



Smart City
Mannheim



Vergleich aktiv/passiv ventilierter Strahlungsschutzhütten



Aufgabenstellung 5

Datenanalyse 13

Wertung..... 40

Herausgeber:

MKB Mannheimer Kommunalbeteiligungen GmbH
Landteilstraße 33
68163 Mannheim



Smart City Mannheim GmbH
info@smartmannheim.de

Autor:

Dr. Wolfgang Lähne
Freiberuflicher Klimatologe
Brucknerstraße 13
67354 Römerberg
laehne.oekoplana@t-online.de

Stand:

10/2023



Inhaltsübersicht

Impressum	2
Vorwort	4
1 Aufgabenstellung	5
2 Datenanalyse	13
2.1 Referenzmessung: THIES HandyLog / BARANI MeteoShield® Professional	13
2.2 Stations-Vergleichsmessung: THIES HandyLog / „Schlossgartenstraße“	15
2.3 Messdatenanalyse Nichtstrahlungstage	17
2.4 Witterungsspezifischer Strahlungshüttenvergleich	21
2.4.1 Mittlere Tagesgänge der 10-Minutenmittelwerte	22
2.4.2 Mittlere Tagesgänge der 10-Minutenmaximawerte	30
2.4.3 Differenzen der Tagesmaxima	36
3 Wertung	40
Literaturverzeichnis	41



Vorwort

Im Rahmen des sMArt roots-Teilprojektes Klimaresilienz soll in Mannheim ein hochverdichtetes Messnetz auf LoRaWAN-Basis mit im Endausbau voraussichtlich 400 Klimastationen errichtet werden. Primär erfasst werden die Parameter Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windrichtung und Windgeschwindigkeit. Anhand von Zielen und Anforderungen wird basierend auf den gegebenen Rahmenbedingungen, zunächst eine konzeptionelle Ausarbeitung der Herangehensweise und benötigten technischen sowie personellen Ressourcen formuliert. Bei allen Aspekten spielen die Anforderungen an Messqualität und Messgenauigkeit eine große Rolle, um belastbare Daten zu erheben, die insbesondere auch zur Entscheidungsfindung (politischer Gremien) sowie zur Meinungsbildung beitragen sollen und ferner für wissenschaftliche Auswertungen herangezogen werden können.

In der ersten Phase erfolgt die schrittweise Ergänzung und der modulare Aufbau eines hochverdichteten Klimamessnetzes Mannheim. Dies soll sich in enger Einbindung verschiedener Fachdisziplinen und Fachbereiche der Stadtverwaltung Mannheim (Stadtplanung und Geoinformation, Klimafolgenanpassung, der Abteilungen Klimaschutz und Umweltschutz sowie der Klimaschutzagentur Mannheim oder dem Local Green Deal Team und weiterer relevanter Fachbereiche (z.B. Feuerwehr Mannheim, Eigenbetrieb Stadtraumservice, Eigenbetrieb Stadtentwässerung) vollziehen.



1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des sMArt roots-Teilprojektes Klimaresilienz soll in Mannheim ein hochverdichtetes Messnetz auf LoRaWAN-Basis mit im Endausbau voraussichtlich 400 Klimastationen errichtet werden. Primär erfasst werden die Parameter Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windrichtung und Windgeschwindigkeit. Die Messgeber werden vorrangig an Straßenbeleuchtungsmasten in einer Höhe zwischen 3 und 4 m über Grund installiert. An Freilandstandorten sollen die in klimatologischen Messnetzen üblichen Standardhöhen von 2 m für Lufttemperatur/Luftfeuchte und 10 m für Windrichtung und -geschwindigkeit angestrebt werden. Weiterhin sind ergänzende Messstandorte über der Dachgrenzschicht bzw. an Hochpunkten projektiert.

Ziele des Messnetzes sind:

- Dynamisch-kleinräumige Erfassung des Mannheimer Stadtklimas mit Fokus auf Belastungssituationen (Hitze/Wärmeineffekt).
- Generierung qualitativer und quantitativer Wirkungsdaten typischer innerstädtischer Grünstrukturen (Straßenbegleitgrün, Grüngleis, Dachbegrünung bis Parkflächen) in deren Interaktion mit den Nutzungsumfeldern.
- Klein- und großskalige Wirkungs-Evaluierung der Ventilationsleitbahnen (Grünzüge).
- Ableitung spezifischer Maßzahlen für Planungsprozesse zur Verbesserung der klimatischen Situation in den Stadtquartieren und als Resilienz an den fortschreitenden Klimawandel.
- Makro- und mikroklimatische Modellierung der thermischen Situation und des Ventilationsgeschehens in Verbindung mit Kurzzeit-Prognosetools (0 bis 72 h).
- Verbesserte makro- und mikroklimatische Modellierung/Evaluierung von Planungsmaßnahmen (z.B. Grünflächen, Gründächer).
- Erfüllung eines verbesserten räumlichen Warnmanagements bei Störfallsituationen (Ausbreitungsmodell).

Bedingt durch die im Vergleich zum Freiland erheblich größeren mikroklimatischen Variabilität in urbanen Räumen ist zwecks Erreichung der gesteckten Ziele besonderer Wert auf die Messgenauigkeit der Lufttemperatur zu legen. Dies betrifft die Sensorik und insbesondere die Güte des Strahlungsschutzes, d.h. die Abschirmung des Sensors vor Eigenüberwärmung bei direkter und indirekter Bestrahlung (Sonnenschein und Globalstrahlung). Ein unzureichender Strahlungsschutz kann die Messgenauigkeit von Temperatursensoren um ein Vielfaches übertreffen. Während PT100-Temperatursensoren Genauigkeitswerte von $\pm 0,1$ °C erreichen, liegen sie bei kalibrierten NTC-Temperatursensoren zumeist im Bereich von $\pm 0,2$ bis $\pm 0,3$ °C.

Strahlungsschutzhütten – und hier vor allem passiv ventilierte Modelle – können dagegen bei direkter Sonneneinstrahlung wie auch bei Diffus- und Gegenstrahlung (z.B. Hausfassaden



oder Bodenoberflächen) bauartbedingt erheblich größere Abweichungen (sog. Strahlungsfehler) gegenüber der tatsächlichen Lufttemperatur verursachen. Die WMO (Weltorganisation für Meteorologie, englisch *World Meteorological Organization*) empfiehlt daher auch in Stadtklimamessnetzen, soweit möglich, den Einsatz aktiv ventilierter Strahlungsschutzhütten (OKE 2006). Der kontinuierliche Luftstrom der im inneren der Strahlungsschutzhütten positionierten Lüfter soll der Eigenüberwärmung (bzw. Auskühlung in klaren Nächten) entgegenwirken. Der notwendige Energiebedarf wird in der Regel via Netzstrom bereitgestellt; Solarmodule können bei hinreichender Insolation einen temporären Ersatz darstellen.

Da im sMArt roots-Teilprojekt Klimaresilienz angesichts der angestrebten außerordentlich hohen Messnetzdichte aus technischen (Wartungsarmut, geringer Energiebedarf) und pragmatischen Gründen Netzstrom nicht zur Verfügung stehen wird, können nur natürlich belüftete Strahlungsschutzhütten zum Einsatz kommen. Erfahrungen ähnlicher Stadtklima-Messnetzkonzepte, bei denen mit passiv belüfteten Strahlungsschutzhütten Strahlungsfehler bis deutlich über 2 °C beobachtet werden (EGLI & BAUM 2019), zeigten bereits im Vorfeld der Messnetzplanung (LÄHNE 2021), dass besondere Sorgfalt bei der Suche nach einem optimalen Strahlungsschutz notwendig ist.

Eine genauere Betrachtung des Arbeitsberichtes der Smart Regio Basel (Smart Regio Basel 2022) und der auf der Opendata-Plattform des Kanton Basel verfügbaren Messnetzdaten (Datenportal Basel-Stadt 2023) bestätigen den Mannheimer Ansatz: Zwar zeigt sich anhand des Messnetzes in Basel, dass bei einer Qualitätskontrolle die Messgenauigkeit kosteneffizienter IoT-Messnetze bis auf 0,2 °C an die Messung teurer Referenzsensoren herankommen kann (Smart Regio Basel 2022). Die Feststellung, dass *„Damit [] die Realisierung eines IoT-Stadtklima-Netzes mit z.B. 100 Sensoren deutlich kostengünstiger und gleichzeitig präziser als ein Messnetz mit 10 der derzeit gängigen Referenzsensoren (MeteoSchweiz-Standard)“* ist und *„Das günstigere und feinmaschigere Messnetz misst dabei zudem um mindestens 1 °C genauer“* (Smart Regio Basel 2022), lässt sich bei genauerer Analyse der Messnetzdaten vor allem während relevanter Witterungssituationen (hochsommerliche Strahlungswetterlagen) nicht bestätigen, wenn die Messsensorik in ungeeigneten Strahlungsschutzschutzhütten verbaut ist. Exemplarisch lässt sich dies anhand der Parallelmessungen am Standort der Klimastation des Schweizer Wetterdienstes (MeteoSchweiz) in Basel-Binningen aufzeigen (Datenportal Basel-Stadt 2023). Die Station Basel-Binningen / MeteoSchweiz ist eine Freiland-Referenzstation des Schweizer Messnetzes und mit aktiv belüftetem Strahlungsschutz entsprechend der WMO-Norm ausgerüstet. Auf dem Messgelände befindet sich ca. 15 m südöstlich eine Messstation des Smart Climate Luftklima-Messnetzes (Stand 2023 mehr als 200 Stationen) mit passiv ventilertem Strahlungsschutz (Abb. 2). Abb. 1 gibt den Tagesgang der Lufttemperatur für beide Messsysteme am 13.07.2022 (Strahlungstag mit weitgehend ungestörter Insolation) wieder.



Zu erkennen sind die erheblichen Temperaturdifferenzen, welche insbesondere am Nachmittag während der Phase der höchsten Tageswerte bis über 5 °C erreichen (passiv belüftete Station um diesen Betrag zu warm) und geringere, aber immer noch deutlich erkennbare Unterschiede während der Nacht (passiv ventilerte Station ca. 0,6 bis 0,8 °C kälter). Standortbedingte Effekte scheiden für die zu beobachtenden außerordentlichen Messunterschiede aus.

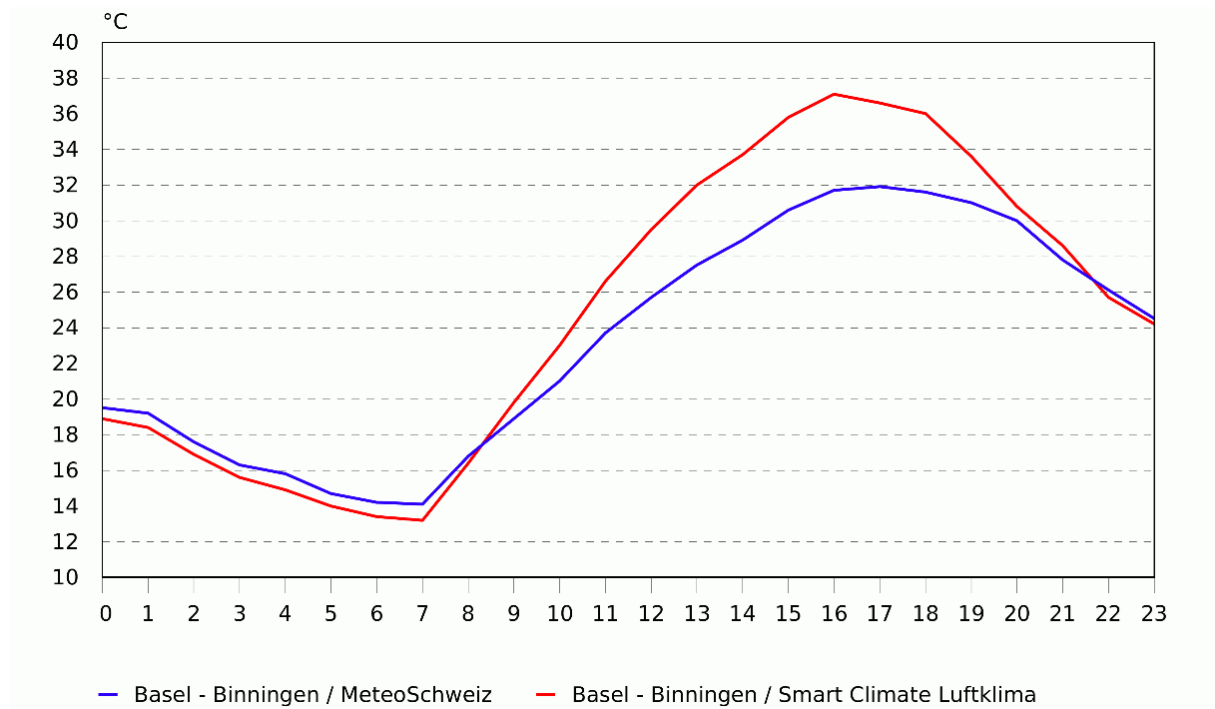


Abb. 1: Tagesgang der Lufttemperatur am 13.07.2022 auf dem Messfeld der Klimastation Basel-Binningen [Quelle: MeteoSchweiz, Präsidialdepartement des Kantons Basel-Stadt/Smart Climate Luftklima]

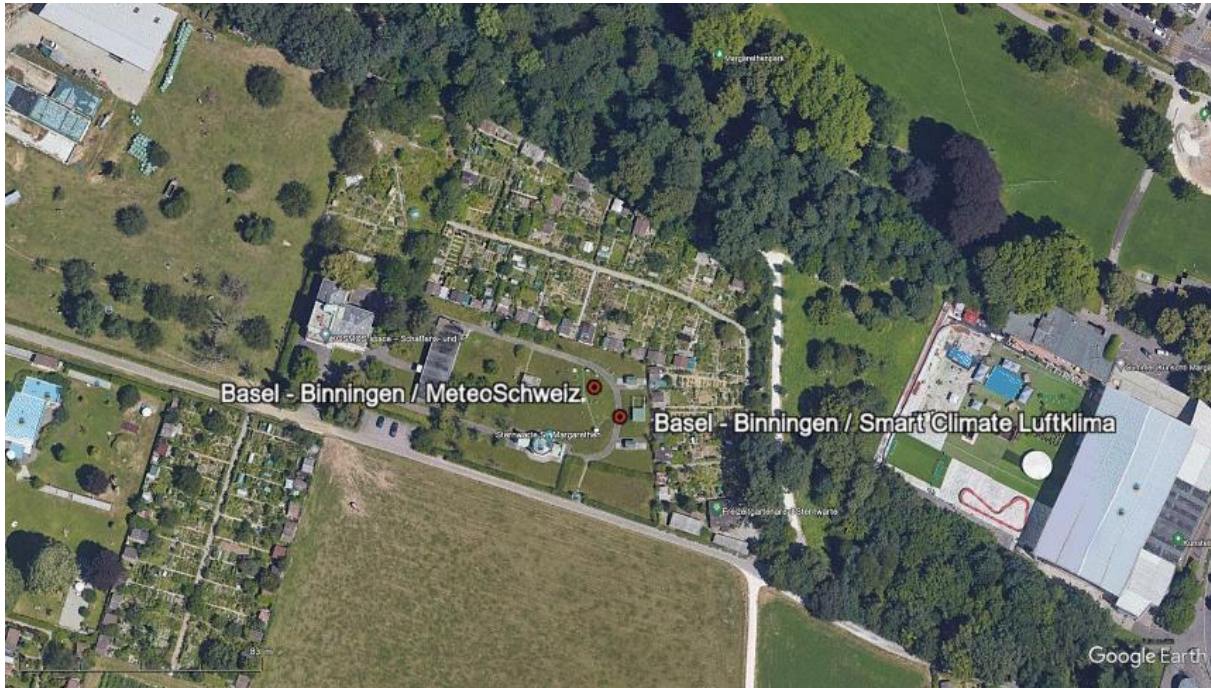


Abb. 2: Standort der MeteoSchweiz Klimastation Basel-Binningen [Quelle: Google Earth]

Die WMO hat der Strahlungsfehlerproblematik mit der Richtlinie zur Gewährleistung der Einheitlichkeit von Lufttemperaturmessungen Rechnung getragen (WMO 1996). Spezifischer Anlass ist der vermehrte Einsatz miniaturisierter Strahlungsschutzhütten in Lamellenbauweise im Zuge der weltweiten Automatisierung der Messnetze (BARNETT et al. 1998). Aufgrund der erheblichen Qualitätsunterschiede, der von Herstellern meteorologischer Messtechnik angebotenen Strahlungsschutzhütten, folgte 2003 ein internationaler Aufruf zu Referenzmessungen. Ziel ist es die Frage zu klären, ob ein Standardmodell in Analogie zur früher gebräuchlichen großvolumigen sog. Englischen Hütte (im englischen Sprachraum Stevenson Screen) gefunden werden kann, d.h. Messwerte zu erlangen, welche der wahren lokalen Lufttemperatur entsprechen und nicht durch bauartbedingte Artefakte des Strahlungsschutzes an der Position des Sensors verfälscht werden (BRANDSMA 2008a,b).

In Anlehnung an die Grundbedingungen der WMO-Richtlinie aus 1996 hat Météo-France (LEROY 2014) strikte Güteklassen (1 bis 5) u.a. für die Messgröße Temperatur festgelegt. Bzgl. der Eigenerwärmung der Strahlungsschutzhütten wird hier eine Genauigkeit von $\pm 0,4$ C insbesondere für Extremwerte vorgeschrieben. Der mittlerweile relativ dichten Studienlage bzw. den Veröffentlichungen und Konferenzpapieren der CIMO (Commission for Instruments and Methods of Observation – WMO) zufolge wurde bislang davon ausgegangen, dass nur aktiv belüftete Strahlungsschutzhütten diese Forderung erfüllen können. Neuere Referenzmessungen zeigen allerdings, dass auch passiv belüftete moderne Strahlungsschutzhütten die Ziele der WMO bzw. von Météo-France erreichen (SOTELINO et al. 2018, PARK et al. 2022). So konnte SOTELINO et al. im Rahmen eines Strahlungshüttenvergleichs des Belgischen Wetterdienstes nachweisen, dass die passiv belüftete Strahlungsschutzhütte



des Herstellers BARANI DESIGN Technologies s. r. o. (MeteoShield® Professional Pro) im Vergleich zum kalibrierten Referenzsystem eine sehr begrenzte Eigenerwärmung sowohl bei mittlerer als auch bei intensiver Strahlungseinwirkung aufweist. Bei mittlerer Sonneneinstrahlung und geringer Windgeschwindigkeit (< 1 m/s) beträgt die Überwärmungsrate in 95 % der Fälle (Konfidenz) $\leq 0,25$ °C.

Im Hinblick auf das im Stadtteil Neckarstadt im Frühjahr 2022 errichtete Pilotmessnetz diente die SOTELINO-Studie als Entscheidungsgrundlage für die Auswahl der Temperatur-/Luftfeuchte-Messsysteme. Die vom Hersteller angegebene etwas geringere Genauigkeit der Halbleiter-Temperaturmessgeber ($\pm 0,2$ °C) gegenüber Pt100-Messgebern ($\pm 0,1$ °C) wurde als nachrangig eingeordnet zumal Vergleichsmessungen mit Hilfe eines kalibrierten Temperaturdatenloggers der Fa. Thies CLIMA (HandyLog 9.3406.00.000) durchgeführt werden sollten.

Obwohl die Referenzmessungen von SOTELINO et al. als maßgeblich für die Zielerfüllung des sMArt roots-Teilprojektes Klimaresilienz betrachtet wird, ist es im Interesse des Projektes nachzuprüfen, ob sich das Studienergebnis auch auf die reale mikroklimatische Variabilität in Mannheim übertragen lässt. Des Weiteren sollte die Frage geklärt werden, ob die Messwerte des sMArt roots-Klimamessnetzes vergleichbar bzw. homogen zum Klimamessnetz des FB 61 (Stadtklimastationen) sind. Zu diesem Zweck wurden an den beiden Stadtklimastationen „Schlossgartenstraße“ und „E4 Dach“ (FB 61) im April 2022 im Parallelbetrieb BARANI METEOHELIX® IoT PRO Messsysteme installiert. Sie sind baugleich zu den Stationen des Pilotversuchs „Neckarstadt“ und erfassen die Parameter Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Windrichtung. Die NTC-Messgeber für Temperatur (Genauigkeit $\pm 0,2$ °C, Tabelle 1) und Luftfeuchte (Genauigkeit $\pm 1,8$ %) sind werkskalibriert.

