

VEREIN  
DEUTSCHER  
INGENIEURE

Umweltmeteorologie  
Meteorologische Messungen  
Crowdsourcing  
Environmental meteorology  
Meteorological measurements  
Crowdsourcing

VDI 3786  
Blatt 24 / Part 24

Ausg. deutsch/englisch  
Issue German/English

*Der Entwurf dieser Richtlinie wurde mit Ankündigung im Bundesanzeiger einem öffentlichen Einspruchsverfahren unterworfen.*

*Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.*

*The draft of this standard has been subject to public scrutiny after announcement in the Bundesanzeiger (Federal Gazette).*

*The German version of this standard shall be taken as authoritative. No guarantee can be given with respect to the English translation.*

Inhalt	Seite	Contents	Page
Vorbemerkung .....	2	Preliminary note.....	2
Einleitung.....	2	Introduction.....	2
<b>1 Anwendungsbereich.....</b>	<b>3</b>	<b>1 Scope.....</b>	<b>3</b>
<b>2 Normative Verweise .....</b>	<b>4</b>	<b>2 Normative references .....</b>	<b>4</b>
<b>3 Begriffe .....</b>	<b>4</b>	<b>3 Terms and definitions .....</b>	<b>4</b>
<b>4 Abkürzungen .....</b>	<b>4</b>	<b>4 Abbreviations.....</b>	<b>4</b>
<b>5 Überblick zu Datenanforderungen, Datenqualität und Datenquellen .....</b>	<b>5</b>	<b>5 Overview of data requirements, data quality, and data sources.....</b>	<b>5</b>
5.1 Datenanforderungen.....	5	5.1 Data requirements.....	5
5.2 Klassifizierung der Datenqualität.....	5	5.2 Data quality classification.....	5
5.3 Datenplattformen .....	7	5.3 Data platforms .....	7
5.4 Metadaten.....	9	5.4 Metadata .....	9
<b>6 Sensorik und Plattformen für Crowdsourcing.....</b>	<b>10</b>	<b>6 Sensor technology and platforms for crowdsourcing .....</b>	<b>10</b>
6.1 Messprinzipien von Smart-Sensors.....	10	6.1 Measuring principles of smart sensors.....	10
6.2 Sensoren und Plattformen aus verschiedenen Einsatzgebieten bzw. Gerätekonfigurationen .....	19	6.2 Sensors and platforms from different areas of application or device configurations .....	19
6.3 Sensormodule.....	22	6.3 Sensor modules.....	22
6.4 Prinzipien der Datenerfassung .....	25	6.4 Principles of data collection.....	25
<b>7 Wartung .....</b>	<b>27</b>	<b>7 Maintenance.....</b>	<b>27</b>
<b>8 Bewertung der Datenqualität .....</b>	<b>28</b>	<b>8 Data quality assessment .....</b>	<b>28</b>
8.1 Ursachen von Messunsicherheiten.....	28	8.1 Causes of measurement uncertainties .....	28
8.2 Kalibrierung und Selektion .....	33	8.2 Calibration and selection .....	33
8.3 Einschätzung der Datenqualität im Vergleich zu herkömmlichen Standards.....	35	8.3 Assessment of data quality compared to conventional standards .....	35
8.4 Verbesserung der Datenqualität durch Clusterung.....	35	8.4 Improving data quality through clustering .....	35

VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) – Normenausschuss

Fachbereich Umweltmeteorologie

VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1 b: Umweltmeteorologie

Inhalt	Seite
<b>9 Algorithmen zur Bearbeitung von Massendaten</b> .....	36
9.1 Vorbemerkungen.....	36
9.2 Algorithmen mit Nutzung von atmosphärischen Referenzdaten.....	37
9.3 Algorithmen ohne Nutzung von atmosphärischen Referenzdaten.....	38
9.4 Alternative Sichtweisen .....	39
<b>10 Beispiele</b> .....	40
10.1 Netzwerk aus privaten Wetterstationen....	40
10.2 Citizen-Science-Netzwerk .....	40
10.3 Professionell gehostete Geonetzwerke....	41
Schrifttum .....	42

Contents	Page
<b>9 Algorithms for processing mass data</b> .....	36
9.1 Annotation .....	36
9.2 Algorithms with use of atmospheric reference data.....	37
9.4 Algorithms without the use of atmospheric reference data .....	38
9.4 Alternative perspectives.....	39
<b>10 Examples</b> .....	40
10.1 Network of private weather stations .....	40
10.2 Citizen Science Network .....	40
10.3 Professionally hosted geo-networks .....	41
Bibliography .....	42

### Vorbemerkung

Der Inhalt dieser Richtlinie ist entstanden unter Beachtung der Vorgaben und Empfehlungen der Richtlinie VDI 1000.

Alle Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, der Fotokopie, der elektronischen Verwendung und der Übersetzung, jeweils auszugsweise oder vollständig, sind vorbehalten.

