

Messkonzept zur Evaluierung der Auswirkungen urbaner Photovoltaik auf das lokale Mikroklima

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades Master of Science, M. Sc. an der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München.

Betreuer/-in	Elisabeth Faßbender, M. Sc.		
	Ahmad Nouman, M. Sc.		
	DrIng. Claudia Hemmerle		

Professor/-in Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen

Eingereicht von

Simon Pytlik



Eingereicht am 28.07.2022 in München

I

Danksagung

Von Seiten des Lehrstuhls bedanke ich mich ausdrücklich bei Prof. Thomas Auer und Dr.-Ing. Claudia Hemmerle, dass sie mir die Einreichung meiner Masterarbeit ermöglicht haben.

Zudem gilt mein Dank meiner Masterarbeitsbetreuerin Elisabeth Faßbender, die mich mit viel Geduld, hilfreichen Anregungen und konstruktiver Kritik betreut hat. Ohne Sie wäre diese Arbeit so gar nicht möglich gewesen.

Außerdem möchte ich mich bei Dr. Andreas Horn für die ursprüngliche Idee der Masterarbeit, die Organisation des Messstandorts, der Bereitstellung von Material sowie der tatkräftigen Unterstützung beim Aufbau zusammen mit dem Werkstudent Bernhard Sommer bedanken.

Weiters war mir Josef Rott eine große Hilfe, da er mich bei dem Aufbau der Messungen unterstützt hat und zusätzlich zeichnerisch das Messkonzept dargestellt hat. Zudem hat er eine Verschattungsanalyse der Messsensoren auf die PV-Anlage und eine genaue Evaluierung des Standorts für die Netto-Radiometer durchgeführt, wofür ich mich herzlichst bedanke.

Ich bin Kai Schönfeld von dem Unternehmen Campbell Scientific sehr dankbar für die sachkundige Beratung bezüglich des Messkonzepts sowie seiner Hilfestellung bei der Programmierung des Datenloggers.

Zum Schluss bedanke ich mich bei Ahmad Nouman und Dr. Ata Chokhachian für die aufschlussreichen Gespräche bezüglich des Messkonzepts und -aufbaus.

Abstract

Cities around the world are facing challenges due to rising temperatures and the UHI effect. Unused roof surfaces have therefore become a focus of discussions in urban planning and building design. On the one hand, the strategy of climate adaptation with "cool roofs" and green roofs ensures that air temperatures are reduced locally and, in the case of green roofs, that the water volumes of increasingly frequent heavy rain events are better permeated. On the other hand, the strategy of climate protection with PV roofs ensures a reduction of progressive climate change. Some simulation studies suggest that PV roofs in the city could also be part of a climate adaptation strategy, as they cool the air temperature by 0.09–0.8K, depending on the study. In contrast, the majority of real-world measurements of PV installations, most of which have taken place in desert regions, describe a warming of 0.2-2.4K due to the PV installation. Although most simulations investigate the effects of PV roofs on the urban microclimate, there is currently only one study in an urban environment that analyses the effect of PV roofing for car parks. In order to measure and analyse the real influence of the PV system on the urban microclimate in a comprehensible way, a measurement concept for a PV system above a green roof and an adjacent, identical green roof without a PV system as a reference was developed within the scope of this master thesis. The paper describes the research, development and installation of the measurement concept, as well as presenting preliminary measurement results. However, the complete analysis will take place beyond the scope of this master's thesis. The final measurement concept consists of 11 air temperature measurements, which create a temperature profile at a height of 2 m above and next to the PV in order to quantitatively estimate the range of the temperature influence of the PV system. In combination with the measurement of wind direction and velocity, the convective heat transport of the PV system is furthermore investigated. In addition, an energy balance can be mapped in the center of the PV system and on the green roof with the help of measurements of the long-wave and short-wave radiation, the soil heat flux, the air temperature and the relative humidity. The first measurement results suggest that the maximum air temperature difference at a height of 0.5 m under the PV system is up to 3.7 K warmer than above the reference green roof. The ground temperatures of the reference green roof are up to 17 K higher during the day and up to 2.5 K lower at night. The results of this master's thesis in combination with the evaluation of the complete measurement dataset will provide more guidance in sustainable urban planning, as to more accurately assess and pre-emptively react to the urban climatic consequences of a large-scale PV expansion.

Kurzfassung

Städte weltweit stehen aufgrund von steigenden Temperaturen und dem UHI-Effekt vor vielen Herausforderungen. Der Umgang mit Dachflächen zählt dabei zu den elementaren Diskussionen der Stadt- und Gebäudeplanung. Einerseits sorgt die Strategie der Klimaanpassung mit "Cool roofs" und Gründächern dafür, dass die Lufttemperaturen lokal reduziert werden und im Fall der Gründächer die Wassermengen von immer häufiger auftretenden Starkregen-Ereignissen besser aufgenommen werden. Andererseits sorgt die Strategie des Klimaschutzes mit PV-Dächern für eine Verminderung des fortschreitenden Klimawandels. Einige Simulationsstudien deuten darauf hin, dass PV-Dächer in der Stadt allerdings auch Teil einer Klimaanpassungsstrategie sein könnten, da sie die Lufttemperatur je nach Studie um 0,09-0,8 K abkühlen. Die Mehrheit der realen Messungen an PV-Anlagen, die überwiegend in Wüstenregionen stattgefunden haben, beschreiben im Gegensatz dazu eine Erwärmung von 0,2-2,4 K aufgrund der PV-Anlage. Obwohl die meisten Simulationen die Auswirkungen von PV-Dächern auf das urbane Mikroklima untersucht haben, gibt es derzeit nur eine einzige Untersuchung in urbaner Umgebung, die den Effekt von PV-Überdachungen für Parkplätze analysiert hat. Um den realen Einfluss der PV-Anlage auf das urbane Mikroklima nachvollziehbar messen und analysieren zu können, wurde im Rahmen dieser Masterarbeit, ein Messkonzept für eine PV-Anlage über einem Gründach und einem danebenliegenden, baugleichen Gründach ohne PV-Anlage als Referenz ausgearbeitet. Die Arbeit beschreibt die Recherche, Ausarbeitung und Installation des Messkonzepts und präsentiert erste Messergebnisse. Die ausführliche Analyse der Messergebnisse findet erst nach dem Abschluss dieser Masterarbeit statt. Das finale Messkonzept besteht aus 11 Lufttemperatursensoren, welche auf 2 m Höhe über und neben der PV ein Temperaturprofil erstellen, um die Reichweite des Temperatureinflusses der PV-Anlage quantitativ abschätzen zu können. In Kombination mit der Messung der Windrichtung und -geschwindigkeit wird der konvektive Wärmetransport der PV-Anlage untersucht. Zusätzlich dazu wird in der Mitte der PV-Anlage und auf dem Gründach eine Energiebilanz mithilfe von Messungen der lang- und kurzwelligen Strahlungen, des Bodenwärmestroms, der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit erstellt. Die ersten Messergebnisse legen nahe, dass die maximale Lufttemperaturdifferenz auf 0,5 m Höhe unter der PV-Anlage um bis zu 3,7 K wärmer ist als über dem Referenz-Gründach. Die Bodentemperaturen des Referenz-Gründachs sind untertags um bis zu 17 K höher und in der Nacht um bis zu 2,5 K niedriger. Die Ergebnisse dieser Masterarbeit in Kombination mit der Auswertung der Messdaten werden für mehr Klarheit in der Stadtplanung sorgen, die dann genauer die stadtklimatischen Folgen eines großflächigen PV-Ausbaus abschätzen und auf diese dementsprechend reagieren kann.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung II
Abstract III
Kurzfassung IV
Abbildungsverzeichnis VII
Abkürzungsverzeichnis XI
Tabellenverzeichnis XIII
 Einleitung 1 Problemstellung 1 Problemstellung 1 Forschungsfrage und Zielsetzung 3 Methodik 4 Theoretische Grundlagen 5 Mikroklima 5 Mikroklima 5 Grundlagen 5 Grundlagen 5 Heteorologische Parameter 6 Energiehaushalt 8
 3. Entwicklung Messkonzept 25 3.1. Messstandort 25 3.1.1. Klimadaten München 25 3.1.2. Messstandort Prinz-Eugen-Park 27 3.2. Messkonzept: Theoretische Hintergründe 35 3.2.1. Energiebilanz 35 3.2.2. Messtechnische und rechnerische Ermittlung der Energien 38 3.3. Messkonzept: Reale Umsetzung 41

- 3.3.1. PV-Dach 43
- 3.3.2. Referenz-Gründach 45

4. Durchführung der Messungen 46

- 4.1. Ablauf des Messaufbaus 46
 - 4.1.1. Ausrichtung/Platzierung der Sensoren 49
 - 4.1.2. Problemlösung 52
 - 4.1.3. Fertiger Messaufbau 54
- 4.2. Erste Messergebnisse 56
 - 4.2.1. Lufttemperaturen 0,5 m über Oberkante Substrat 56
 - 4.2.2. Lufttemperaturen 2 m über Oberkante Substrat 59
 - 4.2.3. Bodenmessungen 61
- 5. Diskussion 63
 - 5.1. Einfluss des Messaufbaus auf die Messergebnisse 63
 - 5.2. Andere Einflüsse auf die Messergebnisse 64
- 6. Zusammenfassung und Ausblick 65
- Literaturverzeichnis 67
- Anhang 73

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 –Vergleich verschiedener Simulationen zu dem Einfluss von PV auf die Lufttemperatur (eigene Darstellung) 14

Abbildung 2 –Vergleich verschiedener Messungen anhand der Lufttemperaturänderungen zwischen einem Standort mit PV und einem nahegelegenen ähnlichen Standort ohne PV (eigene Darstellung) 20

Abbildung 3 – Psychrometrisches Diagramm für den Standort München über den Zeitraum von einem Jahr [64] 25

Abbildung 4 –Direkt- und Diffusstrahlung für den Standort München über ein Jahr [64] 26

Abbildung 5 –Windrose für den Standort München für die Zeit von 15.06. –15.09.; die Häufigkeiten der Windrichtungen in % sind in grau abgebildet [63] 26

Abbildung 6 – Standort der Messungen innerhalb von München [67] 27

Abbildung 7 –Seitenansicht des im Vordergrund liegenden Gründachs für dieReferenzmessungen und der dahinterliegenden PV-Anlage, deren mikroklimatischerEinfluss untersucht wird (eigene Aufnahme am 03.06.2022)28

Abbildung 8 – Ausschnitt aus dem Regeldetail Extensivbegrünung [69] 29

Abbildung 9 – Draufsicht der beiden Dächer für die Messungen inklusive der Himmelsrichtungen (eigene Aufnahme am 03.06.2022) 29

Abbildung 10 –Dachaufsicht des Wohngebäudes an der Ruth-Drexel-Straße 156 (eigene Aufnahme am 03.06.2022) 30

Abbildung 11 –Dachaufsicht des Gründachs, welches für die Referenzmessungen verwendet wird (eigene Aufnahme am 03.06.2022) 31

Abbildung 12 –Nahaufnahme der semitransparenten PV-Module von oben (eigene Aufnahme am 03.06.2022) 32

Abbildung 13 –Nahaufnahme der semitransparenten PV-Module von unten (eigene Aufnahme am 03.06.2022) 32

Abbildung 14 –Aufnahme unterhalb der PV-Anlage (eigene Aufnahme am 03.06.2022) 33

Abbildung 15 – Vegetation unterhalb der PV (eigene Aufnahme am 03.06.2022) 33

Abbildung 16 –Extensives Gründach neben der PV-Anlage (eigene Aufnahme am 03.06.2022) 33

Abbildung 17 – Vegetation neben der PV-Anlage (eigene Aufnahme am 03.06.2022) 33 Abbildung 18 - Regenwassersammelgrube und Totholzhaufen unterhalb der PV-Anlage (eigene Aufnahme am 22.07.2022) 34 Abbildung 19 – Energiebilanz extensives Gründach mit darüberliegender PV-Anlage (eigene Darstellung) 35 Abbildung 20 – Energiebilanz Gründach (eigene Darstellung) 37 Abbildung 21 - Draufsicht auf das Messkonzept des PV-Dachs (Abbildung gezeichnet von Josef Rott) 43 Abbildung 22 – Messkonzept für das PV-Dach mit Begrünung (Abbildung gezeichnet 43 von Josef Rott) Abbildung 23 – Darstellung der notwendigen Netto-Radiometer-Montagehöhen inklusive des Sichtfelds der Pyrgeometer (Abbildung gezeichnet von Josef Rott) 44 Abbildung 24 - Messkonzept für das Referenz-Gründach (Abbildung gezeichnet von Josef Rott) 45 Abbildung 25 – Außensteckdose für die Stromversorgung des Datenloggers (eigene Aufnahme am 22.07.2022) 46 Abbildung 26 – Kabelführung für die Stromversorgung des Datenloggers (eigene Aufnahme am 22.07.2022) 46 Abbildung 27 –Aufstellung des Datenloggers (eigene Aufnahme am 22.07.2022) 47 Abbildung 28 – Abdichtungen des Datenloggers (eigene Aufnahme am 22.07.2022) .47 Abbildung 29 – Innenansicht des Schutzgehäuses mit Beschreibung der wesentlichen Komponenten (eigene Aufnahme am 22.07.2022) 47 Abbildung 30 - Kabelbrücke für die Sensorkabel für die Messungen auf dem Referenz-Gründach (eigene Aufnahme am 22.07.2022) 48 Abbildung 31 - Ausrichtung der Masten für die Lufttemperatursensoren mit einer Maurerschnur (eigene Aufnahme am 23.06.2022) 49 Abbildung 32 – Weltkarte des Erdmagnetfeldes inklusive des Messstandortes in München [82] 50 Abbildung 33 – Ausrichtung des Windsensors nach dem geographischen Norden (eigene Aufnahme am 22.07.2022) 51 Abbildung 34 -geöffnetes SDI-12-Kabel des Windsensors (eigene Aufnahme am 11.07.2022) 52

Abbildung 35 –Ausfälle der beiden HygroVUE5-Sensoren in dem Zeitraum von 19. – 25.07.2022 (eigene Darstellung mit dem Programm View Pro 4.3) 53

Abbildung 36 –Aufstellung der Lufttemperatursensoren (eigene Aufnahme am 22.07.2022) 54

Abbildung 37 –mittlerer Lufttemperatursensor und das Stativ für die Montage des Netto-Radiometers (eigene Aufnahme am 22.07.2022) 54

Abbildung 38 –Luftaufnahme des fertigen Messaufbaus (eigene Aufnahme am 22.07.2022) 54

Abbildung 39 – Aufstellung des Windsensors (eigene Aufnahme am 22.07.2022) 55

Abbildung 40 –HygroVUE5-Sensor und Bodensensoren (eigene Aufnahme am 22.07.2022) 55

Abbildung 41 – Stativ mit Messsensoren und Bodensensoren (eigene Aufnahme am 22.07.2022) 55

Abbildung 42 –Windsensor im Vordergrund und das Stativ im Hitergrund (eigene Aufnahme am 22.07.2022) 55

Abbildung 43 –Überprüfung des HygroVUE5-Sensors (eigene Darstellung mit dem Programm View Pro 4.3) 56

Abbildung 44 –Lufttemperaturvergleich auf 0,5 m Messhöhe zwischen dem Referenz-Gründach und dem PV-Dach (eigene Darstellung mit dem Programm View Pro 4.3).57

Abbildung 45 – Tagesverlauf der Lufttemperatur auf 0,5 m Messhöhe beim Referenz-Gründach und dem PV-Dach (eigene Darstellung mit dem Programm View Pro 4.3). 58

Abbildung 46 –Lufttemperaturvergleich 2 m über Oberkante Substrat an zwei heißen Tagen (eigene Darstellung mit dem Programm View Pro 4.3) 59

Abbildung 47 –Lufttemperaturvergleich 2 m über Oberkante Substrat an drei heißen Tagen (eigene Darstellung mit dem Programm View Pro 4.3) 60

Abbildung 48 –Vergleich der Bodentemperaturen über 5 Tage (eigene Darstellung mit dem Programm View Pro 4.3) 61

Abbildung 49 –Vergleich des volumetrischen Wassergehalts der beiden Böden (eigene Darstellung mit dem Programm View Pro 4.3) 62

Abbildung 50 – PV-Modulleistungen während der Mittagszeit [64] 63

Abbildung 51 - Produktdatenblatt Bauder Pflanzsubstrat BL [83] 74

Abbildung 52 - Regeldetail Extensivbegrünung inklusive Substrathöhe und -

zusammensetzung [69] 75

Abbildung 53 – Mengenangaben Saatgutmischung [69] 76

Abbildung 54 – Saatgutmischung Blumen [69] 76

Abbildung 55 – Saatgutmischung Sedumsprossen [69] 77

Abkürzungsverzeichnis

Α AB B Abluft Bad С CAD Computer Aided Design Computational Fluid Dynamics (deutsch: numerische Strömungsmechanik) CFD CO₂. Kohlenstoffdioxid D DWD Deutscher Wetterdienst Е Е spezifische Energie Elnsol Energie der Sonneneinstrahlung ELS Entlüftung Sanitär EnergyPlus-Format epw ΕT Elektro G GD Gründach Κ kw kurzwellig L langwellig lw Μ MM5 .Mesoscale meterological model (deutsch: Mesoskaliges meterologisches Modell) MPP Maximum power point tracking (deutsch: Tracking des maximalen *Leistungspunkts*) MUHI Micro-urban heat islands (deutsch: Mikro-urbane Wärmeinseln) η η Wirkungsgrad Ν NTC Negative Temperature Coefficient Ρ PTC Positive Temperature Coefficient

PV	Photovoltaik
Q	
q	spezifische Wärme
R	
RW EV	N Regenwasser-Entwässerung
Т	
TEB	Town Energy Balance (deutsch: Stadt-Energiebilanz)
U	
UHI	Urban Heat Island (deutsch: urbane Wärmeinsel)
UTCI.	Universal Thermal Climate Index (deutsch: universeller thermischer Klimaindex)
W	
WRF	Weather Research Forecasting (deutsch: Wetterforschungsprognose

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 – Parameterübersicht der in Abbildung 1 dargestellten Studien	14
---	----

 Tabelle 2 – Parameterübersicht der in Abbildung 2 dargestellten Studien
 20

Tabelle 3 – Energieparameter aus der Energiebilanz für das PV-Dach und dafürgeeignete Messsensoren38

Tabelle 4 – Übersicht der verwendeten Messsensoren (*für tägliche Summen)42

1. Einleitung

1.1. Problemstellung

Im Jahr 2018 lebten 55 % der Weltbevölkerung in Städten. In 2050 werden nach Schätzungen der Vereinten Nationen rund zwei Drittel der Menschheit in Städten leben [1]. Noch größere Steigerungsraten als der Trend zur Urbanisierung hat der Zuwachs des Anteils des städtischen Energieverbrauchs am weltweiten Energieverbrauch. Die urbane Bevölkerung benötigte 65 % des weltweiten Energieverbrauchs und verursachte 70 % der weltweiten Kohlenstoffdioxid-Emissionen (CO₂) [2]. In Deutschland befinden sich knapp 60 % der Dachflächen in Städten [3]. Aufgrund des erhöhten Energiebedarfs [2] und dem größeren Anteil der Dachflächen [3] in Städten wird vorhergesagt, dass Photovoltaik (PV) in Zukunft eine noch größere Rolle im urbanen Umfeld spielen wird [4]. Dadurch kann ein Teil der erforderlichen Energie direkt vor Ort produziert werden. Bei der lokalen Erzeugung ist es von besonderem Vorteil, wenn die produzierte Energie nah und möglichst zeitgleich mit der Erzeugung verbraucht wird [5].

