



Leitfaden für den Aufbau eines regionalen Klimamessnetzes

20.10.2023

Erstellt von:

GEO-NET Umweltconsulting GmbH

Große Pfahlstr. 5a

30161 Hannover

M.Sc. Met. Gregor Meusel

Dipl. Ing. Johannes Becker

M.Sc. Geoökol. Janine Könitz

Dipl. Geogr. Harald Kuttig

Dr. Björn Büter

Im Auftrag des:

Regionalverband Ruhr

Kronprinzenstraße 35

45128 Essen

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	III
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	V
TABELLENVERZEICHNIS	VII
1 AUSGANGSPUNKT UND ZIELE DES LEITFADENS	1
2 KLIMAMESSUNGEN IM REGIONALVERBAND RUHR.....	3
2.1 VERTEILUNG DER STATIONEN NACH KOMMUNEN.....	5
2.2 VERTEILUNG DER STATIONEN NACH KLIMATOPEN	6
2.3 VERTEILUNG DER STATIONEN NACH EINZELNEN KLIMAPARAMETERN.....	9
3 GRUNDLAGEN: KLIMAMESSNETZE IN DER PRAXIS.....	13
3.1 ANWENDUNGSKATALOG: AUSWAHL AN FRAGESTELLUNGEN UND ANALYSEANSÄTZEN	13
3.1.1 <i>Klimamonitoring und Langfristauswertungen im Stadtklimakontext</i>	<i>13</i>
3.1.2 <i>Wettervorhersage und Warnmanagement</i>	<i>14</i>
3.1.3 <i>Innenraumklima.....</i>	<i>16</i>
3.2 (KLIMA-) PARAMETER UND EMPFOHLENE SENSORIK.....	17
3.2.1 <i>Temperaturgrößen.....</i>	<i>17</i>
3.2.2 <i>Luftfeuchtigkeit.....</i>	<i>19</i>
3.2.3 <i>Strahlung und Helligkeit</i>	<i>19</i>
3.2.4 <i>Windgeschwindigkeit und -richtung.....</i>	<i>20</i>
3.2.5 <i>Niederschlag.....</i>	<i>22</i>
3.2.6 <i>Luftdruck.....</i>	<i>23</i>
3.2.7 <i>Lufthygienische Messungen</i>	<i>23</i>
3.3 SENSORKALIBRIERUNG	26
3.4 HILFSTELLUNG FÜR DIE STANDORTAUSWAHL.....	28
3.4.1 <i>Allgemeine Hinweise zum Vorgang der Standortauswahl</i>	<i>28</i>
3.4.2 <i>Metadaten der Stationsstandorte und Beispiel-Steckbriefe</i>	<i>32</i>
3.4.3 <i>Positionierung und Ausrichtung der Sensorik</i>	<i>37</i>
3.5 AUSBAUSTUFEN VON KLIMAMESSSTATIONEN UND QUALITÄTSUNTERSCHIEDE	40
3.6 DATENÜBERTRAGUNG UND -MANAGEMENT	45
3.6.1 <i>Grundlagen: Wege der Datenübertragung</i>	<i>45</i>
3.6.2 <i>Grundgerüst für eine Datenplattform: Datenaufnahme, -ablage und</i> <i>-visualisierung</i>	<i>47</i>
3.6.3 <i>Datenkontrolle und Qualitätssicherung</i>	<i>49</i>

3.7	„LEUCHTTURM“-BEISPIEL: DAS LOKALE KLIMAMESSNETZ DER STADT GELSENKIRCHEN	50
4	DER WEG VOM LOKALEN ZUM REGIONALEN KLIMAMESSNETZ	57
4.1	ALLGEMEINE EMPFEHLUNGEN ZUR ZUKÜNFTIGEN AUSGESTALTUNG DES RVR-MESSNETZES	57
4.2	ÜBERLEGUNGEN ZUR ZUSAMMENFASSUNG LOKALER KLIMAMESSUNGEN ZU EINEM GESAMTHAFTEN RVR- MESSNETZ	61
4.3	DISKUSSION VON CHANCEN UND RISIKEN DES MESSNETZAUSBAUS.....	62
5	LITERATURVERZEICHNIS.....	64
6	ANHANG.....	69

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht der gegenwärtig aktiven Messstationen für klimatologische Daten im RVR (Quelle: eigene Abbildung nach Angaben von DWD, LANUV, der Stadt Gelsenkirchen und EGLV).	5
Abbildung 2: Anzahl der aktuellen Messstationen im RVR getrennt nach Kommunen. (Quelle: eigene Abbildung nach Angaben von DWD und LANUV. Bei den LANUV Stationen handelt es sich um Luftqualitätsmessungen, die nicht an jedem Standort Klimadaten miterfassen.).....	6
Abbildung 3: Histogramm der aktuellen Messstationen im RVR getrennt nach Klimatopen. (Quelle: eigene Abbildung nach Angaben von DWD, LANUV, der Stadt Gelsenkirchen und EGLV.).....	7
Abbildung 4: Übersicht der aktuellen Messstationen im RVR kategorisiert nach Klimatopen mit ausgewählten Klimaparametern. (Quelle: eigene Abbildung nach Angaben von DWD, LANUV, der Stadt Gelsenkirchen und EGLV.).....	8
Abbildung 5: Übersicht der aktuellen und vergangenen Messstationen im RVR zum Parameter Temperatur. (Quelle: eigene Abbildung nach Angaben von DWD, LANUV, der Stadt Gelsenkirchen und EGLV.)	10
Abbildung 6: Übersicht der aktuellen und vergangenen Messstationen im RVR zum Parameter Niederschlag. (Quelle: eigene Abbildung nach Angaben von DWD, der Stadt Gelsenkirchen und EGLV.).....	10
Abbildung 7: Übersicht der Messstationen mit Echtzeitdaten des DWD im RVR zu den Parametern Niederschlag, Temperatur und Wind. (Quelle: eigene Abbildung nach Angaben des DWD).	11
Abbildung 8: Anzahl Todesfälle pro Tag für die Jahre 2003 und 2009-2019 in der Schweiz. Die zu den betrachteten Zeiten vier wärmsten Sommer (2003, 2015, 2018 und 2019) sind farbiger dargestellt (Ragettli und Rösli 2020).	15
Abbildung 9: Von links nach rechts, obere Reihe (<i>Feinstaubsensoren</i>): PMS 5003 (Plantower), OPC-R1 (Alphasense), SPS30 (Sensirion), SDS011 (Nova Fitness), SDS198 (Nova Fitness); untere Reihe (<i>NO₂-Sensoren</i>): MICS-6814 (SGX Sensortech), NO ₂ /C-1 (Membrapor), Series 500 SH ENW1 (Aeroqual), DGS-NO ₂ 968-043 (SPEC Sensors) und B43F (Alphasense) (Quelle: UBA 2023b)	26
Abbildung 10: Temperaturprüfschrank des Instituts für Werkstoffkunde (IW) der Leibniz Universität Hannover (LUH) mit LoRaWAN-fähigen Dragino-Testsensoren, die im Gehäuse (obere Schiene) und außerhalb des Gehäuses (untere Schiene) messen. Die beiden geeichten Pt100-Referenzsensoren sind zwischen diesen beiden Testgruppen montiert.	28
Abbildung 11: Exemplarisches Metadatenblatt der Station "Münsterplattform" in Bern (nach Gubler et al.). Teil 1: Allgemeine Informationen.....	35
Abbildung 12: Exemplarisches Metadatenblatt der Station "Münsterplattform" in Bern (nach Gubler et al.). Teil 2: Mikroskala. / Teil 3: Mesoskalige/Überörtliche Skala.	36
Abbildung 13: Beispiel einer kompakten Klimamessstation mit Temperatur und Globe-Temperatur auf zwei entgegengesetzten Auslegern (Quelle: Smart-City Hannover, eigene Aufnahme GEO-NET, 2023).	37

Abbildung 14: Grundgerüst für eine Datenplattform für die Speicherung, Qualitätskontrolle und Visualisierung der Daten aus einem Sensornetzwerk	48
Abbildung 15: Schaubild der Verarbeitung "Vom Sensor zum Dashboard" (Quelle: comNET).	54
Abbildung 16: Gegenüberstellung aktueller Messstationen im RVR mit der Flächenverteilung der Klimatope. (Quelle: eigene Abbildung nach Angaben von DWD, LANUV, der Stadt Gelsenkirchen und EGLV.)	59
Abbildung 17: Gegenüberstellung der aktuellen Messstationen mit der Geländehöhe (Quelle: eigene Darstellung).....	60
Abbildung 18: Übersicht der aktuellen und vergangenen Messstationen im RVR zum Parameter Wind. (Quelle: eigene Abbildung nach Daten von DWD, LANUV, der Stadt Gelsenkirchen und EGLV).	71
Abbildung 19: Übersicht der aktuellen und vergangenen Messstationen im RVR zum Parameter Luftfeuchtigkeit. (Quelle: eigene Abbildung nach Daten von DWD, LANUV, der Stadt Gelsenkirchen und EGLV).....	71

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auflistung von Vorschlägen für den modularen Stationsbau unterschiedlicher Qualität für drahtlose Datenübertragung und verschiedene Anwendungsfelder ohne Anspruch auf Vollständigkeit.	42
Tabelle 2: Auflistung der beiden in Gelsenkirchen verwendeten Stationstypen nach Ausstattung, dem Weg der Datenübertragung und den ungefähren Anschaffungskosten (Stand Februar 2023).	51
Tabelle 3: Zu erfassende Parameter der Stationsbeschreibung (K.PLAN 2023).	53
Tabelle 4: Metadatenerfassung der Rohdaten (K.PLAN 2023).	54
Tabelle 5: Übersicht der aktuell gemessenen klimatischen Parameter getrennt nach Kommunen.	69

1 Ausgangspunkt und Ziele des Leitfadens

Das Team „Klimaanpassung“ des Regionalverbands Ruhr (RVR) erstellt seinen Mitgliedskommunen seit mehr als vier Jahrzehnten umfassende Analysen der stadtklimatischen Verhältnisse. Basis dieser Auswertungen bilden einerseits umfangreiche stationäre und mobile Messungen in der Region, andererseits modellbasierte Untersuchungen, die zusammengefasst räumlich hochaufgelöste Informationen über die klimaökologischen Begebenheiten im Metropolverbund bereitstellen. Mithilfe des aus dieser wertvollen Datengrundlage gewonnenen Karten- und Abwägungsmaterials werden in der Folge kommunale Planungsempfehlungen unter Berücksichtigung der globalen Klimaerwärmung ermöglicht.

Als Dienstleister im Auftrag der Kommunen fokussiert der RVR seine Produkte auf eine einheitliche und untereinander vergleichbare Ausgestaltung und sorgt bei der Weiterentwicklung des eigenen Methoden- und Instrumentenportfolios stets auf die Anforderungen nach dem Stand der Technik. Bzgl. numerischer Modellanwendungen ließ der RVR hierfür im vergangenen Jahr einen „Leitfaden für den Einsatz von Stadtklimamodellen“ erstellen (GEO-NET 2022), der aktuelle Herausforderungen diskutiert und die Anwendung von (Stadt-)Klimamodellen in der Praxis beleuchtet, insbesondere die des neuartigen, im Rahmen des BMBF-Förderprogrammes „Stadtklima im Wandel“ [UC]² (weiter-)entwickelten Modells PALM-4U. Ein logischer Folgeschritt ist die aktuelle Beauftragung zur Erstellung eines „Leitfadens für den Aufbau eines regionalen Klimamessnetzes“, um den Kommunen innerhalb des RVR auch zum Thema Messung eine Hilfestellung für möglichst einheitliche und fortschrittliche Standards an die Hand zu geben.

Im RVR besteht bereits seit mehreren Jahren die Absicht, ein regionales Klimamessnetz für die Region aufzubauen. Dies könnte vornehmlich durch „Low-Cost“-Sensoren erfolgen, da diese zum einen durch ihren niedrigen Einzelpreis und ihre geringe Größe eine hohe räumliche Auflösung erreicht werden kann, zum anderen durch den technischen Fortschritt heutzutage auch adäquate Messgenauigkeiten vorliegen (Gubler et al. 2021). Aus bilateralen Gesprächen ist bereits bekannt, dass einige Kommunen eigene Erfahrungen beim Aufbau solcher lokaler Messnetze sammeln konnten. Im Hinblick auf die Standort- und Sensorikauswahl besteht ebenso der Wunsch nach kommunal einheitlichen Standards wie

unter Gesichtspunkten der Datenablage, -visualisierung, -analyse und -auswertung, weshalb eine Bündelung der verschiedenen Erfahrungsschätze angestrebt werden sollte. Durch die Bildung kommunen- und behördenübergreifender Arbeitsgruppen im Oktober 2022 wurde erstmals die Bestrebung des RVR sichtbar, das Thema „(Klima-)Messung und Messnetze“ für den Metropolraum im Dialog zu vereinheitlichen:

- AG 1 Messkonzeption und Standards
- AG 2 Plattform und Datenintegration
- AG 3 Anwendungen

Parallel zur Arbeit der drei Arbeitsgruppen wurde die hier vorliegende konzeptionelle Studie beauftragt, die bereits erfolgte Arbeiten der AGs, aber auch Erkenntnisse aus eigens durchgeführten Leitfadeninterviews mit verschiedenen beteiligten Akteuren (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV), MULNV, Stadt Gelsenkirchen, Deutscher Wetterdienst (DWD), Ruhr Universität Bochum – Stadtklimatologie, Kommune Oer-Erkenschwick, Hochschule Bochum – Institut für Bauphysik und Konstruktion) aufgreift und bündelt. Zusätzlich erfolgt die Anfertigung einer klimatopbasierten Auswertung historischer und aktueller Stationsstandorte und -instrumentierungen, um Lücken im Messnetz zu erkennen und Empfehlungen für die Zukunft auszugeben. Da Messungen niemals „auf Halde“, sondern stets mit einem konkreten Anwendungsinteresse durchgeführt werden sollten, erfolgt zudem die Zusammenfassung einiger praxisnaher Fragestellungen und Analyseansätze. Einen weiteren wichtigen Baustein der Studie stellen die Themen Datenaufnahme, -visualisierung und -aufbereitung dar, sowohl lokal in den einzelnen Kommunen als auch regional unter dem Schirm des RVR. Hierfür wird das Konzept eines Grundgerüsts einer Datenplattform vorgestellt.

Analog zum „Leitfaden für den Einsatz von Stadtklimamodellen“ muss auch diese Studie eher als konzeptioneller Rahmen verstanden werden, denn als unabänderliche und vollständige Vorgehensweise. Verschiedene finanzielle Voraussetzungen, Ziele oder Strukturen innerhalb der Kommunen lassen beispielsweise Abwandlungen der vorgestellten Inhalte nötig werden. Mit dem „Leuchtturm“-Beispiel des Aufbaus des Messnetzes in der Stadt Gelsenkirchen wird daher exemplarisch ein möglicher Weg aufgezeigt, wie die Etablierung einer flächendeckenden Messung in Kommunen gelingen kann.

2 Klimamessungen im Regionalverband Ruhr

Im Regionalverband Ruhr gibt es eine lange Historie von (Klima-)Messungen aller Art. Um die Ansprüche an ein zukünftiges regionales Messnetz besser beschreiben zu können, wird im vorliegenden Kapitel ein möglichst breiter Überblick über aktuell vorhandene meteorologische Messstationen gegeben. Ziel ist es dabei, unterschiedliche Informationen zu Messnetzen/-stationen zusammenzuführen und Aussagen zur räumlichen Abdeckung verschiedener wichtiger Messparameter zu treffen. Als ergänzende Komponente wurden, falls vorhanden, auch Informationen zu ehemaligen Messstandorten aufgenommen, da diese ein Anhaltspunkt für die Standortwahl künftiger Messstationen sein können. Es handelt sich bei den hier beschriebenen Stationen um einen im Aufbau befindlichen „lebendigen“ (Geo-)Datensatz, der am Ende des Projektes zusammen mit dem Leitfaden übergeben wird und eine Möglichkeit bieten soll, sich auf vereinfachte Art und Weise einen Überblick über die Messstationen im RVR zu verschaffen.

Die Abbildungen und Aussagen in diesem Kapitel beziehen sich zum überwiegenden Teil auf vier Datenquellen zu denen zum Zeitpunkt der Auswertung georeferenzierte Meta-Daten zum Standort, der Aktualität und den gemessenen Parametern vorlagen:

- Metadatenatz des **Deutschen Wetterdienstes** (DWD; aktuelle und vergangene Stationen, zuletzt abgerufen/aktualisiert im Juni 2023)
- Metadatenatz des Luftqualitätsmessnetzes des **Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen** (LANUV; aktuelle Stationen, zuletzt aktualisiert 2022)
- Metadatenatz der **Stadt Gelsenkirchen** (aktuelle und zukünftige Stationen, Stand: März 2023)
- Metadatenatz **der Emschergenossenschaft und des Lippeverbands** (EGLV; aktuelle Stationen, Stand: Oktober 2023)

Zum Luftqualitätsmessnetz des LANUV gehören noch weitere Stationen, an denen ausschließlich lufthygienische Messungen erfolgen und keine Klimaparameter erhoben werden (LANUV 2023a). Über eine vor Projektstart durchgeführte Umfrage innerhalb der RVR-AG3 „Anwendungen“ sind darüber hinaus Hinweise zu weiteren Messstationen/ und -systemen vorhanden. So berichtete die Stadt **Dortmund** von ihrer Messstation DOLIS (Dortmunder Luft-Informationssystem) auf dem Dach des Umweltamtes und von der Planung von sechs Messsystemen an Schulen. Außerdem betreibt die Stadt ebenso wie Wuppertal ein Netzwerk aus NO₂-Passivsammlern (K.PLAN 2023). Im Kreis **Recklinghausen** wurden von SchülerInnen am Berufskolleg Ostvest Datteln „Mini-

Wetterstationen“ zur Messung von vornehmlich Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit entwickelt. Das mittlerweile über 40 Sensoren umfassende Netzwerk wird punktuell durch Bodenfeuchte- und Niederschlagssensoren erweitert und erfährt wissenschaftliche Anknüpfungspunkte und Unterstützung durch die Ruhr-Universität Bochum, die Technische Hochschule Georg Agricola und die Westfälische Hochschule (Kreis Recklinghausen 2023). Die Stadt **Duisburg** berichtete von 36 sog. „senseBoxen“ im gesamten Stadtgebiet. Diese Boxen sind ein vom Institut für Geoinformatik der Universität Münster entwickeltes DIY-Toolkit für die ortsbezogene Messung von Umweltdaten wie Temperatur, Luftfeuchte, Luftdruck, Beleuchtungsstärke und UV-Licht (Bartoschek et al. 2018). Daten mit ähnlichen Qualitäten und Unsicherheiten gibt es im RVR bspw. auch über den kommerziellen Anbieter Netatmo, der eigene Geräte vertreibt und die Daten zu Verfügung stellt. Die Plattform WeatherUnderground wiederum ermöglicht den Upload von Daten privater Klimastationen unterschiedlicher Bauart und Hersteller und auf dem Portal Luftdaten.info können die Messergebnisse von im Eigenbau entstandenen Luftqualitätssensoren veröffentlicht werden (K.PLAN 2023). Die Ruhr-Universität **Bochum** betreibt aktuell zwei Stationen nach WMO¹-/VDI²-Standard von hoher Qualität: eine Ruhruni-Station als Außenstandort und eine innerstädtische Stadtklimareferenz. Außerdem ist unter dem Namen BoKliNet (Bochumer Klimanetzwerk) ein Netzwerk in Aufbau, in dem (semi-)professionelle Klimamessstationen mit wissenschaftlicher Betreuung im Rahmen eines Projektseminars installiert werden sollen (MINT-Cluster Bochum 2023). Weiterhin ist bekannt, dass das LANUV im Rahmen seines Monitorings zum Thema Wasser auch Niederschläge misst: *„Das [...] LANUV NRW erfasst den Niederschlag als eine Basisgröße zur Ermittlung der Grundlagen des Wasserhaushaltes. Der gesetzliche Auftrag hierfür basiert auf §19 des Landeswassergesetzes NRW. [...] Derzeit werden rund 240 Bodenmessstationen vom LANUV NRW betrieben, die den Niederschlag punktuell erfassen.“* (LANUV 2023b).

Im Emscher-Lippe Thingsnet werden mit Hilfe von LoRaWAN diverse private Stationen betrieben, die mit Förderung des Landes NRW in der Emscher-Lippe-Region ausgegeben wurden. Wie bei den SenseBoxen liegt die Aufstellung in privater Hand und es fehlen ausführliche Metadaten zum Aufstellungsort (nur einzelne Fotos vorhanden). Die Daten sind nicht frei verfügbar, sondern können nach Anmeldung in einem Datenportal verwendet werden (Evangelischer Kirchenkreis Recklinghausen 2023).

¹ WMO: World Meteorological Organization (Weltorganisation für Meteorologie)

² VDI: Verein Deutscher Ingenieure

In diesem Kapitel erfolgt eine Beschreibung der aktuellen Verteilung der Messstationen, untergliedert in verschiedenen Kategorien. Erst im späteren Kapitel 4.1 werden diese Ergebnisse interpretiert und Empfehlungen daraus abgeleitet.

Zum Zeitpunkt der Datenerhebung gab es in den vier oben genannten Messnetzen des DWD, des LANUV, der Stadt Gelsenkirchen und von EGLV 182 aktive meteorologische Messstationen (Abbildung 1). Aus dem Metadatensatz des LANUV wurden dabei nach Möglichkeit nur solche Stationen betrachtet, bei denen neben den lufthygienischen Parametern auch klimatologische Daten erhoben wurden.

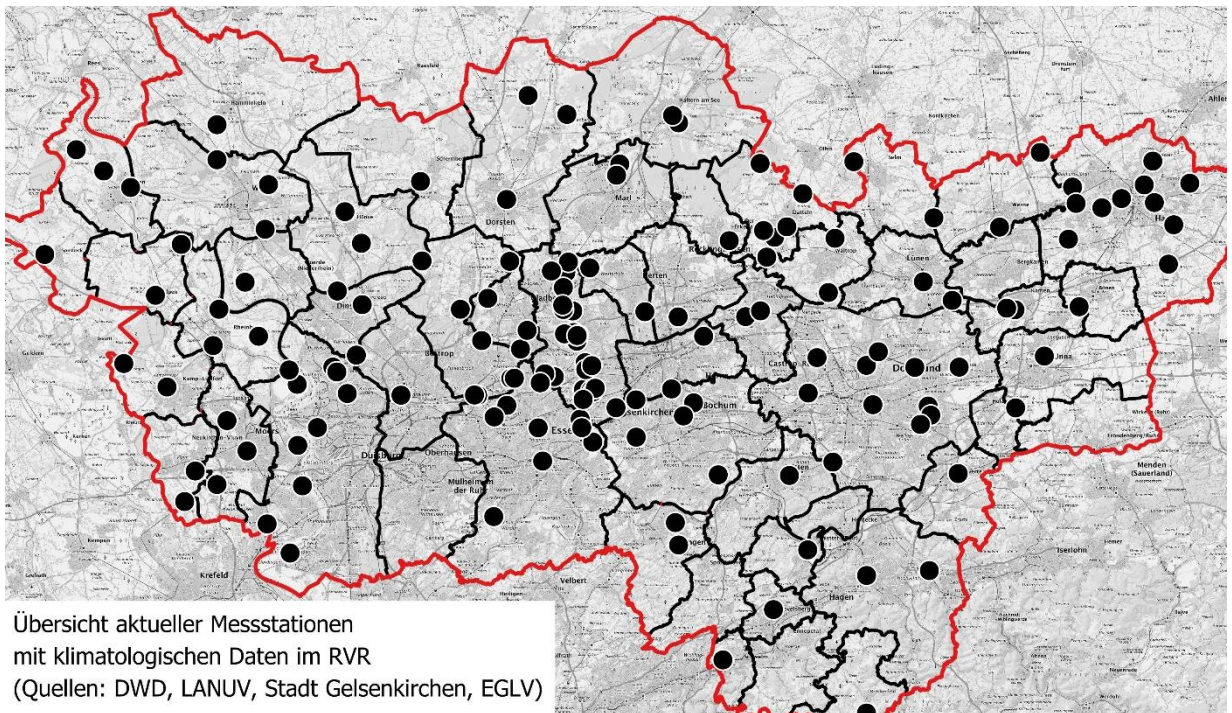


Abbildung 1: Übersicht der gegenwärtig aktiven Messstationen für klimatologische Daten im RVR (Quelle: eigene Abbildung nach Angaben von DWD, LANUV, der Stadt Gelsenkirchen und EGLV).

2.1 Verteilung der Stationen nach Kommunen

Aus der Zusammenstellung der georeferenzierten Messtandorte lässt sich die Anzahl der Messstationen je Kommune ableiten. In Abbildung 2 sind dabei nur die DWD- und LANUV-Stationen aufgeführt. Diese Stationen sind i.d.R. nach den üblichen WMO-Standards eingerichtet (WMO 1996) und liefern überwiegend Daten mit guter Verfügbarkeit und Qualität. Die Daten in Abbildung 2 verdeutlichen, dass sich Messsysteme meist auf die größeren Kommunen und Städte fokussieren. Für die genaue Beurteilung der Stationsverteilung reicht diese aggregierte Übersicht allerdings nicht aus, da hierfür eine Differenzierung der an den Stationen gemessenen Parametern wichtig ist.

Wie in Tabelle 5 im Anhang erkennbar und u.a. in Abbildung 4 visualisiert, wird an vielen Stationen ausschließlich Niederschlag gemessen. Die hohe Stationsdichte dieser Messgröße begründet sich aus den Anforderungen an das Monitoring des Wasserhaushaltes. Niederschlag ist hochgradig von lokalen Gegebenheiten abhängig und besondere Wetterereignisse wie Gewitter und Starkregen können sehr kleinräumig auftreten. Ähnlich wie beim LANUV gilt dabei für das Messnetz des DWD: „Die Dichte des Niederschlagsmessnetzes folgt hauptsächlich nach der räumlichen Variabilität des Niederschlages. Ziel der Messung ist es, das Raum-Zeit-Verhalten meteorologischer und hydrologischer Prozesse bestmöglich zu erfassen, damit das Niederschlagsgeschehen im räumlichen Umfeld der Station möglichst repräsentativ abgebildet wird.“ (LANUV 2023).

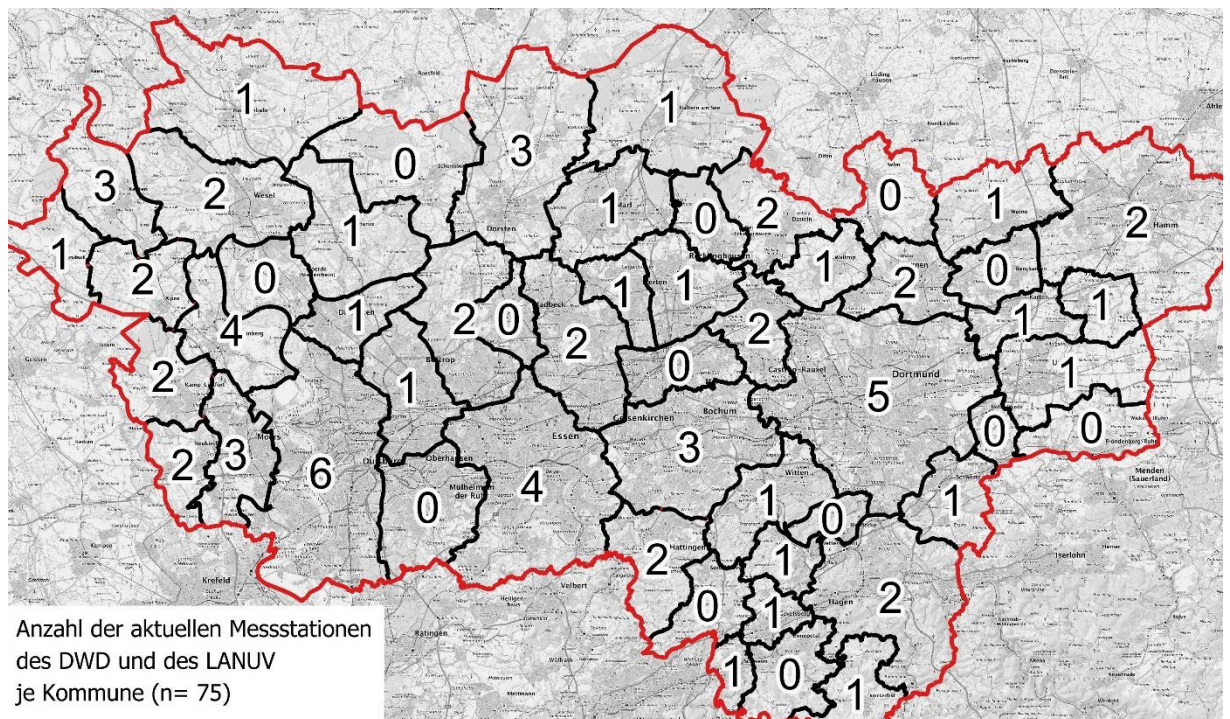


Abbildung 2: Anzahl der aktuellen Messstationen von höherer Qualität im RVR getrennt nach Kommunen. (Quelle: eigene Abbildung nach Angaben von DWD und LANUV. Bei den LANUV Stationen handelt es sich um Luftqualitätsmessungen, die nicht an jedem Standort Klimadaten miterfassen.)