Die Nutzung dieser Richtlinie ist unter Wahrung des Urheberrechts und unter Beachtung der Lizenzbedingungen ([www.vdi.de/richtlinien](http://www.vdi.de/richtlinien)), die in den VDI-Merkblättern geregelt sind, möglich.

Allen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung dieser Richtlinie mitgewirkt haben, sei gedankt.

Eine Liste der aktuell verfügbaren und in Bearbeitung befindlichen Blätter dieser Richtlinienreihe sowie gegebenenfalls zusätzliche Informationen sind im Internet abrufbar unter [www.vdi.de/3786](http://www.vdi.de/3786).

### Einleitung

Crowdsourcing ist im Bereich meteorologischer Anwendungen das Sammeln von nicht klassischen Wetterbeobachtungen aus einer großen Anzahl von Quellen mit hoher Auflösung, insbesondere von einer Reihe von öffentlichen Sensoren, die typischerweise über das Internet verfügbar sind [1]. Fortschritte in der Miniaturisierung von Messwertgebern für meteorologische Elemente wie Temperatur, Feuchte und Druck führten dazu, dass diese Sensoren heute in preiswerten Wetterstationen für den

### Preliminary note

The content of this standard has been developed in strict accordance with the requirements and recommendations of the standard VDI 1000.

All rights are reserved, including those of reprinting, reproduction (photocopying, micro copying), storage in data processing systems and translation, either of the full text or of extracts.

The use of this standard without infringement of copyright is permitted subject to the licensing conditions ([www.vdi.de/richtlinien](http://www.vdi.de/richtlinien)) specified in the VDI Notices.

We wish to express our gratitude to all honorary contributors to this standard.

A catalogue of all available parts of this series of standards and those in preparation as well as further information, if applicable, can be accessed on the Internet at [www.vdi.de/3786](http://www.vdi.de/3786).

### Introduction

Crowdsourcing, in the field of meteorological applications, is to collect non-classical weather observations from a large number of high-resolution sources, especially from a range of public sensors typically connected via the Internet [1]. Advances in the miniaturisation of measuring transducers for meteorological elements such as temperature, humidity and pressure have led to these sensors now being included in low-cost weather stations for private use and in many widely used electronic devices

privaten Gebrauch und in vielen weit verbreiteten elektronischen Geräten, wie Bordcomputer in Autos, Smartphones usw., enthalten sind. Damit steht eine Vielzahl an Messgeräten prinzipiell für viele Anwendungen zur Verfügung, die teilweise über das Internet abrufbar sind. Die Richtlinie soll Möglichkeiten aufzeigen, wie diese Sensoren für Zwecke der Reinhaltung der Luft, das heißt die Ausbreitungsmodellierung und die Umweltüberwachung sowie lokalklimatologische Untersuchungen speziell in Stadtgebieten, nutzbar gemacht werden können.

## 1 Anwendungsbereich

Meteorologische Eingangsdaten werden zur Berechnung der Ausbreitung von Luftbeimengungen und zur Bewertung von Havariesituationen dringend gebraucht. Gleiches gilt für lokalklimatische Untersuchungen. Für diese Anwendungen gibt es diverse VDI-Richtlinien (insbesondere die Richtlinienreihe VDI 3783, VDI 3785 und VDI 3787). Dazu sind Messdaten mit hoher Datenqualität nötig. Orientierung bieten dabei die Richtlinien der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) [2], passt diese aber an die Belange der genannten Fragestellungen mit der Richtlinienreihe VDI 3786 an.

Die massenhafte Verfügbarkeit weiterer Datenquellen würde eine deutliche Verbesserung in der Erfüllung von Fragestellungen der Luftreinhaltung und der lokalen Klimabewertung bedeuten. Dazu müssen die Daten in einer Qualität (Genauigkeit, Wartung, Verfügbarkeit von Metadaten) vorhanden sein, die für die Fragestellungen ausreichend ist. Die massenhafte Verfügbarkeit von Daten und eine geeignete mathematische Datenselektion eröffnen hier durchaus neue Möglichkeiten, die in dieser Richtlinie aufgezeigt werden.

Der Betrieb von Netzwerken unter Einbeziehung von Crowdsourcing-Daten erfolgt unter Berücksichtigung der jeweiligen Aufgabenstellung, wobei die verantwortlichen Einrichtungen (Industrie, Kommune u. Ä.) ein vorhandenes Netzwerk nutzen oder ein neues Netzwerk organisieren können. Im ersten Fall müssen eigene Daten und die eines Netzwerks über geeignete Schnittstellen verbunden werden und für den jeweiligen Anwendungsfall bereitgestellt werden. Beim Aufbau eines eigenen Netzwerks sollten vorhandene Messstellen in der Region und zusätzlich installierte Messstellen mit Sensormodulen verbunden werden. Dabei könnten beispielsweise die Module an kommunalen Masten, Fahrzeugen des öffentlichen Nahverkehrs, interessierten Einrichtungen (Schulen, Betriebe, Handel), elektrischen Leihfahrrädern usw. angebracht werden. Für lokalklimatologische Untersuchungen

such as on-board computers in cars, smartphones, etc. This means that a wide range of measuring devices is available in principle for many applications, some of which can be accessed via the internet. The standard is intended to show ways in which these sensors can be made usable for clean air purposes, i.e., dispersion modelling and environmental monitoring as well as local climatological studies, especially in urban areas.

