Mitt. POLLICHIA	103	23–42	Bad Dürkheim 2025

ISSN 0641-9665 (Druckausgabe)
ISSN 2367-3168 (Download-Veröffentlichung)

Wolfgang **Lähne**, Kathrina **Rötzer**,
Hartmut **Gündra** & Matthias **Müller**

HyperMODE - Entwicklung eines verdichteten meteorologischen Messnetzes für das umweltsensitive Verkehrsmanagement

Kurzfassung

Lähne, W., Rötzer, K., Gründa, H. & Müller, M. (2025): HyperMODE – Entwicklung eines verdichteten meteorologischen Messnetzes für das umweltsensitive Verkehrsmanagement. – Mitt. Pollichia 103: 23–42, Bad Dürkheim.

Die Fortschritte in der Entwicklung digitaler Messsysteme, Kommunikationstechnologien sowie der Datenverarbeitung ab den 1990er Jahren führten auch in der Meteorologie zu einem Umbruch. Nicht nur staatliche Wetterdienste stellten in der Folge von der analogen Messwerterfassung auf autark arbeitende Stationen und Messnetze um. Auch Behörden oder Unternehmen auf Bundes-, Landes- und Kommunalebene begannen zunehmend, meteorologische Stationen oder umfassende Spezialmessnetze für Umweltmonitoring/überwachungszwecke bzw. für Dienstleistungen einzurichten. In fast allen Fällen sind solche Messnetze heterogen ausgerichtet. Datenaustausch oder gemeinsame Datenverwaltungen finden in der Regel nicht statt, obwohl Nutzer und Betreiber hierin einhellig einen Mehrnutzen erkennen. An diesem Punkt setzt das als Machbarkeitsstudie initiierte, mFUND-geförderte Projekt hyperMODE mit dem Ziel an, meteorologische Daten aus verschiedenen Messnetzen in eine zentrale Plattform zu integrieren sowie eine qualitativ hochwertige und frei zugängliche Datenbasis zu schaffen. Dieser Bericht fasst die methodische Herangehensweise, die technologischen Herausforderungen, erzielten Ergebnisse und das Potenzial für weiterführende Forschung zusammen. Im Ergebnis zeigt sich, dass die Anzahl potentiell nutzbarer Messstationen sehr hoch ist, diese oftmals sehr heterogen verteilt sind und zu einem großen Teil mit qualitativ hochwertiger Messtechnik ausgerüstet sind. Einschränkungen und Hürden bei der Integration in eine zentrale Plattform und Nutzung der Daten ergeben sich aus Einschränkungen physischer und rechtlicher Verfügbarkeit, Standortqualität und regelmäßiger Wartungsaufgaben der Stations- und Messnetzbetreiber. Als zentrale Voraussetzung für die Entwicklung von Anwendungen wird die Entwicklung eines tiefgreifenden Metadatenkataloges gesehen.

Summary

Lähne, W., Rötzer, K., Gründa, H. & Müller, M. (2025): HyperMODE – Development of a dense meteorological measurement network for environmentally sensitive traffic management. – Mitt. Pollichia 103: 23–42, Bad Dürkheim.

Advances in the development of digital measurement systems, communication technologies, and data processing since the 1990s led to a radical change in the collection of meteorological data. As a result, not only government weather services switched from analog data acquisition to autonomous stations and measurement networks. Authorities and companies at the federal, state, and local levels also increasingly began to establish meteorological stations or comprehensive specialized measurement networks for environmental monitoring/surveillance purposes or for providing services. In almost all cases, such measurement networks are heterogeneous in structure. Data exchange or joint data management generally do not take place, although users and operators unanimously recognize the added value. This is where the mFUND-funded hyperMODE project, initiated as a feasibility study, comes in with the aim of integrating meteorological data from various measurement networks into a central platform and creating a high-quality and freely accessible database. The following report summarizes the methodological approach, the technological challenges, the results achieved, and the potential for further research. In summary, the number of potentially usable measuring stations is very high, these are often very heterogeneously distributed, and many are equipped with high-quality measuring technology. Limitations and hurdles in integrating them into a central platform and using the data arise from restrictions of physical and legal availability, site quality, and regular maintenance tasks by station and measuring network operators. The development of a comprehensive metadata catalog is seen as a key prerequisite for the development of applications.

1 Aufgabenstellung

In allen gesellschaftlichen Bereichen, in der Wirtschaft, im Umweltschutz, der öffentlichen Verwaltung und der Forschung besteht Bedarf an zeitlich und räumlich hochaufgelösten regionalen meteorologischen Daten und daraus ableitbaren meteorologischen und klimatologischen Produkten. Dafür nutzbare meteorologische Stationsmessdaten existieren in hoher räumlicher und zeitlicher Dichte. Nicht nur der Deutsche Wetterdienst (DWD), sondern unter anderem auch private und öffentliche Einrichtungen und Unternehmen betreiben häufig meteorologische Einzelstationen oder sogar ganze Messnetze. Vielfach werden diese jedoch nur für interne Zwecke genutzt, Fachnutzer und generelle Interessenten haben oft keine Kenntnis über ihre Existenz und keinen Zugang.

Hier setzte das vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr geförderte mFUND Projekt hyperMODE an. Das Hauptziel des Projektes war die Integration und Bereitstellung von Daten unterschiedlichster Messnetze in eine zentral verwaltete Datenplattform auf Grundlage der OpenSensorWeb-Technologie. Von Anfang an war das Projekt aber vor allem als Machbarkeitsstudie geplant. Machbarkeit bedeutet zu prüfen, ob unter dem Anspruch, hohe fachliche Anforderungen und damit verbunden auch hohe Anforderungen an die Daten-Governance zu erfüllen, auch die technische, zeitliche, finanzielle und ressourcenmäßige Umsetzbarkeit des Vorhabens möglich ist.

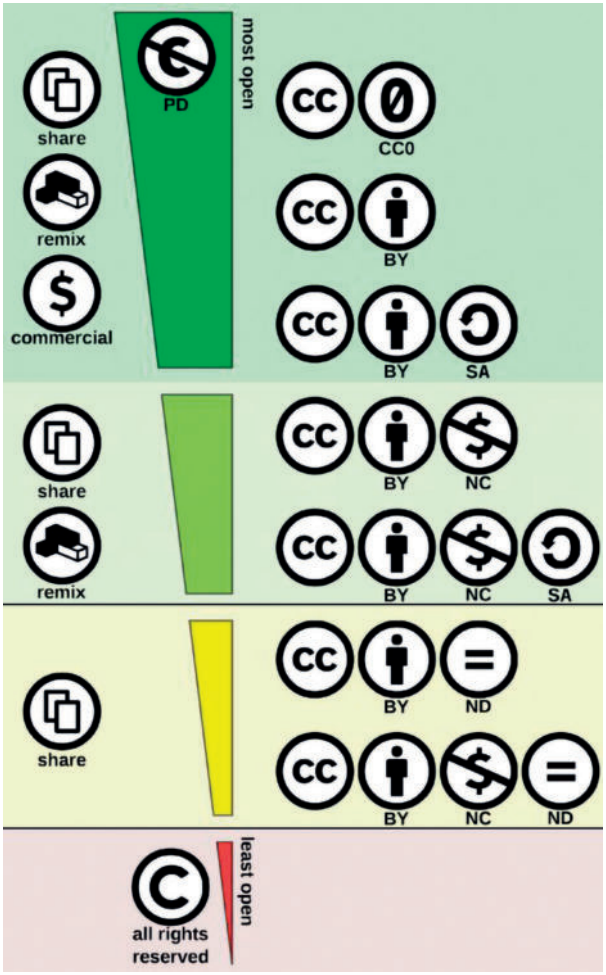


Abb. 1: Das Lizenzspektrum von Creative Commons. Quelle: Shaddim (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Creative_commons_license_spectrum.svg)

Unter hoher fachlicher Anforderung ist insbesondere die Qualität bzw. die Qualitätssicherung der meteorologischen Daten subsummiert. Unter Daten-Governance sind die Nutzungsrechte, also die Verfügbarkeit der Daten zu verstehen, wobei der Fokus auf das Open-Data-Prinzip gelegt wird.

Weiterhin sollten Fragen zu technischen Übertragungs- und Bereitstellungsinfrastrukturen geklärt bzw. entsprechende Konzepte entwickelt werden. Ein besonderes Augenmerk wurde auf eine einheitliche und genaue Metadatenbeschreibung im Hinblick auf die Qualitätssicherung der Daten gelegt, da potenzielle Nutzer des so entstehenden verdichteten meteorologischen Messnetzes die Möglichkeit zur Generierung hochwertiger meteorologischer Anwendungen und daraus abgeleiteter Produkte erhalten sollen. Als Projekt-Verbundkoordinator fungierte das Netzwerk Geoinformation der Metropolregion Rhein Neckar (GeoNet.MRN) e. V. Projektpartner waren die Fa. Pikobytes GmbH und im Unterauftrag Wolfgang Lähne.

2 Voraussetzungen

Im Zuge der Recherche für das Projekt wurde innerhalb der Pilotregion Rhein-Neckar ein erhebliches Potenzial bisher nicht verfügbarer meteorologischer Daten identifiziert. Allgemein bekannt sind das Klimamessnetz des DWD sowie die Immissionsmessnetze der Länder mit ihren meteorologischen Stationen. Zumindest auf fachlicher Nutzerebene sind auch die insbesondere in Rheinland-Pfalz sowie in Baden-Württemberg relativ dicht ausgebauten Agrarmeteorologischen Stationen sowie auf Bundesebene das Netz der Straßenverkehrswetterstationen publik. Dass allerdings auch zahlreiche Kommunen und vereinzelt privatwirtschaftliche Unternehmen wie beispielsweise die BASF meteorologische Stationen oder ganze Messnetze betreibt, ist weithin unbekannt, da deren Messwerte in der Regel nur für interne Zwecke verfügbar sind. Betreiber sind in der Regel Planungsämter, Stadtentwässerungen, kommunale Versorgungsunternehmen oder Forschungseinrichtungen von Universitäten. Die Abbildungen 2 bis 5 geben einen Überblick.

Erste Kontaktaufnahmen mit einzelnen Messnetzbetreibern erbrachten positive Rückmeldungen. So wurde ein allgemeines Interesse an dem Projekt, an einer möglichen Datenbereitstellung wie auch an einer Nutzung der entstehenden Datenplattform für unterschiedliche Zwecke bekundet. Ein Teil der im Vorfeld angesprochenen möglichen Datenbereitsteller wie auch -nutzer zeigten Interesse, als Verwertungspartner mit eigenen definierten Anwendungsfällen einzutreten. Themenfelder wie Starkregenma-

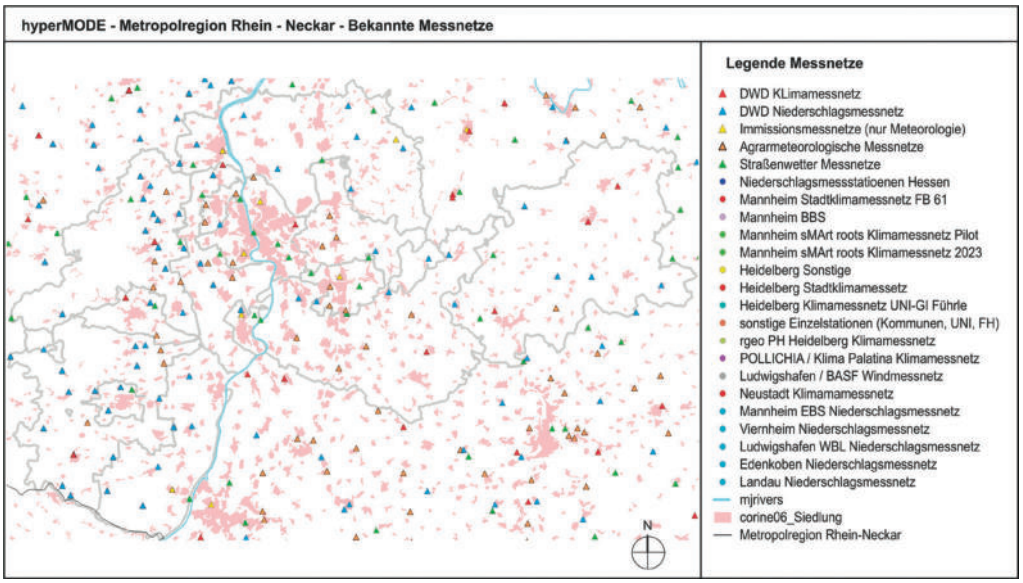


Abb. 2:
Messstationen und -netze in der Metropolregion Rhein-Neckar – bekannter Bestand