Technik und Standortwahl für die Stadt-Klimastationen des FB 61 orientieren sich an der *Richtlinie - Automatische nebenamtliche Wetterstationen im DWD des Deutschen Wetterdienstes* (DWD 2020) sowie dem *Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites* der WMO (OKE 2006). An der Station „Schlossgartenstraße“ (FB 61) werden die Parameter Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Windrichtung erfasst, seit dem Sommer 2022 auch zusätzlich Globalstrahlung und Sonnenscheindauer. Die Pt100-Messgeber für Temperatur (Rotronic HC2A-S3, Genauigkeit laut Datenblatt $\pm 0,1$ °C) und Luftfeuchte (Genauigkeit $\pm 1,5$ %; Tabelle 1) sind in der aktiv ventilierten Strahlungsschutzhütte LAM630 des Herstellers Eigenbrod untergebracht. Der Strahlungsschutzhüttentyp ist Standard im Klimamessnetz des DWD. Deren Eignung kann den Ergebnissen der Temperaturparallelmessungen zum früheren Standard „Englische Hütte“ an deutschen Klimareferenzstationen entnommen werden (HANNAK & BRINCKMANN 2020).

Die primäre Funktion von Strahlungsschutzhütten besteht, wie bereits kurz angesprochen, darin, die Sensorik am Tag vor direkter oder indirekter Sonneneinstrahlung und in der Nacht vor Ausstrahlung zu schützen. Weiterhin soll die Sensorik vor Benetzung durch Nebel bzw.



Wassertropfen (Nieselregen, Regen) bewahrt werden, da diese in Verbindung mit Wind zu einer Abkühlung des Sensors unter die wahre Lufttemperatur führen kann (Verdunstungskälte). Allerdings steht der Schutz vor Strahlung und Nässe im Widerspruch zu der Forderung nach ausreichender Belüftung, da sich bei unzureichender Belüftung innerhalb der Strahlungsschutzhütten ein eigenständiges Mikroklima entwickeln kann. Dessen Ausprägung hängt von der Größe der Schutzhütte, den meteorologischen Bedingungen (Wind, Strahlung und Niederschlag), dem Design der Abschirmung sowie der Belüftungsart (passiv, aktiv) ab.

Strahlungsschutzhütten sind in der Regel in Lamellenform konzipiert. Deren Außenflächen sollen einen möglichst hohen Reflexionsgrad aufweisen, um die Erwärmung der Teller bzw. Lamellen und folglich der einströmenden Luft zu minimieren. Eine aktive Belüftung soll diesen Effekt nachhaltig reduzieren, wobei – wie vorangehend erwähnt – der Grundsatz ‘je mehr Ventilation umso besser’ nicht zwangsläufig zum Vorteil reicht, da ein mit Feuchtigkeit benetzter Sensor bei intensivem Luftstrom Abkühlungseffekten ausgesetzt sein kann, also negativ verfälschend wird, während bei intensiver Sonneneinstrahlung eine intensive Ventilation wiederum vorteilhaft ist, d.h. der zu messende Wert der wahren Lufttemperatur näherkommt. Die LAM630 soll diesen Grenzbedingungen mittels fotosensorgesteuerter Lüfterregelung Rechnung tragen.

Dem Bauprinzip folgend sollten bei gleicher Messsensorik in der LAM630 und in der BARANI MeteoShield® Professional während Nichtstrahlungswettersituationen (vollständig bedeckter Himmel und ausreichende natürliche Ventilation) im Prinzip gleichartige Messwerte erfasst werden. Bei intensiver Sonneneinstrahlung bzw. hohen Globalstrahlungswerten sind dagegen in der LAM630 etwas niedrigere Temperaturen zu erwarten. Allerdings zeigten die ersten Vergleichsdaten ab Anfang April 2022 sowohl bei bedecktem Himmel als auch bei Sonnenschein in der LAM630 regelmäßig $> 0,2$ °C höhere Temperaturwerte als in der BARANI MeteoShield® Professional. Eine naheliegende Erklärung für dieses Verhalten kann in einer, entgegen der Zusage des Herstellers, offenbar größeren Ungenauigkeit der Messgeber zu suchen sein: Deren Genauigkeit konnte vor Inbetriebnahme (Stadtklimastation 10/2022, BARANI Parallelstation 04/2023) nicht geprüft werden, da das Referenzgerät Thies HandyLog erst ab Mai 2023 zur Verfügung stand (vgl. Kapitel 2.1. S. 9 bis 10).

Weiterhin sei noch auf den Faktor thermische Trägheit als Ursache für ungleiche Temperaturverläufe in Strahlungshütten hingewiesen. So beeinflusst die Masse der Sensorik (Filterkappe, 3- bzw. 4-Leiterschaltung zur Kompensation des Leitungswiderstandes) teilweise recht deutlich die Einstellzeit des Messgebers auf tatsächliche Temperaturänderungen. Dieser Effekt sowie die abweichenden Messwerte zu Beginn des Vergleichs bewogen zur Installation eines dritten Messsystems, welches der Verfasser des Arbeitsberichtes als Dauerleihgabe zur Verfügung stellte. Es setzt sich aus einem Pt100-Temperaturmessgebers und dem Datenlogger OPUS10 THE der Fa. LUFFT zusammen. Der Pt100 wurde mittels zweier



geeichter Quecksilberthermometer aus Beständen des DWD (Deutscher Wetterdienst) in Thermoskannen, welche mit destilliertem Eiswasser (0,0 °C) und körperwarmem Wasser befüllt waren auf Genauigkeit geprüft. Im Ergebnis konnte bei den Kalibrierpunkten 0,0 °C und 36,2 °C jeweils eine Sensorabweichung von - 0,1 °C festgestellt werden. In den nachfolgenden Auswertungen ist dieser Korrekturfaktor bereits berücksichtigt. Der Messgeber wurde Ende April 2022 in der BARANI MeteoShield® Professional unterhalb des MeteoTemp RH+T positioniert. Alle drei Messsysteme erfassen die Temperatur in 10-Minutenintervallen für die Funktionen „Mittelwert“, „Maximum“ und „Minimum“.

Die Abb. 3 (vgl. S. 12) zeigt den Aufbau der Stadtklimastation mit der LAM630 und der BARANI MeteoShield® Professional inklusive der Position des MeteoTemp RH+T sowie des Pt100 zum Datenlogger OPUS10 THE.

Element	Messbereich, Auflösung	Genauigkeit Ansprechgeschwindigkeit	Ansprechzeit T(63%)
Lufttemperatur	- 40 ... + 105 °C, 0,1 °C	± 0,2 °C; - 40 ... 105 °C	5 – 30 s
Luftfeuchte	0 ... 100 % RH, 0,1 %	± 1,8 % RH bei 25 °C	8 – 30 s
Windgeschwindigkeit	0 ... 85 m/s, 0,1 m/s	< 0,2 m/s, < 5m/s < 2 % bei 0,3 - 50 m/s	-
Windrichtung	0 ... 360 °, 1 °	± 2 ° WG > 1 m/s	-

Tab. 1: Technische Daten (Werksangaben) der BARANI LoRaWAN-Klimastationen im MKB sMArt roots-Teilprojekt Klimaresilienz

Element	Messbereich, Auflösung	Genauigkeit Ansprechgeschwindigkeit	Ansprechzeit T(90%)
Lufttemperatur	- 40 ... + 85 °C, 0,1 °C	± 0,1 °C; - 40 ... + 85 °C	< 20 s
Luftfeuchte	0 ... 100 % RH, 0,1 %	± 1,5 % RH bei 25 °C	< 10 s
Windgeschwindigkeit	0 ... 75 m/s, 0,1 m/s	± 0,2 m/s, ± 2 % (5 m/s ... 60 m/s)	-
Windrichtung	0 ... 360 °, 1 °	± 2 °	-

Tab. 2: Technische Daten (Werksangaben) der Stadtklimastationen des FB 61

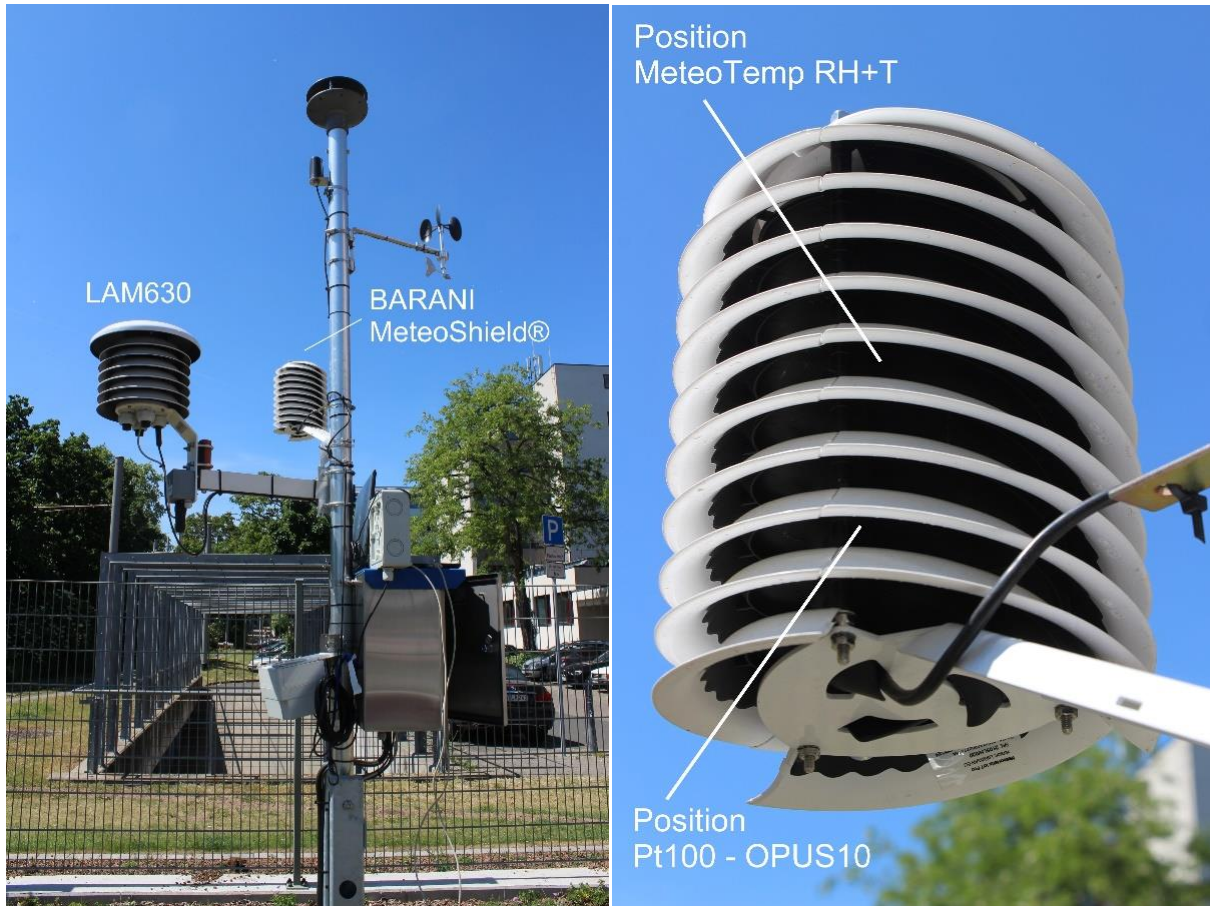


Abb. 3: Messsysteme an der Stadtklimastation „Schlossgartenstraße“ (FB 61)



2 Datenanalyse

2.1 Referenzmessung: THIES HandyLog / BARANI MeteoShield® Professional

Am 18.05.2022 wurden in der Geschäftsstelle der sMArt City Mannheim GmbH 14 BARANI MeteoShield® Professional Stationen unter laborähnlichen Bedingungen auf Messgenauigkeit geprüft. Vorbereitet und unter seiner Leitung durchgeführt wurden die Referenzmessungen (Abb. 5) von Johannes Fürle, Doktorand und Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Forschungsgruppe Geoinformatik des Geographischen Instituts der Universität Heidelberg. Als Referenzgerät fungierte ein zertifiziert kalibrierter THIES CLIMA HandyLog mit Hygro-Thermogeber-Compact. Messstationen und Referenzgerät wurden in einer großvolumigen Styroporkiste positioniert. Um Beeinflussungen zu vermeiden waren während des von 09:08 MESZ bis 12:13 MESZ laufenden Versuchs im Laborraum keine Personen anwesend. Die ersten beiden Stunden des Versuchs dienten der Einpendelung der Sensorik. Zur Auswertung gelangte die letzte Versuchsstunde (11:00 bis 12:00 MESZ). Die Temperatur des Referenzgerätes in der Styroporkiste lag in dieser Zeit konstant bei 25,4 °C. Alle BARANI MeteoShield® Professional Messstationen zeigten im Auswertezeitraum gleichfalls konstante Messwerte.

Im Ergebnis (Abb. 4) zeigten die Messwerte eines BARANI Messsystems vollständige Übereinstimmung zum Referenzgerät (ΔT 0,0 °C), 10 Systeme eine negative Abweichung von 0,1 °C und drei Systeme eine negative Abweichung von 0,2 °C. Positive Abweichungen wurden nicht registriert.

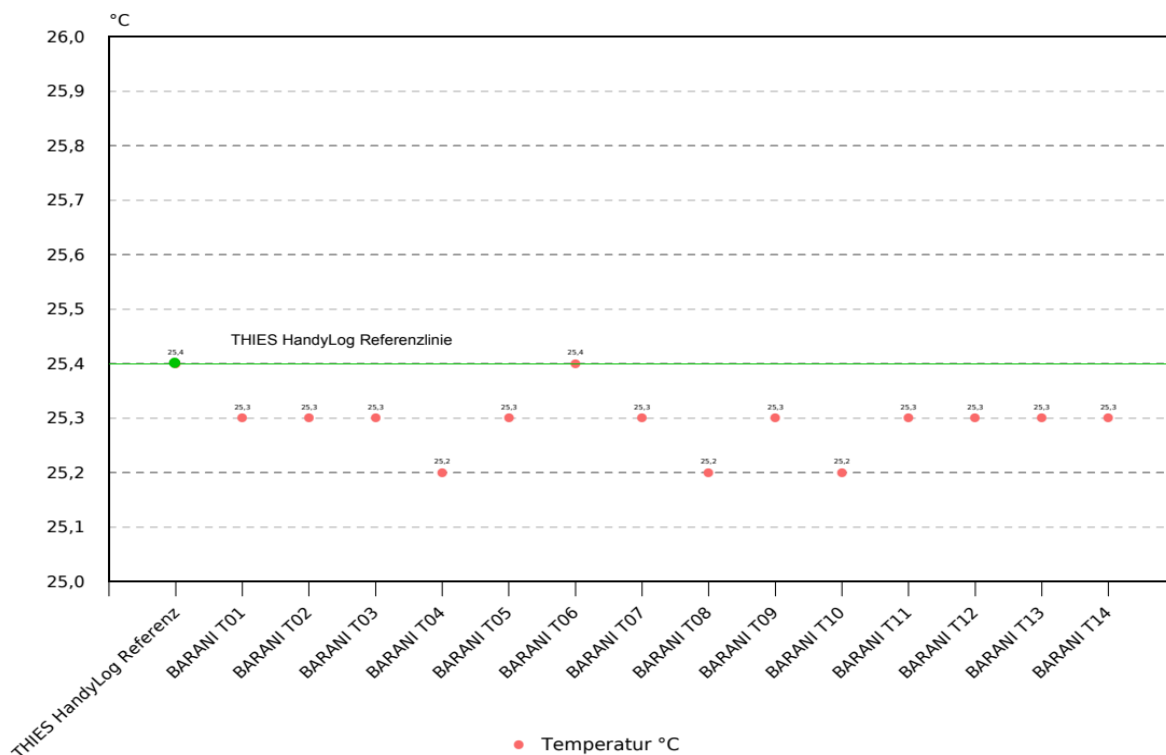


Abb. 4: Vergleichsmessung THIES HandyLog / 14 BARANI MeteoShield® Professional Messstationen, Mittelwerte im Auswertezeitraum 11:00 - 12:00 MESZ



Abb. 5: Labor-Vergleichsmessungen – Versuchsaufbau



2.2 Stations-Vergleichsmessung: THIES HandyLog / „Schlossgartenstraße“

Da das Referenzmesssystem THIES HandyLog nicht hinreichend gegen Niederschlag geschützt ist, konnten zunächst keine umfangreicheren Vergleichsmessungen an der Stadtklimastation „Schlossgartenstraße“ (FB 61) vorgenommen werden. Voruntersuchungen zeigten im Spätsommer bzw. Herbst 2023, dass Witterungssituationen mit variierendem Temperaturverlauf und insbesondere mäßiger bis hoher Globalstrahlung bzw. Besonnung für Vergleichsmessungen ungeeignet sind. Weiterhin führen asynchrone Einstellzeiten (Latenz) der Temperatur-Luftfeuchtemessgeber häufig zu unerwünschten Datenartefakten. Ungeeignet sind ebenfalls Niederschlagsituationen und Wetterlagen mit hoher Luftfeuchte (> 90 %). Benetzungen der Messgeber und hieraus resultierende Abkühlungseffekte können Verfälschungen zur wahren Lufttemperatur verursachen (Verdunstungskälte). Deutlich besser geeignet sind hingegen niederschlagsfreie Wettersituationen mit bedecktem Himmel und relativ konstantem Temperaturverlauf. Entsprechende Verhältnisse waren während einer Stationswartung am Nachmittag des 09.12.2022 gegeben. Abb. 6 gibt den Temperaturgang anhand der 10-Minutenmittelwerte im Zeitraum zwischen 15:00 MEZ und 16:40 MEZ für die vier Messsysteme

- Stadtklimastation FB 61 Fa. F&C Klimamesstechnik = Messgeber in LAM630
- BARANI MeteoHelix® IoT Pro = Messgeber MeteoTemp RH+T
- LUFFT OPUS10 = Messgeber in MeteoShield® Professional
- THIES HandyLog = Messgeber in LAM630

wieder. Die zweistündige Einpendelphase (Angleichung an die Lufttemperatur) nach Positionierung des Messgebers in der LAM630 um ca. 14:00 MEZ blieb unberücksichtigt.

Im Bewertungszeitraum ging die Temperatur am Referenzgeber (Genauigkeit 2 Nachkommastellen) bei geringen Schwankungen von 3,71 auf 3,43 °C zurück. Im Vergleich zu den anderen Messgebern zeigen sich nicht vollständig synchrone Verläufe. Wie bereits angesprochen ist dies auf die unterschiedliche thermische Trägheit der Messgeber zurückzuführen.

Bei genauer Betrachtung zeigt sich, dass der korrigierte Messgeber des LUFFT OPUS10 – abgesehen von Trägheitseffekten - nahezu exakt mit dem THIES HandyLog übereinstimmt. Im Betrachtungszeitraum beträgt die mittlere Differenz 0,03 °C. Dies bestätigt im Ergebnis die relativ unkonventionelle Messgeberkalibrierung des OPUS10-Temperaturgebers im April 2022.

Der Rotronic HC2A-S3 der Stadtklimastation FB 61 verzeichnet hingegen permanent etwa 0,2 °C (im Mittel 0,23 °C) höhere Werte als der THIES HandyLog. Wie nachfolgend dargelegt, wird der Differenzfaktor durch die Feinauswertung der Stationsmessdaten bestätigt. Wahrscheinlich unbeabsichtigt wurde von der Fa. Rotronic für die Stadtklimastation ein



Messgeber etwas außerhalb der technischen Spezifikationen (Genauigkeit $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$) ausgeliefert. Die ermittelte Abweichung von $+ 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ wurde in den Parametereinstellungen des Stationsdatenloggers Anfang April 2023 als fortwährender Korrekturfaktor eingepflegt.