Im Kontext des steigenden PV-Ausbaus in Städten und der steigenden Stadtbevölkerung ist es relevant, inwiefern sich die PV auf das lokale Mikroklima auswirkt. Da die Stadtplanung neben den steigenden Temperaturen durch den Klimawandel [6] zusätzlich auch den Urban Heat Island-Effekt (UHI) berücksichtigen muss. Dieser definiert, dass die Luft- und Oberflächentemperatur in Städten wärmer ist als auf dem Land [7, 8]. Der Effekt wird unter anderem durch den hohen Versiegelungsgrad mit dunklen Materialien mit einer hohen Wärmespeicherkapazität sowie einer stark reduzierten Vegetation verursacht [9]. Die meisten Städte zeigen einen signifikanten UHI-Effekt [10]. Über die Evaluierung von Satellitendaten wurden in asiatischen Großstädten Oberflächen-UHI-Effekte von 4 K in Pjöngjang und bis zu 12 K in Tokio im Vergleich zum Umland festgestellt [11]. In der bayerischen Stadt Würzburg wurde ein UHI-Effekt von bis zu 6 K gemessen [12]. Zusätzlich dazu kann es in einer Stadt Micro-urban heat islands (MUHI) geben, welche begrenzte Stadtregionen darstellen, die wie Aniello et al. mit Satellitendaten gezeigt hat, um 5–11 K wärmere Oberflächentemperaturen als im städtischen Umland aufweisen [7]. Damit können auf lokaler Ebene die Auswirkungen des UHI-Effekt diejenigen des Klimawandels überwiegen [10]. Mit den durch den Klimawandel verursachten Veränderungen wird das Risiko für eine Zunahme der Extremwetterereignisse wie beispielsweise Hitzewellen stark erhöht. Zudem werden durch den UHI-Effekt oft die Folgen von Hitzewellen in Städten verstärkt [6].

Diese oben angeführte zusätzliche Hitzebelastung in den Städten kann zu gesundheitlichen Komplikationen führen. Es ist bekannt, dass sehr heiße oder sehr kalte Temperaturen zu erhöhter Sterblichkeit führen [13]. Dies wurde besonders im Jahr 2003 deutlich, als während der Hitzewelle in Europa 70.000 zusätzliche Tote verzeichnet wurden. In Frankreich allein wurden 15.000–19.000 überzählige Todesfälle registriert [14, 15]. In Moskau kam es im Jahr 2010 aufgrund von Hitzewellen und Waldbränden zu einer Übersterblichkeit von 11.000 Menschen [16]. In einer Studie zu der täglichen Sterblichkeit der über 50-Jährigen während Hitzewellen wird für Rom eine Übersterblichkeit von 22 % und 8 % für Stockholm festgestellt [17]. Abgesehen von der erhöhten Sterblichkeit führen Hitzewellen auch zu erhöhten Krankenhausaufenthalten aufgrund von Hitzschlägen. Bei der älteren Bevölkerung in den USA wurden innerhalb von 15 Jahren 40.019 hitzebedingte Krankenhausaufenthalte gezählt [18]. Studien legen außerdem nahe, dass die Hitze einen Einfluss auf die Psyche hat. Einerseits wird nachgewiesen, dass höhere Temperaturen zu einer Steigerung des Selbstmordrisikos führen, andererseits gibt es eine starke Evidenz für einen Anstieg der Inanspruchnahme von Diensten im Bereich der psychischen Gesundheit während heißen Perioden [19]. Wenn schwangere Personen während der Schwangerschaft hohen Temperaturen ausgesetzt sind, erhöht sich das Risiko für Frühgeburten, ein niedrigeres Geburtsgewicht und Totgeburten. Die Evidenz dafür ist jedoch nur begrenzt. Der negative Effekt auf Geburtsausgänge ist bei heißen Temperaturen höher als bei niedrigen [20]. Die Produktivität von Menschen die im Freien arbeiten, nimmt bei hoher Hitzebelastung ab, da durch eine Verringerung der Arbeitsleistung und mehr Pausen der Hitzestress kompensiert wird [21].

Verschiedene Möglichkeiten, um die urbane Resilienz in Städten zu erhöhen, konkurrieren aktuell um die verfügbaren Dachflächen [22]. Dabei konkurrieren die Strategien Klimaanpassung und Klimaschutz um die knappen Flächen [23]. Auf der einen Seite ist das Ziel der Klimaanpassung, die Städte möglichst gut auf die heißeren Temperaturen und steigenden Extremwetterereignisse [6] vorzubereiten bzw. diese lokal in der Stadt zu reduzieren. Auf der anderen Seite ist das Ziel des Klimaschutzes mithilfe CO₂neutraler Energieproduktion, das Fortschreiten des Klimawandels zu verringern und somit den durch den Klimawandel stattfindenden Temperaturanstieg weltweit zu begrenzen [23]. Zu dem Bereich der Klimaanpassung zählen Kühle Dächer ("cool roofs") und Gründächer; Klimaschutz wird vor allem über PV-Dächer erreicht. Kühle Dächer mit einer hoch reflektierenden Oberfläche können den UHI-Effekt verringern [24]. Gründächer können die durch den Klimawandel wahrscheinlicher werdenden Wassermengen von Starkregen-Ereignissen besser aufnehmen [25]. Das im Gründachsubstrat

2

zurückgehaltene Wasser kühlt durch Verdunstung das lokale Klima [26]. Außerdem wird durch den dickeren Gründachaufbau die Dämmwirkung des Daches erhöht, welches vor Temperaturextremen schützt [26].

Dem gegenüber produzieren PV-Anlagen CO₂-neutralen Strom [22]. Zudem gibt es mehrere Studien, die darauf hindeuten, dass PV auch einen Beitrag zur Klimaanpassung leisten könnte, indem PV zu einer Abkühlung der Lufttemperatur beiträgt [22, 27– 33]. Allerdings gibt es auch Studien, die eine Erwärmung der Lufttemperatur durch die PV-Anlagen zeigen [34–41]. Mit den aktuellen und künftig verstärkten Herausforderungen des Klimawandels in Kombination mit dem UHI-Effekt, ist es in diesem Kontext von großer Bedeutung zu evaluieren, welche Auswirkungen der gesteigerte urbane PV-Ausbau auf das lokale Mikroklima hat.

1.2. Forschungsfrage und Zielsetzung

Im Zuge dieser Masterarbeit soll folgende Forschungsfrage beantwortet werden:

Wie muss ein Messkonzept aufgebaut sein, um den Einfluss einer auf dem Dach installierten PV-Anlage auf das lokale Mikroklima im Vergleich zu einem extensiven Gründach zu evaluieren?

Zur Beantwortung der Forschungsfrage gibt es einige untergeordnete Fragen, die im Zuge der Arbeit beantwortet werden sollen:

- •Welche Messgrößendefinierendas Mikroklima?
- •Wie können die relevanten mikroklimatischen Messgrößen ermittelt werden?
- •Welche Flächen eignen sich für aussagekräftigeReferenzmessungen?

Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein Messkonzept für eine PV-Anlage im Prinz-Eugen-Park sowie für eine entsprechende Referenzfläche auszuarbeiten. Dieses Messkonzept soll möglichst präzise das Mikroklima messen können und dabei beispielsweise auch Unschärfen wie den konvektiven Wärmeabtransport durch den Wind berücksichtigen. Zur finalen Bewertung des Messkonzepts sollen erste Messungen durchgeführt und analysiert werden.

1.3. Methodik

Über eine Literaturrecherche wird die aktuelle Datenlage zu PV und deren Einfluss auf das Mikroklima evaluiert. Dabei wird ein Teil der Literatur von Elisabeth Faßbender zur Verfügung gestellt. Weitere Literatur wird über die angegebene Sekundärliteratur erschlossen. Zudem wird über Datenbanken wie "Scopus", "Web of Science" und "Researchgate" mithilfe einer Schlagwortsuche weitere relevante Literatur ausfindig gemacht. Die Literaturrecherche zu der Messtechnik und dem urbanen Mikroklima wird auf dieselbe Weise durchgeführt.

Danach werden mithilfe der durch die Literaturrecherche erhaltenen Informationen, relevante Messgrößen für die Bestimmung des lokalen Mikroklimas ausgewählt. Anhand dieser Messgrößen werden in Absprache mit Unternehmen geeignete Messsensoren und dazu passende Geräte für die Datenerfassung ausgewählt. Das aufgebaute Messkonzept wird abschließend anhand von Messungen validiert.

2. Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die relevanten theoretischen Grundlagen für diese Arbeit beschrieben. Dabei wird zu Beginn das Mikroklima definiert, eine kurze Einführung in die Messtechnik gegeben und auf den aktuellen Stand der Forschung des Einflusses von PV auf das Mikroklima eingegangen.

2.1. Mikroklima

In diesem Kapitel wird das Mikroklima genauer definiert, die meteorologischen Parameter beschrieben und am Ende wird auf den Energiehaushalt and die Besonderheiten des urbanen Mikroklimas eingegangen.

2.1.1. Grundlagen

Das Wetter beschreibt den augenblicklichen Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort. Dieses wird anhand einer Vielzahl meteorologischer Parameter definiert (z.B. Temperatur, Luftfeuchtigkeit, …). An einem bestimmten Ort können sich daher viele unterschiedliche Wettersituationen einstellen [42].

Mithilfe langjähriger Wetterbeobachtungen und statistischer Verfahren werden typische, charakteristische oder mittlere meteorologische Verhältnisse definiert, die als Klima bezeichnet werden. Das Klima kann nach seiner flächenmäßigen Ausdehnung in Teilklimata aufgeteilt werden [42]:

- •Weltklima: gesamteErdoberfläche
- •Makroklima: bis zu 30 Mio. km²; Klima einer Region z.B. norddeutsches Tiefland
- •Mesoklima (Geländeklima): einige Tausend km²; Klima großer Städte, an Küsten, in Tälern
- •Mikroklima: 1 km² 1 m²; Klima einer städtischen Grünanlage, eines Gebäudekomplexes
- •Spotklima: 1 m² 1 cm²; Klima unter einem Baum, unter der menschlichen Kleidung, Pflanzenblatt

Das Mikroklima beschreibt das Klima, dass sich in bis zu 2 m Höhe über dem Boden einstellt. Dabei wird dieses durch die allgemeinen klimatischen Faktoren (z. B. Strahlung, Lufttemperatur, …) und den Einfluss der lokalen Landschaft geprägt [43]. Dieser Einfluss wird beispielsweise durch die Rauigkeit und die thermischen Eigenschaften der vorhandenen Oberflächen geprägt. Unterschiede in der Geländeform und dem Pflanzenbewuchs können dabei auf kleinem Raum die Temperatur und die Windgeschwindigkeit stark beeinflussen. In wolkenlosen Nächten können in Folge von unterschiedliche Sichtfaktoren der Oberflächen zum Himmel und der damit einhergehenden langwelligen Wärmeausstrahlung in kleinen Arealen große Temperaturunterschiede entstehen [44].

2.1.2. Meteorologische Parameter

Nachfolgend werden die meteorologischen Parameter beschrieben, die das Mikroklima beeinflussen.

Kurzwellige Strahlung

Die Globalstrahlung beschreibt die gesamte am Erdboden ankommende Sonnenstrahlung. Diese setzt sich aus der kurzwelligen Direktstrahlung und der kurzwelligen, diffusen Himmelsstrahlung zusammen [44]. Die diffuse Strahlung entsteht durch die Streuung oder Reflexion an Luftmolekülen und Aerosolen, die bei dem Durchgang der Strahlung durch die Atmosphäre hervorgerufen werden. Die kurzwellige Strahlung liegt in einem Wellenlängenbereich von $0,29-4 \mu m$ [45].

Langwellige Strahlung

Die langwellige Strahlung umfasst einen Wellenlängenbereich von 3,5–100 µm. Sie ist die Strahlung eines Körpers (Erde oder Atmosphäre). Die langwellige Strahlung wird aufgrund ihrer Eigentemperaturstrahlung auch als Wärmestrahlung bezeichnet. Es gibt drei Arten von langwelliger Strahlung: Atmosphärische Gegenstrahlung, Ausstrahlung und Reflexstrahlung [45].

Die Atmosphärische Gegenstrahlung ist die langwellige Strahlung der Atmosphäre. Diese entsteht hauptsächlich durch die Emission von Wolken, Wasserdampf und Kohlendioxid [45].

Die Ausstrahlung beschreibt die abgegebene, langwellige Strahlung der Erdoberfläche [45]. Die Reflexstrahlung bezeichnet den Anteil der Atmosphärischen Gegenstrahlung der von der Erdoberfläche wieder reflektiert wird [45].

Temperatur

Die Lufttemperatur ist ein Maß für den Wärmezustand eines Luftvolumens [44]. Die Haupteinflussfaktoren auf die Lufttemperatur sind der Wind und der Strahlungsaustausch zwischen der Erdoberfläche und der Atmosphäre. Üblicherweise wird die Außenlufttemperatur auf 2 m Höhe über dem Boden gemessen. Dabei wird der Sensor vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt und zusätzlich belüftet [46].

Die Oberflächentemperatur hängt von den Eigenschaften der Oberfläche ab. Dabei spielen der Reflexions- bzw. Absorptionsgrad der Strahlungsenergie, Wärmespeicherund Wärmeleitfähigkeit sowie die Oberflächenstruktur eine Rolle. Bei Bodenoberflächen ist zusätzlich dazu die Wasserspeicherfähigkeit der Materialien relevant [43]. Der Reflexionsgrad von Oberflächen wird über die Albedo beschrieben. Sie beschreibt, welcher Anteil des Lichts von einer Oberfläche, die keine eigene Leuchtquelle ist, reflektiert wird. Wenn ein schwarzer Körper 100 % der auftreffenden Strahlung absorbiert, beträgt die Albedo 0. Die Albedo ist abhängig von der Wellenlänge und dem Einfallswinkel der Strahlung sowie der Oberflächenbeschaffenheit und Farbe der entsprechenden Oberfläche [46].

Luftfeuchtigkeit

Die Luftfeuchtigkeit beschreibt den Gehalt an Wasserdampf in der Luft. Die absolute Luftfeuchtigkeit gibt an, wieviel Wasserdampf in Gramm in einem Kubikmeter Luft enthalten ist. Die Wasserdampfaufnahmekapazität der Luft hängt stark von der Lufttemperatur ab. Je niedriger diese ist, umso weniger Wasserdampf kann die Luft aufnehmen. Die relative Luftfeuchtigkeit beschreibt das Verhältnis der tatsächlichen zu der maximal möglichen Menge des Wasserdampfes in der Luft. Das bedeutet, dass bei 100% Luftfeuchtigkeit die Luft gesättigt ist und keinen weiteren Wasserdampf aufnehmen kann [46].

Wind

Wind beschreibt die Luftbewegungen, die durch Luftdruckunterschiede zwischen unterschiedlichen kalten und warmen Luftmassen entstehen. Der Wind wird durch den Verlauf der Sonne und durch die lokale Topografie beeinflusst [46].

2.1.3. Energiehaushalt

In Formel (1) ist die Energiehaushaltsgleichung der Erdoberfläche dargestellt. Dies ist eine andere Formulierung des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik und bedeutet, dass die Energiemenge, die auf die Erde fließt auch wieder abfließen muss. Das bedeutet, dass die Summe aller Energieströme insgesamt gleich null ist [42].

$$! + # + \$ + \% = '$$
 (1)

•Q = Strahlungsbilanz

Die Strahlungsbilanz setzt sich aus der Summe der ein- und ausgehenden kurzwelligen und langwelligen Strahlung zusammen [42, 44].

•B = Bodenwärmestrom

Der Bodenwärmestrom beschreibt den Wärmetransport über Wärmeleitung im Boden. Dabei fließt dieser immer von der wärmeren zur kälteren Schicht [42]

•L = FühlbareWärme

Die fühlbare Wärme, bezeichnet die Wärmeenergie, die über Konvektion an die Luft abgegeben wird [42]. Konvektion beschreibt in der Meteorologie den Wärmetransport über Luftströmungen. Die fühlbare Wärme ist "fühlbar", was bedeutet, dass diese über die Änderung der Lufttemperatur spürbar ist [44].

•V = LatenteWärme

Die latente Wärme ist die Wärmeenergie, die für einen Aggregatszustandswechsel eines Stoffes benötigt wird. In der Meteorologie ist damit meist die Wärmemenge gemeint, die im Wasserdampf als potentielle Energie gespeichert ist. Als Verdunstungskühlung bezeichnet man die Abnahme der Lufttemperatur an der Verdunstungsoberfläche, die durch den Entzug von Wärme während des Verdunstungsvorgangs entsteht. Im Gegensatz dazu wird bei der Kondensation oder Sublimation latente Wärmeenergie frei und erhöht die Lufttemperatur [44].

Die Temperatur der bodennahen Luftschicht ergibt sich aus dem Energiehaushalt der Erdoberfläche. Je nachdem, wie groß die einzelnen Komponenten sind, stellt sich eine hohe oder tiefe Lufttemperatur ein. In Deutschland haben die vier Komponenten recht unterschiedliche Größen. Dabei bestimmen, gereiht nach ihrer Bedeutung für das Mikroklima, tagsüber folgende Energiemengen die Temperatur der bodennahen Luftschicht [42]:

- 1. Strahlungsbilanz
- 2. Latente Wärme

- 3. Fühlbare Wärme
- 4. Bodenwärmestrom

Nachtsüber bestimmen folgende Energiemengen das Mikroklima:

- 1. Strahlungsbilanz
- 2. Bodenwärmestrom

Bei der Strahlungsbilanz ist nachts nur die langwellige Komponente relevant. Die Ströme der fühlbaren und latenten Wärme sind in den Nachtstunden normalerweise vernachlässigbar.

2.1.4. Urbanes Mikroklima

Unter dem urbanen Klima versteht man die Veränderung des Klimas gegenüber dem Umland durch die Bebauung und anthropogene Emissionen wie z. B. Luftschadstoffe oder Abwärme. Das Klima in der Stadt wird hauptsächlich definiert durch [44]:

- •Eigenschaften von Baustoffen (Wärmespeicherungund Albedo)
- •Versiegelung des Bodens
- •Fehlen von Vegetation
- •Hohe aerodynamische Rauigkeit der Bebauung, die zu geringeren Windgeschwindigkeiten führt

Wegen der vielfältigen Bebauungsstrukturen weist das urbane Mikroklima eine hohe räumliche Variabilität auf. Beispielsweise können Düseneffekte und Wirbelbildung zwischen Gebäuden zu lokal deutlich erhöhen Windgeschwindigkeiten und Turbulenzintensitäten führen [44].

Typisch für das Stadtklima ist außerdem der UHI-Effekt. Dieser beschreibt die Lufttemperaturdifferenz zwischen der wärmeren Stadt und dem kühleren Umland. Diese beträgt im Mittel 1–3K. Dabei gibt es starke Unterschiede zwischen Tag und Nacht. Tagsüber kommt es zu Lufttemperaturdifferenzen von 0,5–2K. Während der Nacht sind bei wolkenfreien und windschwachen Bedingungen in großen Städten bis zu 10 K Lufttemperaturdifferenz im Vergleich zum Umland möglich [42, 47].

2.2. Messsensoren für die Erfassung des Mikroklimas

In diesem Kapitel werden ausgewählte Messsensoren, die für das Messkonzept der Masterarbeit relevant sind, beschrieben.

Strahlungsmessung

Das Pyranometer misst die Gesamtglobalstrahlung. Diese besteht aus der Summe des kurzwelligen direkten und der reflektierten, diffusen Strahlung. Der Messbereich umfasst die Wellenlängen von 0,3–3,0 µm. Der Sensor misst die Strahlungsflussdichte [W/m²] auf einer horizontal ausgerichteten Empfangsfläche mit einem Sichtfeld von 180° [45].

Das Pyrgeometer misst die langwellige Wärmestrahlung im fernen Infrarot, welches einen Wellenlängenbereich von 5–50 µm umfasst. Die Messung erfolgt auf einer horizontal ausgerichteten Empfangsfläche [45].

Ein Netto-Radiometer ist eine Kombination aus je zwei Pyranometern und Pyrgeometern. Dabei ist jeweils ein Gerät nach oben und das andere nach unten gerichtet. Damit kann das Netto-Radiometer die Netto-Strahlungsbilanz zwischen kurz- und langwelliger Strahlung ermitteln. Zusätzlich dazu kann die Albedo berechnet werden, indem die ausgehende, kurzwellige Strahlung von der eingehenden, kurzwelligen Strahlung subtrahiert wird [45].

Temperaturmessung

Für das Widerstandsthermometer wird die elektrische Widerstandsänderung von Metallen zur Temperaturmessung verwendet. Dabei erhöht sich der Widerstandkoeffizient bei metallischen Leitern mit der Temperatur, darum wird dieser auch "Positive Temperature Coefficient" (PTC) genannt. Am häufigsten wird Platin als Messfühler eingesetzt. Die Kurzbezeichnung wie z. B. Pt 1000, bedeutet, dass der Thermometer aus einem Platindraht besteht, der bei 0 °C einen Widerstand von 1000 Ω aufweist [45].