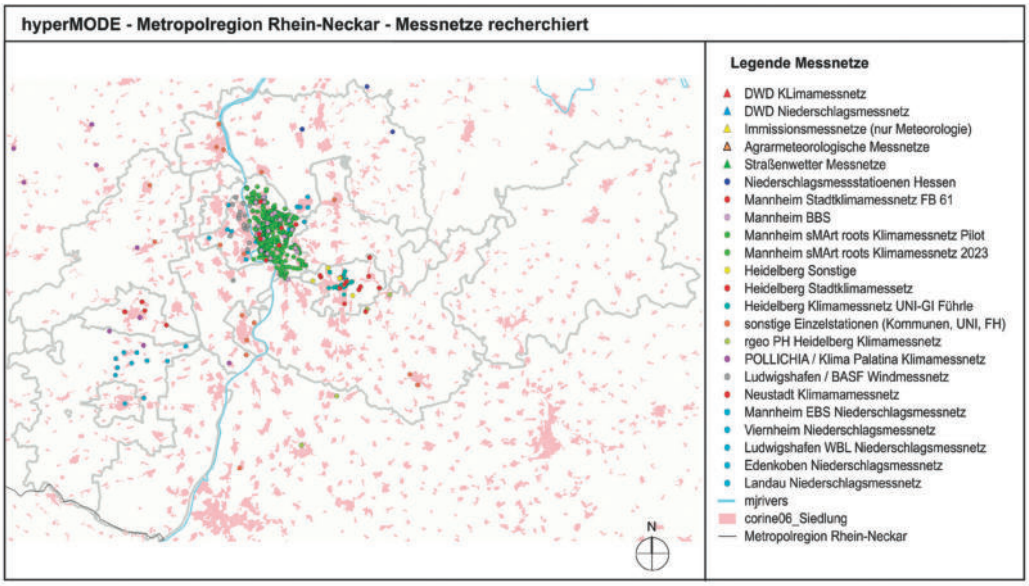


Abb. 3:
Messstationen und -netze in der Metropolregion Rhein-Neckar – recherchiert

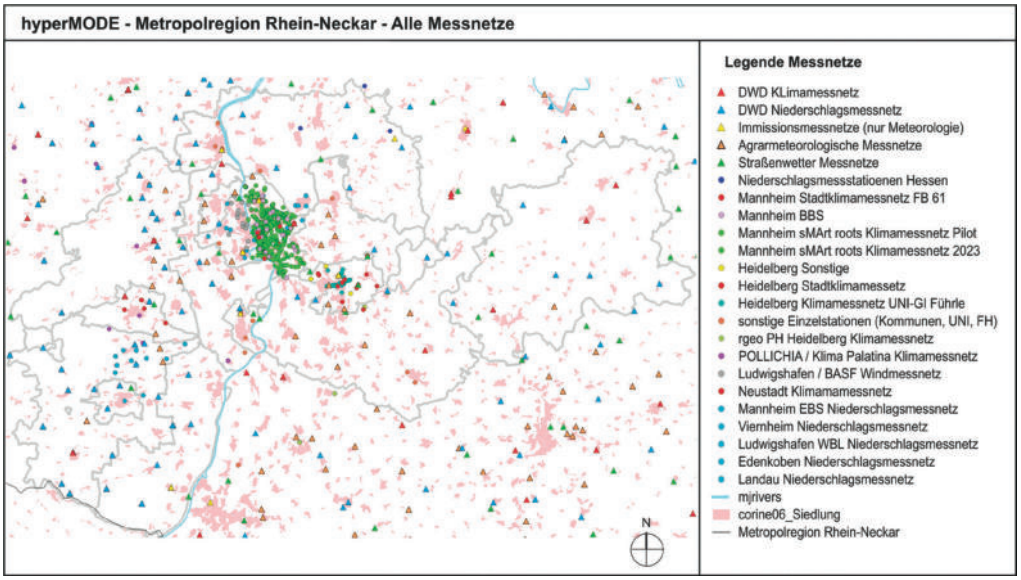


Abb. 4:
Messstationen und -netze in der Metropolregion Rhein-Neckar – Alle Messnetze (recherchiert & Bestand)

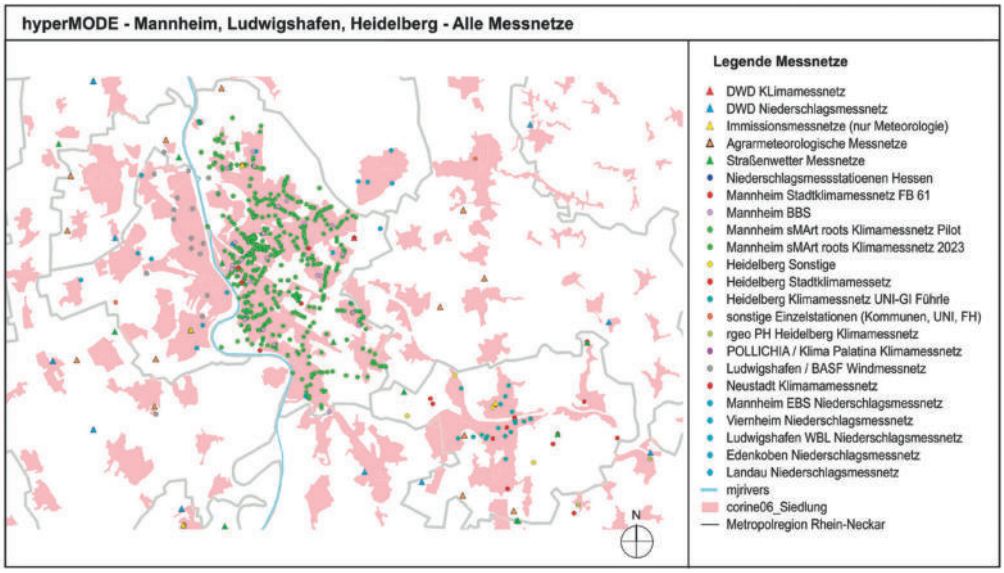


Abb. 5: Messstationen und -netze im Raum Mannheim-Ludwigshafen-Heidelberg – Alle Messnetze (recherchiert & Bestand)

nagement, stadtklimatologische Fragestellungen sowie das umweltsensitive Verkehrsmanagement, Ökologie wie auch ganz allgemein Resilienzmaßnahmen als notwendige Reaktion auf die Folgen des anthropogenen Klimawandels standen seitens der Öffentlichen Hand wie auch der Privatwirtschaft im Vordergrund. Bereiche und Zwecke, in denen hochverdichtete Klimadaten bzw. meteorologische Daten benötigt werden, sind:

Klimawissenschaft und Forschung
- Zweck: Verbesserung des Verständnisses des Klimawandels, seiner Ursachen und Auswirkungen auf verschiedene Ökosysteme und Regionen.
- Verwendung: Langfristige Beobachtungen zur Identifizierung von Klimatrends, Prognosen von Temperatur- und Niederschlagsveränderungen sowie Studien zur globalen Erwärmung.

Wettervorhersage
- Zweck: Genauere Vorhersagen insbesondere für kleinräumige Wetterphänomene wie Gewitter oder Nebelbildung.
- Verwendung**:** Bessere Initialisierung von Wettermodellen durch hochaufgelöste Eingangsdaten.

Landwirtschaft
- Zweck: Optimierung der Ernteerträge und Anpassung an klimatische Bedingungen.
- Verwendung: Wettervorhersagen, die Landwirten helfen, den optimalen Zeitpunkt für Pflanzung, Ernte und Bewässerung zu bestimmen. Daten zu Extremwetterereignissen (z. B. Frost, Dürre) sind wichtig für die Risikominderung.

Bauwesen und Stadtplanung
- Zweck: Sicherstellung der Klimaanpassung und der Nachhaltigkeit von Infrastrukturen.
- Verwendung: Hochverdichtete Wetterdaten zur Planung von Gebäuden und Infrastruktur, um z. B. extremen Temperaturen, starken Regenfällen oder Stürmen standhalten zu können. Auch die Vorhersage von Überschwemmungen ist hier entscheidend.

Energieversorgung und -management
- Zweck: Effiziente Nutzung von Ressourcen und Anpassung an klimatische Bedingungen.
- Verwendung: Optimierung der Energieproduktion aus erneuerbaren Quellen wie Wind und Sonne. Z. B. werden Wetterdaten verwendet, um Windkraftanlagen und Solaranlagen optimal zu betreiben.

Katastrophenschutz und Risikomanagement
- Zweck: Schutz der Bevölkerung vor Naturkatastrophen.
- Verwendung: Vorhersagen von Extremwetterereignissen wie Überschwemmungen, Hitzewellen, Stürmen und Tornados zur rechtzeitigen Warnung und Evakuierung der betroffenen Gebiete.

Verkehr und Logistik
- Zweck: Sicherheit und Effizienz des Verkehrs.
- Verwendung: Wetterdaten zur Optimierung von Flug-, Schiffs- und Straßenverkehr, insbesondere zur Vermeidung von Unfällen und Verzögerungen bei extremen Wetterbedingungen wie Nebel, Schnee oder Regen.

Gesundheitswesen
- Zweck: Verbesserung der öffentlichen Gesundheit und Prävention von gesundheitsgefährdenden Wetterphänomenen.
- Verwendung: Überwachung von Hitzewellen, Luftqualität und anderen klimatischen Faktoren, die Auswirkungen auf die Gesundheit haben können (z. B. Allergien, Atemwegserkrankungen).

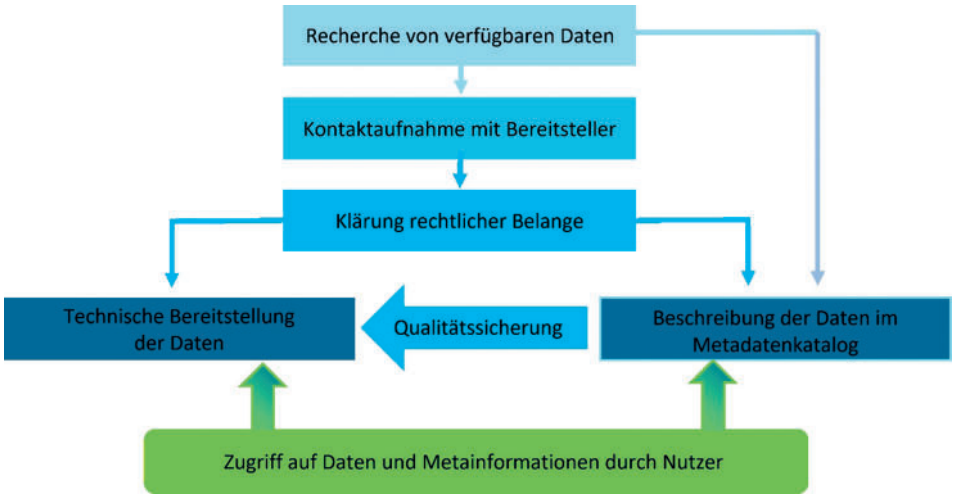


Abb. 6:
Planschema Vorgehensmodell hyperMODE

Wasserwirtschaft
- Zweck: Effizienter Umgang mit Wasserressourcen.
- Verwendung: Analyse von Niederschlagsmustern und Wasserständen in Flüssen und Seen zur Regulierung der Wasserversorgung und -verteilung sowie zur Vermeidung von Überschwemmungen oder Dürren.

Tourismus
- Zweck: Verbesserung der touristischen Planung und Risikominderung.
- Verwendung: Vorhersage von Wetterbedingungen für die Planung von Urlaubszeiten, insbesondere bei saisonabhängigen Destinationen wie Skiorten oder Strandurlauben.

Ökosysteme und Biodiversität
- Zweck: Schutz und Monitoring der natürlichen Umwelt und Artenvielfalt.
- Verwendung: Daten zur Veränderung von Klimabedingungen, die die Lebensräume von Tieren und Pflanzen beeinflussen, sowie zur Analyse der Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die Biodiversität.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Machbarkeitsstudie hyperMODE wurde als 12-monatiges Gemeinschaftsprojekt konzipiert und beinhaltete die Arbeitspakete:
- Kommunikation & Daten-Governance: Recherche von und die Kontaktaufnahme mit Betreibern von Messenetzen.
- Technische Infrastruktur: Entwicklung von Datenadaptern zur automatischen Übernahme der meteorologischen Daten in die bestehende OpenSensorWeb-Infrastruktur.
- Qualitätssicherung: Konzeption notwendiger Anforderungen und Prozessen zur Sicherstellung der Zuverlässigkeit und Konsistenz der meteorologischen Daten.
- Arbeitspaket 4 – Erweiterung und Übertragung – lieferte ein Konzept zum Auffinden von potenziellen Messnetzlücken und Handlungsempfehlung zu ihrer Schließung

Vorgesehen war im Arbeitsplan, dass die Kommunikation mit den Datenbereitstellern und die Entwicklung der Daten-Governance, insbesondere die Klärung der rechtlichen Belange der Datenbereitstellung, im ersten Halbjahr der Projektlaufzeit stattfinden und die prototypische Implementierung von Datenadaptern nach neun Monaten abgeschlossen sein.
Im Verlauf der Projektarbeit zeigte sich jedoch, dass der ursprüngliche Zeitplan nicht wie geplant verfolgt werden konnte, da die Kontaktaufnahme und Verhandlung mit Messnetzbetreibern und damit potenziellen Datenbereitstellern zeitlich nicht genau planbar waren. Zwar gelang der Abschluss von Datennutzungsvereinbarungen und die Bereitstellung von Daten mit einigen Messnetzbetreibern sehr schnell und problemlos, bei anderen jedoch entstanden in diesem Prozess starke zeitliche Verzögerungen, die von Seiten der Projektpartner nicht zu beeinflussen waren. In der Folge verzögerte sich auch die technische Implementierung der jeweiligen Datenbereitstellung. Genauere Ausführungen dazu finden sich im Abschnitt „Datenbereitstellung: Organisatorische und rechtliche Belange“. Um wichtige Datenquellen, bei denen sich der Abschluss der Datennutzungsvereinbarung besonders stark verzögert hatte, noch einbinden zu können, wurde schließlich eine 3-monatige Projektverlängerung beantragt und genehmigt. Diese Zeit wurde hauptsächlich für den Abschluss von Verhandlungen zur Daten-Governance genutzt (insb. Unterzeichnung von Datennutzungsvereinbarungen). Dadurch gewonnene Daten konnten in der Folge noch in die Datenplattform und in den Metadatenkatalog aufgenommen werden.