## 1 Scope

Meteorological input data are urgently needed to calculate the dispersion of air impurities and to assess emergency situations. The same applies to local climatic studies. For these applications, there are various VDI Standards (especially the series of standards VDI 3783, VDI 3785 and VDI 3787). This requires measurement data with high data quality. Orientation is provided by the standards of the World Meteorological Organisation (WMO) [2], but these are adapted to the requirements of the issues mentioned with the series of standards VDI 3786.

The mass availability of further data sources would mean a significant improvement in the fulfilment of questions of air pollution control and local climate assessment. For this, the data shall be available in a quality (accuracy, maintenance, availability of metadata) that is sufficient for the issues. The mass availability of data and a suitable mathematical data selection certainly enable new possibilities here, which are shown in this standard.

The operation of networks involving crowdsourcing data takes place in consideration of the respective task, whereby the responsible institutions (industry, municipality, etc.) can use an existing network or organise a new network. In the first case, own data and that of a network shall be connected via suitable interfaces and made available for the respective application. When setting up an own network, existing measuring points in the region and additionally installed measuring points with sensor modules should be connected. For example, the modules could be attached to municipal masts, public transport vehicles, interested institutions (schools, businesses, trade), electric rental bicycles, etc. For local climatological studies, it is also possible to set up a temporary network and connect it, for example, to mobile monitoring in accordance with VDI 3785 Part 2. The standard shows possibilities for the use

bietet sich auch an, ein zeitweises Netzwerk aufzubauen und beispielsweise mit einem mobilen Monitoring nach VDI 3785 Blatt 2 zu verbinden. Die Richtlinie zeigt Möglichkeiten zum Einsatz geeigneter Geber, der Datenbearbeitung und Qualitätssicherung auf, damit solche Netzwerke für Zwecke der Reinhaltung der Luft und lokalklimatische Untersuchungen angewandt werden können.

Die Nutzung von Messungen für Zwecke der gesetzlichen Überwachung der Luftqualität oder für Genehmigungsverfahren im Rahmen der Luftreinhaltung haben besonders hohe Anforderungen an die Qualität meteorologischer Daten. Hierfür sind Crowdsourcing-Daten meist nicht geeignet. Konzentrationsmessungen werden in dieser Richtlinie nicht behandelt.

## 2 Normative Verweise

Das folgende zitierte Dokument ist für die Anwendung dieser Richtlinie erforderlich:

VDI 3786 Blatt 1:2013-08 Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Grundlagen

## 3 Begriffe

Für die Anwendung dieser Richtlinie gelten die Begriffe nach VDI 3786 Blatt 1.

## 4 Abkürzungen

In dieser Richtlinie werden die nachfolgend aufgeführten Abkürzungen verwendet:

ASIC	anwendungsspezifischer Schaltkreis
GNSS	globales Satellitennavigationssystem
GSM	Global System for Mobile Communications
I2C	Inter-Integrated Circuit
LCZ	lokale Klimazone
LoRaWan	Long Range Wide Area Network
MISCOR	Minderung städtischer Klima- und Ozonrisiken
PoE	Power over Ethernet
SRD	Short Range Device
TCP	Transmission Control Protocol
WMO	Weltorganisation für Meteorologie

of suitable sensors, data processing and quality assurance, so that such networks can be applied for purposes of air pollution control and local climatological investigations.

The use of measurements for the purposes of statutory monitoring of air quality or for approval procedures in the context of air pollution control have particularly high demands on the quality of meteorological data. Crowdsourced data are usually not suitable for this purpose. Concentration measurements are not dealt with in this standard.

## 2 Normative references

The following referenced document is indispensable for the application of this standard:

VDI 3786 Part 1:2013-08 Environmental meteorology; Meteorological measurements; Fundamentals

## 3 Terms and definitions

For the purposes of this standard, the terms and definitions as per VDI 3786 Part 1 apply.

## 4 Abbreviations

The following abbreviations are used throughout this standard:

ASIC	application-specific integrated circuit (ASIC)
GNSS	Global Navigation Satellite System (GNSS)
GSM	Global System for Mobile Communications
I2C	inter-integrated circuit
LCZ	local climate zones
LoRaWan	Long Range Wide Area Network
MISCOR	minimising urban climate and ozone risks
PoE	Power over Ethernet
SRD	short range device
TCP	Transmission Control Protocol
WMO	World Meteorological Organization

## 5 Überblick zu Datenanforderungen, Datenqualität und Datenquellen

Es ist das Ziel dieser Richtlinie, für eine Vielzahl von Messdaten, die frei oder mit beschränktem Zugang zur Verfügung stehen, für Zwecke der Reinhaltung der Luft und lokalklimatologische Untersuchungen Möglichkeiten aufzuzeigen, wie diese Daten genutzt werden können. Dieser Abschnitt stellt diese Daten in Relation zu den bislang genutzten Daten, die den Richtlinien der WMO [2] oder der VDI 3786 entsprechen, vor.