Im Vergleich zeigt der BARANI MeteoTemp RH+T Messgeber einen weniger harmonischen Temperaturverlauf und zumeist etwa $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ (im Mittel $- 0,08 \text{ }^\circ\text{C}$) niedrigere Werte als der THIES HandyLog. Zwischen der Stadtklimastation und der BARANI MeteoHelix® IoT Pro ergibt sich somit eine mittlere Differenz (ΔT) von $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Die Auswertungen der Stationsmessreihen (vgl. Kapitel 2.3) bestätigen die ermittelten Abweichungen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen:

- Der Rotronic HC2A-S3 der Stadtklimastation FB 61 zeigt ein ΔT von ca. $+ 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$
- Der BARANI MeteoTemp RH+T zeigt ein ΔT von ca. $- 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$
- Der korrigierte LUFFT OPUS10 Pt100 zeigt ein ΔT von ca. $0,0 \text{ }^\circ\text{C}$.

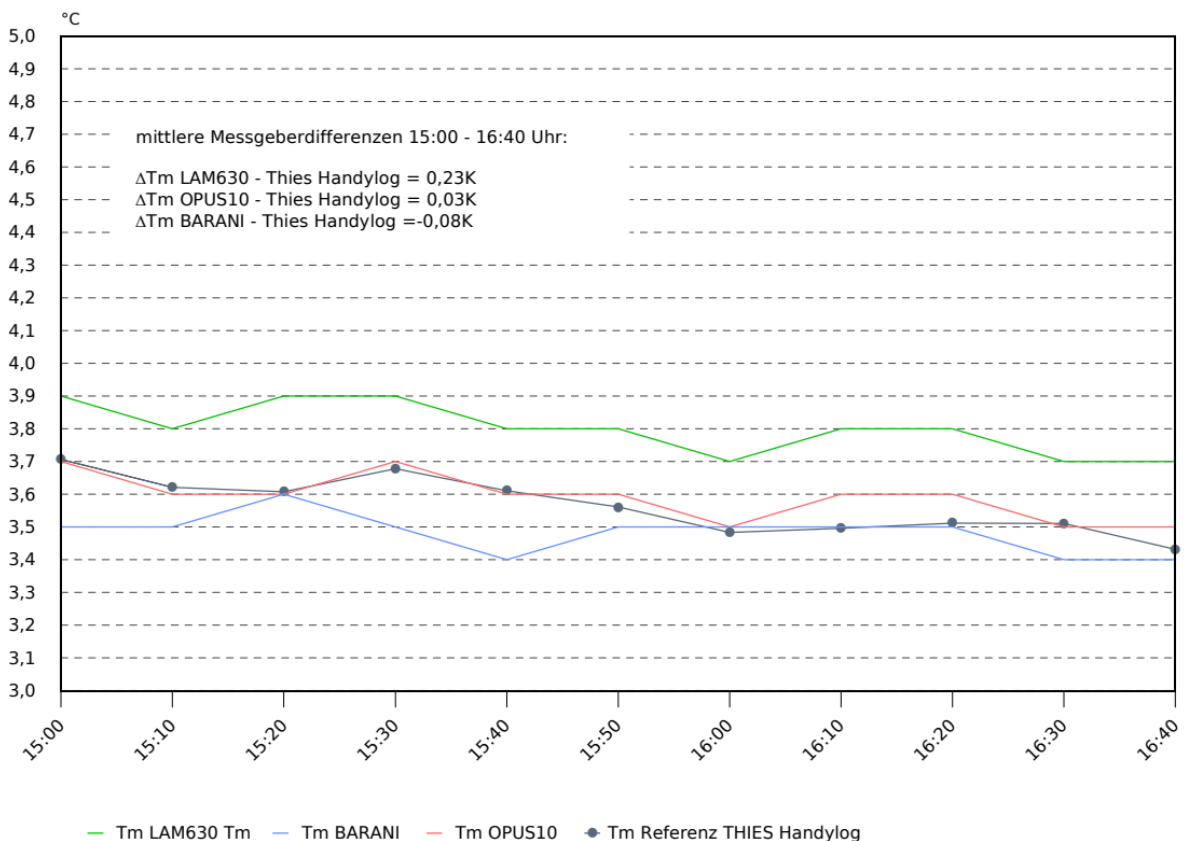


Abb. 6: Referenzmessung an der Station „Schlossgartenstraße“ (FB 61) am 09.12.2022



2.3 Messdatenanalyse Nichtstrahlungstage

Zunächst wurden die Temperaturmessreihen an den Stationen „Schlossgartenstraße“ (Stadtklimastation FB 61, BARANI MeteoHelix® IoT Pro, LUFFT OPUS10) und „E4-Dach“ (Stadtklimastation FB 61, BARANI MeteoHelix® IoT Pro) auf Übereinstimmung (Messgeberabweichungen) geprüft. Geeignet sind – wie bereits angesprochen – niederschlagsfreie nächtliche Nichtstrahlungssituationen, d.h. bedeckter Himmel mit geringen Temperaturamplituden, ausreichender Ventilation und Luftfeuchtwerten < 95%. Nächtliche Zeiträume sind zu bevorzugen, da im Gegensatz zum Tag keine Globalstrahlungseinflüsse zum Tragen kommen. Vor allem im Sommerhalbjahr werden am Tag auch bei vollständig bedecktem Himmel und vertikal relativ dichter Bewölkung häufig Globalstrahlungswerte > 200 W/m² beobachtet. Solche Strahlungswerte können zu deutlichen Erwärmungseffekten an Objektoberflächen führen. Im Alltag bemerkt man dies beispielsweise bei Einstieg in ein geparktes, dunkel lackiertes Fahrzeug.

Abb. 7 zeigt den mittleren Temperaturverlauf an Nichtstrahlungstagen während der zweiten Nachthälfte an der Station „Schlossgartenstraße“ für die Stadtklimastation FB 61 und für die Parallelmessungen in der BARANI-Strahlungsschutzhütte sowie die entsprechenden mittleren Temperaturdifferenzen (ΔT) zwischen

- den Messgebern der Stadtklimastation (LAM630) und der BARANI MeteoHelix® IoT Pro (BARANI),
- den Messgebern der Stadtklimastation (LAM630) und der korrigierten LUFFT (OPUS10) sowie
- den Messgebern der BARANI MeteoHelix® IoT Pro (BARANI) und der korrigierten LUFFT (OPUS10).

Bedingt durch den typischerweise im Verlauf der Nacht flacher werdenden Temperaturgang konzentriert sich die Auswertung auf die zweite Nachthälfte. Um aus der Witterungssituation des Vortages resultierende mögliche nachlaufende Artefakte zu minimieren, wurden nur Fälle berücksichtigt, bei denen am Vortag eine Sonnenscheindauersumme < 1 Stunde registriert wurde. Insgesamt konnten unter den vorgenannten Prämissen im Zeitraum Oktober bis Dezember 2022 insgesamt 22 Fälle ausgewertet werden.

Die Differenzwerte bestätigen das Ergebnis der Referenzmessung zum THIES Handy-Log. Der Rotronic HC2A-S3 der Stadtklimastation FB 61 zeigt im Vergleich zum Pt100 des korrigierten LUFFT OPUS10 ein ΔT von ca. + 0,2 °C (+ 0,21° C), der BARANI MeteoTemp RH+T gegenüber dem korrigierten Pt100 des LUFFT OPUS10 ein ΔT von ca. - 0,1 °C (- 0,05 °C) und der Rotronic HC2A-S3 der Stadtklimastation gegenüber dem BARANI MeteoTemp RH+T ein ΔT von ca. + 0,3 °C (+ 0,26 °C).



Abb. 8 gibt den mittleren Temperaturverlauf und die Differenzen zwischen den Messgebern der Stadtklimastation FB 61 und der BARANI-Station an der Dachstation E4 für Nichtstrahlungswetterlagen im Zeitraum Oktober bis Dezember 2022 wieder. Im Ergebnis zeigt sich im Mittel zwischen LAM630 und BARANI ein ΔT von ca. + 0,1 °C (+ 0,06 °C). Der Differenzwert lässt ohne vergleichende Referenzmessung allerdings keine unmittelbare Aussage über tatsächliche Nullpunktabweichungen zu. Obwohl der Auswertung die gleichen Fälle zu Grund liegen, wird auf einen diesbezüglichen direkten Messgebervergleich der beiden Stadtklimastationen (FB 61) verzichtet da trotz der expliziten Nichtstrahlungswettersituationen niederschwellige lokale Stadtklimaeffekte (z.B. anthropogene Abwärme von Heizungen) nicht ausgeschlossen werden können. Weiterhin können adiabatische Effekte zum Tragen kommen: die Temperaturmessgeber an der Dachstation befinden sich ca. 28 m über Straßenniveau, was in labil geschichteter trockener Atmosphäre theoretisch bereits eine messbare vertikale Temperaturabnahme (~ 0,2 bis 0,3 °C) zur Folge haben kann.

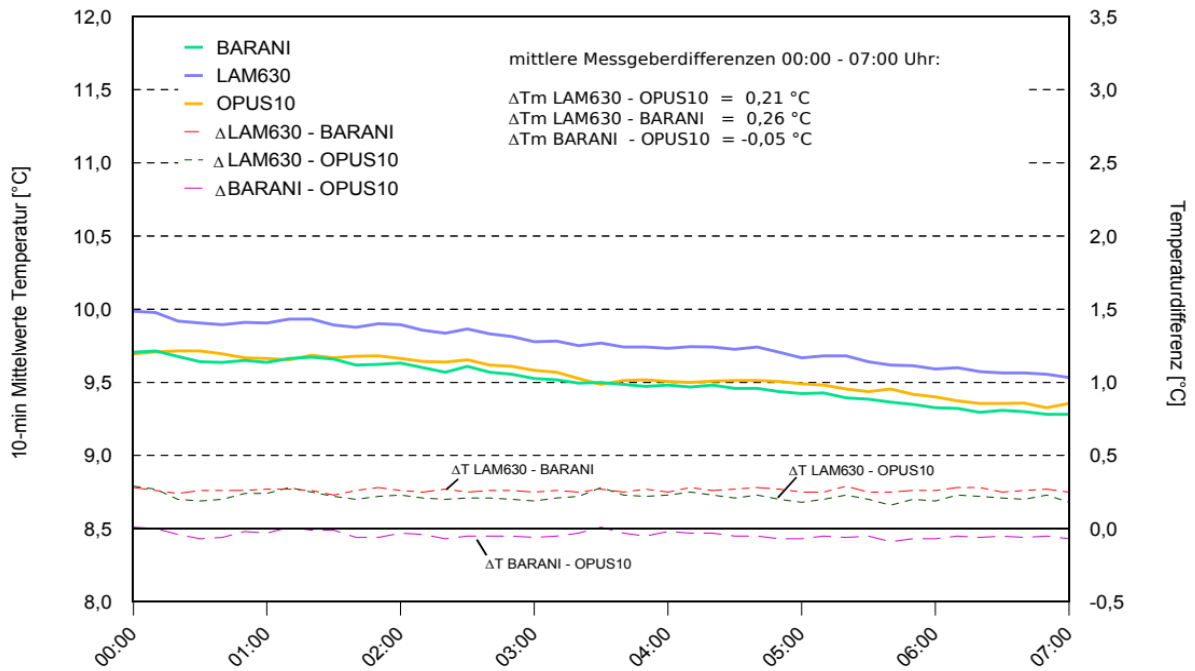
Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Messgeber der Station E4-Dach maximal um 0,1 °C divergieren. Weitere messgeberbedingte Ungenauigkeiten sind abgesehen von Trägheitseffekten auszuschließen.

An der Station „Schlossgartenstraße“ (FB 61) divergieren die Messgeber Rotronic HC2A-S3 und BARANI MeteoTemp RH+T um ca. 0,3 °C. Die Referenzmessung des THIES HandyLog und die Auswertung der Nichtstrahlungswetterlagen weisen übereinstimmend für die Stadtklimastation (FB 61) auf eine Nullpunktabweichung von +0,2 °C und für die BARANI MeteoHelix® IoT Pro von - 0,1 °C hin. Beide Faktoren werden für die witterungsspezifische Bewertung der Strahlungsschutzeigenschaften berücksichtigt. Weitere relevante messgeberbedingte Ungenauigkeiten sind abgesehen von Trägheitseffekten auszuschließen.

Thermische Trägheitseffekte treten bei nahezu allen Messgebersystemen auf und sind im Wesentlichen mit deren physikalischer Masse assoziiert. So sind Kombisensoren für Temperatur und Luftfeuchte, wie der Rotronic HC2A-S3, mit Filterkappen gegen Verschmutzung ausgestattet. Die Filterkappen führen zusammen mit der Masse des Messfühlers gegenüber singulären Pt100- oder NTC-Temperatursensoren zu deutlich längeren Einstellzeiten. Bei Kombisensoren wie dem Rotronic HC2A-S3 wird bei Messeinheiten ohne Filter eine typische Einstellzeit $T_{90} < 20$ s bei V (Luftstrom) = 1,5 m/s angegeben und bei Messeinheiten mit Membranfilter (Stadtklimastation FB 61) eine typische Einstellzeit $T_{90} < 1,5$ min. bei $V = 1,5$ m/s. T_{90} bedeutet, dass 90% der Temperaturanpassdifferenz in der gegebenen Zeit erreicht wird. BARANI gibt für seinen MeteoTemp rH+t eine Einstellzeit T_{63} von 5 bis 30 s an ohne näher auf den Faktor V einzugehen.

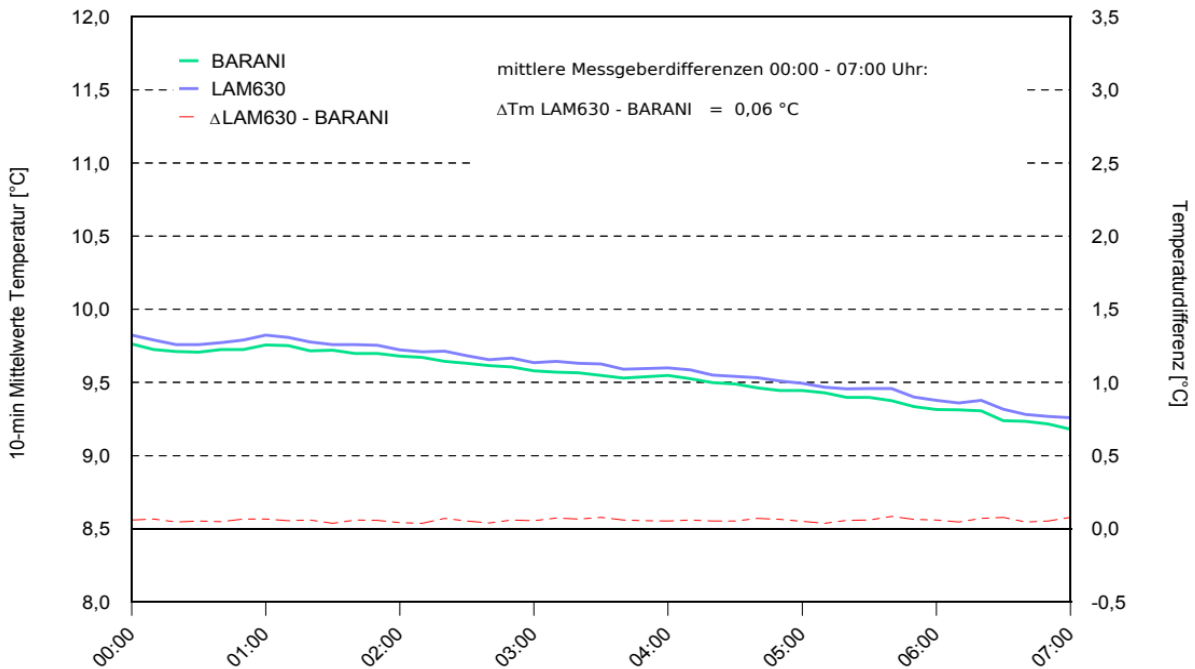


VERGLEICH AKTIV/PASSIV VENTILIERTER STRALUNGSSCHUTZHÜTTEN



N = 22 (BARANI fehlwertergänzt)

Abb. 7: Mittlerer Temperaturverlauf und mittlere Differenzen (ΔT) der 10-Minuten-Mittelwerte am Standort „Schlossgartenstraße“ (FB 61) im Zeitraum Mai bis August 2022 an Nichtstrahlungstagen während der zweiten Nachthälfte



N = 22

Abb. 8: Mittlerer Temperaturverlauf und mittlere Differenzen (ΔT) der 10-Minuten-Mittelwerte am Standort „E4 Dach“ (FB 61) im Zeitraum Mai bis August 2022 an Nichtstrahlungstagen während der zweiten Nachthälfte



Abb. 9 verdeutlicht den beschriebenen Effekt anhand des Temperaturganges am 10.11.2022 an der privaten Wetterstation des Berichtverfassers in Römerberg. Hier sind in einer LAM630 seit Oktober 2022 im Parallelbetrieb ein Rotronic HC2A-S3 Kombisensor mit Membranfilter und ein Pt100-Temperatursensor installiert. Die Messwerte werden analog zu den beiden Stadtklimastationen (FB 61) mittels Datenlogger in 10-Minutenintervallen erfasst. Der 10.11.2022 zeichnete sich durch überwiegend geringe Bewölkung aus (Tagessumme der Sonnenscheindauer an der Station in Römerberg 8,1 h, an der DWD-Station Mannheim 8,0 h). In den Nachtstunden herrschten überwiegend schwache Luftbewegungen vor während am Tag der Wind etwas auflebte (mittlere Windgeschwindigkeit 10 m ü. Gr. zwischen 2 und 3 m/s). Bezüglich der Temperaturwerte sind die Maxima der 10-Minutenintervalle sowie die Differenzen (ΔT) der beiden Messgeber dargestellt.

Sehr deutlich zeigt der Messgebervergleich die unterschiedlichen thermischen Trägheitseffekte während der Temperaturrückgang- und Temperaturanstiegphasen. In der relativ gleichmäßigen Temperaturrückgangphase von 00:00 MEZ bis 07:00 MEZ meldet der Pt100-Sensor zumeist ca. 0,1 °C niedrigere Werte. Nach Sonnenaufgang divergieren die Temperaturen in der Anstiegsphase deutlich. Zwischen 08:30 MEZ und 11:00 MEZ verzeichnet der Pt100 zwischen 0,5 und 0,8 °C höhere Werte. Bis zum Erreichen der Tageshöchsttemperatur gegen 14:30 MESZ geht der Differenzwert zwar etwas zurück. Jedoch werden am Pt100 weiterhin höhere Werte ($\Delta T + 0,2$ bis $+ 0,4$ °C) registriert. In der nachfolgenden Temperaturrückgangphase ab 14:50 wandelt sich das Bild unvermittelt und es werden bis zum Abend ausschließlich negative Differenzen ($\Delta T - 0,1$ bis $- 0,3$ °C) gemessen.

Festzuhalten ist, dass während des beispielhaft dargestellten herbstlichen Strahlungstages der schneller reagierende Pt100 unter gleichen Messbedingungen in der LAM630 (Standardstrahlungshütte im DWD Messnetz) etwas niedrigere Maxima verzeichnet als der thermisch trägere Temperatur-Luftfeuchte-Kombisensor.

