

Mikroklimamessungen mit LoRaWAN und Vergleich mit Simulationen

Bericht zur Dokumentation der Messmethodik



Dr. Felder, Martin

Büttner, Isabelle Christine, M.A.

Dr. Mahler, Boris

Nusser, Tobias, M.Sc.

15.10.2025

Projektlaufzeit

01.07.2024 bis 31.08.2025

Förderkennzeichen

SDB 0212

Steinbeis-Innovationszentrum energieplus

Büro Stuttgart – Projektdurchführung

Gropiusplatz 10
70563 Stuttgart
Telefon: +49 711 99007-841
Telefax: +49 711 99007-99
E-Mail: info@siz-energieplus.de

Hauptsitz Braunschweig

OFFICE am RINGGLEIS
Hamburger Straße 277
38114 Braunschweig
Telefon: + 49 531 793893-80
Telefax: + 49 531 793893-98
E-Mail: info@siz-energieplus.de

*Finanziert aus Landesmitteln, die der Landtag Baden-Württemberg beschlossen hat.
Gefördert im Rahmen der Strategiedialogs „Bezahlbares Wohnen und Innovatives Bauen“.*

INHALTSVERZEICHNIS

Zusammenfassung	3
Messaufbau	4
Untersuchungsquartiere	4
Sensorik und Datenübertragung	5
Qualitätskontrolle	6
Vergleich mit DWD-Daten	6
Vergleich mit Modellierung	7
Auswertung Allgemein	9
Definitionen	9
Tropennächte	10
Maximale Tagestemperaturen	12
PET-Reduktion bei begrünter Fassade	14
Windrichtungsabhängigkeit der Temperatur	17
Quartierspezifische Auswertungen	18
STEP-Areal	18
Fassade Parkhaus	18
Boden-/Dachfeuchte	19
Rosensteinviertel	20
Vergleich verschiedener Arten von Plätzen	20
Vergleich mit/zwischen Dächern	23
Calwer Passage	23
Messung Fassadeneffekt	23
Temperatur hinter der Fassade	24

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Projekts Grün-Blau wurden mikroklimatische Messungen in drei Stuttgarter Quartieren durchgeführt, um Einflüsse von Bebauung, Begrünung und Oberflächenbeschaffenheit auf die Behaglichkeit im Außenbereich zu untersuchen. Zum Einsatz kamen über 60 LoRaWAN-Funksensoren mit geringem Wartungsaufwand, die über ein Jahr hinweg Daten lieferten. Die Messungen wurden hinsichtlich Genauigkeit mit DWD-Daten verglichen und dienten zur Validierung des ergänzend gerechneten Simulationsmodells ASMUS_green. Dabei zeigte sich eine gute Übereinstimmung, wenngleich das Modell Höchsttemperaturen um bis zu 2,5 K überschätzte.

Statistische Auswertungen ergaben unter anderem, dass großflächige Versiegelung Tropen Nächte begünstigt und Verschattung an heißen Sommertagen die Maximaltemperaturen um etwa 5 K senken kann. Extensiv begrünte Dächer mit Photovoltaikmodulen wiesen geringere Boden- und Lufttemperaturen auf als reine (Sedum-)Gründächer, was auf zusätzliche Beschattung und höhere Vegetationsvielfalt zurückzuführen ist. Fassadenbegrünung reduzierte sowohl Luft- als auch Strahlungstemperatur um mehrere Kelvin, wobei der Effekt deutlich vom Wind advektiert wird.

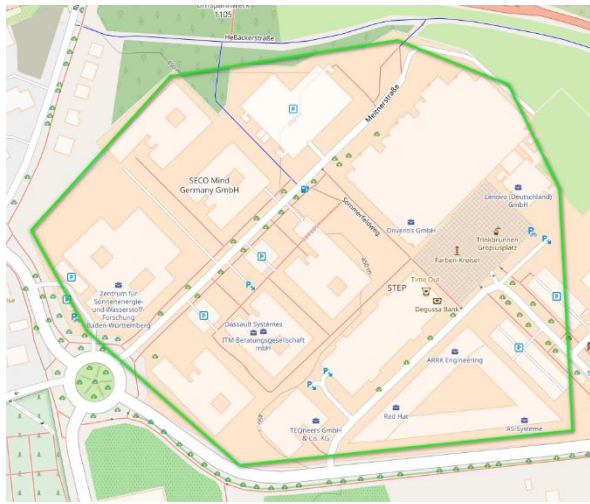
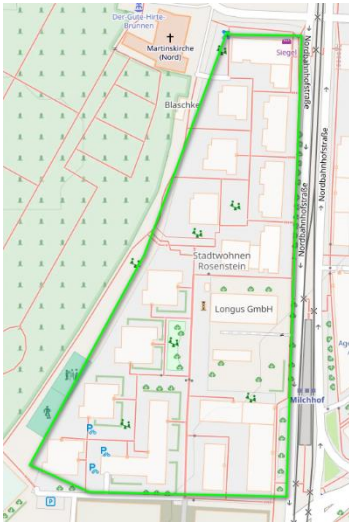
Quartierspezifisch zeigten sich deutliche Temperaturunterschiede zwischen stark versiegelten, unbeschatteten Plätzen (bis +7 K) und begrünten, schattigen Bereichen. Gründächer trockneten in Trockenperioden binnen ein bis zwei Wochen aus, wodurch der Kühlungseffekt durch Verdunstung stark abnimmt. Einzelmessungen im Quartier der Calwer Passage belegten vor einer begrünten Fassade eine mittlere Abkühlung um 2,2 K über den Sommer, vor allem durch Reduktion der Tagesspitzen.

Insgesamt stützen die Ergebnisse den messbaren Nutzen von Begrünung und Verschattung für die lokale thermische Situation auf Fußgängerniveau, insbesondere in stark bebauten und versiegelten Stadtbereichen.

MESSAUFBAU

UNTERSUCHUNGSQUARTIERE

Die Messungen fanden in drei Stadtquartieren statt, die aufgrund unterschiedlicher Lage, Beschaffenheit und logistischen Überlegungen ausgewählt wurden.

	STEP-Areal (Randlage) • Quartier mit durchgehender Gewerbenutzung in der Randlage in Stuttgart-Vaihingen • Mehrgeschossige Bebauung mit Vielfalt an Gebäudehöhen • Vielfalt an Versiegelungsgraden und Solarisierungsvarianten auf den Dächern
	Rosensteinviertel (suburban) • Wohnquartier des Siedlungswerks Stuttgart mit Geschosswohnungsbauten im Stuttgarter Norden • Quartier grenzt sowohl an Grünflächen als auch an urbane, versiegelte Strukturen an
	Calwer Passage (urban) • Neubau eines Bürokomplexes in typischer City-Bebauung in der Stuttgarter Stadtmitte • Pilotprojekt mit hohen Anteilen Fassaden- und Dachbegrünung

Quelle Kartendaten: ©OpenStreetMap

QUALITÄTSKONTROLLE

Die verwendeten LoRaWAN-Sensoren weisen in den Datenblättern Genauigkeiten der Temperaturmessungen von $\pm 0,2$ K aus. Selbst wenn diese in der Praxis doppelt so hoch wären, spielen andere Effekte bei der Auswertung der Messungen eine wesentlich größere Rolle als diese Spanne. Da dem schnellen Aufbau des Messnetzes aufgrund der begrenzten Projektlaufzeit höchste Priorität eingeräumt wurde, entfiel eine detaillierte Kalibrationsmessung. Stattdessen wurden die Messungen durch Quervergleich im Feld plausibilisiert. Ausreißer traten dabei nicht zutage.

VERGLEICH MIT DWD-DATEN

Um die Temperaturmessungen zu plausibilisieren, wurden diese mit nahegelegenen DWD-Wetterstationen verglichen. Ein Beispiel zeigt Abbildung 2.

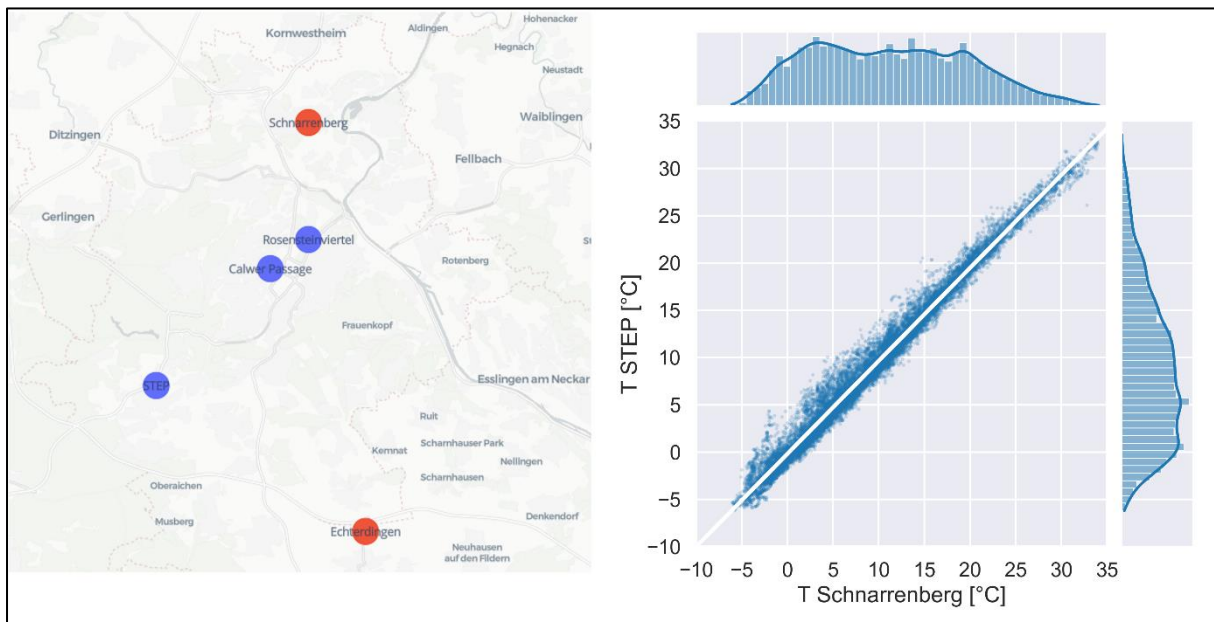


Abbildung 2: Vergleich der Temperaturmessungen im Quartier STEP (Wetterstation Gropiusplatz) mit der Station Schnarrenberg des Deutschen Wetterdienstes. Links: Lage der Station (Karte © OpenStreetmap). Rechts: Regressionsplot mit Verteilungen der Werte.

