



Smart City
Mannheim



Aufgabenstellung 5

**Bewertung
meteorologischer
Messsensorik bzw.
Messsysteme 11**

**Empfehlungen zur
Technikauswahl 30**

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:

12/2023



Inhaltsübersicht

Impressum	2
Vorwort	4
1 Aufgabenstellung	5
2 Bewertung meteorologischer Messsensorik bzw. Messsysteme	11
2.1 Messparameter Lufttemperatur/Luftfeuchte	11
2.2 Messparameter Windrichtung/Windgeschwindigkeit	17
2.3 Messparameter Niederschlag	20
2.4 Kombinierte Messsysteme	22
2.5 Optional: Messparameter Globalstrahlung	27
3 Empfehlungen zur Technikauswahl	30
3.1 Kombinierte Messsensoren – All-In-One-Wetterstationen	30
3.2 Lufttemperatur-/Luftfeuchte in Einheit mit Strahlungsschutzhütte	30
3.3 Windgeschwindigkeit/Windrichtung	31
3.4 Niederschlag	32
3.5 Globalstrahlung	32
3.6 Orientierende Empfehlungen für Messstandorte	33
Literaturverzeichnis	34



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 Projektes sMArt roots Klimaresilienz wird in Zusammenarbeit mit dem Fachbereich Geoinformation und Stadtplanung, Freiraumplanung der Stadt Mannheim (FB 61) ein verdichtetes stadtklimatologisches Messnetz auf Basis von LoRaWAN errichtet. Der Schwerpunkt liegt in der flächendeckenden Erfassung der Parameter Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windrichtung und Windgeschwindigkeit. Wobei die typischen Mannheimer Stadtstrukturen repräsentativ abzubilden sind und ergänzend einzelne Siedlungsstrukturen bzw. Umplanungsbereiche kleinräumig und hochverdichtet analysiert bzw. begleitet werden sollen (Fokus auf die Abhängigkeiten Verdichtungsgrad \leftrightarrow Grünanteil). Das Messnetz wird in Ergänzung zum bestehenden bzw. in Aufbau befindlichen Stadtklimamessnetz (Fachbereich Geoinformation und Stadtplanung, Freiraumplanung der Stadt Mannheim) errichtet und wird ggf. um bestehende externe Messnetze (kommunal, Bund. Land, privatwirtschaftlich) ergänzt. Inhaltlich orientiert es sich als explizites Stadtklimamessnetz an den Richtlinien und Empfehlungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) bzw. der World Meteorological Organization (WMO). Aufgrund technischer Limitierungen bei der Messwerterfassung (unabhängig vom 220-V-Stromnetz und in der Folge keine Nutzung aktiv ventilierter Strahlungsschutzhütten) und Übertragung (LoRaWAN, autarke Stromversorgung bei minimaler Leistungsaufnahme) bestehen allerdings u.U. deutliche Einschränkungen bei der Messtechnikauswahl. Da sich dies je nach Witterungssituation und Sensorumfeld signifikant auf die Messdatengüte auswirken kann (insb. Strahlungsfehler bei der Temperaturerfassung) ist besonderer Wert auf die Auswahl geeigneter Messtechnik zu legen.

Im Unterschied zum Stadtklimamessnetz des FB 61, welches auf die Erfassung und Dokumentation des wetterlagen-, jahres- und tageszeitenabhängigen Überwärmungseffektes insbesondere im Stadtzentrum bzw. der Interaktion der städtischen Wärmeinsel mit dem regionalen Ventilationsgeschehen – z.B. über die ausgewiesenen Grünzugachsen – abzielt, soll das Projekt sMArt roots kleinräumige urbane Mikroklimawirkungs- und -ursacheneffekte identifizieren. Hierauf aufbauend sollen im Kontext des anthropogenen Klimawandels in den Feldern Stadtplanung, Forschung, Modellentwicklung und -anwendung spezifische urbane Anpassungs- und Lösungsstrategien entwickelt werden.

Ziel des Gutachtens ist es die vom Auftraggeber vorausgewählten potentiell nutzbaren Messsysteme hinsichtlich der Projektanforderungen zu bewerten und Handlungsempfehlungen zu geben. Da, wie vorangehend angesprochen, die Datenqualität meteorologischer Messungen nicht allein von der Auswahl der Messtechnik abhängt, sondern vom komplexen Zusammenspiel der Faktoren Messumfeld, meteorologische Situation und Messtechnik bestimmt wird, fokussiert das Gutachten nicht allein auf die fachliche Bewertung der vorausgewählten Messtechnik.



Konkret hat der Auftraggeber folgende generelle Sensorik-Anforderungen formuliert:

- Integration in das Stadtbild bei kompakter, unauffälliger Bauform,
- preislich verhältnismäßig für flächendeckende Anwendung,
- frei von externer Stromversorgung und somit Standortunabhängigkeit,
- integrierte LoRaWAN-Kompatibilität,
- möglichst komplett montierte Lösung eines Herstellers,
- einfache Installationsmöglichkeit (Mast- und Wandmontage) und
- nahezu wartungsfrei.

Auf Grundlage dieser übergeordneten Projekt-Anforderungen und der technischen Spezifikationen, welche der Auftraggeber im Dokument „sMArt roots-Teilprojekt Klimaresilienz-Messtechnik“ (MKB MANNHEIMER KOMMUNALBETEILIGUNGEN GMBH (2021)) vorgelegt hat soll die Eignung der vorgeschlagenen Sensoren im Hinblick auf die vorrangigen Projektziele

- Engmaschige Temperaturerfassung in definierten Stadtgebieten von Interesse,
 - z.B. Grünzug mit Park, Ballungszentrum und Gebiet mit Flussnähe,
 - Einfluss von Bebauung und Gebäudegestaltung.

bewertet werden. Vorgaben bzgl. der Genauigkeit der Messsensorik wurden mit Ausnahme der Erfassung der Lufttemperatur ($\leq 0,2$ K) nicht exakt konkretisiert. Eine diesbezügliche Orientierung kann die „Richtlinie für Automatische nebenamtliche Wetterstationen im DWD“ geben. Sie beschreibt die fachlichen und technischen Anforderungen, deren Erfüllung die Grundlage für eine qualitätsgerechte Datengewinnung sog. nebenamtlicher Stationen nach DWD-Standard ist und auf Richtlinien der WMO basiert. Neben den Genauigkeitsanforderungen der Messtechnik werden hier auch die Anforderungen an das Messfeld (insb. Anforderungen an Abstände zu Hindernissen) definiert. Da sie für stadtklimatologische Messungen nicht praktikabel sind, hat die WMO mit der „Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites“ eine spezifische Handlungsanleitung herausgegeben.

Bezüglich der Messgenauigkeit werden im DWD-Messnetz die in Tab. 1 aufgelisteten Grenzwerte gefordert. Sie lassen sich allerdings nur bei unbeschränkter Auswahl aus den Angeboten der Hersteller meteorologischer Messtechnik einhalten. Bei besonderen Vorgaben bzw. Aufgabenstellungen, wie dem sMArt roots Projekt, müssen teilweise Abstriche in Kauf genommen werden, die sich bei Einhaltung bestimmter Kriterien (z.B. Sorgfalt bei der Auswahl der Messstandorte, Parallelmessung zu Referenzsystemen, qualitativ hochwertiger Strahlungsschutz) minimieren lassen. Die in Tab. 1 wiedergegebenen Anforderungen an die Messtechnik in Klimamessnetzen dienen dem Grundinformationsbedarf.



Element	Messbereich	Auflösung	Typische Genauigkeit
Lufttemperatur (2 m)	- 30 °C ...+ 70 °C	0,1 K	± 0,1 K
Luftfeuchte (2 m)	0 ..+ 100 % RH	0,1 % RH	± 1,5 % rel. F. (5 ... 95 % rel. F. und 10 ... 40 °C)
Niederschlagshöhe	0 mm...350 mm	0,01 mm	0,1 mm oder 1 % (Menge < 6 mm/min) 2 % (Menge > 6 mm/min)
Niederschlagsintensität	0 ... 20 mm/min bzw. 0 ... 1200 mm/h	0,1 mm/h	0,1 mm oder 1 % (Menge < 6 mm/min) 2 % (Menge > 6 mm/min)
Windgeschwindigkeit (mechanisch)	0 ... 75 m/s	0,1 m/s	< 1 % vom Messwert (0,3 ... 50 m/s) oder < ± 0,2 m/s
Windrichtung (mechanisch)	0°... 360°	0,35°	± 1°
Windgeschwindigkeit Ultraschall	0 ... 75 m/s	0,1 m/s	± 0,2 m/s rms (< 5 m/s) ± 2 % rms (5 m/s ... 60 m/s)
Windrichtung Ultraschall	0°... 360°	1 °	± 2° WG > 1 m/s

Tab. 1: Messbereich, Auflösung und Messgüte meteorologischer Messtechnik in Klimamessnetzen

Bevor auf die Bewertung der in Frage kommenden Messsysteme sowie der Darreichung von Handlungsempfehlungen eingegangen wird, soll noch auf Stolpersteine bei der Auswahl meteorologischer Messtechnik aufmerksam gemacht werden.

Seitens des Projektvorgabekataloges wirken die Anforderungen „Integrierte LoRaWAN-Kompatibilität“ und insbesondere „Frei von externer Stromversorgung (> Standortunabhängigkeit)“ potentiell limitierend auf die Datenqualität. Messsensorikhersteller bieten auf LoRaWAN-Basis überwiegend kostengünstigere Messgeber mit höheren Messtoleranzen an, da Interessenten zumeist keine hochpräzise Genauigkeit für ihre Anwendungen benötigen oder wünschen bzw. orientierende Messdaten als ausreichend betrachten aber Kostenaspekte eine mitentscheidende Rolle spielen.

Bzgl. der Erfassung der Lufttemperatur werden für solche Systeme zumeist keine hochpräzise, linearisierte und langzeitstabile PT100-Sensoren eingesetzt, sondern Messgeber auf Halbleiterbasis (zumeist NTC). Diese weisen zumeist eine schlechtere Langzeitkonstanz auf, ändern ihren Widerstand u.U. bei Feuchtigkeit und haben ein gewisses Gedächtnis (Widerstand ist von der Vorgeschichte abhängig), so dass sie i.d.R. für unkritische Messzwecke bzw. einfachere Temperaturmessungen mit Genauigkeitsanforderungen von 1 bis 3 K eingesetzt werden.