Bei Thermistoren wird der elektrische Widerstand anstelle von Metallen mit Halbleitern bestimmt. Dabei nimmt der Widerstandskoeffizient bei steigenden Temperaturen ab, darum wird dieser auch "Negative Temperature Coefficient" (NTC) genannt [45]. Bei den Thermoelementen werden thermoelektrische Effekte für die Temperaturmessung benutzt. Eine Thermospannung entsteht, sobald zwischen den Kontaktstellen zweier verschiedenartiger Metalle eines Stromkreises eine Temperaturdifferenz besteht [45].

Ultraschallanemometer

Es wird zwischen 2D- und 3D- Ultraschallanemometern unterschieden. Dabei bestimmen 2D-Ultraschallanemometer die Windrichtung und -geschwindigkeit. Bei 3D-Ultraschallanemometern wird zusätzlich die Vertikalkomponente des Windes gemessen. Die Messung des Windes erfolgt über den Einfluss des Windes auf die Schallwellenausbreitung. Der Vorteil gegenüber herkömmlichen Windmessgeräten sind der geringe Wartungsaufwand aufgrund keiner beweglichen Teile, sowie die Messung von sehr geringen Windgeschwindigkeiten, da es keine mechanische Reibung gibt [45].

Wärmestromplatten

Wärmestromplatten werden für die Bestimmung des Bodenwärmestroms eingesetzt. Diese bestehen aus einer Thermosäule, die den Temperaturunterschied über den Keramik-Kunststoff-Verbundkörper messen [48].

2.3. Forschungstand des Einflusses von PV auf das Mikroklima

Bezüglich der Auswirkungen von PV auf das Mikroklima gibt es verschiedene Hypothesen, die in [34] so zusammengefasst werden:

- •PV verschattet das Dach und reduziert dadurch die Wärmeaufnahmedes Daches
- •PV-Zellen haben eine geringe thermische Masse und daher geringe Wärmekapazitäten pro Flächeneinheit, aber sie strahlen thermische Strahlung nach oben und unten ab. Dadurch haben sie eine doppelt so große Wärmeabgabefläche wie Dächer [35]. Diese Strahlungsabgabe ist besonders untertags relevant, wenn die PV-Module 20–30 K wärmer sind als die Umgebungstemperatur (aufgeständerte PV; 30° Neigung; G_{poa} = 1000 W/m²; Wind = 0 m/s; $\eta = 16,7$ %; Messort: Ljubljana, Slowenien) [49]. Aufgrund ihres großen Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnisses wird diese absorbierte Energie schnell wieder an die Umgebungsluft abgegeben [50].
- Elektrischer Strom entzieht der PV-Anlage Energie und sorgt dadurch für eine Abkühlung. Der Temperaturunterschied zwischen der PV-Zelle im Leer-laufbetrieb und bei ihrer maximalen Leistung (MPP) beträgt in einer Studie 5,4 K (G_{poa} = 1000 W/m²; Wind = 0 m/s; η = 16,7 %; Messort: Ljubljana, Slowenien) [49]. Bei Böer kühlt sich die wieder eingeschaltete PV-Zelle von 72 °C auf 65 °C ab, was einer Temperaturdifferenz von 7 °K entspricht (Elnsol=880 W/m²; Wind = 0 m/s; η = 14 %; Messort: Kennett Square, USA) [51]. Nach thermodynamischen Berechnungen von Böer beträgt die Abkühlung für eine PV-Zelle mit 20 % Wirkungsgrad 10 K, diese Größenordnung stimmt mit den von Böer durchgeführten Messungen [51].
- •PV-Module reflektieren und absorbieren die vom Boden kommende langwellige Strahlung und reduzieren dadurch den Abkühlungseffekt des Bodens unter einem Nachthimmel.
- •Die niedrige Albedo der PV-Anlage kann, wenn sie Untergründe mit höherer Albedo verdeckt, höhere Wärmemengen in der Umgebung freisetzen [52].

•Aufgrund der Überdachung durch die PV-Anlage wird die Taubildung am Boden verhindert. Die Verdunstung des Taus könnte zu einer zusätzlichen Abkühlung des Bodens beitragen [53].

Die Auswirkungen von PV-Anlagen auf das Klima werden sowohl in Simulationen [22, 27–31, 37, 38, 50, 54, 55] und Berechnungen [36, 51, 52] als auch in realen Messungen [32–35, 39–41, 51, 56–61] überprüft. Dabei fällt jedoch auf, dass die meisten Simulationen sich auf die klimatischen Auswirkungen in der Stadt beziehen [22, 27–31, 37, 54, 55], es jedoch bis jetzt abgesehen von Pham et al. noch keine realen Messungen speziell für urbane Umgebung gibt [35, 36].



2.3.1. Simulationen und Berechnungen

Abbildung 1 - Vergleich verschiedener Simulationen zu dem Einfluss von PV auf die Lufttemperatur (eigene Darstellung)

Stu	ldie	Ort	Zeitraum	Annahmen/Ergebnisse
1.	Tian et al. [54]	Tianjin, China	10 Tage	Umwandlungswirkungsgrad der PV 5–50 %
2.	Millstein & Menon [37]	Mojave Wüste, USA	2005	11 % Modulwirkungsgrad
3.	Taha [31]	Los Angeles, USA	Juli 2005	Szenario mit aktueller Stadtalbedo: η = 10 %: 0 K η = 20 %: -0,05 K η = 30 %: - 0,15 K
4.	Masson et al. [27]	Paris, Frank- reich	2003, Jahr der Hitzewelle	 Tagsüber: -0,2K Nachts: -0,3K Mix aus SolarkollektorenundPV
5.	Cortes et al. [28]	Osaka, Japan	08. — 09.08.2011; klares und ruhiges Wetter	•8—20 Uhr:-0,1K •20 Uhr:-0,4K
6.	Salamanca et al. [29]	Tucson & Phoenix, USA	10. — 19.07.2009	•Tagsüber: 0,2–0,4K •Nachts: 0,4–0,8K

Tabelle 1 – Parameterübersicht der in Abbildung 1 dargestellten Studien

Stu	ıdie	Ort	Zeitraum	Annahmen/Ergebnisse
7.	Li et al. [38]	Sahara Wüste	-	 •15 % Modulwirkungsgrad •min.: 0,97K •max.: 1,28K
8.	Weihs et al. [30]	Wien, Öster- reich	8 Tage (5 x Juni, 2 x Dezember, 1 x August)	über 2 Tage anhand von 9 Datenpunkten gemittelt
9.	Berardi & Graham [22]	Brampton, Kanada	05.07.2018; heißer Sommertag, Hitze- welle	-

In Abbildung 1 sind alle Studienergebnisse, die die Lufttemperaturänderung aufgrund von PV-Installationen simuliert haben, dargestellt. Teilweise unterscheiden sich die Lufttemperaturänderungen in den Studien je nach Parameter [27-29, 31]. Diese sind im Diagramm vereinfachend als Temperaturbereich dargestellt und in Tabelle 1 genauer erläutert. In den Simulationsergebnissen ist eine Tendenz zur Abkühlung der Lufttemperatur für die Studien festzustellen, die wie in Tabelle 1 angegeben, in Städten simuliert werden. Die Abkühlung der Lufttemperatur in den Studien reicht von 0,09-0,8 K. In der ältesten Studie aus dem Jahr 2007 wird keine nennenswerte Abkühlung beschrieben [54]. In Taha gibt es keine Änderungen der Lufttemperatur bei einem PV-Wirkungsgrad von 10–15 %. Ab 20 % gibt es regionale Abkühlungen von bis zu 0,05 K und bei dem hypothetischen zukünftigen PV-Wirkungsgrad von 30% gibt es eine Abkühlung von 0,15 K [31]. Im Gegensatz dazu kommen die beiden Studien, die sich mit den Effekten der PV-Anlagen auf Wüstenregionen befassen, zu dem Ergebnis, dass sich die Lufttemperatur erwärmen wird. Diese Erwärmung reicht von 0,4 K in Millstein & Menon bis zu 0,97–1,28 K für die Sahara in Li et al. [37, 38]. Diese unterschiedlichen Ergebnisse könnten unter anderem mit der unterschiedlichen Albedo von Städten und Wüsten erklärt werden.

Die erste Studie zu dem Einfluss von PV auf das Klima wird im Jahr 2001 veröffentlicht. Zuerst wird über thermodynamische Modelle die Temperaturdifferenz zwischen aus- und eingeschalteten PV-Zellen berechnet und anschließend kann diese mit einem gemessenen Temperaturunterschied von 7 K (E_{Insol} =880 W/m²; Wind = 0 m/s; η = 14 %; Messort: Kennett Square, USA) auch verifiziert werden [51]. Roulet geht mit seinen stationären Zustandsmodellen davon aus, dass die PV-Anlagen die Umgebung kühlen werden, sobald der Wirkungsgrad der PV größer wird als die durchschnittliche Albedo der Stadt. Das begründet Roulet damit, dass ein Teil der solaren Einstrahlung durch die PV in Elektrizität umgewandelt wird und daher nicht als sensible Wärme die Lufttemperaturen erwärmen kann [52]. Bei Brito wird mithilfe eines ein- und zweidimensionalen Strahlungsbilanzmodells der Einfluss von PV an Fassaden und auf Dächern auf den UHI- Effekt untersucht. Bei PV-Wirkungsgraden unter 22 % führt dies laut Brito zu einer Erhöhung des UHI-Effekts in der Stadt. Sobald die Wirkungsgrade größer als 22 % werden, kommt es zu einer Reduktion des UHI-Effekts [36].

In den aktuelleren Veröffentlichungen zu dem Einfluss von PV auf das urbane Mikroklima werden hauptsächlich Simulationen durchgeführt. Genchi et al. kommen zu dem Ergebnis, dass großflächige PV-Installationen im Gebiet von Tokio vernachlässigbare Auswirkungen auf die Dachtemperatur haben. Allerdings könnte sich der Kühlbedarf des Gebäudes um 2~10 % durch den Verschattungseffekt der PV auf das Dach verringern [50]. In Tian et al. wird ein Modell entwickelt, das sowohl die Dächer als auch die Fassaden beinhaltet. Dieses Modell besteht aus vier Untermodellen: 1) einem thermischen PV-Modell, 2) Leistungsmodell der elektrischen PV, 3) Gebäudeenergie-Verbrauchsmodell und 4) "Urban Canyon"-Energiebilanzmodell. Bei der Simulation wird festgestellt, dass eine PV-Anlage, die mit einem Luftspalt von 0,2 m montiert wird, die Oberflächentemperaturen auf dem Dach um 9.4 K und an der Fassade um 4.6 K reduziert. Die Temperaturunterschiede der Straßenoberflächentemperatur mit und ohne PV-Anlage auf dem Dach sind gering und die Lufttemperatur im "urban canyon" verändert sich ebenfalls nur wenig [54]. Brito erwähnt, dass die verwendeten Albedo für die Referenzdächer in Tian et al. mit 0,1 niedrig sind [36, 54]. Simulationen mit einer üblicheren Albedo von 0,3 kommen zu dem Ergebnis, dass der sensible Wärmefluss zwischen dem PV-Dach und dem Referenzdach sehr gering ist [36]. Millstein & Menon kommen zu dem Ergebnis, dass eine Solaranlage mit einer Maximalleistung von einem Terawatt in der Mojave-Wüste zu einer Lufttemperaturerwärmung von bis zu 0,4 K und regionalen Änderungen in den Windprofilen in einem Umkreis von 300 km führt. Die Autoren haben einen Wirkungsgrad der PV von 11 % angenommen und machen wie [52] darauf aufmerksam, dass es zu Kühleffekten kommen kann, sobald der Wirkungsgrad des PV-Moduls größer ist als die Albedo des Untergrunds [37]. In der Dissertation von Scherba wird anhand von Modellen in EnergyPlus untersucht, welchen Einfluss PV hat, wenn sie über ein Gründach oder ein kühles Dach (stark reflektierende weiße Folie) gestellt wird. Die Simulation wird für sechs Städte in den USA über den Sommer durchgeführt. Dabei zeigt sich, dass durch die PV der sensible Wärmefluss an die Umgebung um 95-120 W/m² erhöht wird [55]. Taha untersucht den Einfluss von einer ausgedehnten urbanen PV-Ausbreitung auf den Dächern von Los Angeles [31]. Die Simulation wird mit einem "Mesoscale Meterological Model" (MM5) durchgeführt und es werden drei Szenarios betrachtet: 1) aktuelle Albedo der US-Städte + angemessen hoher PV-Ausbau, 2) "Cool cities" (Städte mit hohen Albedos, aufgrund von stark reflektierenden Oberflächen) + angemessen hoher PV-Ausbau und 3) "Cool cities" + hoher PV-Ausbau. Im ersten Szenario sind bei einem PV-Wirkungsgrad von 10-15 % keine Veränderungen der Lufttemperatur aufgetreten. Dieses Ergebnis wird damit begründet, dass die urbane durchschnittliche Albedo zwischen 0,15 und 0,22 liegt und es bei einem Wirkungsgrad von 10 % und einer zusätzlichen Solarpanelreflektivität von 0,08 zu einer ähnlichen Strahlungsbilanz kommt. Ab einem Wirkungsgrad von 20 % kommt es zu regionalen Abkühlungen von bis zu 0,05 K, bei 25 % treten die Abkühlungen in größeren Gebieten auf und erhöhen sich auf einen Wert zwischen 0,05 K und 0,1 K. Ab einem hypothetischen Wirkungsgrad von 30 % kommt es zu einer Abkühlung von 0,15 K. Bei dem dritten Szenario mit einer Zukunftsvision von "Cool cities" mit einer hohen Albedo kommt es bei geringen Wirkungsgraden (<15 %) zu einer Erwärmung von 0,1 K. Sobald die Wirkungsgrade größer als 20 % werden, kommt es zu einer Abkühlung, die ihr Maximum bei 0,2 K und einem Wirkungsgrad von 30 % erreicht [31]. In Pham et al. wird Taha dafür kritisiert, eine "effective Albedo" zur Berechnung zu verwenden [31, 35]. Diese stellt die PV als eine einzige Fläche dar. Dadurch werden die zwei zusätzlichen Oberflächen, die eine PV-Anlage über einem Dach hat, mit dem dort stattfindenden konvektiven Wärmetransport vernachlässigt. Pham et al. kommt daher zu der Schlussfolgerung, dass der sensible Wärmefluss durch diese Simulationsmethode um den Faktor von zwei unterschätzt wird [35]. Bei der Simulation von Masson et al. wird eine Reduktion des UHI-Effekts im Sommer von 0,2 K tagsüber und 0,3 K nachts in Paris festgestellt. PV und Solarkollektoren werden dabei in die "Town Energy Balance" (TEB) integriert, wobei einige Vereinfachungen gemacht werden. Zum Beispiel wird keine Neigung der Module angenommen. Zudem wird angenommen, dass die Unterseite der Module dieselbe Temperatur wie die Umgebungsluft hat, womit der Strahlungsaustausch zwischen Modul und Dach vernachlässigt wird [27]. Die Simulation von Salamanca et al. basiert auf dem Modell von Masson et al. und hat zum Teil auch ähnliche Vereinfachungen getroffen [27, 29]. Dabei wird der Effekt von PV auf 100 % der Dachfläche in den US-Städten Tucson und Phoenix simuliert. Die Simulation betrachtet einen 10-tägigen Zeitraum mit einem klaren Himmel und extremer Hitze. Als Konsequenz durch die Abkühlung der Lufttemperatur um 0,2–0,4 K tagsüber und 0,4–0,8 K nachts reduziert sich der stadtweite Kühlenergiebedarf um 8–11 %. Im Vergleich dazu schaffen "Cool roofs" eine Reduktion um 3-14 %, während diese untertags mehr kühlen und die PV auf dem Dach nachts einen größeren Kühleffekt hat. Dieser Kühleffekt verdoppelt sich in der Nacht. Im Paper von Pham et al. werden die beiden gerade erwähnten Studien von Masson et al. und Salamanca et al. aufgrund ihrer stark vereinfachten PV-Darstellung kritisiert. In Pham et al. wird erläutert, dass in Masson et al. und Salamanca et al. die Modultemperatur über die Lufttemperatur summiert mit der Strahlung multipliziert mit einer festgesetzten Konstante, berechnet wird [27, 29, 35]. Dadurch wird der Einfluss der Windgeschwindigkeit und des Modulwirkungsgrads nicht beachtet. Für die Berechnung des sensiblen Wärmestroms wird außerdem nicht die Paneltemperatur herangezogen, sondern dieser wird als Restwert der Energiebilanz geschätzt [35]. Cortes et al. kombinierte eine "Computational Fluid Dynamics"-Simulation (CFD) mit dem "Weather Research Forecasting"-Modell (WRF) und einem eindimensionalen Wärmeleitungsmodell für die Stadt Osaka in Japan [28]. Die Referenzdächer haben wie in Tian et al. eine niedrige Albedo von 0,1 [54]. Tagsüber reduziert die PV die Oberflächentemperaturen des Dachs um 2,1 K und an der Wand um 0,8 K. Nachts reduziert sich die Dachoberflächentemperatur um 1,4 K und die Wandoberflächentemperatur um 4,3 K, dies führt nachts zu einer maximalen Lufttemperaturabkühlung von 0,4 K [28]. In der Studie von Hu et al. werden die Auswirkungen von einem weltweiten Solarpanelausbau (Dächer in Städten und Wüsten) auf das globale und regionale Klima untersucht [62]. Die Solarpanels führen zu regionalen Kühleffekten. Dieser Effekt wird ausgeglichen, wenn der Solarstrom vor allem in urbanen Gebieten für die Wärmeerzeugung verwendet wird. Die Wärmeerzeugung führt zu einer Erhöhung der regionalen und globalen Temperaturen [62]. Im Gegensatz dazu kommt die Studie von Li et al., die den Einfluss von großflächigen Solar- und Windfarmen simuliert, zu dem Ergebnis, dass Solarparks in der Sahara zu einer Erwärmung der Lufttemperatur zwischen 0,97–1,28 K führen [38]. Weihs et al. untersuchen den Einfluss von PV auf dem Dach und an der Fassade kombiniert mit unterschiedlichen Albedos [30]. Die Simulation wird ähnlich wie bei Masson et al. mit dem TEB-Modell durchgeführt und findet in Wien, Österreich statt [27]. Die Kombination aus hellem Beton und Fassaden-PV führt zu einem erhöhten "Universal Thermal Climate Index" (UTCI) <1,5 K. Die PV-Fassaden verändern die Lufttemperatur nur gering um ± 0,2 K, aber reduzieren den UTCI um 1 K. Die PV auf dem Dach führt zu einer maximalen Abkühlung der Luft um 1,5 K und durchschnittlich über die zwei Simulationstage gerechnet zu einer Lufttemperaturabkühlung von 0,78 K [30]. In der Studie von Berardi & Graham wird mit dem 3D CFD-Modell als Software-Modell ENVI-met v4.4 eine Simulation für Ontario, Kanada durchgeführt [22]. Dabei werden vier verschiedene Szenarios betrachtet: 1) Basis-Szenario: ursprünglicher Zustand des Gebiets, 2) Erneuerbare-Energien-Szenario: alle Dächer werden mit PV bedeckt, 3) UHI-Reduktionsszenario: alle Dächer werden als "cool roofs" ausgeführt und der Baumbestand wird auf ein Maximum ausgeweitet und 4) Hybrid-Szenario: alle Dächer sind mit PV bedeckt und der Baumbestand wird geringfügig an den Straßen erhöht. Das zweite Szenario führt zu einer Abkühlung der Lufttemperatur um 0,09 K, das vierte Szenario führt zu 0,1 K Abkühlung und die deutlichste Abkühlung wird im dritten Szenario mit 0,44 K erreicht. Die Modellierung der Dach-PV-Anlage wird mit sehr vielen Vereinfachungen realisiert, weil es in ENVI-met v4.4 keine Module für PV-Materialien gibt. Beispielsweise wird der konvektive Wärmetransport an der Unterseite der PV vernachlässigt und die turbulente Mischung der Luft wird nicht berücksichtigt [22].