Wie zu erkennen, verläuft die Regressionsgerade fast diagonal ($R^2=0,981$). Die Temperaturen am STEP weisen leichte Ausschläge nach oben auf. Dieser Effekt ist zum Teil auf die schlechtere Strahlungsabschirmung der IoT-Wetterstation zurückzuführen, zum Teil – vor allem bei tiefen Temperaturen – auf den Einfluss der umgebenden Versiegelung und Bebauung. Andere Sensoren in den Quartieren verhalten sich ähnlich; die Übereinstimmung mit den DWD-Messungen ist trotz der unterschiedlichen Lage sehr gut.

VERGLEICH MIT MODELLIERUNG

Das ASMUS_green-Modell wurde von der Firma GeoNet für einen im Wesentlichen wolkenfreien Sommertag gerechnet, dem am ehesten der 13. August 2024 entspricht. Am 2. Juli 2025 traten erneut ähnliche Bedingungen auf. Der Vergleich der Modellierung mit den Messungen ist hilfreich, um systematische Abweichung der Modellausgabe zu den Messungen einordnen zu können. Dabei ist zu beachten, dass bereits die Anfangs- und Randbedingungen des Modells nicht genau auf den gemessenen Tag zugeschnitten sind, sondern aus einer Wetterdatenbank mit typischen Situationen stammen. Die Assimilation der Messdaten in die meteorologischen Eingangsdaten des Modells ist aufwändig und hätte den Rahmen des Projektes gesprengt.

Abbildung 3 stellt den statistischen Vergleich der Temperatur von Modell und Messungen für die drei Quartiere dar. Wie zu erkennen, gibt es bereits zu Beginn der Simulation einen leicht negativen Offset gegenüber den Messungen. Am frühen Morgen vergrößert sich die Abweichung, was durch das Auftreffen von Sonnenstrahlung auf einige Sensoren in flachem Winkel zu erklären ist: Da die Sensoren größtenteils senkrechte Flächen aufweisen, werden sie bei niedrigem Sonnenstand auch fast senkrecht beschienen. Im Quartier Calwer Passage wurden einige im öffentlichen Raum befindliche Sensoren aus optischen Gründen dunkel lackiert, was sich in der höheren Streuung dieses Quartiers widerspiegelt. Im Vergleich dazu steigt die PET-Kurve, die ja auch Strahlungskomponenten berücksichtigt, wesentlich später an. Dies ist nachvollziehbar, da der Strahlungseinfluss auf den Körper durch isolierende Kleidung und die noch kühle Morgenluft gedämpft und verzögert wird. Leider ergibt sich auch im Tagesverlauf keine Korrelation zwischen PET und den Messungen, was aufgrund der komplexen Berechnungsmethodik der PET auch nicht zu erwarten wäre. Um die Mittagszeit stimmen Lufttemperatur von Modell und Messung im Rahmen ihrer jeweiligen Streuung gut überein, wobei sich die Luft im Modell stärker zu erwärmen scheint als in den Messungen. Am späten Nachmittag bis Abend überschätzt das Modell wieder tendenziell die Messungen, wobei diese aufgrund des abnehmenden Solareinflusses näher zusammenrücken. In der Nacht kühlt das Modell weniger stark aus, was aber durch das deutlich kühlere Wetter am folgenden Tag zu erklären ist. Die Modelltemperaturen am Morgen des 14.8. stimmen allerdings sehr gut mit den Messungen am 13.8. überein.

Alles in allem stellen wir eine ausreichende Übereinstimmung des Modelltages mit den Messungen fest, um zumindest Temperaturdifferenzen innerhalb des Modells bewerten zu können. Das Modell scheint allerdings die Höchsttemperaturen um 1–2,5 K zu überschätzen.

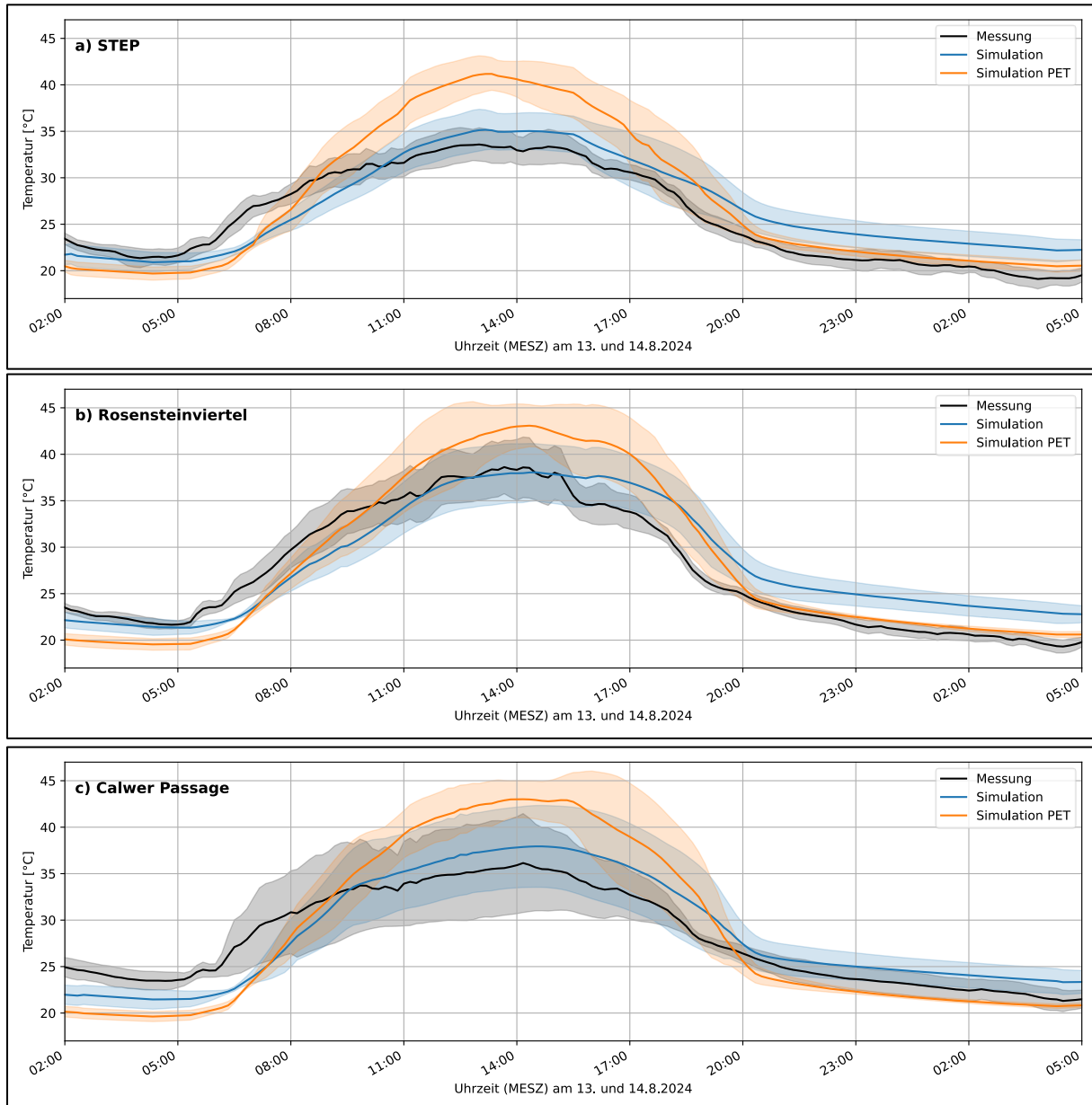


Abbildung 3: Vergleich der Lufttemperatur-Messdaten mit der Simulation der Lufttemperatur und der PET (schattierter Bereich = Standardabweichung um den Mittelwert). Die Modellausgabe wurde hierfür auf die Standorte der Sensoren interpoliert und pro Quartier gemittelt.

AUSWERTUNG ALLGEMEIN

Die Messzeitreihen lagen zum Projektende vor für den Zeitraum vom 15.7.2024 bis 15.7.2025, wobei nicht von Anfang an alle Sensoren vorlagen. Für die statistische Auswertung ist es in diesem Zusammenhang notwendig, einige Definitionen festzulegen.

DEFINITIONEN

Da der Fokus auf heißen Sommertagen liegt, sind alle Zeiten in diesem Dokument in **Mitteleuropäischer Sommerzeit (MESZ = UTC+02:00)** angegeben.