2.2 Verteilung der Stationen nach Klimatopen

Bei vielen klimatologischen Fragestellungen im RVR-Gebiet ist der Klimatopansatz wichtiger Bestandteil der Analysen. Daher wurde die gegenwärtige Messstationsverteilung auch im Hinblick auf diese Klassifizierung analysiert. Ausgewertet wurden hier wiederum alle vier bereits zuvor benannten Datenquellen (DWD, LANUV, Gelsenkirchen und EGLV). Im RVR gibt es acht verschiedene Klimatoptypen, die heterogen im Raum verteilt sind (vgl. Abbildung 16). Messtationen sind überwiegend (73 von 182) im Bereich des

Freilandklimatops zu finden (Abbildung 3). Ein Grund für die hohe Zahl an Stationen dieser Kategorie ist die hohe Zahl an untersuchten DWD-Stationen, deren WMO-Standards sich am besten im ruhigkeitsarmen Freiland realisieren lassen. Ähnliches gilt für das Stadtrandklima, welches sich mit 44 Stationen an zweiter Stelle befindet. Es folgen das Gewerbe-/Industrieklima (24 Stationen), das Parkklima (21 Stationen) sowie das Innenstadt-/ bzw. Stadtklima (11 bzw. 6 Stationen). Im Gewässer- bzw. Waldklimatop gibt es zurzeit keine bzw. lediglich drei Messstationen.

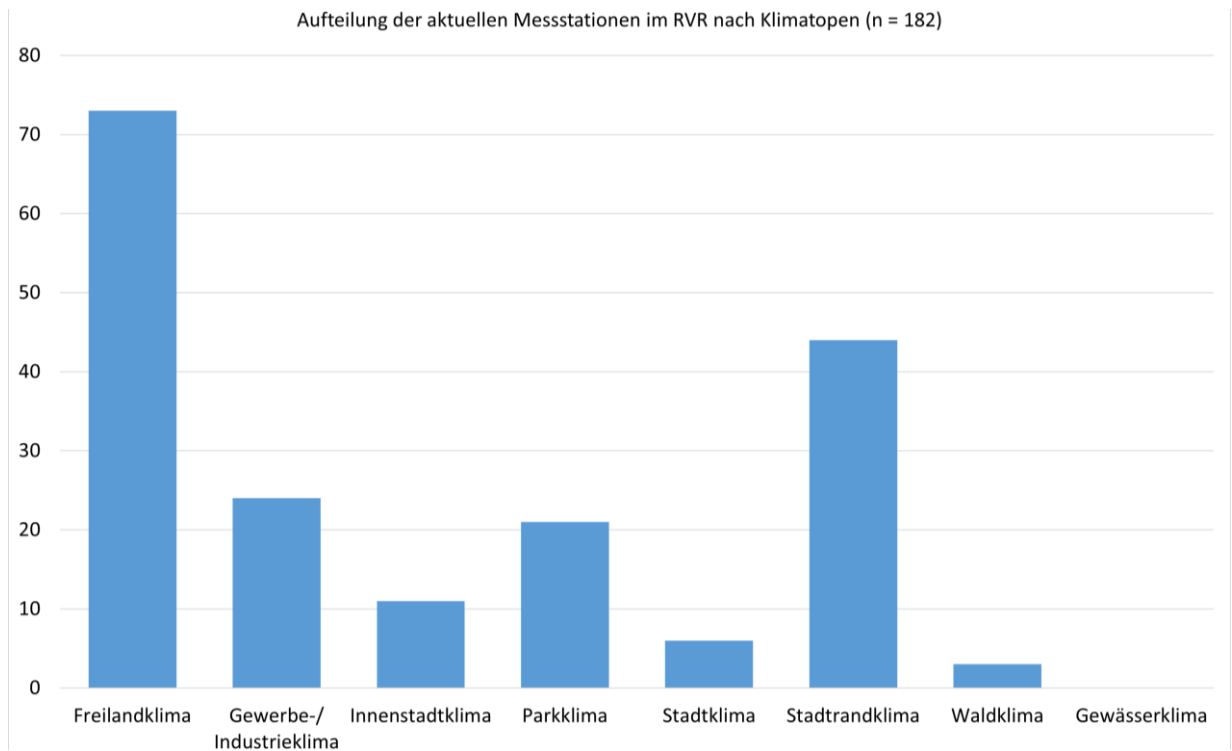


Abbildung 3: Histogramm der aktuellen Messstationen im RVR getrennt nach Klimatopen. (Quelle: eigene Abbildung nach Angaben von DWD, LANUV, der Stadt Gelsenkirchen und EGLV.)

Abbildung 4 stellt über eine Farbcodierung dar, welche Station welchem Klimatop zugeordnet werden kann. Außerdem wird über die Raute und das Kreuz differenziert, welche Stationen ausschließlich Niederschlag messen und welche Stationen weitere Klimadaten liefern.

Es ist erkennbar, dass sich im Westen des RVR der Anteil an Messstationen im Freilandklima häuft. Außerdem zeigt sich dort, aber auch in vielen anderen Bereichen, dass bei den Messstationen im Freilandklima häufig ausschließlich der Niederschlag gemessen wird.

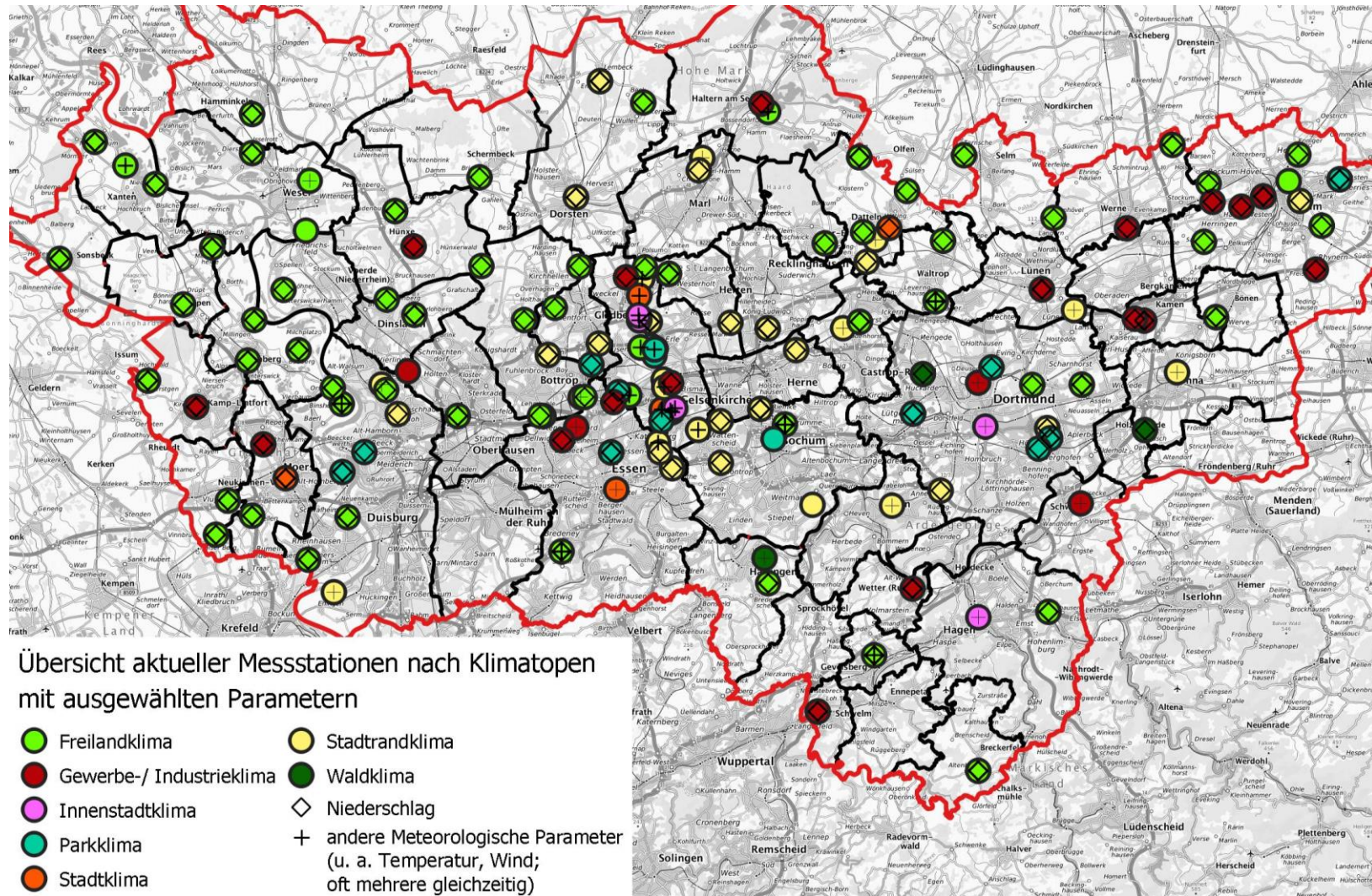


Abbildung 4: Übersicht der aktuellen Messtationen im RVR kategorisiert nach Klimatopen mit ausgewählten Klimaparametern. (Quelle: eigene Abbildung nach Angaben von DWD, LANUV, der Stadt Gelsenkirchen und EGLV.)

2.3 Verteilung der Stationen nach einzelnen Klimaparametern

Die **Lufttemperatur** ist für viele praktische Anwendungsfälle ein interessanter Parameter (vgl. Kapitel 3.1 und 3.2.1). Folglich wird an fast allen Messtationen im dichten Messnetz von Gelsenkirchen auch die Lufttemperatur erhoben (s. Abbildung 5). Bezüglich der Messnetze des DWD und des LANUV sieht man eine Konzentration auf die dichteren Siedlungsbereiche (z.B. Duisburg, Essen Bochum und Dortmund). Bei genauerer Betrachtung wird allerdings erkennbar, dass dem WMO-Standard entsprechend, meist nicht direkt im Siedlungsraum gemessen wird, sondern an den Siedlungsrändern oder im Umland. Liegen doch Stationen im Siedlungsgebiet, so sind sie häufig entlang des Straßenraumes oder bei Gewerbe- und Industriegebieten zu finden, was sich durch die Zielsetzung des LANUV Messnetzes bzgl. des Monitorings der Luftqualität erklären lässt. Eine letzte Gruppe an Messtellen lässt sich unter dem Begriff „öffentlich zugänglich“ gruppieren. Dabei handelt es sich um Messstellen an Parks, Museen, Schulen oder Universitäten. Alt- und Innenstädte sowie Wohngebiete unterschiedlicher Art werden von den Messtellen nahezu nicht abgedeckt. Die Aussagen zur Messung der Lufttemperatur lassen sich auf das Messnetz für Windparameter (Windrichtung und -geschwindigkeit) und für die Luftfeuchtigkeit zum großen Teil übertragen, da die Messtationen deckungsgleich sind (siehe Abbildung 18 im Anhang). Außerdem gibt es rund zehn ehemalige Standorte von DWD-Klimamessstationen mit diesen Parametern. Stichtag für die Differenzierung zwischen aktuellen und ehemaligen Stationen war dabei der 31.03.2023. Diese in der Karte mit grauen Symbolen gekennzeichneten Orte könnten für die Einrichtung neuer Messtellen potenziell interessant sein, da sie sich ggf. hinsichtlich der benötigten Standorteigenschaften eignen (vgl. Kapitel 3.4) und ein Vergleich mit den historischen Messdaten in Bezug auf den lokalen Klimawandel möglich sein könnte. Hierbei sind jedoch zuerst die Gründe für die damaligen Stationsstilllegungen zu eruieren.

Auffällig erscheint die wesentlich höhere Stationsanzahl und -dichte bzgl. der Messung des **Niederschlages** (Abbildung 6). Es handelt sich dabei nicht um ein RVR-spezifisches Phänomen, sondern ist in ganz Deutschland erkennbar. Auf einer Internetseite des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU) ist als Begründung dazu zu lesen: „Die Niederschlagshöhe bzw. -intensität ist eine zentrale Größe für die Wasserwirtschaft. Dabei stellen die kleinräumige sowie hohe zeitliche Variabilität und die unterschiedlichen Niederschlagsarten (zum Beispiel Tau, Reif, Regen, Schnee, Hagel) hohe Anforderungen an eine repräsentative Messung.“ (LfU 2023). Weiterhin ist eine hohe Messnetzdicke für Niederschlag auch immer noch im Bereich der Auswertung extremer Niederschläge wichtig,

da exakte Messungen eine Ergänzung zur mit Unsicherheiten behafteten Überwachung mittels Radar darstellen (DWD 2023c).

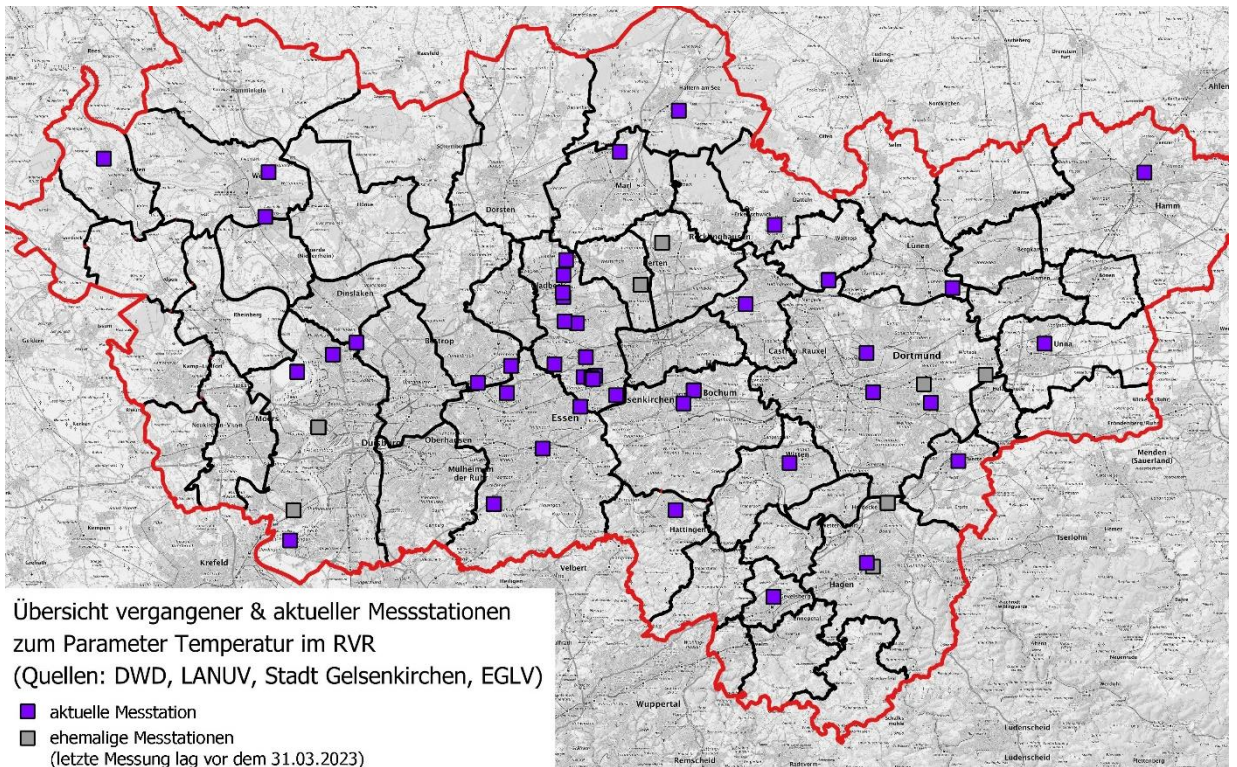


Abbildung 5: Übersicht der aktuellen und vergangenen Messstationen im RVR zum Parameter Temperatur. (Quelle: eigene Abbildung nach Angaben von DWD, LANUV, der Stadt Gelsenkirchen und EGLV.)

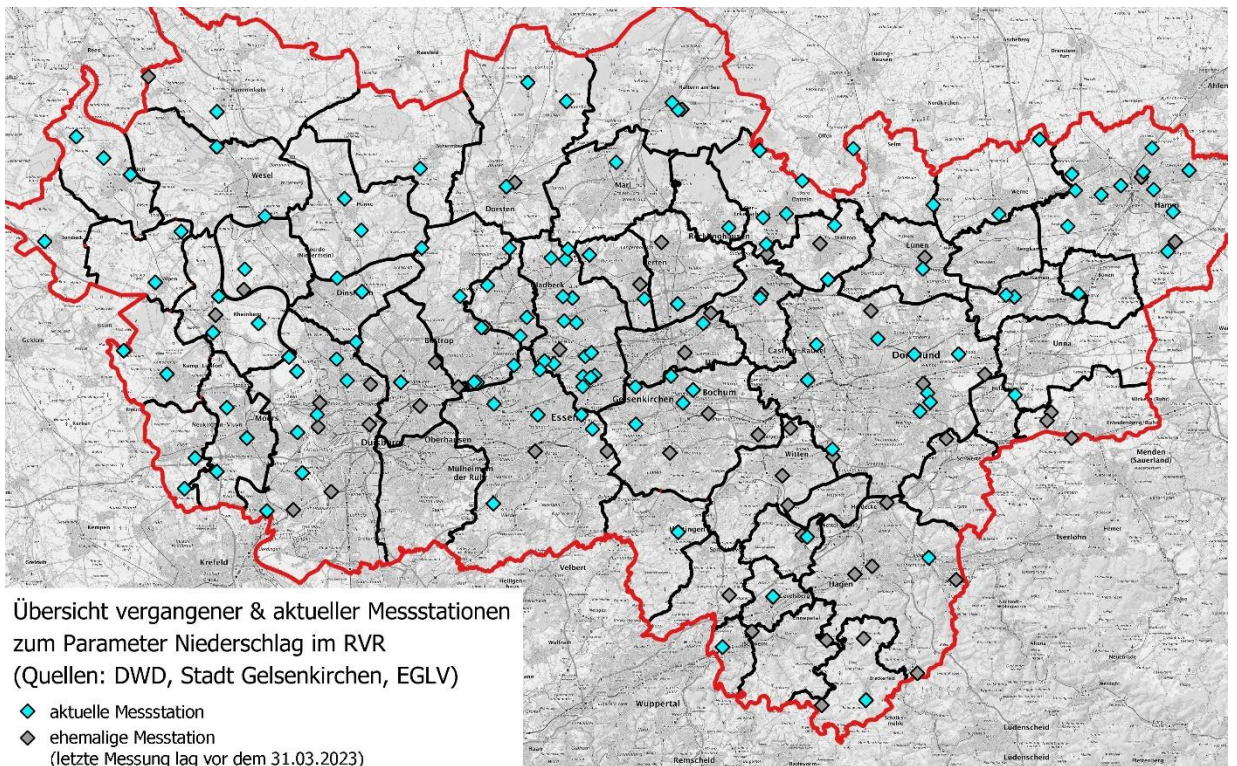


Abbildung 6: Übersicht der aktuellen und vergangenen Messstationen im RVR zum Parameter Niederschlag. (Quelle: eigene Abbildung nach Angaben von DWD, der Stadt Gelsenkirchen und EGLV.)

Neben der erhöhten Anzahl zeigen sich bei der räumlichen Verteilung der Niederschlagsmessstationen allerdings ähnliche Muster wie bei der Lufttemperatur. Die Messstationen sind überwiegend im Außenraum, an Siedlungsrändern und dort eher bei gewerblich genutzten Grundstücken positioniert. Da Niederschlag nicht an LANUV-Stationen gemessen wird, gibt es auch keine siedlungsnahen verkehrsbezogenen Standorte. Zudem beeinträchtigen oder verfälschen in solchen Räumen häufig vorkommende Hindernisse wie Bäume oder Gebäude Niederschlagsmessungen massiv (s. Kapitel 3.2.5 und 3.4.3). Für andere im Anwendungskatalog genannte Szenarien sind Echtzeitmessdaten relevant (vgl. Kapitel 3.1). In diesem Bereich gibt es innerhalb des RVR im Netz des DWD aktuell nur sehr wenige Stationen: acht Niederschlags-, vier Temperatur- und eine Windstation(en) liefern abrufbare Daten in Echtzeit (s. Abbildung 7).

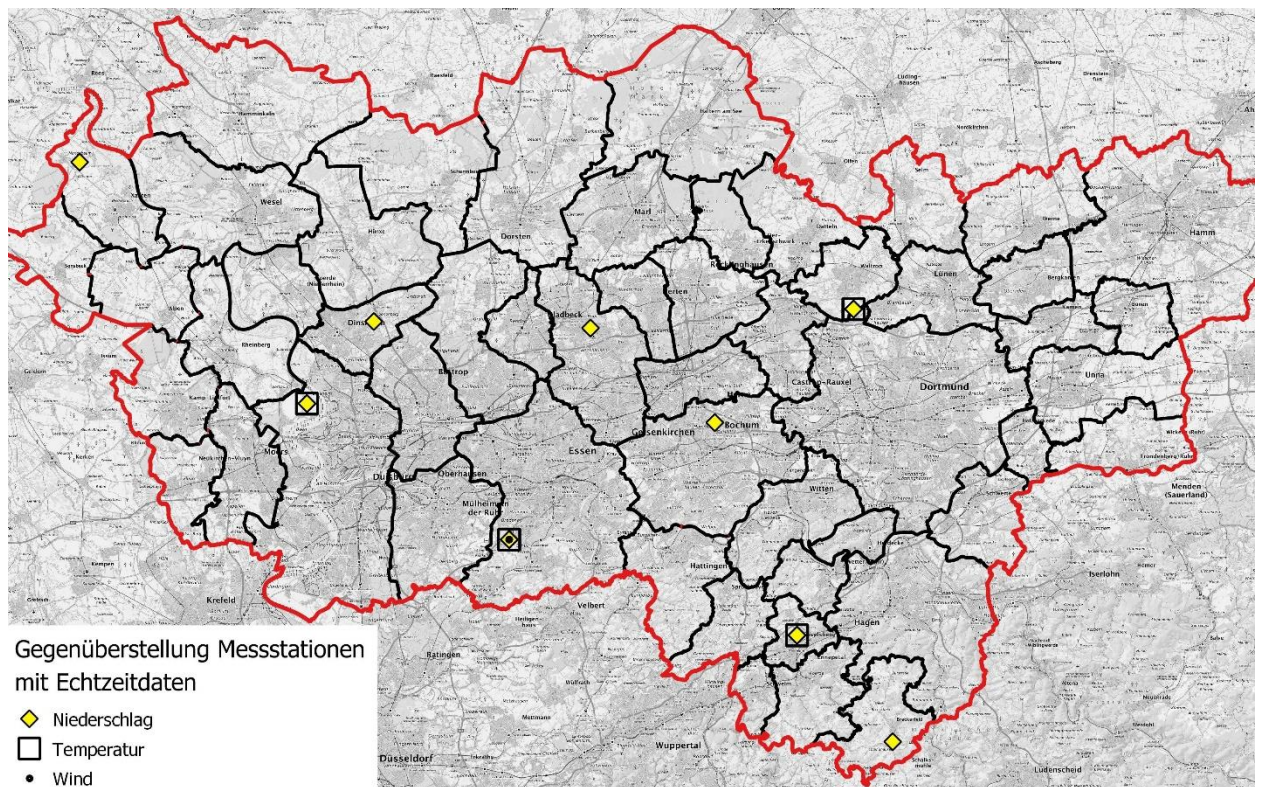


Abbildung 7: Übersicht der Messstationen mit Echtzeitdaten des DWD im RVR zu den Parametern Niederschlag, Temperatur und Wind. (Quelle: eigene Abbildung nach Angaben des DWD).

Deutlich mehr Daten in Echtzeit liefert die Website „openSenseMap.org“. Diese wurde parallel mit den in der Einleitung zum Kapitel 2 erwähnten senseBoxen an der Universität Münster entwickelt. Ziel der Gründer ist es, diese Seite zur „Wikipedia für Umweltdaten“ zu machen (openSenseLab gGmbH 2023). Auf der Website können Umweltdaten aller Art von registrierten Nutzern in Echtzeit übertragen werden und sind dann frei für alle Besucher der Website einsehbar. Die Website visualisiert dabei nicht nur Daten von senseBoxen, sondern

unterstützt auch weitere „Citizen Science“-Projekte und ist durch die Wahl der API³ mit Messwerten von fast jedem IoT⁴-Messgerät kompatibel. Die Boxen werden in verschiedenen Varianten angeboten und sind vom Nutzer individuell anpassbar. Stichproben, die für diesen Bericht erhoben wurden, zeigen dass es sich im RVR meist um Sensoren handelt, die die lufthygienischen Komponenten PM10 und PM2.5 sowie Lufttemperatur, relative Luftfeuchte und Luftdruck mit günstigen und sehr einfachen Sensoren messen. Einschränkend ist zu beachten, dass es sich bei den Messwerten, die bei Bedarf auch heruntergeladen werden können, um ungeprüfte Rohdaten handelt und oftmals eine genaue Standortangabe bzw. ein vollständiger Metadatensatz für die Sensoren fehlt (vgl. Kapitel 3.4.2).

³ API: application programming interface – Fachbegriff für eine Programmierschnittstelle, auch Anwendungsschnittstelle genannt. Eine API ist eine Schnittstelle, die es unabhängigen Anwendungen ermöglicht, miteinander zu kommunizieren und Daten auszutauschen.

⁴ IoT: Internet of Things – Sammelbegriff für Technologien einer übergeordneten, globalen Infrastruktur, die eine Vernetzung physischer und virtueller Objekte miteinander ermöglicht (z.B. ein drahtloses Netzwerk einzelner, miteinander verknüpfter Sensoren oder Klimamessstationen).

3 Grundlagen: Klimamessnetze in der Praxis

3.1 Anwendungskatalog: Auswahl an Fragestellungen und Analyseansätzen

3.1.1 Klimamonitoring und Langfristauswertungen im Stadtklimakontext

Das Ziel eines Klimamonitorings bzw. einer Klimaüberwachung ist es, Aussagen zur Änderung des Klimas an einem bestimmten Ort zu treffen. Hierfür erfolgt die Messung verschiedener Klimaparameter in regelmäßigen zeitlichen Abständen und der anschließende Vergleich mit den Messwerten ausgewählter Referenzzeitpunkten oder -zeiträumen in der Vergangenheit.

Im stadtklimatischen Kontext ist ein Klimamonitoring besonders bei Stadtentwicklungs- bzw. Umgestaltungsmaßnahmen oder sonstigen Bauvorhaben von Interesse, um beispielsweise bauliche Veränderungen in einem Raum oder Klimawandelanpassungsmaßnahmen auf deren (Aus-)Wirkung zu testen.

Die Etablierung von Straßenbäumen in einen zuvor vollständig versiegelten Verkehrsraum kann etwa die Temperaturen während hitzebelasteter, sommerlicher Strahlungswetterlagen lokal deutlich reduzieren und so zu einem günstigeren humanbioklimatischen Komfort am Tage beitragen. Üblicherweise wird bereits vor einer baulichen/landschaftlichen Maßnahme Messtechnik in den zu untersuchenden Räumen ausgebracht, um einen Vorher-Nachher-Vergleich zu ermöglichen. Die Installation einer einzelnen Klimamessstation im unmittelbaren Umfeld der Entwicklungsmaßnahme ist jedoch unzureichend, da sich auch ähnliche Wetterlagen zweier unterschiedlicher Zeiträume in Nuancen (Anströmung, Sonnenstand, Bewölkung etc.) voneinander unterscheiden werden und so etwaige Effekte nicht gänzlich der Maßnahmenwirkung zugeschrieben werden können. Empfohlen wird mindestens die Installation einer weiteren (Referenz-)Klimamessstation nahe der Umbaumaßnahme, jedoch in einem Bereich, an dem selbst keine Änderung der Flächennutzung stattfindet. Zudem sollte dieser weitere Standort dem ersten von der Besonnung im Tagesgang und der Landnutzung im unmittelbaren Umfeld nach Möglichkeit gleichen. Für den konkreten Fall der Baumpflanzungen und der Auswirkung auf den Hitzestress können nun Vergleiche beider Stationen vor und nach der Maßnahme zu

passenden Wetterlagen (z.B. Sommertage oder Heiße Tage⁵ in den Monaten Juni bis August bei geringen Windgeschwindigkeiten) durchgeführt und Aussagen zur Wirkung der Maßnahme an den konkreten Standorten getroffen werden. Ergänzend kann eine mikroskalige Modellsimulation des Untersuchungsgebietes angefertigt werden, deren idealisierte Wetterlage für verschiedene Eingangsdaten (Straßenraum mit und ohne Bäume) reproduzierbar ist und welche Ergebnisse flächenhaft ausgeben kann.