2.3.2. Messungen



Abbildung 2 –Vergleich verschiedener Messungen anhand der Lufttemperaturänderungen zwischen einem Standort mit PV und einem nahegelegenen ähnlichen Standort ohne PV (eigene Darstellung)

_					
Stu	die	Ort	Zeitraum	Höhe über Boden	Besonderheiten/Ergebnisse
1.	Yang et al., Gao et al. [32, 33]	Golmund (Wüste), China	10.2012 — 09.2013	10 m	Chinesische Studie, Interpretation von [59]
2.	Barron- Gafford et al. [34]	Arizona (halbtro- ckene Wüste), USA	04.2014 — 03.2015	2,5 m	 •PV mitNachführung •Datensatz von der Parkplatzmessung im September 2014 nicht vorhanden
3.	Yang et al. [39]	Golmund (Wüste Gobi), China	10.2012 — 09.2013	2 m	Durchschnittliche Lufttemperatur
4.	Broadbent et al. [40]	Arizona (halbtro- ckene Wüste), USA	10.2017 — 07.2018	1,5 m	Durchschnittliche tägliche maximale Luft- temperatur
5.	Li et al. [41]	Yangzhong (Fisch- farm), China	06.2020 — 05.2021	2 m	Durchschnittliche Lufttemperaturänderung: +0,2 K; Durchschnittliche Lufttempera- turänderung (9–15 Uhr): +0,3 K
Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, wird bei allen realen Messungen, außer bei der Studie von Yang et al. und Gao et al., eine Erwärmung der Lufttemperatur durch die PV nachgewiesen [32, 33]. Barron-Gafford et al. haben mit einer durchschnittlichen Änderung von bis 2,4 K den größten Unterschied gemessen, dieser Wert weicht stark von Broadbent et al. ab, der 1,3 K Lufttemperaturänderung, wie in Tabelle 2 ersichtlich, in derselben Region gemessen hat [34, 40]. Bei Yang et al. und Gao et al., die eine Abkühlung der Lufttemperatur messen, fällt auf, dass die Messhöhe der Lufttemperatur stark von den anderen Studien abweicht, allerdings wurde auch in Li et al. die Lufttemperatur auf 10 m Höhe gemessen, dort war die Temperatur während der Hitzeperiode um 0,1 K höher als bei der Referenzmessung [32, 33, 41]. Das ist im Vergleich zu der Messung auf 2 m ein Unterschied von 0,2 K und kann die Abkühlung von Yang et al. und Gao et al nicht ausreichend erklären [32, 33, 41]. Weiters sieht man in Abbildung 2, dass die beiden Studien mit einem aufwendigen Messkonzept zu einem ähnlichen Ergebnis kommen. Beide kommen zu dem Schluss, dass durch die Photovoltaik eine durchschnittliche, jährliche Erwärmung der Lufttemperatur von 0,2–0,3 K auftritt [39, 41].

Die Studie von Golden et al. hat gezeigt, dass Solarpaneele als Verschattung von Straßen eine größere Reduktion der Oberflächentemperaturen bewirken als Bäume [61]. Pham et al. merkt an, dass in der Studie nicht der Einfluss von sensiblen Wärmeströmen untersucht wurde [35]. Bei Barron-Gafford et al. werden in Arizona Messungen über ein Jahr hinweg durchgeführt [34]. Dabei wird innerhalb von einem km² die Umgebungstemperatur von: 1) einer halbtrocken Wüste, 2) einer freistehenden, nachgeführten 1 MW-PV-Anlage und 3) einem Parkplatz gemessen. Im Jahresdurchschnitt ist die Lufttemperatur über der PV-Anlage mit 22,7 °C wärmer als die Wüstentemperatur von 20,3 °C. Außerdem ist die Lufttemperatur über der PV-Anlage tagsüber ähnlich hoch wie über dem Parkplatz. Allerdings sind die Lufttemperaturen über dem Parkplatz in den Sommermonaten nachts um 2,3 K kühler als über der PV-Anlage. Die größte durchschnittliche Erwärmung findet nachts mit 3,5 K Lufttemperaturunterschied zwischen der PV-Anlage und der Wüste statt. Der Parkplatz wird in der Studie als Referenz für den UHI-Effekt herangezogen, allerdings ist dieser großteils von Wüste umgeben und die naheliegenden Gebäude sind von Grünflächen umschlossen. Insofern bleibt es fraglich, inwiefern dieser Parkplatz mit einer dicht bebauten Stadt verglichen werden kann [34]. In der Studie von Armstrong et al. wird in England der Einfluss einer 5 MW-PV-Anlage auf das Mikroklima und die Pflanzen-Boden-Prozesse gemessen [56]. Dabei werden 12 x 1,5 m² Flächen gemessen, wovon jeweils vier in einem der drei Bereiche liegen: 1) unter der PV-Anlage, 2) Zwischenbereich zwischen den PV-Modulen und 3) Kontrollbereich. Der Boden unter der PV-Anlage ist durchschnittlich 5,2 K kühler und trockener als der Kontroll- und Zwischenbereich. Die Schwankungen

der Lufttemperatur fallen unterhalb der PV geringer aus als in den Referenzbereichen. In der Zeit von April bis September ist die Luft unter der PV untertags kühler und nachts wärmer als in den Referenzbereichen [56]. Efthymiou et al. vergleichen in Athen einen PV-Belag mit kahlem Boden und Asphalt [57]. Dabei hat der PV-Bodenbelag immer die niedrigsten Oberflächentemperaturen. Zwischen dem PV-Belag und dem Boden gibt es eine Temperaturdifferenz von 13-18 K und zwischen dem PV-Belag und dem Asphalt gibt es einen Oberflächentemperaturunterschied von 11-15 K [57]. Bei Ogaili & Sailor werden gleichzeitig zwei PV-Module über unterschiedlichen Dachaufbauten in Portland, USA untersucht [58]. In der Studie wird der Einfluss von weißer Dachfolie mit einer Albedo von 0,64, schwarzer Dachfolie mit einer Albedo von 0,062 und einem Gründach mit einer Albedo von 0,28 analysiert. Das Gründach wird jeden Morgen bewässert. Außerdem wird der Einfluss der Höhe des PV-Moduls untersucht, und die Messungen werden in einer Höhe von 18 cm und 24 cm durchgeführt. Das PV-Modul mit einer Höhe von 18 cm produziert über dem Gründach 1,2 % mehr Strom als über dem schwarzen Dach und 0,75 % mehr als über dem weißen Dach. Außerdem ist die Bodenoberflächentemperatur des Gründachs 15 K kühler als des schwarzen Dachs und der Wärmeübergangskoeffizient ist 23 % größer. Die Erhöhung des Abstands der PV-Module von dem Boden erhöht den PV-Ertrag um 0,6 %, unabhängig von dem Dachaufbau. Ogaili & Sailor führen das auf den weniger eingeschränkten Luftstrom, der zu einer Erhöhung des Wärmeübergangskoeffizienten und zu niedrigeren Oberflächentemperaturen führt, zurück [58]. Im Jahr 2016 werden zwei weitere reale Messungen an einer PV-Anlage in der Wüstenregion Golmund, China durchgeführt [32, 33]. Da diese beiden Studien nur in Chinesisch veröffentlich werden, wird hier die Interpretation der beiden Studien von Chang et al. wörtlich und aus dem Englischen übersetzt wiedergegeben [59]:

"In Golmud wird eine signifikante positive Anomalie der jährlichen Netto-Oberflächenstrahlung und eine kühlere Lufttemperatur in 10 m Höhe festgestellt, was wahrscheinlich auch auf den Einsatz der PV-Anlage zurückzuführen ist (Yang et al., 2015, Gao et al., 2016). Insbesondere war die Lufttemperatur in 10 m Höhe über der PV-Anlage das ganze Jahr über etwa 0,11–0,56 °C kühler als auf dem Land ohne PV-Anlage (Gao et al., 2016)."

Chang et al. führen Messungen in Gonghe, China an einer großflächigen PV-Anlage durch [59]. Dabei werden zwei Messstandorte innerhalb einer Entfernung von 0,5 km ausgewählt, der eine innerhalb der PV-Anlage, der andere außerhalb. Die langwellige, nach oben gehende Strahlung über der PV-Anlage ist während der Sommerzeit um 8,1 % niedriger als über dem Referenzstandort. Jedoch ist in derselben Zeit auch die langwellige, nach unten gehende Strahlung über der PV-Anlage um 7,1 % niedriger.

Die Landoberflächentemperatur ist bei der PV-Anlage im Jahresmittel um 4 K reduziert, dies begründen Chang et al. mit der Verschattung des Bodens durch die PV-Anlage. Außerdem wird in der Studie die PV-Oberflächentemperatur mit der Lufttemperatur auf 2 m Höhe verglichen, daraus wird auf eine potenzielle Erwärmung durch die PV-Anlage geschlossen. Da der Vergleich von Oberflächentemperaturen mit Lufttemperaturen nicht aussagekräftig ist, werden diese Ergebnisse hier nicht weiter ausgeführt. Bei den Messungen wird die mögliche Beeinflussung über Konvektion vernachlässigt. Dies könnte relevant sein, da die beiden Standorte innerhalb der dominanten Windrichtung liegen. Weiters merken Chang et al. an, dass sie für zukünftige Messungen gleiche Messhöhen empfehlen würden, um eine bessere Vergleichbarkeit zu erreichen. Die Strahlungsmessung wird bei Chang et al. über der PV auf 10 m Höhe und über dem Referenzstandort auf 3 m Höhe gemessen [59]. In der Studie von Yang et al. werden die Auswirkungen einer großflächigen PV-Anlage in der Wüstenregion Golmund, China auf das umliegende Klima untersucht [39]. Dabei werden die Messungen bei der PV-Anlage mit Referenzmessungen ohne PV-Anlage verglichen. Der Referenzstandort ist 645 m entfernt. Die durchschnittliche, tägliche Albedo der Solarfarm ist mit 0,19 niedriger als die Albedo des Referenzstandortes mit 0,26. Die Nettostrahlung ist über der PV-Anlage im Jahresmittel um 31,8 % höher. Der Tagesumfang der Bodentemperaturen in den ersten 5–10 cm in der Solarfarm niedriger, umgekehrt ist der Jahresumfang der Bodentemperaturen in einer Tiefe von 5–180 cm höher. Die jährlich gemittelte Lufttemperatur auf 2 m Höhe ist bei der PV-Anlage um 0,28 K höher als am Referenzstandort. Der größte Unterschied der monatlichen Durchschnittswerte tritt im Juni mit einer Erhöhung der Lufttemperatur von 0,54 K auf [39]. Broadbent et al. hat ebenfalls wie Yang et al. den Einfluss einer PV-Anlage mithilfe einer Referenzmessung untersucht. Die 40 MW-PV-Anlage liegt in der Nähe von Tucson, USA [39, 40]. Die durchschnittliche, tägliche, maximale Lufttemperatur auf 1,5 m Höhe ist bei der PV-Anlage um 1,3 K wärmer als am Referenzstandort. Die nächtliche Lufttemperatur weist an beiden Standorten keine Unterschiede auf. Aufgrund der PV-Module ist die Albedo der Oberfläche niedriger und die Nettostrahlung und der sensible Wärmestrom höher. Außerdem wird der Bodenwärmestrom aufgrund der Verschattung durch die PV-Module signifikant reduziert [40]. Bei Pham et al. wird eine Verschattungsstruktur untersucht, die in einer Variante mit PV-Modulen verschattet, in der anderen Variante werden diese PV-Module mit einer hoch reflektierenden Folie abgedeckt [35]. Bei den Messungen ist die von der PV-Struktur verschattete Oberfläche untertags 1–2 K wärmer als die der reflektierenden Verschattung. Bei maximaler Einstrahlung ist die mittlere Strahlungstemperatur unterhalb der PV-Verschattung um 12 K wärmer. Bei den Ergebnissen der Studie gibt es zu berücksichtigen, dass die Messungen an einem Modell in kleinerem Maßstab durchgeführt werden. Außerdem werden die Messergebnisse der beiden Varianten nicht zur gleichen Zeit gemessen, sondern der Versuchsaufbau wird abwechselnd verändert und um die Messergebnisse zu vergleichen, werden Tage mit ähnlichen Wetterdaten miteinander verglichen [35]. Li et al. untersucht die Auswirkungen einer PV-Anlage über einer Fischfarm in Yangzhong, China [41]. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Häufigkeit des Ostwindes auf 2 m Höhe wegen der PV-Anlage um 25,3 % abnimmt. Die durchschnittliche Lufttemperatur auf 2 m Höhe ist in der Hitzeperiode (9–15 Uhr) bei der PV-Anlage um 0,3 K höher. Außerdem gibt es einen Unterschied in der Wärmespeicherung des Wassers von 32,18 W/m², dies deutet darauf hin, dass das Wasser unterhalb der PV-Anlage mehr Wärme aufnimmt [41].

Wie aus den zuvor beschriebenen Studien hervorgeht, ist die Datenlage zu dem Thema aktuell noch nicht eindeutig und die realen Messergebnisse von [34, 35, 39–41, 57, 59, 60] stimmen nicht mit den Simulationsergebnissen und Berechnungen von [22, 27– 31, 36–38, 50, 52, 54, 55] überein. Die PV-Anlagen der Studien, in welchen Messungen durchgeführt werden, weichen zudem stark von einer PV-Anlage auf einem Stadtdach ab. Aufgrund des andersartigen Mikroklimas und Unterschieden in der Albedo im urbanen Umfeld können diese Ergebnisse nicht ohne Weiteres übertragen werden. Brito weist ebenfalls darauf hin, dass der Einfluss von PV auf die gebaute Umwelt aktuell nur simuliert wird und noch keine Messungen im urbanen Umfeld vorhanden sind [36]. Pham et al. kommen zu dem Schluss, dass experimentelle Untersuchungen in der urbanen Umgebung zu wenig erforscht sind [35]. Barron-Gafford et al. sehen die Notwendigkeit, ein Energieflussmodel mit genauen Messungen aufzustellen, um die unterschiedlichsten Einflüsse der PV auf das Mikroklima besser abschätzen zu können [34].

3. Entwicklung Messkonzept

In diesem Kapitel wird der Messtandort sowie die Entwicklung des Messkonzeptes anhand von Energiebilanzen erörtert.

3.1. Messstandort

In diesem Kapitel werden die Klimadaten von München sowie der Messstandort im Prinz-Eugen-Park genauer beschrieben.

3.1.1. Klimadaten München

In diesem Kapitel werden die Klimadaten von München analysiert. Dabei wurde mit einer epw-Datei für den Standort München aus dem Jahr 1990 [63], in der CAD-Software Rhino3D mithilfe des grafischen Algorithmus-Editors Grasshopper [64] die in diesem Kapitel abgebildeten Diagramme erstellt.



Abbildung 3 - Psychrometrisches Diagramm für den Standort München über den Zeitraum von einem Jahr [63]

In Abbildung 3 erkennt man, dass die Außenlufttemperaturen über das Jahr verteilt in München zwischen -17 °C und +33 °C betragen. Die relative Luftfeuchtigkeit liegt im Bereich zwischen 20–100%. Dabei gibt es häufig kalte Lufttemperaturen mit einer hohen Luftfeuchtigkeit. Mit mehr als 200 h im Jahr tritt am häufigsten eine Temperatur zwischen 0–1 °C bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 95–100% auf. Jeweils 120 h im Jahr treten Temperaturen von 12 °C und 13 °C bei einer Luftfeuchtigkeit von 90–95% auf.



Abbildung 4 – Direkt- und Diffusstrahlung für den Standort München über ein Jahr [63]

In Abbildung 4 sind die Globalstrahlungsdaten, aufgeteilt in Direkt- und Diffusstrahlung, zu sehen. Über das gesamte Jahr kommen in München 1123 kWh/m²*a Globalstrahlung auf der horizontalen Fläche an. Davon sind ca. 56 % Diffusstrahlung. Die strahlungsstärksten Monate sind im Mai und Juli mit 171 kWh/m² und 174 kWh/m² Globalstrahlung.



Abbildung 5 – Windrose für den Standort München für die Zeit von 15.06. – 15.09.; die Häufigkeiten der Windrichtungen in % sind in grau abgebildet [63]

In Abbildung 5 ist die Windrichtung und -geschwindigkeit von München über den Zeitraum von 15.06. –15.09. zu sehen. Die Windrose wurde entsprechend der Geodaten von dem Messstandort nach dem geographischen Nordpol mit +3,69° Abweichung ausgerichtet. Der Wind kommt am häufigsten zu 13 % der Zeit aus dem Westsüdwesten. Mit insgesamt 998 h, was 46 % der Zeit entspricht, kommt der Wind aus einer Himmelsrichtung im Bereich von Süden und Westen. Die nächstgrößeren Windrichtungshäufigkeiten kommen zu 7,5 % aus dem Osten und 5,6 % aus dem Norden. Windstill ist es zu 5,2 % der Zeit, was 116 h entspricht.

3.1.2. Messstandort Prinz-Eugen-Park

Wie in Abbildung 6 ersichtlich, befindet sich der Standort für die Messungen im Nordosten von München, im Prinz-Eugen-Park. Dieser ist eine Neubausiedlung mit mehrgeschossigen Wohngebäuden, er befindet sich nicht direkt im Stadtzentrum, weist jedoch als Neubausiedlung eine dichte Bebauung auf. Das seit dem Jahr 2016 im Bau befindliche Wohnquartier wird nach der Fertigstellung aus 1800 Wohnungen bestehen [65, 66].



Abbildung 6 - Standort der Messungen innerhalb von München [67]

Nach Besichtigung mehrerer Flachdach PV-Anlagen im Prinz-Eugen-Park mit dem Photovoltaikbeauftragten der Stadt München, Andreas Horn, wurden die in Abbildung 7 rot markierten Dächer ausgewählt. Der Vorteil gegenüber den anderen Dächern besteht im gleichen Substrat und ähnlicher extensiver Begrünung auf beiden Dächern. Die nächsten Bäume sind mit rund 17 m (Luftlinie vom Ende des nächsten Baumes bis zur Attikakante [68]) so weit entfernt, dass sie das Dach nicht verschatten und damit nicht unmittelbar Einfluss auf das Klima auf dem Dach nehmen. Aussagekräftige Referenzmessungen auf dem Gründach sind aufgrund der direkten Nähe zu dem Gründach mit der PV-Anlage möglich. Das westlich liegende Nachbardach mit PV-Anlage muss in der Auswertung der Messdaten vor allem bei Westwind berücksichtigt werden.



Abbildung 7 –Seitenansicht des im Vordergrund liegenden Gründachs für die Referenzmessungen und der dahinterliegenden PV-Anlage, deren mikroklimatischer Einfluss untersucht wird (eigene Aufnahme am 03.06.2022)

3.1.2.1. Extensive Gründächer

In Abbildung 8 ist der Dachaufbau der beiden Gründächer zu sehen. Die Substratschicht hat auf dem Referenz-Gründach eine Dicke von 7,5–8 cm und auf dem PV-Dach eine Dicke von 16 cm. Das Substrat besteht hauptsächlich aus einem mineralischen Schüttstoffgemisch mit geringen Anteilen von organischer Substanz. Genauere Angaben bezüglich der Substrateigenschaften und -zusammensetzung befinden sich im Anhang A. Auf dem Substrat wurde eine Saatgutmischung mit Blumensamen und Sedumsprossen ausgesät. Genauere Angaben bezüglich der Zusammensetzung der Saatgutmischung und Ansaatstärke befinden sich im Anhang B. Es ist anzunehmen, dass neben der ursprünglich angepflanzten Saatgutmischung auch Pflanzen aus der Umgebung über Wind- und Tierausbreitung auf den Dächern wachsen. Einmal jährlich werden die Gründächer gewartet und Gehölze, die die Dachhaut beschädigen können, entfernt.



Abbildung 8 - Ausschnitt aus dem Regeldetail Extensivbegrünung [69]

In Abbildung 9 sind die beiden Dächer in der Vogelperspektive dargestellt. Der Messstandort besteht aus:

- 1. Extensivem Gründach mit PV-Anlage (PV-Anlage)
- 2. Extensivem Gründach für die Referenzmessungen (Referenz-Gründach)



Abbildung 9 – Draufsicht der beiden Dächer für die Messungen inklusive der Himmelsrichtungen (eigene Aufnahme am 03.06.2022)

3.1.2.1.1. Referenz-Gründach

Die Referenzmessungen auf einem extensiven Gründach werden auf einem 3geschossigen Wohngebäude an der Ruth-Drexel-Straße 156, 81927 München, Deutschland durchgeführt. Das Gebäude befindet sich bei den Koordinaten 48.16223, 11.63660 und auf einer Seehöhe von 520 m [68, 69].