5 Wissenschaftlicher und technischer Stand bekannter Messnetzkonstruktionen

Zwar ist die Erfassung und Bereitstellung meteorologischer Daten auf regionaler Ebene Gegenstand zahlreicher Projekte auch innerhalb des mFUND Förderprogrammes.



Abb. 7: Messstationen unterschiedlicher Standort- und Messqualitäten – Beispiel Stadtklimastation Mannheim Stadtkämmerei-Dach, Fachbereich Geoinformation und Stadtplanung



Abb. 8: Messstationen unterschiedlicher Standort- und Messqualitäten – Beispiel Hochschule Mannheim, Fakultät für Elektrotechnik

Bei der Recherche nach mit hyperMODE vergleichbaren Zielsetzungen ließen sich jedoch weder national noch international Präzedenzvorhaben identifizieren. In Ansätzen supranational vergleichbar ist allenfalls die World Meteorological Organisation (WMO) als Oberorganisation der nationalen Wetterdienste. Deren Mitglieder tauschen bodenbezogene meteorologische und klimatologische Beobachtungen auf einer von der WMO verwalteten Plattform aus. Zwar sind hier auch Informationen wie Beobachtungszeitraum und Metadaten wie geographische Breite, Länge und Höhe der Station und ihre Instrumentierung sowie Zugehörigkeit zu den einzelnen Beobachtungssystemen (Messnetze) erfasst. Ein direktes Datenqualitätsmanagement wird seitens der WMO jedoch nicht geleistet. Allerdings setzt sie Qualitätsmindeststandards für deren Mitglieder fest. Das National Climatic Data Center (NCDC) sammelt global meteorologische Messdaten verschiedener meteorologischer Messnetze, jedoch ohne Integration privatwirtschaftlicher (z. B. hier DTN – vormals MeteoGroup bzw. Meteomedia als Sonderfall eines umfassenden Messnetzes in Deutschland) oder kommunaler Messnetzbetreiber.

Ansätze der Verbindung von unterschiedlichen meteorologischen Messnetzen, wie zum Beispiel die Hochwasservorhersagezentrale Baden-Württemberg, die Agrarmeteorologische Beratung Rheinland-Pfalz, oder die Immissionsprognose LUBW waren bislang stets auf spezielle Einzelanwendungen ohne koordinierte synergetische Zusammenarbeit ausgerichtet.

Weitere Beispiele sind Kachelmannwetter und das Opensensorweb des hyperMODE-Kooperationspartners PICOPYTES. Bei Kachelmannwetter werden neben den Messwerten nationaler Wetterdienste zwar auch Daten der Immissionsmessnetze der Länder, der Autobahn GmbH (Straßenverkehrswettermessnetze) oder einzelner privater bzw. privatwirtschaftlicher Messnetze (Agrarversicherer) integriert. Alle Messwerte sind jedoch nur visualisiert dargestellt und teilweise auch nur für kommerzielle Nutzer einsehbar. Datensätze werden generell nicht zur Verfügung gestellt. Das Opensensorweb geht hier mit dem Ansatz alle öffentlich verfügbaren Messnetze auf einer Plattform zu integrieren und via Download Nutzern verfügbar zu machen, einen Schritt weiter. Die qualitative Bewertung der Messdaten, d. h. wer misst mit welchem Standard, welcher Sorgfalt und unter welchen Vor-Ort-Bedingungen obliegt aber auch hier noch dem Nutzer der Plattform.

International finden sich vereinzelt Berichte zur Integration unterschiedlicher regionaler oder lokaler meteorologischer Messnetze. Zumeist liegt deren Fokus im Rahmen stadtklimatischer Aspekte auf projektspezifischer Datenassimilierung. D. h. die Datenintegration ist auf die Projektfra-



Abb. 9: Messstationen unterschiedlicher Standort- und Messqualitäten – Beispiel sMArt City Mannheim Klimamessnetz, Station Windeckstraße/Lindenhofstraße



Abb. 10: Messstationen unterschiedlicher Standort- und Messqualitäten – Beispiel BASF Immissionsmessnetz, Station Mannheim Neckarspitze

gestellung ausgerichtet, nicht nutzungsoffen gestaltet und zeitlich begrenzt. Einzelne exemplarische Beispiele hierfür sind:

- Oklahoma City Micronet (OKCNet). 40 Stationen verschiedener Institutionen. Laufzeit 2008 bis 2013. Konzipiert als operationelles Netz zur Verbesserung der atmosphärischen Überwachung im Großraum Oklahoma City. (Basara et. al. 2011) https://www.mesonet.org/research/past-projects
- Birmingham Urban Climate Labaoratory (BUCL) wurde 2011 als hochauflösendes städtisches meteorologisches Netz (UMN) mit automatischen Wetterstationen und low-cost-Sensorik eingerichtet, wobei der Schwerpunkt auf der Überwachung der städtischen Wärme, der Infrastruktur und der Gesundheitsanwendungen lag (Chapman et. al. 2015).
- Helsinki Testbed. Seit 2011, konzipiert als offene Test- und Austauschplattform, welche neue Informationen über Beobachtungssysteme und -strategien, mesoskalige Wetterphänomene, urbane und regionale Modellierung und Endnutzeranwendungen in einer Küstenumgebung in hohen Breitengraden (~60°N) liefern soll (Koskinen et. al 2011) https://testbed.fmi.fi/.
- Meso West Utah. MesoWest ist ein Kooperationsprojekt, das 1996 an der Universität von Utah und Unterstützung durch den National Weather Service gestartetes Projekt mit dem Ziel, den Zugang zu aktuellen und archivierten Wetterbeobachtungen in den gesamten Vereinigten Staaten durch webbasierte Ressourcen zu ermöglichen. Integriert sind neben verschiedenen öffentlichen Netzen (landesweit, regional und lokal) auch Bürgerwetterstationen. Die Daten unterliegen abgestuften Qualitätskontrollen und dienen der Echtzeitüberwachung von Temperatur, Wind, Luftfeuchtigkeit und aktuellem Niederschlag. Ein beispielhafter Anwendungsfall ist das Wasserrecourcenmanagement im Einzugsgebiet des Colorado River. Die im Netzwerk zusammengefassten räumlich verdichteten Daten erlauben deutliche Verbesserungen in der kurz-, mittel- und langfristigen Prognostik und Projektion des Wassersystems (Lukas & Payton 2020).

Auf europäischer Ebene wurde Ende 2021 (Laufzeit bis 2025) die aus EU-Mitteln geförderte Aktion COST FAIRNESS (FAIR Network of micrometeorological measurements – https://www.fairness-ca20108.eu/) gestartet. COST FAIRNESS zielt darauf ab, die Standardisierung und Integration zwischen Datenbanken bzw. Sammlungen mikrometeorologischer Messungen, welche Teil von Forschungsprojekten oder lokalen/regionalen Beobachtungsnetzen sind (z. B. Agrarmeteorologie, Überwachung des städtischen Mikroklimas), zu verbessern. Hintergrund

sind die zunehmend in den Vordergrund tretenden Herausforderungen wetterbedingter landwirtschaftlicher Verluste, des Wasserverbrauchs für die Bewässerung, des Auftretens neuer invasiver Arten und Krankheitsüberträger, der neuen Umweltzonen für Pflanzenkrankheiten und Schädlinge, der Entwaldung, der zunehmenden Urbanisierung, der Land-Stadt-Migration und des erhöhten städtischen Energieverbrauchs zum Kühlen/Heizen. Mikrometeorologische Wissensplattformen tragen hier zu Lösungen bei, müssen jedoch bestimmte Anforderungen erfüllen. Die Aktion COST FAIRNESS hat sich dementsprechend folgende Ziele gesetzt:

- eine Bestandsaufnahme verfügbarer und qualitätsgeprüfter mikrometeorologischer In-situ-Datensätze auf europäischer Ebene und darüber hinaus,
- Mess- und Datenmanagementempfehlungen, die darauf ausgelegt sind, FAIR-Prinzipien zu erfüllen und zeitliche und räumliche Lücken zu vermeiden,
- Beispiele für ländliche und städtische FAIR-Datensätze und
- Austausch von Fragen und Antworten zwischen COST-Action-Mitgliedern, Interessengruppen, spezialisierten Benutzergruppen und der allgemeinen Öffentlichkeit.

Konkretere Ergebnisse bzw. Handlungsleitfäden liegen derzeit noch nicht vor. In Arbeit sind Berichte über Städtische Netzwerke, außerstädtische Messungen sowie Richtlinien für mikroklimatische Messungen.

Auf nationaler Ebene zeigt der Deutsche Wetterdienst (DWD) in jüngerer Zeit vorsichtige Öffnungstendenzen zu externen Messnetzbetreibern (insb. Agrarmeteorologische Messnetze). Von Interesse sind hier hochwertige Niederschlagsmesswerte für die Niederschlags-Radar-Online-Aneichung (RADOLAN). Größtes Hemmnis für eine allgemeine Integration bzw. Mitnutzung von Fremdmessnetzdaten ist allerdings die personell sehr aufwändige Klärung und Sicherstellung der Datenqualität die vom DWD in der derzeitigen Struktur nicht geleistet werden kann. Hier setzt hyperMODE mit dem Ziel an, erstmalig Daten- und Wissensnetze kombiniert verfügbar zu machen, wobei der Teilbereich Wissensnetze insbesondere Informationen zu qualitativen Bewertungen liefern kann. Ein Folgeprojekt soll auf den Ergebnissen und Erkenntnissen des ursprünglichen Projektes aufbauen und sie weiterentwickeln bzw. in konkrete Anwendungen überführen.

6 Zielsetzung und Ergebnisse: Vorgehensmodelle

Neben dem Hauptziel des Projektes hyperMODE, der Integration und Bereitstellung von Daten unterschiedlichster Messnetze in eine zentral verwaltete Datenplattform, lag das Hauptaugenmerk darauf, Vorgehensmodelle für die



Abb. 12: Messstationen unterschiedlicher Standort- und Messqualitäten - Beispiel Klimastation Am Germansberg Speyer, Stadtwerke Speyer (SWS)



Abb. 13: Messstationen unterschiedlicher Standort- und Messqualitäten - Beispiel Klimastation Großkraftwerk Mannheim (GKM)

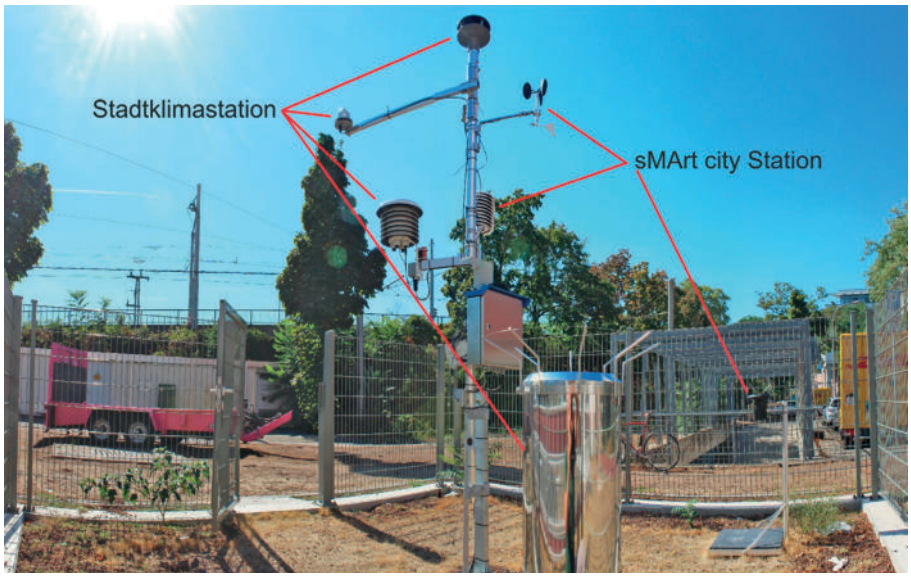


Abb. 11:
Messstationen unterschiedlicher Standort- und Messqualitäten – Beispiel Doppelstandort Stadtklimastation Mannheim Schlossgartenstraße Fachbereich Geoinformation und Stadtplanung & sMArt City Mannheim Klimamessnetz