Zu beachten ist auch, dass PT-Sensoren internationalen Normen entsprechen (IEC 751 / DIN EN 60751). Bei Halbleiterelementen wie NTC schließen material- und produktionsspezifische Merkmale jedoch eine Normung grundsätzlich aus, weshalb solche Sensoren nur begrenzt



untereinander austauschbar sind. Relativ hohe Messgenauigkeit und Linearität sind auf Basis NTC im Temperaturbereich meteorologischer Erfassungen allerdings ebenfalls erreichbar. So können Messtechnikhersteller die angesprochenen Fehlerquellen bzw. Toleranzen mittels nachgeschalteter Elektronik weitgehend kompensieren. Zu beachten bleibt jedoch das Problem der Langzeitstabilität, da sich die angegebene Genauigkeit auf den Sensor ab Werk bezieht und unter realen Anwendungsbedingungen unbekannt ist, welchen Umgebungsbedingungen die Sensoren im Einsatz ausgesetzt sind. Des Weiteren spielt hier auch die Sensorbeschichtung eine Rolle. So sind epoxidbeschichtete NTCs weniger langzeitstabil als hermetische, glasversiegelte NTC-Sensoren. Unter den besonderen Bedingungen der Luftbeimengungen stadtatmosphärischer Umgebungen sollten diese Aspekte bedacht werden.

In der Regel geben Hersteller halbleiterbasierter Temperaturmesstechnik eine Genauigkeit von $\pm 0,2$ K im Temperaturbereich $- 25$ bis $+ 70$ °C an, wobei hier wie bereits erwähnt keine Normung analog PT100 nach EN 60751 existiert.

Die gleichen Einschränkungen betreffen auch die Messungen der Luftfeuchte. Zum Einsatz kommen kapazitative Feuchtesensorelemente. Auch hier gibt es je nach System deutliche Unterschiede bezüglich der Genauigkeit und insbesondere der Langzeitstabilität. Eine Achillesferse bilden Verschmutzungen durch Stäube und Aerosole insbesondere unter stadtatmosphärischen Bedingungen. Resultierende Drifteffekte treten bei Luftfeuchterfassungen generell häufiger und mit größeren Abweichungen als bei Temperaturerfassungen auf. Feuchtesensoren sollten daher unbedingt durch Sinterfilter geschützt werden.

Im Hinblick auf die Temperaturerfassung stellt der Eckpunkt „Frei von externer Stromversorgung (> Standortunabhängigkeit)“ einen weiteren bedeutsamen Faktor dar, da keine aktiv ventilierten Strahlungsschutzhütten entsprechend der generellen Empfehlungen für meteorologische Messungen eingesetzt werden können. Die ventilatorgesteuerte aktive Belüftung dient dazu, die unvermeidliche Eigenerwärmung (oder Abkühlung in klaren Nächten) in der Sensorumgebung als Folge direkter und indirekter Strahlungseffekte (Sonne, Bewölkung, klarer Nachthimmel) mittels geregelter Luftstrom auf ein Minimum zu begrenzen bzw. die realen atmosphärischen Bedingungen im Stationsumfeld auf das Innere der Strahlungsschutzhütte zu übertragen. Ohne aktive Ventilation zeigen auch optimierte Strahlungsschutzhütten bei direkter (Sonne) und indirekter Einstrahlung (reflektierte diffuse Strahlung durch Wolken, Gebäudefassaden, Bodenform und -art, Vegetation) eine Eigenerwärmung in Abhängigkeit von den lokalen Ventilationsbedingungen. In klaren Nächten kühlen sie sich dagegen unter das Niveau der umgebenden Luft ab. Jeder Autofahrer kennt dieses Phänomen als nächtliche Tau- oder Reifbildung auf den Dächern und Windschutzscheiben seines Fahrzeuges. Technisch lassen sich Strahlungsschutzhütten zwar durch die



Wahl von Form, Farbe und Gestalt optimieren; eine Totalreflexion des gesamten Strahlungsspektrums und somit eine Unterbindung des Eigenklimas von Strahlungsschutzhütten ist unter realen Umweltbedingungen jedoch wahrscheinlich ebenso wenig erreichbar wie eine tatsächlich effektive natürliche Durchlüftung.

Natürlich ventilierte Strahlungsschutzhütten liefern nach allgemeinen Erkenntnissen nur ab Windgeschwindigkeiten von etwa 2 m/s bis 3 m/s akzeptable Messwerte. Mit Lüfterunterstützung sind Strahlungsschutzhütten geeignet, wenn der Lüfter im Bereich des Messfühlers eine Strömungsgeschwindigkeit von mindestens 1 m/s erreicht (LÖFFLER 2012, BRANDSMA 2008, HANNAK und BRINCKMANN 2020). Neuere Entwicklungen deuten allerdings darauf hin, dass bei passiv ventilierten Strahlungsschutzhütten effektivere Systeme möglich sind (SOTELINO et. al. 2018).

Abb. 1 vermittelt die unterschiedliche Wirkung natürlich und aktiv ventilerter Strahlungsschutzhütten im Tagesgang während einer hochsommerlichen Strahlungswetterphase mit geringer Bewölkung. Dargestellt sind die maximalen Temperaturen in 10-Minuten-Intervallen. Die Daten wurden mittels auf 0,1 °C kalibrierten PT100-Messgeber und eines Datenloggers (DALOS 515C-M der Fa. F&C Klimamesstechnik) erfasst. Die natürlich (passiv) belüfteten Strahlungshütten (Modelle 'Gill' und 'Fischer', Abb. 2) zeigen insbesondere bei schwacher Ventilation am frühen Vormittag (Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe bis ca. 1 m/s) eine sehr markante Überwärmung bis über 2 °C gegenüber der aktiv ventilierten Strahlungsschutzhütte 'Friedrichs' (modifiziert = leistungsstarker Ventilator und weiß lackiert). Als Folge etwas höhere Windgeschwindigkeiten im weiteren Tagesverlauf (überwiegend 1,5 bis 2,5 m/s) und stärkerer turbulenter Durchmischung im bodennahen Raum bzw. in Messgeberhöhe (2 m) nimmt die Eigenüberwärmung zwar ab. Die Differenzen zwischen den passiv und der aktiv ventilierten Hütte liegen jedoch bis zum späten Nachmittag überwiegend zwischen 0,5 und 1,0 °C wobei das Augenmerk hier auf die Unterschiede zwischen den beiden natürlich belüfteten Strahlungshütten zu richten ist. Während der Nachtstunden ist typischerweise die aktiv ventilierte Strahlungshütte etwas wärmer. Ausstrahlungsbedingt kühlen sich die Oberflächen aller drei Strahlungshütten ab. Via Wärmeleitung und Diffusion sinkt auch die Temperatur innerhalb der Strahlungshütten aufgrund der Luftruhe unter die Werte der Umgebungsluft ab, wobei in der aktiv ventilierten Strahlungshütte der effiziente Luftaustausch diesem Effekt entgegenwirkt.

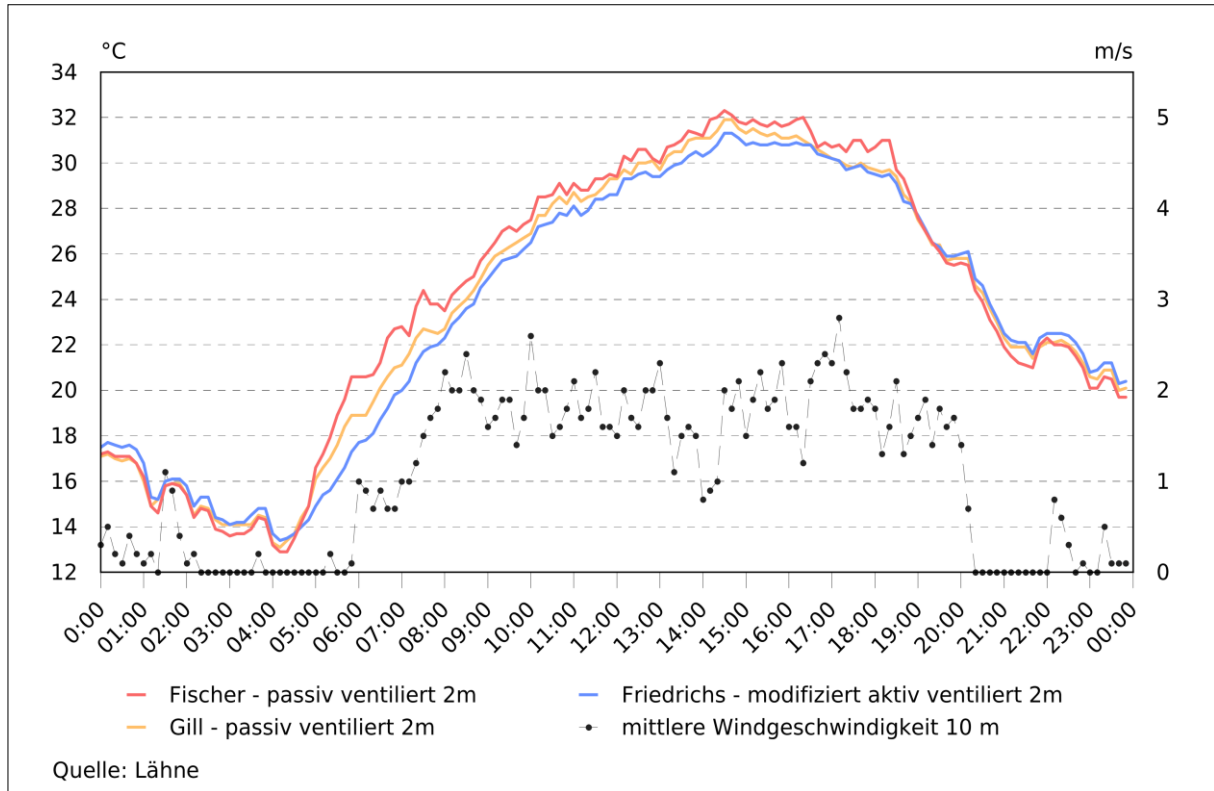


Abb. 1: Tagesgang der Lufttemperatur und der Windgeschwindigkeit während einer Strahlungswetterlage am 15.06.2021 in Römerberg – zwei passiv ventilierte Strahlungsschutzhütten im Vergleich zu einer aktiv ventilierten Strahlungsschutzhütte