Abbildung 10 – Dachaufsicht des Wohngebäudes an der Ruth-Drexel-Straße 156 (eigene Aufnahme am 03.06.2022)

Wie in Abbildung 10 ersichtlich, ist das Dach des Wohngebäudes zweigeteilt. Die Referenzmessungen finden auf dem südlichen, größeren Teil des Gebäudedachs statt. Dieser hat eine Fläche von 272,3 m².

In Abbildung 11 ist das Gründach inklusive aller Deckendurchbrüche und deren Funktion zu sehen, um mögliche Auswirkungen auf die Messungen bei der Datenanalyse besser abschätzen zu können. Die in Abbildung 11 verwendeten Abkürzungen haben folgende Bedeutung:

- EL S Entlüftung Sanitär
- AB B Abluft Bad
- ET Elektro

Die Regenwasser-Entwässerung, Entlüftung Sanitär und Elektroinstallationen sollten, abgesehen von ihrer Albedoveränderung, vernachlässigbare Effekte haben. Die Abluft des Bades weist vor allem nach dem Duschen/Baden eine höhere Luftfeuchtigkeit auf.



Abbildung 11 –Dachaufsicht des Gründachs, welches für die Referenzmessungen verwendet wird (eigene Aufnahme am 03.06.2022)

3.1.2.2. PV-Dach

Die Messungen für die PV-Anlage werden auf einem 3-geschossigen Wohngebäude an der Ruth-Drexel-Straße 158, 81927 München, Deutschland durchgeführt. Das Gebäude befindet sich bei den Koordinaten 48.16201, 11.63624 und 520 m über Seehöhe [68, 70].

Die PV-Anlage auf dem 456,1 m² großen extensiven Gründach besteht aus 120 PV-Modulen der Firma Sonnenstromfabrik. Davon sind 90 Excellent Glas/Glas M72 Module (2050 x 1000 mm) [71] nach Süden mit einer Neigung von 10° und 30 Excellent Glas/Glas M60 (1693 x 993 mm) [72] nach Norden mit einer Neigung von 30° ausgerichtet. Die Excellent Glas/Glas M72 Module sind als Sonderanfertigung rahmenlos ausgeführt und haben eine Nennleistung von 390 Wp und einen Wirkungsgrad unter Standardtestbedingungen von 19,5 %. Die Module wurden rahmenlos ausgeführt, damit möglichst viel Sonnenlicht die Vegetation unter der PV-Anlage erreicht. Die kleineren M60 Module haben eine Nennleistung von 325 Wp und einen Wirkungsgrad unter Standardtestbedingungen von 19,3 %. Das führt insgesamt zu einer Anlagenleistung von 44,85 kWp.

Wie in Abbildung 12 und Abbildung 13 ersichtlich, handelt es sich um rahmenlose, semitransparente und monokristalline Glas-Glas-PV-Module. Der transparente Anteil innerhalb der PV-Module sorgt ebenfalls dafür, dass zusätzliches Licht für die extensive Begrünung unterhalb der PV-Anlage durchkommt.



Abbildung 12 – Nahaufnahme der semitransparenten PV-Module von oben (eigene Aufnahme am 03.06.2022)

Abbildung 13 – Nahaufnahme der semitransparenten PV-Module von unten (eigene Aufnahme am 03.06.2022)

In Abbildung 14 ist zu sehen, dass die PV-Anlage wie ein Pult-Dach aufgeständert wurde. Dieser Aufbau wurde gewählt, um den höchstmöglichen Ertrag pro Quadratmeter zu produzieren. Bei dem Aufbau in Reihen hintereinander können zwar die einzelnen Module einen höheren Ertrag liefern, jedoch passen aufgrund von deren gegenseitiger Verschattung wesentlich weniger Module auf das Dach.



Abbildung 14 – Aufnahme unterhalb der PV-Anlage (eigene Aufnahme am 03.06.2022)

Abbildung 15 – Vegetation unterhalb der PV (eigene Aufnahme am 03.06.2022)

Der Bau der PV-Anlage hat am 23.11.2021 begonnen. Dabei wird das Substrat und die ursprüngliche extensive Dachbegrünung, welche, wie in der Einleitung des Kapitels Messstandort bereits beschrieben, aus Sedumsprossen und einer Blumensamenmischung bestand, abgetragen und nach der Fertigstellung des Baus der PV-Anlage am 16.12.2021 wieder aufgetragen. Die Vegetation unterhalb der PV-Anlage ist in Abbildung 14 und Abbildung 15 ersichtlich, Sedumsprossen sind nur noch sehr vereinzelt vorhanden. Die Vegetation wächst hauptsächlich dort, wo Wasser über die Modulspalten und der darunterliegenden Drainageschicht verteilt wird. Dadurch, dass das Regenwasser auf der Nordseite der PV-Anlage vor der Anlage versickert, gibt es unter den nördlichen PV-Modulen nahezu keine Vegetation.

In Abbildung 16 und Abbildung 17 sind Aufnahmen neben der PV-Anlage zu sehen. Die Vegetation ist karger und es sind im Vergleich zu der Vegetation unterhalb der PV wesentlich mehr Sedumsprossen vorhanden. Die drei Betontröge auf jeder Seite sollen mit Büschen bepflanzt werden, allerdings wird für den Verlauf der Messungen noch keine Bepflanzung vorgenommen, um diese so wenig wie möglich zu beeinflussen.



Abbildung 16 – Extensives Gründach neben der PV-Anlage (eigene Aufnahme am 03.06.2022)

Abbildung 17 – Vegetation neben der PV-Anlage (eigene Aufnahme am 03.06.2022)

In Abbildung 18 ist eine der beiden Regenwassersammelstellen zu sehen, diese ist als Trinkwassergelegenheit für Tiere gedacht. Daneben befindet sich ein Totholzhaufen, der ebenfalls als Biodiversitätsstrategie auf dem extensiven Gründach angelegt wurde. Dieser Aufbau befindet sich ebenfalls an dem anderen Ende der PV-Anlage.



Abbildung 18 - Regenwassersammelgrube und Totholzhaufen unterhalb der PV-Anlage (eigene Aufnahme am 22.07.2022)

3.2. Messkonzept: Theoretische Hintergründe

Um den Einfluss auf das Mikroklima detailliert untersuchen zu können, wird in dem Kapitel 3.2.1 jeweils eine Energiebilanz für das PV-Dach und für das Referenz-Gründach aufgestellt. Mithilfe dieser Energiebilanzen soll ermittelt werden, welche Einflussfaktoren es auf das Mikroklima vor Ort gibt. Damit können in Kapitel 3.2.2 die relevanten Messgrößen und die rechnerische Ermittlung der zusätzlichen Einflussfaktoren abgeleitet werden.

3.2.1. Energiebilanz

In diesem Kapitel werden die Energiebilanz von dem PV-Dach und Referenz-Gründach aufgestellt und beschrieben.

3.2.1.1. PV-Dach



Abbildung 19 –Energiebilanz extensives Gründach mit darüberliegender PV-Anlage (eigene Darstellung)

Die relevanten Einflüsse auf das Mikroklima auf dem Gründach mit Photovoltaik sind in Abbildung 19 als Energiebilanz untertags dargestellt. Die Energiebilanz in der Nacht unterscheidet sich ausschließlich durch die Abwesenheit der solaren Einstrahlung. Maßgebend für diese Darstellung waren die Energiebilanzen von [27, 34, 39, 50, 51, 55]. In Abbildung 19 werden folgende Abkürzungen verwendet:

- (ist die spezifische Wärme [kWh/m²]
-) ist die spezifische Energie [kWh/m²]
- *+ steht für kurzwellig
- ,+ steht für langwellig

Die Energiebilanz in Abbildung 19 zeigt die kurzwellige Solarstrahlung. Diese wird zum Teil reflektiert, von der PV-Anlage absorbiert, transmittiert und in Elektrizität umgewandelt. Die absorbierte Strahlungswärme wird von den PV-Modulen als langwellige Strahlung abgegeben. Ein Teil der kurzwelligen Solarstrahlung und langwelligen Himmelstrahlung transmittiert durch das PV-Modul, da es sich um eine semitransparente PV-Anlage handelt. Über den Wind wird Wärme vom PV-Modul über Konvektion abgeführt und weitertransportiert. Die Bodenwärme stellt die Wärme dar, die in den Boden abgeführt wird und auch über das Dach das Gebäudeklima innerhalb des Gebäudes beeinflussen kann. Außerdem gibt der Boden die gespeicherte Wärme als langwellige Strahlung ab, sobald die Oberflächentemperaturen über dem Boden geringer sind als die Oberflächentemperaturen des Bodens. Die latente Wärme wird bei Verdunstung von Wasser aus dem Boden bzw. aus Pflanzen frei und führt zu einer Abkühlung. Über die Umwandlung der Strahlungsenergie in Elektrizität wird Energie von dem Dach abgeführt, welche somit nicht mehr auf dem Dach in Wärme umgewandelt werden kann. Zur einfacheren Darstellung wurden die Wärmeleitung über die Aluminiumständer, die diffuse Strahlung und Niederschläge nicht abgebildet. Die diffuse Strahlung wird in der Energiebilanz berücksichtigt. Die Wärmeleitung und die Niederschläge werden in der Energiebilanz vernachlässigt.

3.2.1.2. Referenz-Gründach



Abbildung 20 – Energiebilanz Gründach (eigene Darstellung)

In Abbildung 20 ist die Energiebilanz des Gründachs untertags dargestellt. Wie in der Abbildung 20 zu sehen ist, trifft die kurzwellige Solarstrahlung direkt auf den Boden bzw. die Pflanzen und wird dort zum Teil reflektiert und absorbiert. Die absorbierte Strahlungswärme wird zum Teil vom Boden als langwellige Strahlung abgegeben und zum Teil als Bodenwärme aufgenommen. Die weiteren Parameter sowie die entsprechenden Abkürzungen wurden bereits im vorherigen Unterkapitel 3.2.1.1 erörtert. Zur einfacheren Darstellung dieser Energiebilanz wurden Niederschläge und diffuses Licht nicht abgebildet. Die diffuse Strahlung wird jedoch in der Energiebilanz berücksichtigt.

3.2.2. Messtechnische und rechnerische Ermittlung der Energien

In Tabelle 3 sind die unterschiedlichen Energien aus der Energiebilanz der PV-Anlage aus Kapitel 3.2.1.1 dargestellt. Daneben wird jeweils der benötigte Sensor bzw. die benötigten Messgrößen für eine Berechnung des Werts aufgeführt. Für die Messung der Strahlungsdaten sind jeweils vier Pyranometer und Pyrgeometer notwendig. Ein Netto-Radiometer fasst zwei Pyranometer und zwei Pyrgeometer zusammen, von denen jeweils eines nach oben und unten ausgerichtet ist. Die produzierte, elektrische Energie der entsprechenden PV-Anlage kann online über "Solar Edge Monitoring" eingesehen werden [73].

Energieparameter	Messsensor/Messgrößen
QHimmel lw ↓	Pyrgeometer ↑
ESonne kw ↓	Pyranometer ↑
E _{PV} reflektiert kw ↓	Pyranometer ↓
q ₽∨ lw ↑	Pyrgeometer ↓
q ⊳∨ Iw↓	Pyrgeometer ↑
ESonne PV kw ↓	Pyranometer
Eelektrisch	Ertragsdaten PV
qKonvektion	Berechnung über Strahlungswerte und Eelektrisch
qlatent	Berechnung über Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Wind- geschwindigkeit, Nettostrahlung
EBoden reflektiert kw	Pyranometer
Q Boden lw	Pyrgeometer ↓
q _{Boden}	Wärmestromplatte, durchschnittliche Bodentemperatur, Boden- feuchtigkeit

Tabelle 3 - Energieparameter aus der Energiebilanz für das PV-Dach und dafür geeignete Messsensoren

Für die Berechnung der Konvektion der Ober- und Unterseite des PV-Moduls wurde die Leistungsbilanz einer PV-Anlage von Hoyer et al. nach der Variable der Konvektion aufgelöst [74]. In dieser Formel (2) kann die Konvektion anhand der Strahlungswerte und der elektrischen Energiedaten des PV-Moduls berechnet werden.

$$\begin{array}{l} -./012345/0 = 6_{7/00239} + -..5; ; 2 < 9 = 6_{>? 2!} < 23452 439 = 6_{2<234} 5' \# \$ = ->? < 9 \uparrow \\ = ->? < 9 \downarrow \end{array}$$

$$\begin{array}{l} (2) \\ \end{array}$$

Die latente Wärme wird direkt im Programm des Datenloggers berechnet. Die Berechnung findet nach der "ASCE Penman Monteith Equation" statt, welche in Formel (3) dargestellt ist [75]. Dabei werden die Messdaten der Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Nettostrahlung, relativen Luftfeuchtigkeit sowie die Koordinaten und die Seehöhe des Standorts als Eingangsparameter benutzt. Für die stündlichen Daten werden mehr als 40 Gleichungen berechnet, um alle Parameter für die in Formel (3) dargestellte Gleichung zu erhalten [76].

$$'(_{)*} = \frac{', ,'- \cdot / \cdot 01_2 = 34 + 5 \cdot \frac{6_2}{(+789} \cdot \cdot_7 \cdot 0; _{<} = ;_{=}4}{\Delta + 5 \cdot 0? + 6_{\underline{0}} \cdot \cdot_7 4}$$
(3)

$$\begin{split} & 6A_{B7} = CDEFGHUKLJEIMHMGEIGNGOGEGKFPOQJKFGKGRJPSIEJKHPMEJIMSKTUU/hX \\ & N_0 = YGIISHIEJhQDKZT[\scaledol{U}^2 & hX \\ & ^ = _äEUGHIESULMahIGLGHbSLGKHT[\scaledol{U}^2 & hX \\ & A = cDeahHahKMIIQMahG,HIüKLQMahGeDOIIGUPGEJIDEJDO1,5-2,5 U i öhGT'I X \\ & D_m = cDeahHahKMIIQMahG,HIüKLQMahG_MKLZGHahnMKLMZCGMUDO2U i öhG TUHX \\ & G = cDeahHahKMIIQMahGEoäIIMZDKZHLJUPOLEDaCJDO1,5-2,5 U i öhG TCpJX \\ & G_q = cDeahHahKMIIQMahGEcJUPOLEDaCJDO1,5-2,5 U i öhG TCpJX \\ & \Delta = oIGMZDKZLGEoäIIMZDKZHLJUPOLEDaCCDERGTCpJ''IX \\ & r = PHsahESUGIEMHahGtSKHIJKIGTCpJ''IX \\ \\ & HahKMIIQMahGecJUPOLEDaCDISHTCPJ''IX \\ & HahKMIIQMahGtSKHIJKIGTCpJ''IX \\ \\ & HahKMIIQMAhKGTSKHIJKIGTCpJ''IX \\ \\ & HAHKMIIQMAHKGTSKHIJKIGTCPJ'''II HAHKMIIQMAHKGTSKHIJKIKITGY \\ \\ & HAHKMIIIII HAHKMIIQMAHKGTSKHII$$

- I0 =uähQGECSKHIJKIG
- Iv =YGKKGECSKHIJKIG

Neben dem gemessenen Bodenwärmestrom in einer bestimmten Bodentiefe, wird der Bodenwärmestrom an der Oberfläche über der Wärmestromplatte, wie in Formel (4) dargestellt, berechnet. Für diese Formel muss zuvor die durchschnittliche gespeicherte Wärme im Boden über der Wärmestromplatte mit der Formel (5) und die Bodenwärmekapazität mit Formel (6) berechnet werden. In Formel (6) muss zusätzlich eine Annahme für die Wärmekapazität des trockenen Bodens getroffen werden [48, 77].

$$3_{w;xyza\{|;} = 3_{ax^{y}z:<<\Box z=\ddot{A}\ddot{A};} + *$$
 (4)

^BÅ2 !<ä#\$2 = bSLGKnäEUGHIESUJK LGEÇÉGEOäaħGT_/U²X
 ^Ňä ; 2!<ö""Ü<q442 = bSLGKnäEUGHIESU MKLGEAMGOGLGE_äEUGOQDHHPQJIIGT_/U²X
 o = LDEaħHaħKMIQMaħGZGHPGMaħGEIG_äEUGMUbSLGKT_/U²X

$$* = \frac{0(\dot{z} = (\dot{a})^2 4 \cdot \hat{a} \cdot 6_{<}}{\ddot{\mu}}$$
(5)

 $A_5 = JCIDGQQGbSLGKIGUPGEJIDE T^{\circ}X$

 A_{5aa} = RSErGEMZGbSLGKIGUPGEJIDET"I X

C=AMGOGLGE _äEUGOQDHHPQJIIGTUX

I_" =bSLGKnäEUGCJPJFMIäITXU^{ã .°}I X

FUGMIMKIGERJQQTHX

$$6_{<} = \mathring{a}_{w} \cdot 6_{@} + \varsigma_{\acute{e}} \cdot \mathring{a}_{\acute{e}} \cdot 6_{\acute{e}}$$
(6)

 \hat{e}_{A} = oahüllLMahlGTCZ/U³X

Iv =_äEUGCJPJFMIäI LGHIESaCGKGKbSLGKHT/CZ·°IX

í₁ = bSLGKn JHHGEZGħJQITU^ãX

 \hat{e}_9 = c MahlGRSK_JHHGETCZ/U³X

I₉ =_äEUGCJPJFMIäIRSK_JHHGE4190TVCZ·°IX

3.3. Messkonzept: Reale Umsetzung

Mithilfe der in Kapitel 3.2 herausgearbeiteten Energiebilanzen und der daraus in Kapitel 3.2.2 hervorgegangenen Messgrößen und Sensoren, wurde das finale Messkonzept konzipiert, welches in diesem Kapitel vorgestellt wird. Dabei soll neben der Energiebilanz auch die Reichweite des Effekts der Photovoltaik auf das Mikroklima gemessen werden. Das wird über 11 Lufttemperatursensoren über und neben der Photovoltaik erreicht, mit denen ein Temperaturprofil über die Photovoltaik und das gesamte darunterliegende Dach gemessen werden kann. Die Messung des Temperaturprofils ist von dem Messaufbau von [78] inspiriert, der die Auswirkungen einer Grünfassade auf die mittlere Strahlungstemperatur untersucht hat. In der Studie wurden vier Reihen von Kugelthermometern jeweils in einem Abstand von 0,5 m vor der Grünfassade aufgebaut.

In Tabelle 4 sind alle Messsensoren für das Messkonzept aufgelistet. Dabei ist die Höhe über dem Boden für die Referenzmessungen auf dem Gründach separat unter "GD" angegeben. Die angegebenen Messgenauigkeiten sind dabei nur für die erwartbaren Messergebnisse aufgelistet. Das bedeutet, dass die angegebenen Messgenauigkeiten z. B. nicht für Temperaturen von 100 °C gelten.

Die Messdaten werden mit einem CR1000X Datenlogger von Campbell Scientific [79] und einem angehängten Campbell Scientific AM16/32B 16- oder 32-Kanal Relaismultiplexer [80] aufgezeichnet. Der lokale Speicher von 4 MB wird mit einer 16 GB Speicherkarte erweitert. Die Sensoren messen in einem Intervall von 10 s. Alle Messdaten werden über 10 min gemittelt und gespeichert. Zusätzlich dazu werden, wie in Tabelle 4 dargestellt, 10-sekündlichen Werte Luft-PVdie von den und Oberflächentemperaturen sowie den Winddaten abgespeichert. Der Grund dafür ist, dass der Wind großen Schwankungen ausgesetzt ist und für das Temperaturprofil, wie in Abbildung 9 sichtbar, nur aus den Himmelsrichtungen Ost-Süd-Ost oder West-Nord-West kommen kann. Zusätzlich dazu können für das Temperaturprofil auch Aussagen getroffen werden, wenn es nahezu windstill ist. Um die Identifizierung von geeigneten Messwerten zu verbessern, werden die Daten aus diesem Grund im 10-Sekunden-Rhythmus aufgezeichnet.