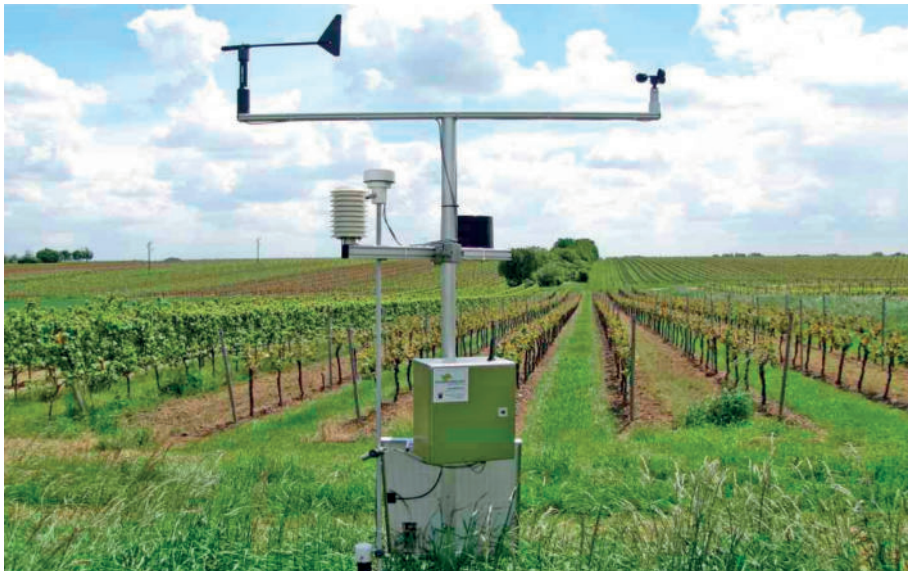


Abb. 14:
Messstationen unterschiedlicher Standort- und Messqualitäten - Beispiel Station Edesheim, Agrarmeteorologie Rheinland-Pfalz



Abb. 15:
Messstationen unterschiedlicher Standort- und Messqualitäten - Beispiel Messfeld Heidelberg-Grenzhof, Geographisches Institut der Universität Heidelberg



Abb. 16: Messstationen unterschiedlicher Standort- und Messqualitäten - Beispiel Messstation am Institut für Umweltphysik Universität Heidelberg,

Bereitstellung zu entwickeln, hierfür die technischen Möglichkeiten zu schaffen sowie vor allem auch die unterschiedlichen Bedürfnisse von Datenbereitstellern und Nutzern kennenzulernen und Lösungswege für regelmäßig auftretende Probleme zu entwickeln.
Im Einzelnen sollten folgende Ziele erfüllt werden:

- Die Entwicklung von Vorgehensmodellen und technischen Voraussetzungen für die Datenbereitstellung
- Die Entwicklung einer Daten-Governance zur Bereitstellung der meteorologischen Daten mit besonderem Augenmerk auf die Datennutzungsrechte
- Qualitätssicherung der Daten: Entwicklung eines Metadatenkataloges und von Datenkorrekturtools
- Die Konzeption technischer Übertragungs- und Bereitstellungs-Infrastrukturen zur und von der Datenplattform

Um die meteorologischen Daten eines Messnetzes in hyperMODE bereitzustellen, fällt jedes Mal die Bearbeitung der gleichen Schritte an. Aus dieser Erfahrung heraus wurde ein Vorgehensmodell (vgl. Abb. 6) für die Integration neuer Messnetze entwickelt.

An erster Stelle steht immer die Recherche der verfügbaren Daten und damit verbunden die Frage, welche meteorologischen Parameter in einem Messnetz gemessen werden. Möglichst schnell sollte dann die Kontaktaufnahme mit den Betreibern des Messnetzes erfolgen, was auch die Ermittlung der für die Datenerhebung und Datenbereitstellung zuständigen Stellen beinhaltet. Daraufhin gilt es, mit den zukünftigen Datenbereitstellern eine Daten-Governance zu entwickeln. Daten-Governance bezeichnet die systematische Verwaltung und Kontrolle von Daten hinsichtlich Qualität, Sicherheit, Zugänglichkeit und Nutzung. In Bezug auf meteorologische Messnetze bedeutet dies, dass die Erfassung, Verarbeitung, Speicherung und Weitergabe von Wetterdaten nach klar definierten Regeln und Standards erfolgt. Der erste hierbei zu klärende Punkt ist die rechtliche Frage, ob und unter welchen Bedingungen die Daten bereitgestellt werden dürfen. Auch die Frage, welche Metadaten und welche Art von Daten (z. B. Echtzeitdaten, historische Daten) bereitgestellt werden können, sowie die technische Art der Datenbereitstellung unter den Gesichtspunkten von Händelbarkeit und Sicherheit werden geklärt. Im nächsten Schritt erfolgt dann die technische Umsetzung der Datenbereitstellung, also die tatsächliche physische Verfügbarmachung der meteorologischen Daten auf der OpenSensorWeb Plattform, sowie die möglichst genaue Beschreibung der Daten im hyperMODE Metadatenkatalog. In diesem Datenkatalog findet sich auch eine kurze Auflistung bzw. Beschreibung von Daten, deren Existenz dem Projekt zwar bekannt ist, die aus den unterschiedlichsten Gründen aber (noch) nicht im Datenkatalog zu finden sind. Interessierte und Nutzer können sowohl auf die Informationen im Metadatenkatalog als auch, bei offen bereitgestellten Daten, auf die Daten selbst auf der OpenSensorWeb Plattform zugreifen.

Dass rechtliche Fragen bei der Integration meteorologischer Messdaten von Messnetzbetreibern der Öffentlichen Hand in eine gemeinsame Datenplattform und deren Bereitstellung für Dritte einen erheblichen Raum einnehmen, ist auf mehrere regulatorische Herausforderungen zurückzuführen. Diese Herausforderungen betreffen insbesondere folgende Aspekte:

Datenhoheit und Lizenzmodelle

- Auch wenn Messnetzbetreiber ihre Daten öffentlich zugänglich machen, bedeutet dies nicht automatisch, dass Dritte sie uneingeschränkt weiterverarbeiten oder weitergeben dürfen. Oft sind die Nutzungsrechte an bestimmte Bedingungen geknüpft (z. B. nicht-kommerzielle Nutzung, Namensnennung, keine Weitergabe an Dritte).
- Unterschiedliche Betreiber können unterschiedliche Lizenzmodelle (z. B. Open Data, kommerzielle Lizenzen, Creative Commons) nutzen, die eine einheitliche Integration erschweren.

Urheber- und Datenbankrecht

- Meteorologische Messdaten an sich sind zwar meist nicht urheberrechtlich geschützt, aber die strukturierte Sammlung und Aufbereitung dieser Daten kann als Datenbank im Sinne des § 87a UrhG (Datenbankschutz) geschützt

sein. Die Nutzung oder Weitergabe kann dann von den jeweiligen Betreibern eingeschränkt werden.
- Falls ein Betreiber durch erhebliche Investitionen eine geschützte Datenbank erstellt hat, kann er sich auf das Datenbankherstellerrecht berufen, was eine Nutzung durch Dritte ohne explizite Erlaubnis erschwert.

Datenschutzrechtliche Fragen (DSGVO)
- Zwar sind meteorologische Daten in der Regel keine personenbezogenen Daten, aber in bestimmten Fällen (z. B. Sensoren auf privaten Grundstücken oder Daten, die Rückschlüsse auf Personen zulassen) könnte die Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO) greifen.
- Falls Daten mit Standortinformationen von privaten Sensoren oder Nutzerdaten verknüpft sind, müssten spezifische Datenschutzanforderungen erfüllt werden.

Regulierung durch das Open-Data- und Informationsfreiheitsrecht
- Die Bereitstellung von Daten durch öffentliche Stellen (z. B. Deutscher Wetterdienst, Umweltbundesamt) unterliegt dem Geodatenzugangsgesetz (GeoZG) und der PSI-Richtlinie (Public Sector Information), welche die Nutzung und Weitergabe regeln.
- Öffentliche Stellen sind oft an gesetzliche Vorgaben zur Datenweitergabe gebunden, die möglicherweise nicht mit den Bedingungen privater Betreiber harmonieren.

Wettbewerbs- und Geschäftsinteressen
- Private Messnetzbetreiber könnten kommerzielle Interessen haben und daher kein Interesse an einer offenen, gemeinsamen Plattform haben, wenn sie ihre Daten selbst vermarkten.
- Selbst wenn eine Plattform die Daten kostenlos bereitstellen möchte, könnten Wettbewerbsaspekte eine Rolle spielen (z. B. Schutz vor Marktverzerrung durch subventionierte öffentliche Angebote).

Technische Standardisierung und Interoperabilität
- Neben den rechtlichen Herausforderungen gibt es oft auch technische Hürden, da unterschiedliche Betreiber verschiedene Datenformate, APIs oder Qualitätsstandards nutzen.
- Falls Daten unter einer spezifischen Lizenz stehen, müssen sie oft in einer bestimmten Form präsentiert oder mit Metadaten versehen werden, was zusätzlichen Aufwand bedeutet.

7 Datenbereitstellung: Organisatorische und rechtliche Belange

Die Recherche von für hyperMODE potentiell verfügbaren Daten wurde bereits während der Antragsphase des Projektes begonnen, um zu gewährleisten, dass genügend Messnetze für die Entwicklung der hyperMODE Plattform vorhanden sind. Auch erste Kontakte zu zukünftigen Messnetzbetreibern und möglichen Nutzern wurden bereits im Vorfeld hergestellt, um sicherzustellen, ob Interesse und Bedarf an einem verdichteten meteorologischen Messnetz in der Metropolregion Rhein-Neckar vorhanden sind. Die Anfragen stießen sowohl auf Betreiber- als auch auf Nutzerseite auf großes Interesse.



Abb. 17: Messstationen unterschiedlicher Standort- und Messqualitäten – Beispiel Niederschlagsmessstation Kläranlage Heidelberg-Wieblingen, Stadt Heidelberg

Auch während der Durchführung des Projektes wurde die Liste der in der Region vorhandenen meteorologischen Messnetze erweitert, viele davon wurden auf Anraten bereits bekannter Messnetzbetreiber aufgefunden.

Die Kontaktaufnahme mit den Messnetzbetreibern erfolgte üblicherweise zuerst telefonisch, gefolgt von einer E-Mail mit kompakt zusammengefassten Informationen des Projektes.

In einigen Fällen war es notwendig, die für die Messnetzbetreuung und Datenbereitstellung zuständigen Stellen zu ermitteln. Gerade bei Organisationen, die einzelne Punkte davon an andere Unternehmen ausgelagert hatten, war die Ermittlung der Verantwortlichen ein langwieriger Prozess.

Nach erfolgreicher Kontaktaufnahme und bei Interesse zur Datenbereitstellung war der nächste Schritt die Aushandlung der Frage, welche Daten unter welchen Bedingungen bereitgestellt werden sollten. Bei kleineren Messnetzen oder Einzelstationen und insbesondere, wenn sie privat oder halboffiziell betrieben werden, konnten hier manchmal sehr



Abb. 18: Messstationen unterschiedlicher Standort- und Messqualitäten – Beispiel Straßenwetterstation Heidelberg-Ziegelhausen, Stadt Heidelberg

schnelle Einigungen erzielt werden. Gab es viele Fragen zu klären, wurde oft ein Onlinetermin abgehalten, um die verschiedenen Vorstellungen des Datenbereitstellers und des hyperMODE Projektes in Einklang zu bringen. Die wichtigsten Punkte, die dabei angesprochen wurden, waren die Fragen

- Welche Daten können bereitgestellt werden – historische oder Echtzeitdaten?
- Welche Parameter werden gemessen?
- Sind die Daten bereits qualitätsgeprüft?
- Welche Metadaten können bereitgestellt werden?
- Unter welchen rechtlichen Bedingungen können die Daten bereitgestellt werden?
- Unter welchen technischen Bedingungen können die Daten bereitgestellt werden?