Bei einigen Auswertungen ist es wichtig, die extremen Temperaturen zu bestimmten Tageszeiten nicht mit weniger extremen zu vermischen. Daher wurde anhand von Abbildung 4 die Periode von

- **13:00 bis 17:00** als „Tag“ und die von
- **04:00 bis 07:00** als „Nacht“

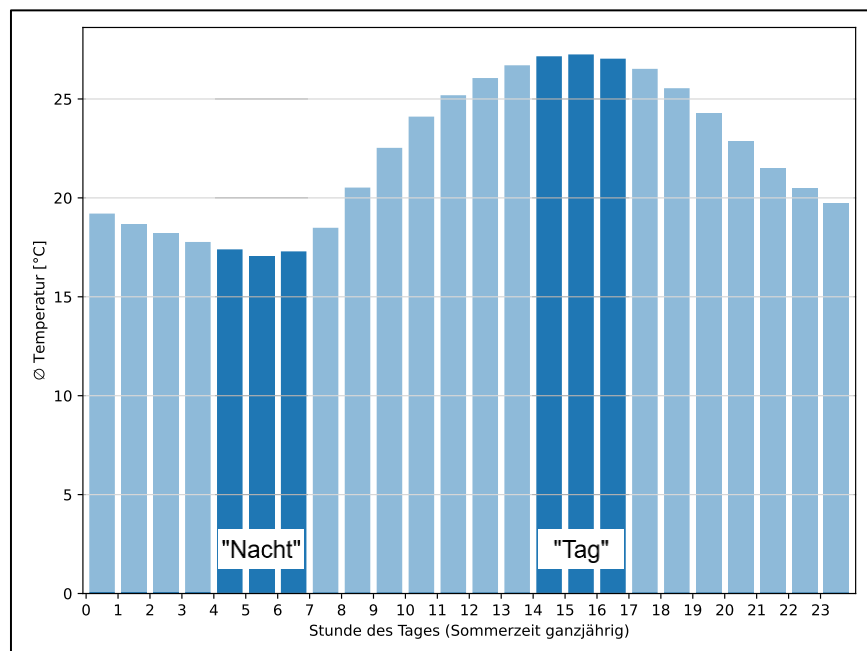


Abbildung 4: Stündliche Mittelwerte aller Temperaturmessungen über die als "Sommer" definierte Periode.

festgelegt.

In Abbildung 5 wird der gleitende Mittelwert der Temperaturen genutzt, um die im Messzeitraum **heißeste Woche (10. bis einschl. 16.8.2024)** sowie den „Sommer“ (**vor 10.9.2024 und ab 28.5.2025**) festzulegen. Der heißeste Tag, an dem auch die Simulationen stattfanden, war der 13.8.2025.

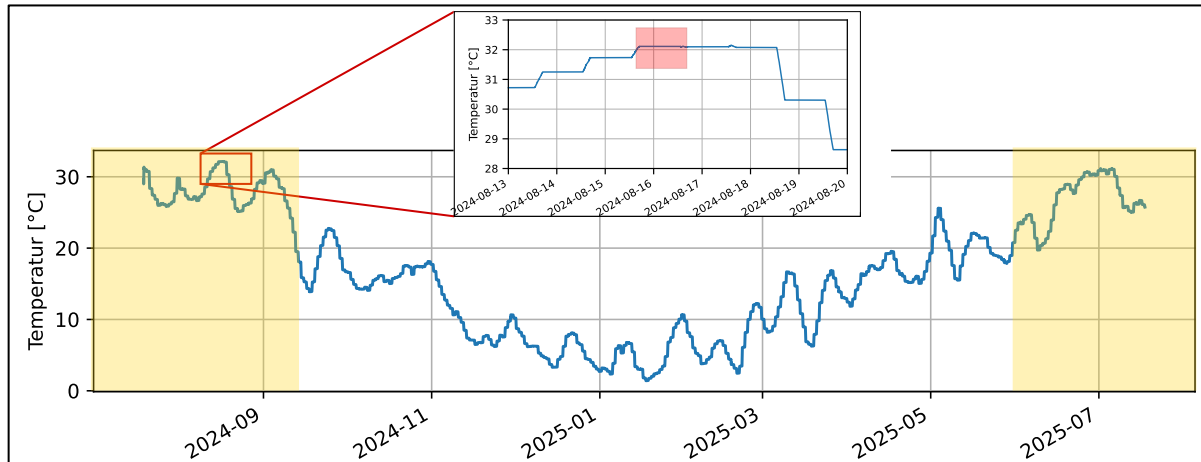


Abbildung 5: Definition der heißesten Woche (rot markiert) und der Sommerperiode (gelb markiert) anhand des gleitenden Mittelwertes der „Tag“-Temperaturen. Die Zeitstempel geben jeweils das Ende der Mittelungsperiode an.

Für statistische Auswertungen wird im Folgenden häufig ein kompakter Violinplot verwendet, dessen Eigenschaften in Abbildung 6 erläutert werden.

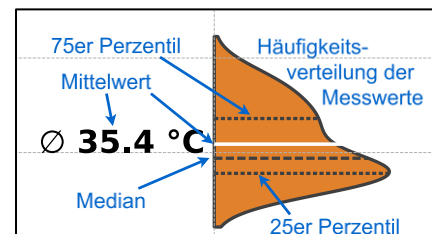


Abbildung 6: Erläuterung der verwendeten statistischen Darstellung

TROPENNÄCHTE

Als „Tropennacht“ bezeichnet der DWD eine Nacht, in der die Lufttemperatur nicht unter 20°C sinkt.¹ Da hierbei die direkte Sonnenstrahlung nicht stört, können die verwendeten Sensoren Tropennächte gut messen. Allerdings ist darauf zu achten, dass die Messzeitreihen in den betreffenden Nächten nicht durch Datenausfälle lückenhaft sind, da sonst die Minimaltemperatur tendenziell zu hoch ausfällt.

Um die in Abbildung 7 dargestellte Statistik zu generieren, wurden für die vier aufgezählten Kategorien jeweils typische Sensoren ausgewählt und die Anzahl der von ihnen gemessenen Tropennächte gemittelt. Wie zu erkennen, ergibt sich eine klare Hierarchie, die Versiegelung/Verschattung einen größeren Teil des Effekts zuweist und der Lage einen geringeren. Dies zeigt, dass gerade in städtischen Lagen Begrünung und Verschattung zu einer deutlichen Reduktion des Hitzestresses beitragen können.

¹ <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv3=102802&lv2=102672>, Zugriff 10.7.2025

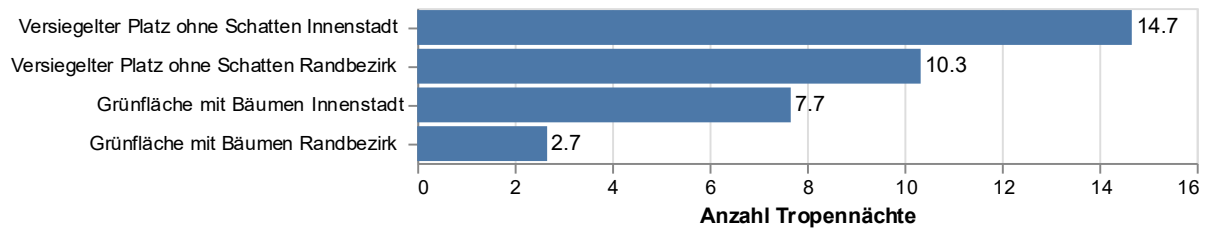


Abbildung 7: Mittlere Anzahl der Tropennächte (Minimaltemperatur über 20°C) über den Messzeitraum, nach Standortkategorien.

Außer der absoluten Anzahl der Tropennächte ist auch deren Verteilung über das Jahr von Interesse, da längere Phasen erschwerten Schlafens sich stärker auf die Gesundheit auswirken als einzelne Nächte. Wie in Abbildung 8 zu erkennen, treten die Tropennächte innerhalb des Messzeitraums im Wesentlichen in vier Zeiträumen geballt auf, die in der Länge zwischen 4 und 14 Tagen variieren. Außerdem gab es am 01.08.2024 und am 21.09.2025 eine einzelne Tropennacht.

Interessant ist weiterhin, dass im Jahr 2024 die Innenstadt und im Jahr 2025 der Randbezirk stärker betroffen zu sein scheint. Dies erklärt sich wahrscheinlich durch die regionale Wetterlage. Insbesondere die Windsituation wurde aber im Rahmen des Projekts nicht weiter untersucht.

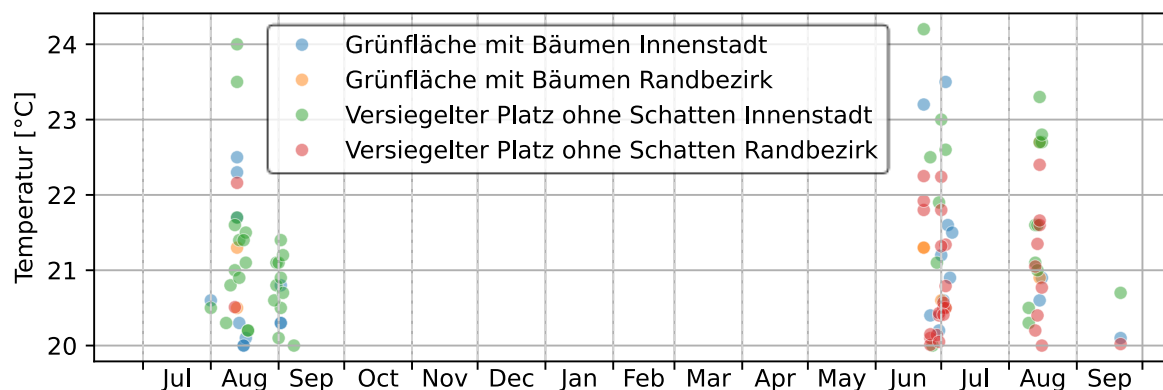


Abbildung 8: Unterjährige Verteilung des Auftretens von Tropennächten und deren Minimaltemperatur.

Die innerhalb eines Jahres gemessenen Tropennächte lassen aufgrund ihres seltenen Auftretens keine direkten Verallgemeinerungen auf andere Städte und Jahre zu. Um die Ergebnisse trotzdem einordnen zu können, wurden die Messungen den zwei nahegelegenen DWD-Wetterstationen aus Abbildung 2 verglichen. Während des Messzeitraums traten an der Station Schnarrenberg, etwas nördlich vom Zentrum Stuttgarts, 8 Tropennächte auf. Am Flughafen Echterdingen wurden zwei Tropennächte gemessen. Dies stimmt gut mit Abbildung 7 überein, wenn man die etwas höhere Lage und die damit verbundene schnellere Abkühlung berücksichtigt.