Tabelle 4 – Übersicht der verwendeten Messsensoren (*für tägliche Summen)

Nr.	Sensor	Parameter [Einheit]	Höhe über Ober- kante Substrat	Genauigkeit	Mittelungs- intervall
1	107 Thermistor	Lufttemperatur [°C]	2 m	± 0,2 °C	10 s, 10 min
2a 2b	Hukseflux NR01, RA01	kurzwellige Strahlung [W/m²]	0,31 m; 1,89 m GD: 1,5 m	± 10 %*	10 min
		langwellige Strahlung [W/m²]	0,31 m; 1,89 m GD: 1,5 m	± 10 %*	10 min
3	HygroVUE5	Lufttemperatur [°C]	0,5 m	± 0,3 °C	10 s, 10 min
		Relative Luftfeuchtigkeit [%]	0,5 m	± 1,8 % (0- 80 %) ± 3 % (80- 100 %)	10 min
4	Gill Windsonic4	Windgeschwindigkeit [m/s]	2 m	± 2 %	10 s, 10 min
		Windrichtung [°]	2 m	± 3 %	10 s, 10 min
5	CS 241	Oberflächentemperatur PV [°C]	1,4 m	± 0,3 °-0,4 °C	10 s, 10 min
6	CS650	Volumetrischer Wassergehalt [%]	-8 cm GD: -4 cm	±3%	10 min
		Bodentemperatur [°C]	-8 cm GD: -4 cm	± 0,1 °C	10 min
		Elektrische Bodenleitfähigkeit [dS/m]	-8 cm GD: -4 cm	±5%	10 min
		Relative dielektrische Permittivität [-]	-8 cm GD: -4 cm	± 1,4	10 min
7	Hukseflux HFP01	Wärmestrom	-0,08 m GD: -0,04 m	-15–5 %	10 min
8	TCAV-L	Bodentemperatur [°C]	-15,5 cm; -10,5 cm; -5,5 cm; -0,5 cm GD: -6,5 cm; -4,5 cm; -2,5 cm; -0,5 cm	± 0,3 °C	10 min

3.3.1. PV-Dach

In Abbildung 21 und Abbildung 22 ist das Messkonzept für das PV-Dach dargestellt. Es sind 11 Lufttemperatursensoren (1) auf 2 m Höhe über das PV-Dach verteilt. Die Temperatursensoren sind in einem Strahlenschutz befestigt, der die Sensoren verschattet und belüftet; das ermöglicht die genaue Messung der Lufttemperatur. Abbildung 21 zeigt die Verteilung der Lufttemperatursensoren über das Dach. Dabei stehen jeweils 4 Lufttemperatursensoren neben beiden Seiten der PV-Anlage. Der erste der vier Lufttemperatursensoren steht direkt an der PV-Anlage, die drei weiteren Sensoren sind jeweils mit 1 m Abstand zu dem Vorgänger aufgestellt. Zusätzlich dazu sind drei Lufttemperatursensoren über der PV-Anlage montiert. Ein Sensor ist genau mittig angebracht und die anderen beiden sind jeweils in der Mitte von dem mittleren Lufttemperatursensoren befestigt.



Abbildung 21 - Draufsicht auf das Messkonzept des PV-Dachs (Abbildung gezeichnet von Josef Rott)

Für die Messung der Windgeschwindigkeit und -richtung misst ein Ultraschallanemometer (4) auf 2 m Höhe den Wind. Dieser ist nördlich abseits der Lufttemperatursensoren aufgestellt, damit die Windmessung nicht von diesen beeinflusst wird. In der Mitte



Abbildung 22 - Messkonzept für das PV-Dach mit Begrünung (Abbildung gezeichnet von Josef Rott)

der PV-Anlage findet die Messung der Messgrößen für die Energiebilanz statt. Wie bei [39-41, 59] wird die kurz- und langwellige Strahlung über zwei Netto-Radiometer (2a) gemessen. Besonders ist dabei, dass nicht nur ein Netto-Radiometer oberhalb der PV, sondern auch eines unterhalb der PV misst, um die transmittierte Strahlung durch die PV-Module sowie die langwellige, nach unten abgestrahlte Wärmestrahlung zu messen. Die PV-Modultemperatur (5) wird an einem Modul mittig und in der Ecke gemessen, die beiden Werte werden gemittelt als PV-Modultemperatur verwendet. Zusätzlich wird im Vorfeld auch der Einfluss der Verschattung durch das Messequipment oberhalb der PV-Anlage auf die Modultemperatur untersucht. Unterhalb der PV-Anlage wird wie bei [56] die relative Luftfeuchtigkeit und -temperatur (3) 0,5 m über dem Boden gemessen. Für die Ermittlung des Bodenwärmestroms wird der Wärmestrom über eine Wärmestromplatte (7) ermittelt. Zusätzlich wird über vier miteinander verbundene Thermoelemente mit dem Namen TVAC-L (8), die in unterschiedlichen Bodentiefen befestigt werden, die durchschnittliche Bodentemperatur bestimmt. Mit dem CS650 (6) wird die Bodenfeuchtigkeit, die Bodentemperatur und zwei weitere Messgrößen, die Tabelle 4 entnommen werden können, ermittelt.



Abbildung 23 – Darstellung der notwendigen Netto-Radiometer-Montagehöhen inklusive des Sichtfelds der Pyrgeometer (Abbildung gezeichnet von Josef Rott)

In Abbildung 23 sind die notwendigen Montagehöhen der Netto-Radiometer dargestellt. Das Ziel ist es, dass die Netto-Radiometer nur die langwellige Strahlung von den PV-Modulen messen, damit der Einfluss der PV auf die Strahlungsbilanz besser abgeschätzt werden kann. Da die Pyrgeometer des Netto-Radiometer jeweils ein Sichtfeld von 150° [81] und die Module eine Neigung von 10° haben, sind relativ niedrige Messhöhen von 0,44 m ober- und unterhalb der PV notwendig. Die Pyranometer haben ein Sichtfeld von 180°, deshalb werden die Messungen der kurzwelligen, reflektierten Sonneneinstrahlung zwar überwiegend die reflektierte Strahlung der PV messen, jedoch auch zu einem Teil die reflektierte Strahlung der Umgebung.

3.3.2. Referenz-Gründach

Abbildung 24 zeigt das Messkonzept für das Referenz-Gründach. Um die Messungen vergleichen zu können, orientiert sich das Messkonzept am im Unterkapitel 3.3.1 vorgestellten Messkonzept für die Energiebilanz des PV-Dachs. Damit das Radiometer (2b) mit dem Sichtfeld des Pyrgeometers von 150° [81] nur den begrünten Teil des Gründachs erfasst wird dieses auf 1,5 m Höhe montiert.



Abbildung 24 - Messkonzept für das Referenz-Gründach (Abbildung gezeichnet von Josef Rott)

4. Durchführung der Messungen

In diesem Kapitel werden der Aufbau des Messkonzepts, die Probleme bei dem Aufbau und erste Messergebnisse beschrieben.

4.1. Ablauf des Messaufbaus

In Abbildung 25 und Abbildung 26 ist die Stromlegung für den Datenlogger zu sehen. Der Strom für den Datenlogger wird von einer Außensteckdose des Wohnhauses an der Ruth-Drexel-Straße 158 bezogen wie in Abbildung 25 sichtbar. In Abbildung 26 ist die Kabelführung zu dem PV-Dach zu sehen. Das Stromkabel einer Kabeltrommel wurde entlang der außenliegenden Wand des Treppenhauses abwärts zu der Steckdose geführt.



Abbildung 25 – Außensteckdose für die Stromversorgung des Datenloggers (eigene Aufnahme am 22.07.2022)

Abbildung 26 – Kabelführung für die Stromversorgung des Datenloggers (eigene Aufnahme am 22.07.2022)

Abbildung 27 zeigt den Aufbau des Datenlogger-Setups. Dieses liegt in einem wettergeschützten Kunststoffgehäuse. Außerdem ist das Gehäuse wettergeschützt auf der Überfahrt des Aufzugs platziert und ist durch die darüberliegenden PV-Module vor Witterung geschützt. Die Erdung (gelb-grünes Kabel) des Datenloggers wurde an der PV-Anlage angeschlossen. Die Datenübertragung erfolgt über ein Mobilfunkmodem. Dieses ist mit einer SIM-Karte ausgerüstet und sendet über eine Mobilfunkantenne die Daten auf den entsprechenden Computer. Um die Technik zusätzlich vor Luftfeuchtigkeit zu schützen, wurden, wie in Abbildung 28 abgebildet, die Kabelöffnungen des Schutzgehäuses mit Sanitärdichtmasse abgedichtet.



Abbildung 27 – Aufstellung des Datenloggers (eigene Aufnahme am 22.07.2022)

Abbildung 28 – Abdichtungen des Datenloggers (eigene Aufnahme am 22.07.2022)

Der Innenraum des Schutzgehäuses wird in Abbildung 29 gezeigt. Die Pufferbatterie sichert die Stromversorgung im Falle eines Stromausfalles. Der Laderegler wurde nachträglich eingebaut, da eine falsche Pufferbatterie geliefert wurde, die für den CR350-Datenlogger gedacht ist. Der Laderegler regelt das Ladeverfahren für die Pufferbatterie. Damit die hohe Anzahl der Sensoren angeschlossen werden kann, wurde der Multiplexer AM16/32B mit dem CR1000X-Datenlogger verbunden. Um die technischen Komponenten vor Luftfeuchtigkeit zu schützen und damit eine lange Lebensdauer zu gewährleisten, wurden zwei Beutel mit Trockenmittel in dem Gehäuse platziert. Die Verdrahtung des Datenloggers und Multiplexers wurde nach den Verkabelungsplänen aus den entsprechenden Produktdatenblättern und in Absprache mit Campbell Scientific vorgenommen.



Abbildung 29 –Innenansicht des Schutzgehäuses mit Beschreibung der wesentlichen Komponenten (eigene Aufnahme am 22.07.2022)



Abbildung 30 -Kabelbrücke für die Sensorkabel für die Messungen auf dem Referenz-Gründach (eigene Aufnahme am 22.07.2022)

In Abbildung 30 ist die Kabelbrücke zu sehen, die das Messen auf zwei Dächern ermöglicht. Das Edelstahlseil ist an zwei Sekuranten befestigt und wurde mithilfe eines Spanngurtes gespannt. An dem Edelstahlseil sind die Kabel der Sensoren mit Kabelbindern befestigt.

4.1.1. Ausrichtung/Platzierung der Sensoren

Für die Lufttemperatursensoren außerhalb der PV-Anlage wurden rechteckige Alumasten mit Mastfußschellen an einer Kunststofffußplatte befestigt, wie in Abbildung 31 zu sehen. Die Masten für die Lufttemperatursensoren innerhalb der PV-Anlage wurden in dem Spalt zwischen zwei PV-Modulen mit den Stangen der PV-Anlage verschraubt. Zum Teil war es dafür notwendig, die PV-Module zu verschieben und den Spalt zwischen den PV-Modulen zu vergrößern. Alle Masten wurden mit einer Wasserwaage vertikal ausgerichtet. Der Abstand der Masten außerhalb der PV-Anlage zueinander beträgt 1 m. Dieser wurde von der Mitte der Öffnung des Strahlenschutzes für die Temperatursensoren gemessen. Damit kann ein genauer Abstand von 1 m trotz unebenem Untergrund gewährleistet werden. Zusätzlich wurden die Masten, wie in Abbildung 31 zu sehen, mit einer Maurerschnur in einer Linie ausgerichtet.



Abbildung 31 –Ausrichtung der Masten für die Lufttemperatursensoren mit einer Maurerschnur (eigene Aufnahme am 23.06.2022)

Die Stahlmasten für die beiden Windsensoren wurden zum Schutz vor Rost mit weißer Farbe lackiert. Danach wurden die Masten mit einer Wasserwaage vertikal ausgerichtet. Zusätzlich dazu müssen die beiden Windsensoren nach dem geographischen Norden (auch "True North" genannt) ausgerichtet werden. Über die Website des "National Centers for Environmental Information" [82] wurde die Abweichung des geographisches Nordpols von dem magnetischen Nordpol für die Koordinaten des Messtandorts in München bestimmt. Die Abweichung beträgt 3,9°. Das ist auch in Abbildung 32 zu sehen, in der der Standort zwischen der 2,5° und 5°-Linie liegt.





In Abbildung 33 sieht man die Ausrichtung des Windsensors mit dem Kompass. Beim Kompass wurde eine Abweichung von 4° eingestellt und der schwarze Pfeil auf dem Windsensor (rot eingekreist) wurde danach ausgerichtet.



Abbildung 33 - Ausrichtung des Windsensors nach dem geographischen Norden (eigene Aufnahme am 22.07.2022)

Alle Querarme für die Befestigung der Netto-Radiometer wurden mit der oben beschriebenen Methode nach dem geographischen Südpol ausgerichtet.

4.1.2. Problemlösung

Lange Zeit hat der Windsensor auf dem PV-Dach keine Messergebnisse angezeigt. Der gleiche Windsensor auf dem Referenz-Gründach funktionierte jedoch. Um zu überprüfen, ob der Sensor oder das Kabel defekt ist, wurden die beiden Sensoren ausgetauscht. Danach funktionierte der Windsensor, der zuvor nicht funktioniert hatte. Wie in Abbildung 34 zu sehen, wurde das SDI-12-Kabel für die Verbindung zum Windsensor aufgeschraubt. Nachdem alle Adern ein- und ausgesteckt wurden, funktionierte der Sensor.



Abbildung 34 –geöffnetes SDI-12-Kabel des Windsensors (eigene Aufnahme am 11.07.2022)

In Abbildung 35 sind die Messdaten der Lufttemperaturmessungen der HygroVUE5-Sensoren (Lufttemperatur & relative Luftfeuchtigkeit) vom 19. –25.07.2022 dargestellt. Sowohl die Messungen der Lufttemperatur als auch die Messungen der relativen Luftfeuchtigkeit fallen je nach Tag bei Temperaturen ab 26,5 °C aus. Um das Problem zu beheben, wurden die beiden Sensoren auf einen eigenen 12 V-Ausgang auf dem Datenlogger gelegt, damit eine stabile 12 V-Stromversorgung sichergestellt werden konnte. Außerdem wurden die beiden Erdungen aus der WAGO-Verbindungsklemme genommen und einzeln in einen Erdungseingang im Datenlogger festgeschraubt. Zusätzlich dazu wurden die Schirmungen aus der Erdung genommen und nicht mehr am Datenlogger angeschlossen. Die oben aufgezählten Versuche, das Problem zu lösen, haben nicht funktioniert. Aus diesem Grund werden die beiden HygroVUE5-Sensoren nach dem Beenden der Masterarbeit umgetauscht.



Abbildung 35 –Ausfälle der beiden HygroVUE5-Sensoren in dem Zeitraum von 19. –25.07.2022 (eigene Darstellung mit dem Programm View Pro 4.3)

Aufgrund von Aluminium- und Chipengpässen hat sich die Lieferung der drei bestellten Netto-Radiometer bis zum 19.08.2022 verzögert. Aus diesem Grund können die Netto-Radiometer im Zuge der Masterarbeit nicht mehr aufgebaut und ihre Messergebnisse nicht mehr überprüft werden.

4.1.3. Fertiger Messaufbau

Das fertige Messkonzept ist in Abbildung 38 zu sehen. Es ist die Aufteilung der 11 Lufttemperatursensoren über das PV-Dach zu sehen. Außerdem kann man die Kabelbrücke die beiden Windsensoren und das Stativ mit den Messsensoren auf dem Gründach erkennen.



Abbildung 38 –Luftaufnahme des fertigen Messaufbaus (eigene Aufnahme am 22.07.2022)

In Abbildung 36 sind die 11 Lufttemperatursensoren zu sehen. Die Lufttemperatursensoren wurden so im Strahlenschutz befestigt, dass der größtmögliche Teil des metallenen Messkopfes in dem Luftraum in dem Strahlenschutz positioniert ist, ohne die Abdeckungsplatte zu berühren. Die Kabel der Lufttemperatursensoren wurden mit Kabelbindern fixiert. In Abbildung 37 sieht man den mittleren Lufttemperatursensor und dahinter das Stativ mit dem Querarm für die Montage des Netto-Radiometers. Das Stativ ist auf 3 Betonplatten fixiert, die, um die Albedo des bewachsenen Untergrunds



Abbildung 36 – Aufstellung der Lufttemperatursensoren (eigene Aufnahme am 22.07.2022)

Abbildung 37 – mittlerer Lufttemperatursensor und das Stativ für die Montage des Netto-Radiometers (eigene Aufnahme am 22.07.2022)

nicht zu verfälschen, in grün angesprüht wurden.

Der Windsensor auf dem PV-Dach ist in Abbildung 39 zu sehen. Der Stahlmast wurde in einer Kunststofffußplatte mit Schrauben fixiert. Die Kabelführung des Windsensors verläuft in dem Stahlrohr und unter der Kunststofffußplatte. In Abbildung 40 ist der HygroVUE5-Sensor auf 0,5 m Höhe, die Kabel der Bodensensoren und auf der linken Seite mittig der Querarm für den unteren Netto-Radiometer zu sehen. Außerdem erkennt man, dass die Vegetation durch den Messaufbau zum Großteil zerstört wurde.



Abbildung 39 – Aufstellung des Windsensors (eigene Aufnahme am 22.07.2022)

Abbildung 40 – HygroVUE5-Sensor und Bodensensoren (eigene Aufnahme am 22.07.2022)

Der Messaufbau des Referenz-Gründachs ist in Abbildung 41 und Abbildung 42 sichtbar. Dabei ist Abbildung 41 das Stativ mit dem Temperatur- und Hygro-VUE5-Sensor zu sehen. Zwischen den beiden Sensoren hängt der Querarm für die Montage des Netto-Radiometers. Das Stativ ist, um es vor Windlasten zu schützen, auf 3 Betonplatten montiert. Diese wurden grün angesprüht, um die Albedo des extensiven Gründachs nicht zu stark zu verfälschen. Im unteren Bereich des Bildes sind die Kabel für die Bodensensoren zu erkennen. Abbildung 42 ist im Vordergrund der Windsensor zu erkennen.



Abbildung 41 – Stativ mit Messsensoren und Bodensensoren (eigene Aufnahme am 22.07.2022)

Abbildung 42 – Windsensor im Vordergrund und das Stativ im Hitergrund (eigene Aufnahme am 22.07.2022)

4.2. Erste Messergebnisse

In diesem Kapitel werden die ersten Messergebnisse präsentiert. Da die vollständige Analyse erst nach dem Abschluss der Masterarbeit stattfindet, ist diese Interpretation der Messergebnisse als vorläufig und nicht abgeschlossen zu bewerten.

4.2.1. Lufttemperaturen 0,5 m über Oberkante Substrat

Bei der ersten Analyse der Messwerte der Lufttemperatursensoren wurden wärmere Lufttemperaturen unterhalb der PV-Anlage als über der PV-Anlage festgestellt. Eigentlich wurde aufgrund der Verschattung durch die PV-Module eine niedrigere Lufttemperatur unter der PV-Anlage erwartet. Um die Messung des HygroVUE5-Sensors zu überprüfen, wurde der Lufttemperatursensor, der über der Photovoltaikanlage misst, direkt neben dem HygroVUE5-Sensor auf derselben Messhöhe montiert. In Abbildung 43 ist die Überprüfung des Sensors zu sehen. Der Zeitraum der Überprüfung beginnt an dem Punkt, an dem die rote Linie des Überprüfungs-Lufttemperatursensors einen Ausschlag hat. Zu der Zeit lag der Sensor kurzfristig außerhalb des Strahlenschutzes in der Sonne, danach wurde er unter dem Dach montiert und man erkennt, dass der Überprüfungs-Lufttemperatursensor genau den gleichen Temperaturverlauf wie der HygroVUE5-Sensor annimmt. Der Überprüfungszeitraum endet, sobald alle drei Linien geradlinig verlaufen. In der Zeit war der Datenlogger ausgeschaltet und es wurden keine Messpunkte aufgezeichnet. Das Darstellungsprogramm verbindet in so einem Fall




den letzten aufgenommenen Messpunkt mit dem Ersten nach der Unterbrechung. Gleichzeitig kann man erkennen, dass der Referenz-Lufttemperatursensor während der Überprüfung über der PV-Anlage niedrigere Temperaturen misst als die beiden anderen Sensoren unter der PV-Anlage messen. Diese Messung stimmt mit den Messergebnissen an dem Tag davor und danach überein. Eine Hypothese für die wärmeren Lufttemperaturen unter der PV-Anlage ist die geringere Windgeschwindigkeit, wodurch durch die reduzierte Konvektion weniger Wärme, die als langwellige Strahlung von den PV-Modulen abgestrahlt wird, abtransportiert werden kann.