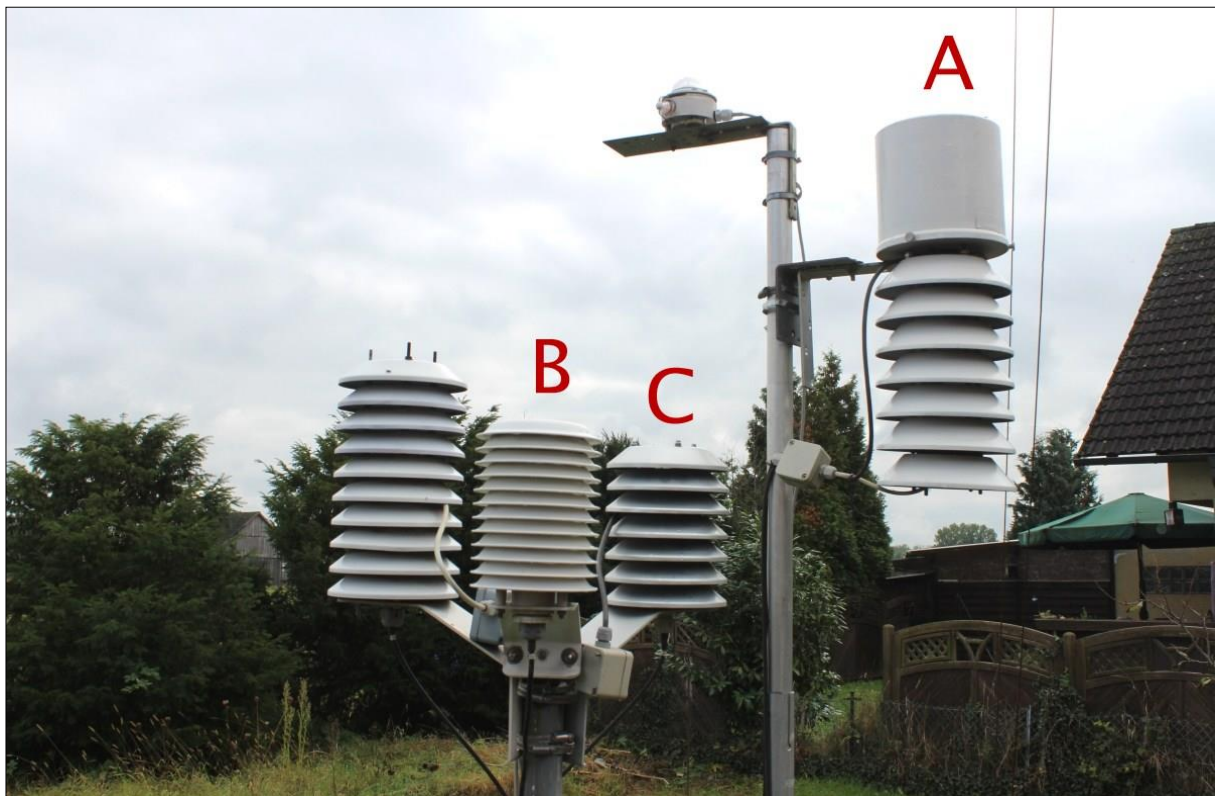


Abb. 2: Versuchsanordnung (Ausschnitt) Testfeld Römerberg mit den Strahlungsschutzhütten A 'Friedrichs', B 'Gill' und C 'Fischer'.



2 Bewertung meteorologischer Messsensorik bzw. Messsysteme

Der Auftraggeber hat im Dokument „sMArt roots-Teilprojekt Klimaresilienz-Messtechnik.docx“ die Nutzung der nachfolgenden Messsensorik vorgeschlagen.

2.1 Messparameter Lufttemperatur/Luftfeuchte

A DECENTLAB

Kombinierter Temperatur-/Feuchtesensor mit Strahlungsschutzhütte für LoRaWAN DL-SHT35-001 mit den Spezifikationen gemäß Produktinformationsunterlagen DECENTLAB:

Messbereich Temperatur:	- 40 ... + 125 °C
Auflösung:	0,01 °C
Genauigkeit:	± 0,1 °C von 20 ... 60 °C ± 0,2 °C von - 40 ... 90 °C
Messbereich Rel. Luftfeuchte:	0 ... 100 % Rel. Feuchte
Auflösung:	0,01 %
Genauigkeit:	± 1.5 % Rel. Feuchte (0 ... 80 % Rel. Feuchte) ± 2 % Rel. Feuchte (80 ... 100 % Rel. Feuchte)



Abb. 3: Messeinheit DECENTLAB DL-SHT35-001 inklusive Strahlungsschutz und Temperatur-/Feuchtemessgeber DL-SHT35-002

Als Messprinzip für Temperatur und Feuchte gibt der Hersteller 'Digital CMOSens® technology' ohne nähere Spezifikationen an. Die Abmessungen der kompletten Messeinheit betragen inklusive Strahlungsschutzhütte 280 × 105 × 85 mm. Der Strahlungsschutz ist mit Abmessungen ca. 80 x 85 x 85 mm deutlich kleiner als bei Standardhütten (2- bis 3-fache Abmessungen bei einem Vielfachen Innenraumvolumen). Gleiches gilt auch für den in Bezug auf den Luftaustausch mitentscheidenden Lamellenabstand (Abb. 3). Die Innenseiten der Lamellen sind nicht geschwärzt. Streustrahlung kann witterungsabhängig auf den schwarzen



Sensorkopf (Abb. 3) einwirken und eine zusätzliche Eigenerwärmung befördern. Hinsichtlich des thermischen Verhaltens der Strahlungsschutzhütte sind vom Hersteller keine Informationen verfügbar. Hinweise lassen sich jedoch aus bereits realisierten Messnetzprojekten gewinnen. So wurden lokale Stadtklimaüberwachungssysteme auf Basis von LoRaWAN in der Schweiz ab 2018 in den Städten Basel und Zürich eingerichtet. In Zürich und im angrenzenden Umland besteht das Netz aus etwa 50 Messstandorten auf Basis des Produktes DL-SHT35-001. Die Messwerte sind als open data über das Portal des Amtes für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) des Kantons Zürich verfügbar (DATENPORTAL KANTON ZÜRICH). Um die Sensor-Ergebnisse (Lufttemperatur) untereinander vergleichbar zu machen, wurden nach Information des AWEL alle Sensoren mit nächtlichen Vergleichsmessungen auf eine Referenzmethode (Meteolabor, Thygan) normalisiert. Dabei werden geringe, sensorspezifische systematische Unterschiede beim Datenexport in das Open-Data-Portal korrigiert. Korrekturen betragen in der Regel weniger als $\pm 0,3$ °C. Gleichzeitig weist das AWEL darauf hin, dass bei der Interpretation der Daten zu beachten ist, dass die Sensoren mit einem passiv belüfteten Strahlungsschild (Lamellen) ausgestattet sind und Vergleichsmessungen zeigen, dass bei direkter, intensiver Sonneneinstrahlung Abweichungen zwischen Messwert und eigentlicher Lufttemperatur von bis zu 5 °C auftreten können. Bei Beschattung des Strahlungsschutzes sind die Messungen bezüglich Strahlungseffekt auf rund 0,5 °C genau. Die Sensoren wurden dementsprechend möglichst an lokal größtenteils beschatteten Standorten aufgehängt. In der Nacht sind die Messdaten erfahrungsgemäß sehr genau (DATENPORTAL KANTON ZÜRICH).

Abb. 4 zeigt als exemplarisches Beispiel anhand des Tagesganges der Lufttemperatur am 14.08.2021 (wolkenarmer heißer Sommertag) auf Basis von vier mit der Sensoreinheit DL-SHT35-001 ausgestatteten AWEL-Stationen und zwei Stationen des nationalen Wetterdienstes MeteoSchweiz die teilweise komplexe Problematik auf. Die vier ausgewählten AWEL-Stationen decken sowohl innerstädtische hochversiegelte Standorte (Hardplatz), innerstädtische Grünflächen (Siefelfeld), verdichtete seenahe Bereiche (Sechsläutenplatz) wie auch Stadtrandbereiche (Blumenfeld) ab, wobei der Standort Blumenfeld nur etwa 1000 m von der MeteoSchweiz Wetterstation Affoltern (aktiv belüftete Strahlungsschutzhütte) entfernt ist. Kloten ist ebenfalls eine Station des Schweizer Wetterdienstes. Von beiden Stationen liegen Stundenwerte vor, von den AWEL-Stationen 10-Minuten-Werte. Die unterschiedliche Intervalldichte erklärt im Vergleich den eher 'zappeligen' Temperaturverlauf der AWEL-Stationen, welche nachts vor allem in dichter Bebauungslage den typischen Stadtklimaeffekt nachzeichnen. Augenmerk sei jedoch auf den Temperaturgang am Tag mit seinen individuellen, teilweise gegensätzlichen Entwicklungen und insbesondere markant überproportional hohen Messwerten gerichtet. Sie liegen am Nachmittag etwa 2 bis 3 °C über den Werten von Affoltern und Kloten wobei kein eindeutiger Bezug zur Bebauungsdichte erkennbar ist. So werden an der Station Siefelfeld auf dem flächigen und stark durchgrüneten



Friedhof sowie an der seenahen Station Sechsläutenplatz ähnlich hohe relative Überwärmungsgrade wie an der Station Hardplatz (sehr hoher Versiegelungsgrad im Umfeld) beobachtet. Weiterhin lassen sich vor allem am Vormittag Sondereffekte erkennen, die weniger aufgrund siedlungsklimatischer Ursachen auftreten, sich aber schlüssig als Folge des passiven Strahlungsschutzes erklären lassen. So zeigen die beiden Stationen Blumenfeld und Sechsläutenplatz zwischen ca. 10 und 12 Uhr einen deutlich verminderten Temperaturanstieg bzw. teilweise ein Verharren. Zeitweise liegen die Werte hier ähnlich niedrig wie in Kloten und Affoltern. Hingegen zeigt die Station Sihlfeld eine überproportionale Temperaturzunahme. Zeitweise werden Differenzen bis zu 5 °C gemessen. Sie sind eine Folge des Zusammenwirkens unterschiedlicher Besonnung, Beschattung, Ventilation, der fehlenden aktiven Belüftung der Sensoreinheit DL-SHT35-001 sowie der Bauform des Strahlungsschutzes. Ohne eingehende Kommentierung sei auch auf den in Abb. 5 dargestellten Tagesgang (ebenfalls 14.08.2021) eines vergleichbaren Projektes in Basel (DATENPORTAL KANTON BASEL STADT) hingewiesen, wobei hier offenbar noch größere Einschränkungen bzgl. des Strahlungsschutzes zu beobachten sind. Die beiden LoRaWAN-Stationen Spitalstrasse (Innenstadt) und Schaffhauser Rheinweg (Rheinufer Stadtteil Wettstein) sind im Gegensatz zu den regulären Wetterstationen am Flughafen sowie in Binningen nur passiv ventiliert.