Aus den Antworten zu diesen Fragen wurde eine Daten-Governance für hyperMODE entwickelt. Darunter wird die Sammlung von Prozessen, Rollen, Richtlinien und Standards verstanden, die die effektive Nutzung von Daten ermöglichen. Dabei umfasst die Daten Governance die Prozesse und Verantwortlichkeiten, die für die Qualität und Sicherheit der in einer Organisation genutzten Daten relevant sind. Wichtige Bestandteile der Governance sind die Beschreibung der Daten durch Metadaten (Vergleiche Abschnitt „Datenrecherche und -publikation“) und die rechtliche Seite der Datenbereitstellung.

Die Frage, unter welchen rechtlichen Bedingungen und Lizenzen die Daten bereitgestellt werden können, muss noch vor allen technischen Fragen gelöst werden. Hierzu musste jeweils zuerst geklärt werden, ob es in der die Daten anbietenden Organisation rechtliche Vorgaben für die Datenbereitstellung gibt, die zwingend einzuhalten waren. Waren diese sehr restriktiv und verhinderten eine öffentliche Bereitstellung, wurde versucht eine Einzelfalllösung herbeizuführen. Oft jedoch konnte in diesen Fällen nicht mehr erreicht werden, als der Hinweis, dass ein offenerer Umgang mit den Daten – besonders im Falle öffentlicher Stellen -wünschenswert wäre. Diese Daten wurden dann in einem passwortgeschützten Bereich des Open Sensor Web bereitgestellt, so dass sie bei einer Änderung der Vorgaben jederzeit freigegeben werden können.

Anhand von Vorgaben und Wünschen auf Seiten des Datengebers wurde dann eine Lizenz für die Veröffentlichung der Daten ausgewählt. Gab es dafür nicht bereits im Vorfeld Vorgaben, wurde vom hyperMODE Projektteam bevorzugt die Datenlizenz Deutschland empfohlen. Diese gibt es in zwei Varianten (Tab. 1), der Datenlizenz Deutschland Zero und der Datenlizenz Deutschland Namensnennung. Die Datenlizenz wurde entwickelt, um die Verwendung weniger, einfacher und einheitlicher Nutzungsbestimmungen zu fördern. Die Variante „Namensnennung“ verpflichtet den Datennutzer, den jeweiligen Datenbereitsteller zu nennen. Die Variante „Zero“ ermöglicht eine einschränkungslose Weiterverwendung. Gab es weitere, von der Datenlizenz Deutschland nicht abgedeckte Einschränkungen, wurde auf die Creative Commons Lizenzen (Abb. 1) zurückgegriffen. Diese erlauben weitere Beschränkungen der Datennutzung, wie beispielsweise die alleinige Weiternutzung der Daten unter der gleichen Lizenz (SA, „share alike“), das Verbot der kommerziellen Nutzung (NC, „non commercial), das Verot der Änderung und Weiterverarbeitung der Daten (ND, „no derivatives“), oder einer Kombination der verschiedenen Merkmale.

Weiterhin wurde ein Muster für eine Datennutzungsvereinbarung entworfen, die den jeweiligen Messnetzbetreibern vorgelegt wurde und nach individuellen Bedürfnissen angepasst werden konnte. Die Nutzungsvereinbarung beschreibt, welche Daten zu Veröffentlichung bereitgestellt werden, unter welcher Lizenz sie veröffentlicht werden, die Übernahme anfallender Kosten, mögliche Gewährleistungen, sowie den zeitlichen Rahmen der Datenbereitstellung.

Besonders lang dauerte generell die Datenbereitstellung bei offiziellen Stellen. Dies betraf sowohl Stellen auf Bundes- oder Landesebene, als auch Kommunen. Oft stellte schon die Unterzeichnung einer Datennutzungsvereinbarung eine Herausforderung dar, die unter Umständen Monate in Anspruch nehmen konnte, da die Einbeziehung übergeordneter Stellen, wie Vorgesetzte, Rechtsabteilungen und sogar Ministerien den Ablauf deutlich verlangsamte. Manche Datennutzungsvereinbarungen konnten deshalb in der Projektlaufzeit nicht unterzeichnet werden. Zusätzlich teilten uns

gerade kleinere Kommunen häufig mit, dass sie zwar großes Interesse an einer Beteiligung hätten, es aber an personellen Kapazitäten und / oder technischem Wissen zur Umsetzung der technischen Seite der Datenbereitstellung mangele.

Bei kommunalen Eigenbetrieben, wie auch bei größeren Privatunternehmen war das größte Hindernis die technische Datenbereitstellung unter Gesichtspunkten der IT-Sicherheit, sowie auch hier die Unterzeichnung einer Datennutzungsvereinbarung, wenn eine hausinterne Rechtsabteilung hinzugezogen werden musste.

Alles in allem konnten durch diese Hindernisse weniger Messnetze als ursprünglich erhofft in die hyperMODE Datenplattform integriert werden. Allerdings konnte so ermittelt werden, wo die Probleme beim Bereitstellen offener Daten liegen. Auch wurden die zuständigen Stellen sensibilisiert für die fehlende Routine im Umgang mit offenen Daten, und gerade durch langwierige Abstimmungen mit Rechtsabteilungen und Ministerien konnten Präzedenzfälle für den Umgang mit offenen Daten geschaffen werden.

Im Rahmen des Integrationsprozesses wurden mit den technischen Ansprechpartnern sinnvolle Bereitstellungswege abgestimmt, technische Fragen zur Datenkodierung (Formate, Wertkodierungen, Konventionen zu Zeitstempeln bzgl. Start und Endzeitpunkt einer Einzelmessung) geklärt und ggf. notwendige Nutzungsvereinbarungen geschlossen. Begleitend dazu wurden Datenadapter zur Datenübernahme programmiert und sofern möglich fortlaufend betrieben.

Die integrierten Messnetze verfügen über recht heterogene Quellformate, APIs und Bereitstellungswege. Die Aktualisierungsintervalle reichen von „nahe Echtzeit“ bis „stark verzögert“. Entsprechend wurden für die einzelnen Datenadapter Verfahren zum periodischen Abtasten der Quellsysteme implementiert.

Im Rahmen der Projektlaufzeit konnten die in Tabelle 2 dargestellten Quellmessnetze bearbeitet werden. Je nach Betreiber und organisatorisch-rechtlichen Rahmenbedingungen war nicht in jedem Fall eine Freigabe als OpenData zu bekommen. In diesen Fällen musste auf eine projektinterne Bereitstellungsvariante zurückgegriffen werden.

Umfangreiche Datenabfragen sind bei vielen APIs / Webdiensten ein wiederkehrendes Problem. In vielen Fällen sind die bereitgestellten Schnittstellen nicht ausreichend, um den Betriebszeitraum (erster bis letzter Messwert an einer Station) zu identifizieren. In diesen Fällen müssen zunächst über heuristisch gestreute Abfragen die wahrscheinlichen Betriebszeiträume ermittelt werden, um dann gezielt Zeitbereiche mit gültigen Messwerten anfragen zu können.

Bei vielen Schnittstellen sind großvolumige Bereichsabfragen (zum Teil schon über mehrere Monate) nicht möglich. Oftmals wird in solchen Fällen die Stabilität der Quelldatenbanken bzw. -server auf der Betreiberseite gefährdet. In Einzelfällen war ein vollständiges Abrufen des Datenbestandes nicht möglich, weil die Bereitstellungsdienste der Anbieter auch bei einem kleinteiligen und inkrementellen Datenabruf regelmäßig zusammenbrachen. Nach Möglichkeit wurden solche Fälle mit den technischen Ansprechpartnern besprochen und gemeinsam nach einer Lösung gesucht.



Abb. 19: Messstationen unterschiedlicher Standort- und Messqualitäten – Beispiel Klimastation Georg von Neumayer Stiftung der Pollichia in Neustadt a.d. Wstr.

Vergleichsweise unproblematisch und hochperformant sind i.d.R. Dateispeicher bzw. Download-Seiten, die auf sehr einfache Weise heruntergeladen und über beliebig große Bereiche ausgewertet werden können. Betreiber, die bisher noch keine eigenen Systeme zur Datenbereitstellung zur Verfügung stellen konnten, wurde dieses Vorgehen empfohlen. In einigen Fällen wurden Webspeicher (z. B. NextCloud oder SFTP) breitgestellt, in die Messnetzbetreiber Ihre Daten hochladen konnten.

8 Datenrecherche und -publikation

Sofern von den Rechteinhabern die Erlaubnis zur Weiterveröffentlichung der integrierten Daten einging, wurden diese im OpenSensorWeb [https://data.opensensorweb.de] publiziert. In dieser Webanwendung können die bereitgestellten Daten in verschiedenen Qualitäten komfortabel heruntergeladen und so in nachgelagerten Anwendungen leicht nachgenutzt werden.

Für den automatisierten Datenabruf ist eine maschinenlesbare, auf offenen Standards basierende REST-Schnittstelle

verfügbar, die mit Standardwerkzeugen wie *R*, Python oder mit ETL-Werkzeugen leicht anzusteuern ist.
Daten, die derzeit aus rechtlichen Gründen nur intern im Projektkonsortium ausgetauscht werden dürfen, sind in der zugriffsgeschützten SensorHub-Cloud-Plattform von PIKOBYTES recherchierbar und maschinenlesbar bereitgestellt. Durch Möglichkeiten der feingranularen Zugriffssteuerung kann nach Zustimmung der Eigentümer bzw. Provider auch assoziierten Partnern und einzelnen externen Nutzer Zugriff auf die Daten gewährt werden. Sobald für die Datenweitergabe eine allgemeine Freigabe erteilt wird, werden die Daten in das OpenSensorWeb überspielt und liegen dort für die Öffentlichkeit verfügbar bereit.

9 Metadaten und Qualitätssicherung

9.1 Allgemeine Beschreibung

Für die Nutzung umweltsensitiver Messwerte ist die Verfügbarkeit detaillierter Metadaten, also beschreibender Informationen über Struktur, Inhalt und Qualität der Datenobjekte von zentraler Bedeutung. Fehlen solche Informationen, sind sie lückenhaft bzw. ist deren Kontinuität nicht gewährleistet, wirkt sich dies unmittelbar auf die Qualität der aus den Daten zu generierenden Produkte aus. In besonderem Maß betrifft dies meteorologische Werte. Hier muss bekannt sein wo genau und unter welchen Umfeldbedingungen eine Messung vorgenommen wird, mit welcher Technik und mit welcher Genauigkeit gemessen wird und wie die stete Kontrolle der Messinstrumente und der Daten gewährleistet wird.

Wie in Abschnitt „Wissenschaftlicher und technischer Stand“ angesprochen, liegen auf internationaler und nationaler Ebene zwar Leitlinien und Empfehlungen für Messsysteme, Standortwahl, Gewährleistung des Stationsbetriebs und der Dokumentation vor. Sie beziehen sich jedoch primär auf die synoptischen Netze der nationalen Wetterdienste und haben im Prinzip auch nur dort aufgrund vertraglicher Verpflichtungen der Mitglieder der WMO (World Meteorological Organisation) verbindlichen Charakter. Da urbane Bereiche aufgrund deren Standortbedingungen nicht die Bedingungen der WMO für meteorologische Messungen (insb. regionale Repräsentanz) erfüllen, befanden sich entsprechende Messstationen in einem Graubereich, d. h. dass häufig auch die Richtlinien der WMO bzgl. Messsensorwahl nicht berücksichtigt werden, zumal solche Stationen nicht seitens nationaler Wetterdienste betrieben werden. Um diese Lücke zu schließen wurden für städtische Messstationen bzw. Messnetze in neuerer Zeit spezifisch angepasste Empfehlungen ausgearbeitet (Oke 2006, WMO 2023). An deren Umsetzung fühlen sich allerdings ebenfalls im Wesentlichen nur nationale Wetterdienste wie der DWD mit seinem seit 2015 entstehendem Stadtklimamessnetz verpflichtet. Betreiber kommunaler meteorologischer Stationen bzw. Netzwerke gehen hier aus vielfältigen Gründen (Kosten, personeller Aufwand, fehlende Fachkenntnis) andere Wege, während Betreiber von Immissionsmessnetzen bzw. agrarmeteorologischer Messnetze in Deutschland auch aufgrund schwächerer Anforderungen an die Messgenauigkeit (bei Immissionsmessnetzen betrifft dies aufgrund deren sekundärer Bedeutung ausdrücklich nur die meteorologischen Messwerte) quasi einen Zwitterweg mit Mischung aus WMO/DWD-Richtlinie und VDI/DIN-Richtlinie (vgl. weiter unten) gehen. In diesem Zusammenhang gilt die Hintergründe der unterschiedlichen Standortanforderungen der Messnetze nationale Wetterdienste und beispielsweise stadtklimatischer Messnetze kurz anzureißen. Meteorologischer Wettermessnetze sollen einen topographischen Raum repräsentieren, d. h. exponierte mikroklimatische Sonderklimaeffekte (z. B. Mulden, Abschattungen, Hindernisse im Umfeld) sind zu vermeiden. Im Gegensatz hierzu stehen urbane Klimabedingungen mit ihren sehr kleinräumig und teilweise sehr markant variierenden Klimaeffekten, dessen Spektrum mit gezielter Stationsstandortwahl erfasst werden soll.