In Abbildung 44 ist ein Vergleich der Lufttemperaturmessungen des HygroVUE5-Sensors auf dem PV-Dach und auf dem Referenz-Gründach zu sehen. Es ist zu erkennen, dass die Lufttemperaturen untertags über die vier dargestellten Tage unter der PV-Anlage wärmer sind als über dem Referenz-Gründach bei derselben Messhöhe.



- PV-Dach - Referenz-Gründach

Abbildung 44 –Lufttemperaturvergleich auf 0,5 m Messhöhe zwischen dem Referenz-Gründach und dem PV-Dach (eigene Darstellung mit dem Programm View Pro 4.3)

Der Tagesverlauf der Lufttemperaturmessungen auf 0,5 m Messhöhe ist in Abbildung 45 zu sehen. Dies stellt den heißesten Tag dar, der von den HygroVUE5-Sensoren ohne Ausfälle aufgezeichnet werden konnte. Die größte Temperaturdifferenz weist einen Lufttemperaturunterschied von 3,7 K auf. Bei der Messgenauigkeit des Sensors von \pm 0,3 °C ist dieser Temperaturunterschied statistisch signifikant.



Abbildung 45 – Tagesverlauf der Lufttemperatur auf 0,5 m Messhöhe beim Referenz-Gründach und dem PV-Dach (eigene Darstellung mit dem Programm View Pro 4.3)

4.2.2. Lufttemperaturen 2 m über Oberkante Substrat



Abbildung 46 – Lufttemperaturvergleich 2 m über Oberkante Substrat an zwei heißen Tagen (eigene Darstellung mit dem Programm View Pro 4.3)

In Abbildung 46 sind die Lufttemperaturen über dem Referenz-Gründach im Vergleich zu den Lufttemperaturen der beiden Sensoren, die auf dem Dach mit der PV-Anlage stehen und nach Osten und Westen den größten Abstand zur PV-Anlage haben. Es ist erkennbar, dass die Lufttemperaturen über dem Referenz-Gründach untertags am niedrigsten sind. Am 19.07.2022 sind die Lufttemperaturen westlich der PV-Anlage um bis zu 0,6 K höher als östlich der PV-Anlage und über dem Referenz-Gründach. Im Gegensatz dazu sind die Lufttemperaturen am 20.07.2022 östlich der PV-Anlage um bis zu 1 K höher als westlich der PV-Anlage und über dem Referenz-Gründach. Im Dadurch wird sichtbar, wie wesentlich für die weitere Analyse der Messdaten das Miteinbeziehen der Winddaten ist. Die vorläufige Analyse deutet darauf hin, dass die wärmere Luft über der PV-Anlage über den Wind abtransportiert wird und noch 4 m neben der PV-Anlage einen Einfluss auf die Lufttemperatur hat.

Abbildung 47 zeigt einen Vergleich der Lufttemperaturen zwischen dem Referenz-Gründach und dem Sensor mittig über der PV-Anlage. Dadurch, dass der Lufttemperatursensor über der PV-Anlage zwar wie beim Referenz-Gründach 2 m über der Oberkante des Substrats montiert ist, durch die PV-Anlage aber eine zusätzliche Ebene dazukommt, die wesentlich näher am Lufttemperatursensor ist, muss dies bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden. Es ist zu erkennen, dass die Lufttemperatur über der PV-Anlage um bis zu 1,5 K wärmer ist. Dabei sind in der Lufttemperaturdifferenz je nach Tag große Schwankungen zu verzeichnen. Ein Grund dafür könnte ein Unterschied in der Windgeschwindigkeit sein, sodass an windstillen Tagen die Lufttemperatur stärker ansteigt als im Vergleich zu windigen Tagen, bei denen die Wärme sofort abtransportiert wird.



Abbildung 47 –Lufttemperaturvergleich 2 m über Oberkante Substrat an drei heißen Tagen (eigene Darstellung mit dem Programm View Pro 4.3)

4.2.3. Bodenmessungen

In Abbildung 48 ist der Verlauf der Bodentemperaturen zu sehen. Die Bodentemperaturen im Referenz-Gründach sind untertags um bis zu 17 K wärmer als im Boden unter der PV-Anlage. Das lässt sich damit erklären, dass der Boden des PV-Dach aufgrund der Verschattung durch die PV-Anlage wesentlich weniger solarer Einstrahlung ausgesetzt ist als das Referenz-Gründach. In der Nacht sind die Bodentemperaturen des Referenz-Gründachs um bis zu 2,5 K niedriger. Das ist darauf zurückzuführen, dass der Boden des PV-Dachs aufgrund der Verschattung durch die PV-Anlage keinen direkten Sichtkontakt mit dem kalten Nachthimmel hat und deshalb in der Nacht nicht so schnell abkühlen kann.



Abbildung 48 - Vergleich der Bodentemperaturen über 5 Tage (eigene Darstellung mit dem Programm View Pro 4.3)

Der Vergleich des volumetrischen Wassergehaltes der beiden Böden in Abbildung 49 zeigt, dass in dem Boden des Referenz-Gründachs bei Niederschlag mehr Wasser ankommt. Der Boden des Referenz-Gründachs trocknet im Vergleich zu dem Boden unter PV-Anlage schneller aus. Durch die Überdachung des Bodens durch die PV-Anlage bekommt dieser nicht so viel Niederschlag und solare Einstrahlung ab. Die Reduktion der solaren Einstrahlung führt zu einem langsameren Austrocknen des Bo-dens. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass der Boden unter PV-Anlage eine mehr als doppelt so hohe Substratdicke aufweist.



Abbildung 49 –Vergleich des volumetrischen Wassergehalts der beiden Böden (eigene Darstellung mit dem Programm View Pro 4.3)

5. Diskussion

Der Messaufbau selbst führt zu Störfaktoren, die in dem Kapitel 5.1 kritisch reflektiert werden. Daneben gibt es andere Störfaktoren, die in dem Aufbau des Daches und der generellen schwierigen Ermittlung der latenten Wärme begründet sind, die in dem Kapitel 5.2 genauer erläutert werden.

5.1. Einfluss des Messaufbaus auf die Messergebnisse

In Abbildung 50 sind die PV-Modulleistungen während der Mittagszeit zu sehen. Da jeweils zwei PV-Module an einem Power Optimizer zusammengeschlossen sind, sind die Werte für jeweils zwei PV-Module gemittelt. An den Stellen, an denen Lufttemperatursensoren angebracht sind, sind klare Leistungseinbußen aufgrund der Verschattung festzustellen. Die üblichen PV-Modulleistungen in der PV-Modulreihe betragen 300 W, die am stärksten betroffen PV-Module produzieren in dem abgebildeten Moment allerdings nur 108 W. Das sind Leistungseinbußen von 64 %. Böer berechnete, dass PV-Module mit einem Wirkungsgrad von 20 % im eingeschalteten Zustand um bis zu 10 K kälter sind als ausgeschaltete Module [51]. Daher ist davon auszugehen, dass die PV-Module in der Umgebung der Lufttemperatursensoren wärmer sind als nicht verschattete PV-Module. Dieser Einfluss wird mit Oberflächentemperatursensoren an einem ein- und einem ausgesteckten PV-Modul nach der Masterarbeit näher untersucht werden.



Abbildung 50 - PV-Modulleistungen während der Mittagszeit [73]

Durch die teilweise Verschattung von einzelnen PV-Zellen, kann es außerdem zu lokalen Hotspots bzw. Coolspots kommen. Auch dieser Einfluss wird im Nachgang der Masterarbeit genauer durch Oberflächentemperatur- und Thermografie-Messungen genauer untersucht. Erste Untersuchungen deuten allerdings darauf hin, dass es sich um lokal begrenzte und kurzzeitige Effekte handelt.

In dem Kapitel 3.3.1 wurde bereits kurz beschrieben, dass durch den Messaufbau unter der PV-Anlage zum Teil die ursprüngliche Vegetation zerstört wurde. Dies ist auch in Abbildung 40 zu erkennen. Die Auswirkungen dieser Tatsache sind schwierig abzuschätzen, es ist jedoch anzunehmen, dass dadurch weniger Verdunstungskühlung über Transpiration der Pflanzen stattfindet.

5.2. Andere Einflüsse auf die Messergebnisse

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) gibt an, dass es schwierig ist, die Verdunstung zu messen. Wie in dem Kapitel 3.2.2 beschrieben, wird die Verdunstung über eine empirische Formel berechnet. Das bedeutet, dass die Berechnung aufgrund der Annahmen, die sie trifft, bezüglich der Genauigkeit nicht an Messungen herankommt. Eine weitere Methode, um die Verdunstung genauer bestimmen zu können, ist die Eddykovarianz-Energiebilanz-Methode. Über einen 3D-Ultraschallanemometer wird der fühlbare Wärmestrom gemessen. Mit zusätzlichen Messdaten zu der Strahlungsbilanz und dem Bodenwärmestrom, kann der latente Wärmestrom mittels Ausschlussverfahrens aus der Energiebilanz bestimmt werden [45]. Diese Methode wurde auch von Broadbent et al. und Li et. al bei ihren Mikroklima-Messungen an PV-Anlagen verwendet [40, 41]. Ein 3D-Ultraschallanemometer war für dieses Messkonzept aufgrund von Budgetgrenzen nicht finanzierbar, könnte jedoch für zukünftige Betrachtungen im urbanen Kontext interessante, zusätzliche Erkenntnisse bringen.

In Kapitel 3.1.2.1.1 wurden bereits die Durchbrüche auf dem Dach genauer beschrieben. Es wurde vor allem identifiziert, dass das Abluftrohr aus dem Bad die Messergebnisse beeinflussen kann. Da die Abluftrohre auf beiden Dächern vorhanden sind, sollten auf beiden Dächern ähnliche Beeinflussungen auftreten.

Abschließend wurde in Kapitel 3.3.2 bereits darauf hingewiesen, dass die Substratdicke auf dem Referenz-Gründach nur halb so hoch ist wie auf dem Dach mit der PV-Anlage. Das führt zu einer reduzierten Wasserspeicherkapazität und dadurch vor allem im Sommer zu einem schnelleren Austrocknen des Substrats und einer damit einhergehenden Reduzierung der Verdunstungskühlungsleistung.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Im Zuge der Masterarbeit wurde ein Messkonzept zur Evaluierung der Auswirkungen einer PV-Anlage auf das urbane Mikroklima entwickelt. Dabei wurden zwei extensive Gründächer ausgewählt, die in unmittelbarer Nähe zueinanderstehen und das gleiche Substrat verwenden. Auf einem der beiden Dächer ist zusätzlich eine PV-Anlage montiert. Das Messkonzept umfasst eine Messung des Temperaturprofils auf dem PV-Dach und die Messung von bestimmten weiteren Messgrößen, um eine Energiebilanz beider Dächer erstellen zu können. Für die Messung des Temperaturprofils wurden 11 Temperatursensoren auf 2 m Höhe auf dem PV-Dach aufgestellt, wobei drei Temperatursensoren direkt über der PV-Anlage messen. Die anderen acht Temperatursensoren sind zu jeweils vier Stück auf beiden Seiten der PV-Anlage positioniert. Durch deren Aufstellung mit jeweils einem Meter Abstand zueinander, kann abgeschätzt werden, wie weit der Einfluss der PV-Anlage auf das lokale Mikroklima reicht. Die Temperaturmessung wird mit einem Windsensor kombiniert, anhand dessen Daten evaluiert werden kann, wie sich unterschiedliche Windrichtungen und -geschwindigkeiten auf das Temperaturprofil auswirken. Für die Energiebilanz wird eine Strahlungsbilanz mittels drei Netto-Radiometern erstellt. Zusätzlich dazu wird der Bodenwärmestrom, die relative Luftfeuchtigkeit, die Lufttemperaturen auf 0,5 m und 2 m, die Oberflächentemperaturen der PV-Module und der Wind gemessen.

Die Überprüfung der ersten Messergebnisse führte zu der Erkenntnis, dass die Lufttemperaturen auf 0,5 m Höhe unter der PV-Anlage um bis zu 3,7 K höher sind als über dem Referenz-Gründach und über der PV-Anlage. Auf dem PV-Dach sind auf 2 m Messhöhe bei den Lufttemperatursensoren neben der PV-Anlage höhere Lufttemperaturen im Vergleich zum Referenz-Gründach von bis zu 1 K festzustellen. Dabei gilt es, die Rolle des Windes noch näher zu untersuchen. Außerdem sind die Bodentemperaturen des Referenz-Gründachs untertags um bis zu 17 K höher, über die Nacht kühlt die Bodentemperatur des Referenz-Gründachs schneller ab, was zu kurzfristig niedrigeren Bodentemperaturen von bis zu 2,5 K führt. Bei Niederschlag bekommt das Gründach mehr Wasser ab, der volumetrische Wassergehalt reduziert sich schneller als in dem Boden unter der PV-Anlage.

Nach Beendigung der Masterarbeit, werden die beiden HygroVUE5-Sensoren ausgetauscht und die verspäteten Netto-Radiometer werden in das Messkonzept integriert. Nachdem die Messungen über den Juli und August erfolgen, wird Anfang September begonnen werden, die Messergebnisse auszuwerten, während die Messungen weiterlaufen. Zwei größere Aufgabenbereiche werden die Zuordnung der Lufttemperaturdaten mit den entsprechenden Windrichtungen und die Erstellung einer Energiebilanz sein. Bei der Erstellung des Lufttemperaturprofils mit den Winddaten könnten auch die aufgezeichneten Windvektoren benutzt werden, die die Windrichtung und -geschwindigkeit in einem Vektor ausdrücken. Zusätzlich dazu werden genauere Messungen bezüglich der Oberflächentemperatur der PV-Module durchgeführt. Dabei wird der Einfluss der Verschattung durch den Messaufbau auf Hotspots und Coolspots genauer untersucht und die Oberflächentemperaturdifferenz zwischen einem ein- und einem ausgesteckten Modul über längere Zeit evaluiert werden. Für zukünftige Arbeiten wäre eine noch genauere Aufstellung der Energiebilanz mithilfe eines 3D-Ultraschallanemometers eine weitere Möglichkeit, um die Ergebnisqualität eventuell zu verbessern. Mit den vollständig analysierten Messergebnissen kann der Einfluss von Dach-PV-Anlagen auf das urbane Mikroklima besser abgeschätzt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, und Population Division, *World urbanization prospects: the 2018 revision*. 2019.
- [2] IRENA, "Renewable Energy in Cities". International Renewable Energy Agency (IRENA), 2016.
- [3] J. Bergner, B. Siegel, und V. Quaschning, *PV in Städten Erkenntnisse über Potenziale und Hürden in Berlin.* 2017.
- [4] M. Revesz, S. M. Oswald, H. Trimmel, P. Weihs, und S. Zamini, "Potential increase of solar irradiation and its influence on PV facades inside an urban canyon by increasing the ground-albedo", *Solar Energy*, Bd. 174, S. 7–15, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.08.037.
- [5] H. Fechner, C. Mayr, A. Schneider, M. Rennhofer, und G. Peharz, "Technologie-Roadmap für Photovoltaik in Österreich". Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2016.
- [6] IPCC, "Zusammenfas-

sung für politische Entscheidungsträger. In: 1,5 °C globale Erwärmung. Ein IPCC-Sonderbe-

richt über die Folgen einer globalen Erwärmung um 1,5 °C gegenüber vorindustrie llem Niveau und die damit verbundenen globalen Treibhausgasemissionspfade im Zusammen-

hang mit einer Stärkung der weltweiten Reaktion auf die Bedrohung durch den Kli mawan-

del, nachhaltiger Entwicklung und Anstrengungen zur Beseitigung von Armut. Deu tsche Übersetzung auf Basis der Version vom 8.10.2018 und unter Berücksichtigu ng von Korrekturmeldungen des IPCC bis zum 14.11.2018. Deutsche IPCC-Koord inierungsstelle, ProClim, Österreichisches Umweltbundesamt, Bonn/Bern/Wien". November 2018.

- [7] C. Aniello, K. Morgan, A. Busbey, und L. Newland, "Mapping micro-urban heat islands using LANDSAT TM and a GIS". Pergamon, 1994.
- [8] T. R. Oke, "The energetic basis of the urban heat island". Royal Meteorological Society, 1982.
- [9] H. Frumkin, "Urban Sprawl and Public Health". Association of Schools of Public Health, 2002.
- [10] J. A. Patz, D. Campbell-Lendrum, T. Holloway, und J. A. Foley, "Impact of regional climate change on human health", *Nature*, Bd. 438, Nr. 7066, S. 310–317, Nov. 2005, doi: 10.1038/nature04188.
- [11] H. Tran, D. Uchihama, S. Ochi, und Y. Yasuoka, "Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Bd. 8, Nr. 1, S. 34–48, Jan. 2006, doi: 10.1016/j.jag.2005.05.003.
- [12] M. A. Rahman *u. a.*, "Tree cooling effects and human thermal comfort under contrasting species and sites", *Agricultural and Forest Meteorology*, Bd. 287, S. 107947, Juni 2020, doi: 10.1016/j.agrformet.2020.107947.
- [13] F. C. Curriero, K. S. Heiner, M. S. Jonathan, S. L. Zeger, L. Strug, und J. A. Patz, "Temperature and Mortality in 11 Cities of the Eastern United States". American Journal of Epidemiology, 2002.
- [14] J.-M. Robine *u. a.*, "Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003", *Comptes Rendus Biologies*, Bd. 331, Nr. 2, S. 171–178, Feb. 2008, doi: 10.1016/j.crvi.2007.12.001.
- [15] A. Fouillet *u. a.*, "Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France", *Int Arch Occup Environ Health*, Bd. 80, Nr. 1, S. 16–24, Sep. 2006, doi: 10.1007/s00420-006-0089-4.