Ein flächendeckendes oder mithilfe modellgestützter Stadtklimaanalysen in die Fläche interpoliertes Stationsnetz ermöglicht neben kurzfristigem Klimamonitoring auch eine langfristige Auswertung der Klimamessdaten bei diversen Forschungsfragen, z.B. bei der Bewertung des Klimawandels im Kontext der Stadtentwicklung. Jahrzehntelange Temperaturmessungen ermöglichen beispielsweise die Aufzeichnung der Entwicklung lokaler Wärmeinseln und können die Grundlage fortlaufend aktualisierter Hitzeaktionspläne bilden. Auf diese Weise steuern langfristige Klimamessungen auch städtische und regionale Planungen. Dies gilt ebenfalls für Lufthygieneparameter, über welche etwa die mögliche Luftqualitätsverbesserung der Stadtluft durch die Etablierung von Fahrradstraßen oder durch die Einführung von „Tempo 30“-Zonen überprüft werden kann.

3.1.2 Wettervorhersage und Warnmanagement

Neben Fernerkundungsdaten wie Radar- oder Satellitenbildern kommen in der Wettervorhersage hauptsächlich Beobachtungs- bzw. Messdaten zum Einsatz (DWD 2023a). Ein flächendeckendes, engmaschiges Messnetz im RVR hätte hierbei insbesondere das Potenzial zur Verbesserung der sogenannten Kurzzeitvorhersage, die als ein Teilbereich der Wettervorhersage definiert ist. Ausgehend vom augenblicklichen Zustand wird durch diese die Weiterentwicklung des Wetters in den nächsten maximal 12 Stunden beschrieben. Auf dieser zeitlichen Skala bewegt sich auch das Warnmanagement für meteorologische Extremereignisse.

Hitzeereignisse wie der Extremsommer 2003, Stürme oder Starkregenfälle wie jene im Juli 2021 über Mitteleuropa haben oftmals verheerende Personen- und Sachschäden zur Folge. Eine Untersuchung der Anzahl von Todesfällen des Jahres 2003 und der Jahre 2009 bis 2019 in der Schweiz zeigt beispielsweise in den Hitzesommern 2003, 2015 und 2018 im Vergleich zu den anderen untersuchten Jahren deutlich sichtbare Anstiege der Mortalität in

⁵ Sommertag und Heißer Tag (Klimakentage): Ersterer ist ein Tag, an dem das Tagesmaximum der Temperatur 25 °C erreicht oder überschreitet ($T_{\max} \geq 25 \text{ °C}$), letzterer führt ein Tagesmaximum der Temperatur von mindestens 30 °C an ($T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$).

den Monaten Juli bzw. August (s. Abbildung 8, Ragetti und Rösli 2020). Ereignisse dieser Art werden zukünftig im Zuge des fortschreitenden Klimawandels global, aber auch im Gebiet des RVR, weiter zunehmen, stärker ausfallen und länger andauern (Reutter et al. 2021).

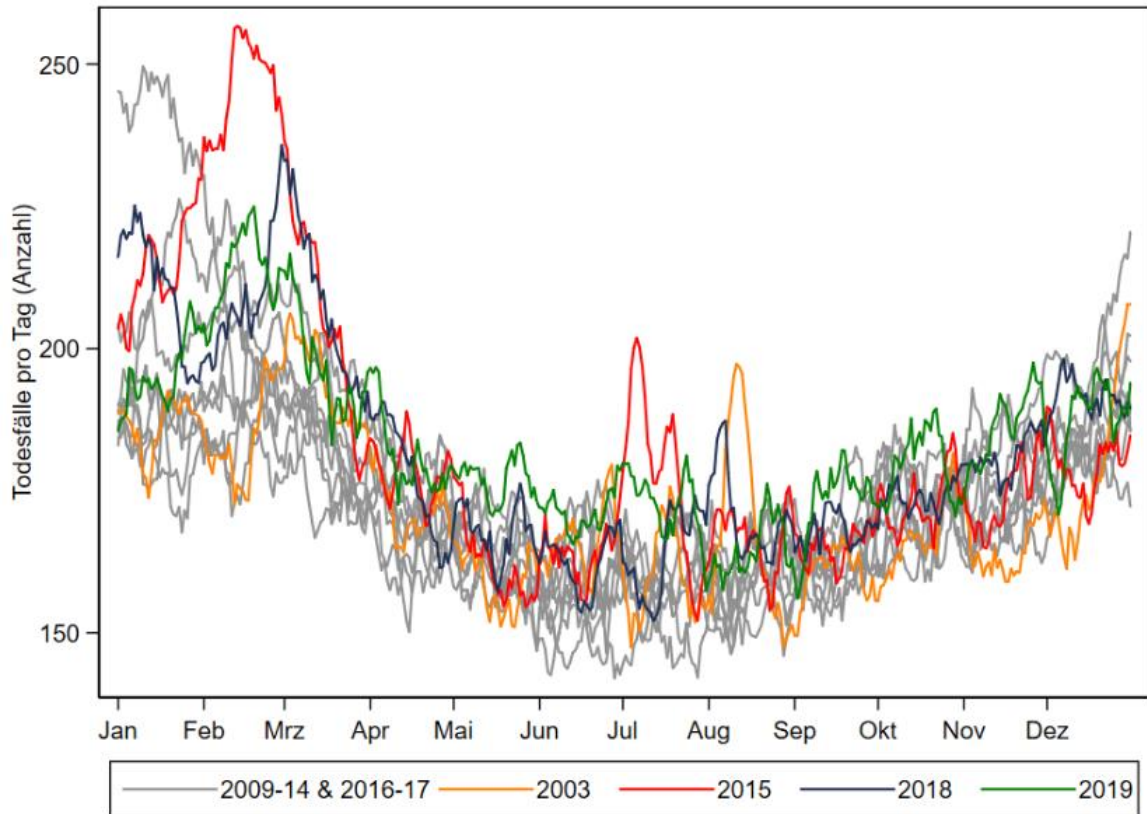


Abbildung 8: Anzahl Todesfälle pro Tag für die Jahre 2003 und 2009-2019 in der Schweiz. Die zu den betrachteten Zeiten vier wärmsten Sommer (2003, 2015, 2018 und 2019) sind farbig dargestellt (Ragetti und Rösli 2020).

Den negativen Folgen solcher Extremwetterereignisse auf Personen könnte mit einer möglichst frühzeitigen Information von BürgerInnen entgegengewirkt werden. In der Praxis erscheint eine Warnampel praktikabel, die bei definierten Grenzwertüberschreitungen an einzelnen Standorten – beispielsweise der (gefühlten) Temperatur bei einem Hitzeereignis – von „grün“ auf „gelb“ oder „rot“ springt, wobei die Farbanzeigen an entsprechende Verhaltensmaßnahmen gekoppelt sind (Treptow 2023). Hierbei ist zu beachten, dass eine solche Ausgabe von Hinweisen auf eine mögliche Hitzebelastung zulässig ist, amtliche Warnungen vor Extremereignissen jedoch nur vom DWD selbst ausgesprochen werden dürfen.

Auch abseits des menschlichen Wohlbefindens ist bei zusätzlichen Messungen der Bodenfeuchte bspw. an Stadtbäumen die Etablierung einer Gießampel möglich, die den zuständigen Bewässerungsunternehmen anzeigt, wann zwingend bewässert werden müsste. Auf diese Weise können zum einen personelle Ressourcen gespart werden, zum

anderen wird einer Über- oder Unterwässerung vorgebeugt. Entwickelt und erprobt wurde ein solches Verfahren beispielsweise im Rahmen des durch die EU mit der Maßnahme „Europäische Innovationspartnerschaft“ geförderten Projekts „NuTree“ in Hannover (NuTree 2023).

3.1.3 Innenraumklima

Die engmaschige meteorologische Vermessung oder Modellierung des Außenraums wird aktuell immer häufiger durch Innenraummessungen ergänzt (z.B. „ABC – Augsburg bleibt cool“ (ABS 2020) oder „KlimaWohL_LAB“ in Hannover (KlimaWohL 2023)). Diese Entwicklung ist im Hinblick auf die Bewertung des human-biometeorologischen Komforts zu begrüßen, da sich der Mensch in den hochindustrialisierten Ländern unserer Klimazonen durchschnittlich insgesamt zu 90 % und insbesondere nachts (► Schlafkomfort) vornehmlich in Innenräumen aller Art aufhält (VDI 2008).

Aufgrund der hohen Wärmedämmung heutzutage üblicher Wohngebäude findet die Wechselwirkung zwischen Außen- und Innenraumklima neben der solaren Einstrahlung fast ausschließlich über den Luftwechsel statt, wobei die Lufttemperatur der Außenluft die entscheidende Größe darstellt (VDI 2008). Neben der Aufnahme von Klimaparametern wie der Lufttemperatur, der relativen Feuchte oder Luftparametern wie dem CO₂-Gehalt der Raumluft ist daher eine Kombination mit Messgeräten zu empfehlen, die die Begleitumstände in Haus oder Wohnung registrieren. Hierzu zählen etwa Fenster- oder Türöffnungssensoren oder Stromverbrauchszähler an einer etwaig verbauten Lüftungsanlage zu jenen Parametern, über die der Tagesgang der Raumlüftung aufgezeichnet werden kann. In modernen „Smart Homes“ können sowohl gemessene Klimaparameter als auch die genannten Parameter der Begleitumstände zur automatisierten Steuerung des Human-biometeorologischen Komforts genutzt werden. Dies gelingt etwa, indem zu sommerlichen, mit Hitzestress assoziierten Wetterlagen bei im Vergleich zum Innenraum niedrigeren Außenraumtemperaturen eine automatische Fensteröffnung oder das Herunterlassen von Jalousien eingeleitet wird.

Unabhängig solcher hochmodernen Systeme eignen sich Klimamessdaten im Innenraum auch für die (Weiter-)Entwicklung oder Validierung von Innenraummodellen. So entwickelte etwa der DWD im Jahr 2006 im Rahmen des Projektes „Verfahren für die Berechnung der Gefühlten Temperatur in Innenräumen in Abhängigkeit von den meteorologischen Parametern im Außenbereich“ ein Modell zur Vorhersage von Wärmebelastung in Innenräumen (DWD 2023b, Pfafferott und Becker 2008) und validierte dieses mit Hilfe von

Messdaten. Ein weiteres Beispiel ist das Innenraummodell „ASMUS_Inside“ (Tils 2020), welches aktuell in Hannover im Rahmen des „KlimaWohL_LAB“-Projektes anhand einer mehrjährigen IoT-basierten Messkampagne im Außen- und Innenraum eines klimaangepassten Wohnquartieres weiterentwickelt wird (KlimaWohL 2023). Neben den Standard-Klimaparametern (s. Kapitel 3.2) kam hier auch eine Messung der Oberflächentemperatur der Nordfassade zum Einsatz, um den Wärmeeintrag von außen in die Gebäudehülle besser abschätzen zu können.

Für die Ausstattung von Innenraumesstechnik eignen sich aus Sicht der Kommunen insbesondere öffentliche Gebäude, die zusätzlich über einen hohen Anteil vulnerabler Bevölkerungsgruppen verfügen. Beispiele sind etwa Schulen, Kindergärten, Alten- und Pflegeheime oder Krankenhäuser. Darüber hinaus könnte sich jedoch zusätzlich die Partizipation privater Haushalte anbieten, denn das Bewusstsein für die gesundheitlichen Folgen von Hitzewellen stieg in den letzten Jahren weiter an. So gibt das Umweltbundesamt an, dass sich 2016 bereits die Hälfte aller Befragten in ihrem körperlichen Wohlbefinden in der Zukunft (sehr) stark beeinträchtigt sehen – vier Jahre zuvor lag dieser Anteil noch bei ca. einem Drittel (UBA 2019). Hinzu kommt der Aspekt, dass in Deutschland in Bezug auf die energetische Gebäudesanierung noch arge Rückstände zu beobachten sind. Dies gilt insbesondere für (Dach-)Geschosswohnungen, welche heutzutage noch überwiegend schlecht gedämmt sind und so über ein großes Hitzestresspotenzial für deren BewohnerInnen verfügen. Um das im Klimaschutzgesetz verankerte und auch für den Gebäudebestand geltende Ziel der Klimaneutralität bis 2045 zu erreichen, müsste die heutige energetische Sanierungsrate von im Mittel 1 % pro Jahr mehr als verdoppelt werden (UBA 2023a).

3.2 (Klima-) Parameter und empfohlene Sensorik

3.2.1 Temperaturgrößen

Wenn von der Aufzeichnung der zentralen Messgröße Temperatur gesprochen wird, ist in erster Linie die Lufttemperatur gemeint. Diese ist für eine Vielzahl meteorologischer und klimatischer Fragestellungen sowie den Antrieb von meteorologischen Modellen (s. Kapitel 3.1) relevant. Die Messung der Lufttemperatur erfolgt in der Regel durch einen Messfühler, der den Einfluss von Niederschlag, Strahlung und Wind auf die Messung auf ein Minimum reduziert und eine gleichmäßige, natürliche Belüftung sicherstellt. Standardmäßig werden Widerstandsmessfühler wie der Pt100-Sensor verwendet, die eine temperaturinduzierte

Widerstandsänderung (hier von Platin) aufzeichnen. In professionellen Wetterstationen sind die Gehäuse zusätzlich mit einem elektrischen Lüfter ausgestattet.

Neben der Temperatur der Luft sind noch weitere Temperaturgrößen von Bedeutung, beispielsweise die Feuchttemperatur und die Globe-Temperatur.

Für Fragestellungen, die sich auf die vom Menschen wahrgenommene bzw. gefühlte Temperatur beziehen, müssen neben der Lufttemperatur auch die Luftfeuchtigkeit (Kapitel 3.2.2), die Strahlung (Kapitel 3.2.3) und der Wind (Kapitel 3.2.4) berücksichtigt werden, da diese die empfundene Temperatur maßgeblich beeinflussen. Unter Zuhilfenahme der genannten Parameter können verschiedene Hitzeindizes wie die „Physiologisch äquivalente Temperatur“ (PET), der „universelle thermische Klimaindex“ (UTCI) oder die „Wet Bulb Globe Temperature“ (WBGT) berechnet werden. Einen Vergleich dieser und weiterer Hitzeindizes liefert beispielsweise Blazejczyk et al. (2012). Die in den USA entwickelte WBGT ist die Summe von verschieden gewichteter Lufttemperatur (hier „Dry Bulb“-Temperatur), Feuchttemperatur (hier „Wet Bulb“-Temperatur) und der Temperatur innerhalb einer schwarzen Kugel, einer Art Strahlungstemperatur, auch Globe-Temperatur genannt (Budd 2008). Da eine permanente Messung der Feuchttemperatur durch ein stets feuchtzuhaltendes Baumwollgewebe am Sensor sehr aufwendig ist, empfiehlt sich stattdessen die berechnete Approximation aus Lufttemperatur und relativer Feuchte nach Stull (2011). Auch für die Globe-Temperatur gibt es eine Berechnungsmethode (z.B. Dimiceli et al. 2011), sie ist jedoch auch deutlich einfacher direkt als gemessene Größe in Klimastationen zu integrieren. Die Messung erfolgt dazu mit einem gewöhnlichen Temperaturfühler (s.o.) in einer schwarzen Kugel mit definierten Abmessungen, die abhängig von der Einstrahlung eine höhere Temperatur als die Lufttemperatur annimmt. Neben der Verwendung der „Schwarze-Kugel“-Temperatur zur Berechnung der WBGT gibt es auch erste Untersuchungen, die die Globe-Temperatur als direktes Äquivalent der PET gegenüberstellen (Alfonso Solar et al. 2019). Die PET ist heutzutage eine häufige Ausgabegröße von Modellsimulationen, weshalb durch diesen Ansatz eine einfache Vergleichsmöglichkeit des Hitzestresses in Natur und Modell geschaffen wird.

Für den Antrieb einer Modellrechnung kann neben der eingangs erwähnten Lufttemperatur auch die Oberflächentemperatur verwendet werden. Diese stellt diejenige Temperatur dar, die an der Oberfläche eines Körpers in Bezug auf dessen Wärmestrahlung herrscht. Für Punktmessungen eignen sich Infrarot-Thermometer oder mechanisch angelegte Tasttemperaturfühler, für flächenhafte Auswertungen werden Wärmebildkameras

verwendet, die die Wärmestrahlung eines Objektes in ein Infrarotbild umwandeln. Je nach Emissionsgrad eines Körpers erfolgt hierbei die (zumeist) geräteinterne Umrechnung in einen Temperaturwert.

3.2.2 Luftfeuchtigkeit

Die Messung der Luftfeuchtigkeit gibt Aufschluss über den Anteil des in der Luft enthaltenen Wasserdampfs und ist relevant für die Berechnung des Human-Bioklimas – bei Schwüle herrscht hohe Luftfeuchtigkeit bei gleichzeitig hoher Lufttemperatur. Weiterhin wird die Luftfeuchte dazu benötigt, um den Taupunkt zu berechnen und somit Nebelbildung und Glätte vorherzusagen. Die Luftfeuchte kann auch als qualitativer Indikator für Niederschlag verwendet werden, da bei Regen die Luft mit Wasserdampf gesättigt ist und die relative Luftfeuchtigkeit ihren Maximalwert von 100 % erreicht.

Da die relative Luftfeuchtigkeit eine stark temperaturabhängige Größe ist, eignet sich häufig die von der Temperatur entkoppelte Größe der spezifischen Feuchte besser um Aussagen über herantransportierte Feuchtigkeit (Wasserdampfmenge in g pro 1 kg feuchter Luft) zu treffen.

Die starke Kopplung der Größen Temperatur und Feuchte wird auch bei der Betrachtung von Feuchtemessgeräten ersichtlich. Die heutzutage seltener gebräuchlichen Psychrometer messen die Trocken- und Feuchttemperatur, über welche sich mithilfe der Psychrometerformel und daraus abgeleiteter Psychrometertabellen die Luftfeuchte bestimmen lässt. Durch die gut erreichbare Messgenauigkeit werden Geräte dieser Art noch immer als valide Referenzgeräte genutzt. Elektrische Feuchtemessgeräte, die sich durch ihre kleineren Abmessungen und die einfachere Handhabung viel eher zur Integration in moderne Messsysteme eignen, liegen ebenfalls häufig als Kombisensor gemeinsam mit der Temperatur vor. Der Messfühler registriert hierbei i.d.R. die Änderung der elektrischen Kapazität, die proportional zur Luftfeuchteänderung geschieht und damit Rückschlüsse auf diese zulässt.

3.2.3 Strahlung und Helligkeit

Die punktuelle Messung der kurzwelligen solaren (Ein-)Strahlung und der langwelligen terrestrischen⁶ (Aus-)Strahlung innerhalb eines Messnetzes kann nützlich sein, um repräsentative Strahlungsbilanzen in definierten Räumen abzuleiten. Üblicherweise werden solche Strahlungsreferenzen in der Höhe auf hohen Dächern oder bodennah im ruralen

⁶ Langwellige Gegenstrahlung der Atmosphäre und Ausstrahlung der Erde

Raum installiert, um ganztägig störungsfrei (z.B. fernab verschattender Elemente) aufzeichnen zu können (s. Kapitel 3.4.3). Zur Messung der Globalstrahlung⁷ werden am häufigsten Pyranometer eingesetzt. Zwischen aktiven Lötstellen an Thermoelementen und passiven Lötstellen innerhalb des Messgerätes entstehen durch die am Gerät ankommende Strahlung Temperaturdifferenzen, die Thermospannungen erzeugen und wiederum ein Maß für die Bestrahlungsstärke darstellen (DWD 2023c). Die terrestrische Ausstrahlung wird hingegen mittels Pyrgeometern gemessen, die das entsprechende Gegenstück zum Pyranometer darstellen.

Strahlungsmessungen dieser Art sind weniger beim Themenkomplex „Stadtklima und Hitze“ von Relevanz, sondern werden vielmehr in der Solarindustrie und Forschung eingesetzt.

Für flächendeckende Stadtklimastationen reichen häufig günstige und einfache Helligkeits- bzw. Lichtsensoren aus, die die Beleuchtungsstärke in der Einheit Lux angeben. Die Helligkeit wird hierbei als Maß für die Besonnung oder Verschattung eines Standorts verwendet und ist relevant für die Erfassung und Interpretation weiterer gemessener Klimaparameter an den Stationen, wie der Luft- und Globe-Temperatur. Da die Wetterschutzgehäuse den Einfluss von Strahlung auf die Temperaturmessung zwar deutlich senken, aber nicht vollständig beseitigen, liefert die Messung der Helligkeit am jeweiligen Standort der Messung Hinweise zu Erwärmung oder Abkühlung des Sensors, der nicht unmittelbar auf eine Veränderung der Lufttemperatur der Umgebungsluft zurückzuführen ist. Dies ist insbesondere der Fall, wenn Wetterschutzgehäuse nicht aktiv belüftet werden und somit ein höherer Einfluss von Einstrahlung auf die Messung besteht.

3.2.4 Windgeschwindigkeit und -richtung

Zu den oftmals mit lufthygienischer Belastung und Hitzestress einhergehenden, sogenannten autochthonen⁸ Wetterlagen im Sommer entstehen Windsysteme im urbanen Raum nahezu ausschließlich als eine Folge von thermischen Ausgleichsprozessen zwischen überwärmter Stadt und kühlem Umland. Diese auf den Siedlungsraum zulaufenden thermischen Winde werden auch Flurwinde genannt. Bei sogenannten allochthonen⁹ Wetterlagen überprägen hingegen die großräumigen Luftströmungen die lokalen Windsysteme, wodurch diese nahezu verschwinden und eine gute städtische Durchlüftung stattfindet.

⁷ Summe der Direktstrahlung der Sonne und der diffusen, an Hindernissen wie Aerosolen oder Wassertröpfchen abgelenkten solaren Strahlung.

⁸ „Eigenbürtige“, windschwache (bewölkungsarme) Strahlungswetterlage unter Hochdruckeinfluss

⁹ „Fremdbürtige“, durch großräumige Luftströmungen bestimmte Wetterlage

Windgeschwindigkeit und -richtung sind allgemein sehr lokal geprägte Größen und können sich auf kurzer Entfernung signifikant ändern. Neben der vor Ort vorherrschenden Wetterlage nehmen auch das örtliche Relief und die Bebauung Einfluss auf die Strömung. Während bei größerem Gefälle (etwa an Berghängen oder Halden) insbesondere nachts Hangabwinde festzustellen sind, können eng bebaute Stellen lokale Beschleunigungseffekte aufweisen, die stellenweise zu einem human-bioklimatischen Diskomfort führen können. Die Messung des Windes im urbanen Raum hat aufgrund dieser vielfältigen Einflüsse in der Regel eine sehr begrenzte räumliche Repräsentativität. Da die Windgeschwindigkeit jedoch einen maßgeblichen Einfluss auf das Wohlbefinden und die gefühlte Temperatur hat (s. Kapitel 3.2.4), sind durchdachte Messungen von Windgeschwindigkeit und -richtung im Stadtgebiet dennoch wichtig. Hinweise zur Standortwahl für Windmessungen sind in Kapitel 3.4.3 aufgetragen.

Die Messung erfolgt zum einen mit mechanischen Messgeräten wie dem Schalensternanemometer (auch Schalenkreuzanemometer genannt), bei der die Rotation des Schalensterns in die Windgeschwindigkeit umgerechnet wird. In diesem Fall ist zur Bestimmung der Windrichtung zusätzlich ein Windrichtungsgeber zu verwenden, dessen Fahne in die der Windrichtung gegenüberliegenden Richtung zeigt. Beide mechanische Sensoren für Windrichtung und Geschwindigkeit sind ebenfalls als Kombisensor erhältlich. Zum anderen kommen zur Windmessung die deutlich kostenintensiveren Ultraschallanemometer zum Einsatz, die jedoch über eine vielfach höhere Messgenauigkeit verfügen. Ultraschallanemometer basieren auf einem akustischen Messprinzip und sind daher ideal zur Registrierung von sich zügig ändernden Windgrößen wie Böen- und Spitzenwerten geeignet. Weiterhin sind die im Stadtbereich häufig auftretenden, sehr geringen Windgeschwindigkeiten unter 1 m/s mit Ultraschallanemometern besser zu vermessen als mit einem Schalensternanemometer. Bei letzterem braucht es eine gewisse Anlaufgeschwindigkeit, die je nach Qualität des verwendeten Anemometers üblicherweise 0,2 bis 1 m/s beträgt, um das Schalenkreuz erst in Bewegung zu setzen. Geringere Windgeschwindigkeiten als diese Anlaufgeschwindigkeit sind folglich nicht messbar. Zusätzlich sind Schalenkreuzanemometer wartungsintensiver, da die mechanische Drehbewegung zum früheren Verschleiß des Gerätes führt und Verschmutzungen, etwa durch Spinnennetze, zu fehlerhaften Windmessungen führen können. Eine weitere Problematik, die beide Gerätearten vereint, ist die Energieversorgung. Die meisten verfügbaren Sensoren sowie smarte „Low-Cost“-Windsensoren benötigen häufig noch eine externe Stromversorgung wie z.B. ein kleines Solarmodul. Diese könnte auch andere

Messgeräte an der Klimastation mitversorgen und den allgemeinen Wartungsaufwand der Station zum Tausch von Batterien reduzieren.

3.2.5 Niederschlag

Niederschlagsmessungen gewinnen heute und zukünftig immer weiter an Bedeutung. Insbesondere für die Planung (z.B. Verkehrswege, Bewässerungsanlagen, Hochwasser-Rückhaltebecken etc.), aber auch für wissenschaftliche oder meteorologische Fragestellungen wie die Auswertung der langjährigen Niederschlagsentwicklung oder kurzfristige Vorhersagen (z.B. von Starkregenereignissen) sind flächendeckende Niederschlagsmessungen unabdingbar.

Die Messung von Niederschlag erfolgt in der Regel mit dem Ziel, ein Niederschlagsereignis zu erfassen sowie die Menge des gefallenen Niederschlags zu registrieren. Optional kann durch manche Geräte auch die Niederschlagsart bestimmt und aufgezeichnet werden.

Die Spannweite verschiedener Niederschlagsmessgeräte mit unterschiedlichen Messprioritäten ist groß. Die einfachste Messung zur Erkennung von Niederschlägen erfolgt mit einem sogenannten Niederschlagswächter. Hierbei fällt Niederschlag durch eine Infrarot-Lichtschanke, wodurch Beginn und Ende von Niederschlagsereignissen, aber keine sonstige Information aufgezeichnet werden kann.

Zusätzliche Informationen zur Niederschlagssumme sind beispielsweise mit einer Niederschlagskippswaage zu erhalten. Die Messung erfolgt hierbei mit einem Trichter von definiertem Durchmesser und einer Kippwaage, die bei einer bestimmten Menge Niederschlag in der Auffangschale ausschlägt. Durch Zählung der Impulse ist dann die Bestimmung der Niederschlagsmenge möglich. Aufgrund ihres hohen Wartungsaufwands ungeeignet sind die in der Vergangenheit oftmals an bemannten Wetterstationen verwendeten Niederschlagsmesser nach Hellmann. Bei diesen wird der aufgefangene Niederschlag nach Ende des Niederschlagsereignisses manuell mit einem Messzylinder bestimmt.

Die wohl umfangreichste Niederschlagscharakterisierung wird mit Laserniederschlagsmonitoren (Distrometern) erreicht, die mithilfe eines laserbasierten Messprinzips sowohl die Partikelgröße und daraus folgend die Art des Niederschlags als auch die Niederschlagsintensität (Niederschlagssumme pro Zeiteinheit) messen können. Bei Temperaturen unterhalb des Gefrierpunkts ist es notwendig die Niederschlagsmessgeräte zu beheizen.

Heutzutage sind bereits einige IoT-fähige Niederschlagsmessgeräte auf dem Markt verfügbar (zumeist mit Kippwaagenprinzip), die zumindest Niederschlagsereignisse und -intensitäten detektieren können. Insbesondere im Stadtbild sind Niederschlagsstationen aufgrund der unebenen, ggf. zu Messfehlern führenden Rauigkeitselemente schwieriger zu integrieren (s. Kapitel 3.4.3). Daher wird empfohlen, auch in Anbetracht der hohen Anschaffungskosten solcher Messgeräte auf eine flächendeckende Ausstattung des Stadtgebiets mit Niederschlagssensorik zu verzichten und Klimamessstationen nur vereinzelt und bedarfsgerecht um Niederschlagsmessungen zu erweitern.

3.2.6 Luftdruck

Die Größe „Luftdruck“ ist als das Gewicht der Luftsäule zwischen dem Erdboden und dem Oberrand der Atmosphäre und der daraus resultierenden Kraft pro Flächeneinheit definiert und nimmt vom Standardatmosphärendruck von 1013,25 hPa am Boden mit der Höhe zügig ab.

Lokale Klimamessstationen im urbanen Raum erfordern üblicherweise keinerlei zusätzliche Drucksensorik, sofern bereits Druckaufzeichnungen synoptischer Stationen in der Messumgebung bestehen (Oke 2004). Häufig sind Messgeräte zur Luftdruckbestimmung jedoch in erhältlichen (auch drahtlos übertragenden) Stationsbausätzen inkludiert. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass sich das Druckniveau in der Nähe von Gebäuden infolge von Böen schlagartig verändern kann. Solche Abweichungen können durch die Installation eines statischen Drucksensors kompensiert werden, welcher die dynamische Druckwirkung herausfiltert. Statische Druckköpfe mindern diesen Effekt auch bei der Anbringung von Drucksensorik im klimatisierten Innenraum, der ansonsten zum Außenraum deutlich abweichende Werte anzeigen würde.