Die divergierenden Qualitätsniveaus sowie die unterschiedliche Umsetzung und Verwaltung der Messnetze zeigen, dass bei Integration in Netzwerke ein großer Bedarf an gemeinsamen Empfehlungen oder Standards besteht. Entwickler und Datennutzer profitieren gemeinsam, wenn hierdurch das Vertrauen in die Repräsentativität und Qualität der Daten gestärkt werden kann. Tatsächlich sind technische Informationen über meteorologische Messnetze infolge unzureichender Berichterstattung und Dokumentation von Methoden und Verfahren jedoch häufig schwer zu ermitteln (Muller 2013a, 2013b). Zwingend erforderlich wird dies im Zuge des verstärkten Wunsches, Low-Cost-Stationen oder einfache Smart-Sensorik z. B. aus Citizen Science Projekten zu integrieren (VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft 2023), um nach Fehlerkorrekturvorprozessierung (KI Technik) durch deren schiere Menge detaillierte Informationsgewinne zu erzielen. Neuere Ansätze (Beele 2022) zeigen hier, dass sich mittels mehrstufiger stationsspezifischer Qualitätskontroll- (QC) und Korrekturverfahren unplausible Messungen entfernen und Temperaturverzerrungen zwischen Stationen korrigieren lassen.

Die Notwendigkeit für die Standardisierung von Metadaten wurde von der WMO (WMO 2021) hervorgehoben und wird insbesondere für Stadtklimanetze (Grimmond et al. 2010) bzw. für Netzwerke in den Vereinigten Staaten (NRC 2010) als kritisch bezeichnet. Verantwortlich sind hierfür mehrere Faktoren, die sich aufgrund teilweise externer Limitierungen nicht vereinheitlichen lassen. An erster Stelle sind die bereits angesprochenen WMO-Richtlinien und Umsetzungen in nationale Leitwerke zu nennen, welche eine Einheitlichkeit und optimale Qualität meteorologischer Daten gewährleisten sollen. So definieren die WMO-Regularien Mindestanforderungen, welche allerdings in der konkreten Umsetzung je nach Messsystem und Standort zu differierenden Datenqualitäten führen können. So fordert die DWD-Richtlinie an Freilandstandorten grasbewachse-

nen Untergrund (WMO: der örtlichen natürlich gewachsenen Zusammensetzung entsprechenden) mit Mindestfläche sowie definierte Abstände zu Hindernissen (natürliche und anthropogene), maximale Hangneigungen der lokalen Topographie. Da jedoch nicht immer geeignete Standorte zu finden sind, Messnetze auch topographisch unruhiges Gelände inklusive Bergstandorte abdecken sollen, müssen gelegentlich Kompromisse eingegangen werden, welche zu unerwünschten Effekten führen können. Beispiele hierfür sind die überproportional hohen Temperaturmaxima während autochthoner Wetterlagen am früheren Standort der DWD-Station Lingen (Gegenstrahlung durch benachbarte Hecke) sowie fortwährend am Standort Weinbiet (Südwest-Exposition des Messfeldes, nach Nordost unmittelbar angrenzendes massives Sandsteingebäude).

Ein spezifisches Problemfeld umfasst auch den Bereich Messtechnik. Die WMO-Kommission für Instrumente und Methoden der Beobachtung (CIMO) setzt hier mit dem Leitfaden für meteorologische Instrumente und Beobachtungsmethoden (WMO 2021) einen für alle nationalen Wetterdienste verbindlichen Rahmen indem von der eingesetzten Sensorik eine Genauigkeit von +/- 0,1°C gefordert wird. Weiterhin soll die wahre Lufttemperatur auch unter Strahlungseinfluss ermittelt werden. Da das Messfeld nicht beschattet sein soll muss der Sensor vor Strahlungseinflüssen geschützt werden, was durch geeignete Strahlungsschutzhütten zu gewährleisten ist. Deren potentielle Fehlerquellen sind jedoch ungleich höher als die Genauigkeit der Messsensorik. Erschwerend kommt hinzu, dass im Zuge der Automatisierung der Messnetze und der erfolgten Abkehr vom früheren Standard „Englische Hütte“ trotz intensiver Bemühungen der CIMO bedingt durch die Vielzahl sich gegenseitig limitierender Einflussfaktoren noch kein verbindlicher neuer Standard gefunden werden konnte. Bramsdma (Bramsdma 2008a, 2008b) gibt einen umfassenden Einblick in das Problemfeld. Die qualitativen Unterschiede der von den Herstellern meteorologischer Messtechnik mit Verweis auf WMO-Konformität angebotenen Strahlungsschutzhütten offenbaren sich bei Integration meteorologische Messnetze außerhalb staatlicher Wetterdienste. Als Folge unterschiedlicher Zielrichtungen der Messnetzbetreiber (Agrarmeteorologie, Immissionen, Stadtklima, Straßenverkehrswetter) ergeben sich – hier beispielhaft wieder auf Lufttemperaturdaten fokussiert – aus der Kombination Standortwahl sowie vom DWD-Standard abweichender Messsensorik und Strahlungsschutz (DWD 2020, Löffler 2012, DWD 2023) Divergenzen. Die DWD-Richtlinien und Musterzulassungen sind bzgl. Messwerterfassung und der Standortwahl sehr konkret ausformuliert. Verbindlichkeit erlangen sie, wie erwähnt, allerdings nur im DWD-eigenen Messnetz. Die öffentlichen Messnetze der Länder (Agrarmeteorologie, Meteorologie der Immissionsmessnetze) orientieren sich in der Regel an der weniger scharf formulierten VDI-Richtlinien 3786-13 Umweltmeteorologie - Meteorologische Messungen – Messstation. In ihr sind die als Industrienorm bezeichneten allgemeine Anforderung an eine Wetterstation beschrieben. Sie lässt größere Toleranzen bzgl. der Standortwahl und der Genauigkeit der Messtechnik zu. Da meteorologische Messtechnik nach Industrienorm niedrigpreisiger angeboten wird, ist der Faktor Anschaffungskosten für Messstations- bzw. -netzbetreiber zumeist ausschlaggebend.

Im Zuge der Diskussion um die Folgen des anthropogenen Klimawandels treten in neuerer Zeit Stadtklimamessnetze in den Vordergrund des Interesses. Sie nehmen im Rahmen von hyperMODE in der Metropolregion Rhein-Neckar bereits einen erheblichen Anteil der zu integrierenden Stationen und Messnetze ein. Um den besonderen Anforderungen, welche sich durch die strukturell kleinteiligen Gliederungen und Variationen der Siedlungsgebiete für die Messnetzkonzeption ergeben, gerecht zu werden, hat die WMO mit spezifischen Handlungsempfehlungen (WMO 2023) zwar einen Orientierungsrahmen vorgegeben. Sie werden jedoch nicht immer hinreichend umgesetzt. In neuerer Zeit erhoffen sich Netzwerkbetreiber durch den vermeintlichen Vorteil moderner einfacher und kostengünstiger Smart-Technologie und deren Integration in großer Stückzahl mittels intelligenter Datenaufbereitungs- und Fehlerkontrolltechniken (KI – Künstliche Intelligenz) einen Informationsgewinn. Im nachfolgenden Abschnitt „Spezifische Anforderungen“ wird hierauf nochmals Bezug genommen.

Ein weiteres Problemfeld betrifft den Bereich Wartung. Neben Sensorausfällen aufgrund technischer Defekte sind hier vor allem Drifteffekte aufgrund Alterung oder Verschmutzung relevant. Sie sind besonders schwer zu fassen und auch im Datenmanagement mit Hilfe von Messwert-Kontroll-Algorithmen nicht hinreichend sicher detektierbar, weshalb der DWD fixe Kontroll- bzw. Austauschzyklen (i. d. R. 2 Jahre), unabhängig vom Sensorstatus, vorgibt. Betreiber städtischer Stationen bzw. kommunaler Messnetze vertrauen dagegen auch aufgrund personeller und finanzieller Einschränkungen häufig auf die von den Herstellern versprochene Langlebigkeit.

Die vorgenannten Aspekte und Problemfelder verdeutlichen die Notwendigkeit hochgradig differenzierter Metadaten- und Qualitätskatalogisierungen. Zwar pflegen Messnetzbetreiber solche Kataloge. Sie weisen jedoch keine einheitlichen Standardisierungen oder Katalogtiefen auf. Insbesondere Informationen zu Fehlererkennungs- oder -korrekturmechanismen werden nicht weitergereicht, da ein zu tiefer Einblick in interne Abläufe und Strukturen befürchtet wird. Anfragen bei Stations- bzw. Messnetzbetreibern zeigen, dass solche Kataloge insbesondere bei Betreibern einzelner Stationen teilweise rudimentär oder nicht digital hinterlegt sind. Dies gilt auch für den Faktor Qualitätssicherung. Auch hier bestehen je nach Messnetzbetreiber unterschiedliche Ansätze und Qualitätsebenen.

Ein Projektziel von hyperMODE ist die Etablierung eines zielorientierten Metadaten- und Qualitätssicherungskonzeptes. Zielorientiert bedeutet, dass die Nutzer der Datenplattform entsprechend ihren Anforderungen qualitativ passende Datensätze wählen können bzw. bei der Entwicklung von Anwendungen qualitativ passende Produkte gene-

riert werden können. Grundlage sollten die WMO-/DWD-Richtlinien und Empfehlungen sein. Im Rahmen des als Machbarkeitsstudie konzipierten hyperMODE-Projektes wurden bestehende Konzepte, Kataloge und Qualitätsmodi vor allem im Hinblick auf Nutzungserfahrungen, Lücken und generelle Fragestellungen bei Messnetzbetreibern unterhalb der Ebene DWD erfragt. Da jedoch zunächst mit den Messnetzbetreibern in einem zeitaufwändigem Verfahren grundsätzliche Fragen (Zuständigkeit Ansprechpartner, Stationsstandorte, Messparameter, Messtechnik, Datennutzungsvereinbarungen, technische Datenbereitstellungsverfahren) zu klären waren, die bis Projektende auch nur teilweise abgeschlossen werden konnten, und beim DWD derzeit keine personellen Kapazitäten für die gemeinsame Entwicklung eines fortgeschrittenen Metadatenkataloges zur Verfügung standen, soll dies in einem angestrebten hyperMODE-Folgeprojekt in Kooperation mit dem DWD realisiert werden.

9.2 Spezifische Anforderungen

Der Begriff Metadaten wird allgemein für jedes Schema der Ressourcenbeschreibung und deren Objekte, ob digital oder nicht digital, verwendet. Die Bedeutung der Metadatendokumentation wird in der WMO-Richtlinie über die Grundsätze der Klimaüberwachung des Globalen Klimabeobachtungssystems (Global Climate Observing System, GCOS) hervorgehoben (WMO 2003b), in dem es heißt, dass Metadaten „mit der gleichen Sorgfalt behandelt werden sollten wie die Daten selbst". Metadaten stellen sicher, dass der Endnutzer „keinen Zweifel an den Bedingungen hat, unter denen die Daten aufgezeichnet, gesammelt und übertragen wurden" (Aguilar et al. 2003), um eine genaue Interpretation, Manipulation und Auswertung der Ergebnisse mit minimalen Annahmen über die Daten zu gewährleisten (WMO 2023). Werden detaillierte Metadaten erhoben, können die Daten genau interpretiert und Anomalien oder Muster angemessen erklärt und berücksichtigt werden, während es bei unzureichenden Metadaten schwierig oder unmöglich ist die Repräsentativität des Standorts zu beurteilen und zuverlässige Datenanalysen durchzuführen (Stewart 2011). Für meteorologische Datensätze umfasst dies daher alle zusätzlichen Informationen, Merkmale und Beschreibungen der Messtechnik (Metadaten Instrumente, Sensoren, Datenlogger und Übertragungstechnik), der Messstandorte (Standort-, Stations-Metadaten), der Netze (Netzwerk- oder Subnetzwerk-Metadaten), der Netzwerk-Managementverfahren sowie der Kommunikationsmethoden (Cyberinfrastruktur- oder Netzbetriebs Metadaten) (Muller et al. 2013). In diesem Zusammenhang wird vielfach (z. B. Aguilar et al. 2003; Manfredi et al. 2005; Grimmond 2006; NOAA 2004; Oke 2006; WMO 2018, 2021, 2023) darauf hingewiesen, dass die zu erfassenden Metadaten eine sehr umfangreiche Tiefe aufweisen müssen, d. h. Informationen zu Sensortyp, Hersteller, Seriennummer, Mess- und Beobachtungsmethode, Einheiten, Auflösung, Genauigkeit, Reaktionszeit, Zeitkonstante, Zeitauflösung, Installationsdatum, Korrekturen und Kalibrierungen sowie Vergleichsergebnissen aufweisen sollten. Weiterhin werden auch Informationen über betriebliche Verfahren gefordert, wie z. B. Datenverarbeitungsmethoden und -algorithmen, Auflösung, Eingabequelle, Parameterwerte, QA/QC (Qualitätssicherung/Qualitätskontrolle), Konstanten, Speicherverfahren, Zugriffs- und Verarbeitungsmethoden sowie Kommunikations- und Übertragungsverfahren.