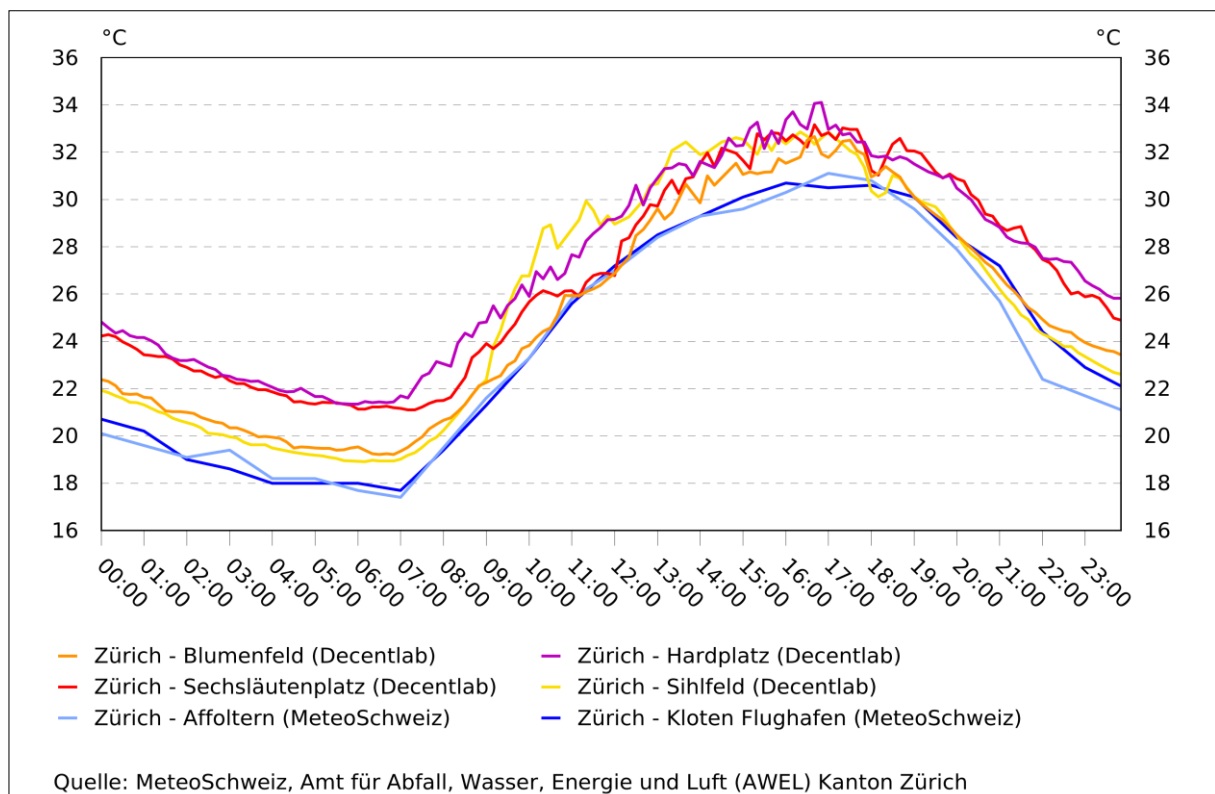


Abb. 4: Tagesgang der Lufttemperatur am 14.08.2021 in Zürich im Vergleich von vier AWEL und zwei MeteoSchweiz Messstationen

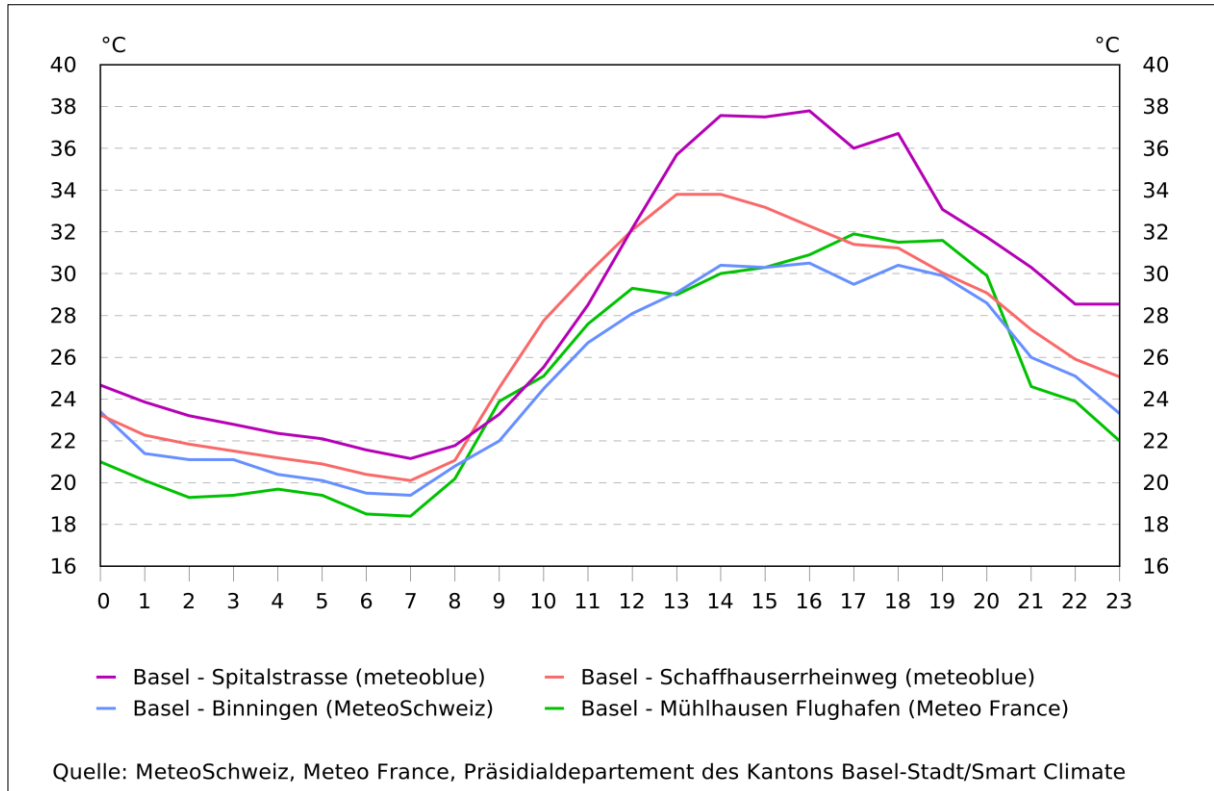


Abb. 5: Tagesgang der Lufttemperatur am 14.08.2021 in Basel an zwei Stationen des Projektes Smart Climate im Vergleich zu den Wetterstationen von MeteoSchweiz und Meteo France

B BARANI DESIGN

Kombinierter Temperatur/-Feuchtesensor MeteoTemp RH+T in Strahlungsschutzhütte MeteoHelix® IoT Pro für LoRaWAN mit den Spezifikationen gemäß den Produktinformationen von BARANI DESIGN:

Messbereich Temperatur: - 40 ... + 105 °C
Auflösung: 0,1 °C
Genauigkeit: ± 0,2 °C von - 40 ... 105 °C

Messbereich Rel. Luftfeuchte 0 ... 100 % Rel. Feuchte
Auflösung: 0,1 %
Genauigkeit: ± 1,8 % Rel. Feuchte bei 25°C, Hystere ± 1 %
Stabilität: < 0,25 % pro Jahr



Abb. 6: Messeinheit BARANI DESIGN Temperatur-/Feuchtesensor MeteoTemp RH+T und Strahlungsschutzhütte MeteoHelix® IoT Pro

Als Messprinzip für Temperatur gibt der Hersteller 'Silikonsensor' und bezüglich der Relativen Feuchte 'kapazitativ' an. Nähere Spezifikationen zur Messtechnik sind nicht verfügbar. Auf Nachfrage teilt BARANI DESIGN mit, dass ihre Temperatursensoren eine höhere Genauigkeit als die meisten PT100-Systeme aufweisen sollen. Ungenauigkeiten treten jedoch nur bei PT100-Systemen in 2-Leiterschaltung und einfacher Datenloggertechnik auf. Meteorologische Systeme mit spezifischer Datenloggerelektronik und PT100 in 3- oder 4-Leiteranschlusstechnik sind hiervon nicht betroffen und erreichen Genauigkeiten von $\pm 0,1$ K im Messbereich $- 30^{\circ}$ C bis $+ 70^{\circ}$ C. Unabhängig von dieser Frage kann jedoch angenommen werden, dass die in der Dokumentation versprochene Genauigkeit von $\pm 0,2^{\circ}$ C im Messbereich von $- 40$ bis 105° C tatsächlich weitgehend eingehalten werden kann, da das Sensorsignal mittels umfassender Elektronik stabilisiert und kalibriert wird (entsprechende Kalibrierungszertifikate können vom Hersteller angefordert werden). Silikonsensor (Abb. 6 und Abb. 15) ist in diesem Zusammenhang irreführend, da Silikon 'nur' der Ummantelung der üblicherweise eingesetzten Halbleiter-KTY-Sensoren dient. Zu beachten ist u. U. jedoch bei Langzeitmessungen die Driftfrage sowie der möglicherweise verstärkend wirkende Effekt der Silikonummantelung.

Die voranstehenden Ausführungen gelten auch für das Relative-Feuchte-Sensorsignal. Positiv ist in diesem Zusammenhang zu bewerten, dass das Sensormodul mit einer Sinterkappe ausgestattet ist und das Sensormodul eine helle Ummantelung aufweist (wichtig in Bezug auf den Einsatz in Strahlungsschutzhütten).

Als Strahlungsschutzhütte bietet BARANI DESIGN ihre patentierte Eigenentwicklung MeteoHelix® an. Die Besonderheit dieser Strahlungsschutzhütte ist die schraubenförmige Anordnung der Lamellen analog einer archimedischen Schraube (Abb. 6 und Abb. 15). BARANI DESIGN verspricht mittels des innovativen Designs der natürlich belüfteten Strahlungsschutzhütte einen erheblichen Vorteil gegenüber der üblichen Bauform, bei der die Lamellen – ähnlich umgekehrter Topfuntersetzschalen – gestapelt übereinander angeordnet sind. Die MeteoHelix® soll insbesondere in Umgebung mit hohem Reflexionsgrad, wie zum Beispiel über Schnee, Wasser, Pflaster oder in Städten mit Smart-City-Anwendungen eine



bessere Belüftung als viele aktiv ventilierte Strahlungsschutzhütten bieten. Als Referenz gibt BARANI DESIGN eine Studie des Belgischen Wetterdienstes (SOTELINO et. al. 2018) an, welche die MeteoHelix® (ungeschwärzter und geschwärzter Innenraum) in einem Testfeld mit der aktiv belüfteten Klimahütte „RMI Stevenson shelter“ (entspricht der früher international gebräuchlichen Stevenson Screen bzw. Großen Klimahütte, jedoch hier mit zusätzlichem Ventilator ausgerüstet) sowie dem aktiv ventilierten System „RMI compact shelter“ (keine Lamellenhütte sondern Sensor in ventiliertem, hoch reflektierendem Stahlrohr), welches allerdings nach eigener Aussage des RMI im Vergleich zu ventilierten Strahlungsschutzhütten schlechtere strahlungsbedingte Eigenerwärmungswerte aufweist, vergleicht. Zum Einsatz kamen jeweils auf $\pm 0,1$ °C kalibrierte PT100-Temperatursensoren. Im Ergebnis wird der MeteoHelix® ein gutes Verhalten mit relativ geringem Strahlungseinfluss bei Abweichungen zwischen 0 °C und 0,2 °C testiert. Ein erhöhter Einfluss zeigt sich insbesondere bei Globalstrahlungswerten um 500 W/m² (dies entspricht im Sommer während der Mittagszeit Situationen mit dichter, jedoch durchscheinender Bewölkung) und geringer Windgeschwindigkeit. Unklar ist, warum der Einfluss bei mittleren Strahlungswerten höher ist. Denkbar wäre der gegenüber Clear-Sky-Bedingungen deutlich höhere Anteil ungerichteter Diffusstrahlung, welche seitlich besser in Strahlungsschutzgehäuse eindringen könnten als die gerichtete Punktquelle Sonne bei hohem Sonnenstand.