### 5.1 Datenanforderungen

Die Datenanforderungen werden bestimmt durch die Richtlinien der Luftreinhaltung, speziell VDI 3783 Blatt 8 und Blatt 9, und der lokalklimatologischen Untersuchungen, speziell VDI 3785 Blatt 1, Blatt 2 und VDI 3787 Blatt 1, Blatt 2 und Blatt 5. Die im Sinne dieser Richtlinie interessanten meteorologischen Parameter sind in Tabelle 1 aufgeführt, wobei die Größen Schichtung, Scherung, Richardson-Zahl und Grenzschichthöhe vorrangig für die Nutzung im Rahmen VDI 3783 Blatt 8 benötigt werden.

### 5.2 Klassifizierung der Datenqualität

Die WMO teilt ihre Stationen in fünf Klassen ein [2], die auch in ISO 19289 übernommen wurden. Dabei sind die Klassen 1 und 2 geeignet für meteorologische Messungen im klassischen Sinne, Klasse 3 ist bedingt geeignet, und Klassen 4 und 5 weisen teilweise erhebliche Abweichungen auf. Somit kann eine Station beispielsweise für die Messung der Lufttemperatur geeignet sein, für den Niederschlag oder Wind aber nicht. Diese Klassifikation wurde für die VDI 3786 nicht übernommen, da keine Stationen beschrieben werden, sondern nur die Anforderung an die Messung der einzelnen meteorologischen Elemente, deren Datenqualität dann aber den Anforderungen genügen soll. Auch an Stationen für bestimmte Anwendungen (VDI 3786 Blatt 13) werden hohe Qualitätsanforderungen gestellt, aber nur für die jeweils notwendigen meteorologischen Elemente.

Die vorliegende Richtlinie geht einen anderen Weg. Sie beschreibt alle verfügbaren Datenquellen, auch jene mit geringer Datenqualität (Klassen 4, 5 und sogar schlechter), und Möglichkeiten, wie durch geeignete Verfahren bei massenhafter Verfügbarkeit von Daten dennoch Datenprodukte erstellt werden können, die für die genannten Anwendungen einsetzbar sind. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die generelle Datenqualität verschiedener Datenquellen.

## 5 Overview of data requirements, data quality, and data sources

The aim of this standard is to show ways, for a variety of measurement data that are freely available or with limited access, in which these data can be used for the purposes of air quality management and local climatological studies. This section presents these data in relation to the data used so far, which comply with the WMO [2] or VDI 3786 Standards.

### 5.1 Data requirements

The data requirements are determined by the standards of air pollution control, specifically VDI 3783 Part 8 and Part 9, and local climatological investigations, specifically VDI 3785 Part 1, Part 2, and VDI 3787 Part 1, Part 2 and Part 5. The meteorological parameters of interest for the purposes of this standard are listed in Table 1, whereby the quantities stratification, shear, Richardson number and boundary layer height are primarily required for use within the framework of VDI 3783 Part 8.

### 5.2 Data quality classification

The WMO divides its stations into five classes [2], which were also adopted in ISO 19289. Where classes 1 and 2 are suitable for meteorological measurements in the classical sense, class 3 is suitable to a certain extent, and classes 4 and 5 sometimes show considerable deviations. This means, a station may be suitable for measuring air temperature, but not for measuring precipitation or wind. This classification was not adopted for VDI 3786, since no stations are described, but only the requirements for the measurement of the individual meteorological elements, whose data quality shall then meet the requirements. High quality requirements are also placed on stations for certain applications (VDI 3786 Part 13), but only for the required meteorological elements.

This standard takes a different approach. It describes all available data sources, including those with low data quality (classes 4, 5 and even worse), and ways in which suitable procedures can still be used to create data products that can be used for the applications mentioned, given the mass availability of data. Table 2 gives an overview of the general data quality of various data sources.

Tabelle 1. Notwendige Messgrößen und ihre Verfügbarkeit

Messgröße (Mittelwerte und Extremwerte)	Erfassung mit Crowdsourcing	Anmerkung	Referenz
Luftdruck	sehr häufig		VDI 3786 Blatt 16
Lufttemperatur	sehr häufig		VDI 3786 Blatt 3
Luftfeuchte	sehr häufig		VDI 3786 Blatt 4
Windgeschwindigkeit und Windrichtung	selten	hohe Anforderungen an Umgebung	VDI 3786 Blatt 2, VDI 3786 Blatt 12
Strahlung	selten	hohe Anforderungen an Umgebung	VDI 3786 Blatt 5
Niederschlag: Status	sehr häufig		VDI 3786 Blatt 7
Niederschlag: Menge und Intensität	häufig	Windschutz erforderlich, fest installierte Sensoren	VDI 3786 Blatt 7
Schichtung	sehr selten	Temperatur in zwei Höhen	VDI 3783 Blatt 8, VDI 3786 Blatt 3
Scherung	extrem selten	Wind in zwei Höhen	VDI 3783 Blatt 8
Richardson-Zahl	extrem selten	Wind und Temperatur in zwei Höhen	VDI 3783 Blatt 8
Grenzschichthöhe	extrem selten	Flugzeug <sup>a)</sup> , Temperatur im Gebirge	VDI 3783 Blatt 8, VDI 3786 Blatt 22
Konzentration von Luftbeimengungen	häufig	nicht Gegenstand der Richtlinie	

<sup>a)</sup> Flugzeugmessungen sind nicht Gegenstand der Richtlinie.