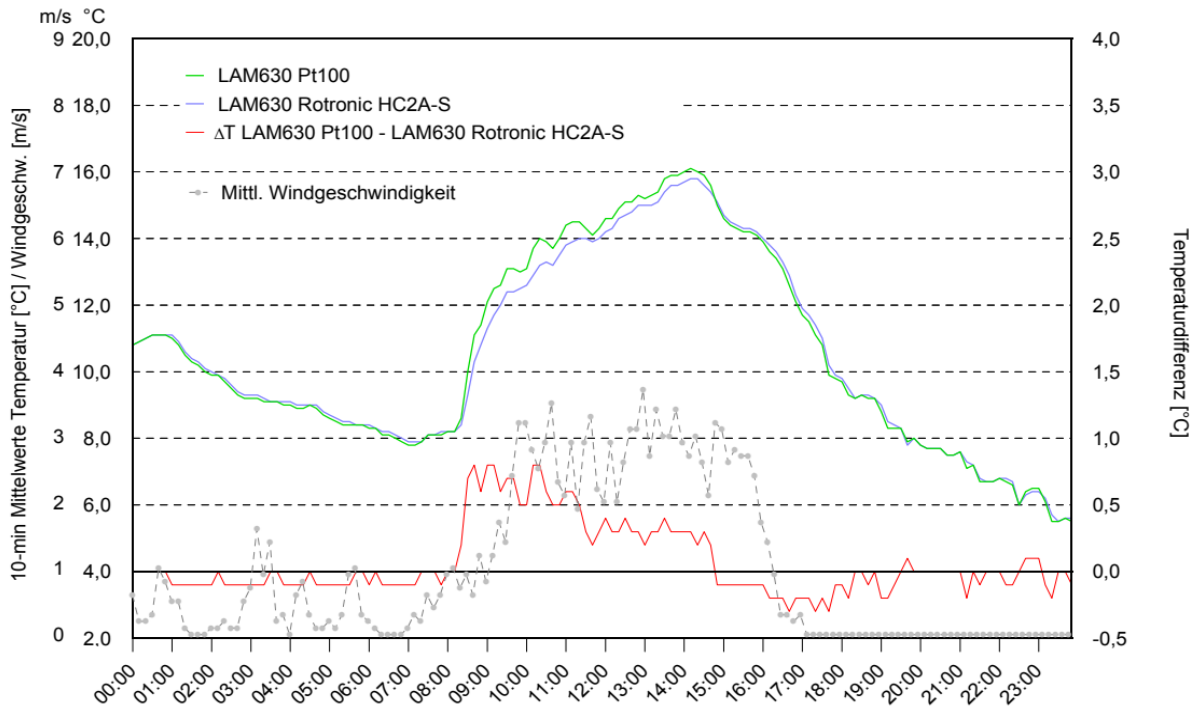


Abb. 9: Temperaturtagesgang am 10.11.2022 in Römerberg

2.4 Witterungsspezifischer Strahlungshüttenvergleich

Die Bewertung der Strahlungseigenschaften des BARANI MeteoShield® Professional konzentriert sich auf den Zeitraum von Mai bis August 2022. Im Jahresverlauf werden in diesen Monaten die höchsten Einstrahlungswerte erreicht, so dass sich bauartbedingte Strahlungsfehler von Lamellenschutzhütten hier am deutlichsten ausprägen.

Der Analysezeitraum zeichnete sich insbesondere in den Monaten Juni bis August durch außergewöhnlich hohe Sonnenscheindauerwerte und überdurchschnittlich hohe Temperaturen aus.

Ausgewertet wurden die 10-Minutenmittelwerte und 10-Minutenmaxima in Abhängigkeit von der täglichen Sonnenscheindauer. Die Tageswerte der Sonnenscheindauer (DWD-Wetterstation Mannheim) wurden nach dem Schema

- ≥ 2 bis < 5 h
- ≥ 5 bis < 8 h
- ≥ 8 bis < 11 h
- ≥ 11 h
- ≥ 13 h

klassifiziert. Die gemessene maximale Tagessumme der Sonnenscheindauer kann in Mannheim unter optimalen meteorologischen Bedingungen zur Zeit der Sonnenwende (21.6.) bis 15,8 h erreichen. Auch bei wolkenfreiem Wetter sind Werte über 15 h bedingt durch



Luftrübungen relativ selten. Der höchste Tageswert lag im Sommer 2022 bei 15,5 h. Tage ohne Sonne werden in den Sommermonaten gelegentlich beobachtet. Im Analysezeitraum wurde allerdings nur an drei Tagen eine Summe von weniger als 2 h registriert. Aufgrund der geringen Fallzahl konnten diese Situationen in der Auswertung nicht berücksichtigt werden. Die sonnenscheindauer-assoziierten Auswertungen erfolgen in Form mittlerer Tagesgänge.

Da am Stationsstandort „E4-Dach“ (FB 61) erst im Juni die Parallelstation installiert wurde, erfolgt hier eine getrennte Analyse. Bzgl. der Parallelmessungen der BARANI MeteoHelix® IoT Pro ist zu beachten, dass infolge des lokal nicht störungsfreien LoRaWAN-Netzzuganges am Standort „Schlossgartenstraße“ (FB 61) die tägliche Datenbelegungsquote im Gegensatz zur „E4-Dachstation“ (FB 61) systembedingt zumeist nur zwischen 95 bis 99 % lag (die LoRaWAN-Stationen verfügen über keine Datenlogger zur Messwertzwischenlagerung). Da die in unregelmäßiger Folge auftretenden Fehlwerte zu störenden Artefakten in der Datenauswertung führen, wurden Ersatzwerte eingefügt (Mittelbildung aus vorangegangenem und nachfolgendem 10-Minutenwert). Im Vergleich zum Artefakt-Effekt ist die potentielle Fehlerabweichung der Ersatzwerte zu vernachlässigen. Das Analyseergebnis wird durch dieses etwas unorthodoxe Vorgehen nicht beeinträchtigt, sondern verbessert.

2.4.1 Mittlere Tagesgänge der 10-Minutenmittelwerte

Die Abb. 10 - Abb. 13 stellen die mittleren Temperaturtagesgänge und mittleren Differenzen (ΔT) der 10-Minuten-Mittelwerte in Abhängigkeit von der Sonnenscheindauer für den Standort „Schlossgartenstraße“ (FB 61) dar. Sie bestätigen die in Kapitel 2.3 diskutierten unterschiedlichen thermischen Trägheiten der Messsysteme und insbesondere die Ergebnisse der Referenzmessungen von SOTELINO et al. (2018) / KMI (Königlich Meteorologisches Institut von Belgien) aus 2018. Im Einzelnen zeigt sich, exemplarisch dargelegt anhand der Situationen mit einer Sonnenscheintagesumme ≥ 11 h (Abb. 11), folgendes Bild:

- Während der Nachtstunden (0 bis 6 MESZ) divergieren die Messwerte zwischen LAM630 und BARANI MeteoShield® Professional sowohl bei hoher wie auch geringer Sonnenscheindauer (wolkenlos bzw. heiter oder wolkig bzw. bewölkt) nur geringfügig (ΔT 0,0 bis 0,1 °C). Trotz der unterschiedlichen Ventilation der Strahlungsschutzhütten (LAM aktiv belüftet) bewirkt die eher schwache natürliche Ventilation in Strahlungsnächten offenbar bereits eine hinreichende Durchlüftung der BARANI MeteoShield® Professional. Andernfalls wäre ein relatives Nachhinken des BARANI-Messgebers (MeteoTemp rH+t) zu beobachten. Im Gegensatz zum MeteoTemp rH+t zeigt der Pt100 des OPUS10 in der BARANI MeteoShield® Professional infolge der geringeren thermischen Trägheit etwas niedrigere Werte (ΔT - 0,2 bis - 0,3 °C) als der Messgeber in der LAM630. Im Zeitabschnitt der Tagestemperaturminima nivellieren sich die Differenzen, was gleichfalls ein typisches Zeichen für thermische Trägheit ist.



- In der Temperaturanstiegphase am Vormittag divergieren die Werte zwischen den Strahlungshütten am deutlichsten und erreichen im Mittel ΔT -Werte bis $0,5\text{ °C}$, d.h. in der LAM630 werden stetig etwas höhere Werte gemessen. Im Vergleich der beiden in der BARANI-Strahlungshütte positionierten Messgeber zeigen sich zwar nur geringe Unterschiede. Tendenziell verzeichnet der Pt100 jedoch etwas höhere Werte, d.h. er reagiert auch hier schneller auf Temperaturänderungen.
- Ab dem späten Vormittag gehen die Differenzwerte zwischen dem LAM630-Sensor und dem BARANI-Sensor synchron mit der sich langsam abflachenden Temperaturtagesgangkurve bis zum Zeitpunkt der Maxima (15 bis 17 MESZ) auf $0,4$ bis $0,3\text{ °C}$ zurück. D.h. die Temperaturunterschiede gleichen sich etwas an. Demgegenüber beträgt das ΔT zwischen dem Pt100 und dem Rotronic HC2A-S3 in der LAM630 weiterhin ca. $0,5\text{ °C}$. In der LAM630 werden somit auch am Nachmittag bzw. zum Zeitpunkt der Maxima stetig etwas höhere Werte als in der BARANI-Strahlungshütte gemessen. Unterschiedliches thermisches Nachhinken der Sensoren (differierende Einstellzeiten) ist eher auszuschließen, da entsprechende Effekte im Wesentlichen nur zu einem Versatz der Ganglinien führen würden. Die relativ deckungsgleichen Temperaturverläufe während der Nachtstunden stehen dem entgegen. Schlüssiger lassen sich die Beobachtungsergebnisse als Folge des unterschiedlichen thermischen Verhaltens der beiden Strahlungsschutzhütten erklären. So wird die Temperatur an der Sensorposition nicht allein aus der Durchlüftungseffizienz der Lamellenhütten beeinflusst. Wäre dies der Fall, wären aktiv ventilierte Strahlungsschutzhütten bei Sonneneinstrahlung in ihrer Schutzwirkung gegenüber passiv ventilierten Hütten stets im Vorteil. Tatsächlich spielen jedoch auch die Faktoren Lamellenabstand, Reflexionsvermögen bzw. Farbgebung der Lamellenaußenseiten, Farbgebung der Lamelleninnenseiten und das äußere Strahlungsgeschehen (Gegenstrahlung aus dem Himmelsraum = Wolkenreflexion; Gegenstrahlung aus dem benachbarten terrestrischen Umfeld = Boden, Hecken, Gebäudefassaden etc.) eine mitentscheidende Rolle. Bekannt ist, dass die LAM630 unter bestimmten Bedingungen (Einfluss des Nutzungsumfeldes durch erhebliche Reduktion der natürlichen Ventilation in Kombination mit Gegenstrahlungseffekten) zu Strahlungsfehlern neigt (was im Nachgang zu den Hitzerekorden im Sommer 2019 zur Verlegung der DWD-Station Lingen führte). Unter solchen, den Standortempfehlungen für Freilandstationen im DWD-Messnetz widersprechenden Bedingungen können die geschwärzten Innenlamellen der LAM630 zu unbeabsichtigten Überwärmungseffekten führen. Genereller Zweck der Schwärzung ist es Reflexionen auf die Messsensorik zu reduzieren (Eigenerwärmung der Sensoren), was aber unter den vorgenannten Bedingungen zu einer ungewollten Eigenerwärmung der Lamelleninnenseiten führen kann. Die BARANI-Strahlungsschutzhütte hat an den Lamellenaußenseiten (Material

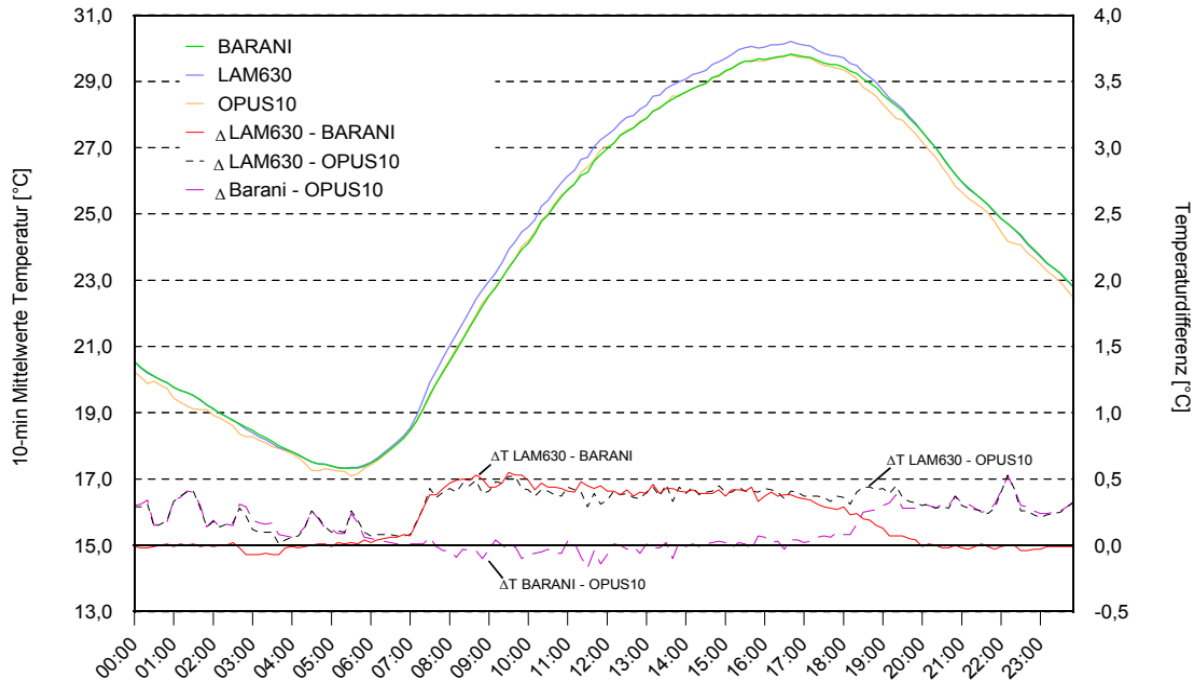


Kunststoff) eine reinweiße Oberfläche während die LAM630-Außenlamellen (Material Aluminium) eine schwach grauweiße Färbung aufweisen. Abgesehen von den Randflächen sind bei der BARANI die Lamelleninnenseiten jeweils mit etwas kleineren separaten schwarzen Lamellen abgedeckt. Offenbar zeigen sich hier unter den gegebenen stadtklimatischen Außenbedingungen Vorteile in den Strahlungsschutzeigenschaften, welche möglicherweise den theoretischen Nachteil der passiven Belüftung überkompensiert. Dass im Verlauf des Nachmittags der Pt100-Sensor im Mittel geringfügig niedrigere Temperaturen als der MeteoTemp RH+T registriert, ist an dieser Stelle zunächst nicht schlüssig erklärbar, da sich dieser Effekt weder in Fällen mit intensiverer Sonneneinstrahlung (Tage mit Sonnenscheindauer ≥ 13 h; Abb. 10) noch bei Situationen mit vermehrter Bewölkung (Abb. 12 bis Abb. 14) zeigt.

- Während der abendlichen Temperaturrückgangphase gleichen sich die Differenzen zwischen den beiden Strahlungsschutzhütten zunehmend an; nach Sonnenuntergang zeigt sich ein analoges Geschehen zum Zeitraum 0 bis 6 MESZ.
- Betrachtet man die Tagesgänge mit Fokus auf die Tagessituation und in Abhängigkeit von der Sonnenscheindauer, zeigen sich bzgl. der Kategorien 'tägliche Sonnenscheindauer ≥ 13 h, ≥ 11 h und 8 bis 11 h' im Verhalten der beiden Strahlungsschutzhütten keine signifikanten Unterschiede. Zwar werden bei hoher Sonnenscheindauer etwas größere Differenzwerte als bei geringerer Sonnenscheindauer beobachtet. Da jedoch bei teilweise bedecktem Himmel bzw. insbesondere hoher Bewölkung i.d.R. weiterhin hohe Globalstrahlungswerte auftreten, wirken sich Verschattungsperioden nicht nachhaltig auf die Strahlungsfehler der Strahlungsschutzhütten aus. Lediglich bei stärker reduzierter Sonnenscheindauer (Kategorien 5 bis 8 h und 2 bis 5 h) zeigt sich eine Nivellierung der Differenzen.
- Vergleicht man das Verhalten der beiden Sensoren in der BARANI-Strahlungsschutzhütte mit dem der LAM630 in Abhängigkeit von der Sonnenscheindauer zeigt sich, dass bei weitgehend fehlender Bewölkung und sehr klarem Himmel (Sonnenscheindauer ≥ 13 h, geringe Gegenstrahlung) tagsüber zwischen dem Pt100 und dem BARANI MeteoTemp RH+T tendenziell die geringsten Messwertunterschiede herrschen.

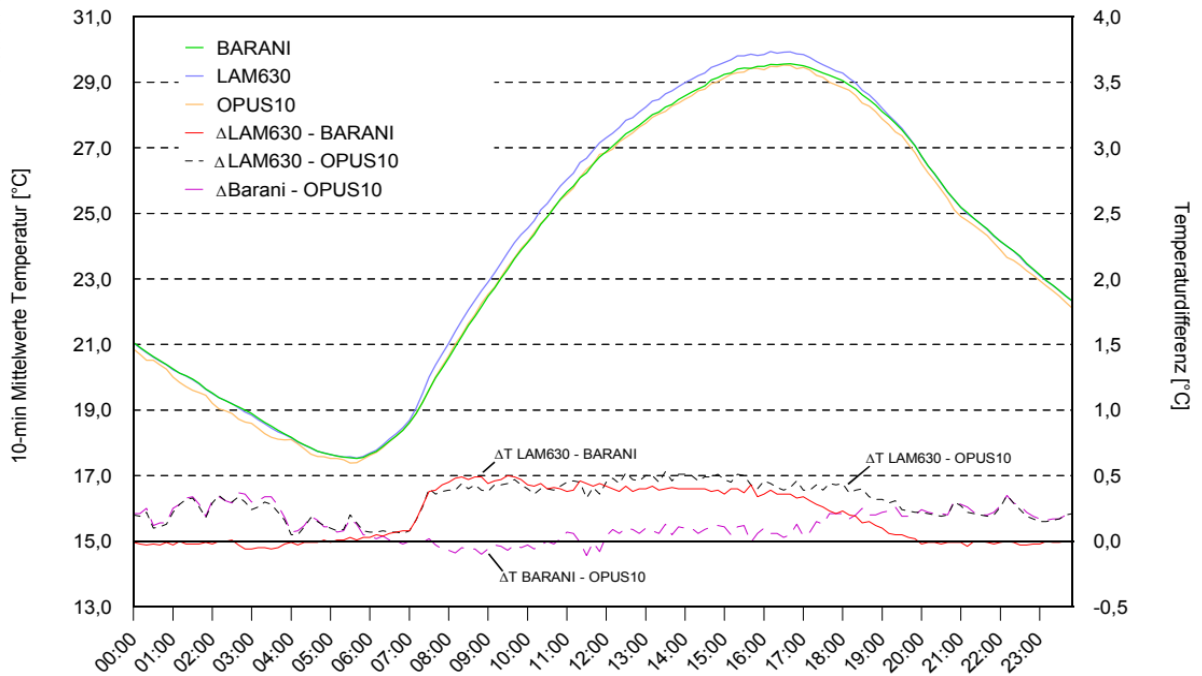


VERGLEICH AKTIV/PASSIV VENTILIERTER STRALUNGSSCHUTZHÜTTEN



N = 29 (BARANI fehlwertergänzt)

Abb. 10: Mittlerer Temperaturtagesgang und mittlere Differenzen (ΔT) der 10-Minuten-Mittelwerte am Standort „Schlossgartenstraße“ (FB 61) im Zeitraum Mai bis August 2022 für Wetterlagen mit täglicher Sonnenscheindauer ≥ 13 h