In Bewertung der RMI-Studie gilt hinzuweisen, dass die beiden Referenzsysteme „RMI Stevenson shelter“ und „RMI compact shelter“ möglicherweise schlechtere Strahlungsschutzeigenschaften aufweisen als heute übliche ventilierte Strahlungsschutzhütten wie die beim DWD im Einsatz befindliche LAM630 des Herstellers Eigenbrodt. Bei genauerem Blick in die Abbildungen der Studie zeigt sich aber auch hier das unabhängig von der Bauform gegebene unvermeidliche Strahlungsproblem nicht ventilierter Lamellenhütten. So zeigt Abb. 7 (entspricht bei SOTELINO et. al. 2018 Figure 8.1: Case study example) bei intensiver Einstrahlung und geringen Windgeschwindigkeiten gegenüber den Referenzsystemen um ca. 1,0 bis 1,5 °C höhere Temperaturen. Dies deckt sich mit den Ergebnissen zahlreicher internationaler Feldstudien zu passiv und aktiv ventilierten Strahlungsschutzhütten.

Bauartspezifisch zeigen sich weiterhin deutliche Unterschiede. Die vorangehend diskutierten Fallbeispiele aus Zürich und Basel verdeutlichen das Grundproblem gleichfalls. Jedoch weist die MeteoHelix® offenbar Vorteile auf, d.h. bessere Durchlüftungseigenschaften als das Decentlab Messsystem DL-SHT35-001 und entsprechend geringere Strahlungsfehler während physioklimatisch besonders relevanter Witterungsphasen. Dies dürfte auch auf die deutlich größeren Abmessungen (226 x 170 x 170 mm) der MeteoHelix® zurückzuführen sein.

Wie vorangehend erwähnt wird die MeteoHelix® als Standardvariante und als 'blacked' angeboten. Bei der Standardvariante ist der Innenraum ebenfalls weiß, bei der 'blacked' dagegen teilweise schwarz. Generell werden Strahlungsschutzhütten mit geschwärzten



Innenlamellen aus den bereits erwähnten Gründen empfohlen. Bei der MeteoHelix® 'blacked' sind die Innenlamellen nur teilweise geschwärzt. Der Abb. 7 ist zu entnehmen, dass die 'blacked'-Variante möglicherweise keinen besseren Strahlungsschutz leisten kann. Eine Erklärung hierfür wäre, dass über die teilweise weißen Innenlamellen Streustrahlung in den geschwärzten Innenraum gelangen kann und zu einer unbeabsichtigten Erwärmung im Bereich der Sensorpositionierung führen könnte.

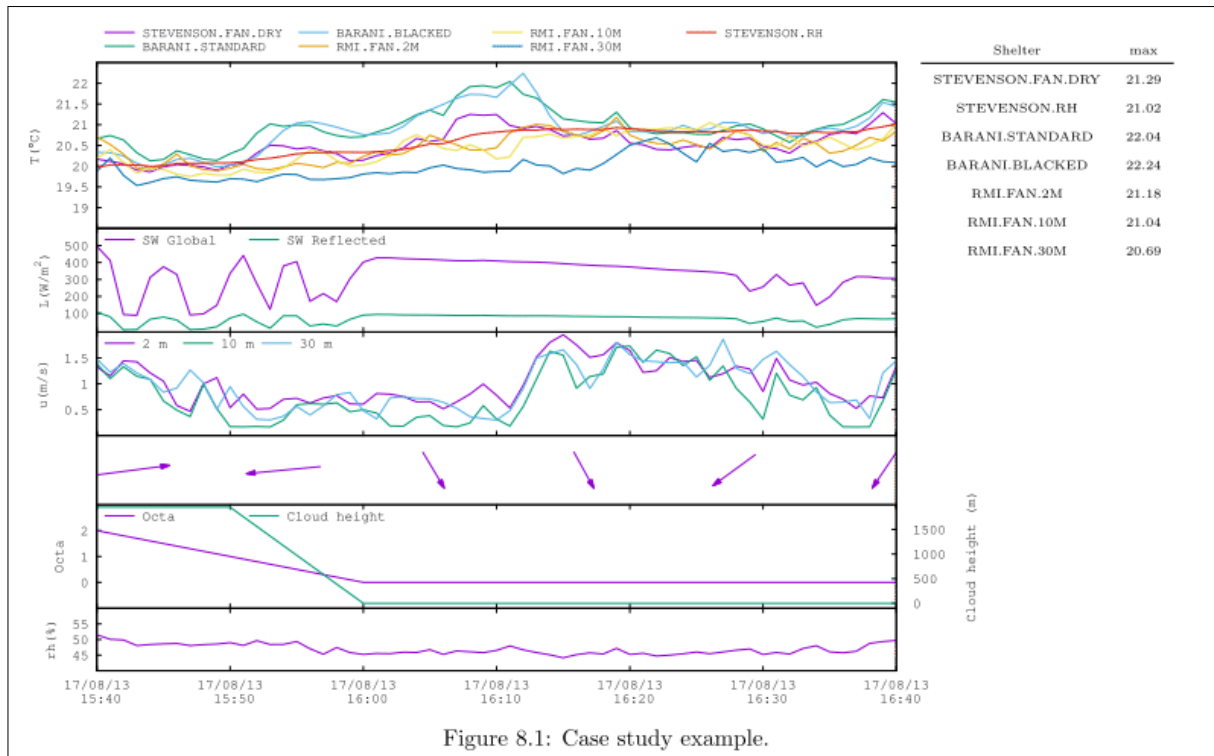


Abb. 7: Sensormesswerte-Beispiel aus SOTELINO et. al. 2018: „Intercomparison of Shelters in the RMI AWS Network“

2.2 Messparameter Windrichtung/Windgeschwindigkeit

A DECENTLAB

Kombinierter Sensor für Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Temperatur für LoRaWAN® DL-ATM22:

Messbereich Windgeschwindigkeit:	0 ... 30 m/s
Auflösung:	0,01 m/s
Genauigkeit:	< 0,3 m/s oder 3 % im Messbereich
Messbereich Windrichtung	0 ... 359°
Auflösung:	1°
Genauigkeit:	± 5°



Stabilität:	< 0,25 % pro Jahr
Messbereich Temperatur:	- 50 ... + 60 °C
Auflösung:	0,1 °C
Genauigkeit:	± 0,6 °C, Werte nicht nutzbar für exakte Lufttemperaturmessungen; Sonnenscheinfehlerrate bis über 2 °C möglich.



Abb. 8: *DECENLAB Kombierter Sensor für Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Temperatur für LoRaWAN® DL-ATM22*

Der kombinierte Sensor für Windrichtung und Windgeschwindigkeit (Abb. 8) basiert auf dem Ultraschallprinzip, d.h. beide Komponenten werden nicht wie bei den klassischen Windgebern über sich mechanisch bewegende Sensormodule erfasst. Vorteil ist, dass kein Verschleiß auftritt und in der Regel auch sehr schwache Luftbewegungen erfasst werden können. Dies ist in Bezug auf die Projektziele von Bedeutung, da im urbanen Raum unterhalb der Dachgrenzschicht vor allem während stadtklimatisch besonders relevanter Wetterlagen typischerweise ein schwaches Windgeschehen mit Luftbewegungen < 1 m/s vorherrscht. Klassische meteorologische Windgeschwindigkeitsgeber im unteren Preissektor sprechen in der Regel erst ab Windgeschwindigkeiten > 0,5 m/s an, so dass u. U. überproportional häufig Windstillen verzeichnet werden.

Die vom Hersteller DECENLAB angegebene Genauigkeit und Auflösung reicht sowohl bezüglich der Windgeschwindigkeit als auch Windrichtung für die Projektanforderungen und Ziele aus. Entscheidender für den Erfolg wird die Wahl der Messstandorte und die Einhaltung von Abständen zu Gebäudefassaden, Gebäudeoberkanten bzw. die generelle Beachtung von Hinderniswirkungen sein. Der Ultraschallsensor gibt analog zu vergleichbaren Produkten anderer Hersteller auch ein Temperatursignal aus. Dieses ist unabhängig von der angegebenen Genauigkeit jedoch nicht sinnvoll nutzbar, da Strahlungseinflüsse (insb. Sonnenschein) nicht nur in Ausnahmefällen zu einer erheblichen Verfälschung des



Temperatursignale führen. Ob sich das fehlerhafte Signal mittels paralleler Erfassung der Strahlungsintensität am Messgeber (Globalstrahlung) und intelligenter Korrekturalgorithmen kompensieren lässt, wäre gegebenenfalls zu prüfen, ist jedoch aufgrund der Vielzahl an Einflussfaktoren fraglich.

Unabhängige Nutzererfahrungen mit dem DL-ATM22 liegen nicht vor, ebenso kein Zertifikat einer DAkkS-akkreditierten Anemometerkalibrierung.

B BARANI DESIGN

Kombinierter Windgeber Barani Design MeteoWind IoT Pro:

Messbereich Windgeschwindigkeit:	0 ... 85 m/s
Auflösung:	0,1 m/s
Genauigkeit:	< 2 % im Messbereich 0,3 ... 50 m/s
Ansprechgeschwindigkeit	< 0,2 m/s
Messbereich Windrichtung	0 ... 360°
Auflösung:	1°
Genauigkeit:	± 2°
Stabilität:	Keine Angabe



Abb. 9: *BARANI DESIGN Kombiniertes Sensor für Windgeschwindigkeit und Windrichtung MeteoWind IoT Pro*

Der kombinierte Sensor für Windrichtung und Windgeschwindigkeit basiert auf dem klassischen Messprinzip mittels Halbschalenkreuz und Windfahne. Laut Angaben des Herstellers BARANI DESIGN soll er zumindest dem Qualitätsniveau der Standard-Windgeber führender Hersteller meteorologischer Messtechnik entsprechen, was im Wesentlichen das Zertifikat des DAkkS-akkreditierten Anemometerkalibrierungslabors der Deutschen WindGuard (anerkannt von der Physikalisch-Technische Bundesanstalt – PTB) auch bestätigt



(**BARANI DESIGN:** siehe Dokument [MEASNET calibration certificate with default MEASNET constants](#) (letzter Zugriff 12/2023)).

Die angegebene Auflösung, Genauigkeit und Anlaufgeschwindigkeit reichen für die Projektziele aus. Auch hier werden die lokalen Standortbedingungen die Datenqualität entscheidend beeinflussen.