Beide Stationen weisen Messzeitreihen ab mindestens 1996 auf. Aus Abbildung 9 ist ersichtlich, dass vor 1998 keine Tropennächte gemessen wurden und deren Häufigkeit – wenn die

Extremsommer 2003 und 2015 ausgeklammert werden – mit den Jahren langsam zunimmt, wie dies in diversen Studien zum Klimawandel nachzulesen ist. Wird der Sommer 2025 zur Veröffentlichung dieses Berichts als abgeschlossen angesehen, fallen beide Tropennächte in Echterdingen und 7 der 8 Tropennächte auf dem Schnarrenberg in das Jahr 2025, das somit den Trend fortsetzt. Zu beachten ist, dass heiße Lagen der Innenstadt gemäß Abbildung 7 fast doppelt so viele Tropennächte aufweisen, wie am Schnarrenberg gemessen.

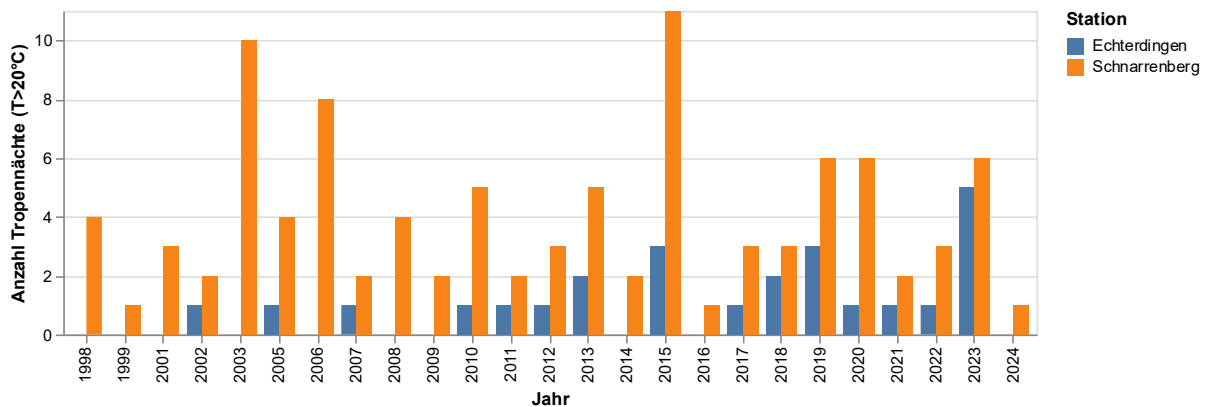


Abbildung 9: Häufigkeit des Auftretens von Tropennächten an den DWD-Wetterstationen im zeitlichen Verlauf.

Erwähnenswert ist in diesem Zusammenhang, dass die Anhebung der Temperaturmessungen um 1 K die Zahl der aus den DWD-Daten berechneten Tropennächte um 130 % erhöht. Natürlich wird sich der Klimawandel nicht auf ganz so einfache Weise auswirken, aber dass diese Temperaturerhöhung früher oder später auftreten wird, steht gemäß IPCC außer Frage.

MAXIMALE TAGESTEMPERATUREN

Als Indikation für den thermischen Komfort untertags im Vergleich von sonnigen und verschatteten Standorten kann die Differenz der jeweiligen täglichen Maximaltemperaturen herangezogen werden. Hierzu wurden die Sensoren quartiersübergreifend manuell in verschattete und sonnige Lagen kategorisiert.

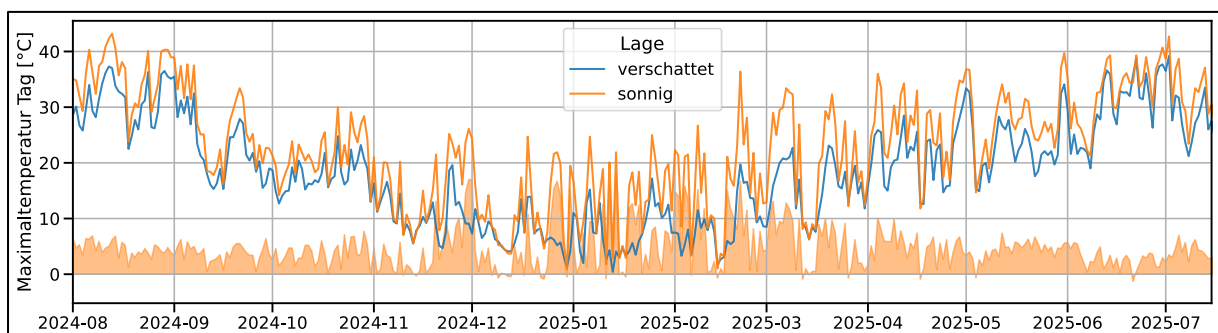


Abbildung 10: Tageswerte der Maximaltemperaturen und ihre Differenz (schattiert) über den Messzeitraum.

Aus Abbildung 10 ist erkennbar, dass die Differenz der Lagen im Sommer bei etwa 5 K liegt. Dies liegt in der Größenordnung des für die Handlungsempfehlungen recherchierten Verschattungseffekts. Für einen Menschen dürfte der Effekt eher noch größer ausfallen, da auch einige „verschattete“ Sensoren gelegentlich einzelne Sonnenstrahlen abbekommen und sich dann – wie oben erläutert – sehr schnell aufwärmen. Im Winter schwankt die Differenz erratisch, da die Sonne dann oft unter der Verschattung hindurchscheint oder durch weiter entfernte liegende Gebäude abgeschirmt wird. Dadurch ist die Klassifikation der Standorte nicht mehr so eindeutig.

Die Berechnung der Maximaltemperaturen kann auch für die Gründächer des Untersuchungsgebiets durchgeführt werden (Abbildung 11). Hier liefert ein etwa 1 m über der Oberfläche hängender Sensor die Lufttemperatur und ein Bodensensor die Temperatur der obersten Erdschicht in 10 cm Tiefe sowie die Strahlungstemperatur. Letztere wurde hier jedoch als weniger relevant betrachtet, da sie sich im Gleichgewicht zwischen Boden- und Lufttemperatur indirekt widerspiegelt. In der Grafik fällt auf, dass sowohl die Luft- als auch die Bodentemperatur bei den nicht mit PV belegten Gründächern höher sind. Dies mag nicht generell auf alle Gründächer übertragbar sein, ist aber bei den Dächern im Untersuchungsgebiet plausibel: Die Dächer ohne PV sind hier größtenteils mit niedrigen Sedum-Arten bewachsen und muten während des Sommers eher braun an. Zwischen Reihen flach aufgeständerter PV-Zellen finden sich hingegen durchweg auch höhere Gras- und Kräuterarten. Der Boden wird also nicht nur durch die PV, sondern zusätzlich durch die Krautschicht beschattet und wärmt sich dadurch viel weniger stark auf. Sogar die zum Vergleich aufgetragenen Wiesenflächen weisen eine höhere Bodentemperatur auf, da sie gemäht werden und über den Sommer teilweise schneller vertrocknen als die PV-belegten Gründächer.

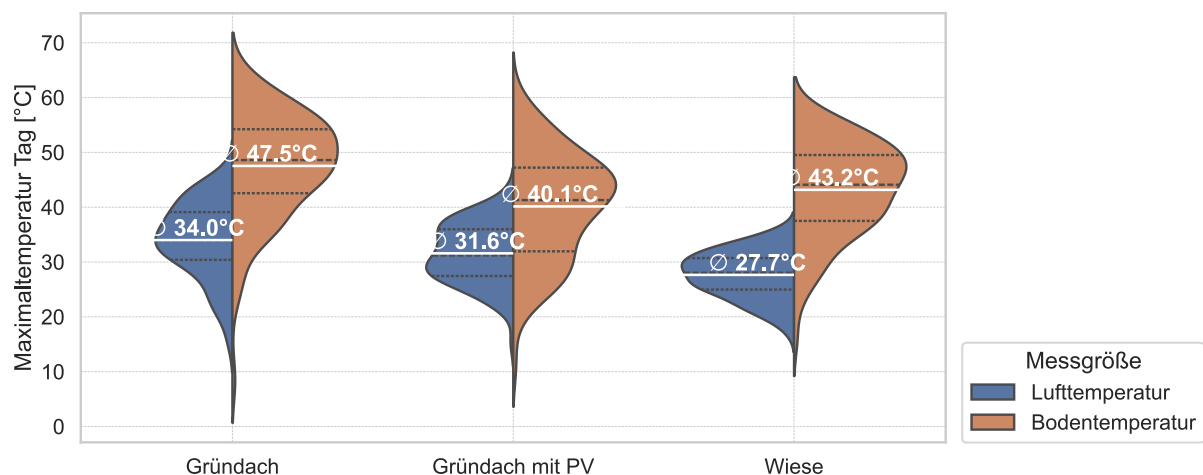


Abbildung 11: Vergleich der sommerlichen Tages-Maximaltemperaturen für verschiedene Bodenaufbauten.

Die Interpretation der Lufttemperaturen steht aufgrund der Advektion durch Wind auf den relativ kleinen Dachflächen unter gewissen Vorbehalten. Auch ist hier eine gewisse Strahlungskomponente durch die Bauweise der Sensoren enthalten. Dass sich die Luft über den ausgedehnten Wiesenflächen nicht so stark aufwärmt, ist nachvollziehbar. Während sich die Luft über dem heißeren Boden der Gründächer tagsüber stärker aufwärmt, enthält die leicht bimodale Werteverteilung bei Gründächern mit PV unter bestimmten Einfallswinkeln Reflexionen von den Modulen, ist aber ansonsten von der kühleren Bodenoberfläche dominiert. Die Differenz der Lufttemperaturen verschwindet, wenn von beiden Dacharten die mittleren Tagestemperaturen anstatt des Maximums betrachtet werden (beide $\approx 21,9^\circ\text{C}$).

