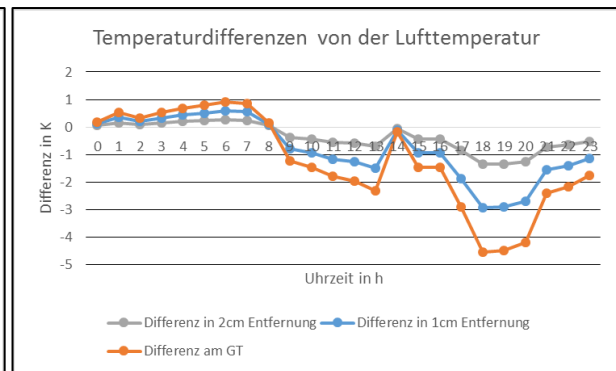


Abbildung 7 – Differenzen der berechneten Temperatur in verschiedenen Entfernungen vom „Greentower“ zur gemessenen Lufttemperatur

### 5.3 Temperaturangleichung im Abstand vom „Greentower“

Bei der Berechnung der Temperaturänderung über dem „Greentower“ fiel auf, dass der Abstand vom „Greentower“, bei dem die veränderte Temperatur die Lufttemperatur erreicht, stets gleich groß ist. Er liegt, bei einem Durchmesser des „Greentowers“ von 1,5m und einer Höhe von 3,7m, bei rund 29mm. Dieser Wert ist nur von der Größe der Bepflanzungsfläche und nicht von meteorologischen Bedingungen abhängig. Die einzige Ausnahme besteht, wenn die verfügbare Energie zur Lufterwärmung null wird. Dann ist auch schon die Oberflächentemperatur gleich der Lufttemperatur. Um diesen bei verschiedenen Rechnungen gefundenen Abstand nachvollziehen zu können und zu beweisen, dass dieser wirklich unabhängig von den meteorologischen Gegebenheiten ist, wurde der Abstand auch analytisch hergeleitet. Da die verwendete Formel den Radius vom Mittelpunkt des „Greentowers“ verwendet, muss vom Ergebnis der Radius der Bepflanzung des „Greentowers“ (0,75m) abgezogen werden, um den Abstand zu erhalten. Auf dieser Grundlage wird bei der Berechnungsschablone für die Stundenwerte für die Temperatur im Abstand die Lufttemperatur ausgegeben, wenn der eingegebene Abstand 28,67mm erreicht oder überschreitet. Die Herleitung für diesen Abstand ist im Anhang A.2 zu finden.

Dieser Abstand ist sehr klein und bedeutet, dass der Einfluss des „Greentowers“ auf die Umgebungstemperatur eher zu vernachlässigen ist. Wird die Bepflanzungsfläche erhöht, vergrößert sich auch der Abstand der Temperaturangleichung. Außerdem könnte durch den Einfluss von Wind die Temperaturänderung in die Windrichtung weitergetragen werden. Im Gegenzug ist dann die Änderung an der windzugewandten Seite des „Greentowers“ womöglich nur in einem noch kleineren Umfeld vorhanden. Um diesen Einfluss besser beurteilen zu können, dient die Simulation mit OpenFOAM im weiteren Verlauf. Beim Vergleich mit durchgeführten Messungen aus der Literatur zeigen sich Abkühlungseffekte in Abständen von 0,15m bis 0,6m Entfernung von begrünten Dächern und Wänden (Brune et al. 2017, S. 12) bis zu 3,3K. Allerdings wurden die höheren Temperaturunterschiede in Singapur (Wong et al. 2010) und damit in tropischem Klima gemessen. Bei Messungen in Deutschland fallen die Unterschiede geringer aus. So sind beim Vergleich von zwei bepflanzten und bloßen Wänden in 0,4m Entfernung Temperaturunterschiede von 0,03K und 0,2K aufgetreten (Hoelscher et al. 2016, S. 42). Diese Änderung wurde als nicht signifikant angesehen. Es wird aber auch auf äußere Wettereinflüsse als Grund für die niedrigen Änderungen hingewiesen. In Braunschweig wurden Temperaturen in 0,5m Höhe über einem Gründach und einem Bitumendach verglichen (Heusinger und Weber 2015). Dabei wurde ein maximaler Unterschied von 0,7K festgestellt. Hierbei ist zum einen auf die Größe der Flächen von 600m<sup>2</sup> vom begrünten Dach und 160m<sup>2</sup> vom Bitumendach im Vergleich zu den rund 20m<sup>2</sup> des



„Greentowers“ hinzuweisen. Außerdem erwärmt sich die Temperatur über dem Bitumendach aufgrund des niedrigen Reflexionsvermögens stark. Im Vergleich mit den Messungen wirkt der berechnete Abstand des Temperaturangleichs sehr klein, die umliegenden Wetterverhältnisse wirken sich in der Realität aber wahrscheinlich auf die Verbreitung der Temperaturänderung aus.

#### 5.4 Berechnung mit einem Pflanzenkoeffizienten

Wie bereits in Kapitel 3 beschrieben, hängt die reale Verdunstungsleistung maßgeblich auch von der Bepflanzung ab. Um diese zu berücksichtigen, wird die potenzielle Evapotranspiration mit dem Pflanzenkoeffizienten  $k_c$  multipliziert. Aufgrund fehlender Werte für  $k_c$ , wird dieser mit 0,8 angenommen, ein mittlerer Wert aus den Angaben für Blumen im Freiland von 0,3 bis 1,1 (Bernhardt et al. 2022, S. 94). Die so berechneten Werte der Temperatur am „Greentower“ werden mit den Werten für die potenzielle Verdunstung, beziehungsweise einem Pflanzenkoeffizienten von eins, verglichen.

Als erstes werden wieder die Werte vom ersten Beispieltag, dem 07.07.2023, verwendet. Mit dem Pflanzenkoeffizienten zeigen sich eine höhere und längere Temperaturerhöhung am Morgen und eine geringere Temperaturabsenkung über den Tagesverlauf (Abbildung 7).

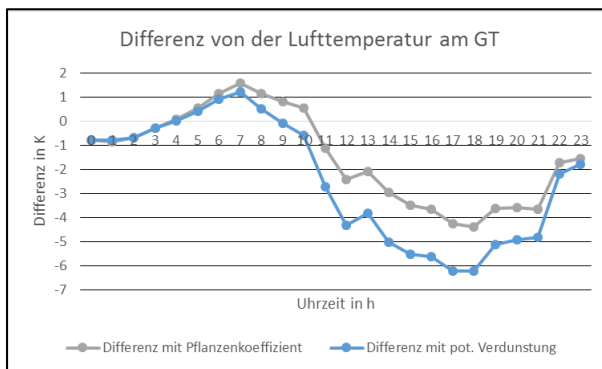


Abbildung 7 – Differenzen der berechneten zur gemessenen Lufttemperatur am „Greentower“ am 07.07.2023

Beim zweiten Beispiel, dem 12.07.2023, liegen auch mit dem Koeffizienten von 0,8 alle Temperaturen am „Greentower“ unter der gemessenen Lufttemperatur (Abbildung 8). Auch hier ist, wie beim Pflanzenkoeffizienten von eins, die Temperatursenkung nicht so hoch wie bei der potenziellen Verdunstung.

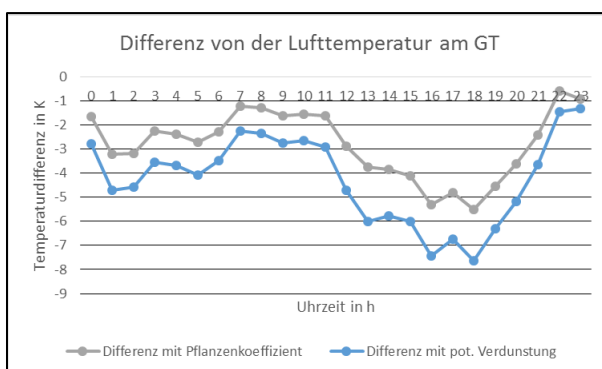


Abbildung 8 – Differenzen der berechneten zur gemessenen Lufttemperatur am „Greentower“ am 12.07.2023

Am 30.07. gibt es wie bei der Berechnung zum 07.07. eine höhere Temperaturerhöhung in den ersten Tagesstunden, allerdings hier bei gleichem Zeitraum wie bei der potenziellen Verdunstung (Abbildung



9). Auch die Temperatursenkung zu den anderen Tageszeiten ist kleiner als bei der potenziellen Evapotranspiration. Zusätzlich steigt um 14 Uhr beim Regenschauer die Temperatur am „Greentower“ über die Lufttemperatur.

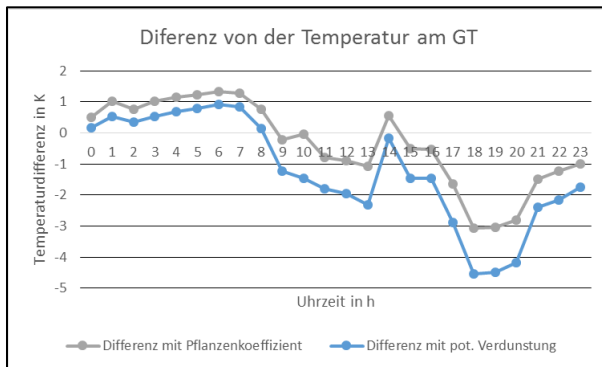


Abbildung 9 – Differenzen der berechneten zur gemessenen Lufttemperatur am „Greentower“ am 30.07.2023

Ein Pflanzenkoeffizient kleiner als eins verschiebt die Temperaturdifferenzkurve also ins Positive. Im ungünstigen Fall kann so die Temperaturveränderung auch vom negativen in den positiven Bereich wechseln und die Temperatur steigen. Die Unterschiede der Differenz steigen mit der Verdunstung. Dabei haben die Faktoren Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit einen größeren Einfluss als der Bewölkungsgrad. Bei einem Pflanzenkoeffizienten, der größer als eins ist, wird die Abkühlung größer.

### 5.5 Vergleich der berechneten Verdunstung mit Messdaten

Auf kachelmannwetter.com werden auch Stundenwerte für die potenzielle Verdunstung vergangener Tage ausgegeben. Da die Ausgabe nur in Form einer Karte mit Farbstufen vorliegt, wurden als Werte die Mittelwerte aus Minimal- und Maximalwert der jeweiligen Farbe angenommen. Für den Tag 07.07.2023 sind die berechneten Werte der Evapotranspiration tagsüber teilweise deutlich kleiner als die angegebenen. Auch die Summe liegt um 43,5% unter der Summe der angegebenen Werte. Um ähnlich hohe Werte für die Mittagszeit zu erreichen, müsste etwa die dreifache Windgeschwindigkeit oder eine Temperatur von 60°C herrschen. Mit derart hohen Verdunstungswerten wäre aber auch die Temperatursenkung am „Greentower“ bis zu 16K groß. Für die anderen Tage ist die Abweichung der Berechnung von den angegebenen Werten kleiner (3,5% kleiner für den 12.07.2023; 2,5% größer für den 30.07.2023). Allgemein verlaufen die berechneten Werte flacher als die angegebenen, sie sind nachts höher und tagsüber meist niedriger.

Die Berechnungsmethode nach der Penman-Monteith-Gleichung ergibt größere Schwankungen im Tagesverlauf und führt stets zu höheren Zahlen, bis zu 54% für den 12.07.2023, bei der Aufsummierung der Stundenwerte im Vergleich zur Summe der angegebenen Daten. Die Berechnung dieser Stundenwerte folgt der Angaben der FAO, der „Food and Agriculture Organization of the United Nations“ (Allen et al. 1998, Chapter 4). Auch an den anderen Tagen sind die Abweichungen von 48% für den 07.07.2023 und 26% für den 30.07.2023 vergleichsweise groß.