2.3 Messparameter Niederschlag

A DECENTLAB

DECENTLAB DL-TBRG Regenmesser mit Kippwage, ohne Heizung:

Messbereich Niederschlag:	Keine Angabe
Auflösung:	0,1 mm je Wippenschlag
Genauigkeit:	2 % im Messbereich 0 ... 25 mm/h 3 % im Messbereich 25 ... 50 mm/h
Auffangfläche	200 cm ²



Abb. 10: DECENTLAB Niederschlagsmesser DL-TBRG (= Young Modell 52203)

Der Niederschlagsmesser DL-TBRG (Abb. 10) ist keine Eigenentwicklung von DECENTLAB sondern entspricht dem Modell 52203 des Herstellers Young. Der Niederschlag wird nach dem Kippwagenprinzip erfasst wobei der im Trichter aufgesammelte flüssige Niederschlag über einen Tropfer auf einen doppelseitigen Kipplöffel geleitet wird. Sobald der Löffel mit 0,1 mm Niederschlag gefüllt ist kippt die Waage, gibt die gegenüberliegende Löffelseite zum Auffangen des Niederschlags frei und löst via Reetkontakt einen Impuls aus. Dieses Messprinzip ist bewährt und Standard bei der elektronischen Niederschlagserfassung. Obgleich dieses Messprinzip auch bei Niederschlagsmessern mit hohem Anspruch an die Genauigkeit (z.B. mit Heizung) gängig ist, gibt es eine relativ weite Streuung bzgl. der Genauigkeit –



insbesondere bei der Erfassung von Starkregen – wie auch häufig Probleme im alltäglichen Gebrauch (Verschmutzung).

Bei Niederschlagsmessern welche insbesondere Starkregen hinreichend exakt erfassen sollen, geben Hersteller hinsichtlich der Genauigkeit als Zeitmaß nicht „mm/h“ sondern „mm/min“ an, so z.B. als Grenzwerte 0,1 mm oder 1 % bei Niederschlagsmengen < 6 mm/min sowie 2 % bei Niederschlagsmengen > 6 mm/min“. Hintergrund ist, dass konvektive Starkregen in der Mehrzahl der Fälle kurzzeitige Intensitätsspitzen in einem Zeitraum zwischen ca. 1 min bis ca. 15 min betreffen. Einfachere Niederschlagsmesser können solche Intensitäten oft nicht hinreichend genau erfassen bzw. messen nicht unerhebliche Mindermengen. Des Weiteren ist die Niederschlagsmessung auch von der Aufstellungshöhe abhängig. Als Standard wird 1 m über Erdboden mit einem Mindestabstand zu Hindernissen angegeben, welche zumindest der Höhe der Hindernisse entspricht. Ein Ausweichen auf Gebäudedächer wird insbesondere im Freiland infolge des mit der Höhe ansteigenden Windeinflusses (Mindermengen) nicht empfohlen, kann jedoch im urbanen Raum mangels hinreichend geeigneter Standorte in Bodennähe sinnvoll sein. Bei weiträumigen Flachdächern können hier u.U. sogar ähnlich geringe Windeinflüsse wie in Freilandlagen gegeben sein. Weiterhin wird die Niederschlagsmessung häufig durch Verschmutzungen erheblich beeinträchtigt. Blätter, Insekten, Vogelkot sowie Stäube führen zu Verstopfungen des Tropfers und u. U. zu einem Totalausfall der Niederschlagsmesser. Zu empfehlen sind daher bei entsprechend anfälligem Standort 14-tägige Kontrollen und Säuberungen.

B BARANI DESIGN

MeteoRainTM IoT Compact:

Messbereich Niederschlag:	Keine Angabe
Auflösung:	0,1 mm
Genauigkeit:	1 % im Messbereich < 100 mm/Jahr
Stabilität:	< 0,0125 mm/Jahr
Auffangfläche	200 cm ²



Abb. 11: BARANI DESIGN Niederschlagsmesser MeteoRain™ IoT Compact

Der Niederschlagsmesser MeteoRain™ IoT Compact (Abb. 11) ist eine Eigenentwicklung von BARANI DESIGN und soll ebenfalls nach dem Kippwagenprinzip funktionieren wobei die verfügbaren Dokumentationen keine genaueren Informationen zum Funktionsprinzip beinhalten. Der Hersteller gibt an, dass Dank des konsistenten und genauen magnetisch ausbalancierten Mechanismus weniger Restwasser auf der Kippwaage verbleiben und demzufolge die Messung weniger beeinträchtigt werden soll als bei jedem anderen Kippwaagenmechanismus mit 'Schmetterlingsfunktion'. Diese Eigenschaft soll den MeteoRain® im Vergleich zu anderen Anbietern zum beständigsten sich selbst entleerenden Regenmesser machen. Laut der Herstellerangabe soll eine Messgenauigkeit bei Regenraten bis zu 10 mm/min sowie Unempfindlichkeit gegen Drift und Messfehler durch Schmutzansammlungen gegeben sein.

Inwieweit die versprochenen Produkteigenschaften unter realen Messbedingungen eingehalten werden lässt sich mangels unabhängiger Referenzstudien nicht beurteilt. Verlässliche Daten wären gegebenenfalls über hinreichend lange Parallelmessreihen an Standorten mit DWD-konformer Niederschlagserfassung zu gewinnen.

2.4 Kombinierte Messsysteme

A DECENTLAB

Kombinierter Wettersensor Decentlab DL-ATM41 – Globalstrahlung, Niederschlag, Lufttemperatur, Luftfeuchte, Barometrischer Luftdruck, Windrichtung, Windgeschwindigkeit:

Messbereich Temperatur:	- 50 ... + 60 °C
Auflösung:	0,1 °C
Genauigkeit:	± 0,6 °C
Messprinzip:	Thermistor



BEWERTUNG METEOROLOGISCHER MESSSYSTEME



Messbereich Rel. Luftfeuchte	0 ... 100 % Rel. Feuchte
Auflösung:	0,1 %
Genauigkeit:	± 3 % Rel. Feuchte
Stabilität:	< 0,25 % pro Jahr
Messbereich Dampfdruck:	0 ... 47 kPa
Auflösung:	0,01 kPa
Genauigkeit:	± 0,2 kPa (typischerweise < 40 °C)
Messbereich Niederschlag:	0 ... 400 mm/h
Auflösung:	0,017 mm
Genauigkeit:	5 % im Messbereich 0 ... 50 mm/h
Messprinzip:	Elektronischer Tropfenzähler
Messbereich Globalstrahlung:	0 ... 1750 W/m ²
Auflösung:	1 W/m ²
Genauigkeit:	± 5 % (typisch)
Messprinzip:	Siliziumzelle
Messbereich Barometrischer Luftdr.:	50 ... 110 kPa
Auflösung:	0,01 kPa
Genauigkeit:	± 0,1 kPa (- 10 ... 50 °C), ± 0,5 kPa (- 40 ... 60 °C)
Messbereich Windgeschwindigkeit:	0 ... 30 m/s
Auflösung:	0,01 m/s
Ansprechgeschwindigkeit:	< 0,2 m/s
Genauigkeit:	0,3 m/s oder 3 %
Messprinzip:	Ultraschall
Messbereich Windrichtung:	0 ... 359°
Auflösung:	1°
Genauigkeit:	± 5°
Messprinzip:	Ultraschall



Abb. 12: DECENTLAB kombiniertes Messsystem DL-ATM41

Kombinierte Wettermessgeräte bzw. sogenannte All-In-One-Wetterstationen werden vermehrt in den Bereichen Gebäudeleittechnik, Verkehrsleittechnik, Energieversorgung oder Umweltmonitoring eingesetzt. Ihr Vorteil liegt in deren kompakter Bauweise, da zahlreiche Messparameter in einer Sensoreinheit erfasst und weitergereicht werden. Genutzt werden solche Systeme insbesondere, wenn Präzision nicht an erster Stelle steht, sondern hinreichend gute orientierende Messdaten als Basis für Entscheidungsprozesse erfasst werden sollen. Zu beachten ist, dass im Hinblick auf die Projektziele solche kombinierten Systeme nicht für alle Messparameter die notwendigen Genauigkeitsanforderungen erreichen. Besonders kritisch sind hier bauartbedingt vor allem die Erfassung der Lufttemperatur (insb. Strahlungsfehler) und des Niederschlags zu bedenken und die Tatsache, dass meteorologische Parameter generell in unterschiedlichen Abständen zum Boden sowie zu Hindernissen erfasst werden sollen (Niederschlag 1 m, Temperatur-/Feuchte 2 m, Wind Freiland 10 m). Die Einschränkungen gelten auch für den DEZENTLAB DL-ATM41 (Abb. 12).

Die Grundgenauigkeit des Temperatursensors beträgt messprinzipbedingt (Thermistor) lediglich $\pm 0,6 \text{ }^\circ\text{C}$, d.h. bei einer im Einsatz befindlichen 'Stationenflotte' können die erfassten Temperaturwerte u. U. bis über $1 \text{ }^\circ\text{C}$ voneinander abweichen. Des Weiteren ist mangels weiterer Spezifikationen unklar, wie effizient der passive Strahlungsschutz unter realen Messbedingungen wirken kann. Da somit zwei Unbekannte den Messwert beeinflussen sind nachträgliche Anpassungskorrekturen auf Basis sekundärer Informationen (Vergleichswerte hochpräziser Messstationen, Informationen zu Strahlungsbilanz und Wind am Messstandort) nicht mehr möglich. Ähnliche Einschränkungen gelten auch für die Luftfeuchte.

Die Messwerte für die Windgeschwindigkeit und Windrichtung weisen den technischen Information zufolge eine vollkommen ausreichende Datenqualität auf. Gleiches gilt auch für die Globalstrahlung, da die Messtoleranz von 5 % in Bezug auf die typischerweise deutlich größere Variabilität der Globalstrahlung unter wechselnden Bewölkungsverhältnissen bzw. im Hinblick auf die Projektziele als nachrangig einzuordnen ist.



Bzgl. der Erfassung des Niederschlags wird eine Genauigkeit von 5 % im Messbereich bis 50 mm/h angegeben. Inwieweit diese Toleranzen auch bei kurzzeitigen Starkregenereignissen eingehalten werden können bzw. welchen Einfluss Windintensitäten ausüben können ist unklar. Als besonders kritisch ist hier auch die Aufstellungshöhe zu betrachten, da im städtischen Umfeld der kombinierte Messgeber vandalismussicher zumindest 3 m über Boden montiert werden sollte.