Table 1. Necessary measurands and their availability

Measured variable (mean and extreme values)	Acquisition with crowdsourcing	Note	Reference
Air pressure	very often		VDI 3786 Part 16
Air temperature	very often		VDI 3786 Part 3
Humidity	very often		VDI 3786 Part 4
Wind speed and wind direction	rare	high demands on environment	VDI 3786 Part 2, VDI 3786 Part 12
Radiation	rare	high demands on environment	VDI 3786 Part 5
Precipitation: status	very often		VDI 3786 Part 7
Precipitation: amount and intensity	frequent	windbreak required, permanently installed sensors	VDI 3786 Part 7
Stratification	very rare	temperature at two heights	VDI 3783 Part 8, VDI 3786 Part 3
Shear	extremely rare	wind at two heights	VDI 3783 Part 8
Richardson number	extremely rare	wind and temperature at two heights	VDI 3783 Part 8
Boundary layer height	extremely rare	aircraft <sup>a)</sup> , temperature in the mountains	VDI 3783 Part 8, VDI 3786 Part 22
Concentration of air impurities	frequent	not subject of this standard	

<sup>a)</sup> Aircraft measurements are not subject to the standard.

Tabelle 2. Datenqualität verschiedener Datenquellen, den Begriffen ist die ungefähr korrespondierende WMO-Klasse zugeordnet ([2], ISO 19289)

Stationstyp	Datenqualität <sup>a)</sup>	Regelwerk
Wetter- und Klimastationen	hoch (2) und extrem hoch (1)	WMO [2]
Stationen für verschiedene Zwecke, siehe VDI 3786 Blatt 13	mittel (3) bis hoch (2)	WMO [2], VDI 3786
Private, Schul- u. Ä. Wetterstationen, Citizen Science <sup>d)</sup>	mittel (3) bis hoch (2)	interne Regularien der Netzwerke
Netzwerke als Kombination verschiedener Stationstypen, siehe Tabelle 3	niedrig (4) <sup>b)</sup> bis hoch (2)	interne Regularien der Netzwerke
Industrie, Bauwesen	niedrig (4) <sup>b)</sup> bis mittel (3)	interne Regularien
Citizen Science <sup>d)</sup> und andere Quellen	niedrig (4) <sup>b)</sup> bis extrem niedrig (5) <sup>c)</sup>	Bei einzelnen Betreibern sind Regularien vorhanden.

<sup>a)</sup> Durch Aufbereitung kann Datenqualität verbessert werden, in bestimmten Netzwerken werden auch qualitativ hochwertige Daten gewonnen.

<sup>b)</sup> Unsicherheiten: 2 K, 25 % beim Niederschlag, 50 % bei der Windgeschwindigkeit

<sup>c)</sup> Unsicherheiten: 5 K, 100 % beim Niederschlag, bei Windgeschwindigkeit nicht klassifiziert

<sup>d)</sup> unterschiedliche Zuordnung entsprechend der Datenqualität, siehe Abschnitt 10.2

Table 2. Data quality of different data sources, the terms are assigned to the approximately corresponding WMO class ([2], ISO 19289)

Station type	Data quality <sup>a)</sup>	Regulations
Weather and climate stations	high (2) and extremely high (1)	WMO [2]
Stations for various purposes, see VDI 3786 Part 13	medium (3) to high (2)	WMO [2], VDI 3786
Private, school and similar weather stations, citizen science <sup>d)</sup>	medium (3) to high (2)	internal regulations of the networks
Networks as a combination of different station types, see table 3	low (4) <sup>b)</sup> to high (2)	internal regulations of the networks
Industry, construction	low (4) <sup>b)</sup> to medium (3)	internal regulations
Citizen Science <sup>d)</sup> and other sources	low (4) <sup>b)</sup> to extremely low (5) <sup>c)</sup>	Regulations are available for individual operators.

<sup>a)</sup> Data quality can be improved through processing, and high-quality data is also obtained in certain networks.

<sup>b)</sup> uncertainties: 2 K, 25 % for precipitation, 50 % for wind speed

<sup>c)</sup> uncertainties: 5 K, 100 % for precipitation, for wind speed not classified

<sup>d)</sup> different allocation according to data quality, see Section 10.2

### 5.3 Datenplattformen

Neben den amtlichen Wetterstationen gibt es einige Netzwerke, die Daten im Internet mit recht guter Qualität zur Verfügung stellen, die mittels der beigefügten Metadaten bewertet werden können (Tabelle 3). Auf diese Netzwerke könnte zugegriffen werden, um die vorhandenen meteorologischen Daten zu verdichten. Daneben gibt es weitere Netzwerke, speziell aus den USA, die Daten auch weltweit zur Verfügung stellen.