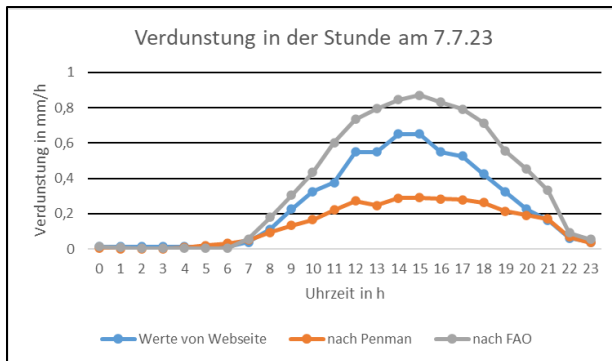


Abbildung 9 – Verdunstung im Tagesverlauf vom 07.07.2023 nach verschiedenen Methoden

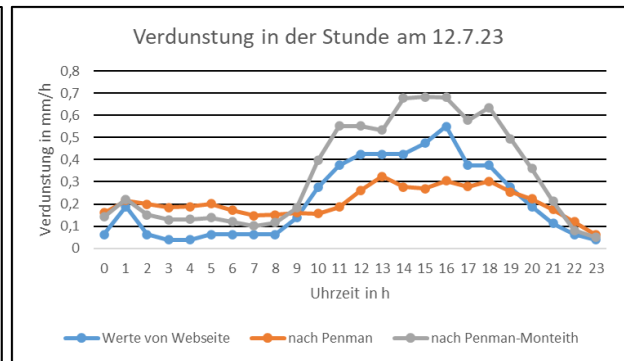


Abbildung 8 – Verdunstung im Tagesverlauf vom 12.07.2023 nach verschiedenen Methoden

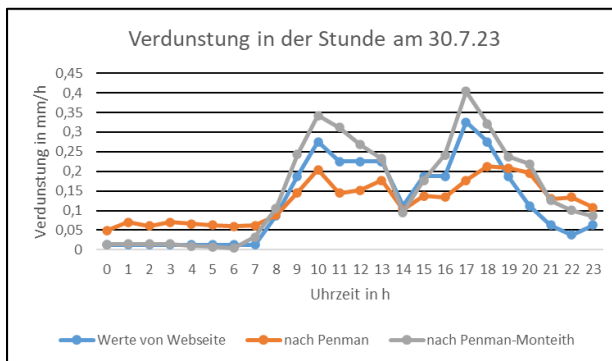


Abbildung 12 – Verdunstung im Tagesverlauf vom 30.07.2023 nach verschiedenen Methoden

Bei der Berechnung der Evapotranspiration über den gesamten Tag liefert die Berechnung mit der Penman-Monteith-Gleichung jedoch nähere Ergebnisse zu den angegebenen Werten, als die Berechnung mit der Penman-Gleichung. Erstere gibt Abweichungen zwischen einem 3% kleineren Wert für den 07.07.2023 und einem 26% größeren Wert für den 12.07.2023. Für die Penman-Gleichung ergeben sich Werte, die zwischen 17% kleiner für den 07.07.2023 und 32% größer für den 12.07.2023 sind. Dabei sollte für ein möglichst genaues Ergebnis die durchschnittliche Tagestemperatur verwendet werden, noch besser ist die Durchschnittstemperatur ohne die Werte aus den nächtlichen Stunden.

Es zeigt sich, dass die Berechnung von Stundenverläufen nach der Penman-Gleichung ähnlichere Werte zu den auf der Webseite angegebenen liefert, als die Berechnung nach der Penman-Monteith-Gleichung. Bei den Berechnungen der Tageswerte der Verdunstung scheint die Penman-Monteith-Gleichung bessere Werte zu ergeben. Jedoch schwanken die Größen der Abweichung zwischen den verschiedenen Tagen stark. Bei der Berechnung der täglichen Verdunstung während des Zeitraums des vom 20.11.2023 bis 15.03.2024, ergab die Penman-Gleichung kleinere Abweichungen zu den Verdunstungswerten vom Deutschen Wetterdienst, obwohl diese nach Beschreibung der Webseite mit der Penman-Monteith-Gleichung gerechnet wurde. Bei der Angabe der potenziellen Verdunstung auf kachelmannwetter.com, wird die Berechnungs- oder Messmethode nicht weiter erläutert. Auch beim Ablesen der Karte können Fehler entstanden sein, insbesondere da hier Mittelwerte von der angezeigten Spanne für die jeweilige Farbe als Werte angenommen wurden.

## 5.6 Wind durch den „Greentower“

Zur Steigerung der Abkühlungsleistung entstand das Konzept, einen Ventilator in den „Greentower“ hinzuzufügen, der durch den erzeugten Wind im Inneren die Verdunstung steigert. Der Ventilator könnte durch eine Solarzelle auf dem „Greentower“ mit Strom versorgt werden. Ein ähnlicher Versuch



wurde von Davis und Hirmer untersucht und berechnet. Dabei handelte es sich um eine bepflanzte Wand, hinter der Luft von Ventilatoren durchgesogen wurde. Da mit dem Massenstrom der Luft hinter der Bepflanzung beziehungsweise innerhalb des „Greentowers“ gerechnet wird, ist das Ergebnis der Temperaturänderung nicht mehr als Wert nach einer Stunde zu sehen, sondern gilt als Momentaufnahme mit den eingegebenen Daten. Als  $k_c$ -Faktor für das Substrat wurden 1,15 angenommen (Allen et al. 1998, Chapter 11  $ET_a$  during non-growing periods). Bei der Berechnung wurde die Penman-Monteith-Formel modifiziert, so dass sie keine Strahlungsanteile mehr enthält (Davis und Hirmer 2015, S. 138), da hinter der Bepflanzung keine Sonnenstrahlung ankommt.

$$ET_{\text{Substrat}} = \left( \frac{1,15}{86\,400} \right) * \frac{Y \left( \frac{900}{T + 273} \right) (cf(z) * U_z) (e_s - e_a)}{\Delta + Y(1 + 0,34 (cf(z) * U_z))}$$

- $\frac{1,15}{86\,400}$  =  $k_c$ -Faktor und Umwandlung der Verdunstung von [mm/d] in [mm/s]
- Y = Psychrometerkonstante [kPa/°C]
- $T_l$  = Lufttemperatur [°C]
- cf(z) = Umrechnungsfaktor für die Windgeschwindigkeit
- z = Höhe über dem Substrat [m]
- $U_z$  = Windgeschwindigkeit über dem Substrat
- $e_s$  = Sättigungsdampfdruck [kPa]
- $e_a$  = tatsächlicher Dampfdruck [kPa]
- $\Delta$  = Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve [kPa/°C]

$$Y = 0,000665 * 101,3 * \left( \frac{293 - 0,0065 * H}{293} \right)^{5,26}$$

- H = Höhe des Standorts über Normal-Null [m]

Außerdem wurde die Windgeschwindigkeit, die bei diesem Versuch direkt über das Substrat gemessen wird, mit einem Faktor multipliziert, da in der Penman-Monteith-Formel die Windgeschwindigkeit in 2m Höhe angenommen wird. In dem vorliegenden Paper wird als Faktor 10,5 verwendet (Davis und Hirmer 2015, S. 138). Wenn man annimmt, dass die maximale Geschwindigkeit im „Greentower“ nur in der Mitte vorliegt, kann dieser Faktor für die Höhe von 0,75m – dem Radius des „Greentowers“ – berechnet werden (Allen et al. 1998, Annex 2. Meteorological tables). Damit beträgt der Faktor 1,2761477.

$$cf(z) = \frac{4,87}{\ln(67,8 * z - 5,42)}$$

- z = Höhe des Winds mit der angegebenen Windgeschwindigkeit über der Bepflanzung/dem Substrat [m]

Die Temperaturänderung wird anschließend aus dieser Verdunstung berechnet (Davis und Hirmer 2015, S. 138ff). Da die Verdunstung stets pro Quadratmeter ausgerechnet wird, multipliziert man diese mit der Verdunstungsfläche. Das wurde bei Davis und Hirmer nicht beschrieben, deren Verdunstungsfläche beträgt allerdings mit 1,08m<sup>2</sup> ungefähr einen Quadratmeter.

$$\Delta T = \frac{ET_{\text{Substrat}} * \lambda_W}{Q_m * \rho_L * c_L} * A_{\text{Verd}}$$

- $\lambda_W$  = latente Wärme von Wasser [J/kg]
- $Q_m$  = Massenstrom hinter der Bepflanzung [kg/s]
- $\rho_L$  = Dichte der Luft [kg/m<sup>3</sup>]
- $c_L$  = spezifische Wärmekapazität der Luft [J/(kg\*°C)]
- $A_{\text{Verd}}$  = Verdunstungsfläche [m<sup>2</sup>]

$$Q = h * \pi * r_i^2 * \rho_L$$



- $h$  = Höhe der Bepflanzung des „Greentowers“ [m]
- $r_i$  = Durchmesser der Bepflanzung des „Greentowers“ [m]
- $\rho_L$  = Dichte der Luft [kg/m<sup>3</sup>]

Der Massenstrom ist im Falle des „Greentowers“ größer als bei der bepflanzten Wand, bei der nur ein kleiner Spalt für die Luftströmung zur Verfügung steht. Diese Tatsache zusammen mit dem größeren Abstand der Höchstwindgeschwindigkeit vom Substrat führt zu deutlich kleineren Temperatursenkungen am „Greentower“ im Vergleich zur bepflanzten Wand. Man kann davon ausgehen, dass der Wind auch in geringerer Entfernung noch die gleiche Geschwindigkeit behält. Dann wird der Faktor  $cf(z)$  und damit die Verdunstung und die Temperaturdifferenz größer (Abbildung 13).

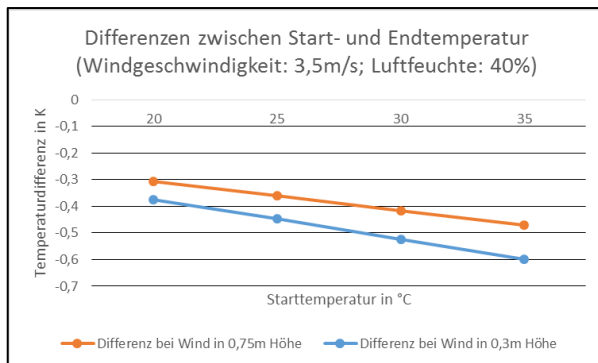


Abbildung 10 – Differenzen bei unterschiedlichen Entfernungen des Ventilators vom „Greentower“

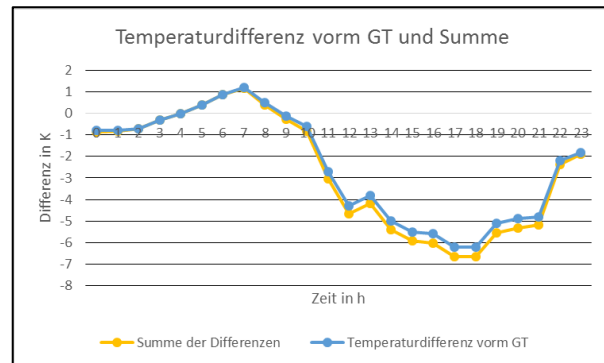


Abbildung 11 – Temperaturdifferenzen ohne und mit Ventilator vorm „Greentower“

Bei einem Einsatz von Ventilatoren im „Greentower“ kommen die Temperaturveränderungen aus beiden Ansätzen zusammen und müssen daher addiert werden. In Abbildung 14 ist die Summe mit der Temperaturänderung, die nur außen am „Greentower“ entsteht, dargestellt. Dabei wurden der als Abstand der maximalen Windgeschwindigkeit (3,5m/s) mit 0,75m vom Substrat angenommen. Es wird deutlich, dass mit dieser Variante die Temperatursenkung, die im „Greentower“ erfolgt, im Vergleich zur äußeren Verdunstung fast zu vernachlässigen ist. Da anzunehmen ist, dass sich die Windgeschwindigkeit aus dem Einsatz eines Ventilators jedoch nicht nur auf die Mitte des „Greentowers“ beschränkt, sondern in einem gewissen Umfeld um diese gleich groß bleibt, reduziert sich der Abstand zum Substrat. Mit dieser Voraussetzung wird die Temperatursenkung im Turm größer und der Einsatz des Ventilators hätte größeren Anteil an der Abkühlung. Es ist allerdings nicht bekannt in welchem Umfeld die Maximalgeschwindigkeit des Ventilators gilt. Außerdem zeigt sich schon in Abbildung 10, dass selbst ein Abstand, der mehr als halbiert wurde, nur eine geringe Verbesserung der Kühlleistung bringt.