3.2.7 Lufthygienische Messungen

Städte sind Zentren menschlicher Aktivitäten, durch die täglich große Schadstoffmengen in die Atmosphäre emittiert werden. Gleichzeitig fördert die raumstrukturelle Form der Verdichtung und die damit einhergehende Charakteristik der städtischen Strömungsverhältnisse eine Anreicherung dieser Schadstoffe im Siedlungsraum. Da die Luftqualität und die klimatischen Sonderbedingungen der Städte häufig eng miteinander in Zusammenhang stehen, und sowohl klimatische als auch lufthygienische Aspekte durch den Menschen beeinflussbar sind, empfiehlt es sich, bei der planungsrelevanten Analyse des Stadtklimas immer auch die Lufthygiene zu berücksichtigen.

Ein überwiegender Anteil der Luftschadstoffe im städtischen Umfeld wird durch den Straßenverkehr freigesetzt. Anders als bei industriellen Quellen und Kleinf Feuerungsanlagen werden die straßenverkehrsbedingten Emissionen in geringen Höhen und in direkter Nähe zum Schutzgut (menschliche Gesundheit) emittiert. Als Folge davon treten insbesondere an Straßen mit großen Verkehrsmengen und eingeschränkten Strömungs- und Durchlüftungsbedingungen hohe Immissionsbelastungen mit Grenzwertüberschreitungen auf. Diese Zusammenhänge betonen die besondere Relevanz der Messung von Luftschadstoffen im Nahbereich von vielbefahrenen Straßen. Stationen im städtischen und ländlichen Hintergrund dienen der Bestimmung von Vergleichswerten, der durchschnittlichen Exposition der Bevölkerung und der Beurteilung von weiträumig herantransportierten Luftmassen.

Die messtechnische Bestimmung von Luftschadstoffkonzentrationen nimmt im Stadtklimakontext eine Sonderstellung ein: Die Luftqualität wird durch zahlreiche, in Gesetzen und Verordnungen festgelegten Grenz- oder Richtwerte bestimmt. Daher wird sie vom Umweltbundesamt und von den zuständigen Behörden der Bundesländer in umfangreichen Messnetzen mit einheitlichen Messmethoden und Qualitätskriterien eingehend überwacht. In Nordrhein-Westfalen geschieht dies beispielsweise über das vom LANUV betriebene Luftqualitäts-Überwachungssystem LUQS. Zu den wichtigsten und am häufigsten gemessenen Luftschadstoffkomponenten gehören Stickstoffdioxid (NO_2), Ozon (O_3), Schwefeldioxid (SO_2) sowie die Feinstaubfraktionen PM_{10} und $\text{PM}_{2,5}$.

Die zur Überwachung der Luftqualität verwendenden Messverfahren sind europaweit gesetzlich vorgeschrieben. Kommt ein anderes Verfahren als das Referenzverfahren zum Einsatz, so muss eine Gleichwertigkeit mit dem Referenzverfahren nachgewiesen werden. Die geltenden Referenzmethoden für die Messung von Luftverunreinigungen und für die Kalibrierung von Messeinrichtungen sind in einschlägigen DIN-Normen und VDI-Richtlinien beschrieben, z.B. in der DIN EN 14211 (2012) für NO_2 , oder in der DIN EN 12341 (2014) für PM_{10} und $\text{PM}_{2,5}$. Die Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im Verein Deutscher Ingenieure (VDI) betreut und koordiniert diese Richtliniensammlung. Als Grundlage zur groß- und kleinräumigen Konfiguration des Gesamtmessnetzes und der Positionierung der einzelnen Messgeräte dient die 39. BImSchV (2010).

Die Messung der Außenluftkonzentration von Schadstoffen kann mit kontinuierlich arbeitenden, in Messstationen eingebauten Messgeräten und über diskontinuierliche (ortsfeste oder mobile) Messverfahren erfolgen.

Um Proben für die verschiedenen Analysatoren bereitzustellen, wird bei kontinuierlichen Messungen die Außenluft in einer bestimmten Höhe (s. Kapitel 3.4.3) angesaugt und durch Probenahmeleitungen in die Messstation geführt. Solche Luftmessstationen sind in der Regel als begehbare thermostatisierte Laborräume ausgelegt, ihre Messergebnisse werden direkt zur Auswertung weitergeleitet. Aufgrund der hohen Anschaffungs- und Wartungskosten sind die hier beschriebenen Geräte der Referenzklasse in der Regel uninteressant und unwirtschaftlich für die Nutzung außerhalb von staatlichen Messnetzen (UBA 2023b). Da an den Stationen in der Regel auch meteorologische Parameter erfasst werden, bietet sich allerdings eine vollständige Integration der Daten aus kontinuierlichen Messungen in Klimamessnetze an.

Diskontinuierliche Messeinrichtungen sind im Allgemeinen variabler als Geräte kontinuierlicher Messungen. Dies betrifft neben den Anschaffungskosten oft auch die Größe, den Betrieb und die Wartung der Sensoren. Je nach Schadstoff erfolgt die Probenahme mit unterschiedlicher Frequenz und Dauer. Häufig kommen Filter oder Sorptionsmittel zum Einsatz, die später im Labor analytisch ausgewertet werden.

Neben Passivsammlern spielen in jüngster Zeit die sogenannten Luftqualitätssensoren (LQS) eine größer werdende Rolle, die als LQS-Systeme (also in Verbindung mit der zugehörigen Technik-Peripherie) für weniger als 10% der Kosten eines Referenzmessgerätes erworben werden können (s. UBA 2023b).

Passivsammler verfügen über keinerlei aktive Probenahmeeinrichtung, die Zufuhr der zu messenden Komponente erfolgt rein passiv über den Massentransport durch Diffusion. Sie sind häufig noch einmal deutlich kostengünstiger als LQS, benötigen keinerlei Stromversorgung und sind beispielsweise einfach an einem Laternenmast montierbar. Sie werden daher häufig zur ergänzenden Überwachung der NO₂-Konzentration eingesetzt. Die gute Übereinstimmung verschiedener NO₂-Passivsammler mit dem Referenzverfahren wurde mehrfach nachgewiesen (s. z.B. LANUV 2021). In Parallelmessung zu einer kontinuierlich arbeitenden Messstation kann eine zusätzliche Kalibrierung erfolgen. Die Bestimmung der Konzentration von NO₂ mittels Passivsammlern wird in der DIN EN 16339 (2013) beschrieben.

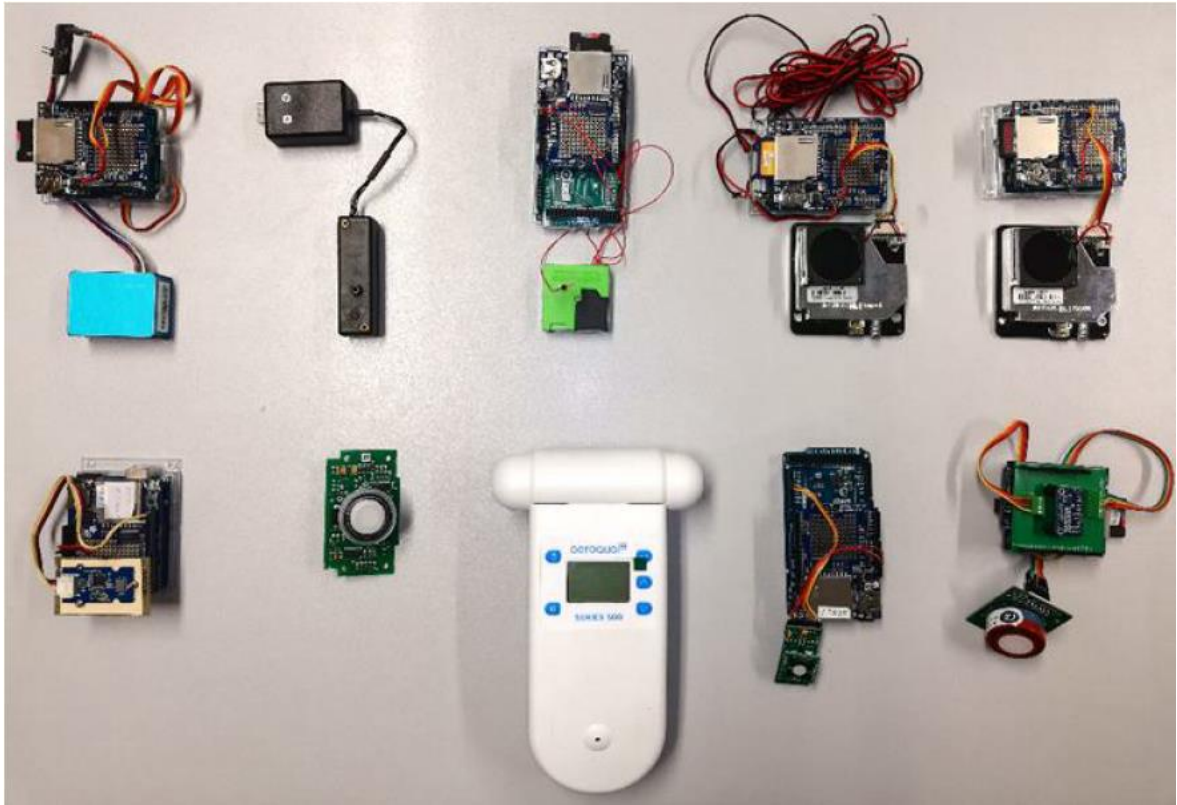


Abbildung 9: Von links nach rechts, obere Reihe (*Feinstaubsensoren*): PMS 5003 (Plantower), OPC-R1 (Alphasense), SPS30 (Sensirion), SDS011 (Nova Fitness), SDS198 (Nova Fitness); untere Reihe (*NO₂-Sensoren*): MICS-6814 (SGX Sensortech), NO₂/C-1 (Membrapor), Series 500 SH ENW1 (Aeroqual), DGS-NO₂ 968-043 (SPEC Sensors) und B43F (Alphasense) (Quelle: UBA 2023b)

3.3 Sensorkalibrierung

Jedes Messgerät unterliegt einer eigenen, systematischen Messabweichung vom „wahren Wert“ einer physikalischen Größe. Zwar sind üblicherweise Messgenauigkeiten für die jeweiligen Messgeräte ausgegeben – die Gerätefehler können sich jedoch je nach Messgerät in verschiedenen Bereichen der angegebenen Toleranz, in Einzelfällen auch außerhalb dieser, eingliedern. Um sicherstellen zu können, dass gemessene Unterschiede tatsächlich auf Änderungen im Umfeld der Messungen zurückzuführen sind (z.B. Wetterlage, Tag-Nacht-Zyklus, bauliche Änderungen im Umfeld etc.) und nicht systematisch vom Gerät verursacht werden, empfiehlt sich vor Ausbringung der Sensorik sowie in regelmäßigen zeitlichen Abschnitten eine (Re-)Kalibrierung der eingesetzten Sensoren. Dies gilt insbesondere, falls die verwendete Messsensorik nicht ab Werk kalibriert wurde. „High-End“-Messgeräte¹⁰ sind häufig mit einer bereits vom Hersteller durchgeführten Kalibrierung

¹⁰ „High-End“-Messgeräte legen anders als „Low-Cost“-Geräte den Schwerpunkt auf eine hohe Messgenauigkeit durch Sensorik und Wetterschutzgehäuse von gesteigerter Qualität bei einem zumeist höherem Anschaffungspreis.

verfügbar, wobei den Geräten dann ein sog. Kalibrierschein beiliegt. In diesem Fall kann eine eigenständige Erstkalibrierung als optional angesehen werden. Auf „Low-Cost“-Sensorik trifft dies jedoch in den meisten Fällen nicht zu, weshalb hier zu einer selbst durchgeführten Kalibrierung oder zur Beauftragung eines Prüflabors zu raten ist. So lässt beispielsweise auch der DWD seine Messinstrumente in regelmäßigen Abständen an den Standorten Hamburg-Sasel und Oberschleißheim in nach DIN EN ISO/IEC 17025 (Zimmermann und Steinhorst 2019) akkreditierten Kalibrierlaboren kalibrieren (DWD 2022).

Unter dem Begriff der Kalibrierung ist die Gegenüberstellung der Messwerte eines Testsensors mit jenen eines kalibrierten Referenzsensors unter definierten Umgebungsbedingungen wie nahezu konstanter Luftfeuchte und ohne relevante Luftbewegung zu verstehen. Die hierbei aufgenommenen Messwerte des Testsensors lassen systematische Abweichungen des Testsensors sichtbar werden. Nachfolgend wird eine mathematische Abhängigkeit vom Test- zum Referenzsensor gesucht, wodurch die Messwerte des Testsensors denen der Referenz bestmöglich angenähert werden können. So erhält jeder einzelne Sensor seine eigene Korrekturgleichung, anhand derer die gemessenen Werte direkt in korrigierte Werte der betrachteten Größe überführt werden können oder mit deren Hilfe die Korrektur der erhobenen Messwerte zumindest im Nachgang ermöglicht wird.

Jede physikalische Größe verfügt über eigene Methoden der Kalibrierung. Die Kalibrierung von Temperatursensoren wird üblicherweise in Kalibrierbädern oder in Klimakammern mit veränderlicher Wasser- bzw. Lufttemperatur durchgeführt. Abbildung 10 zeigt ein Beispiel eines Temperaturprüfschranks, der zur Kalibrierung von Temperaturmessgeräten im Rahmen des Smart-City-Projekts in Hannover verwendet wurde. Ähnlich funktioniert die Kalibrierung von Feuchtemessgeräten, die in Feuchtegeneratoren getestet werden. Für die Kalibrierung von Windgrößen werden hingegen Windkanäle verwendet, Druckmessungen können mit Druckkalibratoren, Feinmessmanometern oder Prozesskalibratoren durchgeführt werden. Die Kalibrierung der Strahlung geht auf die World Radiometric Reference (WRR) als Messstandard zurück, die ursprünglich aus dem Mittelwert der Messungen einer Gruppe von 15 Absolut-Radiometern bestimmt wurde und seit 1981 offiziell von der WMO eingesetzt ist. Ein Regionales Strahlungszentrum (RRC) der WMO ist das RRC in Lindenberg. Hier werden beispielsweise die nationalen Kalibrierungen im Auftrag des DWD sowohl im Labor als auch unter freiem Himmel durchgeführt (DWD 2023d).



Abbildung 10: Temperaturprüfschrank des Instituts für Werkstoffkunde (IW) der Leibniz Universität Hannover (LUH) mit LoRaWAN-fähigen Dragino-Testsensoren, die im Gehäuse (obere Schiene) und außerhalb des Gehäuses (untere Schiene) messen. Die beiden geeichten Pt100-Referenzsensoren sind zwischen diesen beiden Testgruppen montiert.

3.4 Hilfestellung für die Standortauswahl

Die Inhalte dieses Kapitels beziehen sich größtenteils auf die von der WMO für städtische Stationsstandorte ausformulierten Hinweise zur Gewinnung repräsentativer meteorologischer Beobachtungsdaten (Oke 2004), die durch eigene und durch InterviewpartnerInnen der Leitfadeninterviews geschilderte Erfahrungswerte ergänzt wurden.

3.4.1 Allgemeine Hinweise zum Vorgang der Standortauswahl

Zu Beginn der Standortplanung ist es essenziell, den Zweck der Klimastationen klar festzulegen (s. z.B. Kapitel 3.1). Hierbei ist insbesondere die räumliche Skala zu beachten, bei der entschieden werden muss, ob eine einzelne Station mesoskalig für ein gesamtes Quartier oder bestimmte Klimatope¹¹ repräsentativ sein sollte (z.B. zu Vergleichszwecken untereinander) oder das Hauptaugenmerk eher darauf liegt, die mikroskaligen Charakteristika eines Standorts herauszuarbeiten (z.B. Filtern von lokalen Hotspots, Monitoring von Stadtentwicklungsmaßnahmen etc.).

¹¹ Fläche mit einheitlichem geländeklimatischen Eigenschaften (Begriff aus der Landschaftsökologie)

Bei der mesoskaligen Betrachtungsweise kann vorab die Einteilung in Local Climate Zones¹² (oder auch in Urban Climate Zones¹³ oder andere gebräuchliche Landnutzungsklassifizierungen) oder die Verwendung von Klimatopen nützlich sein, um nach Arealen verschiedener Beschaffenheit zu filtern und deren Auswirkungen auf die zu untersuchenden Klimaparameter abschätzen zu können. Auch die Zuhilfenahme von Stadtklimaanalysen oder vergleichbarer modellbasierter und (je nach Anwendungsfall der Messung) räumlich angemessen aufgelöster Untersuchungen kann die Verteilung für verschiedene Klimaparameter wie Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit und -richtung, Niederschlag oder Hitzeindizes anzeigen. Sollten ausreichend zeitliche und finanzielle Ressourcen zur Verfügung stehen, können bei den zu vermessenen Parametern Lufttemperatur und Feuchte darüber hinaus mehrfache Profilmessgänge oder -fahrten durchgeführt werden, um Bereiche interessanter Hitze- oder Feuchtigkeitsanomalien zu erkennen und in die Standortauswahl einzubeziehen.

Beim mesoskaligen Ansatz mit der Betrachtung von LCZs oder Klimatopen steht die Aufzeichnung eines einer bestimmten Stadtstruktur zugeordneten Lokalklimas im Mittelpunkt. Daher sollte bei der Standortwahl darauf geachtet werden, fremde mikroklimatische Einflüsse oder andere lokale Klimaphänomene zu vermeiden. Diese zumeist topographisch bedingten Phänomene sind beispielsweise der Kaltluftabfluss durch Täler und Hänge in das Stadtgebiet, die Beschleunigung oder Abschirmung von Winden durch Hügel und Steilhänge, Nebel in Flusstälern oder in der Nähe von Gewässern oder geographisch gebundene Wolkenmuster. Sollte das Hauptanliegen jedoch die Herausarbeitung mikroskaliger Charakteristika sein, könnten solche Effekte gerade von Interesse sein, etwa bei der Abkühlung einer übermäßig heißen Stadt durch lokale Seewindsysteme oder allgemein beim Monitoring von Stadtentwicklungs- oder Klimaanpassungsmaßnahmen.

Sind das Anliegen und der ungefähre Bereich der geplanten Messung abschließend festgelegt, empfiehlt sich die Sichtung von (Stadt-)Karten, Orthofotos/Satellitenbilder und Fotografien, um die Zahl etwaiger Stationsstandorte weiter einzugrenzen. Eigene Fotos können im Rahmen einer ausdrücklich empfohlenen Ortsbegehung angefertigt werden,

¹² LCZ: Local Climate Zones (Lokale Klimazonen) bilden ein mittlerweile weitverbreitetes, systematisches Klassifikationsschema von 17 Standardklassen, das für die räumliche Kategorisierung von Oberflächentypen, die das lokale Klima unterschiedlich beeinflussen, verwendet wird (Steward und Oke 2012).

¹³ UCZ: Urban Climate Zones (Stadtklimazonen) sind eine siebenstufige Kategorisierung von Stadtstrukturtypen und deren Einfluss auf das Lokalklima, mit dem Fokus auf Rauigkeit, (ebenerdiger, impermeable) Überbauung und dem Verhältnis der mittleren Strukturhöhe zum Abstand der Einzelhindernisse voneinander (Oke, 2004).

zusätzlich bieten Dienste wie „mapillary“¹⁴ oder „Google Street View“¹⁵ ebenfalls die Möglichkeit, sich einen Überblick entlang von Straßen und Wegen zu verschaffen.

Sofern nicht die lokalen Eigenheiten eines Standorts, sondern Zonen/Klimatope vermessen werden sollen, ist darauf zu achten, dass der gewählte Standort als repräsentativ für die Zone angesehen werden kann und Zonenränder bzw. Übergangsbereiche zwischen zwei verschiedenen Zonen vermieden werden. Darüber hinaus ist die zu erwartende Stadtentwicklung, welche möglichst homogen erfolgen sollte, in die Überlegungen einzubeziehen. Weiterhin ist zu beachten, dass die Strukturen, Oberflächenarten und -materialien zum Gesamtbild einer definierten Zone passen. Ungewöhnlich nasse Stellen in einem ansonsten trockenen Gebiet, einzelne Gebäude, die die durchschnittliche Gebäudehöhe um mehr als die Hälfte überragen, ein großer gepflasterter Parkplatz in einem Gebiet mit bewässerten Gärten oder eine große, konzentrierte Wärmequelle wie ein Heizwerk oder ein Tunnelabzug sind Beispiele für tendenziell ungeeignete Standorte für den mesoskaligen Zonen-Ansatz. Aber auch bei der Betrachtung lokaler Charakteristika ist darauf zu achten, dass alle Standorteinflüsse zum Ziel der Messung beitragen und diesem nicht entgegenstehen. Bei der Untersuchung der Aufenthaltsqualität auf einem begrünten und begehbaren Tiefgaragendach sollte etwa nicht oberhalb des bodennahen Abluftrohres der Tiefgarage gemessen werden. Kleinräumige Phänomene dieser Art sind üblicherweise in Luftbildern nicht auszumachen und nur durch Ortsbegehungen festzustellen.

Bei einem kleinräumigen Monitoring einer Stadtentwicklungs- oder Klimaanpassungsmaßnahme sollte stets ein zweiter, klimatologisch vergleichbarer und ungestörter Standort, an welchem keine Umgestaltung stattfindet, als Referenzstandort vermessen werden. Sollten finanzielle Mittel für eine dritte Station in der Umgebung verfügbar sein, empfiehlt sich die Etablierung einer Station ohne Verschattung im Tagesgang als zusätzliche Strahlungsreferenz.

Bei der Verwendung von „Low-Cost“-Sensorik in größeren Messnetzen ist zudem – egal ob bei mikro- oder mesoskaligen Untersuchungen – je eine mit „High-End“-Sensorik ausgestattete urbane Referenzstation im Stadtkern und eine rurale Referenzstation im Umland anzuraten, um gemessene Einflüsse besser einordnen zu können. Dies gilt insbesondere bei Abwesenheit weiterer synoptischer Messtationen in der Umgebung wie jenen des DWD.

¹⁴ <https://www.mapillary.com/app/>

¹⁵ <https://www.google.com/streetview/>

Sobald eine Reihe möglicher Standorte definiert wurde, sollte in einem nächsten Schritt für jeden einzelnen eine Dokumentation der wichtigsten Eigenschaften und Einflüsse im Rahmen eines sog. „Footprints“ erfolgen. Neben einer Abschätzung der jeweils am Standort wirkenden Strahlung und der turbulenten Einflüsse enthält dieser Footprint auch die Dokumentation wichtiger Rauigkeitseigenschaften wie der mittleren Höhe und Dichte der umliegenden Bebauung, die wichtigsten Merkmale der Oberflächenbedeckung und -materialien und beim mesoskaligen Ansatz eine Homogenitätseinordnung in Bezug auf die zu untersuchende Zone.

Sind passende Standortkandidaten gefunden, startet anschließend der Vorgang der Genehmigungsgenerierung. Es ist immer ratsam, mehr potenzielle Standorte als benötigt festzuhalten, da häufig davon auszugehen ist, dass nicht jeder Standort eine Genehmigung zur Installation der Klimastation erhält. Grundstückseigentümer, auf deren Land Messstationen etabliert werden sollen, müssen hierfür ihr Einverständnis geben. Der Genehmigungsprozess bei der Standortsuche von Städten, Kommunen, Verbänden oder Behörden stellt sich oftmals einfacher dar, denn diese verfügen häufig über eigene Grundstücke oder über gute Beziehungen zu anderen Behörden oder Unternehmen. Beispiele solcher Grundstücke sind nachfolgende aufgelistet:

- Werksgelände, Grundstücke von Ämtern, Schulen, Universitäten etc.
- Grundstücksbrachen
- Versorgungseinrichtungen (z.B. für Strom oder Mobilfunk)
- Verkehrsräume (Straßen- und Schienennetz)

Grundstücke dieser Art sind zumeist sehr gut als Stationsstandorte geeignet, denn Sie sind für Installations- und Wartungsvorgänge durch den Stationseigentümer begehbar, häufig vor Vandalismus geschützt (z.B. durch Zäune) und verfügen oftmals über einen Stromanschluss, was die Stationsinfrastruktur deutlich verbessert.

Ebenfalls vandalismussicher zeigen sich Gebäudedächer, die als Stationsstandorte für meteorologische Messdatenerhebungen jedoch in der Regel ungeeignet sind. Dächer haben ihr eigenes, teils sehr anomales Mikroklima, das zu fehlerhaften Ergebnissen führt. Einerseits wirkt das Gebäude selbst als Störelement auf die Geschwindigkeit, Richtung und Böigkeit des Windes, zum anderen bestehen Dächer üblicherweise aus Materialien, die sich tagsüber stark aufheizen und nachts extrem abkühlen, wodurch im Tagesgang ein besonders starker Temperaturgradient gemessen wird. Weiterhin zeigen sich Dächer über die Maßen trocken, da sie meistens so konzipiert sind, dass Niederschläge schnell abfließen und gleichzeitig an Strahlungstagen die solare Einstrahlung ungehindert auf die

Dachflächen auftreten kann. Dächer eignen sich somit nur in zwei Szenarien als Stationsstandorte: Als Referenzstation für die einfallenden Strahlungskomponenten oder als Referenzstation oberhalb der Dachgrenze, sofern die Klimastation auf sehr hohen Masten (bestenfalls mindestens auf 1,5-facher mittlerer Höhe umgebender Strömungshindernisse) angebracht ist, um frei von o.g. Störungen zu messen.

Zur Anbringung der Messtechnik im Straßenraum eignen sich je nach Gesamtmasse der Sensorik auch Straßenlaternen oder Bäume (falls beispielsweise Verschattungseffekte zu vermessen sind), für deren Genehmigungsprozess üblicherweise die Tiefbau- bzw. Umweltämter zuständig sind. Hierbei ist jedoch darauf zu achten, dass weder die Laternenmasten noch die Bäume Schaden nehmen, weshalb materialschonende Halterungen verwendet werden und (insb. bei den Bäumen) häufigere Wartungstermine eingeplant werden sollten. Gerade im belebten Straßenraum ist eine Kennzeichnung der Station mit den Kontaktdaten des Stationseigentümers angeraten. Kontaktdaten (Adresse, Rufnummern und E-Mailadressen) sowie eine Kurzbeschreibung des Projekts anhand eines Aushangs tragen zur Information und Achtsamkeit der BürgerInnen bei und senken die Vandalismusgefahr.

3.4.2 Metadaten der Stationsstandorte und Beispiel-Steckbriefe

Die lückenlose und genaue Dokumentation der Metadaten einer Station ist für jede einzelne Station obligatorisch und unerlässlich. Durch diese wird sichergestellt, dass der Endnutzer der erhobenen Daten genaueste Kenntnis über die Bedingungen erlangt, unter denen die Daten aufgezeichnet, gespeichert und übertragen wurden, um korrekte Schlussfolgerungen aus ihrer Analyse ziehen zu können.

Mindestanforderungen an Metadaten sind WMO-konform nach Aguilar et al. (2003) definiert und umfassen Informationen zur **Stationskennung** (Ortskennziffer, ggf. WMO-Kennziffer, Name und ggf. Pseudonym), **Geografische Kenndaten** (Längen- und Breitengrad, Höheninformation und Informationen zu Stationsumzügen) und zur Beschreibung der **Datenverarbeitung** (Angabe von Einheiten, Berechnungen und Algorithmen zur Korrektur, Qualitätskontrolle, Homogenisierung oder Interpolation der Daten, Umgang mit Fehlwerten).

Offizielle WMO-Messstationen unterliegen einem viel strengeren und einheitlicherem Anforderungsrahmen (ganztägig uneingeschränkte solare Einstrahlung, Messungen über gemähter Wiese definierter Abmessungen etc.) als Klimamessstationen zur Aufzeichnung bestimmter Lokalklimate im urbanen Raum. Bei Letzteren ist in Anbetracht der urbanen

Enge eine Messung nach ursprünglichen WMO-Standards in den meisten Fällen nicht möglich oder aufgrund der Messziele oftmals gar nicht erwünscht. Da sich das Umfeld urbaner Klimastationen aus diesen Gründen deutlich vielseitiger und komplexer zeigt als im ländlichen Raum, ist hier eine über den Standard hinausgehende Beschreibung erforderlich – mit besonderem Fokus auf die **Lokale Umgebung** und **Historische Entwicklung**.

Bei einer langfristigen, über Jahrzehnte angelegten Messkampagne ist die Dokumentation der **Historischen Entwicklung** notwendig, um späteren Datennutzern die Möglichkeit zu geben, etwaige fortwährende Klimaveränderungen auch in den Kontext der Historie setzen zu können. Kommunale Regierungswechsel aber auch neu erlassene Gesetze zu zulässigen Materialien und Bautechniken, oder veränderte Umwelt-, Bewässerungs- oder Verkehrsvorschriften könnten mittel- bis langfristig beispielsweise zur Umstrukturierung ganzer Quartiere und Stadtbezirke führen (z.B. Rückbau von Straßen, ehemaligen Fabrikgebäuden, Etablierung blau-grüner Klimaanpassungsmaßnahmen etc.), die es fortlaufend festzuhalten gilt.