Für Fragestellungen im Sinne dieser Richtlinie ist es aber auch möglich, eigene Netzwerke zu generieren, die auf andere Netzwerke zugreifen (soweit es geeignete Datenschnittstellen gibt) und durch weitere Messungen ergänzt werden. Damit könnte die Datenlage in Städten oder im Umfeld von Industrieanlagen deutlich verbessert werden. Auch ein zeitweiser Betrieb derartiger Netzwerke ist denkbar.

### 5.3 Data platforms

In addition to the official weather stations, there are some networks that provide data on the internet with quite good quality, which can be assessed on the basis of the attached metadata (Table 3). These networks could be accessed to condense the existing meteorological data. In addition, there are other networks, especially from the U.S.A., which provide data worldwide.

For questions in the sense of this standard, however, it is also possible to generate own networks that access other networks (as far as there are suitable data interfaces) and are supplemented by further measurements. This could significantly improve the data situation in cities or in the vicinity of industrial plants. A temporary operation of such networks is also conceivable.

Mesometeorologische Netzwerke werden in dieser Richtlinie nicht betrachtet. Diese erfassen in einem begrenzten Gebiet Daten, die aber höchsten Qualitätsansprüchen genügen müssen, um in Echtzeit meteorologische Phänomene in der Ausdehnung von 3 km bis etwa 100 km erfassen zu können [3]. Für die Datenerfassung und -bearbeitung gelten die üblichen Richtlinien der WMO [2].

Mesometeorological networks are not considered in this standard. These collect data in a limited area, while they shall meet the highest quality standards in order to be able to record meteorological phenomena in real time in the range of 3 km to about 100 km [3]. The usual WMO standards apply to data acquisition and processing [2].

Tabelle 3. Beispiele für Netzwerke, die für ergänzende meteorologische Daten geeignet sind [4], weitere internationale Beispiele siehe [5]

Name	Beschreibung	Link, Quelle
BürgerWolke Soest	100 Low-cost-Sensoren an Bürger der Stadt Soest verteilt	<a href="https://digital-soest.de/projekte/projekte-infrastruktur/57-buergerwolke">https://digital-soest.de/projekte/projekte-infrastruktur/57-buergerwolke</a> <sup>a)</sup>
Citizen Weather Observer Program (CWOP)	Daten privater Wetterstationen vorwiegend aus USA, aber auch vielen anderen Ländern mit Qualitätsüberprüfung	<a href="http://www.wxqa.com">www.wxqa.com</a> <sup>a)</sup>
City Climate	Netzwerkprojekt der Firma meteoblue, realisiert in Zürich und Basel, kann auf andere Städte übertragen werden	<a href="https://meteoblue.com/de/products/cityclimate">https://meteoblue.com/de/products/cityclimate</a> <sup>a)</sup>
Community Collaborative Rain, Hail and Snow Network (CoCo-RaHS)	Low-cost-Messnetz privater Wetterstationen zur Erfassung des Niederschlags	<a href="https://cocorahs.org/">https://cocorahs.org/</a> <sup>a)</sup>
Netatmo Weathermap	globales Netzwerk privater Wetterstationen, die aus kostengünstigen Geräten der Firma Netatmo-Wetterstation bestehen	<a href="https://weathermap.netatmo.com">https://weathermap.netatmo.com</a> <sup>a)</sup>
Netzwerk Schleswig-Holstein	Zusammenschluss von ca. 50 Hobby-Wetterstationen	<a href="https://internetwetter.de/home/s-h-netz.php">https://internetwetter.de/home/s-h-netz.php</a> <sup>a)</sup>
openSenseMap	Plattform für offene Umweltdaten von verschiedenen Sensoren, die von der openSenseLab gGmbH zur Verfügung gestellt wird, wenig gepflegt	<a href="https://opensensemap.org">https://opensensemap.org</a> <sup>a)</sup>
Sensor.community	globales Sensornetzwerk für offene Umweltdaten mit Schwerpunkt Feinstaubmessungen, ehemals luftdaten.info	<a href="https://sensor.community/de">https://sensor.community/de</a> <sup>a)</sup>
Smart Air Quality Network	Netzwerk im Raum Augsburg, nur wenige Sensoren aktiv	<a href="https://smartaq.net/de">https://smartaq.net/de</a> <sup>a)</sup>
MISCOR	Minderung städtischer Klima- und Ozonrisiken (Bayreuth)	<a href="http://bayceer.uni-bayreuth.de/miskor/">http://bayceer.uni-bayreuth.de/miskor/</a> <sup>a)</sup>
Trans-African Hydro-Meteorological Observatory (TAHMO)	Netzwerk von kostengünstigen Wetterstationen für hydro-meteorologische Anwendungen in Afrika unter Einbeziehung von Bildungseinrichtungen	<a href="https://tahmo.org/">https://tahmo.org/</a> [6] <sup>a)</sup>
Weather Observation Website (WOW)	Daten privater Wetterstationen vorwiegend aus U.K. und den Niederlanden, aber auch vielen anderen Ländern, umfangreiche Metadaten	<a href="https://wow.metoffice.gov.uk">https://wow.metoffice.gov.uk</a> <sup>a)</sup>
Weather Underground	globales Netzwerk privater Wetterstationen von unterschiedlichen Herstellern	<a href="https://wunderground.com/wundermap">https://wunderground.com/wundermap</a> <sup>a)</sup>