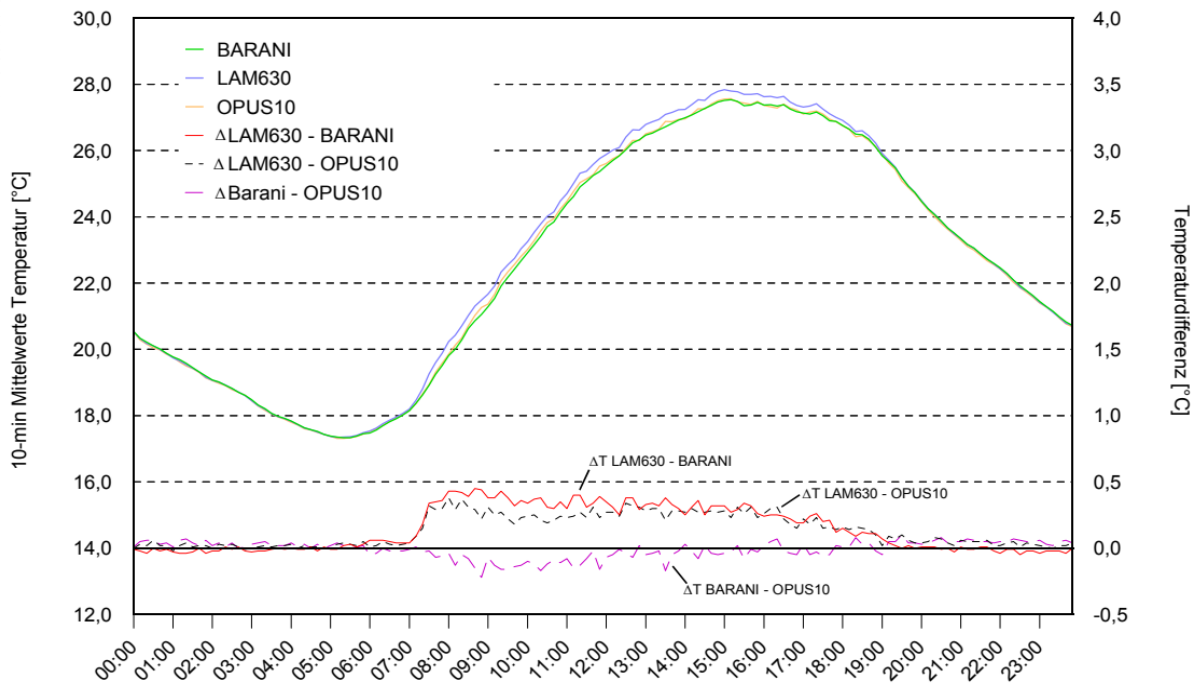


N = 47 (BARANI fehlwertergänzt)

Abb. 11: Mittlerer Temperaturtagesgang und mittlere Differenzen (ΔT) der 10-Minuten-Mittelwerte am Standort „Schlossgartenstraße“ (FB 61) im Zeitraum Mai bis August 2022 für Wetterlagen mit täglicher Sonnenscheindauer ≥ 11 h

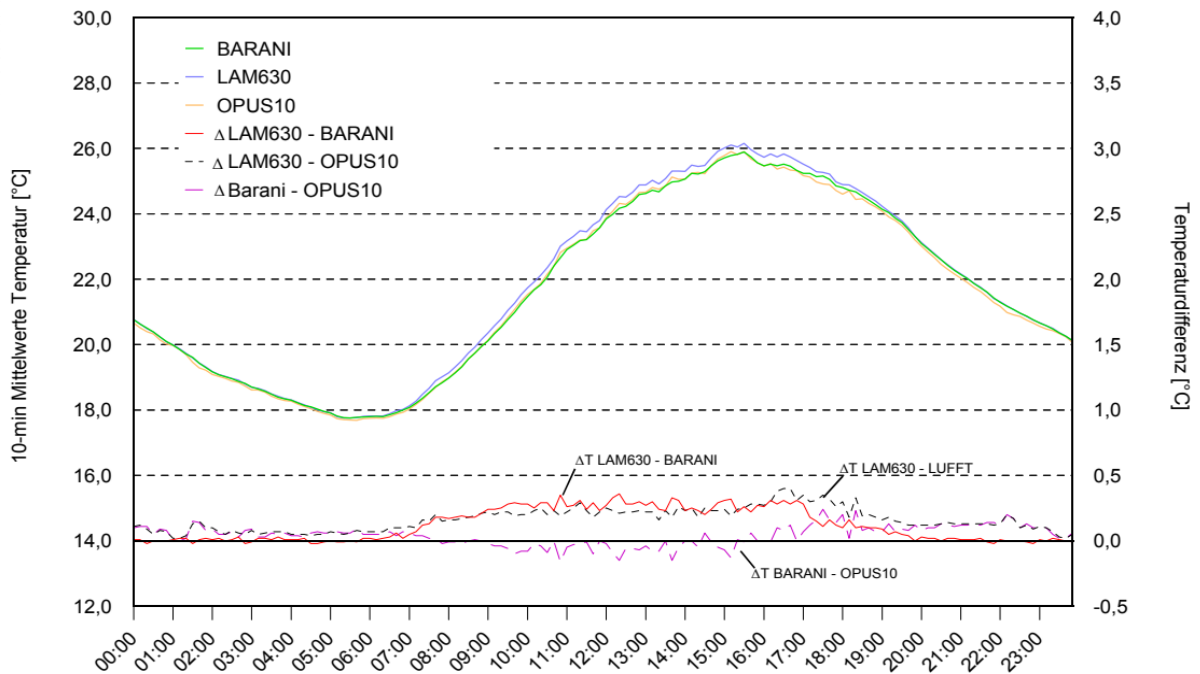


VERGLEICH AKTIV/PASSIV VENTILIERTER STRALUNGSSCHUTZHÜTTEN



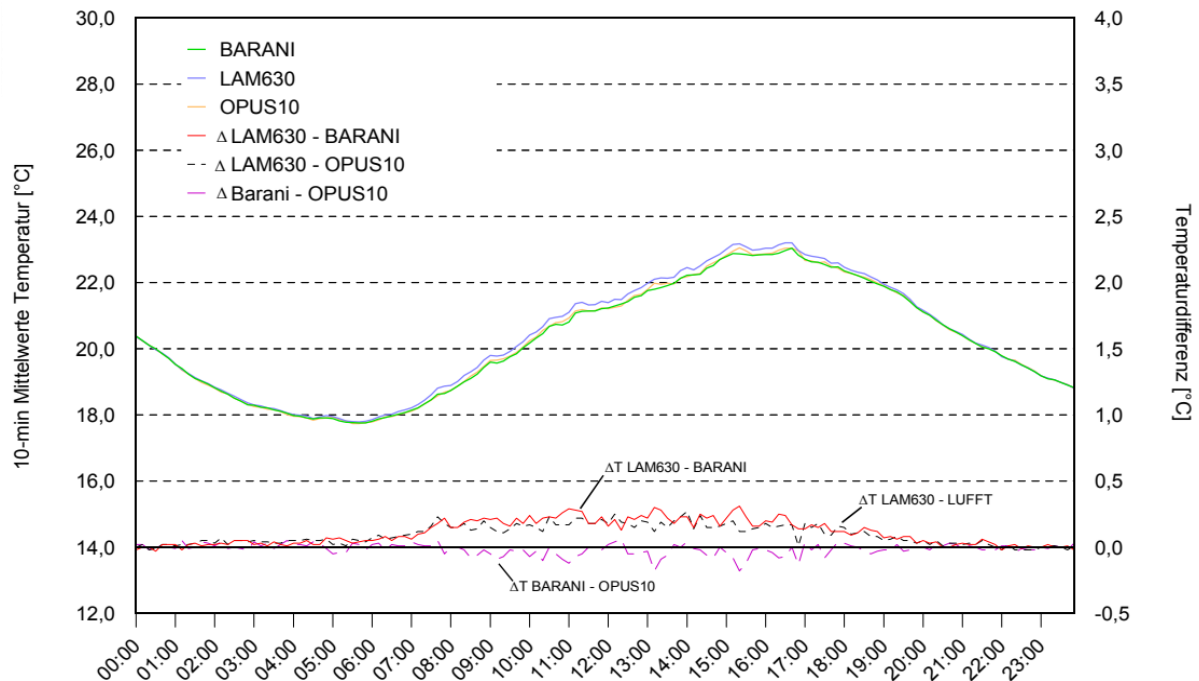
N = 29 (BARANI fehlwertergänzt)

Abb. 12: Mittlerer Temperaturtagesgang und mittlere Differenzen (ΔT) der 10-Minuten-Mittelwerte am Standort „Schlossgartenstraße“ (FB 61) im Zeitraum Mai bis August 2022 für Wetterlagen mit täglicher Sonnenscheindauer 8 - 11 h



N = 24 (BARANI fehlwertergänzt)

Abb. 13: Mittlerer Temperaturtagesgang und mittlere Differenzen (ΔT) der 10-Minuten-Mittelwerte am Standort „Schlossgartenstraße“ (FB 61) im Zeitraum Mai bis August 2022 für Wetterlagen mit täglicher Sonnenscheindauer 5 – 8 h



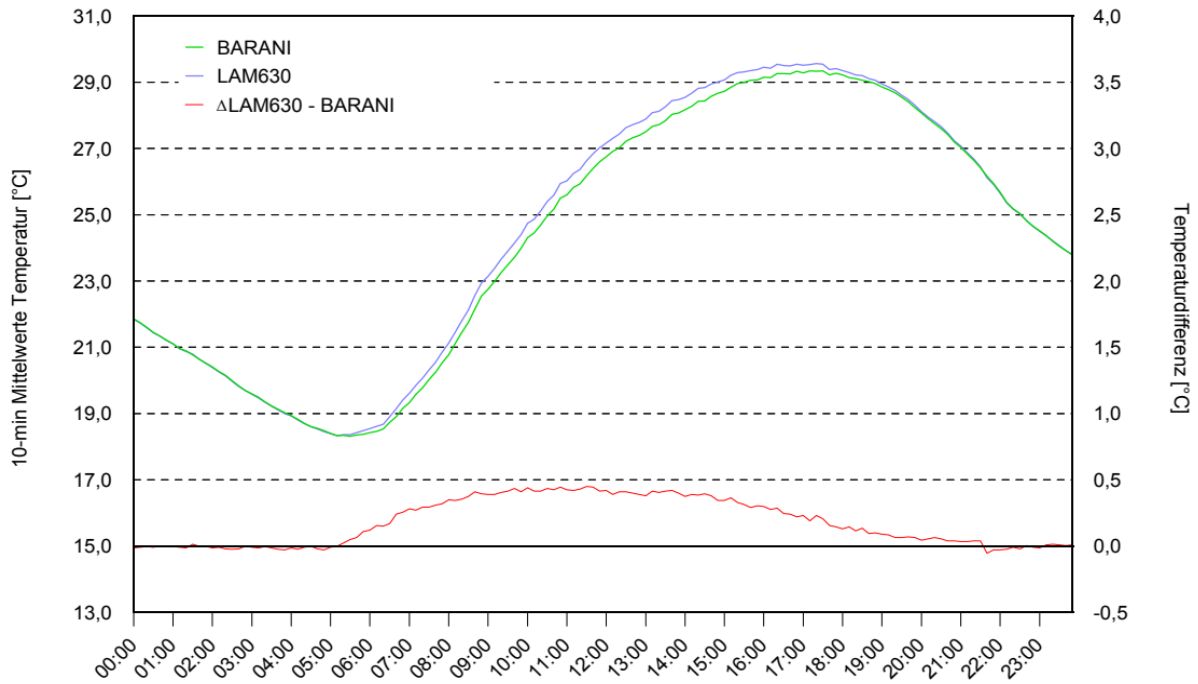
N = 13 (BARANI fehlerergänzt)

Abb. 14: Mittlerer Temperaturtagesgang und mittlere Differenzen (ΔT) der 10-Minuten-Mittelwerte am Standort „Schlossgartenstraße“ (FB 61) im Zeitraum Mai bis August 2022 für Wetterlagen mit täglicher Sonnenscheindauer 2 – 5 h

Die in den Abb. 15 bis Abb. 18 dargestellten mittleren Temperaturtagesgänge und mittleren Differenzen (ΔT) der 10-Minuten-Mittelwerte am Standort „E4-Dach“ (FB 61) sind mit den Ergebnissen der Station „Schlossgartenstraße“ (FB 61) nahezu deckungsgleich. Berücksichtigt man die generell besseren natürlichen Ventilationsbedingungen oberhalb der städtischen Dachgrenzschicht sind mit Blick auf die Tagessituation allerdings tendenziell geringere Differenzen zu erwarten, da sich konstruktionsbedingte Strahlungsfehler bei zunehmender Ventilation nivellieren. Allerdings sind die spezifischen Grenzbedingungen für beide Strahlungshüttentypen nicht bekannt und möglicherweise reichen die typischerweise herrschenden Strömungsintensitäten (die mittlere Windgeschwindigkeit beträgt an Tagen mit einer Sonnenscheindauer ≥ 11 h im Zeitraum 10 bis 16 MESZ an der Station „Schlossgartenstraße“ (FB 61) 1,1 m/s und an der Station „E4-Dach“ (FB 61) 2,3 m/s) nicht für eine effiziente Angleichung aus. Weiterhin können aber auch hier Gegenstrahlungseffekte der hellen Dachflächen eine Rolle spielen. Bekannt ist, dass eine hohe Albedo (insbesondere Schneedecken) zu Strahlungsfehlern führt.

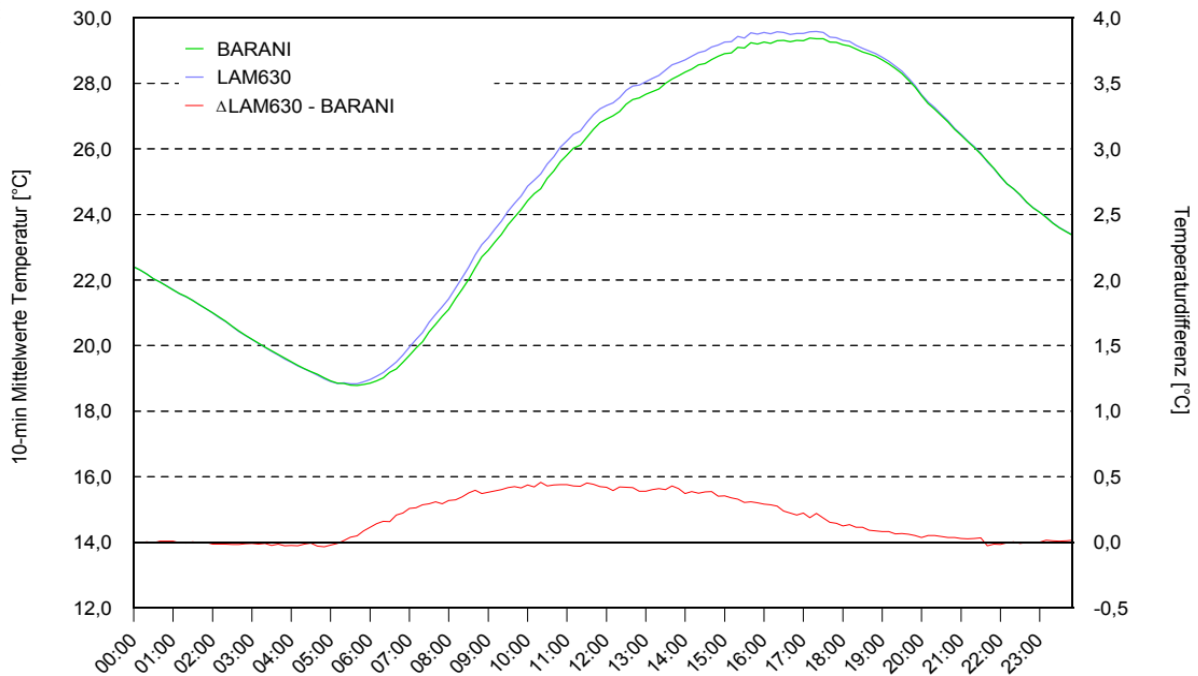


VERGLEICH AKTIV/PASSIV VENTILIERTER STRALUNGSSCHUTZHÜTTEN



N = 20

Abb. 15: Mittlerer Temperaturtagesgang und mittlere Differenzen (ΔT) der 10-Minuten-Mittelwerte am Standort „E4-Dach“ (FB 61) im Zeitraum Mai bis August 2022 für Wetterlagen mit täglicher Sonnenscheindauer ≥ 13 h



N = 32

Abb. 16: Mittlerer Temperaturtagesgang und mittlere Differenzen (ΔT) der 10-Minuten-Mittelwerte am Standort „E4-Dach“ (FB 61) im Zeitraum Mai bis August 2022 für Wetterlagen mit täglicher Sonnenscheindauer ≥ 11 h



VERGLEICH AKTIV/PASSIV VENTILIERTER STRALUNGSSCHUTZHÜTTEN

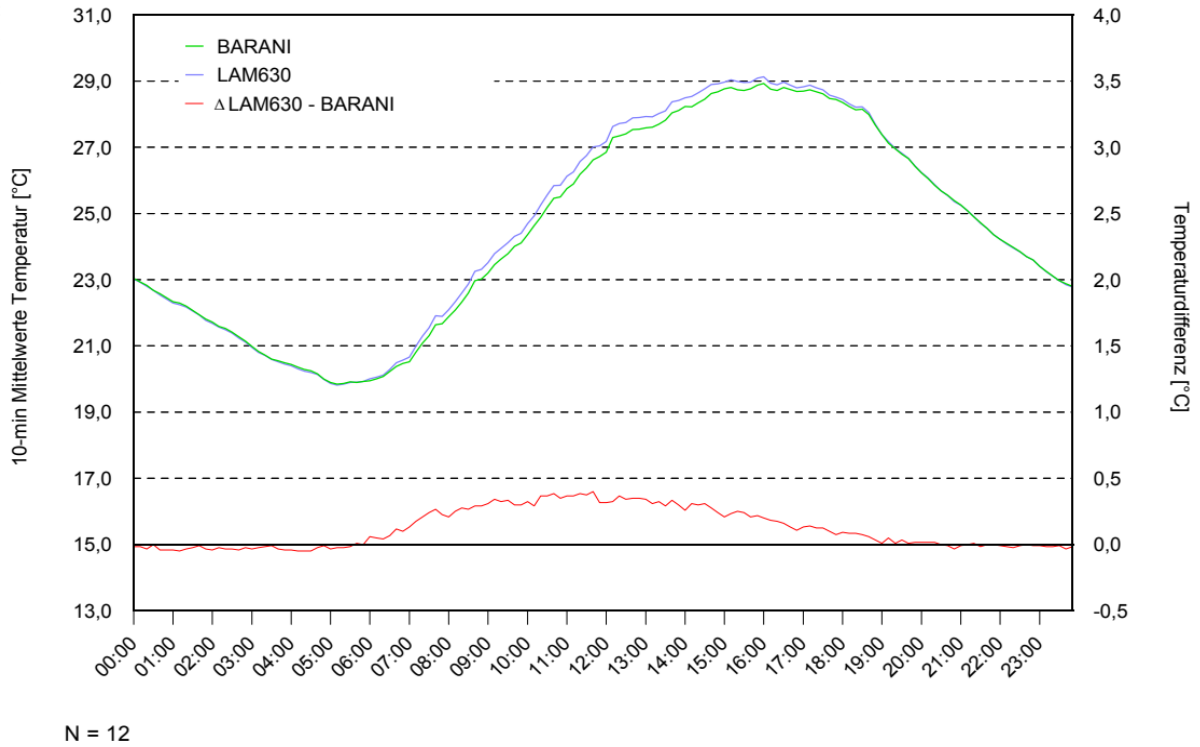


Abb. 17: Mittlerer Temperaturtagesgang und mittlere Differenzen (ΔT) der 10-Minuten-Mittelwerte am Standort „E4-Dach“ (FB 61) im Zeitraum Mai bis August 2022 für Wetterlagen mit täglicher Sonnenscheindauer 8 – 11 h