Im Hinblick auf die Beschreibung der **Lokalen Umgebung** sind die nach Oke (2004) auf den heutigen Stand der Technik modifizierten, nachfolgenden Informationen aufzuführen:

a. Bereitstellung einer Überblickskarte auf mesoskaliger Ebene (Maßstab ca. 1:50.000):

Eine mesoskalige Karte eines hochaufgelösten Luftbilds rund um den Standort der Station gibt einen Überblick über ihr großräumiges Umfeld sowie über etwaige städtische Entwicklungsmaßnahmen. Letztere erfordern ggf. eine wiederkehrende Aktualisierung der Karte. Das Luftbild kann für eine bessere Orientierung und weitere Informationen durch eine topografische Stadtkarte (Gelände, Verkehrsinfrastruktur, Gebäude, Bäume etc.) oder eine Katasteransicht (z.B. ALKIS) ergänzt werden. Idealerweise werden Luftbild und Stadtkarte zusätzlich in einem größeren Maßstab (1:500.000 oder 1:1.000.000) zur Verfügung gestellt, um die Lage der Station zum Rest der urbanisierten Region ins Verhältnis setzen zu können. Weitere Zusatzinformationen aus der Höhe könnten Schrägaufnahmen zur Visualisierung von Baum- und Gebäudehöhen im Vergleich zum Stationsstandort oder Infrarotaufnahmen sein, welche beispielsweise weitere Rückschlüsse auf die Eigenschaften von Materialien in der Umgebung zulassen. Weitere Informationen, die die mesoskalige Überblickskarte ergänzen sind die Einordnung in UCZ (nach Oke 2004), LCZ (nach Stewart und Oke 2012) und Rauigkeitsklassen (nach Davenport et al. 2000).

b. Bereitstellung einer Übersichtskarte auf mikroskaliger Ebene (Maßstab ca. 1:5.000 oder geringer):

Auf dieser hochauflösenden Karte wird das nahe Umfeld des Stationsstandorts ersichtlich. Analog zu a.) eignet sich hier vor allem eine Luft- bzw. Satellitenbilddaufnahme, die durch eine topografische Karte ergänzt werden kann.

c. Erfassung der Horizontüberhöhung (Sky View Factor¹⁶):

Untersuchungen der Horizontüberhöhung Anfang des Jahrtausends ergaben, dass diese sich auf den Strahlungshaushalt an einem Ort auswirken und daher nachweislich zu Temperaturunterschieden im urbanen Raum führen (Svensson 2004). Aus diesem Grund ist der SVF für den gewählten Standort zu berechnen und zu dokumentieren. Für das Metadatenblatt ist die senkrecht nach oben ausgeführte Fotoaufnahme (bei auf der Rückseite liegender Kamera) mithilfe eines Fischaugenobjektivs zu empfehlen. Alternativ kann ein auf dem Erdboden liegender, konvexer Spiegel senkrecht von oben mit einer Kamera fotografiert werden. Heutzutage bieten Computerprogramme (oftmals „open source“, z.B. Python- oder R-basiert) die Möglichkeit, solche Aufnahmen auszuwerten und den Wert des SVF des Standorts auszugeben. Sollten rund um den Standort Stadtentwicklungsmaßnahmen durchgeführt werden, ist eine Wiederholung der Aufnahmen und Berechnungen des SVF in kürzeren Zeitabständen zu empfehlen.

d. Fotografien aller Himmelsrichtungen (von der Messstation ausgehend):

Obligatorisch ist zumindest die Aufnahme der vier Haupthimmelsrichtungen Norden, Ost, Süden, Westen, ausgehend von der Klimastation.

e. Kleinteilige Bestandsaufnahme des Stationsaufbaus:

Diese dient zur Dokumentation der verbauten Sensoren. Neben einer fotografischen Nahaufnahme der Station sollte eine Sensorik-Liste beigefügt werden. Änderungen des Aufbaus, z.B. beim Austausch von Sensoren, sind zu vermerken.

f. Vorgehen bei stationszugehörigen, aber entfernt angebrachter Sensorik:

Außerhalb der Anlage durchgeführte Messungen, wie Wind- oder Strahlungsmessungen, die häufig auf Dächern oder hohen Masten stattfinden, müssen ebenfalls entsprechend der Schritte b.) bis d.) dokumentiert werden.

¹⁶ Der Sky View Factor (SVF) beschreibt die von einem Punkt aus sichtbaren Bereiche des Himmels als Zahl zwischen 0 und 1. Ein Wert von 1 bedeutet einen vollständig hindernisfreien Blick auf den Himmel, 0 hieße einen komplett von Hindernissen bedeckten Himmel.

Besonders vollständige und übersichtliche Metadatenblätter nach WMO-Vorbild von Oke (2004) wurden im Rahmen der Entwicklung eines „Low-Cost“-Sensor-Netzwerkes in Bern erstellt (Gubler et al. 2021). Da die Ausstattung aller Stationen gleichartig erfolgte, enthalten die Stationsblätter keinerlei Information zur Sensorik, welche in der zugehörigen wissenschaftlichen Veröffentlichung publiziert wurde. Ein in drei Teile aufgeteilter, beispielhafter Stationssteckbrief nach Gubler et al. (2021) ist den folgenden Abbildungen zu entnehmen. Teil 1 weist dabei allgemeine Informationen aus (Abbildung 11), Teil zwei ordnet die Station auf mikroskaliger Ebene und Teil 3 auf mesoskaliger bzw. überörtlicher Ebene entsprechend der zuvor definierten Kriterien ein (Abbildung 12).

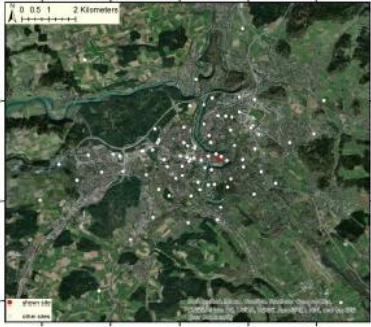


Metadata sheet: „Urban Climate Bern“			
1. General site information			
Site Nr.: <i>Log_16</i>		Site name / alias: <i>Münsterplattform</i>	
Latitude: 46.9471° N	Longitude: 7.4523° E	Elevation: 534 m [a.m.s.l.]	
Site location:		Mounting material: Metal	Mounting height [cm]: 298
		Mounting: Lantern	Mounting colour: Dark grey
		Sky view factor: 0.430	
		Local climate zone [LCZ; Stewart & Oke 2012]: 2B	
		General comments [e.g., data availability]: -	
Sensor location [date: 03/05/2018]		Sky view photograph [date: 26/07/2018]	
			

Abbildung 11: Exemplarisches Metadatenblatt der Station "Münsterplattform" in Bern (nach Gubler et al.). Teil 1: Allgemeine Informationen.

<p>2. Micro scale</p>	
<p>Land cover [% in 25 m radius area]: Buildings: 16% Impervious: 53% Vegetated: 31% Forest: - Bare: - Water: -</p>	
<p>Building & impervious [description]: Concrete and gravel square, cathedral (sandstone)</p>	<p>Vegetation type [description]: Single trees, lawn areas with low hedges and bushes</p>
<p>Distance to next building [m]: 3</p>	<p>Distance to next tree [m]: 9</p>
<p>Mean building height [m in 25 m radius]: 24.383</p>	<p>Mean vegetation height [m in 25 m radius]: 2.571</p>
<p>Map [© swisstopo, 1:500]</p> 	<p>Aerial photograph [© swisstopo, 1:500]</p> 
<p>Cardinal photographs [1.5 m; date: 25/06/2018]</p>	
<p>North</p> 	<p>East</p> 
<p>South</p> 	<p>West</p> 
<p>3. Local scale</p>	
<p>Land cover [% in 500 m radius area]: Buildings: 26% Impervious: 28% Vegetated: 24% Forest: 6% Bare: - Water: 16%</p>	
<p>Map [© swisstopo, 1:2'500]</p> 	<p>Aerial photograph [© swisstopo, 1:2'500]</p> 

Abbildung 12: Exemplarisches Metadatenblatt der Station "Münsterplattform" in Bern (nach Gubler et al.). Teil 2: Mikroskala. / Teil 3: Mesoskalige/Überörtliche Skala.

3.4.3 Positionierung und Ausrichtung der Sensorik

Für die in Kapitel 3.2 aufgelisteten meteorologischen Größen werden im Rahmen dieses Abschnitts die wichtigsten Kriterien im Hinblick auf vertikale Positionierung und horizontale Ausrichtung der Sensorik benannt, um untereinander vergleichbare Messdaten zu erheben. Im Stadtgebiet ist die Messung beinahe aller betrachteter Größen nicht nach WMO-Standard möglich oder erwünscht. So kann etwa die **Lufttemperatur** aus Gründen der Vandalismusgefahr häufig nicht auf den üblichen 1,25 m – 2 m Höhe stattfinden und wird i.d.R. auf eine Höhe zwischen 3 m und 5 m angebracht. Insbesondere in dicht bebauten Gebieten bzw. Straßenschluchten wird der durch diese Anpassung entstehende Fehler als nicht-signifikant angesehen, solange der Sensor mehr als einen Meter von einer Oberfläche entfernt ist (Nakamura und Oke 1988). Ein zusätzlich positiver Effekt dieser größeren vertikalen Entfernung vom Verkehr ist die mit der Höhe abnehmende Abgaswärme der Autos und die geringere Gefahr der Verschmutzung des Sensors. Die Ausrichtung eines Lufttemperatursensors sollte stets gen Norden erfolgen, um die strahlungsbedingte Aufheizung des Sensors zu minimieren. Allgemein ist zudem auf ein ausreichendes Strahlungsschutzgehäuse zu achten. Die Sensorik für die **Globe-Temperatur** wird hingegen möglichst nach Süden ausgerichtet, um im Tagesgang die am Standort maximal auftreffende solare Einstrahlung auf den Sensor zu erfassen. Aus diesem Grund findet man Klimastationen mit diesen beiden gemessenen Parametern zumeist mit Auslegern in zwei verschiedene Himmelsrichtungen vor (s. Abbildung 13).



Abbildung 13: Beispiel einer kompakten Klimamessstation mit Temperatur und Globe-Temperatur auf zwei entgegengesetzten Auslegern (Quelle: Smart-City Hannover, eigene Aufnahme GEO-NET, 2023).

Als eine stark von der Temperatur abhängige Größe wird die Messung der **Relativen Feuchte** in Höhe und Ausrichtung analog zu jener der Lufttemperaturmessung empfohlen. Bei der Anbringung von Strahlungs- oder Helligkeitssensorik ist zuerst festzulegen, vor welchem Hintergrund die Messungen stattfinden sollen. Einfache **Helligkeitssensoren**, die (z.B. für Monitoring-Fragestellungen) Aussagen über die Besonnung oder Verschattung einer Station zu verschiedenen Tageszeiten zulassen sollen, um andere gemessene Parameter besser einordnen zu können, sollten auf dem Höhenniveau dieser weiteren Messsensorik angebracht werden. Gleiches gilt für die Messung der **kurzwelligeren solaren Einstrahlung** an einem Standort. Falls diese jedoch repräsentativ für ein größeres Gebiet gemessen werden soll, empfiehlt sich die Installation der Pyranometer und anderer Strahlungsstromsensoren waagrecht und vibrationsfrei außerhalb des Einflusses von Hindernissen. Hierfür sind vor allem die Dachplattformen hoher Gebäude gut geeignet.

Bei Messungen der **langwelligeren terrestrischen Ausstrahlung** ist entscheidend, wie hoch der Sensor angebracht wird. Je nachdem ist der Durchmesser des darunter liegenden, repräsentierten Gebiets größer oder kleiner. Die Standardexposition nach WMO-Richtlinien für meteorologische Instrumente und Beobachtungsmethoden (WMO 1996) gibt 2 m über einer kurzgemähten Wiese an. Dieser Bereich ist repräsentativ für die langwellige Ausstrahlung eines ca. 12 m großen Durchmessers. Für urbane Räume ist ein solch geringer Durchmesser oftmals nicht repräsentativ, daher sind hier größere Höhen empfohlen. Ein auf einem 10 m hohen Mast montiertes Pyrgeometer auf einem 10 m hohen Gebäude (insgesamt 20 m über Grund) wäre beispielsweise repräsentativ für ein Quellgebiet mit einem Durchmesser von 120 m in Bodennähe.

Auch bei der Messung von **Windrichtung und -geschwindigkeit** ist zuvorderst das Anwendungsgebiet der Messungen zu definieren. Monitoring-Fragestellungen wie die kleinräumigen Windverhältnisse an einem lokalen Standort rechtfertigen durchaus bodennahe Windmessungen im verdichteten Raum auf Messhöhen wie jenen der Temperatur. Hierbei sind jedoch Turbulenzeffekte (z.B. in der Nähe von Gebäudefassaden) zu berücksichtigen, die Messungen stark verfälschen oder gar unbrauchbar machen können. Solche Effekte könnten jedoch bei der Evaluierung neuartiger mikroskaliger Modelle wie PALM-4U (Raasch und Schröter 2001, Maronga et al. 2015; Maronga et al. 2020) von gesteigertem Interesse sein.

Bei der Vermessung von mesoskaliger, für größere Gebiete repräsentativer Windinformation sollte jedoch ein deutlich höherer und ungestörterer Standort, z.B. auf hohen Masten auf Gebäudedächern, gewählt werden, um fernab der städtischen Rauigkeit zu messen (s. Kapitel 3.4.1).

Bei einem sehr dichten Stationsnetz reicht es üblicherweise aus, **Niederschlagsmessungen** nur punktuell zu integrieren. Im urbanen Raum gibt es bzgl. Niederschlagsmessungen vielerlei Probleme, die zu verfälschten Messwerten führen können. Hierzu zählen das Abfangen des Niederschlags durch Gebäude oder Bäume, an harten Oberflächenmaterialien abgeprallter Niederschlag, der vom Messgerät registriert wird oder durch die in Städten allgemein stärkere Böigkeit verursachte Verwehungen rund um das Messgerät, was je nach Standort zu einer Über- oder Untererfassung des Niederschlags führen kann. Ideal für den Stationsstandort wäre eine möglichst weitläufige, offene Fläche, auf der der Niederschlagsmesser bodennah (ähnlich der Sensorik der Temperatur) aufgestellt wird. Da diese Anforderungen jedoch zumeist gänzlich andere sind als für Parameter wie Temperatur, Luftfeuchte oder Wind muss die Niederschlagsmessung u.U. separat an einem anderen Ort stattfinden.

Die Messung **lufthygienischer Parameter** findet laut 39. BImSchV (2010) ebenfalls auf einem ähnlichen Messniveau statt wie Temperaturmessungen, in der sogenannten „Atemzone“, die sich zwischen 1,5 m und 4 m über Grund befindet. Sollen die Messungen für ein größeres Gebiet repräsentativ sein, ist, ähnlich der langwelligen Ausstrahlung, eine größere Messhöhe zulässig.

Für alle genannten Parameter ist die genaue Dokumentation von Ausrichtung und Messhöhe im Rahmen der Metadatenblätter (s. Kapitel 3.4.2) essenziell um dem Datenendnutzer die Gelegenheit zu geben, die richtigen Schlüsse aus den Datensätzen zu ziehen.

3.5 Ausbaustufen von Klimamessstationen und Qualitätsunterschiede

Seit etwa 1-2 Dekaden nimmt die Verfügbarkeit günstiger und gleichzeitig hinreichend genauer Messtechnik für kompakte urbane Klimamessstationen am Markt weiter zu. Eine größer werdende Zahl von Händlern bietet mittlerweile auch Stationsbaukästen an, bei denen Sensorik nach Bedarf zusammengestellt werden kann. Die Verwendung solcher modularer Stationsaufbauten kann in vielerlei Hinsicht sinnvoll sein. An erster Stelle ermöglicht die freiwählbare Stationskonzeption maßgeschneiderte Lösungen für den zu bearbeitenden Anwendungszweck. Auf diese Weise können einerseits Kosten eingespart, und andererseits nicht benötigte oder gar für den Standort unpassende (s. Kapitel 3.4.3) und folglich ggf. fehlerbehaftete Messgrößen übergangen werden.

Die Tabelle 1 auf den Folgeseiten zeigt eine Auswahl verschieden ausgestatteter Klimamessstationen für unterschiedliche, vornehmlich stadtklimatische Anwendungsfälle. Die aufgeführten Messgeräte stellen einen Überblick nach dem Status Quo dar, sind in Anbetracht des stetigen Fortschritts und der unvorhersehbaren Preisentwicklung jedoch möglicherweise schnell überholt oder unpassend für die eigenen Bedürfnisse. Es wird empfohlen, die Tabelle als ersten Überblick zu nutzen, jedoch stets den Markt zu sondieren und die Datenblätter bzw. Handbücher möglicher Sensorik genau zu studieren.

Bei der Zusammenstellung wurde darauf geachtet, Klimasensorik zu kombinieren, die ähnliche Anforderungen an einen Standort stellt und sich dort gut ergänzt. Die hier aufgeführte Messtechnik ist überwiegend kompakt und überträgt die Daten drahtlos per LoRaWAN. In allen genannten Fällen a)-f) in Tabelle 1 wurde davon ausgegangen, dass die Infrastruktur der Datenübertragung, ggf. über ein Smart-City-Projekt oder den städtischen Energiedienstleister bereits vorliegt. Ist dies nicht der Fall, ist der Aufbau eines eigenen LoRaWAN-Netzes (oder vergleichbares, s. Kapitel 3.6.1) für die drahtlose Übertragung der Messdaten erforderlich. Hierfür müssen je nach Messgebietsgröße eines oder mehrere LoRaWAN-Gateways an möglichst hohen Orten (z.B. auf Dächern) installiert werden.

Zugunsten vergleichsweise geringer Anschaffungskosten nimmt die aufgeführte Messsensorik teils (moderate) Einbußen in der Messgenauigkeit in Kauf. Messtechnik dieser Art als kostengünstiger Kompromiss für den flächendeckenden Aufbau eines Messnetzes erfüllt daher nicht immer die allerhöchsten Qualitätsansprüche an Klimamessungen und unterscheidet sich häufig von den qualitativ höher einzuschätzenden „High-End“-Messungen bspw. von DWD oder LANUV. Zwar werden mittlerweile Algorithmen zur Verbesserung der Datenqualität von (IoT-)Netzwerken entwickelt und angewandt (z.B. BMDV 2021 oder Fraunhofer IZM 2023) oder vorab Kalibrierungen anhand hochwertiger

Referenzsensoren zur Steigerung der Qualität der mit „Low-Cost“-Sensorik erhobenen Datensätze durchgeführt (vgl. Kapitel 3.3), dennoch wird es notwendig sein, bei der Zusammenführung der Daten verschiedener Stationen und Netze Qualitätseinstufungen zu vergeben und in den Metadaten zu hinterlegen (s. Kapitel 4.2). Eine Kalibrierung der wichtigsten Messgrößen wie der Temperatur wird an „Low-Cost“-Stationen als Mindestmaßnahme dringend empfohlen.

Den geringsten Qualitätsstandard weisen „Citizen-Science“-Projekte aus. Diese sind eine geschickte Möglichkeit, die Klimasensibilisierung in der Bevölkerung voranzutreiben und ein Messnetz von hoher Dichte zu erzeugen, dennoch wird häufig weder die fachgerechte Installation der Klimamessstationen bis ins Detail überprüft, noch sind i.d.R. Details zu einer ggf. durchgeführten Qualitätskontrolle der Daten bekannt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die hohe räumliche Auflösung der Messungen die geringere Qualität weitgehend wieder wettmachen wird (Kumar et al. 2015).

Tabelle 1: Auflistung von Vorschlägen für den modularen Stationsbau unterschiedlicher Qualität für drahtlose Datenübertragung und verschiedene Anwendungsfelder ohne Anspruch auf Vollständigkeit.

Ausbaustufe	Erläuterung	Geräte und Hersteller	Kostenabschätzung
a) Basisvariante Messsensorik: <ul style="list-style-type: none"> • Temperatur (T) • Relative Feuchte (rH) • <i>Optional:</i> <ul style="list-style-type: none"> - Beleuchtungsstärke (L) - Luftdruck (p) 	<p>Die Basisstation ist die einfachste aller Klimamessstationen. Durch die Messung von Temperatur und Feuchte können einfache klimaökologische Fragestellungen beantwortet werden, u.a. erste Approximationen zur Aufenthaltsqualität im Freien, nächtlicher Überwärmung oder möglicher Kaltluftentstehung. Für genauere Rückschlüsse sollte jedoch auf die Stationen b)-d) zurückgegriffen werden.</p> <p>Stationen dieser einfachen Art eignen sich gut zur Nachverdichtung von Messnetzen, etwa, um eine flächendeckendere Temperatur messen oder durch Algorithmen einfacher und genauer interpolieren zu können.</p> <p>Je hochwertiger der Wetter-/Strahlungsschutz gewählt wird, desto geringer ist der Messfehler (z.B. durch Aufheizung der Apparaturen). Optional können zur besseren Einordnung der Messergebnisse die Beleuchtungsstärke oder der Luftdruck gemessen werden.</p> <p>Zur Steuerung der Batterielaufzeit einzelner Sensoren (bei interner Stromversorgung) sind Überlegungen anzustellen, die den Wartungsaufwand (Batteriewechsel) bei für den Anwendungszweck ausreichender, zeitlicher Datendichte geringhalten. Im Smart-City-Projekt Hannover haben sich beispielsweise ein Messwert pro 2 Minuten etabliert (► auch für b)-f) relevant).</p>	<p>Kombisensor für T, rH und L: <i>Preiswert:</i> Dragino LHT65N-EU868-E5</p> <p>Klimastation für T, rH und p (inkl. Wetterschutzgehäuse): <i>Premium:</i> NKE Wetteco ATM'O (s. Tabelle 2 Kapitel 3.7. Ein zusätzliches Wetterschutzgehäuse ist bei dieser Station nicht nötig.)</p>	<p>ca. 50,00 €</p> <p>ca. 600,00 €</p>
Zusätzlich nötig: <ul style="list-style-type: none"> • Wetterschutzgehäuse • Befestigungsmaterial (z.B. für Straßenleuchten) • LoRaWAN-Infrastruktur • Kalibrierung der Temperaturmessung 		<p>Wetterschutzgehäuse: <i>Preiswert:</i> TFA Dostmann Schutzhülle für Sender außen <i>Premium:</i> Wetter- und Strahlungsschutz, compact (Thies)</p> <p>Befestigungsmaterial: Aluminiumrohre, Schrauben, Schlauschellen etc.</p> <p>Kalibrierung: Temperatur</p>	<p>ca. 15,00 €</p> <p>ca. 175,00 €</p> <p>variiert</p> <p>variiert, pro Sensor: ca. 150,00-600,00 €</p>
b) Variante Hitzestress Messsensorik: <ul style="list-style-type: none"> • 2x Temperatur (T) • Relative Feuchte (rH) • Helligkeitssensor (L) oder Strahlung • <i>Optional:</i> <ul style="list-style-type: none"> - Windgeschwindigkeit/-richtung (WG/WR) 	<p>Zur Ableitung von Hitzestress-Indizes ist die Messung mehrerer meteorologischer Größen notwendig: Temperatur, Feuchte, Wind und Strahlung (s. Kapitel 3.2.1). Einfachste Approximationen zur Bewertung von Hitzestress sind jedoch bereits mit Temperatur-, Globe-Temperatur und Feuchte-Messungen möglich.</p> <p>Die Montage erfolgt mittels Ausleger in zwei horizontale, entgegengesetzte Richtungen: Temperatur- und Feuchtefühler in einem Wetterschutzgehäuse nach Nord, ein zweiter Temperaturfühler innerhalb einer Schwarzen Kugel (zur Messung der Globe-Temperatur) nach Süd. Ein Helligkeitssensor zeigt an, ob die Station besonnt oder verschattet ist. Die optionale Messung von Windgeschwindigkeit und -richtung bietet sich an, sofern keine stationsnahen Referenzwerte zur PET-Berechnung (aus Messung oder Modellierung) vorliegen oder die stark approximierten Gleichsetzung mit der PET nicht infrage kommt.</p>	<p>Kombisensor für T, rH und L: Dragino LHT65N-EU868-E5</p> <p>2-facher T-Sensor (extern): Dragino LSN50 v2</p> <p>Optional: Windsensorik: <i>Preiswert:</i> Dragino WSS-02 <i>Premium:</i> Barani MeteoWind IoT Pro</p> <p>Schwarze Kugel (für Globe-T): KIMO BN150</p> <p>Wetterschutzgehäuse: <i>Preiswert:</i> TFA Dostmann Schutzhülle für Sender außen <i>Premium:</i> Wetter- und Strahlungsschutz, compact (Thies)</p> <p>Befestigungsmaterial: Aluminiumrohre, Schrauben, Schlauschellen etc.</p> <p>Kalibrierung: Temperatur</p>	<p>ca. 50,00 €</p> <p>ca. 40,00 €</p> <p>ca. 90,00 € ca. 650,00 €</p> <p>ca. 200,00 €</p> <p>ca. 15,00 €</p> <p>ca. 175,00 €</p> <p>variiert</p> <p>variiert, pro Sensor: ca. 150,00-600,00 €</p>
Zusätzlich nötig: <ul style="list-style-type: none"> • Schwarze Kugel • Wetterschutzgehäuse • Befestigungsmaterial (z.B. für Straßenleuchten) • LoRaWAN-Infrastruktur • Kalibrierung der Temperaturmessung 			

<p>c) Variante Kaltluft</p>	<p>Diese Klimamessstation legt den Fokus auf das nächtliche Kaltluftprozessgeschehen. Neben der Temperatur als erstem leichten Indikator für Kaltluftentstehung z.B. in einer Kaltluftleitbahn oder einem Kaltluftentstehungsgebiet (bspw. auf einer Wiese oder Agrarfläche), erfolgt die Messung von Windgeschwindigkeit und Richtung zur Identifikation von thermisch induzierten Winden in Richtung des Siedlungsraums. Messstationen der Variante c) sollten immer mindestens paarweise in Verbindung mit einer siedlungsraumnahen Referenzstation installiert werden, z.B. um Temperaturunterschiede besser einordnen zu können. Diese Referenzstationen können auch einfacher gehalten sein (Variante a) oder b)). Zur klimaökologischen Vermessung einer Leitbahn sollten mehrere Stationen entlang deren Struktur (Anfang, Mitte, Ende) etabliert werden.</p>	<p>Kombisensor für T, rH (und L): Dragino LHT65N-EU868-E5</p> <p>Windsensorik: <i>Preiswert:</i> Dragino WSS-02 + WSC1-L <i>Premium:</i> Barani MeteoWind IoT Pro</p> <p>Alternativ: Kombistation für T, WG und WR: <i>Premium:</i> Decentlab DL-ATM22 Wind- und Temperatursensor (sofern auf rH verzichtet werden kann)</p>	<p>ca. 50,00 €</p> <p>ca. 180,00 € ca. 650,00 €</p> <p>ca. 2.000,00 €</p>
<p>Messensorik:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Temperatur (T) • Relative Feuchte (rH) • Windgeschwindigkeit/ richtung (WG/WR) <p>Zusätzlich nötig:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wetterschutzgehäuse • Befestigungsmaterial (z.B. für Straßenleuchten) • LoRaWAN-Infrastruktur • Kalibrierung der Temperaturmessung 		<p>Wetterschutzgehäuse: <i>Preiswert:</i> TFA Dostmann Schutzhülle für Sender außen <i>Premium:</i> Wetter- und Strahlungsschutz, compact (Thies)</p> <p>Befestigungsmaterial: Aluminiumrohre, Schrauben, Schlauchschellen etc.</p> <p>Kalibrierung: Temperatur</p>	<p>ca. 15,00 €</p> <p>ca. 175,00 €</p> <p>variiert</p> <p>variiert, pro Sensor: ca. 150,00-600,00 €</p>
<p>d) Variante Vollausstattung</p>	<p>Die punktuelle Integration vollausgestatteter Stationen in ein Messnetz ist insbesondere dann sinnvoll, wenn keine weiteren synoptischen Wetterstationen (bspw. des DWD) im Umfeld des Untersuchungsgebiets verfügbar sind. Größen wie Niederschlag oder Strahlung (s. auch f)) helfen bei der Einordnung des lokal vorherrschenden Wetters und erweitern die Möglichkeit der Interpretation der weiteren Messgrößen. Mit der „Barani“-Station oder dem „Decentlab“ sind bereits fertige Bausätze für vollausgestattete Klimamessstationen auf dem Markt verfügbar. Je nach Anforderung an die Messungen und verfügbaren Geldmitteln kann aber auch eine eigenständige Kombination verschiedener Sensorik (etwa aus a)-c) gewählt werden.</p>	<p>Kombination von Messtechnik aus a)-c) (s.o.), zusätzlich Niederschlagssensorik: Decentlab DL-TBRG Niederschlagssensor</p> <p>Alternativ: Kombistation „Vollausstattung“ Klimastation „Barani“ (s. Tabelle 2 Kapitel 3.7)</p> <p><i>oder:</i> Decentlab DL-ATM41 Wetterstation mit elf Parametern</p>	<p>s.o.</p> <p>ca. 1.500,00 €</p> <p>ca. 2.200,00 €</p> <p>ca. 3.800,00 €</p>
<p>Messensorik:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Temperatur (T) • Relative Feuchte (rH) • Luftdruck (p) • Helligkeit (L) / Strahlung • Windgeschwindigkeit/-richtung (WG/WR) • Niederschlagsmenge/-intensität (RR/RRi) <p>Zusätzlich nötig:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ggf. Schwarze Kugel • Wetterschutzgehäuse • Befestigungsmaterial (z.B. für Straßenleuchten) • LoRaWAN-Infrastruktur • Kalibrierung der Temperaturmessung 		<p>Schwarze Kugel (für Globe-T): KIMO BN150</p> <p>Wetterschutzgehäuse: <i>Preiswert:</i> TFA Dostmann Schutzhülle für Sender außen <i>Premium:</i> Wetter- und Strahlungsschutz, compact (Thies)</p> <p>Befestigungsmaterial: Aluminiumrohre, Schrauben, Schlauchschellen etc.</p> <p>Kalibrierung: Temperatur</p>	<p>ca. 200,00 €</p> <p>ca. 15,00 €</p> <p>ca. 175,00 €</p> <p>variiert</p> <p>variiert, pro Sensor: ca. 150,00-600,00 €</p>
<p>e) Variante Innenraum</p>		<p>Neben der klimaökologischen Untersuchung des Außenraums erfährt auch die messtechnische Inwertsetzung des Aufenthaltskomforts in Innenräumen eine zunehmende Popularität. Insbesondere „Smart Homes“ eignen sich gut zur Integration drahtloser Klimamess-technik. Temperatur-/Feuchte-/Helligkeits-Kombi-</p>	<p>Kombisensor für T, rH und L (innen): ELSYS ELSYS-ERS 868 MHz</p>