<sup>a)</sup> abgerufen am 11. September 2024



Table 3. Examples of networks suitable for supplementary meteorological data [4], for further international examples see [5]

Name	Description	Link, source
BürgerWolke Soest	100 low-cost sensors distributed to citizens of the city of Soest	<a href="https://digital-soest.de/projekte/projekte-infrastruktur/57-buergerwolke">https://digital-soest.de/projekte/projekte-infrastruktur/57-buergerwolke</a> <sup>a)</sup>
Citizen Weather Observer Program (CWOP)	data from private weather stations mainly from the U.S.A., but also from many other countries with quality control	<a href="http://www.wxqa.com">www.wxqa.com</a> <sup>a)</sup>
City Climate	network project of the company meteoblue, realised in Zurich and Basel, can be transferred to other cities	<a href="https://meteoblue.com/de/products/cityclimate">https://meteoblue.com/de/products/cityclimate</a> <sup>a)</sup>
Community Collaborative Rain, Hail and Snow Network (CoCoRaHS)	low-cost monitoring network of private weather stations for recording precipitation	<a href="https://cocorahs.org/">https://cocorahs.org/</a> <sup>a)</sup>
Netatmo Weathermap	global network of private weather stations consisting of low-cost Netatmo weather station devices	<a href="https://weathermap.netatmo.com">https://weathermap.netatmo.com</a> <sup>a)</sup>
Schleswig-Holstein Network	association of approx. 50 hobby weather stations	<a href="https://www.internetwetter.de/home/s-h-netz.php">https://www.internetwetter.de/home/s-h-netz.php</a> <sup>a)</sup>
openSenseMap	platform for open environmental data from various sensors provided by openSenseLab gGmbH, little maintained	<a href="https://opensensemap.org">https://opensensemap.org</a> <sup>a)</sup>
Sensor.community	global sensor network for open environmental data with a focus on fine particles measurements, formerly luftdaten.info	<a href="https://sensor.community/de">https://sensor.community/de</a> <sup>a)</sup>
Smart Air Quality Network	network in the Augsburg area, only a few sensors active	<a href="https://smartaq.net/de">https://smartaq.net/de</a> <sup>a)</sup>
MISCOR	mitigation of urban climate and ozone risks (Bayreuth)	<a href="http://bayceer.uni-bayreuth.de/miskor/">http://bayceer.uni-bayreuth.de/miskor/</a> <sup>a)</sup>
Trans-African Hydro-Meteorological Observatory (TAHMO)	network of low-cost weather stations for hydro-meteorological applications in Africa with the involvement of educational institutions	<a href="https://tahmo.org/">https://tahmo.org/</a> [6] <sup>a)</sup>
Weather Observation Website (WOW)	data from private weather stations mainly from U.K. and the Netherlands, but also many other countries, extensive metadata	<a href="https://wow.metoffice.gov.uk">https://wow.metoffice.gov.uk</a> <sup>a)</sup>
Weather Underground	global network of private weather stations from different manufacturers	<a href="https://wunderground.com/wundermap">https://wunderground.com/wundermap</a> <sup>a)</sup>

<sup>a)</sup> accessed on 11 September 2024

#### 5.4 Metadaten

Über die Möglichkeit der Verwendbarkeit von Messdaten entscheiden die vorhandenen Metadaten (VDI 3786 Blatt 1, DIN EN ISO 19115-1):

- geografische Koordinaten der Station
- Datum und Zeitinformationen (Zeitzone, gesetzliche Zeit und/oder UTC)
- Stations-ID
- Höhe über Normalhöhennull
- Zugreifbarkeit

Weiterhin sind für eine umfassende praktische Nutzung der Daten noch folgende Informationen wünschenswert:

- Stationsname

#### 5.4 Metadata

The existing metadata (VDI 3786 Part 1, DIN EN ISO 19115-1) determine whether measurement data can be used:

- geographical coordinates of the station
- date and time information (time zone, legal time and/or UTC)
- station ID
- height above sea level
- accessibility

Furthermore, the following information is still desirable for a comprehensive practical use of the data:

- station name

- Umgebung der Station (insbesondere bei Wind- und Niederschlagsmessungen)
- Anströmung/Abschattung/Unterlage
- Aufstellungshöhe der Geräte
- Exposition der Geräte
- Fotodokumentation
- Geräte und Konfiguration und Kalibrierung
- Wartungszyklen
- Methoden der Qualitätskontrolle
- Betreiber (kollektiv oder einzeln; zum Teil anonym)
- usw.