PET-REDUKTION BEI BEGRÜNTER FASSADE

Durch die Begrünung von Fassaden entsteht ein lokaler Abkühlungseffekt, da sowohl die Lufttemperatur als auch die Rückstrahlung von der Fassade reduziert wird. Um dies zu quantifizieren, wurden in den Quartierssimulationen die Modelldatenpunkte manuell in Abhängigkeit von Abstand und Himmelsrichtung zu den modifizierten Fassaden eingefärbt (Abbildung 12).

Wie in Abbildung 13 zu erkennen, nimmt der Fassadeneffekt mit der Entfernung ab, jedoch nicht so stark wie erwartet. Der Kühleffekt beträgt im Mittel 3,5–4 K im Bereich bis 2 m Abstand vor der Fassade, die Kühlwirkung nimmt dann auf 2–3 K in 6–8 m Abstand ab. Während die reduzierte Rückstrahlung sich direkt auf vor der Fassade stehende Personen auswirkt, wird die fassadengekühlte Luft durch den Wind verweht. Die Abkühlung verteilt sich dadurch relativ gleichmäßig zwischen Häusergassen und wird je nach Windrichtung auch um die Gebäude herum und von ihnen weg bewegt, wie dies im PET-Differenzbild zu erkennen ist. Dies erklärt auch, warum im Rosensteinviertel der Effekt an Nordfassaden teilweise größer als an Südfassaden ist: Viele „Nordfassaden“ zeigen hier größtenteils nach Westen und bekommen durch die südlichen Winde den Effekt der Südfassaden advektiert.

Wie in der Dokumentation von Geonet erläutert, wurde im Rosensteinviertel auch ein Lauf mit verringerter Fassadenbegrünung gerechnet. Dabei bleibt der Kühlungseffekt bis zu etwas 80 % erhalten. Auch die Entfernungcharakteristik ändert sich wenig.

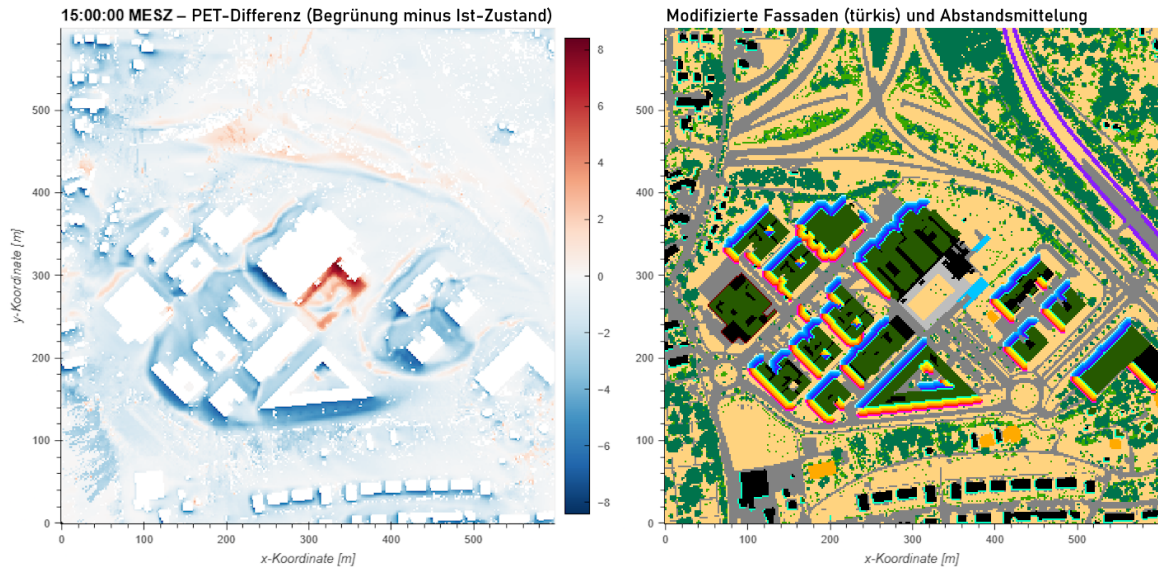


Abbildung 12: Untersuchung des kühlenden Fassadeneffekts am Beispiel STEP-Areal. Links Modelloutput, rechts Modellinput mit modifizierten Fassaden und eingefärbten Abstands-Datenpunkten.

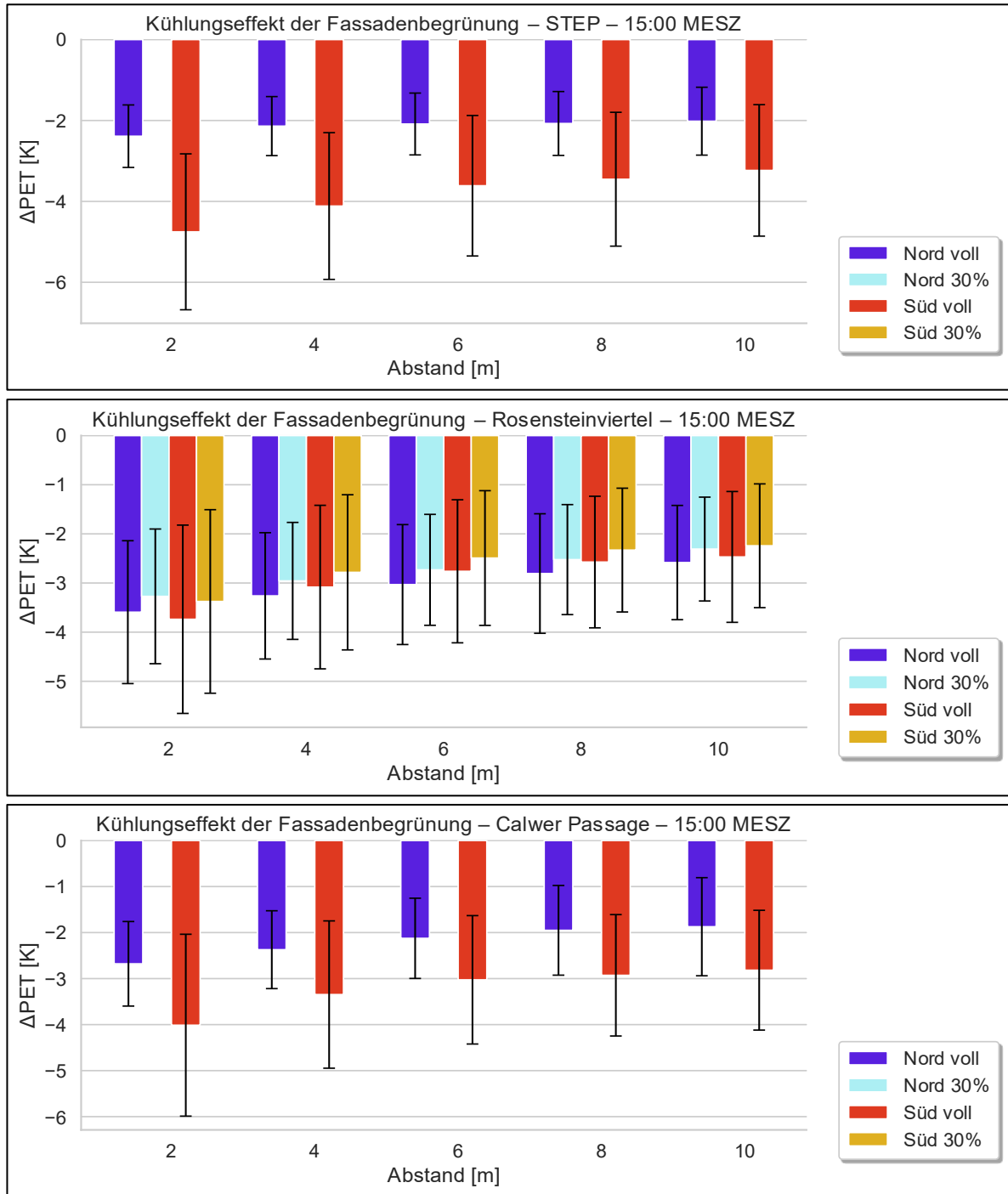


Abbildung 13: Statistische Mittelung des Fassadeneffekts auf die PET in Abhängigkeit vom Abstand zur Fassade. Teilbe-
 grünte Fassaden wurden nur im Rosensteinviertel simuliert.

WINDRICHTUNGSABHÄNGIGKEIT DER TEMPERATUR

Zur Interpretation der Simulationsergebnisse bezüglich des Fassadeneffekts ist es hilfreich, auch das lokale Windfeld zu beachten. Die Simulation wurde mit einem vornehmlich aus Westen kommenden Windfeld initialisiert, welches sich innerhalb der komplexen Gebäudestruktur des STEP in viele kleinere Wirbel und Windstraßen aufspaltete (Abbildung 14). Leider ist die sich einstellende Situation mit einer Anströmung der Wetterstation von Süd-West statistisch eher selten: Aus den Windrosen ist zu entnehmen, dass im Sommer stärkere Winde bei niedrigen Temperaturen (u.a. nachts) meist aus Nord-West kommen, während an heißen Tagen ein Südostwind vorherrscht. Bei der detaillierten Bewertung der Ergebnisse aus Abbildung 12 und dem separaten Bericht der Firma GeoNet ist somit zu beachten, dass die Advektion des Fassadeneffekts und etwaiger Gründächer typischerweise eher in Richtung Nord-West erfolgen wird, nicht in östliche Richtung wie im Modell angenommen.