<ul style="list-style-type: none"> • <i>Optional:</i> <ul style="list-style-type: none"> - Lüfthygiene (z.B. CO₂, VOCs) - Messungen im Außenraum/Balkon 	<p>Sensorik ermöglicht analog zum Außenraum (Variante a) und b)) eine aussagekräftige Einschätzung des Innenraumkomforts. Die Messung der Globe-Temperatur zur PET-Berechnung ist im Innenraum nicht zwingend erforderlich, da davon ausgegangen werden kann, dass der Einfluss von Wind und Strahlung bei konstanter Feuchte hier vernachlässigbar ist, wodurch die PET als identisch zur Lufttemperatur angenommen werden kann (Höppe 1999). Wichtig ist jedoch der Vergleich mit nahegelegenen Außenraumtemperaturen, da zwischen dieser und der Innenraumtemperatur eine direkte Abhängigkeit besteht (VDI 2008). Sind keine Vergleichsstationen in der Nähe, bietet sich optional eine Außenraummessung nach Variante b), z.B. auf dem Balkon, an, die zusätzlich die Bewertung dieses nächstgelegenen, mikroskaligen Ausgleichsraums zulassen.</p>	<p>Optional: Lüfthygiene (Kombisensor T, rH, CO₂ und VOC¹⁷): <i>ATIM ACW-THAQ Raumluftsensor mit CO₂ und VOC</i> <i>(Achtung: Helligkeit ist hier nicht enthalten.)</i></p> <p>Optional: Außenraummessung: <i>s. bspw. Variante b)</i></p>	<p>ca. 170,00 €</p> <p>s.o.</p>
<p>Zusätzlich nötig:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fensteröffnungssensoren • LoRaWAN-Infrastruktur • Kalibrierung der Temperaturmessung • <i>Optional:</i> <ul style="list-style-type: none"> - Stromverbrauchssensorik (Gesamtwohnung vs. Lüftung) 	<p>Aufgrund der genannten Abhängigkeit von Innen- und Außentemperatur ist die Lüftung der Räumlichkeiten der entscheidende Faktor für die spätere Auswertung der Messdaten. Folglich ist die Aufzeichnung der manuellen Raumlüftung durch Fensteröffnungssensoren oder, falls vorhanden, der automatisierten Raumlüftung durch Lüftungssysteme per Stromverbrauchsmessung (Gesamt vs. Lüftungssystem) vorzunehmen. Lüfthygiene-Parameter wie CO₂ oder VOCs runden das Gesamtbild der Innenraummessung als optionale Größen in Bezug auf den human-biometeorologischen Komfort ab.</p>	<p>Fensteröffnung: <i>Dragino LoRaWAN Tür/Fenster Sensor</i></p> <p>Stromverbrauch: <i>KLAX 2.0 LoRaWAN SML Optokopf für moderne Stromzähler</i> <i>(Stromverbrauch der gesamten Wohnung)</i></p> <p><i>ADE ARF8190BAB02</i> <i>(Stromverbrauch der Lüftungsanlage)</i></p>	<p>ca. 20,00 €</p> <p>ca. 180,00 €</p> <p>ca. 170,00 €</p>
<p>f) Weitere Sensorik/Technik (stationsfern)</p>	<p>Wie insb. in den Kapiteln 3.4.1 und 3.4.3 erläutert, existieren Klimaparameter, die zumeist an engen, lokalen Standorten keine aussagekräftigen Messungen erlauben. Hierzu zählen der Niederschlag, die Messung von übergeordneten Windsystemen und komplexere Strahlungsmessungen, z.T. auch lufthygienische Messungen. Sind diese Messgrößen nicht ohnehin in fertigen Stationsbausätzen enthalten (s. Variante d)) oder eignen sich an den dortigen Standorten nur bedingt, empfiehlt sich die Installation dieser genannten Messtechnik entsprechend der in Kapitel 3.4.3 aufgeführten Anforderungen an stationsfernen Orten.</p>	<p>Gesamtstrahlung: <i>Decentlab DL-PYR Sonneneinstrahlungssensor</i></p> <p>Wind- und Niederschlagssensorik: <i>(s. z.B. Variante c) und d))</i></p> <p>Lufthygiene(-Stationen): <i>Thermokon LA LoRaWAN Outdoor Sensor</i> <i>Temperature, CO₂ and VOC</i></p> <p><i>Netvox R72623 Wireless Outdoor</i> <i>PM_{2.5}/Noise/Temperature/Humidity Sensor</i> <i>with Solar Panel</i></p> <p><i>Decentlab DL-PM Particulate Matter,</i> <i>Temperature, Humidity and Barometric Pressure</i> <i>Sensor</i></p>	<p>ca. 1.200,00 €</p> <p>s.o.</p> <p>ca. 550,00 €</p> <p>ca. 900,00 €</p> <p>ca. 1.200,00 €</p>
<p>Zusätzlich nötig für a)-f):</p> <ul style="list-style-type: none"> • LoRaWAN-Infrastruktur • Kalibrierung der Temperaturmessung 		<p>LoRaWAN-Gateway: <i>DLOS8N Outdoor LoRaWAN Gateway</i></p> <p>Kalibrierung (mindestens bei Verwendung einer Station mit Temperatur-Messung): <i>Temperatur</i></p>	<p>ca. 300,00 €</p> <p>variiert, pro Sensor: ca. 150,00-600,00 €</p>

¹⁷ VOC: Flüchtige organische Verbindungen (Volatile Organic Compounds) umschreiben gas- und dampfförmige Stoffe organischen Ursprungs in der Luft. Dazu gehören zum Beispiel Kohlenwasserstoffe, Alkohole, Aldehyde und organische Säuren (UBA 2016).

3.6 Datenübertragung und -management

3.6.1 Grundlagen: Wege der Datenübertragung

Die Übertragung von Daten aus einem urbanen Sensornetz kann mit verschiedenen Kommunikationstechnologien und -protokollen erfolgen.

Aufgrund der Flexibilität und einer einfachen Einrichtung von drahtlosen Sensoren am Standort der Messung werden in städtischen Sensornetzen fast ausschließlich drahtlose Übertragungsverfahren eingesetzt. Das Einrichten von kabelgebundener Übertragung ist zwar denkbar und stellt meist die stabilste Form der Datenübertragung dar, ist in der Regel aber bei einer großen Anzahl an Messstationen mit erheblichem Aufwand bei gleichzeitig geringer Flexibilität verbunden und dürfte somit für die meisten Sensornetze keine Option darstellen.

Für Drahtlose Kommunikation stehen generell folgende Technologien zu Verfügung:

a. Wi-Fi / WLAN (Wireless Fidelity / Wireless Local Area Network):

Wi-Fi oder WLAN ist eine weit verbreitete drahtlose Technologie, die die Datenübertragung über kurze bis mittlere Entfernungen ermöglicht. Sie bietet hohe Übertragungsgeschwindigkeiten bei mittlerem Energiebedarf und wurde für die Nutzung von mobilen Geräten wie Laptops und Smartphones entworfen. Die Infrastruktur besteht aus Basisstationen (Hot-Spots), mit denen sich mehrere Endgeräte wie Laptops oder Smartphones verbinden können und ist in der Regel nicht großflächig vorhanden bzw. nutzbar. Für die Übertragung von Daten aus einem städtischen Sensornetz ist die Technologie weniger gut geeignet, da Hotspots in der Umgebung (ca. 10 – 50 m) vorhanden und nutzbar sein oder extra installiert werden müssen. Weiterhin ist der Energiebedarf zu hoch, um eine ausreichende Autonomiedauer von z.B. 1 Jahr oder länger zu erreichen.

b. Mobilfunknetze:

Die Nutzung von Mobilfunknetzen wie 3G, 4G (LTE) und 5G ermöglicht die Datenübertragung über große Entfernungen. Mobilfunknetze bieten eine breite Abdeckung bei mittlerem Energiebedarf. Insbesondere die neueren Standards 4G und 5G bieten hohe Datenraten und eignen sich somit z.B. für die Übertragung von Multimediainhalten. Die Infrastruktur ist in Deutschland und insbesondere im urbanen Bereich gut ausgebaut und erfordert einen Vertrag mit einem Mobilfunkanbieter. Für die Übertragung von Daten aus einem städtischen Sensornetz ist die Technologie aufgrund des vergleichsweise hohen Energiebedarfs und der daraus resultierenden kurzen Autonomiedauer nicht gut geeignet.

c. Zigbee:

Zigbee ist ein drahtloses Protokoll mit geringem Stromverbrauch und niedriger Datenrate, das häufig in intelligenten Haus- und Gebäudeautomatisierungsanwendungen eingesetzt wird. Es erlaubt niedrige Datenraten bei geringem Energiebedarf und kurzen Übertragungswegen. Die Infrastruktur besteht aus einer Basisstation (Koordinator) der mit den verschiedenen Teilnehmern (Sensoren und Aktoren) ein Netzwerk bildet. Die Teilnehmer (Knoten) mit einer ausreichenden Energieversorgung agieren neben ihrer eigentlichen Funktion als Router und leiten Datenpakete von weiter entfernten Teilnehmern und Endpunkten weiter. Aufgrund der geringen Reichweite von mehreren Metern zwischen zwei Teilnehmern eignet sich Zigbee nicht für urbane Sensornetzwerke.

d. LoRaWAN (Long Range Wide Area Network):

LoRaWAN ist ein drahtloses Kommunikationsprotokoll, das für niedrige Datenraten, geringen Stromverbrauch und große Reichweiten entworfen wurde und somit insbesondere im IoT-Bereich Anwendung findet. Es ermöglicht die Datenübertragung über mehrere Kilometer im Freifeld bzw. mehrere hundert Meter im urbanen Bereich. Die notwendige Infrastruktur für die Datenübertragung besteht aus Gateways die eine Verbindung zwischen den Endgeräten und einem zentralen Netzwerkservers herstellen. Die Infrastruktur ist in Deutschland nicht flächendeckend vorhanden und basiert beispielsweise auf privat betriebenen Gateways, die von Mitgliedern der Community The-Things-Network¹⁸ (TTN) betrieben werden. Die Nutzung ist im Rahmen der Community-Regeln möglich und bedarf i.d.R. der Installation von Gateways, um eine ausreichende Abdeckung des Zielraums zu erreichen. Darüber hinaus betreiben z.B. einige Energieversorger eigene LoRaWAN Netze, um z.B. Strom-, Gas- und Wasserzähler aus der Ferne auslesen zu können und eine flächendeckendes Monitoring Ihrer Infrastruktur kostengünstig umzusetzen. Die Nutzung der privaten Infrastruktur bedarf einer individuellen Vereinbarung mit dem Betreiber des Netztes. Die Technologie eignet sich gut für die Umsetzung von urbanen Sensornetzwerken, sofern ein vorhandenes Netzwerk benutzt werden kann oder sich im Aufbau befindet. Der Aufbau eines flächendeckenden LoRaWAN Netzwerks, welches nur für ein urbanes oder regionale Klimamessnetz verwendet wird, dürfte in der Regel nicht wirtschaftlich darstellbar sein.

¹⁸ <https://www.thethingsnetwork.org>

e. NB-IoT (Narrow Band - Internet of Things) / LTE-M:

NB-IoT und LTE-M sind Technologien, die für IoT-Anwendungen mit geringem Stromverbrauch und großen Entfernungen entwickelt wurden und auf den i.d.R. vorhandenen Infrastruktur der 4G-Mobilfunknetze basieren. Im Vergleich zu Mobilfunkstandards wie 4G (LTE) oder 5G wird eine niedrige Bandbreite verwendet, was mit einer geringen Datenraten einhergeht, die aber für Sensornetze in denen nur wenige Daten übertragen werden, ausreichend ist. Die Technologie eignet sich gut für die Umsetzung von urbanen oder Regionalen Sensornetzwerken, da eine großflächig vorhandene Infrastruktur von verschiedenen Anbietern verwendet werden kann. Die Abdeckung kann bei den Mobilfunkanbietern als Karte eingesehen werden.

3.6.2 Grundgerüst für eine Datenplattform: Datenaufnahme, -ablage und -visualisierung

Die Daten aus Klimamessstationen eignen sich wie in diesem Bericht dargestellt für vielfältige Einsatzbereiche und es kann in der Zukunft mit weiteren Anwendungen z.B. im Bereich Smart-City gerechnet werden. Um die Daten aus Messstationen allgemein für verschiedene Personengruppen oder die Öffentlichkeit verfügbar zu machen, müssen die Daten auf einer geeigneten Plattform visualisiert und bereitgestellt werden. Als Plattform eignet sich idealerweise eine Serverarchitektur, die verschiedene Microservices bereitstellt. Hierzu zählen das Entgegennehmen der Daten über eine geeignete Schnittstelle, deren Speicherung sowie deren Bereitstellung über eine API für die weitere Verarbeitung und Visualisierung. Das Grundgerüst einer solchen Plattform ist in Abbildung 14 dargestellt.

Über die Schnittstelle zum Sensor-Netzwerk werden die Daten aus diesem auf den Applikations-Server übertragen. Als geeignete Schnittstelle kann beispielsweise das MQTT-Netzwerkprotokoll (Message Queuing Telemetry Transport) genutzt werden, was inzwischen insbesondere im IoT-Bereich weit verbreitet ist und eine einfache Möglichkeit zum Austausch von Messdaten und Statusinformationen darstellt.

Die in Abschnitt 3.5 (Tabelle 1) dargestellten Sensoren verfügen über keine lokale Datenspeicherung in den Geräten selbst, d.h. die Speicherung der relevanten Messdaten mit Zeitstempel und ggf. relevanten Meta-Informationen muss auf dem Applikations-Server durchgeführt werden. Das bedeutet auch, dass Messwerte, die nicht übertragen werden, verloren gehen.

Für diese Anwendung existieren speziell dafür zugeschnittene Datenbanken, englisch TSDB für Time Series Data Base. Konkrete Umsetzungen von solchen Datenbanken sind z.B. unter

den Namen InfluxDB, RRDTOOL, Prometheus und CreateDB verfügbar und gut dokumentiert. Die Spezifikation der verwendeten TSDB und des Servers sollte von Beginn an so gewählt werden, dass die Daten mit der gewählten Messfrequenz für eine Dauer von mehreren Jahren gespeichert und abrufbar bleiben. Ein Backup der Daten auf ein von der Plattform unabhängiges System oder Medium sollte regelmäßig durchgeführt werden, um bei Problemen jeder Art die aufgezeichneten Messdaten nicht zu verlieren.

Nach der Speicherung (Persistenz) werden die Daten in einem weiteren Schritt aus der Datenbank abgerufen und es erfolgt eine Korrektur und Qualitätskontrolle der Daten, d.h. eventuell aus der Kalibration verfügbare Daten werden auf die Daten angewendet. Außerdem sollte eine Prüfung auf die Plausibilität der Daten erfolgen, wie z.B. eine Prüfung, ob die Messwerte für die jeweiligen Umgebungsbedingungen in einem realistischen Bereich liegen. Weitere Kriterien für Korrektur und Kontrolle müssen je nach Anwendungsfall und eingesetzter Sensorik hinzugefügt werden.

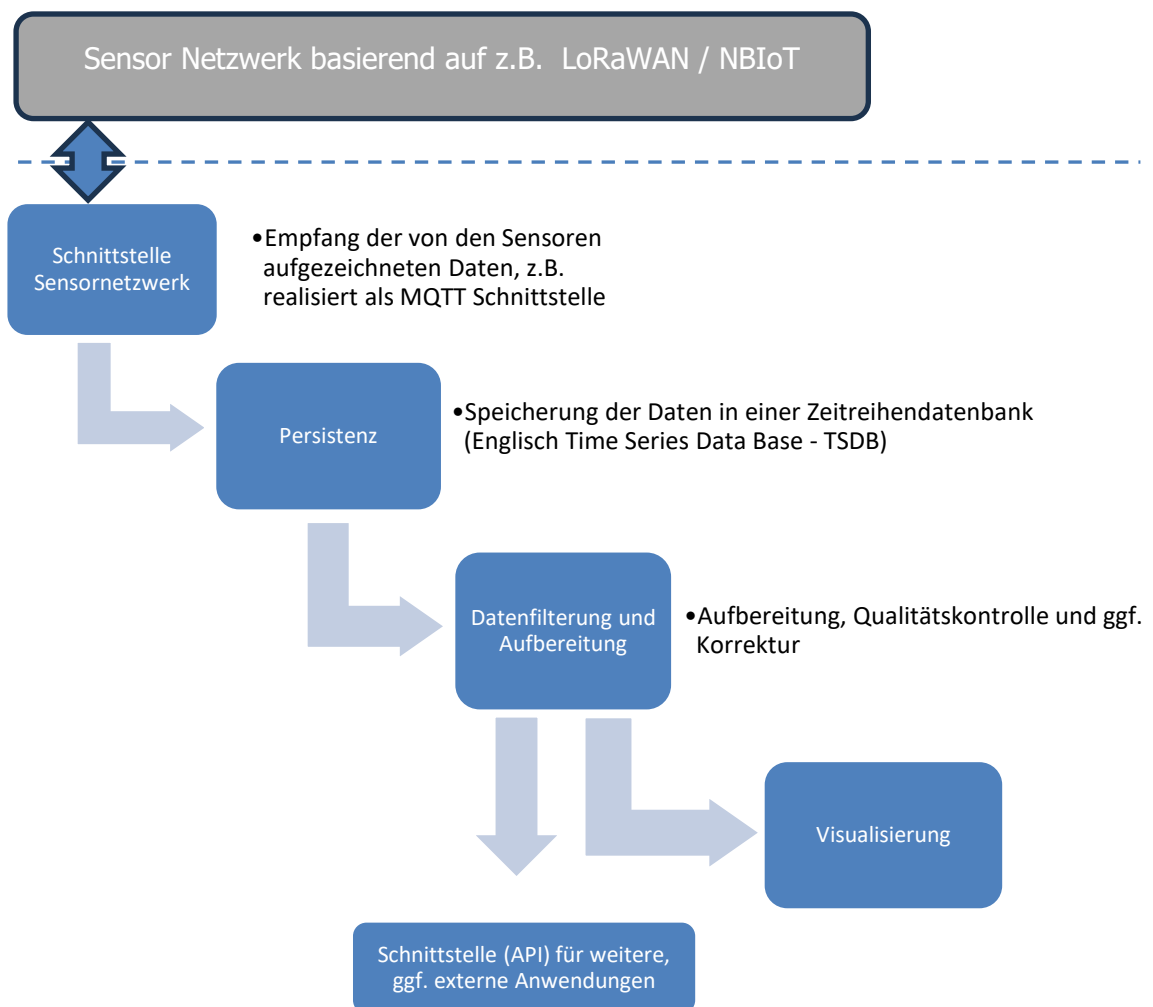


Abbildung 14: Grundgerüst für eine Datenplattform für die Speicherung, Qualitätskontrolle und Visualisierung der Daten aus einem Sensornetzwerk

Es wird empfohlen, die Reihenfolge in der dargestellten Form umzusetzen, da sie eine nachträgliche Korrektur und Filterung der Daten ermöglicht. Die im Nachgang angewandten Filter und Korrekturen sollten so dokumentiert werden, dass ein hohes Maß an Transparenz erreicht wird. Es ist so möglich, auch spätere Erkenntnisse über Einflüsse auf Messstationen oder zum Zeitpunkt der Implementation unbekannte Sensitivitäten von Messsensorik im Nachhinein zu berücksichtigen.

Die Visualisierung der Daten sollte auf Basis der korrigierten Daten geschehen und kann beispielsweise über Programmpakete wie Grafana erfolgen. Es existiert darüber hinaus eine Vielzahl an gut dokumentierten Programmpaketen mit Schnittstellen zu den o.g. TSDB, sodass eine individuelle Datenaufbereitung und Visualisierung über Programmiersprachen wie z.B. Python und R ebenfalls mit einfachen Mitteln möglich sind.

Eine Datenplattform sollte weiterhin Möglichkeiten bieten, die aufbereiteten Daten über eine Schnittstelle (API) für weitere Anwendungen, z.B. aus dem Bereich Smart-City, für Veröffentlichungen, die Weitergabe an Forschungsinstitute oder für weitere behördliche Aufgaben verschiedener Fachrichtungen, bereitzustellen.

3.6.3 Datenkontrolle und Qualitätssicherung

Um eine hohe Datenqualität sicherzustellen und Fehler bei der Interpretation der Daten zu vermeiden, wird neben einer automatischen Qualitätskontrolle eine regelmäßige manuelle Kontrolle empfohlen. Die eingehenden Daten sollten regelmäßig von einer erfahrenen Person geprüft werden, da automatische Qualitätskontrollen zwar regelmäßig auftretende und bekannte Muster erkennen können, jedoch müssen die den automatischen Filtern zugrundeliegenden Kriterien bei Bedarf nachjustiert oder verändert werden.

Weiterhin sollte in Ergänzung zu den in Kapitel 3.4.2 eingeführten Stationssteckbriefen ein Stationslogbuch geführt werden (z.B. innerhalb einer Asset-Datenbank oder bei geringem Stationsaufkommen zumindest als „lebendige“ Exceltabelle), in dem relevante Ereignisse wie Wartungen der Station und Veränderungen beschrieben werden, die einen Einfluss auf die Messung haben können. Darunter fallen Änderungen an der Station selbst, wie der Tausch von Sensoren und Änderungen in der Umgebung wie z.B. das Pflanzen von Bäumen oder das Errichten von Gebäuden. Diese Informationen sollten den Personen zur Verfügung gestellt werden, die über Zugang zu den Daten verfügen.

Weiterhin können die Daten, welche die zuvor für die jeweilige Station gesetzten Qualitätsstandards nicht oder nur teilweise erfüllen entsprechend gekennzeichnet werden und mit der Kennzeichnung weiteren Anwendern zur Verfügung stehen (s. Kapitel 4.2).



3.7 „Leuchtturm“-Beispiel: Das lokale Klimamessnetz der Stadt Gelsenkirchen

Mit Gelsenkirchen ist im Gebiet des RVR eine Kommune ansässig, die im Laufe der vergangenen Jahre schon auf vorbildliche Weise ein eigenes Klimamessnetz entwickelt und bereits zu großen Teilen umgesetzt hat. Dieses Kapitel beleuchtet die übergeordneten Umstände und Ziele, unter denen der Ausbau des eigenen Messnetzes vorangetrieben wurde und legt die wichtigsten Arbeitsschritte vom Konzept bis zum funktionierenden Messnetz dar.

Die Stadt Gelsenkirchen treibt seit 2017 die Digitalisierung der gesamten Stadt unter dem **Leitbild** „Gelsenkirchen – die Vernetzte Stadt“ voran. Vor diesem Hintergrund wurde in einem partizipativen Arbeitsprozess eine Digitalstrategie für Gelsenkirchen erarbeitet, die der Rat am 25. Juni 2020 beschlossen hat. Die „Integrierte Strategie der digitalen Stadt Gelsenkirchen“ bildet den Rahmen für die nachhaltige, soziale und partizipative Entwicklung der Vernetzten Stadt bis zum Jahr 2030 (Stadt Gelsenkirchen 2023a). Gelsenkirchen ist eines der insgesamt 73 „Modellprojekte Smart Cities“ (MPSC), die der Bund seit 2019 mit einem Gesamtbudget von 820 Mio. Euro fördert. Unter dem Motto „Gemeinsam. Intelligent. Vernetzt.“ sollen insgesamt sieben Smart-City-Einzelmaßnahmen mit einem **Gesamtvolumen** von 12,7 Mio. Euro bis 2025 umgesetzt werden. Eine dieser Maßnahmen ist das Projekt GE grünt: Umweltsensornetz & Grünes Bürgerbudget, für das 630.000 Euro zur Verfügung stehen und das in der Digitalstrategie der Stadt Gelsenkirchen im Handlungsfeld „Resilienz und Umweltdaten“ des Leitthemas „Energie und Umwelt“ angesiedelt ist.

Das Hauptvorhaben von „GE grünt“ ist der Aufbau eines Umwelt- und Klimadaten-Sensornetzwerks zur Information für BürgerInnen sowie zur intersektionalen Nutzung u.a. für die Mobilitäts-, Frei- und Grünflächenplanung sowie -pflege, aber auch für die datengestützte Umsetzung und Bewertung von Klimaanpassungsmaßnahmen. Die Erkenntnisse aus den Messdaten sollen darüber hinaus mit einem Grünen Bürgerbudget verknüpft werden, um Anpassungsmaßnahmen in Gelsenkirchener Quartieren umzusetzen und die Lebensqualität vor Ort nachhaltig zu steigern (Stadt Gelsenkirchen 2023b). Die Klimadaten werden zudem BürgerInnen, der Wissenschaft und allen Interessierten online frei zur Verfügung gestellt und in digitalen Medien, wie z.B. der City-App zeitnah eingebunden.

Tabelle 2: Auflistung der beiden in Gelsenkirchen verwendeten Stationstypen nach Ausstattung, dem Weg der Datenübertragung und den ungefähren Anschaffungskosten (Stand Februar 2023).

Station	Ausstattung	Datenübertragung	Kosten
 <p>Klimastation „NKE Wetteco ATM‘O“ (https://www.watteco.fr/produit/capteur-atmo-lorawan/)</p>	<p>Messgrößen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Temperatur • Feuchte • Luftdruck <p>Messbereiche: -20°C/+55°C; 0%/100%rH; 900hPa/1150hPa;</p> <p>Messgenauigkeiten: ±0,1°C; ±1,5%rH ±1,5%;</p>	LoRaWAN	ca. 600 €
 <p>Klimastation „Barani“ (Quelle: Stadt Gelsenkirchen)</p>	<p>Messgrößen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Temperatur, Taupunkt • Feuchte • Luftdruck • Solarstrahlung • Windrichtung/-geschwindigkeit • Niederschlagsmenge/-intensität <p>Messbereiche: -40°C/+105°C; 0%/100%rH; 300 hPa/1100 hPa; 0 Wm⁻²/ /2000 W/m⁻²; 0-360 °, 0- 85 ms⁻¹; 0-255 Pulse/10 min</p> <p>Messgenauigkeiten: ±0,2°C; ±1,5%rH; ±1,5; 5 % des Tageswerts; ±2 °, ±2 %; ±1% bei einer Intensität <100 mm/h</p>	LoRaWAN	ca. 2200 €

Die erste Erprobung von Messtechnik fand in einer Reihe von Anwendungsfällen, sog. „Use Cases“, im „Open Innovation Lab“ im ARENA PARK statt, das als Gelsenkirchener Experimentierlabor für Smart-City-Lösungen angelegt wurde. So startete im Sommer 2020 die testweise Installation verschiedener, digitaler Sensoren für Wetter-, Wind und

Bodendaten sowie Luftqualitäts- und Lärmintensitätsmessungen, z. B. zur Ermittlung des mikroklimatischen Stadtbildes. **Sensoren**, die sich im Rahmen dieser Praxis bewährten, wurden ab dem Frühjahr 2022 auf das gesamte Stadtgebiet ausgerollt. Zum bisherigen Standard entwickelten sich hierbei zwei Stationsausbaustufen: Eine Basisstation „NKE ATM'O“ des französischen Herstellers Watteco und eine Klimastation mit Vollausrüstung des slowakischen Herstellers Barani (s. Tabelle 2).