## 6. Simulation mit OpenFOAM

### 6.1 Einführung

OpenFOAM (= Open Source Field Operation and Manipulation) ist ein freies CFD-Programm (= Computational-Fluid-Dynamics-Programm), das 2004 entwickelt wurde. Es kann zur numerischen Lösung von verschiedenen Problemen der Strömungsmechanik und Thermodynamik verwendet werden. Bei der Verwendung für die Berechnungen hier werden auch beide Anteile benötigt, da der Einfluss des Windes auf die Verbreitung der Temperatur untersucht werden sollte. Nach der Berechnung können die Ergebnisse dargestellt und analysiert werden. Das geschieht mit dem Programm paraview, das aus den Daten, die OpenFOAM berechnet, ein visuelles Modell erstellt. Mit diesem können beispielsweise Temperaturverläufe oder Strömungslinien dargestellt werden. Auch das Auslesen von Werten an bestimmten Punkten und die Erstellung von Diagrammen ist möglich. Zur optimalen Nutzbarkeit sollte OpenFOAM auf einem Linux-Betriebssystem verwendet werden.



Der Ablauf einer Berechnung und Simulation mit OpenFOAM folgt einer festen Systematik und ist in drei Teile aufgeteilt: Pre-processing, Solving und Post-processing. Das Pre-processing umfasst die Erstellung des 3D-Modells und die Umwandlung von diesem in ein Mesh (= Netz). Bei der späteren Berechnung werden für jeden Punkt in diesem Netz die zugehörigen Werte bestimmt, daher ist der Aufbau des Netzes für die Genauigkeit der Ergebnisse von großer Bedeutung. Ein feineres Netz bringt bessere Ergebnisse, benötigt aber auch mehr Rechenleistung. Ebenfalls im Pre-processing werden die Randbedingungen festgelegt. Dazu gehören die Definition und Bezeichnung von Flächen und Körpern. Beim Solving werden Startbedingungen wie Temperatur und Geschwindigkeit festgelegt, die an einzelnen Flächen sowie im internen Volumen des Modells („internalField“) herrschen sollen. Außerdem wird ein Solver ausgewählt, der bestimmt nach welcher Methodik OpenFOAM rechnen soll. Dabei ist zum Beispiel zu beachten, ob sich Randbedingungen mit der Zeit ändern sollen oder ob es sich um komprimierbares Gas handeln soll oder nicht. Im Anschluss kann die Rechnung gestartet werden. Beim Post-processing kann das berechnete Ergebnis dargestellt und die Konvergenz der Parameter überprüft werden. Danach können verschiedene Rechnungen miteinander verglichen werden, zum Beispiel mit verschiedenen Netzen, verschiedenen Startbedingungen oder unterschiedlichen Solvern.

## 6.2 Berechnung mit dem „Greentower“

Bei der analytischen Rechnung wurde die Windgeschwindigkeit bei der Berechnung der Verdunstung zwar berücksichtigt, deren Auswirkung auf die Temperaturverteilung konnte jedoch nicht berechnet werden. Diese Berechnung sollte anschließend mit OpenFOAM durchgeführt und die Ergebnisse dargestellt werden. Es wurden mehrere Rechnungen mit verschiedenen geometrischen Modellen und Startbedingungen durchgeführt, deren Vorgehensweise im Folgenden beschrieben wird.

### 6.2.1 Pre-processing

Die erste Aufgabe vor der Berechnung ist, das Modell des „Greentowers“ in eine Form zu bringen, die von OpenFOAM verarbeitet werden kann. Dazu wurde das Modell als starke Vereinfachung dargestellt, die aus zwei Zylindern besteht. Der untere Zylinder „Unterbau“ steht für den Sockel, in dem sich auch der Wassertank befindet, und der zweite Zylinder „Bepflanzung“ steht für den Aufbau mitsamt der angebauten Bepflanzung. Das Modell wurde mit dem Programm SolidWorks erstellt, kann aber aufgrund der einfachen Geometrie auch in OpenFOAM direkt erstellt werden. Dieses Modell wird mithilfe der Befehle „blockMesh“ und „snappyHexMesh“ in einen Quader gesetzt, der die Umgebungsluft darstellt. Um später den Einfluss des Windes darstellen zu können, wird der „Greentower“ nicht mittig in den Quader gesetzt, sondern in die Richtung verschoben, aus der der Wind kommt. So können auch in weiterer Entfernung vom „Greentower“ die Auswirkungen beobachtet werden. In späteren Rechnungen werden auch mehrere „Greentower“ eingesetzt in ein geometrisches Modell, das eine Straße darstellt.

### 6.2.2 Solving

Zunächst wurde mit dem Solver „buoyantSimpleFoam“ gerechnet, der für kompressible Gase den Wärmetransfer durch Konvektion berechnen kann. Wie aber die Auswertungen der Ergebnisse in Kapitel 6.3.1 zeigen, ist dieser Solver nicht für diese Berechnung geeignet.

Da der Solver für den Wärmetransfer zwischen einem Feststoff, dem „Greentower“, und einem gasförmigen Stoff, der Umgebungsluft, gelten soll, wird der Solver „chtMultiRegionFoam“ verwendet. Zur Berechnung werden die verschiedenen Stoffe in Regionen aufgeteilt, denen die entsprechenden thermophysikalischen Parameter wie Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und Dichte zugeordnet werden. Dabei wurden dem „Greentower“ die Kennwerte für Polybuten zugeordnet. Das ist das Material, welches für die Bepflanzungsvorrichtung verwendet wird. Die Umgebung besitzt die Kennwerte von Luft bei 20°C. Mit diesem Solver können auch transiente Rechnungen durchgeführt werden, also Rechnungen, bei denen sich Werte mit dem Verlauf der Zeit ändern.



Als Startbedingungen werden bei der ersten Berechnung die Temperaturen, ausgehend von den analytischen Ergebnissen, in dem Umgebungsfeld auf einen Wert der gemessenen Lufttemperaturen gesetzt und die Temperatur an der Oberfläche der Bepflanzung auf den entsprechenden Wert der Temperatur am „Greentower“. Dabei wird von einem Pflanzenkoeffizienten mit Wert eins ausgegangen, es werden also die Werte der Grasreferenz übernommen. Nun können die Ergebnisse der Temperaturänderung in Entfernung vom „Greentower“ überprüft werden. Im nächsten Schritt kann ein Wind durch das Feld gegeben werden, dieser sollte die Temperaturänderung mit sich ziehen. Wird die Windgeschwindigkeit über die Zeit verändert, können Aussagen über deren Einfluss in Abhängigkeit ihrer Größe getroffen werden.

Für die Berechnungen wurden vor allem die Temperaturwerte vom 07.07.2023 um 19 Uhr und um 7 Uhr, da zu diesem Zeitpunkt die größte positive Temperaturdifferenz von 1,2K berechnet wurde, verwendet. Vom 12.07.2023 wurden die Werte um 5 Uhr und um 18 Uhr, das entspricht dem Zeitpunkt mit der größten negativen Differenz zwischen der Temperatur direkt am Turm von -7,63K, verwendet.

### 6.2.3 Post-processing

Im Post-processing werden die Ergebnisse visuell dargestellt und der Abstand, in dem sich die durch den „Greentower“ veränderte Temperatur der Lufttemperatur angleicht, kann mit dem analytischen Ergebnis verglichen werden. Für den Vergleich zwischen verschiedenen Eingabewerten, wurden in jeder neuen Berechnung, bei der sich die Größe der Startbedingungen geändert haben, Werte in den gleichen Punkten gemessen. Bei Änderungen der Windrichtung oder der Geometrie, müssen selbstverständlich andere Punkte verwendet werden. Alle Punkte sind in 4m über dem Boden angesetzt worden, das gleiche gilt für die Schnittbilder als Draufsicht.

## 6.3 Auswertung der Ergebnisse

Mit den Ergebnissen der ersten Rechnungen konnten die verwendeten Startbedingungen, Solver und Geometrien beurteilt und, wenn notwendig, für weitere Rechnungen angepasst werden. Allgemein wurde, wie schon bei den analytischen Berechnungen, ein nur sehr geringer Einfluss der Temperaturänderung am „Greentower“ für die Temperatur der Umgebung festgestellt. Die Temperaturänderung liegt im Abstand von wenigen Zentimetern bei nur wenigen Hundertstel bis Zehntel Kelvin. Dennoch zeigt sich, dass die Windströmung die Temperaturänderung durchaus in einem weiteren Umfeld verbreiten kann. Weitere Gegenstände, zum Beispiel Gebäude, können durch ihren Einfluss auf die Windströmung das Ergebnis ebenfalls stark verändern.

Der analytisch berechnete Wert für die Temperatur in Abhängigkeit vom Abstand vom „Greentower“ stimmt mit den numerischen gerechneten Ergebnissen nicht überein.

### 6.3.1 Wahl des Solvers

Bei den ersten Rechnungen wurde der Solver „buoyantSimpleFoam“ verwendet. Bei der Auswertung der Ergebnisse für eine Rechnung zeigte sich die größte Temperaturänderung zunächst bis etwa 26mm, was dem analytisch ermittelten Wert zur Angleichung der Temperatur um den „Greentower“ an die

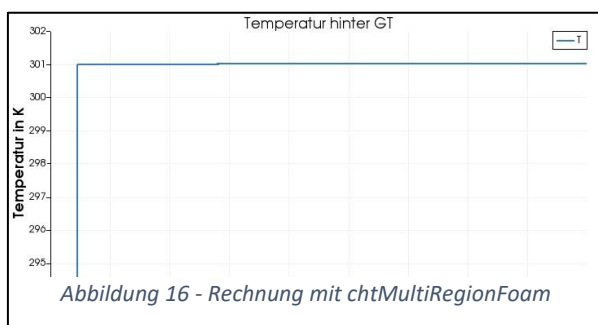
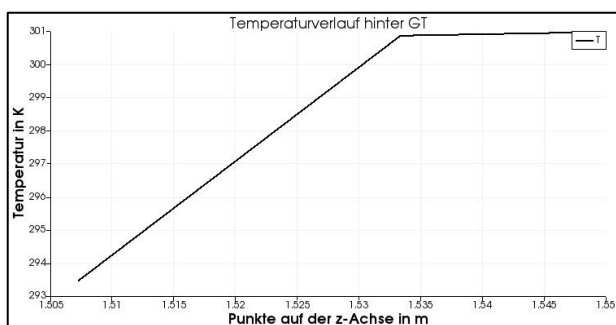


Abbildung 16 - Rechnung mit chtMultiRegionFoam



Lufttemperatur sehr nahekommt. Allerdings wurden bei Rechnungen mit anderen Netzen andere Distanzen gemessen, obwohl die meteorologischen Bedingungen, wie Temperatur und Windgeschwindigkeit, gleich waren. Bei genauer Betrachtung wurde deutlich, dass die Entfernung vom „Greentower“, in der die größte Temperaturänderung zu verzeichnen ist, der ersten Schicht an Zellen um den „Greentower“ entspricht. Somit ist diese Größe in erster Linie vom Grad der Netzverfeinerung und nicht von Temperaturwerten abhängig, was dafür spricht, dass ein anderes Berechnungsmodell verwendet werden sollte. Die Wahl fiel auf den Solver „chtMultiRegionFoam“, der mit den entsprechenden thermophysikalischen Kennwerten die Wärmeübertragung zwischen verschiedenen Stoffen berechnen kann. Bei diesem Solver findet die größte Temperaturänderung direkt beim Übergang von einem in den anderen Stoff statt, was bei der Darstellung in Diagrammen von der Temperatur über die Entfernung vom „Greentower“ einen Sprung erscheinen lässt.