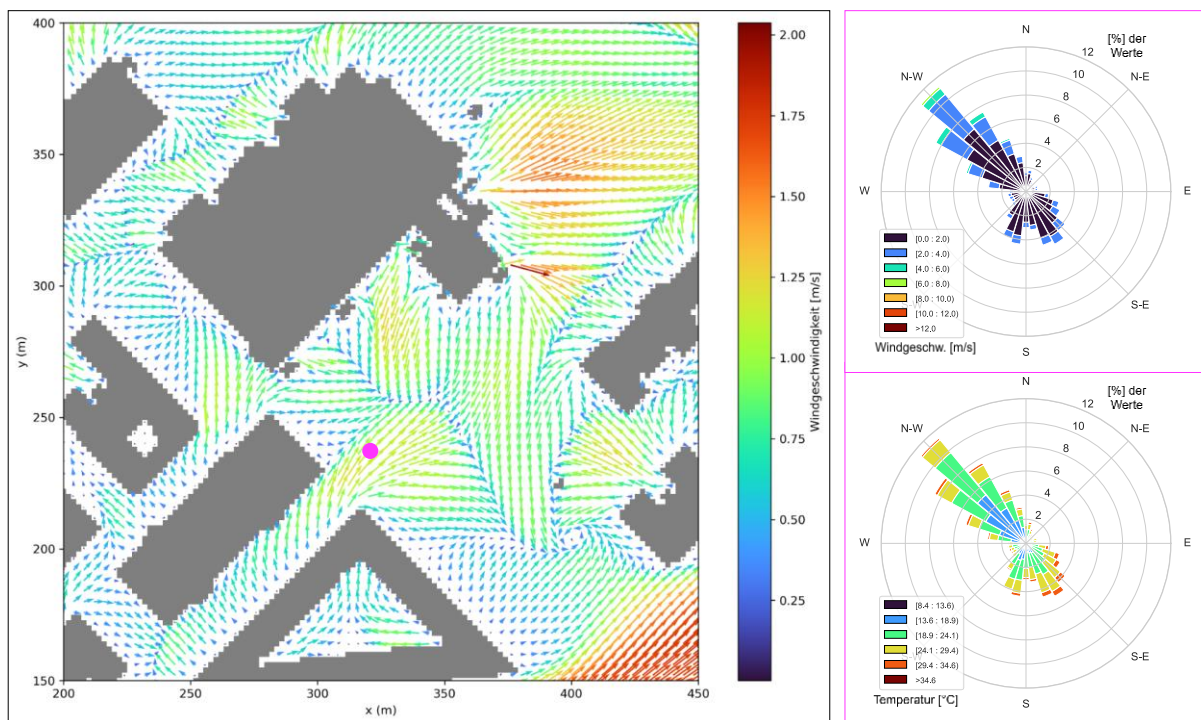


Abbildung 14: Windfeld der Simulation (STEP 14:00 MESZ). Der Standort der Wetterstation ist der magentafarbene Kreis. Die Windrosen rechts zeigen die relative Häufigkeit der über die Sommerperiode anfallenden Windrichtungen. Im oberen Bild sind diese farblich nach Windgeschwindigkeit, unten nach gemessener Lufttemperatur eingefärbt.

Im Quartier Calwer Passage konnte leider keine Wetterstation auf Bodenhöhe installiert werden und die Dachmessung wurde durch Pflanzenbewuchs gestört. Daher ist hier eine Aussage über die im Sommer vorherrschende Windrichtung nicht möglich.

Im Rosensteinviertel scheint der angenommene schwache Westwind die Situation im Sommer gut abzubilden. Die gemessene Windrichtung ist durch nicht aufgelöste, lokale Wirbel gestört, weist aber kaum Variation auf und stimmt im Rahmen der Unsicherheiten mit dem Modell überein.

QUARTIERSPEZIFISCHE AUSWERTUNGEN

STEP-AREAL

Fassade Parkhaus

In etwa 2 m Entfernung wurden vor dem Parkhaus am STEP vor einer ca. 8 m breiten Fassadenbegrünung (Glyzinie, 100 % Bedeckung über alle 5 Stockwerke) und an einem Abschnitt ohne Begrünung jeweils ein ungeschirmter und ein geschirmter Temperatursensor angebracht. Interessanterweise ließ sich hier kein Effekt der Fassade nachweisen (Abbildung 15). Allerdings handelt es sich um eine offene Fassade, so dass kühle Luft unten aus dem Parkhaus ausströmen kann und (vornehmlich) an den Sensoren im unbegrünten Teil vorbeistreicht. Rückstrahlung von Sonnenlicht von der Fassade ist aufgrund der Offenheit ebenfalls nicht vorhanden – die Sonne scheint direkt auf die Parkplätze im Gebäude.

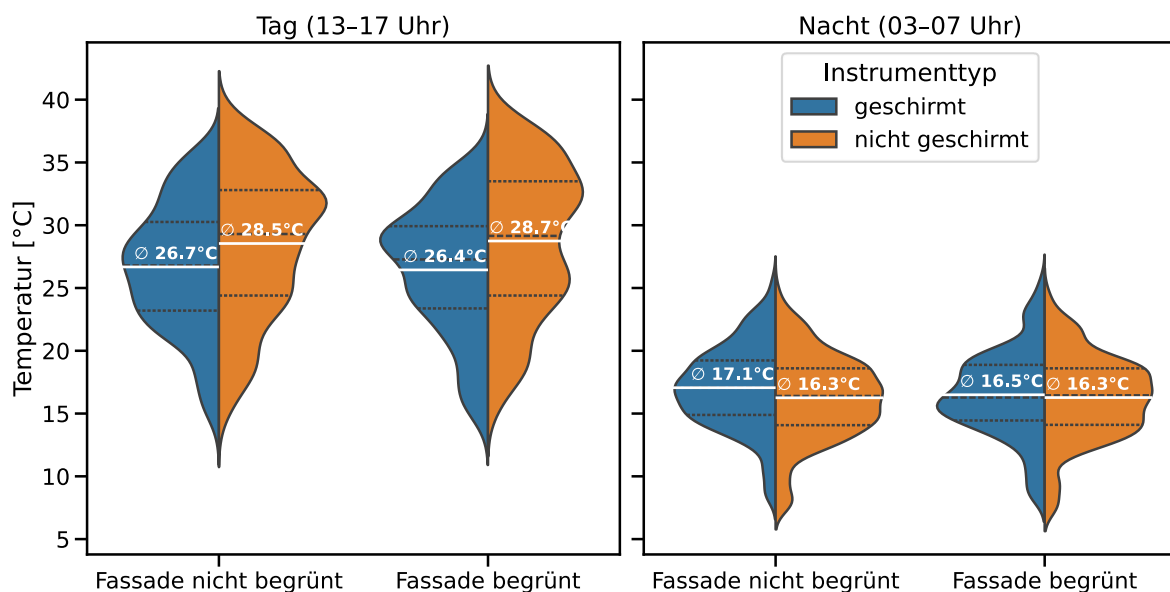


Abbildung 15: Verteilung von Temperaturen vor dem Parkhaus am STEP nach Tageszeit, Begrünung und Instrumententyp. Messzeitraum war 4.6. bis 30.6.2025. Gestrichelte Linien innerhalb der Verteilungen zeigen Median und IQR an.

Wie zu erkennen, ist die Temperaturverteilung bei beiden Sensortypen nachts fast identisch, während sich die ungeschirmten Sensoren im sehr sonnigen Messzeitraum tagsüber um etwa 2,5 K stärker aufheizen und auch höhere Spitzentemperaturen erreichen.

Obwohl hier kein direkter Effekt der Fassadenbegrünung auf Fußgänger vor dem Gebäude vorliegt, kann davon ausgegangen werden, dass die Lufttemperaturen im Parkhaus und in randständigen PKW selbstverständlich von der Fassadenbegrünung profitieren. Die begrünte Fläche bezogen auf die gesamte Fassade liegt hier bei unter 10 %, die Kaltluft kann also ebenerdig

fast überall das Gebäude verlassen. Bei großflächiger Begrünung von offenen Fassaden sollte die Kaltluftausströmung am Boden hingegen so gelenkt werden, dass Fußgänger davon profitieren und der Effekt nicht auf reinen Autozuwegen und/oder wegelosen Grundstücken verpufft.

Boden-/Dachfeuchte

Auf dem STEP-Areal wurden verschiedene Bodenfeuchtsensoren auf Gründächern und am Boden installiert (Abbildung 16). Wie zu erkennen, trocknen die (extensiven) Gründächer innerhalb von 1–2 Wochen fast vollständig aus. Es ist somit nicht zu erwarten, dass diese Dächer bei längeren Trockenperioden nennenswert Verdunstungskälte abgeben.

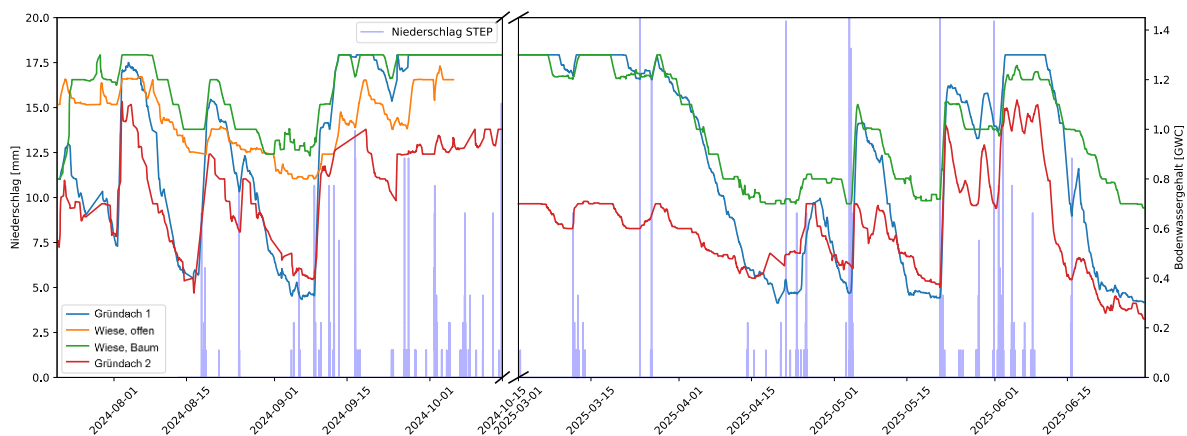


Abbildung 16: Bodenwassergehalt über den Messzeitraum. Die Skala gibt GWC=Global Water Content an, der nicht kalibriert ist, aber zwischen den Sensoren vergleichbar. Der Winter ist wegen wenig interessanter Effekte nicht dargestellt.