Mittlerweile (Stand Juli 2023) sind in Gelsenkirchen insgesamt 17 Klimamessstationen aus Eigenmitteln der Stadt installiert worden (s. z.B. Abbildung 4 in Kapitel 2.2). Die dazugehörigen Dienstleistungen (u.a. Testung von Sensorik, Ermittlung von technischen Spezifikationen, Standortsuche, Unterstützung der Komponentenzusammenführung durch Vorarbeiten, Einbindung ins städtische LoRaWAN-Netz, Programmierung einer IoT-Plattform zur Sammlung, Darstellung und zu ersten Analysen der Daten) wurden im Auftrag der Stadt durch die Firma comNET in Form der Projektbüroleitung des Open Innovation Labs und in Anlehnung an die Konzeptstudie „Stadtklimatisches und umwelttechnisches digitales Sensorik-, Analyse- und Monitoringsystem für die Stadt Gelsenkirchen“ (K.PLAN 2023) erbracht und durch Mittel aus dem NRW-Förderprogramm „Digitale Modellregionen“ (DMR) finanziert. Erst der weiterführende Ausbau zu einem Umweltsensornetz ist über das o.g. Bundesförderprogramm „Modellprojekte Smart Cities“ geplant. Im Winter 2023/2024 soll das Klimamessnetz im Gelsenkirchener Stadtgebiet insgesamt auf etwa 50 Messtationen erweitert werden. Welche Sensorik dabei zum Einsatz kommt, ergibt sich aus den aktuellen Marktanalysen bzw. Ausschreibungsverfahren.

Die Grundlage für die Auswahl geeigneter **Standorte** bildeten die Gesamtstädtische Klimaanalyse Gelsenkirchen (Kuttler et al. 2011) sowie das Kapitel „Analysen zum Klimawandel und Empfehlungen“ des „Klimakonzept 2030/45“ (Gertec 2023). Im Fokus der Standortwahl stand, dass die potenziellen Standorte repräsentativ für die Umgebung, den Stadttyp (bzw. das Klimatop) und die Wechselwirkungen innerhalb des Stadtgebietes sein sollten. Aus diesen Anforderungen wurden fünf wichtige klimatische Kriterien definiert:

- Hitzeinsel-Bereiche der Innenstädte
- Hitzeinsel-Bereiche der Industrie- und Gewerbegebiete
- Lage in einer Luftleitbahn und Kaltluftabfluss
- Innerstädtische Parkanlage – Klimaoase
- Hitzegefährdung in Wohnquartieren

Die Standortsuche wurde hierbei in 4 Prioritätsstufen unterteilt. In der ersten Prioritätsstufe erfolgte eine Übernahme der fünf einjährigen Standorte der Stadtklimaanalyse. Nachfolgend wurden für Stufe 2 weitere Stationen ausgewählt, die Bereiche mit extremer Hitze oder wirksamen Kühlpotenzial aufzeigten. Der Zweck von Stufe 3 war ein Klimaanpassungsmonitoring (Vergleich vorher/nachher) und in Stufe 4 sollten Frisch- und Kaltluftleitbahnen und spezielle Fragestellungen identifiziert und geprüft sowie generell eine Verbesserung der räumlichen Auflösung des Messnetzes erreicht werden. Vergleichbar zu den in Kapitel 3.4.2 aufgeführten Metadatenanforderungen erfolgte auch in Gelsenkirchen die Erstellung eines Kriterienkatalogs für die Dokumentation von Station und Standort (s. Tabelle 3).

Tabelle 3: Zu erfassende Parameter der Stationsbeschreibung (K.PLAN 2023).

Station Nr.	Adresse	Laternennummer	Koordinaten	Messstation	Messparameter	Standortauswahl	Zeitraum der Messungen	
							seit	bis

Folgestation	Messhöhe	Klimatop		Besonderheit der Lage (lt. Handlungskarte Klimaanpassung und Starkregengefahrenkarte)	Relative Gewichtung der Lage im Stadtgebiet	
		IST	Zukunft		Innen	Außen
Falls vorhanden						

Um eine hohe **Datenqualität** für die spätere Auswertung zu erreichen, beschreibt das Konzept zudem den Umgang mit den Rohdaten einzelner Messparameter in eigenen Metadatenblättern (s. Tabelle 4 für das Beispiel der Temperatur). Neben dem Übertragungsintervall einer jeden Messgröße werden hier Definitionen für Messwertausreißer, der Umgang mit Fehlwerten und spezifische Schwellenwerte für eine sinnvolle Weiterverarbeitung festgelegt, beispielsweise für (nicht amtliche) Warnhinweise. Bevor die Rohdaten durch hinterlegte Programme und Algorithmen auf einem Server qualitätsgesichert und aufbereitet werden können, müssen Sie auf diesen von den einzelnen Sensoren transferiert werden (s. Schaubild in Abbildung 15).

Tabelle 4: Metadatenerfassung der Rohdaten (K.PLAN 2023).

Messparameter	Mess-Modul	Beschreibung	Bemerkung	Mess-intervall	Übertragungs-intervalle
Lufttemperatur	PT1000	Tmittel, Tmax, Tmin des Übertragungs-intervalls		2 min	10 Minuten

Definition		Schwellwert für Warnmeldungen	
Ausreißer / Fehler	Datenlücken: Dauer berechnen		
Einzelwert weicht vom Vorwert ab um mehr als 20 %, LT > (2 * Stdabw. + Mittel aller anderen Stationen)	fehlende Daten / h fehlende Daten / Tag	30 °C 38 °C 0 °C t+f T um 20 Uhr, Folge von Hitzetagen	Hitzewarnung Extreme Hitzewarnung Frostwarnung / Glättewarnung Hitzeindex Warnung vor möglicher Tropennacht

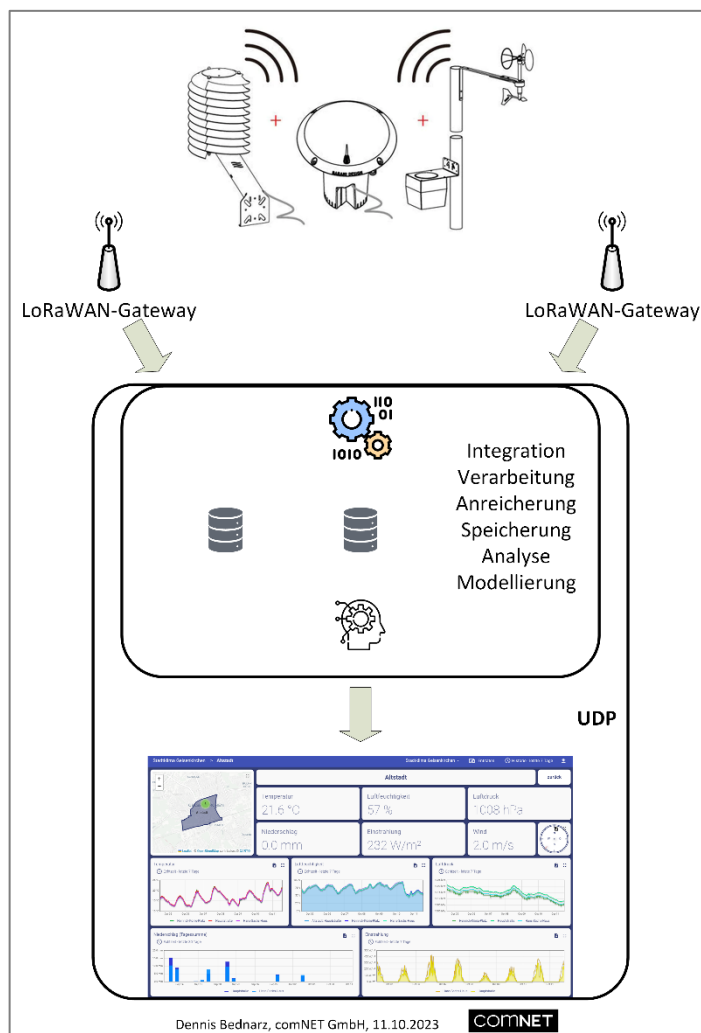


Abbildung 15: Schaubild der Verarbeitung "Vom Sensor zum Dashboard" (Quelle: comNET).

Die **Datenübertragung** erfolgt in Gelsenkirchen mithilfe von Gateways der Stadt Gelsenkirchen über LoRaWAN (s. Kapitel 3.6.1). Konkret erfolgt der Datentransfer zum LoRa Network Server der Gelsen-Net, von wo aus die von den Sensoren übermittelte Nutzlast (sog. Payload) auf einen Application-Server weitergeleitet wird, der mithilfe von hinterlegten Payload-Decodern die Nutzlast dekodiert. Die dabei entstehenden Rohdaten werden an „Kafka“¹⁹ weitergeleitet – ein sog. „Message Broker“ zur Verarbeitung von event- oder streamingbasierten Echtzeitdaten.

Auf dem Kafka-Storage-Layer wird der Import und Export der Datenevents mit dem bestehenden System, wie z.B. relationalen Datenbanken, integriert. Ein Event (Datenergebnis) besteht in der Regel aus einem Key-Value-Paar und einem Zeitstempel. Die Events werden mithilfe von Clients geschrieben, gelesen und verarbeitet. Das passiert durch die sogenannten Producer und Consumer. Producer sind die Client-Anwendungen, die Ereignisse in Kafka veröffentlichen (schreiben), und Consumer sind die Anwendungen, die diese Ereignisse abonnieren (lesen und verarbeiten). Die Events werden in Themen (sog. Topics) sortiert und im Rahmen eines „Message-Queueings“ auf Basis der konfigurierten Einstellungen vorgehalten. Im Falle des Klimamessnetzes Gelsenkirchen könnte das Topic beispielhaft "stadtklima-gelsenkirchen" heißen.

Mithilfe der Stream-Processing-Bibliothek „Faust“ können Anwendungen in Python geschrieben werden, welche die Kafka-Datenströme aus den definierten Topics in Echtzeit verarbeiten und bei Bedarf aggregieren. In diesem Schritt laufen folglich die automatisierte Generierung von Mittel- und Extremwerten und weiterer Auswertungen nach wissenschaftlichen Standards (z.B. von Klimakennwerten) ab sowie Qualitätsalgorithmen über die erhobenen Datensätze.

Nach erfolgter Verarbeitung und Sicherung können die Daten in der Folge mittels Kafka-Integration im Dashboard „Stadtklima Gelsenkirchen“ visualisiert werden. Hier kann der Anwender die Zeitreihen des voreingestellten oder eines selbstgewählten Zeitraums sowie Echtzeitwerte (zuletzt gemessener Wert des jeweiligen Sensors) einsehen und die Daten als CSV- oder Exceldatei über das jeweilige Widget herunterladen. Zusätzlich ist ein Massenexport über eine bereitgestellte REST API einzelner oder mehrerer Sensoren/Standorte möglich.

Die Konzeptstudie (K.PLAN 2023) beschäftigt sich neben der Sammlung, Aufbereitung und Verwaltung der im eigenen Messnetz erhobenen Datensätzen zusätzlich mit deren **Erweiterung durch externe Umweltmessdaten**.

¹⁹ <https://kafka.apache.org/intro>

Erörterte und für den Raum Gelsenkirchen relevante Messnetze sind etwa jene von Netatmo, WeatherUnderground, Emscher-Lippe Thingsnet, BoKliNet, das DWD-Netz, Accuweather, LANUV NRW, die Messnetze der Städte Wuppertal und Dortmund, das Netz der EGLV (Emschergenossenschaft Lippeverband), das Portal Luftdaten.info sowie OpenSenseMap (vgl. Kapitel 2).

Zusätzlich werden Anbieter von **Fernerkundungsdaten** benannt, deren Satelliten- und Radardatensätze ebenfalls dazu in der Lage sind, das Gelsenkirchener Messnetz sinnvoll zu erweitern und aufzuwerten. Genannt werden hierbei das Niederschlagsradar des DWD, das Buienradar, das Erdbeobachtungsprogramm Copernicus, der Earth Explorer des USGS (United States Geological Survey), das Portal Earth.nullschool.net und das neuseeländische OpenUV.

Die **Datenverwendung** gestaltet sich in Gelsenkirchen durch den Gedanken der „Vernetzten Stadt“ äußerst vielfältig. Die Daten fließen zukünftig in vielseitige thematische Bereiche ein und werden von unterschiedlichen Zielgruppen aufbereitet bzw. genutzt, sind also nicht ausschließlich dem Themenbereich Stadtklima vorbehalten. Eine Auswahl ist im Folgenden aufgelistet:

- **Genauere und erweiterte Beurteilung des Stadtklimas:** Inhaltliche Analysen, städtische und regionale Planungen, Datengrundlage für Klimamodelle
- **Katastrophenschutz:** Signalmöglichkeiten für Hitze, Sturm und Starkregen (keine amtlichen Warnungen!)
- **Gesundheit:** z.B. Hitzebelastung und „kühle Orte“
- **Umweltbildung:** z.B. Wetter in der Stadt, Klimadatenkurven bei konkreten Wetterereignissen, Klimawandel
- **Wissenschaft:** gute Datengrundlage für wissenschaftliche Analysen, vor allem durch die Verknüpfung mit Modellen und fernerkundlichen Daten (s.o.)

4 Der Weg vom Lokalen zum Regionalen Klimamessnetz

4.1 Allgemeine Empfehlungen zur zukünftigen Ausgestaltung des RVR-Messnetzes

Die umfangreichen Informationen der vorangegangenen Kapitel haben aufgezeigt, wann, wie und wo sich der Aufbau zusätzlicher Messstandorte im RVR lohnen kann. Als Zusammenfassung und Ausblick sollen in diesem Kapitel allgemeine Empfehlungen zur zukünftigen Ausgestaltung des RVR-Messnetzes gegeben werden.

Wie im Kapitel 3.4.1 aufgezeigt, ist bei Einsatz von „Low-Cost“-Messsystemen ein Vergleich mit einer Messstation von hoher Messqualität als **Referenz** notwendig. Gerade in den Kommunen, die zurzeit über keine Stationen des DWD oder des LANUV verfügen, muss die Auswahl dieser Referenzstation besonders aufmerksam erfolgen und die Repräsentativität von Stationen in Nachbarkommunen geprüft werden.

Wie in Kapitel 3 beschrieben, ist die Auswahl der zu messenden Parameter immer und vorrangig an die aktuelle Fragestellung bzw. den aktuellen Anwendungsfall anzupassen. Gemessen an der Diskrepanz zwischen aktuellem Bestand (vgl. Kapitel 2.3) und vermutetem Bedarf ist den Kommunen und dem RVR bei der anwendungsbezogenen Weiterentwicklung des Messnetzes ein besonderes Augenmerk auf den Ausbau von **Temperatur- und Luftfeuchtemessungen** (z.B. mindestens durch Basisstationen, s. Tabelle 1 in Kapitel 3.5) zu empfehlen.

Ein Themenschwerpunkt für die Empfehlungen liegt bei der Ausgestaltung des Messnetzes anhand von **Klimatopen**. Angesichts eines voranschreitenden Klimawandels und den damit einhergehenden prognostizierten zunehmenden Hitzebelastungen, wird zudem empfohlen, eine höhere Anzahl an Messungen in den siedlungsbezogenen Klimatopen im Bereich des RVR durchzuführen. Einerseits ist bekannt, dass diese Bereiche oftmals Hotspots der Belastung darstellen. Andererseits stellen diese Klimatope auch den Hauptaufenthaltsbereich der meisten EinwohnerInnen des RVR dar. Es empfiehlt sich daher ein Monitoring besonders heißer Orte und/oder von siedlungsraumnahen Ausgleichsräumen im Stadtgebiet durchzuführen. Die Messungen sollten immer repräsentativ für einen Standort oder ein Quartier sein und zum Ziel der Messung passen (s. auch Kapitel 3.4).

Weiterhin kann beispielsweise von Interesse sein, mehr Messungen in Bereichen mit Gewerbe- und Industrieklima durchzuführen, da sich dort viele Menschen in ihrer Arbeitszeit

aufhalten und eine Überprüfung auf gesunde Arbeitsverhältnisse gewünscht sein kann. Bedarf aus der räumlichen Analyse zeigt sich hier bspw. in den großen Gebieten in Duisburg und Dortmund (Abbildung 16).

Innenstadtklimatope kommen nicht in allen Kommunen des RVR vor (vgl. Abbildung 16). In den Kommunen, welche über dieses Klimatop verfügen, mit Ausnahme von Gelsenkirchen, empfiehlt es sich, mit hoher Priorität Anwendungsfälle zu identifizieren und weitere Messtellen einzurichten. Innenstadtklimatope weisen meist neben dem Gewerbe-/Industrieklimatop die höchsten Wärmebelastungen auf. Gleichzeitig halten sich dort viele BürgerInnen auf, sei es beim Gang durch die Einkaufsstraßen, am Arbeitsplatz oder in den Wohngebäuden. Ähnliches gilt, mit nachrangiger Priorität für den Klimatoptyp Stadtklima, das in kleineren Kommunen auch in den Innenstädten vorherrscht. Dort gibt es aktuell laut der hier analysierten Daten nur repräsentative Stationen in Gelsenkirchen, Essen und Moers.

In Zeiten steigender Hitze in Städten sind Wälder und Gewässer wichtige Ausgleichsräume mit hohem human-bioklimatischen Komfort. Aktuell wird in diesen Klimatopen im RVR kaum bis gar nicht gemessen (vgl. Kapitel 2.2). Diese Räume sollten in den zukünftigen Messnetzen nicht ausgespart werden, sondern können den Menschen aufzeigen, dass hier an heißen Tagen Abkühlung zu erwarten ist und sich Besuche lohnen.

Bezogen auf das Freilandklimatop ist mindestens eine Referenzstation pro Kommune empfehlenswert. Dabei sollten Übergangsbereiche mitgedacht werden: Liegt eine Station bspw. im Grenzgebiet zweier Kommunen sollte geprüft werden, ob diese Station von beiden Kommunen als Referenz verwendet werden könnte. Dort, wo solche Referenzstationen fehlen, kann es sich für Einzelkommunen lohnen, mit deren Nachbarn in Kontakt zu treten und gemeinsam eine neue Referenz zu planen (Vernetzung/Kostenoptimierung).

Besonders interessant für Messungen können auch Orte mit Parkklima sein, da diese oft Rückzugsräume bei Hitzebelastungen darstellen können. Bisher sind Messstellen in diesem Klimatop in Dortmund, Gelsenkirchen, Essen, Hamm und Duisburg vorhanden. Bei der Wahl der konkreten Messstandorte sollten vorrangig öffentlich zugängliche parkähnliche Grün- und Freiflächen im Parkklimatop untersucht werden. Neben der Verfügbarkeit in einzelnen Kommunen kann die Entfernung von Grün- und Parkanlagen zu belasteten Siedlungsräumen ein zweiter wichtiger Faktor sein.

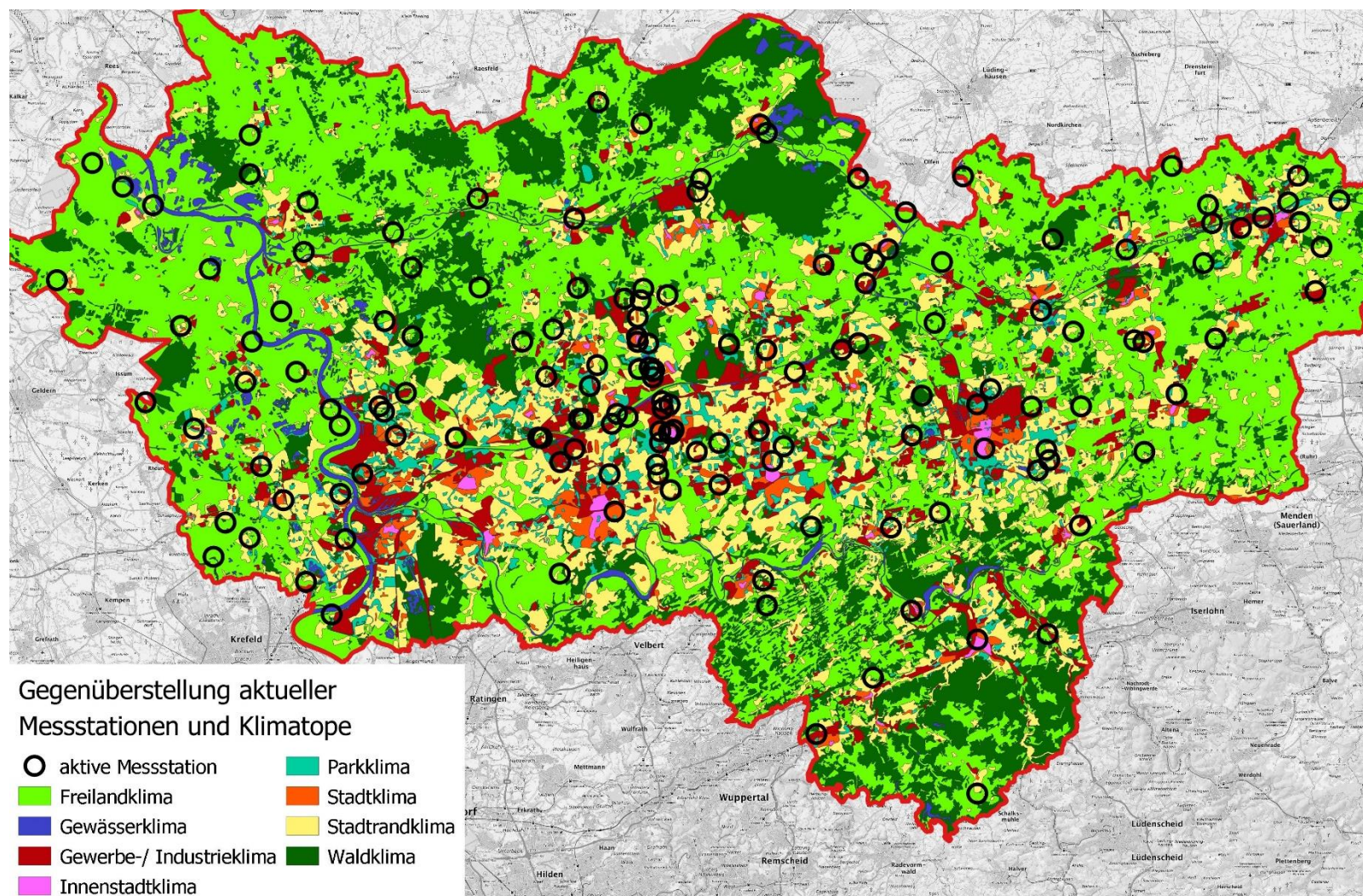


Abbildung 16: Gegenüberstellung aktueller Messstationen im RVR mit der Flächenverteilung der Klimatope. (Quelle: eigene Abbildung nach Angaben von DWD, LANUV, der Stadt Gelsenkirchen und EGLV.)

Das letzte im RVR vorkommende Klimatop ist das Stadtrandklima: Hinter Freiland- und Waldklima ist es das Klimatop mit dem drittgrößten Flächenanteil. Hier ist in Bezug auf den Gesamtdatensatz aktuell eine überdurchschnittliche Zahl an Stationen vorhanden. Zu begründen ist dies dadurch, dass es in diesem Klimatop vermutlich einfacher ist einen Standort zu finden, der WMO-konforme Messungen erlaubt. Wie beim Freilandklima empfiehlt es sich, dass jede Kommune eine Station in diesem Klimatop in ihr Messnetz integriert. Analog zum Freiland kann auch hier geprüft werden, ob Kommunen eine Messstation gemeinsam planen und nutzen möchten.

Ein letzter Themenbereich für allgemeine Empfehlungen bezieht sich auf das Relief im RVR (s. Abbildung 17). Insbesondere wenn es im Laufe der Zeit in den einzelnen Kommunen oder gesamthaft für den RVR um Nachverdichtungsprozesse geht, sollte dieser Faktor mitberücksichtigt werden. Im ersten Schritt empfiehlt es sich bezogen auf den RVR insgesamt je Klimatop auf jeder Höhenstufe ungefähr gleich viele Stationen zu betreiben. Im RVR existieren Höhenunterschiede von insgesamt 433 m. Die geringste Höhen ü. NN befinden sich mit ca. 15 - 20 m in der Nähe des Rheins bei Xanten, während südlich von Hagen der höchste Punkt mit rund 444 m ü. NN erreicht wird. Da die Lufttemperatur im Mittel mit 0,65 K pro 100 m Höhenunterschied sinkt, können sich auf diese Weise sehr unterschiedliche Lokalklimate ergeben. Anschließend an dieses Thema kann es für Kommunen interessant sein, Messstationen an Orten mit Kaltluftprozessgeschehen zu etablieren (vgl. 3.4.1). In Gelsenkirchen wurden dafür Ergebnisse einer Stadtklimaanalyse zur Standortwahl genutzt (vgl. Kapitel 3.7).

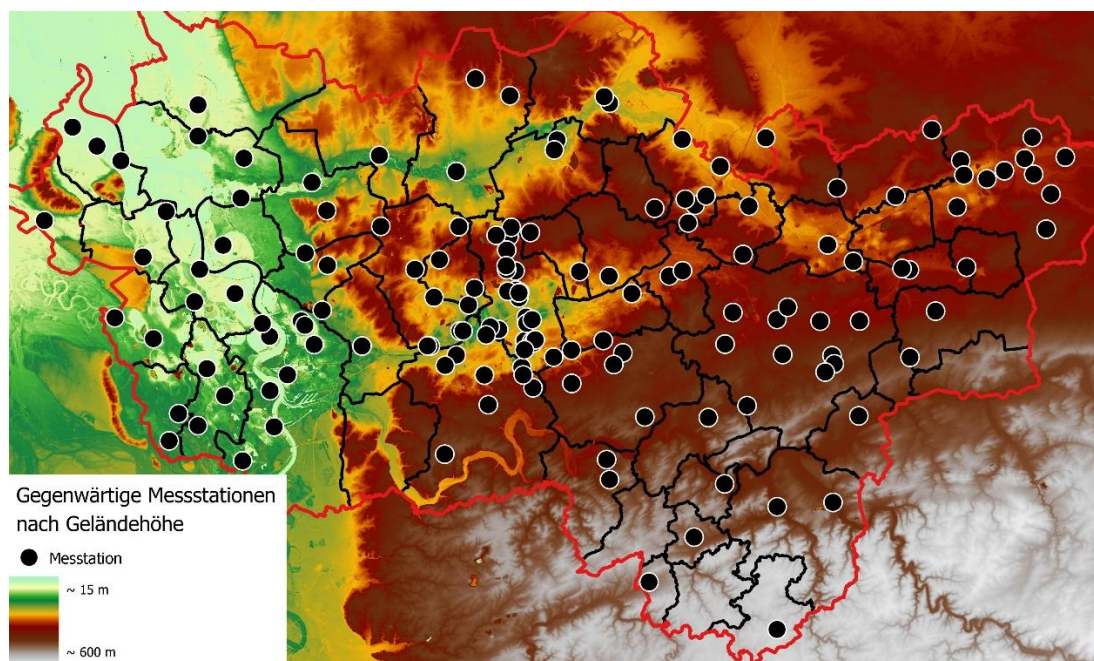


Abbildung 17: Gegenüberstellung der aktuellen Messstationen mit der Geländehöhe (Quelle: eigene Darstellung).

4.2 Überlegungen zur Zusammenfassung lokaler Klimamessungen zu einem gesamthaften RVR-Messnetz

Der RVR verfolgt das langfristige Ziel, die in den vielen Kommunen und durch verschiedene Behörden durch Einzelmessplätze und Messnetze erhobenen sowie aus anderen Quellen (z.B. Fernerkundung) extrahierten und für den Raum bedeutsamen klimatologischen Datensätzen unter eigenem Schirm zu sammeln, zu ordnen, weiterzuverarbeiten und letztlich bereitzustellen.

Das ambitionierte Vorhaben der Verarbeitung eines Datensatzes von solcher Vielfalt, Menge und mit hoher Empfangsrate birgt allerhand Herausforderungen, die im Rahmen dieses Kapitels andiskutiert werden.

Im Zentrum der Überlegungen steht die **Vergleichbarkeit** der angehäuften Datensätze. Da selbst die Daten gleicher Messgrößen von qualitativ verschiedenen, kalibrierten oder unkalibrierten Sensoren gemessen wurden, verschiedene oder gar keine Qualitäts- oder Aufbereitungsalgorithmen durchlaufen haben und zusätzlich an unterschiedlichen Standorten mit unterschiedlicher Umgebung bei unterschiedlichem Anwendungszweck (lokale oder regionale Repräsentativität) oder in unterschiedlicher Messhöhe ü. NN / u.Gr. erhoben wurden, muss besonderes Augenmerk auf den Metadaten dieser Datenströme liegen, um dem Datenendnutzer alle Informationen zur bestmöglichen Interpretation an die Hand zu geben.

Die erste Stufe der Vereinheitlichung geschieht nicht erst beim RVR, sondern bereits bei den Datenurhebern, beispielsweise in den Kommunen. Diese achten auf die lückenlose Dokumentation der Metadaten von Messung, Standort und Datenverarbeitung nach dem Stand der Technik (s. Kapitel 3.4.2 und 3.6.3). Der vorliegende Leitfaden bietet hierfür die ideale Unterstützung und sorgt bereits von der Planung bis zur Datenerhebung für ein einheitliches Vorgehen.