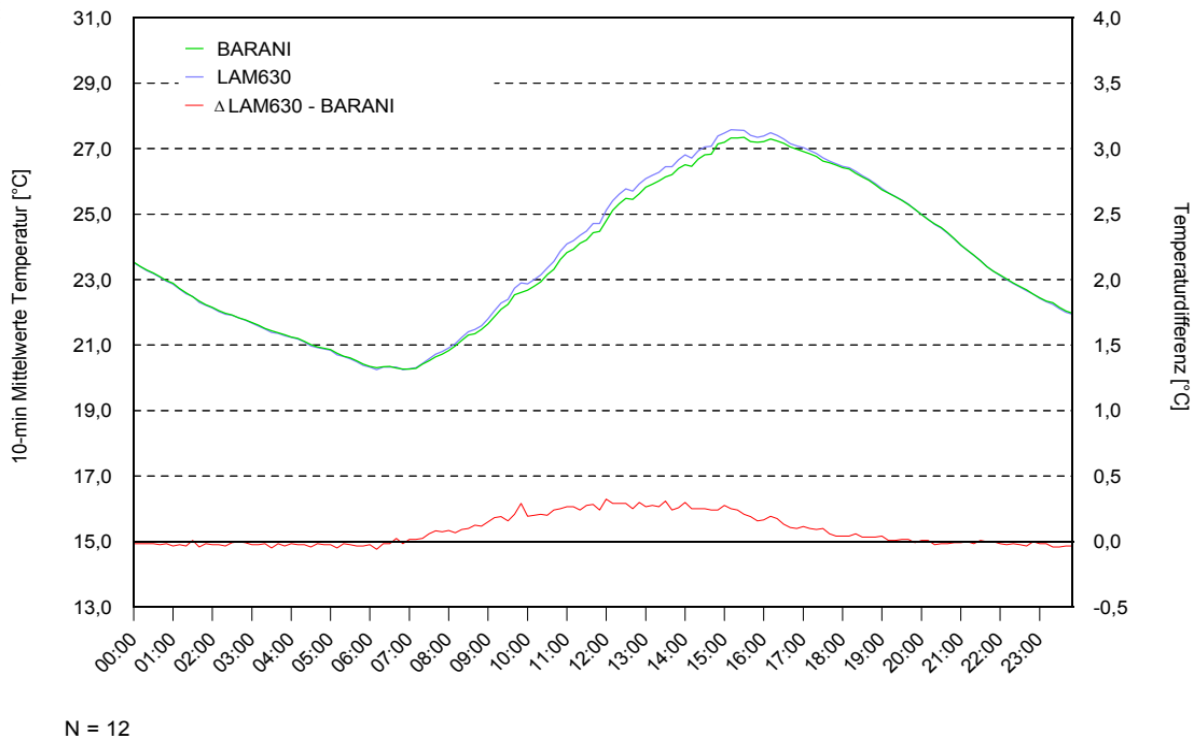
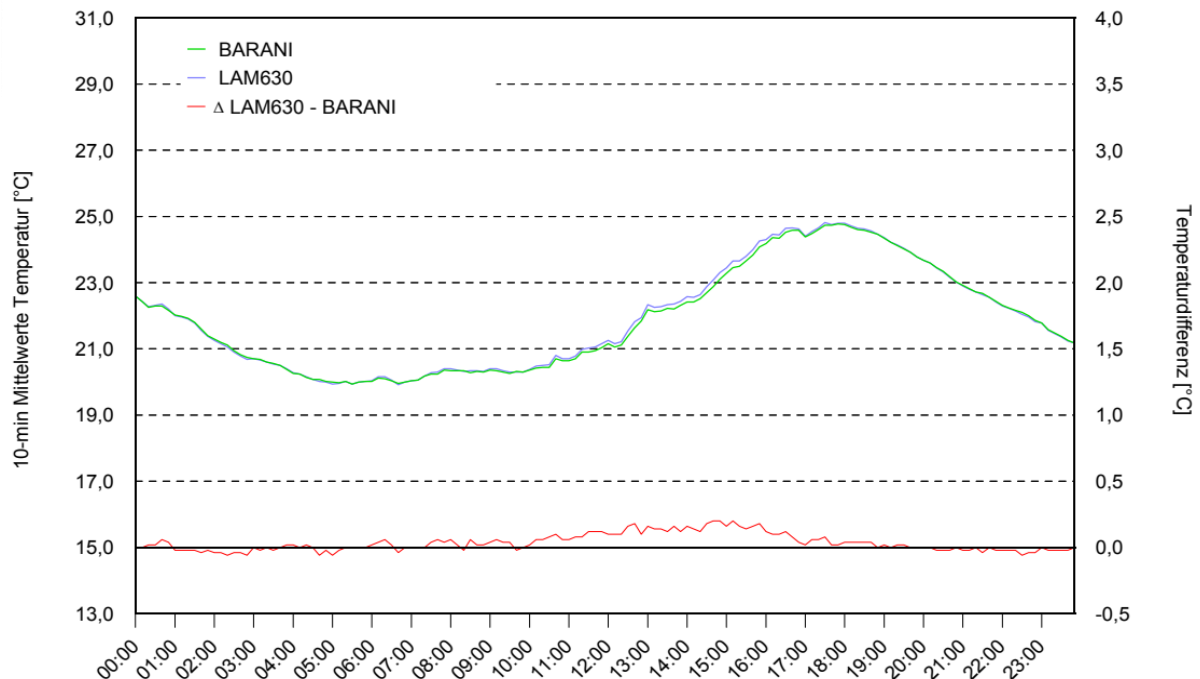


Abb. 18: Mittlerer Temperaturtagesgang und mittlere Differenzen (ΔT) der 10-Minuten-Mittelwerte am Standort „E4-Dach“ (FB 61) im Zeitraum Mai bis August 2022 für Wetterlagen mit täglicher Sonnenscheindauer 5 – 8 h



N = 5

Abb. 19: Mittlerer Temperaturtagesgang und mittlere Differenzen (ΔT) der 10-Minuten-Mittelwerte am Standort „E4-Dach“ (FB 61) im Zeitraum Mai bis August 2022 für Wetterlagen mit täglicher Sonnenscheindauer 2 – 5 h

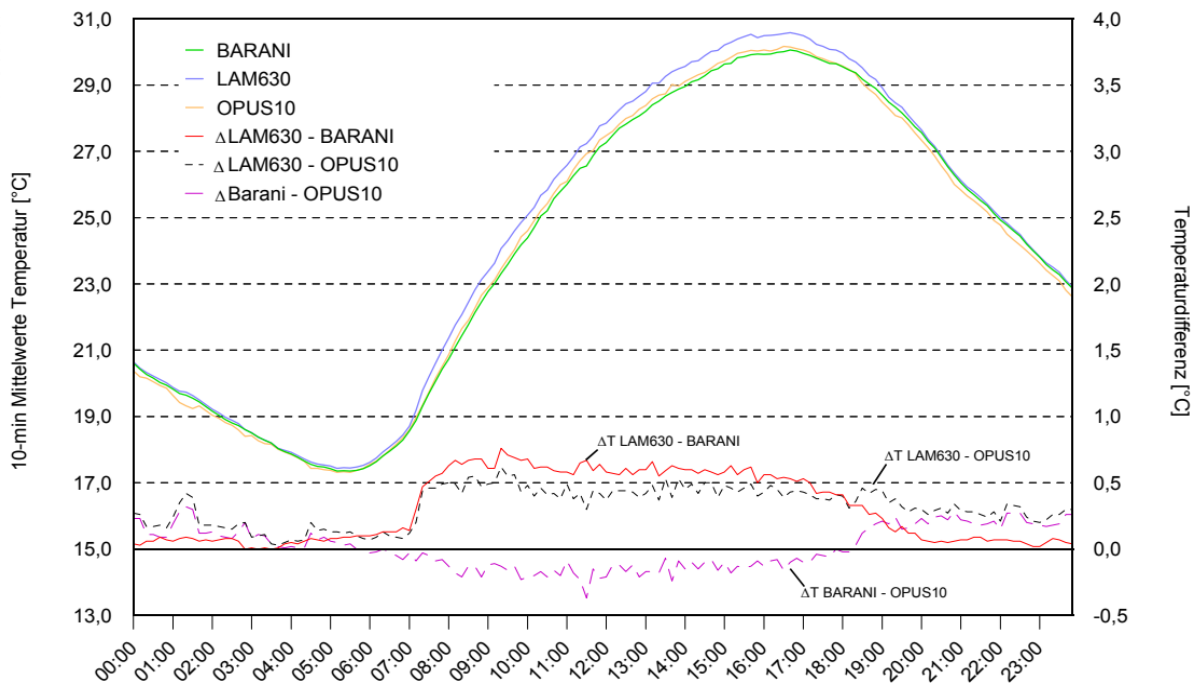
2.4.2 Mittlere Tagesgänge der 10-Minutenmaximawerte

Im Vergleich zu den 10-Minutenmittelwerten zeigen die mittleren Tagesgänge der 10-Minuten-temperaturmaxima ein ähnliches Bild (Abb. 20 - Abb. 24). Lediglich die Differenzen sind am Tag noch deutlicher ausgeprägt. Während zwischen dem BARANI MeteoTemp RH+T und dem Rotronic HC2A-S3 (LAM630) an Tagen mit mehr als 11 h Sonnenscheindauer vor- und nachmittags das ΔT der 10-Minutenmittelwerten zwischen etwa 0,5 und 0,3 °C liegt, erreicht es bei den 10-Minutenmaxima Werte zwischen 0,7 und 0,5 °C. Gleichartige Unterschiede zeigen sich sowohl an weitgehend wolkenfreien Tagen (Sonnenscheindauer ≥ 13 h) wie auch an Tagen mit gemischten Bewölkungsverhältnissen (Sonnenscheindauer 8 bis 11 h, 5 bis 8 h). Dies lässt sich durch die effizientere Belüftung der aktiv ventilerten LAM630 gegenüber der passiv ventilerten BARANI-Strahlungsschutzhütte erklären. Der aktiv ventilerte Messgeber gleicht sich schneller an die sich typischerweise bei intensiver Einstrahlung in kurzer Frequenz fluktuierende Lufttemperatur an, als der thermisch Träger reagierende passiv belüftete Messgeber (BARANI MeteoTemp RH+T). Dies gilt sowohl für Lamellenhütten mit minimalem Strahlungsfehler als auch für Lamellenhütten mit thermisch schlechterem Verhalten. Welche Wirkung der Effekt „aktiv ventilert“ auf die Strahlungsschutzeigenschaften der BARANI MeteoShield® Professional ausüben würde, kann nicht geklärt werden, da die Lamellenhütte nicht mit aktiver Ventilierung angeboten wird. Sekundäre Informationen lassen sich anhand der Pt100-Vergleichsmessungen ziehen. Vergleicht man die Temperaturverläufe am Tag für



Situationen mit einer Sonnenscheindauer ≥ 11 h bzw. ≥ 13 h werden am Messgeber Pt100 bis zur Phase der Tageshöchsttemperaturen etwas höhere Werte (ca. 0,1 bis 0,2 °C) als am BARANI MeteoTemp RH+T gemessen während bezüglich der 10-Minuten-Mittelwerte geringere bzw. teilweise keine Unterschiede registriert werden. Hier spielt offensichtlich die unterschiedliche thermische Trägheit der beiden Sensoren eine Rolle.

Zu bewerten sind noch die entsprechenden Ergebnisse der Station „E4-Dach“ (FB 61) (Abb. 25 bis Abb. 29). Im Vergleich zur Station „Schlossgartenstraße“ (FB 61) (Abb. 20 bis Abb. 24) zeigen sich für die analysierten Strahlungssituationen sowohl im Tagesgang wie auch bezüglich der Differenzabstände im Wesentlichen die gleichen Verlaufskurven. Allerdings wirkt die Ganglinie der Differenzwerte harmonischer, was eine Folge der etwas besseren Ventilationsbedingungen im Dachniveau sein dürfte. Bezüglich des ΔT LAM630 - BARANI sind jedoch keine signifikant geringen Werte zu erkennen.

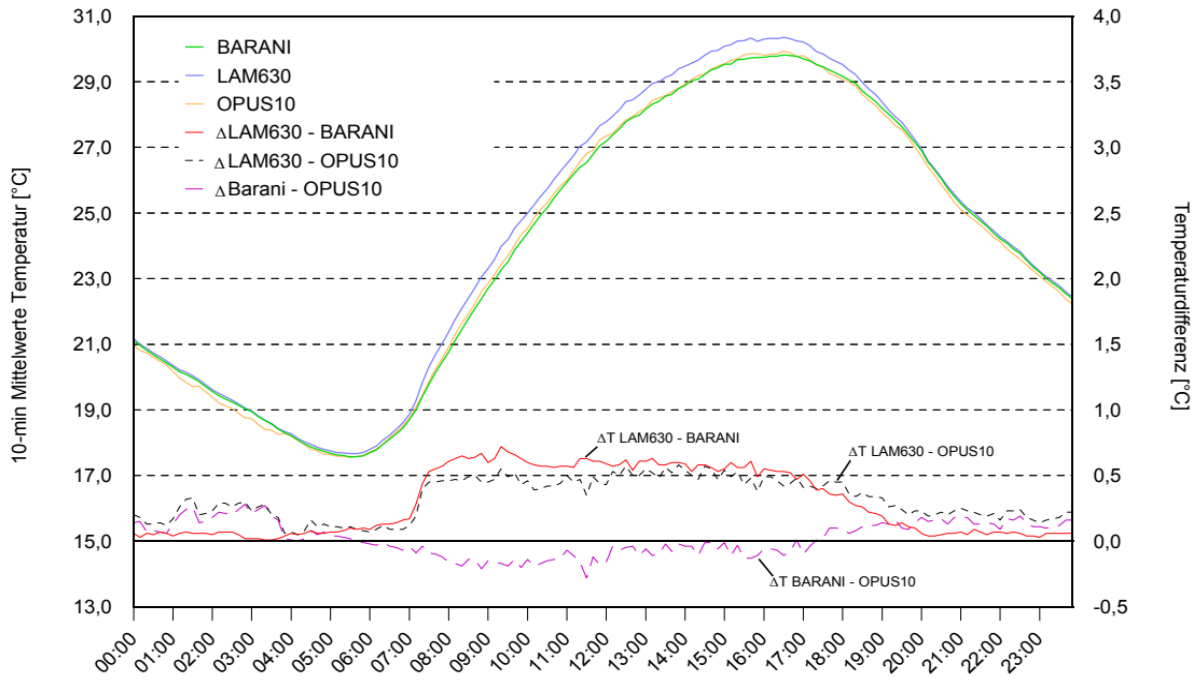


N = 29 (BARANI fehlwertergänzt)

Abb. 20: Mittlerer Temperaturtagesgang und mittlere Differenzen (ΔT) der 10-Minuten-Maximalwerte am Standort „Schlossgartenstraße“ (FB 61) im Zeitraum Mai bis August 2022 für Wetterlagen mit täglicher Sonnenscheindauer ≥ 13 h

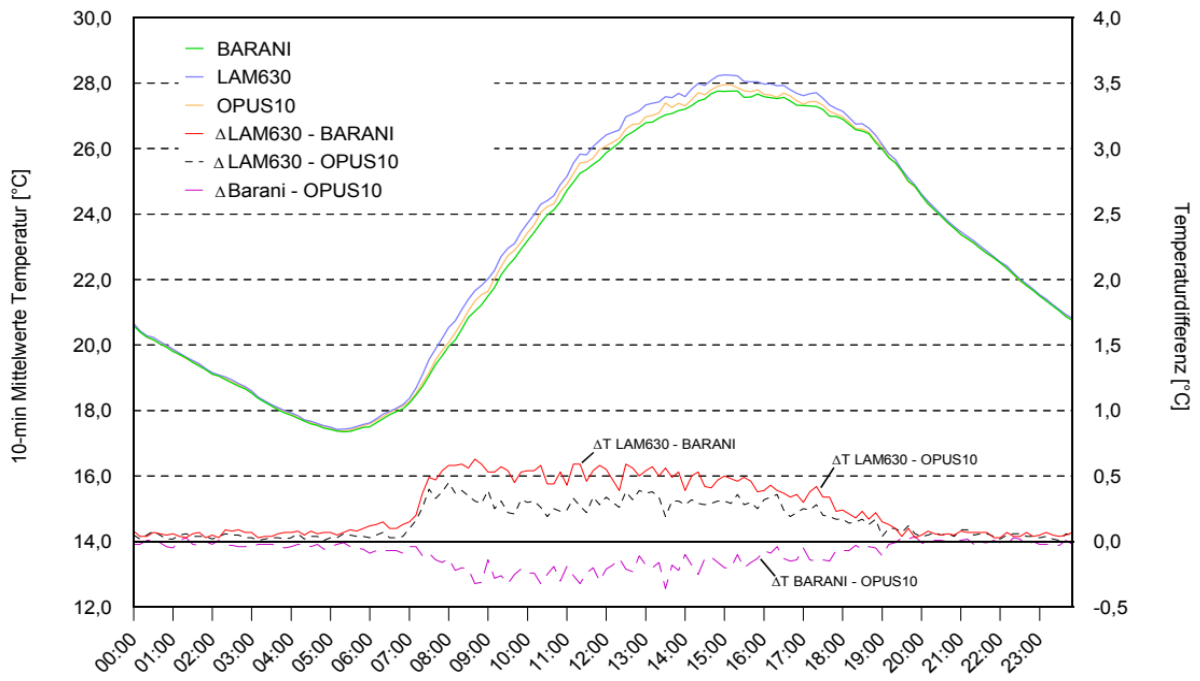


VERGLEICH AKTIV/PASSIV VENTILIERTER STRALUNGSSCHUTZHÜTTEN



N = 47 (BARANI fehlerergänzt)

Abb. 21: Mittlerer Temperaturtagesgang und mittlere Differenzen (ΔT) der 10-Minuten-Maximalwerte am Standort „Schlossgartenstraße“ (FB 61) im Zeitraum Mai bis August 2022 für Wetterlagen mit täglicher Sonnenscheindauer ≥ 11 h

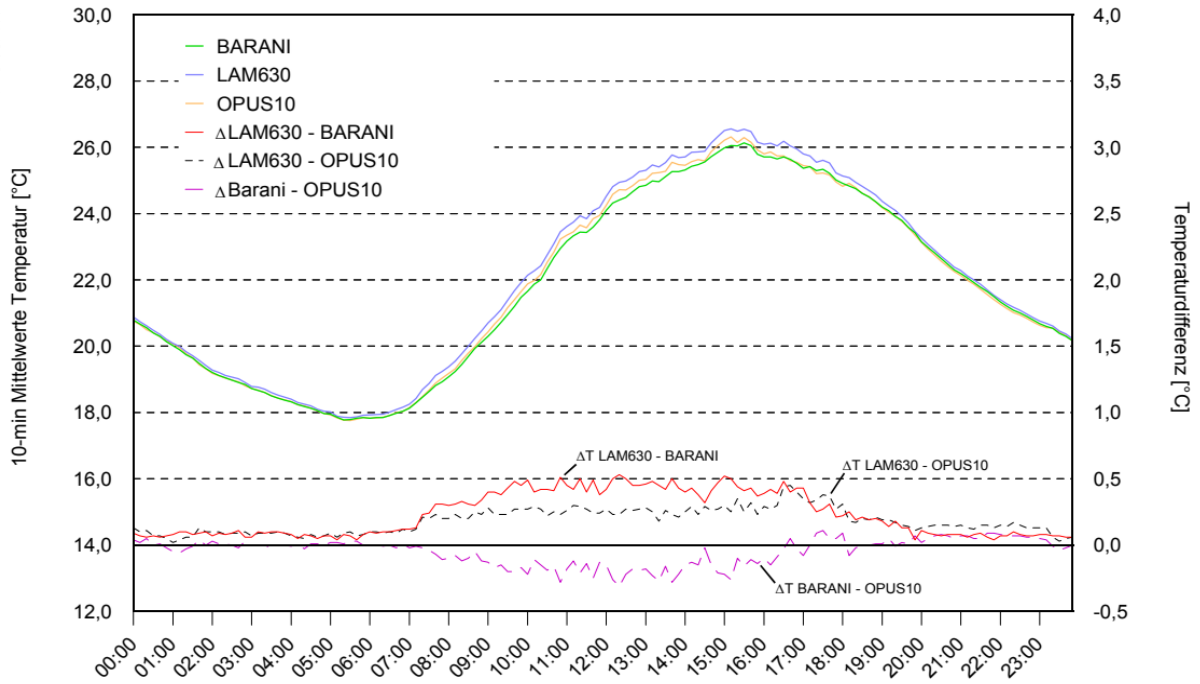


N = 20 (BARANI fehlerergänzt)

Abb. 22: Mittlerer Temperaturtagesgang und mittlere Differenzen (ΔT) der 10-Minuten-Maximalwerte am Standort „Schlossgartenstraße“ (FB 61) im Zeitraum Mai bis August 2022 für Wetterlagen mit täglicher Sonnenscheindauer 8 – 11 h