Die Temperaturänderungen, die durch den „Greentower“ in der Umgebungsluft entstehen, sind sehr klein. Daher wurde als Überprüfung, ob bei der Rechnung mit diesem Solver die Wärmeübertragung nicht stets sehr klein ist eine Rechnung durchgeführt, bei der der „Greentower“ als Heizkörper dient. Die geometrischen Daten sind gleichgeblieben, nur besaß der Turm eine Temperatur von 50°C und die Luft eine Temperatur von 10°C. Mit diesen Werten wurde die Umgebung aufgeheizt, sodass in 0,5m Entfernung vom „Greentower“ eine Temperatur von 22°C herrschten. Damit ist deutlich, dass dieser Solver bei einem ausreichend großen Temperaturunterschied auch in größerer Entfernung eine Ände-

*Abbildung 15 - Rechnung mit buoyantSimpleFoam*

rung der Umgebungstemperatur errechnet.

### 6.3.2 Verlauf der Geschwindigkeit

Wie bereits zuvor in Kapitel 5.6 bei der Berechnung der Strömung durch den „Greentower“ festgestellt, wird die Windgeschwindigkeit für die Berechnung der Verdunstung in 2m Höhe über dem Boden angenommen. Für die analytische Berechnung wurde dieser Wert übernommen. In der Realität hängt die Windgeschwindigkeit von der Höhe und der Bodenbeschaffenheit ab. Am Boden ist es nahezu windstill und mit der Höhe nimmt der Wind an Geschwindigkeit zu. Da die Unterschiede über dem „Greentower“ mit einer Höhe zwischen 1,8m und 5,5m klein sind und sich zudem teilweise ausgleichen, wurde bei der Berechnung der Verdunstung und der Temperaturänderung auf eine Berücksichtigung verzichtet. Bei der Simulation mit OpenFOAM sind die Modelle jedoch bis zu 30m hoch, daher wurde hier der Gradient beachtet. Dazu wurde die Geschwindigkeit am inlet, also dem Eingang, mit einem Code definiert, der aus dem jeweiligen y-Wert des Berechnungspunktes den zugehörigen Faktor berechnet und anschließend die resultierende Geschwindigkeit. In Abbildung 17 ist der Geschwindigkeitsverlauf abhängig von der Höhe bei einer Windgeschwindigkeit von 4m/s in 2m Höhe dargestellt. In diesem Modell entspricht y der Höhe. Der Faktor wurde ebenfalls in Kapitel 5.6 beschrieben. Damit beim Rechnen nicht der Logarithmus von null gebildet werden muss und OpenFOAM so die Berechnung nicht durchführen könnte, wird auf den y-Wert noch 0,08m addiert. Damit wird ein Abbruch und auch negative



Lösungen umgangen, dennoch ist der addierte Wert klein genug, um keine großen Abweichungen zu bewirken.

### 6.3.3 Berechnungen mit einem „Greentower“

Bei den ersten Berechnungen wurde der „Greentower“ in einen Quader mit 9m Breite (x-Richtung), 10m Höhe (y-Richtung) und 20m Länge (z-Richtung) gestellt. Der Wind kommt zunächst aus z-Richtung

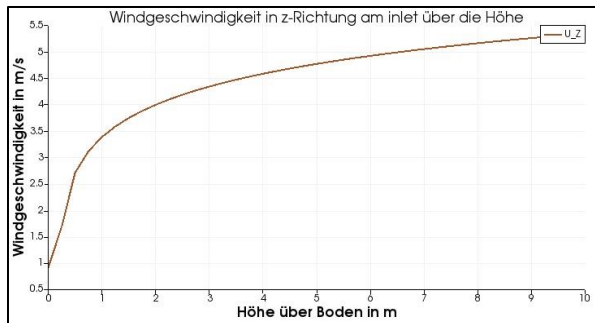


Abbildung 17 - Verlauf der Windgeschwindigkeit über der Höhe

```

// Internalfeld uniform (0 = 0);
// boundaryfield
// inlet
// type codedInletFlow;
// value uniform (0 = 0);
// name rampOfSpeedValue; //setztgwaditor Name des Codes
// code
// const refPatch boundaryPatch = patch(); //Definition der benötigten Flächen
// const vectorField cr = boundaryPatch.Cf();
// vectorField field = "0";
// const vector U = (0, 0, 0); //vektor der Geschwindigkeit
// const scalar U0_x = 0; //geschwindigkeit in richtungen aufgesetzt
// const scalar U0_y = 0;
// const scalar U0_z = 0;
// forall(cr, faceI)
// {
//     const scalar y = cf[faceI].y() * 0.01; //Definition der Höhe
//     const scalar convFac = (1.0)/(log(1.0+y*0.1)); //Berechnung des Konversionsfaktors
//     field[faceI] = vector(U0_x*convFac, U0_y*convFac, U0_z*convFac); //Berechnung der Geschwindigkeiten //in den richtungen
// }
// outlet
// type pressureOutletVelocity;
// value
// }
// wall
// }
    
```

Abbildung 18 - Code für die Geschwindigkeitsrampe

und die Windgeschwindigkeit entspricht dem Wert, der zu dem Zeitpunkt der eingestellten Temperaturen gemessen wurde. Da der Turm gleichförmig ist, sollte die Windrichtung bei den Berechnungen ohne andere Geometrien im Modell keine Rolle spielen. Für alle Fälle wurden die Temperatur-Zeit-Verläufe in drei Punkten dargestellt. Außerdem wurden Schnittbilder als Draufsicht und als Schnitt durch den „Greentower“ erstellt. Es zeigt sich eine Temperaturänderung auf der windleeren Seite des „Greentowers“, die zwar über eine lange Strecke von der Windströmung mitgezogen wird, aber im Raum neben dieser Strecke keine Auswirkungen auf die Temperatur hat. Vor dem „Greentower“ werden teilweise höhere Temperaturen berechnet als die ursprüngliche Lufttemperatur.

Bei der Veränderung der Windgeschwindigkeit und gleichbleibender Lufttemperatur und Temperatur direkt am Turm, diese Werte wurden aus den gemessenen und berechneten Daten vom 12.07.2023 um 18 Uhr übernommen, zeigt sich, dass im Abstand von 2m hinter dem „Greentower“ die Abkühlung größer ist, je kleiner die Windgeschwindigkeit ist, wobei die Unterschiede im Bereich von Hundertstel und Tausendstel Kelvin liegen.

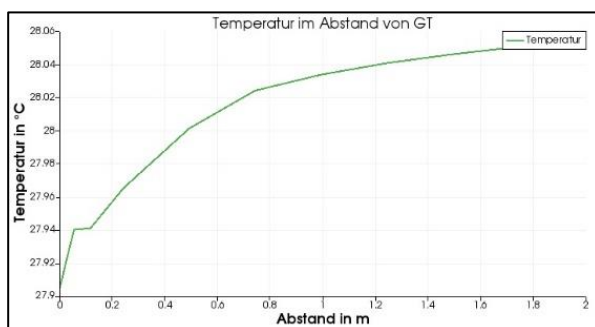


Abbildung 19 - Temperaturverlauf bei 2m/s Windgeschwindigkeit

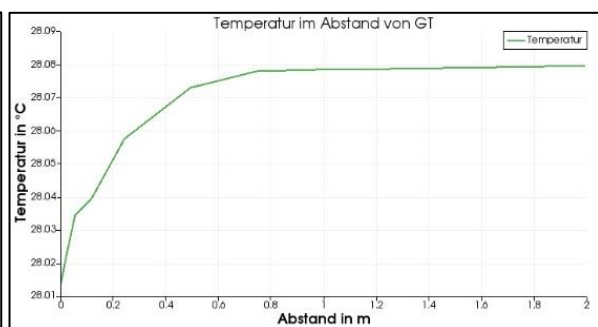


Abbildung 20 - Temperaturverlauf bei 6m/s Windgeschwindigkeit

Bei Windgeschwindigkeiten, die höher als etwa 10m/s liegen, werden vor und hinter dem „Greentower“ höhere Temperaturen berechnet, während neben dem Turm die Luft abgekühlt wird. Eine mögliche Erklärung wäre, dass die vergleichsweise niedrige Strömungsgeschwindigkeit vor und hinter dem „Greentower“ und der dadurch entstehende hohe Druck die Temperaturerhöhung bewirkt. An den Seiten vom Turm ist dagegen die Geschwindigkeit hoch und der Druck niedrig. Mit der Temperaturerhöhung durch den Druck lassen sich auch die Temperaturanstiege erklären, die direkt vorm Turm bei



der Messung der Temperatur über den „Greentower“ entstehen (siehe Abbildung 122 - Temperaturverlauf über den "Greentower" bei 5,7m/s Windgeschwindigkeit in z-Richtung). Die höchste vorliegende Windgeschwindigkeit, die bei den ausgewählten Sommertagen auftritt, ist am 12.07.2023 um zwei Uhr nachts aufgetreten und beträgt 38km/h beziehungsweise 10,5556m/s. Eine höhere Windgeschwindigkeit als 10m/s tritt im Sommer nur selten auf.

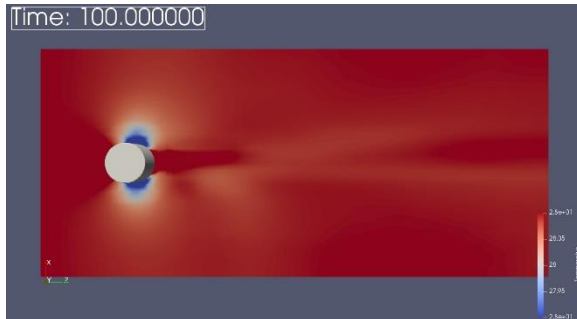


Abbildung 131 - Draufsicht mit Temperaturkonturplot

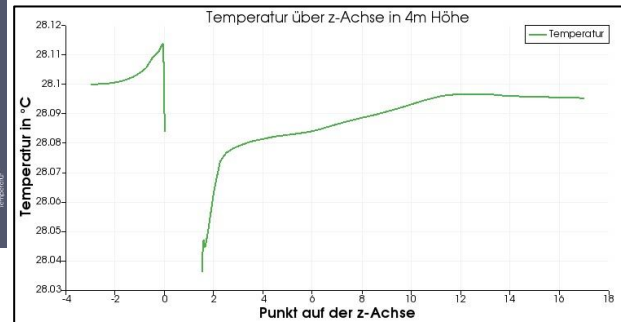


Abbildung 122 - Temperaturverlauf über den "Greentower" bei 5,7m/s Windgeschwindigkeit in z-Richtung

#### 6.3.4 Berechnungen mit mehreren „Greentowern“

Nach der Berechnung von einzelnen Türmen, kam als nächster Schritt die Berechnung eines Modells, das der Umgebung entspricht, in dem der „Greentower“ realisiert werden soll. Das bedeutet, dass eine Geometrie entworfen wird, die einer Straße nachempfunden ist. Dazu wurden mithilfe des blockMesh-Befehls nicht nur die Geometrie des umgebenen Quaders erstellt, sondern auch an den Längsseiten 10m hohe Flächen als Wände definiert, die Gebäude an der Straße repräsentieren. Außerdem wurden sechs „Greentower“ verteilt. Dabei stehen jeweils drei „Greentower“ in 2m Abstand zu den Seitenflächen an den beiden Längsseiten. Zwischen den Mittelpunkten der einzelnen „Greentowern“ sind jeweils 10m Abstand. Der Wind kommt anschließend entweder aus z-Richtung, aus x-Richtung oder aus x-z-Richtung. In diesem Fall ist die Windrichtung relevant, da die dargestellten Gebäude die Strömungsrichtung und die Windgeschwindigkeit, insbesondere wenn der Wind quer zu den Gebäuden verläuft, beeinflussen können.