B LUFFT

Kombinierter Wettersensor LUFFT WS600-UMB – Niederschlag, Lufttemperatur, Luftfeuchte, Luftdruck, Windrichtung, Windgeschwindigkeit

Messbereich Temperatur: - 50 ... + 60 °C
Auflösung: 0,1 °C
Genauigkeit: ± 0.2 °C (- 20 ... 50 °C), sonst ± 0.5 °C (> - 30 °C)
Messprinzip: NTC

Messbereich Rel. Luftfeuchte 0 ... 100 % Rel. Feuchte
Auflösung: 0,1 %
Genauigkeit: ± 2 % Rel. Feuchte
Stabilität: Keine Angabe
Messprinzip: kapazitativ

Messbereich Niederschlag: Tropfengröße 0,3 ... 5 mm
Auflösung: 0,01 mm
Genauigkeit: 20 % unter Laborbedingungen
Partikelgeschwindigkeit: 0,9 ... 15,5 m/s
Niederschlagsart: Regen/Schnee
Messprinzip: Ultraschall

Messbereich Barometrischer Luftdr.: 300 ... 1200 hPa
Auflösung: 0,1 kPa
Genauigkeit: ± 0,5 hPa (0 ... 40 °C)

Messbereich Windgeschwindigkeit: 0 ... 75 m/s
Auflösung: 0,1 m/s
Ansprechgeschwindigkeit: Keine Angabe
Genauigkeit: ± 0,3 m/s oder 3 % (0 ... 35 m/s), ± 5 % (> 35 m/s)
Messprinzip: Ultraschall



Messbereich Windrichtung:	0 ... 359,9°
Auflösung:	0,1°
Genauigkeit:	< 3° bei > 1,0 m/s
Messprinzip:	Ultraschall

Kombinierter Wettersensor LUFFT WS800-UMB – Niederschlag, Lufttemperatur, Luftfeuchte, Luftdruck, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung

Lufttemperatur, Luftfeuchte, gleiche Technische Daten wie WS600-UMB
Niederschlag, Luftdruck,
Windgeschwindigkeit, Windrichtung

Messbereich Globalstrahlung:	0 ... 1400 W/m ²
Auflösung:	1 W/m ²
Genauigkeit:	± 5 % (typisch)
Ansprechzeit (95 %)	< 1s
Spektralbereich	300 ... 1100 nm
Messprinzip:	Siliziumzelle



Abb. 13: LUFFT kombinierte Messsysteme WS600-UMB, WS800-UMB

Die vorangehend beschriebenen Einschränkungen betreffen generell auch die kombinierten Wettermesssysteme LUFFT WS600-UMB und WS800-UMB (Abb. 13). Im Gegensatz zum DECENTLAB-System weisen hier der Luftfeuchtesensor ($\pm 2\%$) und vor allem der Lufttemperatursensor ($\pm 0,2\text{ °C}$) bessere Grundgenauigkeiten auf. Aber auch hier ist mangels Erfahrungen bzw. vergleichender Untersuchungen unklar, welchen Einfluss das Strahlungsschutzgehäuse bzw. die gesamte Kombinationsmeseinheit auf die Temperaturmessung ausübt.



Als vollkommen ausreichend sind auch hier die Spezifikationen für die Erfassung der Windgeschwindigkeit und Windrichtung zu bewerten. Gleiches gilt für die Globalstrahlung.

Dagegen ist die Niederschlagsmessung wiederum in Bezug auf die Montagehöhe sowie auf die Genauigkeit (20 % unter Laborbedingungen) kritisch zu werten.

2.5 Optional: Messparameter Globalstrahlung

A DECENTLAB

Pyranometer DECENTLAB DL-PYR-001 – Messsensor für Globalstrahlung

Messbereich Globalstrahlung:	0 ... 2000 W/m ²
Auflösung:	0,5 W/m ²
Messfeldwinkel:	180°
Genauigkeit:	± 5 %
Messwert Reproduzierbarkeit:	< 1 %
Spektralbereich	360 ... 1120 nm
Langzeitstabilität:	< 2 % pro Jahr



Abb. 14: DECENTLAB Pyranometer DL-PYR-001

Pyranometer dienen der Erfassung der eintreffenden Sonneneinstrahlung wobei jedoch nicht ausschließlich die gerichtete direkte Sonneneinstrahlung, sondern die gesamte aus dem Halbraum über dem Sensor eintreffende Strahlung erfasst wird. D.h. zusätzlich reflektierte Strahlung von Wolken, Dunst oder auch Gebäudefassaden im Umkreis des Sensors. Im Hinblick auf das Ziel einer möglichst exakten Messung der Lufttemperatur und der erheblichen Fehlerquelle „passiv belüftete Strahlungsschutzhütte“ sollte die parallele Messung der Globalstrahlung am Messort zwecks nachgeordneter individueller Korrekturen in das Messprojekt integriert werden. Über die Information der aktuellen Globalstrahlungswerte am Messstandort, der entsprechenden Werte an unbeeinflussten Referenzstandorten (Stadtklimastation Stadtkämmerei, DWD Wetterstation Mannheim) sowie von Lufttemperaturreferenzwerten an den Stadtklimastationen (passive belüftete LoRaWAN Messsysteme im



Parallelbetrieb zu den DWD-konformen Messsystemen der Stadtklimastationen) können u. U. für einen Großteil der Witterungssituationen hinreichend gute Korrekturfaktoren für das geplante LoRaWAN-Messnetz bestimmt und mittels intelligenter Algorithmen als individuelle Echtzeitanpassungen in die Datenweiterverarbeitung integriert werden. Im Vergleich zu ähnlichen Stadtklima-Projekten kann dies im Hinblick auf die angestrebten Projektziele einen wesentlichen Vorteil darstellen.

Den technischen Informationen zufolge soll der Pyranometer DECENTLAB DL-PYR-001 hinreichend genaue Messwerte liefern (Abb. 14). Ob die Werte dem Standard ISO 9060 entsprechen (dieser unterscheidet nach drei Qualitätsklassen) ist der Dokumentation nicht zu entnehmen. Der Sensor ist nicht mit einem Glasdom (beschränkt den Spektralbereich auf 0,3 bis 2,8 μm) ausgerüstet (schützt das Messelement = Thermosäule vor Konvektion). Ein Glasdom fungiert auch als Schutz vor abgesetzten Verschmutzungen (Stäube, Aersole, Vogelkot, etc.) welche sehr deutlich die Messwerte beeinflussen können. Ein regelmäßiger Reinigungszyklus muss hier in Betracht gezogen werden.

B BARANI DESIGN

METEOHELIX® IoT PRO - Messsensor für Globalstrahlung:

Messbereich Globalstrahlung:	0 ... 2000 W/m ²
Auflösung:	2 W/m ²
Messfeldwinkel:	Keine Angabe
Genauigkeit:	± 5 % (in der Tagessumme)
Messwert Reproduzierbarkeit:	Keine Angabe
Spektralbereich	Keine Angabe
Langzeitstabilität:	< 0,6 % pro Jahr



Abb. 15: BARANI DESIGN METEOHELIX® IoT PRO mit Strahlungssensor



Die Strahlungsschutzhütte METEOHELIX® IoT PRO (Abb. 15) ist an der Gehäuseoberseite mit einem Strahlungssensor ausgestattet. Den technischen Informationen sind nur wenige Eckdaten zu entnehmen, insbesondere nicht ob die ISO 9060 eingehalten werden kann oder wie gut die Messwerte in Hinblick auf den Einstrahlwinkel linearisiert sind. Der flächige Messsensor ist nicht mit einem Glasdom versehen und daher verschmutzungsanfällig. Im Hinblick auf hinreichend genaue Messwerte ist bei der Montage auf eine exakte horizontale Ausrichtung zu achten. Bei hochwertigen Sensoren ist an der Messeinheit eine Libelle zur Justierung implementiert. Inwieweit der Strahlungssensor im Messbetrieb hinreichend verlässliche Messwerte liefern kann ist unklar. Orientierende Werte wären nur im Parallelbetrieb an den Stadtklimamessstationen mit kalibrierten Pyranometern zu gewinnen.



3 Empfehlungen zur Technikauswahl

3.1 Kombinierte Messsensoren – All-In-One-Wetterstationen

Trotz ihrer auf den ersten Blick bestechenden Vorteile sind All-In-One- Wetterstationen im Hinblick auf die Projektziele, der Einschränkungen durch LoRaWAN und insbesondere der Notwendigkeit hinreichend verlässliche Messdaten zu gewinnen nicht zu empfehlen. Gegenüber Einzelsensoren müssen zumeist wesentliche Abstriche hinsichtlich der Messgenauigkeit in Kauf genommen werden. Des Weiteren ist es notwendig Messsensoren in unterschiedlichen Höhen zu positionieren: Niederschlag 1 m über Boden, Temperatur ≥ 2 m über Boden, Wind ≥ 3 m über Boden. Letztendlich ergibt sich bei Preisen ab ca. 3000 Euro je Kombinationssensor auch kein entscheidender Kostenvorteil.

3.2 Lufttemperatur-/Luftfeuchte in Einheit mit Strahlungsschutzhütte

In Anbetracht der generellen Einschränkungen bzgl. der Messgenauigkeit und vor allem des generellen Strahlungsfehlerproblems passiv ventilierter Strahlungsschutzhütten ist das System des Herstellers BARANI DESIGN mit Temperatur-/Feuchtesensor MeteoTemp RH+T in Strahlungsschutzhütte MeteoHelix® IoT Pro gegenüber dem System von DECENTLAB (Temperatur-/Feuchtesensor mit Strahlungsschutzhütte DL-SHT35-001) aus den vorangehend diskutierten Gründen und Erwägungen zu bevorzugen.

Entscheidend für den Erfolg des Messnetzes (Genauigkeit, Reproduzierbarkeit, Robustheit gegenüber externer kritischer Bewertung, Nutzbarkeit für stadtplanerische Prozesse, Innovationsgedanke im Vergleich zu ähnlichen Projekten in anderen Städten) ist in diesem Kontext, dass das Messnetz nicht nur in Hinblick auf die mikroklimatischen Einflussfaktoren „intelligent“ geplant wird, sondern vor allem auch permanente Parallelmessungen an Referenzstationen stattfinden. In Bezug auf die Temperatur- und Feuchtemessungen bedeutet dies, dass die Temperatur-/Feuchtesensoren mit den Strahlungsschutzhütten im Parallelbetrieb an den Stadtklimamessstationen Stadtkämmerei E4, Schlossgartenstraße und BUGA23 (ab April 2023) eingesetzt werden. D.h. die Messsysteme sollen als LoRaWAN-Zweitstation mindestens an diesen Referenzstandorten betrieben werden. Zwecks Konsistenzprüfung- und Identifikation potentieller weiterer Fehlerquellen im LoRaWAN-Übertragungssystem (der Betreiber des Projektes der Stadt Zürich, AWEL, erwähnt gelegentliche Fehler) wäre darüber hinaus auch eine Miterfassung via Datenlogger an einer Referenzstation in Erwägung zu ziehen. Bzgl. der Parameter Temperatur und Feuchte sollten dann Sensoren mit Messausgang 0 bis 1 V (alternativ 0 bis 5 V oder 0 bis 10 V) integriert werden. Mittels des parallelen Betriebes können die Strahlungsfehler in Abhängigkeit von Standort und Witterungssituation quantifiziert sowie weitere potentielle Fehlerquellen im LoRaWAN-Übertragungssystem identifiziert werden.