Wie aufgezeigt wird, erfordern die Integration und die Datenbereitstellungen aus unterschiedlichsten Messnetze auf einer zentral verwaltete Datenplattform die Entwicklung und Pflege eines konzeptionell tief strukturierten Metadatenkataloges. Dessen Notwendigkeit wird auch bei Betreibern der einzelnen Messnetze nicht in Frage gestellt. Im Rahmen der Kontaktaufnahme mit den Messnetzbetreibern zeigte sich auch seitens der öffentlichen Hand, vielfach mit Verweis auf Datenschutzrichtlinien, eine deutliche Zurückhaltung Metadaten in hinreichender Tiefe bereitzustellen. Dass jedoch keine unüberwindlichen Hürden gegeben sein müssen, lassen beispielsweise das Oklahoma Mesonet (Basara et al. 2010) und das Oklahoma City Micronet (Brock et al. 1995; Shafer et al. 2000; McPherson et al. 2007) welche solche Informationen veröffentlichen und online verfügbar machen bzw. das Helsinki Testbed (Poutiainen et al. 2006) erkennen. Hier besteht noch genereller Abstimmungsbedarf mit Fachabteilungen der Kommunen, der Länder und des Bundes. Im Rahmen eines hyperMODE-Folgeprojektes wird es Ziel sein, in Begleitung durch Fachabteilungen des DWD einen Metadatenkataloges und eines Qualitätssicherungskonzeptes zu entwickeln.

10 Datenkatalog & Datenübersicht

10.1 Datenübersicht

Neben den bekannten Messnetzen mit direktem oder indirekten meteorologischen bzw. klimatologischen Bezügen konnte eine erhebliche Anzahl bislang nicht bekannter Messnetze bzw. Einzelstationen ermittelt werden.
Als öffentlich bekannte Messnetze gelten:

- Klimamessnetz bzw. Niederschlagsmessnetz des Deutschen Wetterdienstes
- Luftmessnetz des Umweltbundesamtes – hier Stationen mit meteorologischen Messkomponenten
- Immissionsmessnetze der Länder – hier Stationen mit meteorologischen Messkomponenten
- Straßenwetterstationen des Autobahn GmbH, der Bundesländer und verschiedener Kommunen
- Agrarmeteorologische Messnetze der Länder Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland, Sachsen, Thüringen
- Privatwirtschaftliches Messnetz DTN/meteomedia (im Rahmen von hyperMODE aufgrund primär kommerzieller Zielsetzung zunächst nicht berücksichtigt)
- Pfalzwerke Netz AG – dezentral verteilte Klimastationen

- EnBW Energie Baden-Württemberg AG – Klimastationsnetz

Vornehmlich im Gebietsbereich der Metropolregion Rhein-Neckar konnten zahlreiche öffentlich unbekannte Messnetze bzw. Einzelstationen recherchiert werden. Betreiber sind hier seitens der öffentlichen Hand Städte und Gemeinden, Universitäten und Hochschulen, Vereine und Stiftungen sowie privatwirtschaftliche Unternehmen. In den Abbildungen 2 bis 5 sind die Stationsstandorte und Betreiber – soweit Standortkoordinaten mitgeteilt wurden – lokalisiert. Hinzu kommen noch weitere, hier nicht gelistete Stations- bzw. Messnetzbetreiber, von denen noch keine konkreteren Informationen mitgeteilt wurden, sowie Privatpersonen mit Stationen, welche der Kategorie Citizen Science zuzuordnen sind und im Rahmen des gegebenen Recherchezieles zunächst noch nicht Berücksichtigung fanden. Die Ausstattungen der Stationen decken das gesamte, im Abschnitt „Metadaten und Qualitätssicherung" diskutierte Standort- und Qualitätsspektrum ab. Die in den Abbildungen 7 bis 19 beispielhaft dargestellten Messstationen geben hierzu einen ersten Eindruck. Im Einzelnen umfassen die Messnetze bzw. Einzelstationen:

- Stadt Mannheim – Eigenbetrieb Stadtentwässerung (Niederschlagsstationen), Fachbereich Geoinformation und Stadtplanung (Stadtklimastationen), MKB Mannheimer Kommunalbeteiligungen GmbH / sMArt roots Klimaresilienzmessnetz (Stadtklimastationen), MVV Energie AG (Niederschlagsstationen), GKM – Großkraftwerk Mannheim (Klimastation), BBS Bau- und Betriebsservice GmbH (Klimastationen Schulen)
- Mannheim – Hochschule Mannheim (Klimastation)
- Stadt Ludwigshafen – Eigenbetrieb Stadtentwässerung (Niederschlagsstationen), TWL Technische Werke Ludwigshafen (Klimastation), Umwelt und Klima (Windmessstationen)
- Ludwigshafen – BASF (Windmessstationen & Klimastation)
- Stadt Heidelberg - Amt für Umweltschutz, Gewerbeaufsicht und Energie (Stadtklimastationen), Abwasserzweckverband (Niederschlagsmessstation)
- Heidelberg – Universität: Institut für Umweltphysik (Klimastation), Geographisches Institut (Klimamessfeld), Max-Planck-Institut für Kernphysik (Klimastation), Pädagogische Hochschule: Geographisches Institut (Klimamessnetz)
- Stadt Worms - Entsorgungs- und Baubetrieb Worms AöR (Klimastationen)
- Worms – Fachhochschule, Fachbereich Informatik (Klimastation)
- Stadt Speyer – SWS Stadtwerke Speyer (Klimastationen)
- Stadt Viernheim - Stadtwerke Viernheim GmbH (Niederschlagsstationen)
- Stadt Landau - Entsorgungs- und Wirtschaftsbetrieb Landau (Niederschlagsstationen)
- Stadt Neustadt - Eigenbetrieb Stadtentsorgung (Klimastationen)
- Neustadt - POLLICHIA / Georg-von-Neumayer Stiftung (Klimastationen)
- VG Edenkoben – VG-Werke (Niederschlagsstationen)
- Stadt Sinsheim - Eigenbetrieb Stadtwerke (Niederschlagsstationen)
- Sinsheim – Klima Arena, Klimastiftung für Bürger (Klimastationen)
- Maikammer - Klima-Palatina e.K.(Klimastationen)
- Karlsruhe – KIT Karlsruher Institut für Technologie (Klimamessmast)

11 Konzept zur potenziellen bedarfsspezifischen Erweiterung und Ergänzung von Meteorologischen Messnetzen

Die im Rahmen der Machbarkeitsstudie recherchierten Messnetze zeigen zusammen mit dem bekannten Bestand eine räumlich stark variierende Dichteverteilung. Die betrifft insbesondere die für mögliche Verwertungen besonders wichtigen Parameter Lufttemperatur/Luftfeuchte, Niederschlag und Wind. Des Weiteren variiert die Qualität der Messdaten deutlich. Nachträgliche Aufbereitungen und Korrekturmechanismen können beide Faktoren nicht hinreichend kompensieren. Unsicher ist auch, inwieweit alle recherchierten Messnetzbetreiber tatsächlich bereit sein werden kontinuierlich Daten an die Plattform zu liefern. Teilweise sind hier noch rechtliche und technische Hürden zu bewältigen. So bestehen auf technischer Seite oftmals gravierende Sicherheitsbedenken, welche sich zwar überwiegend ausräumen lassen, jedoch seitens der Messnetzbetreiber einen zusätzlichen Investitionsbedarf bedingen würden. Zwar können weitere Recherchen zumindest teilweise zu Lückenschließungen insbesondere ländlich geprägten Raum führen. Die Messnetzdichte urbaner Räume wird jedoch nicht erreicht werden können.
Ein Bedarf an der Erweiterung und Ergänzung der meteorologischen Messnetze ergibt sich in den Bereichen

- Beratung: Technische Infrastruktur bei der Datenbereitstellung
- Beratung: Qualitative und quantitative Nachrüstung bestehender Stationen
- Lückenschließung

Beratung: Technische Infrastruktur bei der Datenbereitstellung

Bei zahlreichen angefragten Messnetzbetreibern sind die Stationsnetze ausschließlich auf interne Belange ausgelegt. Datenabfrage, -verwaltung und -nutzung laufen dort über ein vom Internet unabhängiges Intranet. Um Sicherheitsaspekten (Schutz vor äußeren Zugriffen, Manipulation) unter Verweis auf hoheitliche Belange (z. B. Wasserversorgung, Abwasserentsorgung) gerecht zu werden, stellen einige angefragte Messnetzbetreiber keine aktuellen Daten zur Verfügung bzw. scheuen den technischen und finanziellen Aufwand für hinreichend sichere Bereitstellungswege. Des Weiteren erklärten einzelne Messnetzbetreiber, dass ihnen

der technische Sachverstand für adäquate Lösungen fehlt. Um in Zukunft dennoch die Daten dieser Betreiber nutzen zu können, sollen in einem Folgeprojekt als beratende Dienstleitung konzeptionelle fachliche Lösungswege angeboten werden.

Beratung: Qualitative und quantitative Nachrüstung bestehender Stationen

Im Rahmen der Vor-Ort-Begehung zahlreicher Stationsstandorte bzw. Sichtung der technischen Betreiberunterlagen zeigten sich häufig ungünstige Platzierung von Sensoren (z. B. Niederschlagsmessgeber im Nahbereich von Bäumen oder Gebäuden, Temperatursensoren an Gebäudefassaden), ungenügende oder fehlende Wartungen, Sensorausfälle bzw. Teilausfälle (z. B. Windgeber, welche nicht mehr alle Richtungssektoren erfassen, verschmutzte und daher nicht mehr funktionsuntüchtige Feuchtesensoren) oder sehr alte Sensoren mit deutlichen Messwertabweichungen. Zumeist sind solche Probleme auf nicht hinreichenden Sachverstand der Stations- oder Messnetzbetreiber zurückzuführen. Teilweise ist aber auch vor Ort kein geeigneterer Standort gegeben. Im Gespräch zeigen zahlreiche Messnetzbetreiber Interesse an einer fachlichen Begleitung zur qualitativen und quantitativen Um- oder Nachrüstung.

Die Umsetzung der beiden Bereiche ‚Technische Infrastruktur' und ‚Nachrüstung' würden zu einer deutlichen quantitativen und qualitativen Steigerung des angestrebten verdichteten meteorologischen Messnetzes führen. In einem Folgeprojekt soll ein spezifisches Konzept ausgearbeitet werden.

Lückenschließung

Der Bereich Lückenschließung stellt in Bezug zum Ziel der Messnetzverdichtung den aufwändigeren Aufgabenteil dar. Bei bestehenden Messnetzbetreibern kann deren möglicher Eigenbedarf ermittelt werden bzw. es können, wenn gegeben, Lückenschließungen angeregt werden. Zeit- und Kostenaufwand sind schwer kalkulierbar und von Engagement und Vorleistung der Messnetzbetreiber abhängig.
Für Regionen, welche bislang noch nicht von Messstationen abgedeckt sind, ist in Abhängigkeit von den Anwendungsfällen, Verwertungszielen und den potentiellen Nutzern der Daten und Endprodukte ein Bedarfsplan zu ermitteln. In weiteren Schritten müssen mögliche Stations- bzw. Messnetzbetreiber ermittelt und Standort- bzw. Infrastrukturfragen mit Grundstückseigentümern geklärt werden. Da ein vergleichsweise hoher Zeitaufwand notwendig werden wird, wäre dem Arbeitsbereich Lückenschließung zunächst nachrangige Priorität einzuräumen.

12 Anwendungsfälle

12.1 Hitzeinseln

Im Rahmen des fortschreitenden Klimawandels und der hiermit in Zusammenhang stehenden deutlichen Zunahme sommerlicher Wärmebelastungen kommt dem Anwendungsfeld Urbane Hitzeinsel (UHI) eine besondere Bedeutung zu. Der Wärmeinseleffekt ist hierbei nicht auf Großstädte begrenzt, sondern tritt auch in Mittel- und Kleinstädten auf. Am deutlichsten ist der Wärmeinseleffekt, d. h. die relative Überwärmung von Siedlungsflächen gegenüber nicht versiegelten Räumen, während autochthoner Wetterlagen (geringe oder keine Bewölkung, geringe Windbewegungen) in den Abend- und Nachtstunden im Sommerhalbjahr ausgeprägt. Am Tag sind dagegen auch bei intensiver Einstrahlung vergleichsweise geringe Unterschiede zwischen Stadt und Umland festzustellen. Die am Tag allerdings dominant in den Vordergrund tretenden Gegenstrahlungseffekte versiegelter und vegetationsbestandener Oberflächen in Kombination mit unbeschatteten und beschatteten (z. B. Bäume, Häuserschluchten) Raumstrukturen beherrschen dann die Aufenthaltsqualität.