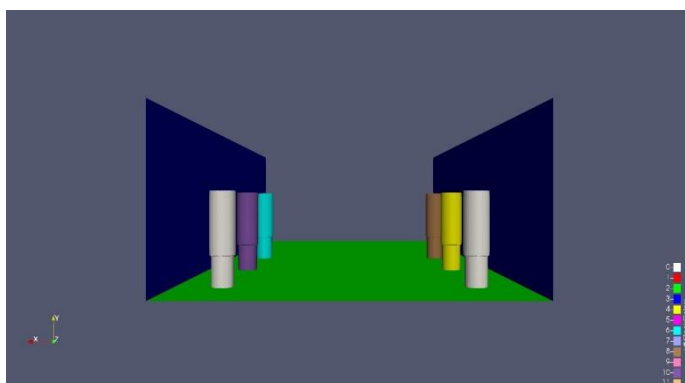


Abbildung 14 - Modell einer Straße mit mehreren "Greentowern"



Wenn der Wind ganz in z-Richtung strömt, ergeben sich Temperaturänderungen hinter den Reihen der „Greentower“, im Zwischenraum findet nur eine kleine Änderung um maximal 0,01K und in einigen Bereichen sogar eine sehr kleine Erhöhung der Temperatur statt. Dadurch, dass die Strömung längs der Gebäude erfolgt, haben diese keinen Einfluss auf die Strömungsrichtung oder Strömungsgeschwindigkeit und das Modell entspricht dem Modell von mehreren einfachen „Greentowern“ hintereinander. Genau wie bei dem einfachen Modell, wird hier eine sehr kleine Temperaturänderung hinter dem Turm weit fortgeführt. Eine Ausbreitung in die Breite findet dabei fast nicht statt.

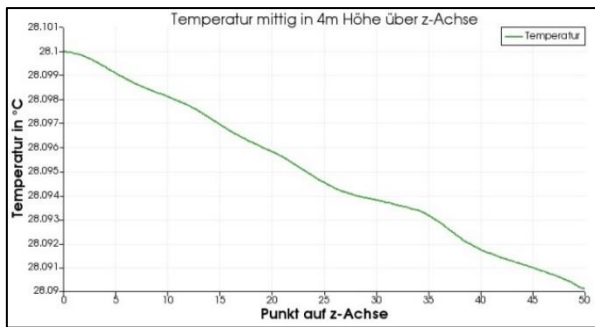


Abbildung 15 - Temperaturverlauf in der Mitte des Modells

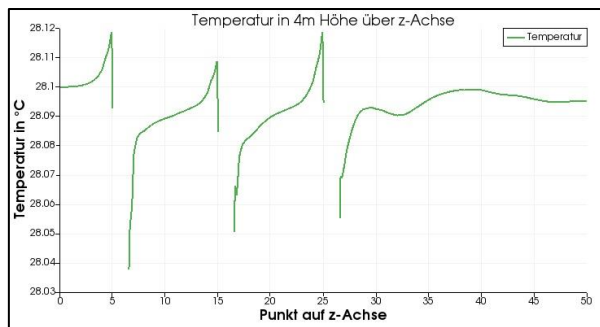


Abbildung 25 - Temperaturverlauf über die vordere Reihe Greentower

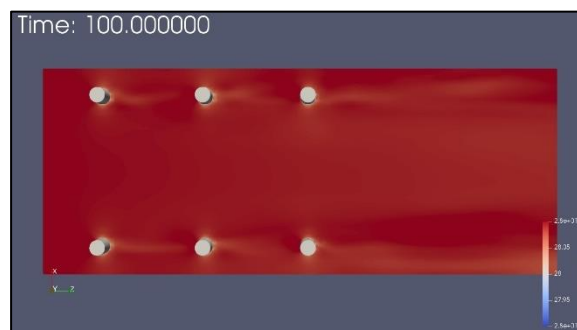


Abbildung 26 - Draufsicht mit Temperaturkonturplot

Bei einer Anströmung, die ganz aus x-Richtung und damit quer zu den Gebäuden verläuft, ist die Kühlungswirkung des „Greentowers“ dagegen mit Werten um 27,8°C im Raum zwischen den Gebäuden wesentlich größer. Wenn man die Strömungslinien in diesem Fall betrachtet, kann man den Grund für dieses Verhalten erkennen. Während über den Gebäuden die Windströmung gerade in x-Richtung erfolgt, bilden sich zwischen den Gebäuden Luftwirbel.

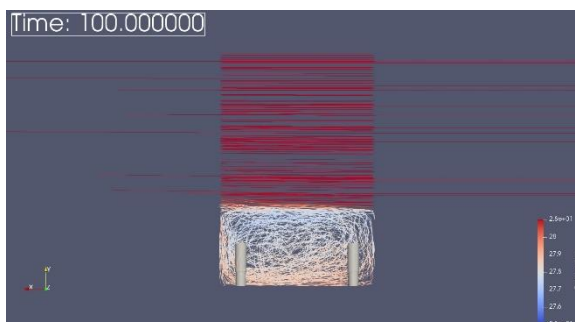


Abbildung 167 - Strömungslinien, Färbung nach Temperatur

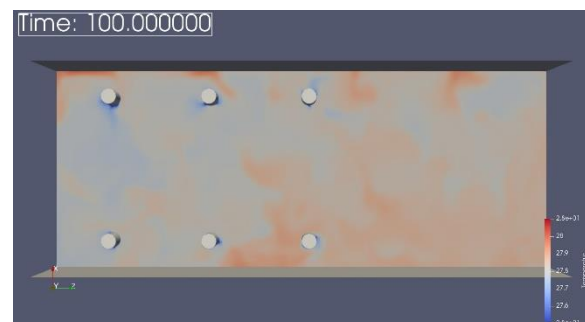


Abbildung 28 - Draufsicht mit Temperaturkonturplot

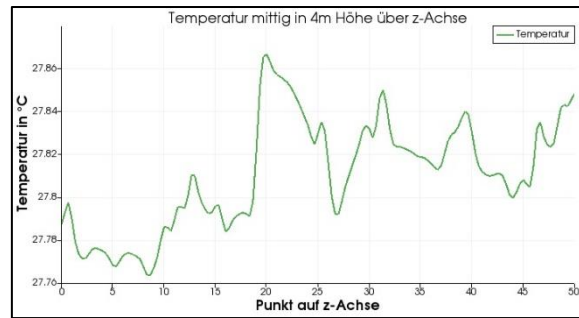


Abbildung 29 – Temperaturverlauf zwischen den „Greentowern“

Dabei findet zwischen den Wirbeln und der geraden Strömung kaum ein Austausch statt. Somit wird unten zwischen den Gebäuden immer wieder gekühlte Luft aufgenommen und verbleibt aufgrund des geringen Austausches auch dort. Außerdem verlaufen die Strömungen zwischen den Gebäuden nicht in eine Richtung, sodass die Temperaturänderung ebenfalls in mehrere Richtungen verteilt wird. Der fehlende Luftaustausch würde in der realen Welt allerdings auch bedeuten, dass der verdunstete Wasserdampf sich dort anlagern würde, was eine verminderte Verdunstungsleistung zur Folge hätte. Auch die Gebäude könnten durch Abwärme eine Änderung der Temperatur bewirken. Das wird in unserem Modell nicht berücksichtigt, sie haben eine Randbedingung „zeroGradient“. Das bedeutet, dass sie die gleiche Temperatur besitzen, wie die Luft direkt neben ihnen.

Eine dauerhafte Windströmung aus einer Querrichtung entspricht nicht der Wirklichkeit, in der der Wind meist zumindest etwas schräg auf das Modell der Straße trifft. Daher erfolgt in einer weiteren Rechnung die Anströmung als Summe aus x- und z-Richtung. Dadurch werden beide vorherigen Rechnungen kombiniert. Dabei liegen bei einer ersten Rechnung in x-Richtung 2m/s und in z-Richtung 4m/s Windgeschwindigkeit vor. Damit ergibt sich ein Gesamtbetrag von etwa 4,47m/s. Die anderen Parameter entsprechen den Werten vom 12.07.2023 um 18 Uhr. Dabei zeigt sich die Beeinflussung der Temperatur durch den „Greentower“ vor allem im Zwischenraum von der vorderen Reihe „Greentower“ und den vorderen Gebäuden (Abbildung ), da dort die Windströmung von den Gebäuden größtenteils blockiert wird.



Abbildung 30 – Draufsicht mit Temperaturkonturplot

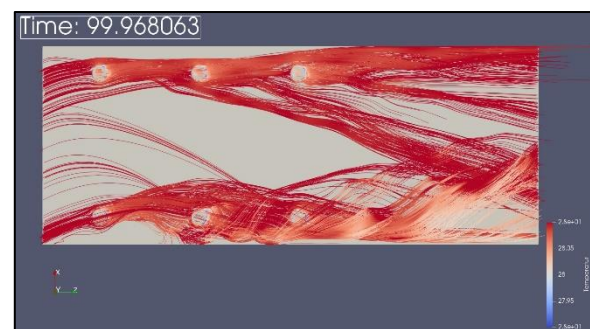


Abbildung 31 – Draufsicht mit Strömungslinien, Färbung nach Temperatur

Eine zweite Rechnung wird mit einer Windgeschwindigkeit von 4m/s in x-Richtung und 2m/s in z-Richtung durchgeführt. Der Betrag bleibt also gleich groß und nur die Windrichtung ändert sich. Da der Anteil der Strömung in x-Richtung nun größer ist, zeigen sich auch mehr Verwirbelungen zwischen den Gebäuden (Abbildung 18).

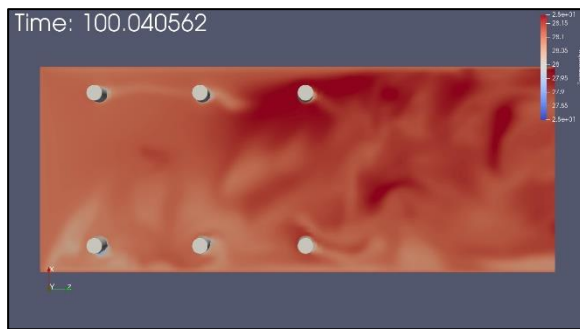


Abbildung 17 – Draufsicht mit Temperaturkonturplot



Abbildung 18 – Draufsicht mit Strömungslinien, Färbung nach Temperatur

Dieses Modell zeigt den Einfluss, den die Umgebung auf die Wirkung des „Greentowers“ hat. Es lässt sich schlussfolgern, dass eine Anströmung aus x-Richtung, beziehungsweise eine Anströmung über Gebäude, die Kühlwirkung des „Greentowers“ auf die Umgebung verstärkt, da durch die entstehenden Verwirbelungen die Temperaturänderung in einem größeren Luftvolumen verteilt werden kann. Gleichzeitig findet noch ein Austausch mit der oberen Luftschicht statt, sodass keine schnelle Sättigung der Luft mit Wasserdampf erfolgt. Dieses Modell mit einer schrägen Anströmung dürfte den realen Umständen am nächsten kommen. Einschränkungen des Modells sind die vereinfachte Geometrie der Gebäude und die fehlende Wärme, die von diesen und dem Boden ausgehen könnte. Diese Wärmestrahlung ist schwer zu quantifizieren, da sie unter anderem vom verwendeten Material, der Sonneneinstrahlung, die wiederum vom Bewölkungsgrad und Tageszeit abhängt, und von zusätzlichen Hitze- und Windquellen abhängig ist. Letztere können zum Beispiel durch Lüftungen oder Klimaanlage entstehen.