Im zweiten Schritt sollte der RVR, ggf. auch im Dialog mit den Datenurhebern, einen Datenstandard für ankommende Datensätze für jede verfügbare Messgröße definieren. Dieser umfasst Datenformate (z.B. CSV, Excel, txt oder netCDF), Einheiten (z.B. für die Temperatur °C oder K) und Kennzeichnungen für angewandte Metriken (Mittelwerte, Extrema etc.). Auch Qualitätsalgorithmen (Fehlwertkennung, Plausibilitätsprüfung anhand von Schwellwerten für einzelne Messgrößen etc.) könnten durch einen solchen Datenstandard definiert werden, etwa in Form einer ziffernbasierten Qualitätseinordnung. Ein gutes Beispiel eines sehr detaillierten Datenstandards über viele Organisationen und Bundeslandgrenzen hinweg liefert jener des vom BMBF geförderten

Verbundforschungsprojektes „Stadtklima im Wandel [UC]²“ (Scherer et al. 2022). Der hier definierte Standard versucht sowohl PALM-4U-Modellergebnisse als auch zur Validierung des Modells erhobene Messdatensätze verschiedener Urheber und Untersuchungsgebiete in Berlin, Stuttgart und Hamburg zu vereinen und favorisiert dabei eine Open-Data-Policy. Der dritte Schritt zur Etablierung eines Gesamtmessnetzes ist die Bereitstellung einer Datenplattform, auf der die zuvor gekennzeichneten Datensätze in den entsprechenden Datenformaten auflaufen und weiterverarbeitet werden können. So kann es etwa auch im Nachgang möglich sein, eine zuvor vergebene niedrigere Qualitätseinstufung durch wissenschaftlich fundierte Standardalgorithmen der weiteren Datenverarbeitung auf ein höheres Qualitätslevel zu heben. Wichtig ist auch hier die erneute und nachvollziehbare Kennzeichnung bearbeiteter Datensätze, etwa durch Revisionsnummern und weitere entsprechende Metadaten, die Aufschluss über die angewandten Prozesse geben. Eine webbasierte Schnittstelle (z.B. ein Dashboard) sollte abschließend ein Toolkit (z.B. zur Darstellung von Tagesgängen, Differenzen, Langzeitauswertemöglichkeiten etc.) mit Suchfunktion und weiteren Einstellungsmöglichkeiten bereitstellen, um dem Datenendnutzer maßgeschneiderte Inhalte in Form von Abbildungen und Datensätzen in definierten Standardformaten ausgeben zu können.

4.3 Diskussion von Chancen und Risiken des Messnetzausbaus

Durch den Ausbau einzelner kommunaler Messnetze in den Grenzen des RVR und ihre Zusammenführung auf einer gemeinsamen Plattform unter dem Dach des RVR ergeben sich vielfältige Chancen für die Region, aber auch einzelne Risiken.

Je größer die Dichte an standardisierten Messungen im RVR-Gebiet ist, desto größer zeigt sich der Pool der für die unterschiedlichsten, fachübergreifenden Anwendungsziele (s. Kapitel 3.1 oder 3.7) verfügbaren Daten. Insbesondere beim stetigen Ausbau des Messnetzes bietet sich zudem von Beginn an die Chance, gemeinschaftlich einheitliche Standards zu definieren, die nicht nur die Interpretation und Auswertung der Messungen für alle Kommunen in gleicher Weise ermöglichen, sondern auch zur besseren Nachvollziehbarkeit von Veröffentlichungen einzelner Kommunen für Außenstehende beitragen. Die Definition und Verschriftlichung einheitlicher Richtlinien zum Ausbau von Klimamessstationen sowie der Aufbereitung und Auswertung derer Daten, die mit dieser Veröffentlichung ihren Anfang genommen hat und bei Bedarf für einzelne Teilaspekte vertiefend in weiterführenden Studien (z.B. zu Datenstandards, Auswertemethoden)

fortgeschrieben werden kann, hebt den Wissensstand zum Thema „Klimamessungen und Klimamessnetze“ daher auf ein einheitliches und hohes Niveau an.

Zu einer größeren Stationsdichte tragen neben den von Kommunen oder Behörden errichteten Stationen auch jene aus „Citizen-Science“-Projekten bei (s. Kapitel 2.3 und 3.5). Diese eignen sich besonders gut zur besseren Datenabdeckung oder zur Schließung von Messnetzlücken und lassen die Bevölkerung partizipieren. Risiken sind hierbei jedoch die unbekannte Standort- und Datenqualitätsgröße, die entsprechend in den Daten gekennzeichnet werden muss (s. Kapitel 4.2). Eine weitere Möglichkeit, die Bevölkerung teilhaben zu lassen und auf Klimathemen zu sensibilisieren, sind Bildschirme oder Infotafeln im Stadtbild, die mit aufbereiteten Messdaten des Klimamessnetzes gespeist werden. Diese eignen sich besonders in Wartebereichen wie Bahnhöfen, Bushaltestellen oder Bürgerämtern, aber auch in Wartezimmern von ÄrztInnen. Neben Echtzeitinformationen können auf diese Weise auch Hinweismeldungen bei zu starker Hitze, Sturm- oder Starkregenereignissen ausgegeben werden.

Da die einzelnen Kommunen im RVR unterschiedlich viel Geld und personelle Ressourcen zur Verfügung haben, steht zu befürchten, dass mancherorts Lücken im Messnetz entstehen könnten. Auch Qualitätsschwankungen in der Datenerhebung sind nicht auszuschließen, obwohl zumindest eine entsprechende Dokumentation in den Metadaten möglich gemacht werden sollte und auch im Rahmen dieses Berichts günstige Alternativen für Messaufbauten präsentiert wurden (s. Kapitel 3.5). Eine Möglichkeit der Abfederung solcher Ungleichheiten bieten Fördermaßnahmen wie beispielsweise das von der Stadt Gelsenkirchen genutzte „Modellprojekte Smart Cities (MPSC)“ (s. Kapitel 3.7). Auch im Rahmen von Klimaanpassungskonzepten sind Förderungen einzelner Maßnahmen, deren Evaluierung durch die Installation von Messstationen durchgeführt werden kann, eine Möglichkeit zur Förderung. Es wird empfohlen, das Einwerben von Drittmitteln in regelmäßigen zeitlichen Abständen zu prüfen und proaktiv auf entsprechende Landes- oder Bundesbehörden zuzugehen.

Zuletzt ist noch einmal zu bekräftigen, dass der Ausbau von Klimamessstationen stets mit einem übergeordneten Ziel zu erfolgen hat und zweckungebundenes Messen zu vermeiden ist. Ungenutzte Datenanhäufungen können jedoch im Rahmen von studentischen Abschlussarbeiten oder anderweitig in der Forschung Verwendung finden. Daher wird empfohlen, hierzu mit Hochschulen und Universitäten im RVR in Dialog zu treten und Kooperationen zu erarbeiten und zu stärken.

5 Literaturverzeichnis

39. BImSchV (2010): Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen vom 2. August 2010 (BGBl. I S. 1065)
- ABC (2020): ABC – Augsburg bleibt cool. https://www.uni-augsburg.de/de/fakultaet/fai/geo/forschung/projekte/2020-2018_abc_phy/ bzw. <https://www.uni-ulm.de/nawi/nawi-wichem/forschung/verbundprojekt-abc/>
- Alfonso Solar, D., Bastida Molina, P., Montuori, L., und Vargas Salgado, C. A. (2019): Monitoring and evaluation of thermal comfort in urban areas: application to Valencia city. In *Proceedings 5th CARPE Conference: Horizon Europe and beyond* (pp. 98-105). Editorial Universitat Politècnica de València.
- Bartoschek, T., Wirwahn, J., Pesch, M. (2018): Beitrag B: Thomas Bartoschek, Jan Wirwahn, Mario Pesch – senseBox und openSenseMap: Umweltmonitoring für Jedermann. Tagungsband UIS 2018. <https://ceur-ws.org/Vol-2197/paper2.pdf> (zuletzt abgerufen: 20.07.2023)
- Blazejczyk, K., Epstein, Y., Jendritzky, G., Staiger, H., und Tinz, B. (2012): Comparison of UTCI to selected thermal indices. *International journal of biometeorology*, 56, 515-535.
- BMDV (2021): Förderprojekt „Smart Air Quality Network“, abgeschlossen 2021. <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/smart-air-quality-network-smartaqnet.html>, (zuletzt besucht: 26.07.2023)
- Budd, G. M. (2008): Wet-bulb globe temperature (WBGT)—its history and its limitations. *Journal of science and medicine in sport*, 11(1), 20-32.
- Davenport, A.G., Grimmond, C.S.B., Oke, T.R. and Wieringa, J. (2000): Estimating the roughness of cities and sheltered country. *Proceedings 12th Conference on Applied Climatology*, Asheville, NC, American Meteorological Society, Boston, pp. 96-99.
- Dimiceli, V. E., Piltz, S. F., und Amburn, S. A. (2011). Estimation of black globe temperature for calculation of the wet bulb globe temperature index. In *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science* (Vol. 2, pp. 19-21).
- DIN EN 12341 (2014): Außenluft - Gravimetrisches Standardmessverfahren für die Bestimmung der PM10- oder PM2,5-Massenkonzentration des Schwebstaubes; Deutsche Fassung EN 12341:2014
- DIN EN 14211 (2012): Außenluft - Messverfahren zur Bestimmung der Konzentration von Stickstoffdioxid und Stickstoffmonoxid mit Chemilumineszenz; Deutsche Fassung EN 14211:2012
- DIN EN 16339 (2013): Außenluft - Bestimmung der Konzentration von Stickstoffdioxid mittels Passivsammler; Deutsche Fassung EN 16339:2013

- DWD (2023a): Das Wetter- und Klimalexikon des Deutschen Wetterdienstes.
<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html;jsessionid=0CE05A030B4CA74BA5D34C023DF15EA3.live21062?lv2=102936&lv3=103160> (zuletzt besucht: 04.07.2023)
- DWD (2023b): Wärmebelastungsvorhersage für Innenräume (2006/2011).
<https://www.dwd.de/DE/leistungen/hitzewarnung/innenraum.html?lsbid=463806> (zuletzt besucht: 04.07.2023)
- DWD (2023c): Pyranometer – Messung von Global- und Diffusstrahlung.
<https://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/pyranometer.html;jsessionid=03C6D148F2E2A569850CDF939BF6AC5E.live31094?nn=16102> (zuletzt besucht: 19.07.2023)
- DWD (2023d): Regionales Strahlungszentrum WMO.
https://www.dwd.de/DE/forschung/atmosphaerenbeob/lindenbergersaeule/strahlungsprozesse/rrc_node.html (zuletzt besucht: 24.07.2023).
- DWD (2022): Die Kalibrierlaboratorien des Deutschen Wetterdienstes - Regional Instrument Centre der WMO Region RA VI-. 21.02.2022
- EGLV – Emscher-genossenschaft und Lippeverband (2023): Pegelstände im Emscher- und Lippegebiet. <https://www.eglv.de/niederschlag-und-pegel/> (zuletzt besucht: 27.07.2023)
- Evangelischer Kirchenkreis Recklinghausen (2023): Emscher-Lippe-Things.Net. Info-Material.
<https://el-things.net/info-material> (zuletzt besucht: 27.07.2023)
- Fraunhofer IZM (2023): Internet-of-Things & Big Data.
<https://www.izm.fraunhofer.de/de/trendthemen/internet-of-things---big-data.html> (zuletzt besucht: 26.07.2023)
- GEO-NET (2022): Leitfaden für den Einsatz von Stadtklimamodellen. – GEO-NET Umweltconsulting GmbH. Im Auftrag von Regionalverband Ruhr. Hannover. 56 S.
https://www.rvr.ruhr/fileadmin/user_upload/01_RVR_Home/02_Themen/Umwelt_Oekologie/Klima/Stadtklima/RVR_Leitfaden_Stadtklimamodelle_2023.pdf (zuletzt besucht: 20.10.2023).
- Gertec (2023): Klimakzept 2030/45 für die Stadt Gelsenkirchen. Im Auftrag der Stadt Gelsenkirchen in Zusammenarbeit mit EPC – Projektgesellschaft für Klima. Nachhaltigkeit. Kommunikaion. mbH, Corporate Values GmbH, EEB ENERKO Energiewirtschaftliche Beratung GmbH und Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
- Gubler, M., Christen, A., Remund, J., und Brönnimann, S. (2021): Evaluation and application of a low-cost measurement network to study intra-urban temperature differences during summer 2018 in Bern, Switzerland. *Urban climate*, 37, 100817.
- Höppe, P. (1999): The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International journal of Biometeorology*, 43, 71-75.

- K.PLAN (2023): Stadtklimatisches und umwelttechnisches digitales Sensorik-, Analyse- und Monitoringsystem für die Stadt Gelsenkirchen - Konzeptstudie. Im Auftrag der Stadt Gelsenkirchen, Bochum 2023.
- KlimaWohL (2023): KlimaWohL_Lab aktuell. <https://klimawohl.net/> (zuletzt besucht: 04.07.2023)
- Kreis Recklinghausen (2023): Sensordaten und was sie über den Kreis Recklinghausen verraten. <https://www.regioklima.de/klima-im-kreis/sensordaten> (zuletzt besucht: 05.10.2023)
- Kumar, P., Morawska, L., Martani, C., Biskos, G., Neophytou, M., Di Sabatino, S., Britter, R.: The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. In: *Environment International*, 75 (2015), pp. 99–205
- Kuttler, W., Mersmann, M., Barlag, A.-B. (2011): Gesamtstädtische Klimaanalyse Gelsenkirchen – Darstellung und Bewertung der klimatischen und lufthygienischen Situation unter zusätzlicher Berücksichtigung des globalen Klimawandels. Universität Duisburg Essen, Campus Essen, Fakultät für Biologie, Angewandte Klimatologie und Landschaftsökologie. Im Auftrag der Stadt Gelsenkirchen, Referat Umwelt. Oktober 2011.
- LANUV (2021): Messen von Stickstoffdioxid in der Außenluft. Nachweis der Gleichwertigkeit von Passivsammlern. LANUV-Fachbericht 108. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Recklinghausen 2021
- LANUV (2023a): Messorte der Luftqualitätsüberwachung in NRW. <https://www.lanuv.nrw.de/umwelt/luft/immissionen/messorte-und-werte> (zuletzt besucht: 20.07.2023)
- LANUV (2023b): Niederschlag. <https://www.lanuv.nrw.de/umwelt/wasser/niederschlag> zuletzt besucht: 20.07.2023)
- Maronga, B., Banzhaf, S., Burmeister, C., Esch, T., Forkel, R., Fröhlich, D., Fuka, V., Gehrke, K. F., Geletič, J., Giersch, S., Gronemeier, T., Groß, G., Heldens, W., Hellsten, A., Hoffmann, F., Inagaki, A., Kadasch, E., Kanani-Sühring, F., Ketelsen, K. und Raasch, S. (2020): Overview of the PALM model system 6.0. *Geoscientific Model Development*, 13(3), 1335–1372. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-1335-2020>
- Maronga, B., Gryschka, M., Heinze, R., Hoffmann, F., Kanani-Sühring, F., Keck, M., Ketelsen, K., Letzel, M. O., Sühring, M. und Raasch, S. (2015): The Parallelized Large-Eddy Simulation Model (PALM) version 4.0 for atmospheric and oceanic flows: model formulation, recent developments, and future perspectives. *Geoscientific Model Development*, 8(8), 2515–2551. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-2515-2015>
- MINT-Cluster Bochum (2023): Klimanetzwerk Bochum. <https://www.mint-bochum.de/klimanetzwerk/klimanetzwerk-bochum/> (zuletzt besucht: 27.07.2023)
- Nakamura, Y. und T.R. Oke (1988): Wind, temperature and stability conditions in an E-W oriented urban canyon, *Atmospheric Environment*, 22, pp. 2691-2700.
- NuTree (2023): NuTree – Sensor- & KI-gestützte Wertschöpfungskette Baum, <https://www.nutree-eip.de/> (zuletzt besucht: 10.07.2023))

- Oke, T. R. (2004): Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites (Vol. 81, p. 51). Geneva: World Meteorological Organization.
- openSenseLab gGmbH (2023): Über uns. <https://opensensemap.org/about> (zuletzt besucht: 20.07.2023)
- Pfafferott, J. und Becker, P. (2008): Erweiterung des Hitzewarnsystems um die Vorhersage der Wärmebelastung in Innenräumen. *Bauphysik*, 30(4), 237-243.
- Ragettli, M. S. und Rössli, M. (2020): Gesundheitliche Auswirkungen von Hitze in der Schweiz und die Bedeutung von Präventionsmassnahmen. Hitzebedingte Todesfälle im Hitzesommer 2019 - und ein Vergleich mit den Hitzesommer 2003, 2015 und 2018.
- Raasch, S. und Schröter, M. (2001): PALM - A large-eddy simulation model performing on massively parallel computers. *Meteorologische Zeitschrift*, 10(5), 363–372. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2001/0010-0363>
- Reutter, O. et al. (2021): Bericht zur Lage der Umwelt in der Metropole Ruhr 2021. Regionalverband Ruhr.
- Scherer, D., Fehrenbach, U., Grassmann, T., Holtmann, A., Meier, F., Scherber, K., Pavlik, D., Höhne, T., Kanani-Sühring, F., Maronga, B., Ament, F., Banzhaf, S., Langer, I., Halbig, G., Kohler, M., Queck, R., Stratbücker, S., Winkler, M., Wegener, R., Zeeman, M. (2022): [UC]2-Datenstandard "Stadtklima im Wandel", Version 1.5.2, 22.11.2022., https://uc2-program.org/sites/default/files/inline-files/uc2_datenstandard.pdf (zuletzt besucht: 27.07.2023)
- Stadt Gelsenkirchen (2023a): Über die vernetzte Stadt Gelsenkirchen. https://www.gelsenkirchen.de/de/Stadtprofil/Stadtthemen/Die_vernetztes_Stadt/Ueber_die_Vernetzte_Stadt/index.aspx (zuletzt besucht: 19.07.2023)
- Stadt Gelsenkirchen (2023b): GE grunt: Umwelt-Sensornetz & Grünes Bürgerbudget. https://www.gelsenkirchen.de/de/stadtprofil/stadtthemen/die_vernetztes_stadt/leitthemen_und_projekte/energie_und_umwelt/ge_gruent_umwelt-sensornetz__gruenes_buergerbudget.aspx (zuletzt besucht: 20.07.2023)
- Stewart, I. D., and Oke, T. R. (2012): Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879-1900.
- Stull, R. (2011): Wet-bulb temperature from relative humidity and air temperature. *Journal of applied meteorology and climatology*, 50(11), 2267-2269.
- Svensson, M. K. (2004): Sky view factor analysis—implications for urban air temperature differences. *Meteorological applications*, 11(3), 201-211.
- Tils, R. v. (2020). Einfluss von Gebäudebegrünung auf das Innenraumklima: Simulationen mit einem mikroskaligen Modell.
- Treptow, J. (2023): Abschlussbericht BürgerWOLKE. Digitale Modellregion Regierungsbezirk Arnsberg mit der Leitkommune Soest. Stand 05.04.2022.
- UBA (2023a): Wie ist der Stand der energetischen Gebäudesanierung in Deutschland?, <https://www.umweltbundesamt.de/umweltatlas/bauen->

wohnen/verursacher/energetischer-gebaeudezustand/wie-ist-der-stand-der-energetischen, (zuletzt besucht: 26.07.2023)

UBA (2023b): Sensoren zur Messung von Luftschadstoffen: Möglichkeiten und Grenzen sowie Hinweise zu deren Einsatz. Texte 77/2023. Ressortforschungsplan des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Forschungskennzahl 3718 51 240 0 FB001105, Dessau-Roßlau, Juni 2023

UBA 2019: GE-I-1: Hitzebelastung + Bewusstsein in der Bevölkerung, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, <https://www.umweltbundesamt.de/monitoring-zur-das/handlungsfelder/gesundheit/ge-i-1-hitzebelastung#ge-i-1-hitzebelastung> (zuletzt besucht: 04.07.2023).

UBA (2016): Flüchtige organische Verbindungen.
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/chemische-stoffe/fluechtige-organische-verbindungen#fluechtige-organische-verbindungen-voc->. (Zuletzt besucht: 25.07.2023)

VDI 2008: VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2. Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung. Teil I: Klima, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.

WMO (1996): Guide to meteorological instruments and methods of observation. Geneva.

Zimmermann, U. und Steinhorst, A. (2019): DIN EN ISO/IEC 17025. In Lexikon der Medizinischen Laboratoriumsdiagnostik (pp. 708-708). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

6 Anhang

Tabelle 5: Übersicht der aktuell gemessenen klimatischen Parameter getrennt nach Kommunen.

Kommune	Lufttemperatur	Niederschlag	Wind	Luftfeuchtigkeit	Sonstige
Alpen	0	4	0	0	8
Bönen	0	3	0	0	3
Bergkamen	0	0	0	0	0
Bochum	5	8	1	3	8
Bottrop	2	8	1	2	4
Breckerfeld	0	2	0	0	3
Castrop-Rauxel	1	3	1	1	4
Datteln	1	7	1	1	3
Dinslaken	1	3	0	1	3
Dorsten	0	7	0	0	8
Dortmund	3	15	2	3	11
Duisburg	6	12	3	4	14
Ennepetal	0	0	0	0	0
Essen	6	10	7	4	13
Fröndenberg	0	0	0	0	0
Gelsenkirchen	14	16	18	15	10
Gevelsberg	4	3	1	2	3
Gladbeck	0	3	0	0	0
Hünxe	0	6	0	0	4
Hagen	1	2	1	1	4
Haltern	1	2	5	1	1
Hamm	1	15	0	1	6
Hamminkeln	0	1	0	0	1
Hattingen	1	1	1	1	1
Herdecke	0	0	0	0	0
Herne	0	2	0	0	0
Herten	0	4	0	0	4
Holzwickede	0	0	0	0	0
Kamen	0	2	0	0	1
Kamp-Lintfort	0	4	0	0	8

Lünen	1	3	1	1	3
Marl	1	1	1	1	0
Moers	0	6	0	0	12
Mülheim	0	0	0	0	0
Neukirchen- Vluyn	0	4	0	0	8
Oberhausen	0	3	0	0	4
Oer- Erkenswick	0	1	0	0	0
Recklinghausen	0	3	0	0	4
Rheinberg	0	8	0	0	16
Schermbeck	0	1	0	0	0
Schwelm	0	2	0	0	4
Schwerte	1	0	1	1	0
Selm	0	2	0	0	0
Sonsbeck	0	2	0	0	4
Sprockhövel	0	0	0	0	0
Unna	1	1	1	1	0
Voerde	0	1	0	0	0
Waltrop	4	4	1	2	3
Werne	0	2	0	0	1
Wesel	2	2	1	2	1
Wetter	0	2	0	0	4
Witten	1	0	1	1	0
Xanten	1	5	5	1	8

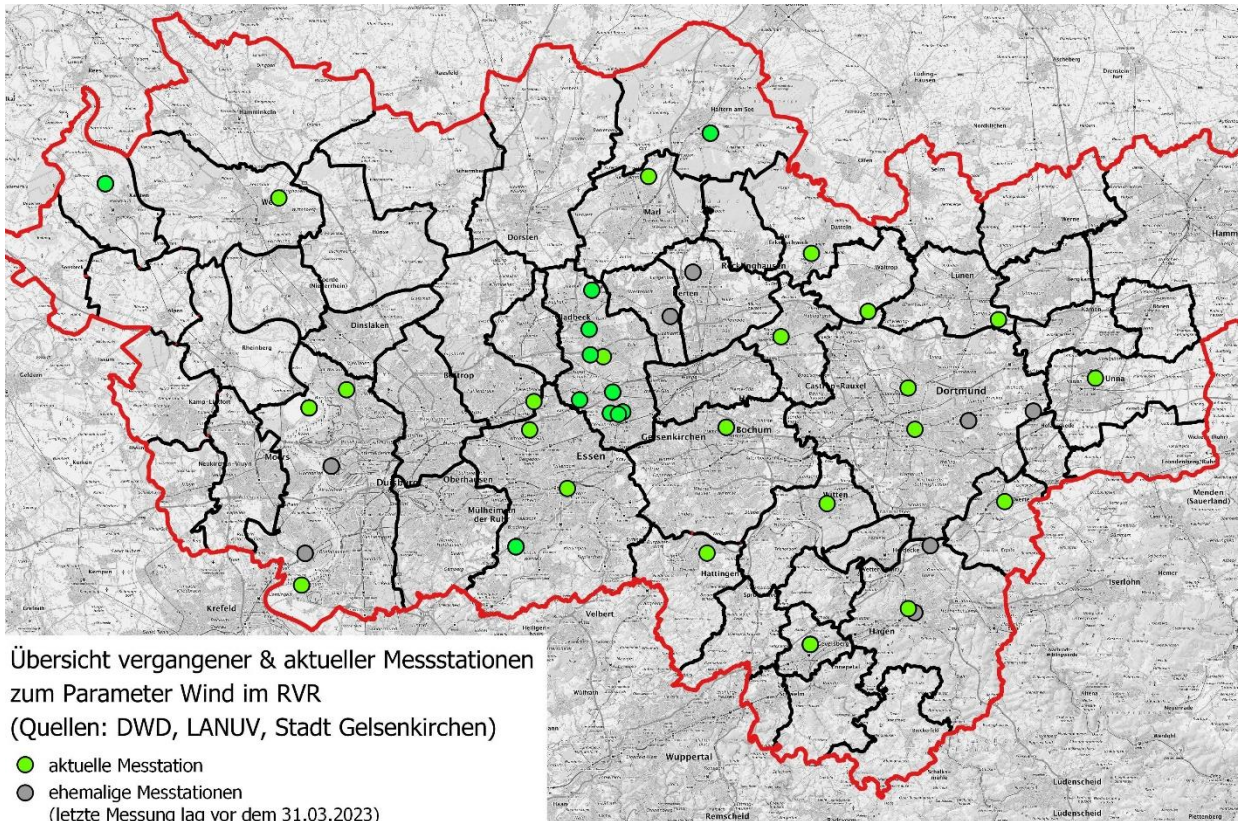


Abbildung 18: Übersicht der aktuellen und vergangenen Messstationen im RVR zum Parameter Wind. (Quelle: eigene Abbildung nach Daten von DWD, LANUV, der Stadt Gelsenkirchen und EGLV).

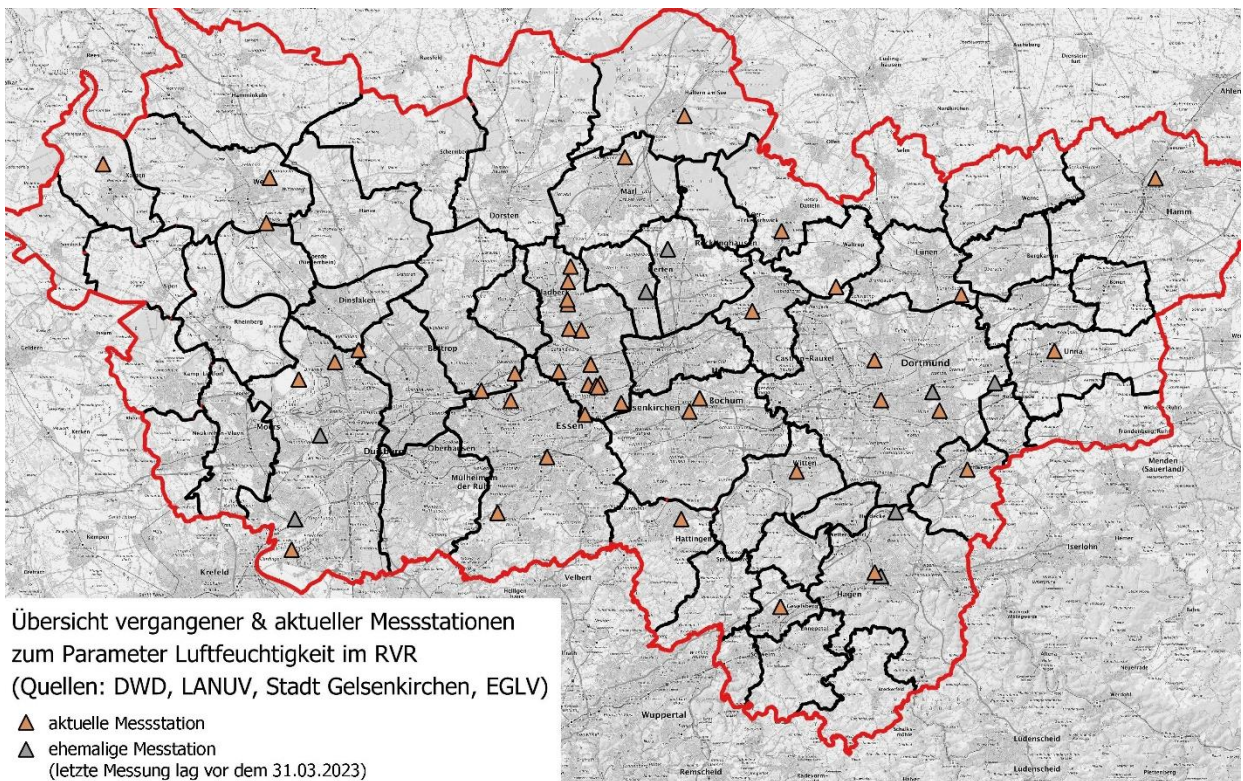


Abbildung 19: Übersicht der aktuellen und vergangenen Messstationen im RVR zum Parameter Luftfeuchtigkeit. (Quelle: eigene Abbildung nach Daten von DWD, LANUV, der Stadt Gelsenkirchen und EGLV).