Aus dem Hitzeinseleffekt können verschiedene Anwendungsfälle für Bürger sowie Planungsbehörden und Daseinsvorsorgedienstleister generiert werden. Beispiele hierfür sind:

- Quartiersspezifisches Hitzewarn- und Informationsmanagement für Bürger via Apps, Social-Media-Kanäle und Dashboards inklusive Empfehlungen, Hinweise auf kühle Orte, Echtzeit-Routenoptimierung ‚schattige Wege' für Rad und Zu-Fuß.
- Freizeitempfehlungen: Aktuelle und zu erwartende Aufenthaltsqualität im öffentlichen Raum, z. B. abendliches Biergartenwetter in Abhängigkeit vom Wärmeinseleffekt
- Erfolgskontrolle kommunaler Klimaresilienzmaßnahmen: Evaluierung und Simulierung von Maßnahmen zur Stadtkühlung (z. B. Entsiegelung und Begrünung, Frischluftluftschneisen, Dachbegrünung).

12.2 Starkregen

Zukunftsszenarien deuten eine Zunahme vor allem bei extremen, konvektiven Ereignissen an, d. h. Ereignissen mit lokal begrenztem und kleinräumig stark variierendem Charakter. Verdichtete Niederschlagsmessnetze ermöglichen eine

- bessere Verifikation von Starkregenereignissen (z. B. Fördermaßnahme ClimXtreme)
- bessere Verifikation von Überflutungsgegenmaßnahmen (Schwammstadt, Entsiegelungen, Fördermaßnahme Klimaresilienz))
- helfen bei der Entwicklung von Ansätzen zum Management von Starkregen-Extremereignissen (Fördermaßnahme WaX)
- bessere räumliche und quantitative Auflösung von radarbasierten Aneichungen des konventionellen C-Band-

Niederschlagsradarverbundnetzes (DWD RADOLAN) bzw. regionaler X-Band-Niederschlagsradarsysteme

Störfall-Warnmanagement

Die Ausbreitung von Schadstoffwolken bei Störfällen der Industrie oder Brandereignissen sind insbesondere während autochthoner Wetterlagen vom komplexen lokalen bzw. regionalen Strömungsgeschehen abhängig. Echtzeitmodellierungen zur Kenntnis der Verfrachtungswege und daraus mündender exakter ortsbezogener Warnketten lassen sich nur durch verdichtete Messnetzdaten generieren.

Landwirtschaft

Die Zunahme von Hitze- und Dürreperioden lässt den Bedarf an Beregnungen und die Notwendigkeit an Optimierungen des Wasserverbrauchs zunehmen. Mit verdichteten Messnetzdaten lassen sich regional/lokal höher aufgelöste Modelle und spezifische Anwendungs-/Empfehlungstools entwickeln.

Energieversorgung

Auf Freileitungsstrecken entstehen Netzleistungsverluste, welche von den Faktoren Wind und Temperatur kleinräumig beeinflusst werden. Da Netzbetreiber bestrebt sind, Strom verbrauchsoptimiert einzuspeisen, lässt sich die anhand räumlich verdichten Messnetzdaten besser steuern.

Umweltsensitives Verkehrsmanagement

Der Anwendungsfall „Umweltsensitives Verkehrsmanagement“ wurde von den assoziierten Partnern, Stadt Heidelberg, Stadt Mannheim und Verkehrsverbund Rhein-Neckar begleitet. Seit Beginn der Skizzenerstellung haben die Ziele des Verkehrsmanagement eine Wandlung erfahren. Während vor wenigen Jahren noch das Ziel der Reduktion der NO_x-Belastung und das Unterschreiten von Grenzwerten vordringliches Ziel war, haben pandemiebedingt Änderungen des Mobilitätsverhaltens und der steigende Anteil elektrifizierter Kraftfahrzeuge zu einer Neuausrichtung der Zielsetzungen des Verkehrsmanagements geführt. Verkehrsvermeidung und die Verminderung des Anteils des motorisierten Individualverkehrs (MIV) bleibt vordringliches Ziel. Da die NO_x-Belastung jedoch nicht mehr als Begründung verkehrsmindernder Maßnahmen legitimiert werden kann, wird nun der Begriff „Intelligentes Verkehrsmanagement“ bevorzugt. Meteorologische Messnetze haben somit an Bedeutung für das Verkehrsmanagement verloren.

13 Literatur

Aguilar, E., I. Auer, M. Brunet, T. C. Peterson & J. Wieringa (2003): Guidance on metadata and homogenization. WMO/TD-1186, WCDMP-53.

Basara, J. B., Illston, B. G., Fiebrich, C. A., Browder, P. D., Morgan, C. R., McCombs, A. & Crawford, K. C. (2011): The Oklahoma city micronet. – Meteorological Applications 18 (3): 252–261.

Beele, E., Reyniers, M., Aerts, R. & Somers, B. (2022): Quality control and correction method for air temperature data from a citizen science weather station network in Leuven, Belgium. – Earth System Science Data, 14 (10): 4681–4717.

Brandsma, T. & Van der Meulen, J.P. (2008a): 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 28 (3): 371–387.

Brandsma, T., Van der Meulen, J.P. (2008b): 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 28 (3): 389–400.

Brock, F.V., Crawford, C., Elliot R.L., Cuperus, G.W., Stadler, S.J., Johnson, H.L., Eilts, M.D. (1995). The Oklahoma Mesonet: A technical overview. – J. Atmos. Oceanic Technol. 12, 5–19.

Chapman, L. (2015): Urban meteorological networks: an urban climatologists panacea. – 9th International Conference on Urban Climate (IAUC & AMS), open plenary speech: 20–24.

Chapman, L., Muller, C. L., Young, D. T., Warren, E. L., Grimmond, C. S. B., Cai, X. M., & Ferranti, E. J. (2015): The Birmingham urban climate laboratory: an open meteorological test bed and challenges of the smart city. – Bulletin of the American Meteorological Society, 96 (9): 1545–1560.

Deutscher Wetterdienst (2020): Richtlinie – Automatische nebenamtliche Wetterstationen im DWD (Stand: September 2020). Offenbach am Main. https://www.dwd.de/DE/derdwd/beobachter/richtlinie_auto_na_wetterstationen.html

Deutscher Wetterdienst (2023): Liste der musterzugelassenen Sensoren an Regionalflugplätzen (Stand: 28.07.2023). Offenbach am Main. https://www.dwd.de/DE/leistungen/lf_11_flugwetterbetriebsdienste/liste_der_musterzugelassenen_Sensorik.pdf

Grimmond, C.S.B. (2006): Progress in measuring and observing the urban atmosphere. – Theor. Appl. Climatol. 84 (1–3): 3–22.

Grimmond, C.S.B., Roth, M., Oke, TR., Au, YC., Best, M., Betts, R. CG., Cleugh, H., Dabbert, W., Emmanuel, R., Freitas E., Fortuniak, K., Hanna, S., Klein, P., Kalkstein, LS., Lui, CH., Nickson ,A., Pearlmutter, D., Sailor, D. Voogt, J. (2010): Climate and more sustainable cities: climate information for improved planning and management of cities (producers/capabilities perspective). – Procedia Environmental Sciences 1: 247–274.

International Standardization Organization (2007): ISO 17714:2007: Meteorology – air temperature measurements – test methods for comparing the perfor-

mance of thermometer shields/screens and defining important characteristics. First edition 2007-07-01. Genf.

Koskinen, J. T., Poutiainen, J., Schultz, D. M., Joffre, S., Koistinen, J., Saltikoff, E., & Viisanen, Y. (2011). The Helsinki Testbed: a mesoscale measurement, research, and service platform. – Bulletin of the American Meteorological Society, 92 (3): 325–342.

Löffler, H. (2012). Meteorologische Bodenmesstechnik (vormals: Instrumentenkunde), vol. 6, Leitfaden für die Ausbildung im Deutschen Wetterdienst. – Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main.

Lukas, J., & Payton, E. (2020): Colorado River Basin Climate and Hydrology: State of the Science. – Western Water Assessment, University of Colorado Boulder Tech. Rep.

Manfredi, J., Walters,T., Wilke, G., Osborne,L., Hart, T., Incrocci, T., Schmitt, T. (2005): Road Weather Information System environmental sensor station siting guidelines. – FHWA Publ. FHWA-HOP-05-026.

McPherson, R. A. et. al. (2007): Statewide monitoring of the mesoscale environment: A technical update on the Oklahoma Mesonet. – J. Atmos. Oceanic Technol., 24, 301–321.

Muller, C. L., Chapman, L., Grimmond, C. S. B., Young, D. T., & Cai, X. (2013a): Sensors and the city: a review of urban meteorological networks. – International Journal of Climatology, 33 (7): 1585–1600.

Muller, C. L., Chapman, L., Grimmond, C. S. B., Young, D. T., & Cai, X. M. (2013b): Toward a standardized metadata protocol for urban meteorological networks. – Bulletin of the American Meteorological Society, 94 (8): 1161–1185.

NOAA (2004): COOP modernization: Building the National Cooperative Mesonet program develeopment plan. NOAA, 62 pp. Verfügbar unter: https://www.hsdl.org/?view&did=764647

NRC (2010): When Weather Matters: Science and Services to Meet Critical Societal Needs. The National Academies Press: Washington, DC, USA.

Oke, T. R. (2006): Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites. – WMO/TD-No. 1250; IOM Report- No. 81. World Meteorological Organization (WMO). Genf.

Poutiainen, J., Saltikoff, E., Dabberdt, W. F., Koistinen, J. & Turtiainen, H. (2006): Helsinki Testbed: A new open facility to test instrumentation technology for atmospheric measurements. – Extended Abstracts, WMO Technical Conf. on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (p. 13). Geneva, Switzerland: World Meteorological Society, Instruments and Observing Methods Rep. 94, WMO/TD-1354.

Shafer, M. A., Fiebrich, C. A., Arndt, D. S., Fredrickson, S. E., Hughes, T .W. (2000): Quality assurance procedures in the Oklahoma Mesonetwork. – J. Atmos. Oceanic Technol. 17: 474–494.

Silvestri, L., Saraceni, M., & Bongioannini Cerlini, P. (2022): Quality management system and design of an integrated mesoscale meteorological network in Central Italy. – Meteorological Applications, 29 (2): e2060.

Stewart, I. D. (2011): A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. – Int. J. Climatol. 31: 200–217.

VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) – Normenausschuss (2019). VDI 3786 Blatt 13. Umweltmeteorologie – Meteorologische Messungen – Messstation. Düsseldorf.

VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) – Normenausschuss (2023). VDI 3786 Blatt 24 Entwurf „Umweltmeteorologie – Meteorologische Messungen – Crowdsourcing“. Düsseldorf.

World Meteorological Organization (1996): Guide to meteorological instruments and methods of observation.

World Meteorological Organization (2003): Commission for instruments and methods of observation. 13 th session, Bratislava, 25 September – 3 October 2002. – WMO-No.947. WMO: Geneva.

World Meteorological Organization (2003): GCOS Climate Monitoring Principles. Online Ressource http://ane4bf-datap1.s3-eu-west-1.amazonaws.com/wmocms/s3fs-public/ckeditor/files/GCOS_Climate_Monitoring_Principles.pdf?l1e4ALNYxVIStmm19we2Sz0evxEFpHmT]

World Meteorological Organization WMO (2018): Guide to Climatological Practices. Online Ressource https://public.wmo.int/en/resources/library/guide-climatological-practices-wmo-100.

World Meteorological Organization WMO (2021): Guide to meteorological instruments and methods of observation (“CIMO guide”), 2021 edition. WMO: Geneva. Online:https://library.wmo.int/records/item/41650-guide-to-instruments-and-methods-of-observation#.YW01m9nP3X0

World Meteorological Organization.int. (2023): Guidance on Measuring, Modeling and Monitoring the Canopy Layer Urban Heat Island (CLUHI). 2023 edition. Online: https://library.wmo.int/records/item/58410-guidance-on-measuring-modelling-and-monitoring-the-canopy-layer-urban-heat-island-cl-uhi.

Anschrift des Autors:

Wolfgang Lähne
Brucknerstraße 13
67354 Römerberg
E-Mail: laehne@pollichia.de

Eingegangen bei der Schriftleitung am 31. März 2025

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Mitteilungen der POLLICHIA

Jahr/Year: 2025

Band/Volume: 103

Autor(en)/Author(s): Lähne Wolfgang, Rötzer Katharina, Gündra Hartmut, Müller Matthias

Artikel/Article: HyperMODE - Entwicklung eines verdichteten meteorologischen Messnetzes für das umweltsensitive Verkehrsmanagement 23-42