## 7. Weitere Einflüsse des „Greentowers“ auf die Umgebung

Neben dem Einfluss auf die Umgebungstemperatur kann der „Greentower“ weitere positive Auswirkungen auf die direkte Umgebung bieten. Zum Beispiel können Insekten ihn als Lebensraum nutzen. Außerdem werden von den Pflanzen Kohlenstoffdioxid und Feinstaub aufgenommen. Diese Auswirkungen zu quantifizieren war eine weitere Aufgabe.

### 7.1 Aufnahme von CO<sub>2</sub> durch den „Greentower“

Kohlenstoffdioxid wird von Pflanzen im Rahmen der Photosynthese aufgenommen. Dazu benötigen Pflanzen Sonnenstrahlung, sonst tritt auch bei ihnen die Atmung in den Vordergrund, sie stoßen Kohlenstoffdioxid aus und nehmen Sauerstoff auf. Auch bei hohen Temperaturen nimmt die Atmung zu. Das Maximum der CO<sub>2</sub>-Aufnahme ist pflanzenspezifisch und liegt meist bei Temperaturen zwischen 20°C und 30°C (Frey und Lösch 2010, S. 272). Aus den Daten für verschiedene Pflanzengruppen können Abschätzungen über die Photosynthese des „Greentowers“ gemacht werden. Wird eine Nettoprimärproduktion pro Jahr und Quadratmeter Grundfläche von 1kg/m<sup>2</sup>a angenommen, ein guter Wert für Gräser (ebd. S.275), erzeugt der „Greentower“ 20kg/a Trockensubstanz. Aus dieser Trockensubstanz oder Trockenmasse kann die aufgenommene Menge Kohlenstoffdioxid errechnet werden (Herfort et al. 2012, S. 11f). Mit einem Umrechnungsfaktor von 1,46 ergibt sich eine Aufnahmemenge von 29,2kg/a beziehungsweise 80g/d an Kohlenstoffdioxid für die berechnete Trockensubstanz. Die Kohlenstoffdioxid-Emissionen pro Kopf betragen 2022 in Deutschland 7,98t/a beziehungsweise 21,86kg/d (carbonmonitor.org 2024). Allein bei der Atmung stößt der Mensch jährlich zwischen 168 und 2040kg Kohlenstoffdioxid aus (tagesschau.de 2019). Das bedeutet, dass ein „Greentower“ nur einen kleinen Teil der menschlichen Produktion aufnehmen kann.



## 7.2 Aufnahme von Feinstaub durch den „Greentower“

### 7.2.1 Allgemeine Informationen

Als Feinstaub werden kleine Partikel in der Luft bezeichnet, die beim Einatmen die Gesundheit schädigen können (Flohr 2010, S. 21f). Pflanzen können Feinstaub aus der Umgebung aufnehmen. Dabei kann zwischen zwei Filterwirkweisen unterschieden werden. Bei der aktiven Filterung nach Wentzel sammeln sich die Partikel auf der Pflanzenoberfläche an und bei der passiven Filterung nach Blum wird der Luftstrom abgelenkt und es kommt zu Geschwindigkeits- und Richtungsänderungen, die Luftverunreinigungen ausfallen lassen (Flohr 2010, S. 4). Es können Partikel umso besser abgefangen werden, je rauer oder klebriger die Pflanzenoberfläche ist. Die Rauigkeit wird insbesondere durch Haare auf Blättern und Sprossachsen erreicht (ebd. S. 18). Bei sommergrünen Pflanzen ist zu beachten, dass sie im Winter nicht im vollen Umfang zur Staubablagerung beitragen können (ebd. S. 93), obwohl diese dann am höchsten ist (ebd. S. 16). Aber auch die Sprossachsen können, insbesondere bei dichter Behaarung oder strukturierter Oberfläche, gute Staubfänger sein (ebd. S. 93ff). In der Dissertation von Flohr wurden experimentell Aufnahmewerte von Partikeln in den Größenordnungen PM<sub>10</sub> und PM<sub>2.5</sub> für verschiedene Pflanzenarten ermittelt (ebd. S. 87f). Diese reichen von 0,05mg/cm<sup>2</sup> bis 9,76mg/cm<sup>2</sup> für PM<sub>10</sub> und von 0,03mg/cm<sup>2</sup> bis 7,65mg/cm<sup>2</sup> für PM<sub>2.5</sub>. Dabei sind die Maximalwerte allerdings Ausreißer und gelten nur für eine Pflanzenart, die zweithöchsten Werte betragen 3,91mg/cm<sup>2</sup> und 3,18mg/cm<sup>2</sup>.

Ausgehend von diesen Werten können Rechnungen für den „Greentower“ vorgenommen werden. Da Staub auf jedem Blatt aufgenommen wird, muss der Blattflächenindex (LAI = „Leaf area index“) beachtet werden. Als Annahme wird 4m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> genommen (Frey und Lösch 2010, S. 177). Dieser Wert bedeutet, dass sich auf 1m<sup>2</sup> Grundfläche 4m<sup>2</sup> Blattflächen befinden. Bei einer bepflanzten Fläche von 20m<sup>2</sup> ergibt das Blattflächen von 80m<sup>2</sup>. Für die Aufnahme von PM<sub>10</sub>-Staub wurden 0,8mg/cm<sup>2</sup> angenommen, was eine maximale Gesamtaufnahme von 640g ergibt. Wenn bei PM<sub>2.5</sub> eine Staubaufnahme von 0,6mg/cm<sup>2</sup> angenommen wird, ergibt sich eine Gesamtaufnahme von 480g auf dem gesamten „Greentower“. Die Pflanzen können erst wieder weitere Partikel aufnehmen, wenn die alten von der Oberfläche entfernt werden. Das geschieht vor allem durch Abspülen des Staubs bei Regen und bei starkem Wind (Wang et al., 2014). Auch mit dem Abwurf von Blättern werden die darauf befindlichen Partikel entfernt (Popek et al., 2014).

### 7.2.2 Beispielrechnung

Um die Kompensationsmöglichkeiten des „Greentowers“ im Hinblick auf die Feinstaubbelastung besser beurteilen zu können, wurde eine Berechnung an einem Beispiel durchgeführt. Als Modellbereich dient die Fuldaer Bahnhofstraße und die senkrecht zu ihr verlaufenden Straßen in einer Länge von jeweils 250m. Es wurden insgesamt 24 „Greentower“ in diesem Bereich angenommen.

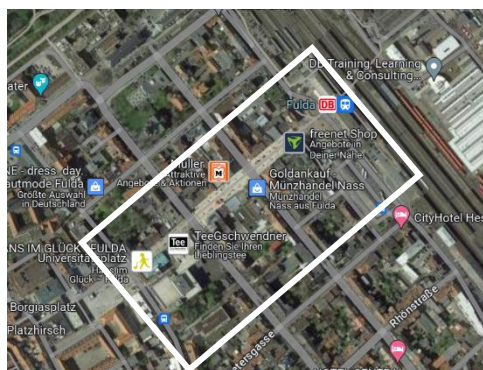


Abbildung 19 - Satellitenbild Bahnhofstraße mit Modellbereich



Dabei war vor allem der durch den Verkehr entstehende Feinstaub von Interesse. Zu dessen Berechnung wurde das Verkehrsaufkommen in den Querstraßen nach den Daten aus dem Verkehrsentwicklungsplan (2018) geschätzt. Dabei wurden für den Abschnitt der Kurfürstenstraße und Am Bahnhof 8000, für die Heinrichstraße 4000, für die Lindenstraße 6000 und für die Rabanusstraße 7000 Autos täglich angenommen. Hinzu kommen noch etwa 684 Busse in der Straße Am Bahnhof und der Kurfürstenstraße und 210 Busse in der Rabanusstraße. Diese Zahlen entsprechen den Abfahrten an den Haltestellen ZOB beziehungsweise Universitätsplatz (RMV). Somit beträgt die Gesamtsumme im Modellbereich etwa 25 000 Autos und 894 Busse, die jeweils eine Strecke von 250m zurücklegen. Alle Werte gelten für Schultage. An den Wochenenden und in den Ferien ist mit deutlich reduziertem Verkehr zu rechnen.

Für 2022 gibt das Umweltbundesamt einen Ausstoß von 0,013g Partikeln der Größe PM10 für jeden gefahrenen Kilometer pro Person bei einer Auslastung von 1,4 Personen pro Pkw an. Das ergibt einen Partikel ausstoß von 0,0182g/km pro Auto. Für Busse werden bei 14% Auslastung 0,012g/km Feinstaubemission pro Person angegeben, was bei einer Kapazität von 70 Personen (procitybahn) einen Partikel ausstoß von 0,1176g/km pro Bus ergibt. Das ergibt mit dem Verkehrsaufkommen im Modellbereich einen Gesamtausstoß von 140,0336g pro Tag. Diese Angaben beziehen sich auf den reinen Ausstoß über die Auspuffanlagen der Fahrzeuge. Hinzu kommen noch Partikel aus Reifen- und Bremsabrieb. Dieser Anteil nimmt durch die ständige Verbesserung der Filter in Fahrzeugen und der Zunahme von Elektroantrieben zu. Die Summe aus Ausstoß und Abrieb beträgt etwa 414% des reinen Ausstoßes (Dauert, 2021). Demnach produziert der Verkehr im Modellbereich insgesamt etwa 579,7391g Feinstaubpartikel pro Werk- und Schultag. Für 2021 gibt das Bundesumweltamt einen Anteil von 10% PM10-Partikeln des Verkehrs an den Gesamtemissionen von Feinstaub an (Bundesumweltamt 2024), was zu einer Gesamtsumme von 5,797kg Feinstaub pro Tag im Modellbereich führt.

Bei einer maximalen Aufnahmemenge von 640g pro „Greentower“ folgt eine Kompensation von Feinstaubausstoß aus dem Verkehr von 1,104 Tage beziehungsweise werden für die Kompensation der Gesamtemissionen täglich 9,058 „Greentower“ benötigt.

Die berechneten Werte geben nur Durchschnitte an. Bei der Betrachtung des Feinstaubausstoßes im abgegrenzten Bereich ist zu beachten, dass die Menge des Feinstaubes aus dem Anteil des Verkehrs abgeschätzt wurde. Die Zusammensetzung wurden aus den Werten für ganz Deutschland abgeleitet. Da es sich bei unserem Gebiet um ein Stadtgebiet handelt, könnte die reale Zusammensetzung etwas abweichen. Vermutlich ist der Anteil der Landwirtschaft kleiner und dafür sind die Anteile von Verkehr und Haushalten größer als im Durchschnitt. Auch der unterschiedliche Verkehr über den Tages- und Wochenverlauf hat Einfluss auf die Feinstaubemissionen. An der Messstation an der Petersberger Straße werden beispielsweise häufig höhere Feinstaubkonzentrationen zur Hauptverkehrszeit zwischen 7 und 8 Uhr gemessen (hlnug). Am Wochenende sind meist niedrigere Konzentrationen zu erkennen. Daher gelten die Angaben für das Verkehrsaufkommen und den resultierenden Feinstaub für Werk- und Schultage. Außerdem ist die Feinstaubbelastung abhängig von den Wetterbedingungen. Windiges Wetter begünstigt eine weite Verteilung von Partikeln und einen Austausch mit höheren Luftschichten, sodass die örtliche Belastung niedriger wird. Mit Niederschlägen kann der Feinstaub gebunden und dem Boden zugeführt werden. Im Jahresverlauf zeigen sich ebenfalls Unterschiede in der Feinstaubkonzentration. Meist ist der Wert im Februar am höchsten, was sich auf die häufigen trockenen Hochdrucklagen mit geringem Luftaustausch mit höheren Luftschichten zurückführen lässt. In den typischerweise niederschlagsreicheren Sommermonaten sind die Feinstaubwerte niedriger. Hinzu kommt die erhöhte Heizleistung im Winter, wodurch ebenfalls zusätzlicher Staub erzeugt wird. Daher sollte bei der Bepflanzung insbesondere Wert darauf gelegt werden, dass nicht nur sommergrüne Pflanzen verwendet werden.