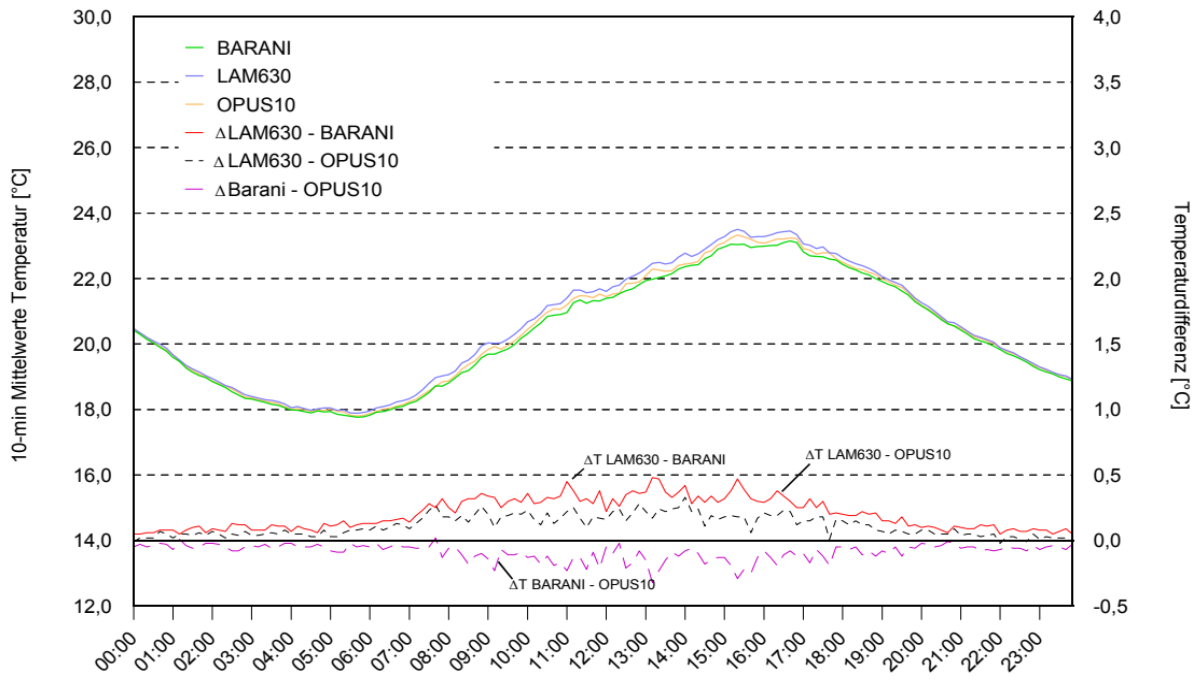


VERGLEICH AKTIV/PASSIV VENTILIERTER STRALUNGSSCHUTZHÜTTEN



N = 24 (BARANI fehlerwertergänzt)

Abb. 23: Mittlerer Temperaturtagesgang und mittlere Differenzen (ΔT) der 10-Minuten-Maximalwerte am Standort „Schlossgartenstraße“ (FB 61) im Zeitraum Mai bis August 2022 für Wetterlagen mit täglicher Sonnenscheindauer 5 – 8 h

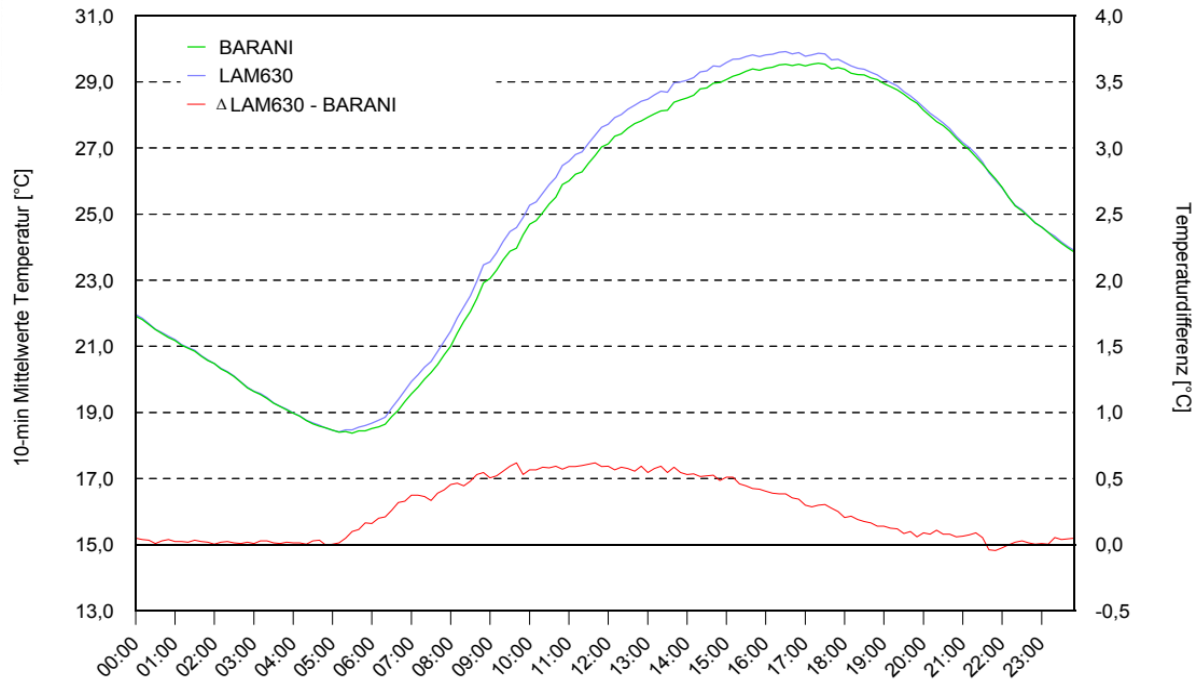


N = 13 (BARANI fehlerwertergänzt)

Abb. 24: Mittlerer Temperaturtagesgang und mittlere Differenzen (ΔT) der 10-Minuten-Maximalwerte am Standort „Schlossgartenstraße“ (FB 61) im Zeitraum Mai bis August 2022 für Wetterlagen mit täglicher Sonnenscheindauer 2 – 5 h

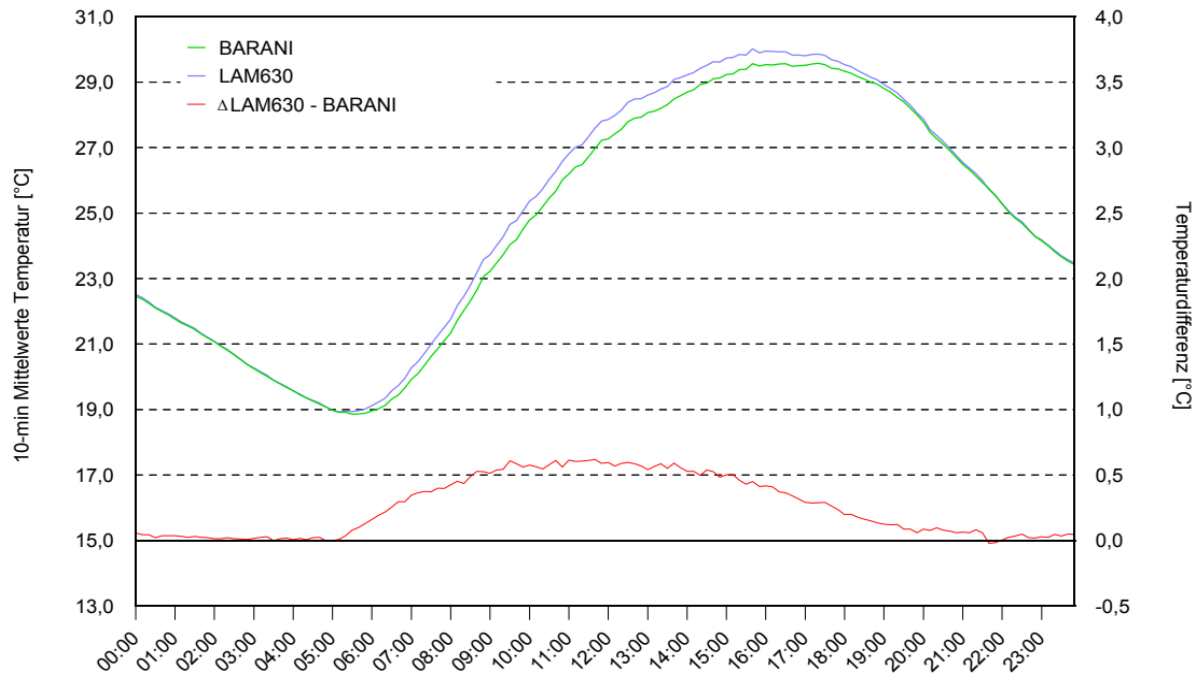


VERGLEICH AKTIV/PASSIV VENTILIERTER STRALUNGSSCHUTZHÜTTEN



N = 20

Abb. 25: Mittlerer Temperaturtagesgang und mittlere Differenzen (ΔT) der 10-Minuten-Maximalwerte am Standort „E4-Dach“ (FB 61) im Zeitraum Mai bis August 2022 für Wetterlagen mit täglicher Sonnenscheindauer ≥ 13 h

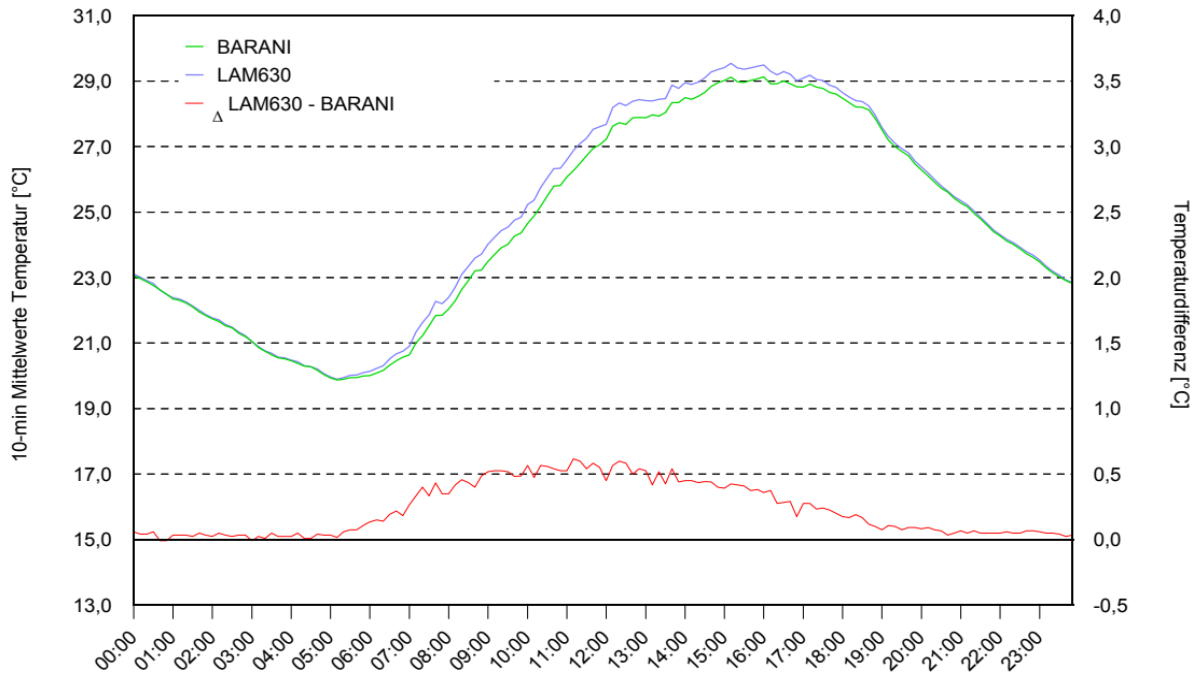


N = 32

Abb. 26: Mittlerer Temperaturtagesgang und mittlere Differenzen (ΔT) der 10-Minuten-Maximalwerte am Standort „E4-Dach“ (FB 61) im Zeitraum Mai bis August 2022 für Wetterlagen mit täglicher Sonnenscheindauer ≥ 11 h

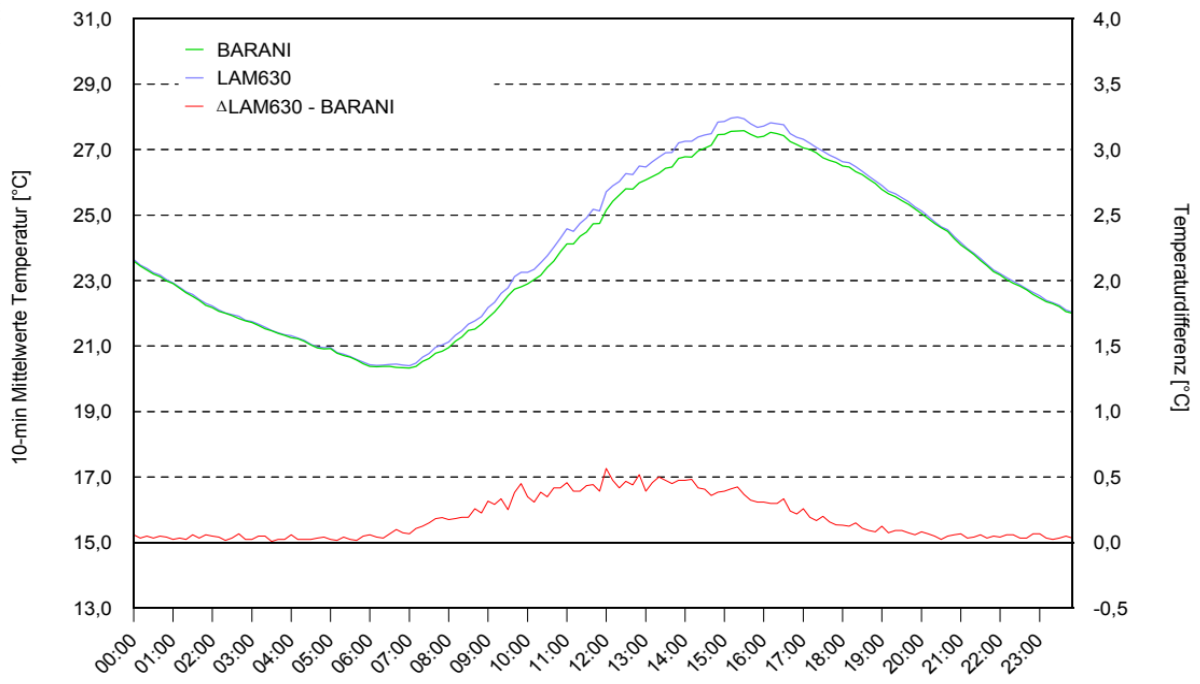


VERGLEICH AKTIV/PASSIV VENTILIERTER STRAHLUNGSSCHUTZHÜTTEN



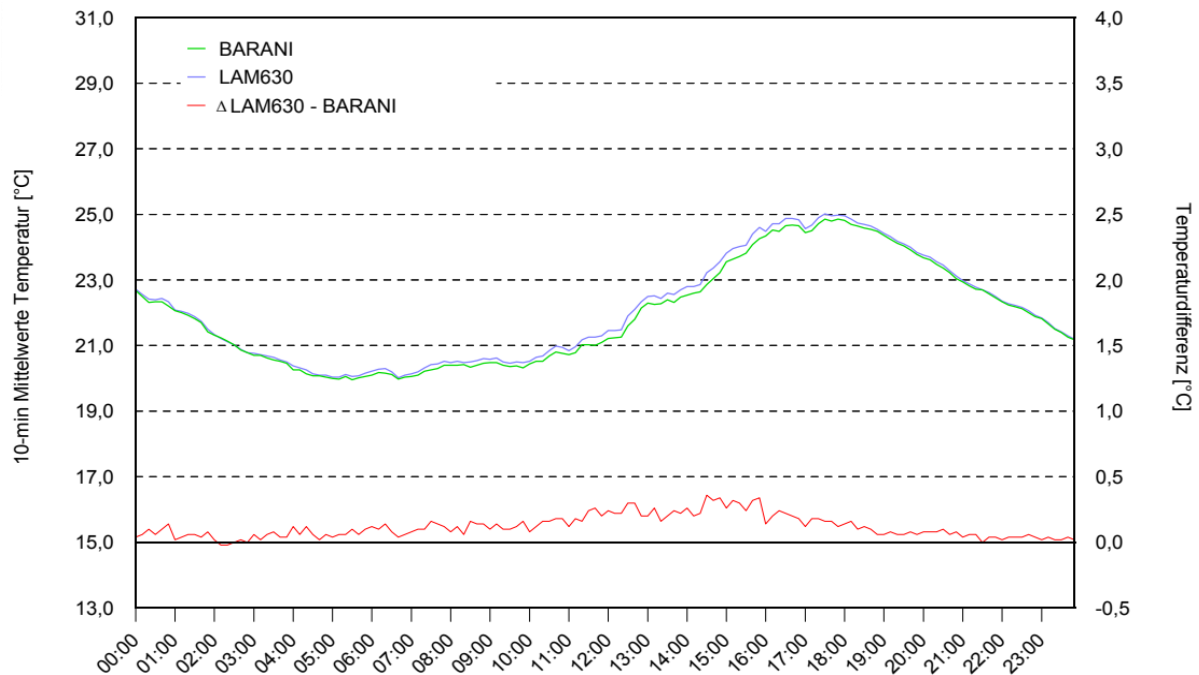
N = 12

Abb. 27: Mittlerer Temperaturtagesgang und mittlere Differenzen (ΔT) der 10-Minuten-Maximalwerte am Standort „E4-Dach“ (FB 61) im Zeitraum Mai bis August 2022 für Wetterlagen mit täglicher Sonnenscheindauer 8 – 11 h



N = 12

Abb. 28: Mittlerer Temperaturtagesgang und mittlere Differenzen (ΔT) der 10-Minuten-Maximalwerte am Standort „E4-Dach“ (FB 61) im Zeitraum Mai bis August 2022 für Wetterlagen mit täglicher Sonnenscheindauer 5 – 8 h



N = 5

Abb. 29: Mittlerer Temperaturtagesgang und mittlere Differenzen (ΔT) der 10-Minuten-Maximalwerte am Standort „E4-Dach“ (FB 61) im Zeitraum Mai bis August 2022 für Wetterlagen mit täglicher Sonnenscheindauer 2 – 5 h

2.4.3 Differenzen der Tagesmaxima

Abschließend sollen noch die Tagesmaximadifferenzen der Lufttemperatur an den beiden Stationen „Schlossgartenstraße“ und „E4-Dach“ (FB 61) im Hütten- und Messgebergvergleich bewertet werden. Auch hier wird wieder nach der Sonnenscheindauer (geringe / stärkere Bewölkung) unterschieden. Wie Abb. 30 entnommen werden kann zeigen sich im direkten Strahlungsschutzhüttenvergleich (Rotronic HC2A-S3 in LAM630 ↔ MeteoTemp RH+T in BARANI MeteoShield® Professional) an der Station „Schlossgartenstraße“ (FB 61) geringere Differenzen als an der Station „E4 Dach“ (FB 61). Weiterhin zeigt sich mit zunehmender Sonnenscheindauer auch eine tendenzielle Zunahme der Differenzen. Mit einem ΔT von $0,67\text{ °C}$ ($\geq 11\text{ h}$ Sonne) bzw. $0,69\text{ °C}$ ($\geq 13\text{ h}$ Sonne) sind die Differenzwerte allerdings an besonders wolkenarmen Tagen eher unwesentlich größer als an wolkigen ($\Delta T\ 0,55\text{ °C}$ an Tagen mit 8 bis 11 h Sonne, $\Delta T\ 0,56\text{ °C}$ an Tagen mit 5 bis 8 h Sonne) bzw. stärker bewölkten Tagen ($\Delta T\ 0,47\text{ °C}$ bei 2 bis 5 h Sonne). Wie bereits angesprochen spielt bei der Effizienz von Strahlungsschutzhütten die effektive Sonnenscheindauer offenbar eine geringere Rolle als das generelle Strahlungsgeschehen, d.h. das Wirkungsspektrum aus den Faktoren Globalstrahlung (Himmelsraum) und Gegenstrahlung aus dem Bodenraum.