Bei den Bodensensoren waren in etwa 1 m Höhe darüber auch (nicht abgeschirmte) Temperatursensoren installiert worden. Diese werden – sofern nicht verschattet – durch direkte Sonneneinstrahlung gleichzeitig aufgewärmt, weisen aber z.B. beim Vergleich zwischen Wiese und Dach grundsätzlich unterschiedliche Temperaturen auf. Die Frage, ob die Temperaturen von der Bodenfeuchte abhängen, lässt sich grundsätzlich beantworten, indem Temperaturdifferenzen gegen Bodenfeuchtedifferenzen aufgetragen werden.

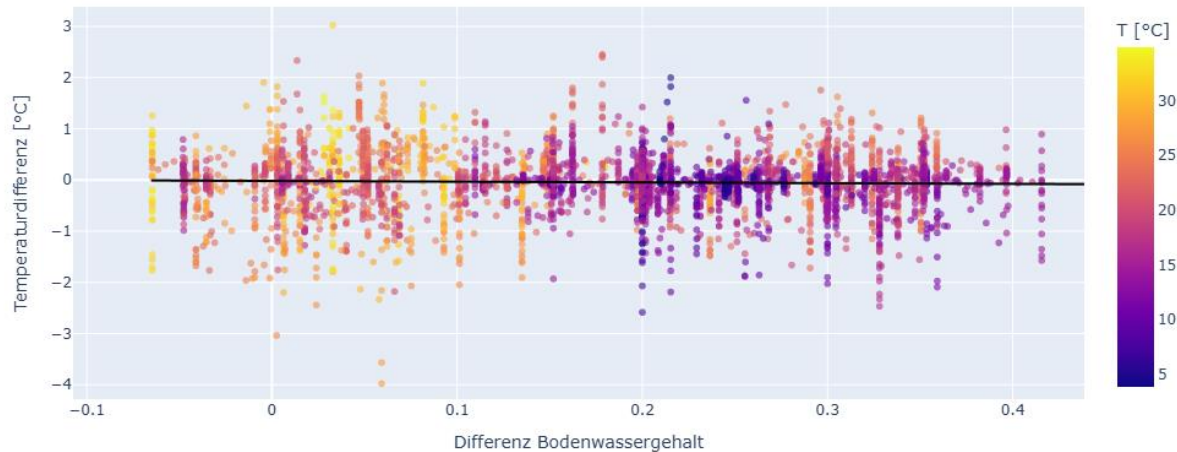


Abbildung 17: Vergleich eines auf der Wiese und eines auf dem Dach installierten Bodensensors. Beschreibung siehe Text. Es ist keine Abhängigkeit der Temperaturdifferenz vom Bodenwassergehalt nachweisbar.

Leider konnte dieser Abkühlungseffekt durch Verdunstung mit der installierten Messtechnik nicht direkt nachgewiesen werden, wie beispielhaft in Abbildung 17 dargestellt. Der Effekt ist vermutlich zu klein gegenüber den Störgrößen wie inhomogener Strahlungsabsorption, Advektion durch Oberflächenwinde und Abhängigkeit der Verdunstung von Pflanzenauflage und Bodenbeschaffenheit.

ROSENSTEINVIERTEL

Vergleich verschiedener Arten von Plätzen

Im Rosensteinviertel wurde ein statistischer Vergleich zwischen verschiedenen exponierten Plätzen durchgeführt (Abbildung 18). Der nördliche „Platz“ ist ein Grünstreifen mit mittelgroßen Bäumen neben dem Weg, der die Grenze des Quartiers zum Pragfriedhof hin markiert. Bei dem mittleren Platz handelt es sich um zentrales Areal im nördlichen Teil des Geländes, das einen kleinen Spielplatz enthält und in der Mitte durch eine Gruppe von jungen Birken beschattet wird. Der südliche Platz liegt direkt neben einer als Wendeanker dienenden Straßenerweiterung und ist von einem Klettergerüst durchzogen, neben dem vereinzelt kleine Bäume stehen.



Abbildung 18: Lage der Sensoren im Quartier Rosensteinviertel Von oben nach unten: Bäume über Gras, Bäume über Kies, versiegelt (durch die breite Straße und die fehlende Bodenvegetation kann der Platz i.W. als versiegelt betrachtet werden).
(Karte © OpenStreetMap)

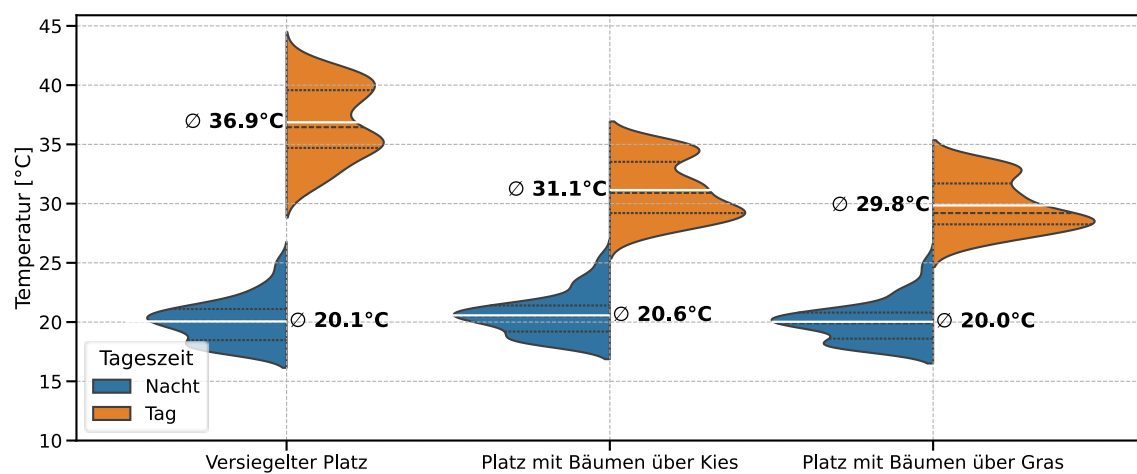


Abbildung 19: Temperaturverteilungen über die heißeste Woche 2024 an den verschiedenen Plätzen aus Abbildung 18 (von unten nach oben).

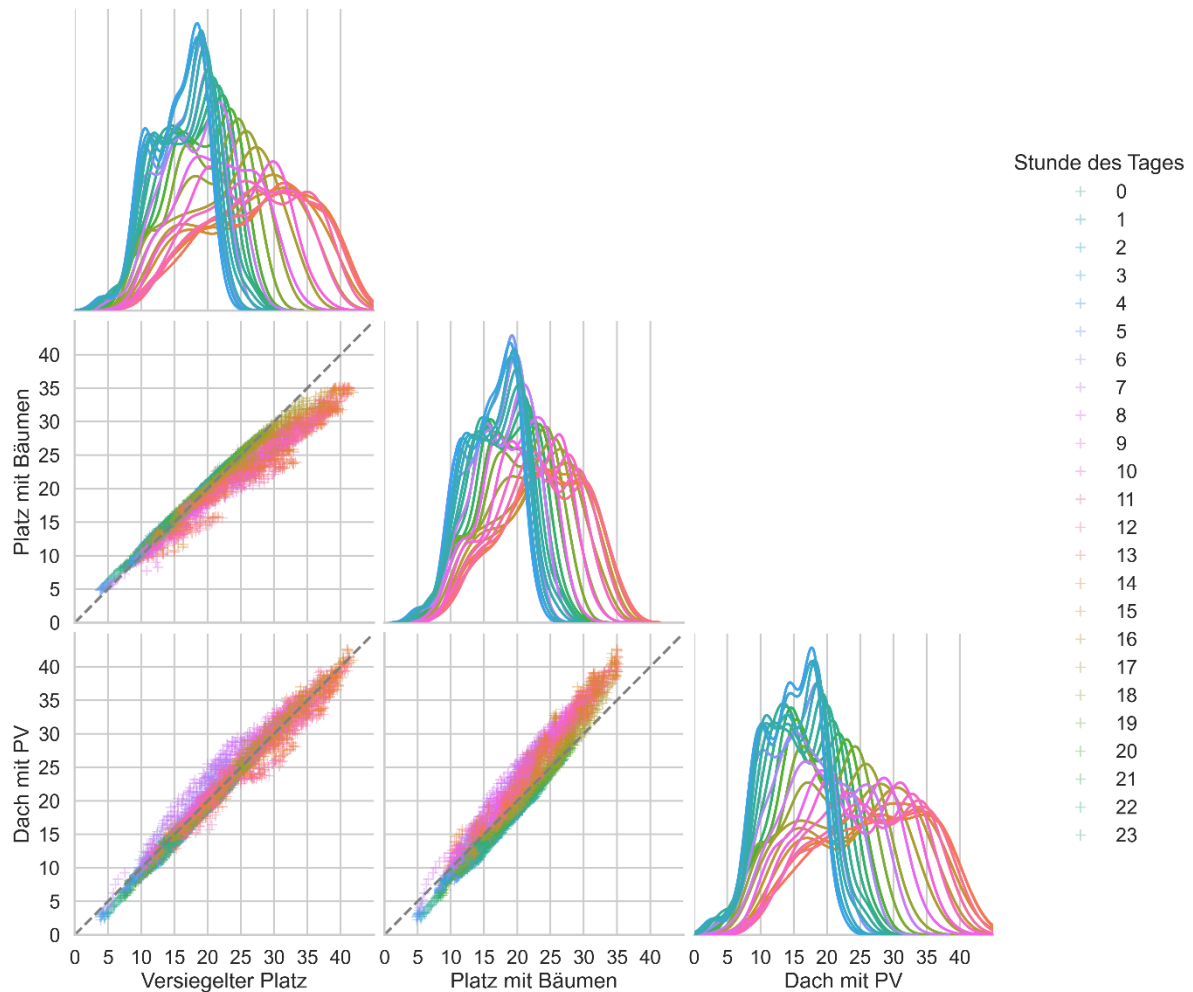


Abbildung 20: Vergleich von 15-Minuten-Werten über den gesamten Messzeitraum für die ersten zwei Plätze aus Abbildung 19 sowie einem PV-Dach mit Kiesunterlage. Die Kurven oben zeigen die Verteilung der Temperaturwerte zu jeweils einer Stunde des Tages.