Im Gegensatz zur Temperaturänderung und der Kohlenstoffdioxidaufnahme, bei denen die Auswirkungen relativ klein sind, kann der „Greentower“ bei der Aufnahme von Feinstaub durchaus einen positiven Einfluss auf die Umgebung bewirken.



## 8. Fazit

Der „Greentower“ bewirkt nur eine geringe Abkühlung der Umgebung durch die Evapotranspiration. Bei Wind kann dieser Unterschied allerdings in einem größeren Umfeld verbreitet werden, bewirkt aber auch dann nur sehr kleine Temperaturänderungen in der Umgebung. Mit zunehmender Windgeschwindigkeit steigt die Verdunstungsleistung und damit die Kühlleistung des „Greentowers“. Zusätzlich kann der Wind die Temperaturänderung in die Windrichtung verteilen. Dabei bewirkt eine geringere Windgeschwindigkeit allerdings eine Verbreitung in einer breiteren Umgebung. Zudem beeinflusst der Standort diesen Einfluss stark. Befindet sich der „Greentower“ in einer Position, bei der nur wenig Austausch der Umgebungsluft stattfindet, ist seine Wirkung auf die Lufttemperatur größer als in einer Umgebung mit ständigem Luftaustausch. Zu beachten ist dabei allerdings, dass unter diesen Bedingungen aufgrund der Zunahme der Wassersättigung der Luft auch die Verdunstungsleistung und somit die Kühlleistung abnimmt. Außerdem entstehen in solchen Stauungslagen häufig auch höhere Lufttemperaturen, die aber wiederum zu einer größeren Verdunstung beitragen können. Beide Faktoren konnten bei diesen Rechnungen nicht berücksichtigt werden.

Kohlenstoffdioxid wird nur in einer zu vernachlässigenden Größenordnung aufgenommen. Der „Greentower“ kann allerdings effektiv zur Reduzierung von Feinstaub beitragen. Außerdem entsteht durch den entstehenden Schattenwurf, der bei der Berechnung nicht berücksichtigt wurde, ebenfalls ein Bereich, in dem die Luft kühler wird. Im Gegensatz zu grünen Bodenflächen nimmt der Turm bei großer Bepflanzungsfläche wenig Grundfläche ein und benötigt, anders als eine bepflanzte Wand oder Gründächer, keine Einwilligung von Hauseigentümern zur Installation. Die benötigte Zeit bis zur vollen Entwicklung der Pflanzen ist weitaus geringer als bei der Anpflanzung von Bäumen und durch die Höhe, in der die Bepflanzung beginnt, ist sie auch besser vor Vandalismus geschützt. Gleichzeitig findet die Einflussnahme auf die Umgebungsluft, anders als bei hohen begrünten Dächern, noch in einer Höhe statt, die von Menschen genutzt wird. Bei einem Einsatz mit weiteren Maßnahmen zur Begrünung oder von mehreren Türmen in kurzen Abständen könnten durchaus Kühlungseffekte erreicht werden. Insgesamt sollte der zunehmenden Hitze in Städten mit einem Mix aus verschiedenen Maßnahmen begegnet werden. Dazu gehört wie, eingangs bereits beschrieben, neben Begrünungen auch eine geeignete Auswahl an Baumaterialien und eine allgemeine Reduktion des Energieverbrauchs. Insbesondere bei der Neuerrichtung oder dem Umgestalten von ganzen Stadtvierteln sollte der Hitzeschutz beachtet werden. Der „Greentower“ kann dazu einen kleinen Teil beitragen.



## I. Literaturverzeichnis

*Akbari et al. 2015*

Akbari, Hashem; Cartalis, Constantinos; Kolokotsa, Denia; Muscio, Alberto; Pisello, Anna Laura; Rossi, Federico et al. (2015): LOCAL CLIMATE CHANGE AND URBAN HEAT ISLAND MITIGATION TECHNIQUES – THE STATE OF THE ART. In: *Journal of Civil Engineering and Management* 22 (1), S. 1–16. DOI: 10.3846/13923730.2015.1111934.

*Allen et al. 1998*

Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. (1998): Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Paper 56. FAO. Rome. Online verfügbar unter <https://www.fao.org/4/X0490E/x0490e01.htm>, zuletzt geprüft am 13.03.2025.

*Bernhardt et al. 2022*

Bernhardt, J. J.; Rolfes, L.; Kreins, P.; Henseler, M. (2022): Ermittlung des regionalen Bewässerungsbedarfs für die Landwirtschaft in Bayern. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Braunschweig (Thünen Rep, 96). Online verfügbar unter [https://literatur.thuenen.de/digbib\\_extern/dn065033.pdf](https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn065033.pdf), zuletzt geprüft am 15.03.2025.

*Brune et al. 2017*

Brune, M.; Bender, S.; Groth, M. (2017): Gebäudebegrünung und Klimawandel. Anpassung an die Folgen des Klimawandels durch klimawandeltaugliche Begrünung. Hg. v. Climate Service Center Germany. Hamburg (Report, 30).

*Cameron et al. 2014*

Cameron, Ross W.F.; Taylor, Jane E.; Emmett, Martin R. (2014): What's 'cool' in the world of green façades? How plant choice influences the cooling properties of green walls. In: *Building and Environment* 73, S. 198–207. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.12.005.

*Dauert 2021*

Dauert, Ute (2021): Luftqualität 2020 - Situation und Quellenanalyse. Hg. v. Bundesinstitut für Risikobewertung. Online verfügbar unter <https://mobil.bfr.bund.de/cm/343/luftqualitaet-2020-situation-und-quellenanalyse.pdf>, zuletzt geprüft am 13.03.2025.

*Davis und Hirmer 2015*

Davis, Michael Maks; Hirmer, Stephanie (2015): The potential for vertical gardens as evaporative coolers: An adaptation of the 'Penman Monteith Equation'. In: *Building and Environment* 92, S. 135–141. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.03.033.

*Flohr 2010*

Flohr, Sabine: Untersuchungen zum Fangvermögen von Mittel- und Feinstaub (PM10 und PM2.5) an ausgesuchten Pflanzenarten unter Berücksichtigung der morphologischen Beschaffenheit der Blatt- und Achsenoberflächen und der Einwirkung von Staubauflagen auf die Lichtreaktion der Photosynthese. Universität Duisburg-Essen. Online verfügbar unter [https://duepublico2.uni-due.de/receive/duepublico\\_mods\\_00024168](https://duepublico2.uni-due.de/receive/duepublico_mods_00024168).

*Fohrer 2016*

Fohrer, Nicola; Bormann, Helge; Miegel, Konrad; Casper, Markus; Bronstert, Axel; Schumann, Andreas; Weiler, Markus (2016): Hydrologie. 1. Aufl. Bern: Haupt Verlag.

*Glück 2007*

Glück, Bernd (2008): Simulationsmodell "Erdwärmekollektor". Rud. Otto Meyer-Umwelt-Stiftung. Online verfügbar unter <https://berndglueck.de/erdwaermekollektor.php>, zuletzt geprüft am 13.03.2025.

*Herfort et al. 2012*

Herfort, Susanne; Tschuikowa, Steffi; Ibañez, Andrés (2012): CO<sub>2</sub> - Bindungsvermögen der für die Bauwerksbegrünung typischen Pflanzen. Institut für Agrar - und Stadtökologische Projekte an der Humboldt - Universität zu Berlin (IASP). Berlin. Online verfügbar unter [https://www.gebaeudegruen.info/fileadmin/website/downloads/bugg-untersuchungen/F002\\_co2\\_bindung.pdf](https://www.gebaeudegruen.info/fileadmin/website/downloads/bugg-untersuchungen/F002_co2_bindung.pdf), zuletzt geprüft am 13.03.2025.

*Heusinger und Weber 2015*

Heusinger, Jannik; Weber, Stephan (2015): Comparative microclimate and dewfall measurements at an urban green roof versus bitumen roof. In: *Building and Environment* 92, S. 713–723. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132315300172>.

*Hoelscher et al. 2016*

Hoelscher, Marie-Therese; Nehls, Thomas; Jänicke, Britta; Wessolek, Gerd (2016): Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation. In: *Energy and Buildings* 114, S. 283–290. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.06.047.

*Frey und Lösch 2010*

Wolfgang Frey; Rainer Lösch (2010): Geobotanik. Pflanze und Vegetation in Raum und Zeit. 3. Aufl. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

*Wong et al. 2010*



Wong, Nyuk Hien; Kwang Tan, Alex Yong; Chen, Yu; Sekar, Kannagi; Tan, Puay Yok; Chan, Derek et al. (2010): Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. In: *Building and Environment* 45 (3), S. 663–672. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.08.005.

*Zenker 2003*

Zenker, Thomas (2003): Verdunstungswiderstände und Gras-Referenzverdunstung. Dissertation. TU Berlin, Berlin. Online verfügbar unter <https://depositonce.tu-berlin.de/items/a37d7cd8-7066-4277-85fd-c8c5557f302e>, zuletzt geprüft am 13.03.2025.

*Žuvela-Aloise et al. 2016*

Žuvela-Aloise, M.; Koch, R.; Buchholz, S.; Früh, B. (2016): Modelling the potential of green and blue infrastructure to reduce urban heat load in the city of Vienna. In: *Climatic Change* 135 (3-4), S. 425–438. DOI: 10.1007/s10584-016-1596-2.



## II. Internetquellen

*Hlnug*

Hlnug: Luftmessstelle Fulda Zentral | Messdatenportal. Online verfügbar unter <https://www.hlnug.de/messwerte/datenportal/messstelle/2/1/1205>, zuletzt geprüft am 13.03.2025.

*kachelmannwetter.com*

kachelmannwetter.com (2025): Aktuelle Messwerte Deutschland. Online verfügbar unter <https://kachelmannwetter.com/de/messwerte>, zuletzt geprüft am 13.03.2025.

*kachelmannwetter.com*

kachelmannwetter.com (2025): Potentielle Verdunstung, 1std (mm) - Wetteranalyse vom 07.07.2023, 00:00 Uhr für Hessen | SuperHD (Mesoanalyse). Online verfügbar unter <https://kachelmannwetter.com/de/analyse/superhd/hessen/pot-evaporation-1h/20230706-2200z.html>, zuletzt geprüft am 13.03.2025.

*carbonmonitor.org 2024*

Liu, Zhu; Ciais, Philippe; Davis, Steve; Deng, Zhu; Wang, Yilong (2025): TOTAL CO2 EMISSIONS PER YEAR (MtCO<sub>2</sub>/day). Tsinghua University; LSCE; UCI; Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research. Online verfügbar unter <https://carbonmonitor.org/>, zuletzt geprüft am 13.03.2025.

*tagesschau.de 2019*

Rohwedder, Wulf (2019): CO<sub>2</sub>-Ausstoß: Atmen wir das Klima kaputt? tagesschau.de. Online verfügbar unter <https://www.tagesschau.de/faktenfinder/kohlendioxid-atmung-brandner-101.html>, zuletzt geprüft am 13.03.2025.

*Schöniger 2008*

Schöniger, H. M. (2008): Verdunstung. (...eine wichtige Wasserhaushaltskomponente). Online verfügbar unter <https://www.tu-braunschweig.de/index.php?elD=dumpFile&t=f&f=50570&token=32fc74430adb7076bb36a9357d86e271486e61ae>, zuletzt geprüft am 13.03.2025.