Für eine hinreichend verlässliche Datenbasis ist weiterhin die Erfassung der Globalstrahlung mit Parallelmessungen an den Stadtklimastationen anzustreben. Eine ausschließliche Nutzung der Daten der Wetterstation Mannheim wäre aufgrund des räumlichen Abstandes zur Stadtmitte (ca. 7 km) und dem Umstand, dass bei wechselnden Bewölkungsverhältnissen erhebliche räumliche und zeitliche Variationen bei den Globalstrahlungs- bzw. Sonnenscheinmesswerten eher die Regel sind, nicht ausreichend. Zu diesem Zweck sollten die Stadtklimastationen zusätzlich mit referenzierten Globalstrahlungs-/Sonnenscheinmessgebern nachgerüstet werden.

Ziel sollte es sein, mit Hilfe der Parallelmessungen von Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und der Globalstrahlung zumindest näherungsweise individuelle Korrekturfaktoren zu errechnen und die Rohmessdaten des geplanten LoRaWAN-Messnetzes mittels intelligenter Algorithmen in Echtzeit anzueichen. Die resultierenden kalibrierten Messnetzdaten können eine qualitativ aufgewertete Basis für die Projektanwendungen und Projektziele darstellen. Zu beachten ist allerdings, dass möglicherweise während umweltklimatisch sensibler meteorologischer Situationen (Hitzebelastung bei schwachwindigen hochsommerlichen Strahlungswetterlagen) nicht immer an allen Messstellen eine hinreichende Kompensation der Strahlungsfehler erreicht werden kann oder Berechnungsalgorithmen zu einer individuellen Überinterpretation, also quasi einer „Verschlimmbesserung“ führen können. Vor allem bei kurzen Datensatzzeitreihen, d.h. zumindest im ersten Betriebsjahr des Messnetzes wäre dies zu erwarten. Letztendlich kann dieses Vorgehen jedoch eine Innovation und ein Alleinstellungsmerkmal in Anbetracht der grundsätzlichen Limitierungen von LoRaWAN darstellen.

3.3 Windgeschwindigkeit/Windrichtung

Eine eindeutige Empfehlung kann für eines der beiden vorgeschlagenen Messgebersysteme (DECENTLAB, BARANI DESIGN) nicht gegeben werden. Beide Systeme sollten den technischen Dokumentationen zufolge hinreichend gute Messwerte liefern. BARANI DESIGN legt hierzu auch ein anerkanntes Zertifikat vor.

Da bezüglich der Parameter Lufttemperatur/Luftfeuchte der Hersteller BARANI DESIGN empfohlen wird, liegt es nahe bei angenommener Gleichwertigkeit der Winderfassung dem Anbieter BARANI DESIGN den Zuschlag zu geben. Für DECENTLAB würde die kompaktere, kleinere und unauffälligere Sensoreinheit sprechen. In Hinblick auf die Genauigkeit der Windmesssysteme sei nochmals darauf hingewiesen, dass im urbanen Raum die Wahl des Messstandortes sowie die Messhöhe mitentscheidende Faktoren hinsichtlich der Güte bzw. Nutzbarkeit der Messdaten darstellen (orientierende Empfehlungen s.w.u.).



3.4 Niederschlag

Bezüglich der Niederschlagserfassung kann keines der beiden vorgeschlagenen Systeme überzeugen, zumal hier standort- und wartungsspezifischen Faktoren entscheidende Einflussgrößen darstellen. Generell wird der Niederschlag in 1 m über Boden mit einem Abstand zu Hindernissen, welche mindestens deren Höhe entspricht, gemessen. In städtischen Räumen ist bei dieser Aufstellungshöhe zusätzlich die potentielle Vandalismusgefahr (Verlust, Beschädigung, Manipulation) zu berücksichtigen und letztendlich auch der regelmäßige Wartungsaufwand (Verschmutzung). Aufgrund der Hinderniswirkungen in Straßenschluchten erscheinen Niederschlagsmessungen hier generell nicht zielführend zu sein. Installationen auf Flachdächern würden eine Reihe von Fehlerquellen reduzieren. Wegen des mit dem Bodenabstand zunehmenden Windeinflusses werden Niederschlagsmessungen auf hoch gelegenen Standorten nicht empfohlen. Im städtischen Umfeld können bei einer relativ homogenen Dachlandschaft ausgedehnte Flachdächer aber einen Kompromiss darstellen. Jedenfalls wäre auch hier ein Parallelbetrieb von Niederschlagsmessern an den Stadtklimastationen unerlässlich.

In diesem Kontext ist zu überlegen, ob eine separates Niederschlagsmessnetz mit den angebotenen Messsystemen auf LoRaWAN-Basis zielorientiert sein kann oder möglicherweise eine Ergänzung und Ertüchtigung des bestehenden Niederschlagsmessnetzes des EB Stadtentwässerung (kein Austausch der Messtechnik aber Neuplatzierung der Messgeber an einzelnen Standorten infolge Hinderniswirkungen – insb. Bäumen) unter Mitnutzung der Niederschlagsradardaten des DWD (RADOLAN) einen größeren Vorteil bringen könnte. RADOLAN bezeichnet das Online-Aneichungsverfahren des DWD für flächige Niederschlagsrasterdaten. Mit Hilfe der Ist-Messungen des Niederschlags an den Messstationen wird das Niederschlagsradarsignal für die Standorte der Niederschlagsmesser angeeicht und die Aneichungskorrekturfaktoren flächendeckend auf die Niederschlagsrasterfelder umgesetzt. Die gewonnenen Niederschlagsdaten werden schließlich auf 1 x 1 km Rasterfelder für 1-Stunden-Summenwerte berechnet und sind im Umfeld der Messstationen in der Regel hinreichend genau. Der DWD ist an einer Implementation von Niederschlagsstationen externer Betreiber interessiert soweit sie den empfehlenden Richtlinien des DWD entsprechen.

3.5 Globalstrahlung

Bzgl. der hier empfohlenen Mitausrüstung der Messstationen mit Globalstrahlungssensoren macht der Messgeber von DECENTLAB auf Basis der Firmendokumentation einen besseren Eindruck wobei spezifische unabhängige Erfahrungswerte nicht zu ermitteln waren. Letztendlich gilt auch hier, dass eine verlässliche Beurteilungsbasis nur bei Parallelmessung mit zertifizierten Pyranometern an den Stadtklimamesstationen zu gewinnen ist.



3.6 Orientierende Empfehlungen für Messstandorte

Der Auftraggeber sowie der FB 61 Stadt Mannheim haben in einer ersten Konzeptidee ein engmaschiges Temperatur-/Feuchtemessnetz auf einer Achse vom Herzogenriedpark über die Neckarstadt, den Neckar, die Innenstadtquadrate sowie Friedrichspark/Schlossgarten bis zum Rhein angeregt. Auf dieser Achse können nahezu alle stadtklimatisch sensiblen bzw. unterschiedlich verdichtete/strukturierte Bereiche inklusive eingebetteter Grünflächen (z.B. Neumarkt, eingetieftes Neckarvorland, Schillerplatz) oder begrünter Dachflächen (z.B. im Rahmen der aktuell geplanten Neugestaltung der Dachflächen am Verwaltungsgebäude der REM am Bassermannhaus in C4) sowie hochverdichtete öffentliche Stadtflächen (Alter Messplatz) erfasst werden.

Bei der Wahl der Messstandorte sollten Mindestabstände zu Gebäuden eingehalten und die lokale natürliche Belüftungssituation einbezogen werden, um beispielsweise potenzierende Strahlungsfehler abstrahlender Gebäudewände bzw. unterbundene lokale Ventilation zu minimieren. Da aber andererseits solche Einflüsse und Wirkungen explizit bilanzierend erfasst werden sollen, kann ein mehrgleisiges Standortauswahlverfahren bestehend aus primären Standorten und sekundäre Ergänzungsstandorte angestrebt werden.

Die primären Standorte sollten repräsentativ für die jeweilige Bebauungsstruktur sein. Als Abstand zu Gebäudefassaden und anderen Hindernissen (Baumgruppen) werden mindestens 10 m empfohlen. Der Standort (Messgeber und Bodenraum) sollte möglichst wenig und insbesondere nicht in den Stunden um den Sonnenhöchststand durch Gebäude oder Bäume beschattet sein. Die Messgeberhöhe für Temperatur/Feuchte über Boden nicht unter 2 m (bei Dachstandorten sind das Bezugsmaß die Dachkantenhöhen im Umfeld); für Windmessungen ≥ 3 m über Boden bzw. Dachkanten. Bei der Temperatur-, Feuchte- und der Windmessung ist an allen primären Standorten der gleiche Bodenabstand einzuhalten. Die Globalstrahlung sollte in gleicher Messgeberhöhe wie die Temperatur/Feuchte erfasst werden. Die primären Standorte sind als lokale Bezugsgröße für die sekundären Standorte zu betrachten. Die definierten Kriterien sollen auch der generellen Vergleichbarkeit dienen.

Die sekundären Standorte sind losgelöst von den oben genannten Kriterien zu betrachten. Dies gilt insbesondere in Bezug auf Gebäudeabstände und Beschattungseinflüsse und können der Erfassung mikroklimatischer Einflüsse dienen. So z.B. lokal unterschiedliche Beschattungs- und Besonnungssituationen (Straßenschluchten, verdichtete Baumbestände) inklusive der Wirkung von Grünstrukturen sowie die Erfassung der vertikalen Situation bis zur Stadtgrenzschicht (mittleres Dachniveau). Bodennahe Sensoren (versiegelte / begrünte Flächen) zwecks Ermittlung von Austauschprozessen wären zu integrieren.



Literaturverzeichnis

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.

Datenportal Kanton Basel-Stadt: 29. 11 2021 .
<https://data.bs.ch/explore/?q=smart+climate&sort=modified> (Zugriff am 29. 11 2021).

Datenportal Kanton Zürich: 29. 11 2021.
<http://www.web.statistik.zh.ch/awel/LoRa/data/datenbeschreibung.txt> (Zugriff am 29. 11 2021).

Deutscher Wetterdienst: „Richtlinie - Automatische nebenamtliche Wetterstationen im DWD.“ Offenbach am Main, 2017.

Hannak, L., und S. Brinckmann: *Parallelmessungen an deutschen Klimareferenzstationen: Schlussfolgerungen im Hinblick auf Homogenität und Messunsicherheiten*. Offenbach a. Main: Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 2020.

Löffler, Hans: *Meteorologische Bodenmesstechnik (vormals: Instrumentenkunde) - Leitfaden für die Ausbildung im Deutschen Wetterdienst Nr. 6*. Offenbach am Main, 2012.

Oke, Tim R.: *Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites*. WMO/TD-No. 1250, Genf: World Meteorological Organization (WMO), 2006.

Pijnappel, Max: „Low-cost Autonomous Temperature Measurements System.“ Twente, 2020.

Sotelino, L. G. , N. D. Coster, P. Beirinckx, und P. Peetres: *Intercomparison of Shelters in the RMI AWS Network*. Vers. P1_26. WMOCIMO. 2018.