Wie in Abbildung 19 zu erkennen, liegt die mittlere Temperatur am südlichen Platz um etwa 7 K höher als auf den beschatteten Plätzen. Nachts gleicht sich die Temperatur im ganzen Areal offenbar an, wobei sie in dem geschützteren, mittleren Platz tendenziell etwas höher bleibt. Ein starker Einfluss des nahen Waldareals im Westen ist selbst beim nördlichen Platz nicht auszumachen, die Werte sind nur wenig geringer als im Zentrum des Areals.

Einen anderen Blick auf die Daten wirft Abbildung 20. In den Streudiagrammen sind verschiedene Effekte zu erkennen. Der PV-Dach-Temperatursensor ist ähnlich exponiert wie der auf dem versiegelten Platz und korreliert stark mit diesem (Diagramm links unten). Allerdings wärmt sich das Dach am frühen Morgen schneller auf, da zu dieser Uhrzeit noch Gebäudeschatten auf den Platz fallen. Im Diagramm darüber ist die hervorragende Korrelation der Nachttemperaturen zu sehen, aber auch Temperaturüberhöhungen von bis zu 10 K auf dem versiegelten Platz gegenüber dem schattigen. Ähnliches zeigt das mittlere Diagramm (Abb. 18), wobei hier die Regressionsgerade (nicht gezeichnet) offenbar von der Diagonalen abweicht: Die Temperaturspreizung ist auf dem geschützten Platz gegenüber dem PV-Dach verringert.

Dies ist auch gut an den Verteilungskurven zu erkennen, die für diesen Platz am nächsten zusammen liegen.

Vergleich mit/zwischen Dächern

Im Rosensteinviertel wurden auch Temperaturmessungen auf vier Dächern mit unterschiedlicher Höhe, teilweise begrünter Kiesauflage und PV bzw. Sonnenkollektoren durchgeführt (nicht gezeigt). Hier ließ sich kein systematischer Unterschied zwischen den Dächern erkennen. Sollte es einen geben, wäre er nur durch eine wesentlich stringenter Kontrolle des Messaufbaus (Verschattung, Ausrichtung, Kontaktflächen, Wind, usw.) nachzuweisen.

CALWER PASSAGE

Messung Fassadeneffekt

Der kühlende Effekt der Fassade des fast vollständig begrünten Gebäudes an der Kreuzung wurde messtechnisch durch zwei nicht geschirmte Sensoren erfasst, die an Ampelmasten am Gebäude und quer über die Kreuzung auf Kopfhöhe angebracht waren. Da sie aus optischen Gründen anthrazitfarben lackiert werden mussten, ist die Strahlungsaufnahme etwas größer als bei den unlackierten, weißen Sensoren.

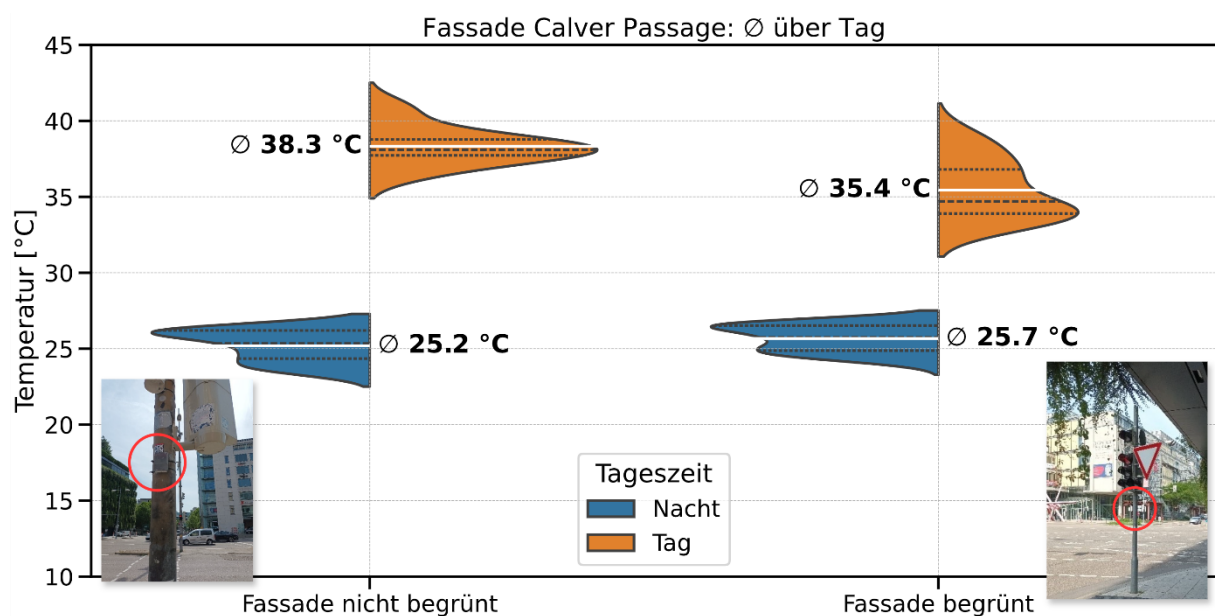


Abbildung 21: Fassadeneffekt an der Calwer Passage für den 13.8.2024, 14:00–17:00.

Temperatur hinter der Fassade

Oberhalb des Sensors auf Fußgängerniveau vor der Grünfassade wurde ein weiterer Sensor im 2. Stock hinter der Fassade vor den Fenstern platziert. Abbildung 22 zeigt den Vergleich der entsprechenden Temperaturmessungen.

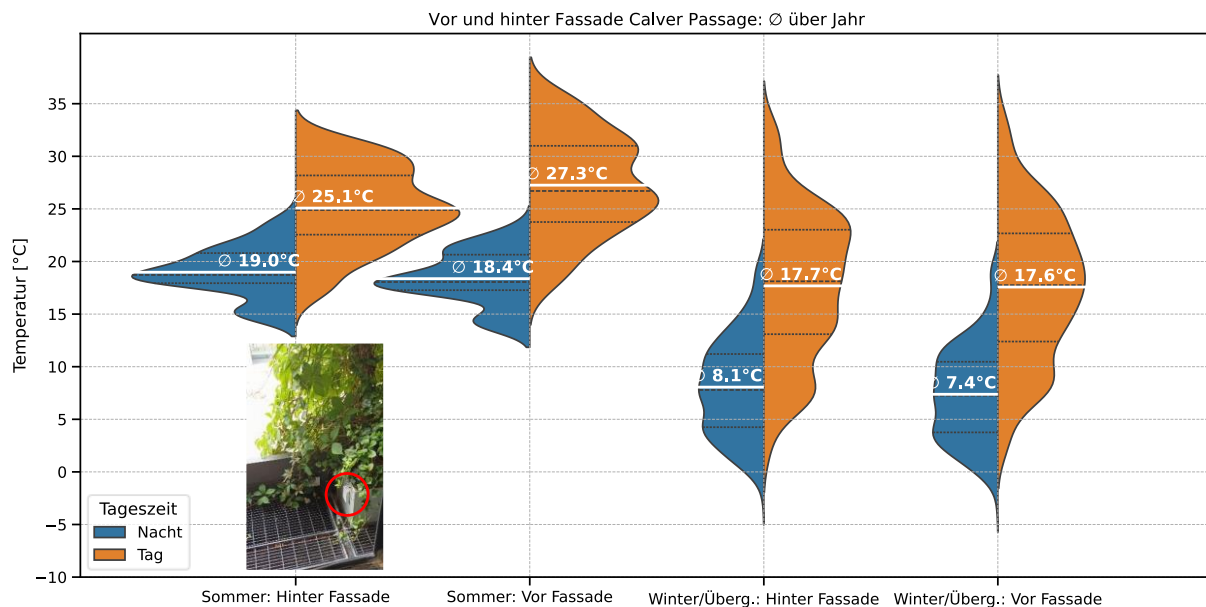


Abbildung 22: Vergleich der Temperaturen vor der Fassade am Boden und hinter, bzw. in der Fassade (Foto).

Leider war die Empfangsqualität für diesen Sensor sehr schlecht: Der Empfänger musste in der Calver Passage aufgrund externer Vorgaben in einem innenliegenden Serverraum installiert werden, was bei mehreren Sensoren zu Übertragungsproblemen führte. Darum ist eine statistische Auswertung hier nur über längere Perioden möglich. Für Abbildung 22 wurden die Daten der beiden Sensoren auf fixe 10-Minuten-Zeitstempel interpoliert und nur diejenigen Zeitstempel für die Statistik verwendet, an denen für beide Sensoren Messwerte vorlagen.

Wie zu erkennen, tritt hinter der Fassade im Sommer eine Temperaturverringerung um durchschnittlich 2,2 K auf. Die Verteilung der Tageswerte deutet darauf hin, dass der Unterschied vor allem an heißen Tagen durch eine Kappung der Spitzenwerte entsteht. Nachts ändert die Fassade hingegen nicht viel. Im Winter und in der Übergangszeit ist nachts ein kleiner Aufwärmefekt zu beobachten, wobei es sich eher um Abstrahlung durch die Fensterfront handeln dürfte, da die meisten Rankpflanzen dieser Fassade im Winter ihre Blätter abwerfen.