- [16] B. Porfiriev, "Evaluation of human losses from disasters: The case of the 2010 heat waves and forest fires in Russia", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Bd. 7, S. 91–99, März 2014, doi: 10.1016/j.ijdrr.2013.12.007.
- [17] D. Oudin Åström *u. a.*, "The effect of heat waves on mortality in susceptible groups: a cohort study of a mediterranean and a northern European City", *Environ Health*, Bd. 14, Nr. 1, S. 30, Dez. 2015, doi: 10.1186/s12940-015-0012-0.
- [18] A. Liss und E. N. Naumova, "Heatwaves and hospitalizations due to hyperthermia in defined climate regions in the conterminous USA", *Environ Monit Assess*, Bd. 191, Nr. S2, S. 394, Juni 2019, doi: 10.1007/s10661-019-7412-5.
- [19] R. Thompson, R. Hornigold, L. Page, und T. Waite, "Associations between high ambient temperatures and heat waves with mental health outcomes: a systematic review", *Public Health*, Bd. 161, S. 171–191, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.puhe.2018.06.008.
- [20] Y. Zhang, C. Yu, und L. Wang, "Temperature exposure during pregnancy and birth outcomes: An updated systematic review of epidemiological evidence", *Environmental Pollution*, Bd. 225, S. 700–712, Juni 2017, doi: 10.1016/j.envpol.2017.02.066.
- [21] L. G. Ioannou *u. a.*, "Time-motion analysis as a novel approach for evaluating the impact of environmental heat exposure on labor loss in agriculture workers", *Temperature*, Bd. 4, Nr. 3, S. 330–340, Juli 2017, doi: 10.1080/23328940.2017.1338210.
- [22] U. Berardi und J. Graham, "Investigation of the impacts of microclimate on PV energy efficiency and outdoor thermal comfort", *Sustainable Cities and Society*, Bd. 62, S. 102402, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.scs.2020.102402.
- [23] J. Brasche, G. Hausladen, J. Maderspacher, R. Schelle, und T. Zölch, "Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung: Teilprojekt 1: Klimaschutz und grüne Infrastruktur in der Stadt", Nr. Abschlussbericht, S. 227, 2017.
- [24] J. Zahra und B. Umberto, "Effects of increasing urban albedo in the Greater Toronto Area", *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, Bd. 609, Nr. 7, S. 072002, Sep. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/609/7/072002.
- [25] J. Hill, J. Drake, B. Sleep, und L. Margolis, "Influences of Four Extensive Green Roof Design Variables on Stormwater Hydrology", *J. Hydrol. Eng.*, Bd. 22, Nr. 8, S. 04017019, Aug. 2017, doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001534.
- [26] M. Köhler, M. Schmidt, M. Laar, U. Wachsmann, und S. Krauter, "Photovoltaic panels on greened roofs: Positive interaction between two architectures", S. 151– 158, Jan. 2002.
- [27] V. Masson, M. Bonhomme, J.-L. Salagnac, X. Briottet, und A. Lemonsu, "Solar panels reduce both global warming and urban heat island", *Front. Environ. Sci.*, Bd. 2, Juni 2014, doi: 10.3389/fenvs.2014.00014.
- [28] A. Cortes, Y. Murashita, T. Matsuo, A. Kondo, H. Shimadera, und Y. Inoue, "Numerical evaluation of the effect of photovoltaic cell installation on urban thermal environment", *Sustainable Cities and Society*, Bd. 19, S. 250–258, Dez. 2015, doi: 10.1016/j.scs.2015.07.012.
- [29] F. Salamanca, M. Georgescu, A. Mahalov, M. Moustaoui, und A. Martilli, "Citywide Impacts of Cool Roof and Rooftop Solar Photovoltaic Deployment on Near-Surface Air Temperature and Cooling Energy Demand", *Boundary-Layer Meteorol*, Bd. 161, Nr. 1, S. 203–221, Okt. 2016, doi: 10.1007/s10546-016-0160y.
- [30] P. Weihs *u. a.*, "Optimierung reflektierender Materialien und Photovoltaik im Stadtraum bezüglich Strahlungsbilanz und Bioklimatik". Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2018.
- [31] H. Taha, "The potential for air-temperature impact from large-scale deployment of solar photovoltaic arrays in urban areas", *Solar Energy*, Bd. 91, S. 358–367, Mai 2013, doi: 10.1016/j.solener.2012.09.014.
- [32] L. Yang *u. a.*, "Study on the impact of large solar farm on radiation field in desert areas of golmud", Bd. 36, S. 2160–2166, Sep. 2015.

- [33] X. Gao u. a., "Observational study on the impact of the large solar farm on air temperature and humidity in desert areas of golmud", Bd. 37, S. 2909–2914, Nov. 2016.
- [34] G. A. Barron-Gafford, R. L. Minor, N. A. Allen, A. D. Cronin, A. E. Brooks, und M. A. Pavao-Zuckerman, "The Photovoltaic Heat Island Effect: Larger solar power plants increase local temperatures", *Sci Rep*, Bd. 6, Nr. 1, S. 35070, Dez. 2016, doi: 10.1038/srep35070.
- [35] J. V. Pham, A. Baniassadi, K. E. Brown, J. Heusinger, und D. J. Sailor, "Comparing photovoltaic and reflective shade surfaces in the urban environment: Effects on surface sensible heat flux and pedestrian thermal comfort", *Urban Climate*, Bd. 29, S. 100500, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.uclim.2019.100500.
- [36] M. C. Brito, "Assessing the Impact of Photovoltaics on Rooftops and Facades in the Urban Micro-Climate", *Energies*, Bd. 13, Nr. 11, S. 2717, Mai 2020, doi: 10.3390/en13112717.
- [37] D. Millstein und S. Menon, "Regional climate consequences of large-scale cool roof and photovoltaic array deployment", *Environ. Res. Lett.*, Bd. 6, Nr. 3, S. 034001, Juli 2011, doi: 10.1088/1748-9326/6/3/034001.
- [38] Y. Li *u. a.*, "Climate model shows large-scale wind and solar farms in the Sahara increase rain and vegetation", *Science*, Bd. 361, Nr. 6406, S. 1019–1022, Sep. 2018, doi: 10.1126/science.aar5629.
- [39] L. Yang, X. Gao, F. Lv, X. Hui, L. Ma, und X. Hou, "Study on the local climatic effects of large photovoltaic solar farms in desert areas", *Solar Energy*, Bd. 144, S. 244–253, März 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.01.015.
- [40] A. M. Broadbent, E. S. Krayenhoff, M. Georgescu, und D. J. Sailor, "The Observed Effects of Utility-Scale Photovoltaics on Near-Surface Air Temperature and Energy Balance", *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Bd. 58, Nr. 5, S. 989–1006, Mai 2019, doi: 10.1175/JAMC-D-18-0271.1.
- [41] P. Li, X. Gao, Z. Li, T. Ye, und X. Zhou, "Effects of fishery complementary photovoltaic power plant on near-surface meteorology and energy balance", *Renewable Energy*, Bd. 187, S. 698–709, März 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.01.118.
- [42] H. Häckel, *Meteorologie*, 8., Vollständig überarbeitete und Erweiterte Auflage. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer, 2016.
- [43] K. Hagen, R. Stiles, und H. Trimmel, "Wirkungszusammenhänge Freiraum und Mikroklima", Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Nov. 2010. Zugegriffen: 8. Dezember 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/hdz_pdf/aspernplus_freiraummikroklima.pdf?m=1469659857&
- [44] Deutscher Wetterdienst, "Wetter- und Klimalexikon". https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=102936&lv3=1 03040 (zugegriffen 27. Juli 2022).
- [45] H. Löffler, *Meteorologische Bodenmesstechnik*, 3., Vollst. neu bearb. Aufl. Offenbach am Main: Dt. Wetterdienst, 2012.
- [46] J. Busch, "Designing Urban Microclimates: Passive Low-Tech-Kühlung im Entwurf städtischer Außenräume", Universitätsbibliothek Braunschweig, 2019. doi: 10.24355/DBBS.084-201903261500-0.
- [47] Deutscher Wetterdienst, "Stadtklima die städtische Wärmeinsel". https://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimawirk/stadtpl/projekt_warmei nseln/projekt_waermeinseln_node.html (zugegriffen 27. Juli 2022).
- [48] Campbell Scientific Ltd., "Product Manual HFP01 Soil Heat Flux Plate", Campbell Scientific Ltd., 2020. Zugegriffen: 19. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://s.campbellsci.com/documents/eu/manuals/hfp01%20-%20384.pdf
- [49] J. Kurnik, M. Jankovec, K. Brecl, und M. Topic, "Outdoor testing of PV module temperature and performance under different mounting and operational conditions", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Bd. 95, Nr. 1, S. 373–376, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.solmat.2010.04.022.

- [50] Y. Genchi, M. Ishisaki, Y. Ohashi, Y. Kikegawa, H. Takahashi, und A. Inaba, "IM-PACTS OF LARGE-SCALE PHOTOVOLTAIC PANEL INSTALLATION ON THE HEAT ISLAND EFFECT IN TOKYO", 2003.
- [51] K. W. Böer, "Self-Cooling of Photovoltaic Cells when Power is Drawn", phys. stat. sol. (a), Bd. 184, Nr. 1, S. 201–209, März 2001, doi: 10.1002/1521-396X(200103)184:1<201::AID-PSSA201>3.0.CO;2-P.
- [52] C.-A. Roulet, "Solar energy and global heat balance of a city", *Solar Energy*, Bd. 70, Nr. 3, S. 255–261, 2001, doi: 10.1016/S0038-092X(00)00098-0.
- [53] H. Marrou, L. Guilioni, L. Dufour, C. Dupraz, und J. Wery, "Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels?", *Agricultural and Forest Meteorology*, Bd. 177, S. 117–132, Aug. 2013, doi: 10.1016/j.agrformet.2013.04.012.
- [54] W. Tian, Y. Wang, Y. Xie, D. Wu, L. Zhu, und J. Ren, "Effect of building integrated photovoltaics on microclimate of urban canopy layer", *Building and Environment*, Bd. 42, Nr. 5, S. 1891–1901, Mai 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2006.02.022.
- [55] A. Scherba, "Modeling the Impact of Roof Reflectivity, Integrated Photovoltaic Panels and Green Roof Systems on the Summertime Heat Island", Jan. 2011. doi: 10.15760/etd.246.
- [56] A. Armstrong, N. J. Ostle, und J. Whitaker, "Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling", *Environ. Res. Lett.*, Bd. 11, Nr. 7, S. 074016, Juli 2016, doi: 10.1088/1748-9326/11/7/074016.
- [57] C. Efthymiou, M. Santamouris, D. Kolokotsa, und A. Koras, "Development and testing of photovoltaic pavement for heat island mitigation", *Solar Energy*, Bd. 130, S. 148–160, Juni 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.01.054.
- [58] H. Ogaili und D. J. Sailor, "Measuring the Effect of Vegetated Roofs on the Performance of Photovoltaic Panels in a Combined System", *Journal of Solar Energy Engineering*, Bd. 138, Nr. 6, S. 061009, Dez. 2016, doi: 10.1115/1.4034743.
- [59] R. Chang, Y. Shen, Y. Luo, B. Wang, Z. Yang, und P. Guo, "Observed surface radiation and temperature impacts from the large-scale deployment of photovoltaics in the barren area of Gonghe, China", *Renewable Energy*, Bd. 118, S. 131– 137, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.11.007.
- [60] P. Li, X. Gao, Z. Li, und X. Zhou, "Physical analysis of the environmental impacts of fishery complementary photovoltaic power plant", *Environ Sci Pollut Res*, Feb. 2022, doi: 10.1007/s11356-022-18930-8.
- [61] J. S. Golden, J. Carlson, K. E. Kaloush, und P. Phelan, "A comparative study of the thermal and radiative impacts of photovoltaic canopies on pavement surface temperatures", *Solar Energy*, Bd. 81, Nr. 7, S. 872–883, Juli 2007, doi: 10.1016/j.solener.2006.11.007.
- [62] A. Hu *u. a.*, "Impact of solar panels on global climate", *Nature Clim Change*, Bd. 6, Nr. 3, S. 290–294, März 2016, doi: 10.1038/nclimate2843.
- [63] ASHRAE Inc., "MUNICH :: 108660 :: IWEC Klimadatensatz". ASHRAE Inc., 1990. Zugegriffen: 20. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ladybug.tools/epwmap/
- [64] S. Davidson, "Grasshopper Algorithmic Modeling for Rhino". https://www.grasshopper3d.com/ (zugegriffen 27. Juli 2022).
- [65] Arbeitsgruppe Redaktion des Konsortiums Prinz Eugen Park, "Prinz Eugen Park -Leben im Quartier", Prinz Eugen Park - Leben im Quartier. https://www.prinzeugenpark.de/home.html (zugegriffen 24. Juni 2022).
- [66] Stadtverwaltung Landeshauptstadt München, "Prinz-Eugen-Park", *muenchen.de*. https://stadt.muenchen.de/infos/prinz-eugen-park.html (zugegriffen 24. Juni 2022).
- [67] A. Garkisch, K. Schmid, und M. Wimmer, "Hochhausstudie München Fachgutachten". 03 Arch., 21. Januar 2020. Zugegriffen: 19. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.muenchen.de/rathaus/dam/jcr:32f57b93-30ca-4de9-a075-1b5348cbe198/Hochhausstudie_Langfassung.pdf
- [68] "Google Maps", Google Maps. https://www.google.com/maps/@48.1618354,11.6364732,87m/data=!3m1!1e3?hl =de (zugegriffen 24. Juni 2022).

- [69] Progeno Wohnungsgenossenschaft eG, "Regeldetail Extensivbegrünung". 20. Oktober 2017.
- [70] "Topografische Karte München, Höhe, Relief", *topographic-map.com*. https://dede.topographic-map.com/maps/64z0/M%C3%BCnchen/ (zugegriffen 19. Juli 2022).
- [71] CS Wismar GmbH und Sonnenstromfabrik, "EXCELLENT GLASS/GLASS XL -Sonnenstromfabrik", 27. Juni 2022. https://www.sonnenstromfabrik.com/files/content/pdf/de/product-datasheets/excellent-glassglass-xl/EXCELLENT_GLASSGLASS_385-390-395_M72_balance-black_DE_2021.pdf (zugegriffen 27. Juni 2022).
- [72] CS Wismar GmbH und Sonnenstromfabrik, "EXCELLENT GLASS/GLASS Sonnenstromfabrik", 27. Juni 2022. https://www.sonnenstromfabrik.com/files/content/pdf/de/product-datasheets/excellent-glassglass/EXCELLENT_GLASSGLASS_320-325-330_M60_balance-smart-black-fullblack_DE_2020.pdf (zugegriffen 27. Juni 2022).
- [73] "SolarEdge Monitoring". https://monitoring.solaredge.com/solaredgeweb/p/home#/sites (zugegriffen 22. Juli 2022).
- [74] U. Hoyer, S. Diatschuk, R. Auer, und C. Brabec, "Hinterlüftung von Solargeneratoren". Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V., 2010.
- [75] I. A. Walter u. a., "ASCE's Standardized Reference Evapotranspiration Equation", in Watershed Management and Operations Management 2000, Fort Collins, Colorado, United States, Mai 2001, S. 1–11. doi: 10.1061/40499(2000)126.
- [76] D. V. Baker, "From Sensor to Decision: Evapotranspiration", Campbell Scientific.
- [77] Campbell Scientific Ltd., "Product Manual TCAV Averaging Soil Thermocouple Probe", Campbell Scientific Ltd., 2020. Zugegriffen: 19. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/tcav.pdf
- [78] C. L. Tan, N. H. Wong, und S. K. Jusuf, "Effects of vertical greenery on mean radiant temperature in the tropical urban environment", *Landscape and Urban Planning*, Bd. 127, S. 52–64, Juli 2014, doi: 10.1016/j.landurbplan.2014.04.005.
- [79] Campbell Scientific Ltd., "Product Manual CR1000X Measurement and Control Datalogger", Campbell Scientific Ltd., 2020. Zugegriffen: 24. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://s.campbellsci.com/documents/eu/manuals/cr1000xproduct-manual%20-%201217.pdf
- [80] Campbell Scientific Ltd., "Product Manual AM16/32B Relay Multiplexer", Campbell Scientific Ltd., 2020. Zugegriffen: 24. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://s.campbellsci.com/documents/eu/manuals/am16-32b%20-%20760.pdf
- [81] Hukseflux Thermal Sensors B. V., "User Manual NR01/RA01- NR01 4component net radiometer - RA01 2-component radiometer", Hukseflux Thermal Sensors B. V., 2022. Zugegriffen: 24. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.hukseflux.com/uploads/productdocuments/NR01 RA01 manual v2213 3.pdf
- [82] National Centers for Environmental Information, "Magnetic Field Calculators". https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#igrfgrid (zugegriffen 25. Juli 2022).
- [83] Paul Bauder GmbH & Co. KG, "Bauder Pflanzsubstrat BL Produktdatenblatt". 2018.

Anhang

Anhang A: Substrat für Gründächer

Anhang B: Saatgutmischung für Gründächer

Anhang A: Substrat für Gründächer

BAUDER

Bauder Pflanzsubstrat BL Produktdatenblatt

Produktbeschreibung

Mineralisches Schüttstoffgemisch, Hauptbestandteile Blähschiefer und Lava, mit geringen Anteilen organischer Substanz

Einsatzbereich

und Lava, mit geringen Anteilen organischer Substanz Vegetationssubstrat für einschichtige Extensivbegrünungen

Eigenschaft nach FLL	Anforderung	BL*	Einheit
maximale Wasserkapazität (WK)	≥ 20 - ≤ 65	30	Vol%
Luftgehalt bei max. WK	≥ 10	25	Vol%
Gesamtporenvolumen		55	Vol%
Wasserdurchlässigkeit mod. Kf	60 - 400	61,3	mm/min
pH-Wert	6,0 - 8,5	7,15	
Salzgehalt	≤ 3,5	0,9	g/l
Gehalt an organischer Substanz	≤ 40,0	20	g/l

* FLL-Prüfzeugnis vom 29.08.2011

Verlegehinweise Substrat aufbringen und plan abziehen; Einbaugenauigkeit +/- 1,5 cm. Verdichtungsfaktor für Transport und Einbau 15 %

Volumengewichte	trocken: wassergesättigt:	ca. 880 - 930 kg/m³ ca. 1180 – 1230 kg/m³

Lieferform Silo, Kipper

Paul Bauder GmbH & Co. KG - Korntaler Landstrasse 63 - D 70499 Stuttgant Telefon 0711/88 07-0 - Telefax 0711/88 07-300 - www.bauder.de Anderungen behalten wir uns zwi. Informieren Sie sich gdf. Über em genacheinen Lerbeischen Kantolssand Stont (001



Abbildung 51 - Produktdatenblatt Bauder Pflanzsubstrat BL [83]



Abbildung 52 - Regeldetail Extensivbegrünung inklusive Substrathöhe und -zusammensetzung [69]

Anhang B: Saatgutmischung für Gründächer

Saatgutmischung Blumen gem. beiliegender Artenliste Ansaatstärke 2 g/m² Füllstoff zum Hochmischen auf 10 g/m², 100 kg/ha

_

zusätzlich 25 g/m² Sedumsprossen gem. beiliegender Artenliste

Abbildung 53 – Mengenangaben Saatgutmischung [69]

Ansaat Blumenmischung mit zusät	zlicher Anssaat Sedumsprossen		
Sondermischung Dachbegrünun	g/Saatgut		
Ansaatstärke: 2 g/m² (20 kg/ha)			
Blumen 100%		Blütenfarbe	%
Allium lusitanicum	Berglauch	rosa	4,00
Arenaria serphyllifolia	Quendelblättriges Sandkraut	weiss	0,70
Armeria maritima ssp. elongata	Gemeine Grasnelke	rosa	5,00
Campanula rotundifolia	Rundblättrige Glockenblume	dunkelblau	1,00
Clinopodium vulgare	Gewöhnlicher Wirbeldost	purpurrot	2,00
Dianthus armeria	Raue Nelke	purpurrot	3,00
Dianthus carthusianorum	Kartäusernelke	purpurrot	10,00
Dianthus deltoides	Heidenelke	purpurrot	7,00
Dianthus superbus ssp. sylvestris	Prachtnelke	purpurrot	3,00
Erodium cicutarium	Gewöhnlicher Reiherschnabel	hellrot	0,90
Erophila verna	Frühlings-Hungerblümchen	weiss	0,20
Filipendula vulgaris	Kleines Mädesüß	weiss	5,80
Fragaria vesca	Wald-Erdbeere	weiss	0,40
Gentiana cruciata	Kreuz-Enzian	violettblau	0,20
Geranium robertianum	Stinkender Storchschnabel	rosa	0,60
Globularia punctata	Gewöhnliche Kugelblume	violettblau	0,40
Legousia speculum-veneris	Echter Frauenspiegel	violett	2,80
Linum austriacum	Österreichischer Lein	azurblau	12,00
Papaver argemone	Sandmohn	dunkelrot	3,00
Petrorhagia prolifera	Sprossende Felsennelke	rötlich-lila	3,00
Petrorhagia saxifraga	Steinbrech-Felsennelke	rosa / weiss	4,00
Prunella grandiflora	Großblütige Braunelle	purpurviolett	8.00
Saxifraga granulata	Knöllchen-Steinbrech	weiss	0,20
Sedum album	Weißer Mauerpfeffer	weiss	2.00
Silene nutans	Nickendes Leimkraut	weiss	6.00
Silene vulgaris	Gewöhnliches Leimkraut	weiss	4.00
Teucrium chamaedrys	Edel-Gamander	rosapurpur	4.00
Thymus praecox	Frühblühender Thymian	rosarot	0.60
Thymus pulegioides	Gewöhnlicher Thymian	purpurviolett	5 20
Veronica teucrium	Großer Ehrenpreis	azurblau	1.00

Abbildung 54 – Saatgutmischung Blumen [69]

Ansaat Sedumsprossen			
Ansaatstärke: 25 g/m² (250 kg/ha)			
Sedum album	Weißer Mauerpfeffer	weiss	40,00
Sedum spurium	Teppich-Fettblatt,		
'Album Superbum'	weissblühende Sorte	weiss	40,00
Sedum spurium	Teppich-Fettblatt,		
'Erdblut'	Rosablühend Sorte	rosa	20,00
Gesamt Sedumsprossen			100,00

Abbildung 55 – Saatgutmischung Sedumsprossen [69]