*Umweltbundesamt 2024*

Umweltbundesamt (2024): Emission von Feinstaub der Partikelgröße PM-10. Emissionsentwicklung. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland/emission-von-feinstaub-der-partikelgroesse-pm10#emissionsentwicklung>, zuletzt geprüft am 13.03.2025.

*Umweltbundesamt 2025*

Umweltbundesamt (2025): Emissionsdaten. Emissionen im Personenverkehr. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/emissionsdaten#verkehrsmittelvergleich\\_personenverkehr\\_grafik](https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/emissionsdaten#verkehrsmittelvergleich_personenverkehr_grafik), zuletzt geprüft am 13.03.2025.



## A Anhang

### A.1 Tabellen

#### Messwerte für verschiedene Tage

Messwerte für den 07.07.2023

Wetterstation Fulda-Horas; Windgeschwindigkeit als Mittelwert von Wasserkuppe und Aisfeld; Bewölkungswerte von Wetterstation Wasserkuppe; Strahlungswerte von Wetterstation Bad Hersfeld

Uhrzeit in Stunden	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Temperatur in °C	10,2	8,8	7,7	6,8	6,4	5,8	5,6	8,4	12,8	16,7	20,8	25,2
Luftfeuchte in %	86	91	95	96	97	97	98	97	68	56	50	33
Windgeschw. in km/h	6,5	8,5	7,5	7,5	9,5	11,5	10,5	7,5	5,5	6	6	8,5
Bewölkung in %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Niederschlag in mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Strahlung in MJ/m <sup>2</sup>	0	0	0	0	0	0	0,08	0,308	0,806	1,366	1,936	2,454

Uhrzeit in Stunden	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Temperatur in °C	27,1	27,3	28,3	29,4	29,7	30,6	30	30,2	29,3	27,1	19,2	15,9
Luftfeuchte in %	29	28	28	25	25	22	22	23	26	31	60	75
Windgeschw. in km/h	12	10	13	13	13	13	13	10	10	11	9,5	12,5
Bewölkung in %	0	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Niederschlag in mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Strahlung in MJ/m <sup>2</sup>	2,928	3,326	3,469	3,406	3,094	2,621	2,174	1,441	0,977	0,45	0,056	0

Tabelle 1



Messwerte für den 12.07.2023

Wetterstation Fulda-Horas; Windgeschwindigkeit als Mittelwert von Wasserkuppe und Alsfeld; Bewölkungswerte von Wetterstation Wasserkuppe; Strahlungswerte von Wetterstation Bad Hersfeld

Uhrzeit in Stunden	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Temperatur in °C	25,2	26,5	22,1	21,6	21,2	21,2	20,8	21,3	21,6	20,6	22,4	23,5
Luftfeuchte in %	65	56	72	74	73	73	75	75	77	68	61	53
Windgeschw. in km/h	16,5	21	38	34	34,5	38	35	24	27	22	15,5	14
Bewölkung in %	100	100	88	100	100	100	63	100	100	100	100	75
Niederschlag in mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Strahlung in MJ/m <sup>2</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0,003	0,11	0,449	1,647	2,363

Untersuchung des Einflusses eines bepflanzten Turms auf die Umgebungstemperatur

Uhrzeit in Stunden	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Temperatur in °C	24,9	26,4	26,4	27,3	27,4	27	28,1	27	25,2	23,2	20	17,2
Luftfeuchte in %	46	43	41	40	36	35	32	34	41	47	57	71
Windgeschw. in km/h	19	22,5	19,5	19	22	19,5	20,5	17,5	17	14	8,5	9,5
Bewölkung in %	50	25	63	75	75	75	50	88	100	88	100	38
Niederschlag in mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Strahlung in MJ/m <sup>2</sup>	2,093	2,551	2,63	2,551	2,325	1,705	1,812	1,216	0,74	0,241	0,018	0

Tabelle 2



Messwerte für den 30.07.2023

Wetterstation Fulda-Horas; Windgeschwindigkeit als Mittelwert von Wasserkuppe und Alsfeld; Bewölkungswerte von Wetterstation Wasserkuppe; Strahlungswerte von Wetterstation Bad Hersfeld

Uhrzeit in Stunden	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Temperatur in °C	16,6	16,2	16,3	16,4	15,8	14,9	14,3	15,5	17,9	19,6	21,1	19,9
Luftfeuchte in %	94	93	93	94	96	97	98	98	87	68	64	67
Windgeschw. in km/h	12,5	11,5	12	14,5	14,5	15,5	13	13	12	14	16	16
Bewölkung in %	75	100	88	100	100	100	100	100	75	50	0	88
Niederschlag in mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Strahlung in MJ/m <sup>2</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0,142	0,496	1,032	1,582	1,493

Untersuchung des Einflusses eines bepflanzten Turms auf die Umgebungstemperatur

Uhrzeit in Stunden	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Temperatur in °C	20,9	20,6	15,5	17,8	17,7	19,9	20,3	20	19,6	17,6	16,8	16,9
Luftfeuchte in %	70	67	88	76	73	62	54	56	56	65	68	67
Windgeschw. in km/h	18,5	20,5	26	22,5	19,5	20,5	24	25	23,5	18,5	20,5	15
Bewölkung in %	88	75	88	88	88	75	88	88	88	63	88	75
Niederschlag in mm	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Strahlung in MJ/m <sup>2</sup>	1,193	0,827	0,501	0,776	1,226	2,104	1,11	0,461	0,366	0,129	0,002	0

Tabelle 3



Tabellen mit Werten für Extraterrestrische Strahlung und maximale tägl. Sonnenscheindauer (Schöniger 2008, S. 5)

Geogr. Breite	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
0°N	425	439	444	433	408	393	399	419	433	436	427	419
10°N	374	402	433	444	439	433	433	439	433	416	385	365
30°N	249	303	371	430	467	481	475	444	393	328	269	235
40°N	181	243	323	405	464	490	473	430	354	272	198	161
46°N	135	198	289	382	452	483	467	409	324	230	153	117
47°N	128	191	283	378	450	482	466	406	319	224	146	110
48°N	121	184	277	375	449	482	465	403	314	217	139	103
49°N	114	177	271	371	447	481	464	400	309	211	132	96
50°N	107	170	265	367	445	481	463	398	304	204	125	89
51°N	100	163	259	363	443	480	462	394	298	197	118	83
52°N	93	156	253	358	441	480	461	391	293	191	111	76
53°N	86	149	247	354	439	479	459	388	287	184	104	70
54°N	79	142	240	350	437	478	458	384	282	177	97	63
55°N	73	135	234	345	435	478	457	381	276	170	90	56

Tabelle 4 – Extraterrestrische Strahlung RE, mittlere Monatswerte in W/m<sup>2</sup>

Nördl. Breite	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun
55°	7.9	9.8	11.9	14.2	16.2	17.3	16.7	15.0	12.7	10.6	8.5	7.3
54°	8.0	9.9	11.9	14.1	16.1	17.1	16.6	14.9	12.7	10.6	8.6	7.4
53°	8.2	9.9	11.9	14.0	15.9	16.9	16.4	14.8	12.7	10.6	8.7	7.6
52°	8.3	10.0	11.9	13.9	15.7	16.7	16.3	14.6	12.7	10.7	8.9	7.8
51°	8.5	10.1	11.9	13.9	15.5	16.5	16.1	14.6	12.7	10.8	9.0	8.0
50°	8.6	10.2	11.9	13.8	15.4	16.4	15.9	14.5	12.7	10.8	9.1	8.1
49°	8.7	10.2	11.9	13.7	15.3	16.2	15.8	14.4	12.7	10.8	9.2	8.2
48°	8.8	10.2	11.9	13.6	15.2	16.0	15.6	14.3	12.6	10.9	9.3	8.3
47°	9.0	10.3	11.9	13.6	15.1	15.8	15.5	14.2	12.6	10.9	9.4	8.5
46°	9.2	10.3	11.9	13.5	15.0	15.7	15.3	14.1	12.6	10.9	9.6	8.6
40°	9.6	10.7	11.9	13.3	14.4	15.0	14.7	13.7	12.5	11.2	10.0	9.3
35°	10.1	11.0	11.9	13.1	14.0	14.5	14.3	13.5	12.4	11.3	10.3	9.8
30°	10.4	11.1	12.0	12.9	13.6	14.0	13.9	13.2	12.4	11.5	10.6	10.2
25°	10.7	11.3	12.0	12.7	13.3	13.7	13.5	13.0	12.3	11.6	10.9	10.6
20°	11.0	11.5	12.0	12.6	13.1	13.3	13.2	12.8	12.3	11.7	11.2	10.9
15°	11.3	11.6	12.0	12.5	12.8	13.0	12.9	12.6	12.2	11.8	11.4	11.2
10°	11.6	11.8	12.0	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.8	11.6	11.5
5°	11.8	11.9	12.0	12.2	12.3	12.4	12.3	12.3	12.1	12.0	11.9	11.8
0°	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0

Tabelle 5 – Maximale tägliche Sonnenscheindauer S, mittlere Monatswerte in h/d



## A.2 Herleitung für die Temperaturgleichung

$$\Delta T_{\text{Luft}} = T(r) - T_L = T_L + \frac{(1-a) * \left(\frac{E_{\text{Lufterw}}}{A_{\text{verd}}}\right)}{15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}} - \frac{\frac{E_{\text{Lufterw}}}{24h}}{\lambda * 2 * \pi * h} * \ln\left(\frac{r}{r_i}\right) - T_L$$

- Oberflächentemperatur am „Greentower“
- Temperatur in Abhängigkeit vom Radius

$$\Delta T_{\text{Luft}} = \frac{(1-a) * \left(\frac{E_{\text{Lufterw}}}{A_{\text{verd}}}\right)}{15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}} - \frac{\frac{E_{\text{Lufterw}}}{24h}}{\lambda * 2 * \pi * h} * \ln\left(\frac{r}{r_i}\right)$$

$$\Delta T_{\text{Luft}} = \frac{(1-0,23) * \left(\frac{E_{\text{Lufterw}}}{20}\right)}{15} - \frac{\frac{E_{\text{Lufterw}}}{24}}{0,262 * 2 * \pi * 3,7} * \ln\left(\frac{r}{0,75}\right)$$

$$\Delta T_{\text{Luft}} = \frac{0,77 * E_{\text{Lufterw}}}{300} - \frac{\frac{E_{\text{Lufterw}}}{24}}{0,262 * 2 * \pi * 3,7} * \ln\left(\frac{r}{0,75}\right)$$

$$\Delta T_{\text{Luft}} = 0,00256667 * E_{\text{Lufterw}} - \frac{E_{\text{Lufterw}}}{24 * 0,60909198} * \ln\left(\frac{r}{0,75}\right)$$

$$\Delta T_{\text{Luft}} = 0,00256667 * E_{\text{Lufterw}} - \frac{E_{\text{Lufterw}}}{14,6182076} * \ln\left(\frac{r}{0,75}\right)$$

$$\Delta T_{\text{Luft}} = E_{\text{Lufterw}} * \left(0,00256667 - \frac{1}{14,6182076} * \ln\left(\frac{r}{0,75}\right)\right)$$

- $\Delta T_{\text{Luft}}$  wird null, wenn die verfügbare Energie null wird oder der andere Faktor des Terms

$$\Delta T_{\text{Luft}} = 0 = 0,00256667 - \frac{1}{14,6182076} * \ln\left(\frac{r}{0,75}\right)$$

$$\frac{1}{14,6182076} * \ln\left(\frac{r}{0,75}\right) = 0,00256667$$

$$\ln\left(\frac{r}{0,75}\right) = 0,00256667 * 14,6182076$$

$$\ln\left(\frac{r}{0,75}\right) = 0,03752007$$

$$\frac{r}{0,75} = e^{0,03752007}$$

$$r = e^{0,03752007} * 0,75 = 0,77867462 \approx 0,779$$