Im Vergleich zum Standort „Schlossgartenstraße“ (FB 61) zeigen sich am Standort „E4 Dach“ (FB 61) mit Werten zwischen $0,42\text{ °C}$ (5 bis 8 h Sonnenscheindauer) und $0,45\text{ °C}$ ($\geq 11\text{ h}$ Sonnenscheindauer) erkennbar geringere Differenzen der Tagesmaxima. Gleichzeitig ist bei



Unterscheidung nach der Sonnenscheindauer kein signifikanter Trend erkennbar. Die generell etwas besseren Ventilationsbedingungen über Dachniveau überkompensieren offensichtlich den direkten Einfluss der Sonnenscheindauer zugunsten des generellen Einflusses der sommerlichen Globalstrahlungsintensitäten. Erst bei einem Überwiegen von Phasen relativ dichter Bewölkung (2 bis 5 h Sonnenscheindauer) nivellieren sich die Differenzwerte der beiden Strahlungshüttentypen.

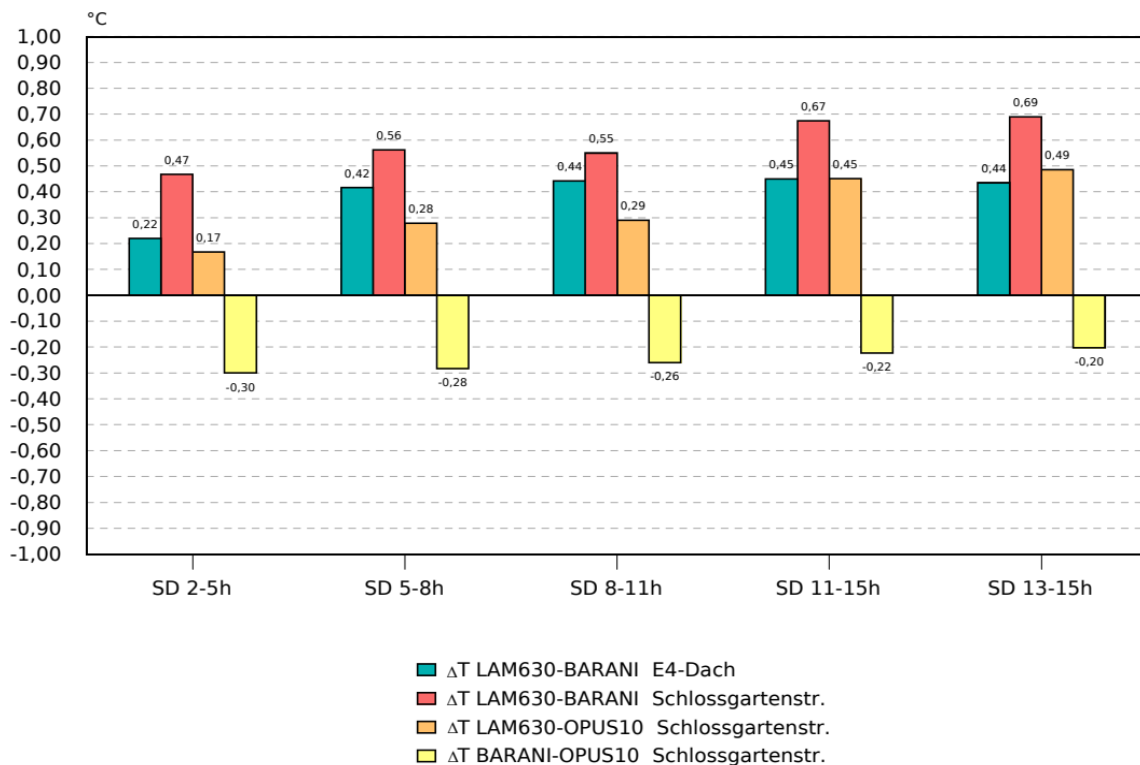


Abb. 30: Mittlere Differenzen (ΔT) der Tagesmaxima der Lufttemperatur an den Stand-orten „E4-Dach“ und „Schlossgartenstraße“ (FB 61) im Zeitraum Mai bis August 2022 differenziert nach täglicher Sonnenscheindauer

Näher zu betrachten sind auch die Maximadifferenzen bezüglich des Pt100-Messgbers. Im Vergleich zum MeteoTemp RH+T, d.h. innerhalb der BARANI-Strahlungsschutzhütte, werden an wolkenarmen Tagen etwas geringere Differenzwerte (ΔT 0,20 °C bei Sonnenscheindauer ≥ 13 h) als an wechselnd bewölkten (ΔT 0,26 °C bei Sonnenscheindauer 8 bis 11 h) bzw. stärker bewölkten Tagen (ΔT 0,30 °C bei Sonnenscheindauer 2 bis 5 h) beobachtet. Ob direkte oder indirekte Strahlungseinflüsse, unterschiedliche Ventilationsbedingungen oder Messgebereinpendelzeiten bzw. eine Kombination aus allen drei Faktoren dominant sind kann an dieser Stelle nicht geklärt werden. Die in Abb. 31 dargestellte Differenzierung nach der Strömungsintensität für Witterungssituationen mit geringer Bewölkung (≥ 11 h Sonnenscheindauer) deutet auf einen erheblichen Ventilationseinfluss hin. Auf Basis der mittleren Windgeschwindigkeiten im Zeitraum 14:00 bis 16:30 MESZ des Ultraschallmessgebers der Station „Schlossgartenstraße“ (FB 61) (THIES Ultraschall Compact) zeigen sich nur geringe



Unterschiede zwischen dem Rotronic HC2A-S3 in der LAM63 und dem MeteoTemp RH+T in der BARANI-Strahlungsschutzhütte (ΔT 0,66 °C bei mittleren Windgeschwindigkeiten 0,0 bis < 1,0 m/s, ΔT 0,69 °C bei mittleren Windgeschwindigkeiten \geq 1,0 bis < 2,0 m/s) jedoch markante Unterschiede innerhalb der BARANI-Strahlungsschutzhütte. Bei Strömungsintensitäten \geq 1,0 m/s stellen sich geringe (ΔT - 0,09 °C) und bei Strömungsintensitäten < 1,0 m/s deutliche Maximadifferenzen (ΔT - 0,37 °C) ein.

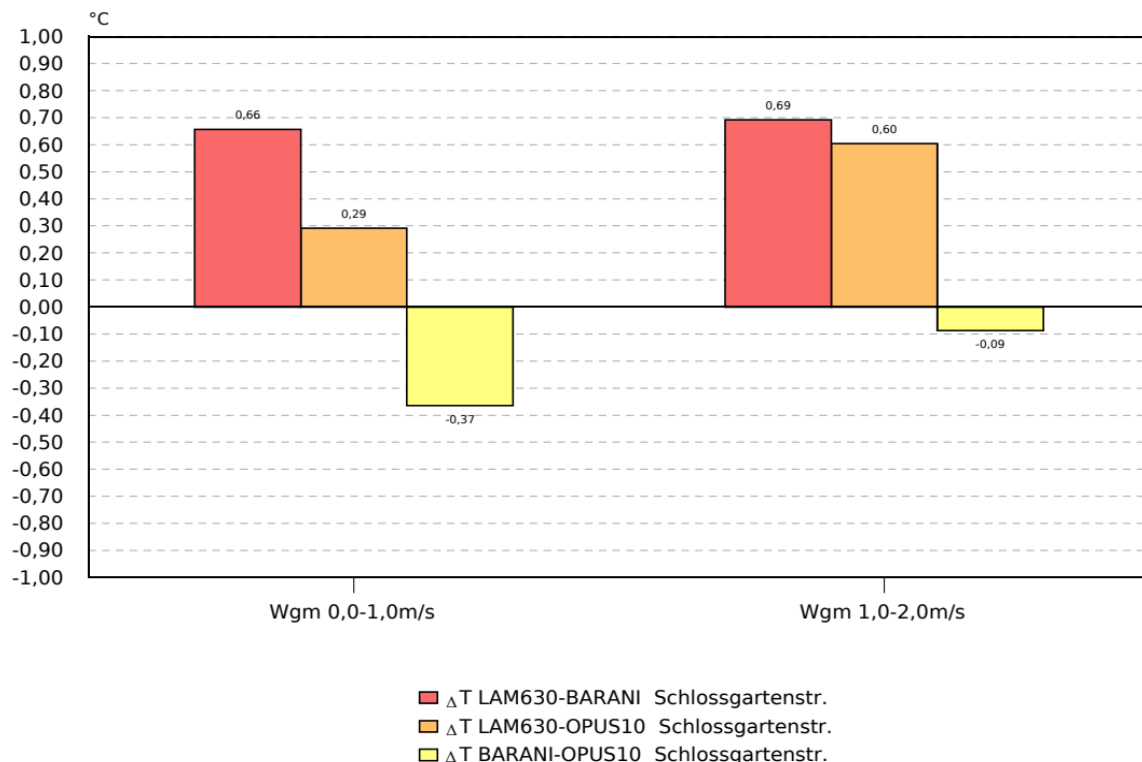


Abb. 31: Mittlere Differenzen (ΔT) der Tagesmaxima der Lufttemperatur am Standort „Schlossgartenstraße“ (FB 61) im Zeitraum Mai bis August 2022 differenziert nach mittl. Windgeschwindigkeit (14 bis 16 h) für Wetterlagen mit täglicher Sonnenscheindauer \geq 11 h

Abschließend sollen noch die Messdaten des Standortes „Schlossgartenstraße“ (FB 61) mit den Werten der DWD-Wetterstation Mannheim verglichen werden (Abb. 32). Die DWD-Station befindet sich ca. 7 km ostnordöstlich in ungestörter Freilandlage zwischen den Mannheimer Vororten Vogelstang und Wallstadt. Bewertungsbasis sind wiederum die kategorisierten täglichen Sonnenscheindauersummen im Zeitraum Mai bis August 2022. Verglichen werden die mittleren Tageshöchstwerte der Lufttemperatur. Auch heben sich wiederum die sehr guten Strahlungsschutzeigenschaften des BARANI METEOHELIX® IoT PRO Messsystems hervor. Im Vergleich zur DWD-Wetterstation werden sowohl an Tagen mit häufig wechselnder Bewölkung (Sonnenscheindauer 2 bis 5 h) als auch an heiteren bzw. weitgehend wolkenfreien Tagen (Sonnenscheindauer \geq 11 bzw. \geq 13 h) mit Werten von 0,45 °C bis 0,49 °C im Mittel nahezu die gleichen, relativ geringen Differenzen verzeichnet. Demgegenüber werden am Pt100-Messgeber in der BARANI-Strahlungsschutzhütte mit einem ΔT von 0,65 °C bis 0,74 °C



etwas höhere Maxima gemessen, wobei die Differenzwerte an wolkenarmen Tagen tendenziell etwas geringer als an Tagen mit wechselnder Bewölkung sind.

Die LAM630 zeigt die größten Abweichungen. Hier werden an der Stadtklimastation „Schlossgartenstraße“ (FB 61) an Tagen mit gemischter Bewölkung sowie an wolkenarmen Tagen im Mittel 1,02 °C bis 1,14 °C höhere Maxima als an der DWD-Station gemessen. Tendenziell zeigt sich mit zunehmender Sonnenscheindauer auch ein Trend zu geringfügig höheren Temperaturdifferenzen. Zu beachten ist in diesem Kontext nochmals, dass an der DWD-Station in einer baugleichen LAM630 Lufttemperatur und Luftfeuchte erfasst werden. Wie aufgeführt kann die Neigung der LAM630 zu Strahlungsfehlern bei reduzierter Ventilation in Kombination mit Gegenstrahlungseffekten als Folge des ungünstigen Nutzungsumfeldes am Standort „Schlossgartenstraße“ (FB 61) eine Rolle spielen. Die BARANI-Strahlungsschutzhütte scheint mit solchen typischen urbanen Bedingungen besser zurecht zu kommen.

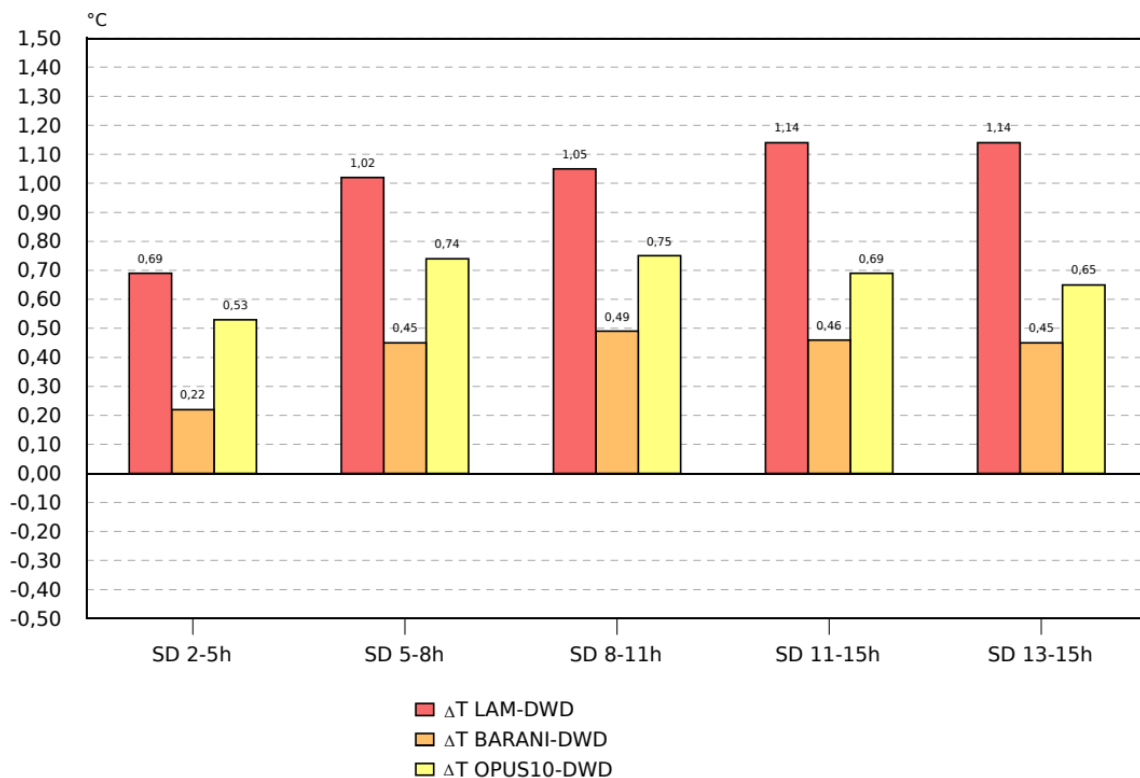


Abb. 32: Mittlere Differenzen (ΔT) der Tagesmaxima zwischen der Station „Schlossgartenstraße“ (FB 61) (LAM630, BARANI, OPUS10) und der DWD-Wetterstation Mannheim (DWD) im Zeitraum Mai bis August 2022 differenziert nach täglicher Sonnenscheindauer



3 Wertung

Der witterungsspezifische Vergleich der LAM630 mit der BARANI MeteoShield® Professional bestätigt die Ergebnisse der Referenzmessungen des Königlich Meteorologischen Institut Belgiens (SOTELINO et al., 2018) und die Eignung der BARANI IOT-Messstationen für den spezifischen Anwendungsfall „Gesamtstädtisches Klimamessnetz in Mannheim im Rahmen des sMArt roots Teilprojektes Klimaresilienz“. Die Parallelmessungen an der hinreichend belüfteten Dach- wie auch Bodenstation, welche infolge der lokalen Nutzungssituation deutlich reduzierte Ventilationsbedingungen und stärkere Einflüsse durch Gegenstrahlungseffekte aufweist, zeigen bezüglich der Referenzmesswerte der Stadtklimastationen des FB 61 auch während intensiver Besonnung keine relevanten Strahlungsfehler. Vielmehr belegen die Messdaten, dass die LAM630 an Strahlungstagen als Folge der besonderen nutzungsspezifischen Einflüsse in der Regel sogar etwas höhere Temperaturwerte registriert. Vor Beginn der Vergleichsmessungen wurden aus Erfahrung anderer Stadtklimamessnetze auf Basis passiver Strahlungsschutzhütten sogar eher stärkere Überwärmungseffekte in der BARANI MeteoShield® Professional, vor allem unter ungünstigen stadtklimatischen Bedingungen, erwartet.

Aufgrund der sehr guten Strahlungsschutzeigenschaften der BARANI MeteoShield® Professional können die Zielvorgaben,

- hinreichend genaue Messdaten,
- untereinander vergleichbare Messdaten,
- von Strahlungsfehlern weitgehend unbeeinflusste Messdaten

zu erhalten in einem Messnetz auf Basis der BARANI MeteoHelix® IoT Wetterstationen voraussichtlich erreicht werden.



Literaturverzeichnis

- Barnett, A., D. B. Hatton, und D. W. Jones. *Recent changes in thermometer screen design and their impact*. Geneva: WMO, 1998, 12.
- Brandsma, T., und J. P. Van der Meulen. „Thermometer screen intercomparison in De Bilt (The Netherlands), Part I: Understanding the weather-dependent temperature differences.“ *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, Nr. 28(3): (2008): 371–387.
- Brandsma, T., und J. P. Van der Meulen. „Thermometer screen intercomparison in De Bilt (the Netherlands), Part II: Description and modeling of mean temperature differences and extremes.“ *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, Nr. 28(3) (2008): 389-400.
- „Commission for instruments and methods of observation. 13 th session, Bratislava, 25 September – 3 October 2002.“ (World Meteorological Organization), Nr. WMO-No. 947 (2003).
- Coppa, G., A. Quarello, G. J. Steeneveld, N. Jandrić, und A. Merlone. „Metrological evaluation of the effect of the presence of a road on near-surface air temperatures.“ *International Journal of Climatology*, Nr. 41(6) (2021): 3705–3724.
- Datenportal Basel-Stadt*. 2023.
https://data.bs.ch/explore/embed/dataset/100009/table/?disjunctive.name_original&disjunctive.name_custom&sort=dates_max_date (Zugriff am 24. 04 2023).
- Egli, M., und F. Baum. *Stadtklima-Messungen: Ausgewählte Resultate Sommer 2019*. Kanton Zürich. 2019. (Zugriff am 2019).
- „Guide to meteorological instruments and methods of observation (“CIMO guide”).“ (World Meteorological Organization), Nr. WMO guide 8, 7th edition (2008).
- „Guide to meteorological instruments and methods of observation.“ (World Meteorological Organization) 1996.
- Hannak, L., und S. Brinckmann. *Parallelmessungen an deutschen Klimareferenzstationen: Schlussfolgerungen im Hinblick auf Homogenität und Messunsicherheiten*. Offenbach a. Main: Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 2020.
- ISO 17714:2007: Meteorology - air temperature measurements - test methods for comparing the performance of thermometer shields/screens and defining important characteristics*. Genf: International Standardization Organization, 2007.



- Lähne, W. *Bewertung meteorologischer Messsysteme im Rahmen der Projektanforderung. Arbeitsbericht für das sMArt roots Teilprojekt Klimaresilienz.* Mannheim: sMArt City Mannheim GmbH, 2021.
- Leroy, M. „Note Technique No 35B, Direction des Systemes d’Observation.“ *Classification d’un site* (Meteo France), 2014.
- Lopardo, G., F. Bertiglia, S. Curci, G. Roggero, und A. Merlone. „Comparative analysis of the influence of solar radiation screen ageing on temperature measurements by means of weather stations.“ *International Journal of Climatology* 34(4): 1297–1310 (2014).
- Oke , T. R. „Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites.“ (World Meteorological Organization (WMO)) WMO/TD-No. 1250, Nr. IOM Report- No. 81 (2006).
- Park, J. W., J. W. Kim, S. Lee, und Y. G. Kim. „Air temperature dependencies on the structure of thermometer screens in summer at Daejeon, South Korea.“ *Meteorological Applications*, Nr. 29(3): e2064 (2022).
- Richtlinie - Automatische nebenamtliche Wetterstationen im DWD.* September 2020.
https://www.dwd.de/DE/derdwd/beobachter/richtlinie_auto_na_wetterstationen.html
(Zugriff am 2020).
- Smart Climate – Plug & Sense. Abschlussbericht Pilotphase 1.* SMART REGIO BASEL. 2022.
https://smartregiobasel.ch/download/30/Abschlussbericht_Smart_Climate_Pilotprojekt.pdf.
- Sotelino, L. G. , N. D. Coster, P. Beirinckx, und P. Peetres. *Intercomparison of Shelters in the RMI AWS Network.* Vers. P1_26. WMOCIMO. 2018.