Bei mobilen Geräten ist eine GNSS-Verbindung notwendig.

Sind keine derartigen Metadaten vorhanden, ist mit den Daten wie in Abschnitt 8 beschrieben zu verfahren.

## 6 Sensorik und Plattformen für Crowdsourcing

### 6.1 Messprinzipien von Smart-Sensors

Unter Smart-Sensors ist die funktionelle und konstruktive Einheit eines oder mehrerer Sensorelemente und einer geeigneten Elektronik zu verstehen [8]. Die Elektronik dient hierbei dazu, die eigentlichen Sensormesswerte gezielt zu verbessern. Dies kann über gespeicherte Kompensationsfunktionen (Kennlinienlinearisierung) oder das Verrechnen von störenden Einflüssen (Temperaturkompensation von Drucksensoren) erfolgen. Zudem lassen sich mit der geeigneten Kompensation von unterschiedlichen Sensoren Größen messen, die nicht oder nur sehr schwierig direkt erfasst werden können. Smart-Sensors liefern standardisierte Signale, die in Bus-systemen (oft I2C) übertragen und weiterverarbeitet und dann auch per Funk übertragen werden können. Hierzu benötigen sie eine Energieversorgung, die auch gleichzeitig für die Signalübertragung verwendet werden kann. Die Leistungsaufnahme von Smart-Sensors ist eher gering, so lassen sich z.B. Außenmodule von kommerziellen Wetterstationen mit einem Satz Batterien etwa ein bis drei Jahre betreiben. Aufgrund der Vernetzung der Sensoren können auch Meldungen zum Batteriezustand verschickt werden, sodass diese rechtzeitig gewechselt werden können. Somit ist ein wartungsarmer, aber kein wartungsfreier Betrieb möglich. Autarke Sensorlösungen sind denkbar, hierbei wird die Energie aus der Umgebung gewonnen („Energy Harvesting“). Bekanntestes und am besten funktionierendes System ist hier die Solarzelle. Energiegewinnung aus Vibrationen, Drehbewegungen (Wind)

- surroundings of the station (especially for wind and precipitation measurements)
- approaching flow/shading/substrate
- installation height of the units
- equipment exposure
- photo documentation
- devices and configuration and calibration
- maintenance cycles
- quality control methods
- operators (collectively or individually; partly anonymous)
- etc.

For mobile devices, a GNSS connection is necessary.

If no such metadata is available, the data is to be handled as described in Section 8.

## 6 Sensor technology and platforms for crowdsourcing

### 6.1 Measuring principles of smart sensors

Smart sensors are to be understood as the functional and constructive unit of one or more sensor elements and suitable electronics [8]. The electronics are used to specifically improve the actual sensor measurement values. This can be done by means of stored compensation functions (linearisation of characteristic curves) or by offsetting interfering influences (temperature compensation of pressure sensors). In addition, with suitable compensation of different sensors, quantities can be measured that are impossible or very difficult to record. Smart sensors provide standardised signals that can be transmitted and processed in bus systems (often I2C) and then also transmitted by radio transmission. To do this, they require a power supply that can also be used for signal transmission at the same time. The power consumption of smart sensors is rather low, e.g., outdoor modules of commercial weather stations can be operated with one set of batteries for about one to three years. Due to the networking of the sensors, messages about the battery status can also be transmitted so that they can be replaced in time. This means that low-maintenance operation is possible, but not maintenance-free. Self-sufficient sensor solutions, in which case the energy is obtained from the environment (energy harvesting), are conceivable. The best-known and best-functioning example of such a system is the solar cell. However, energy harvesting from vibrations, rotational movements (wind) and temperature differences is also possible. The basic structure of a smart sensor is shown in

und Temperaturunterschieden ist aber auch möglich. Die prinzipielle Struktur eines Smart-Sensors ist in Bild 1 gezeigt.

Der beschriebene Ansatz von Smart-Sensors ermöglicht die massenhafte und preiswerte Verfügbarkeit von Sensoren für das Crowdsourcing. Die Technologien der Mikrosystemtechnik und Mikroelektronik erlauben die kostengünstige Fertigung von Sensoren.

Smart-Sensoren nutzen aus Kostengründen und wegen der massenhaften Herstellung nur einige ausgewählte Messprinzipien, die auch in den Richtlinienblättern der VDI 3786 im Detail dargelegt sind. Zudem sind sie oft nicht für meteorologische Messungen, sondern für andere Anwendungen gedacht.

Figure 1.

The described approach of smart sensors enables the mass and inexpensive availability of sensors for crowdsourcing. The technologies of microsystems and microelectronics allow the low-cost production of sensors.

For reasons of cost and mass production, smart sensors use only a few selected measurement principles, which are also described further in individual parts of the series of standards VDI 3786. Moreover, they are often not intended for meteorological measurements, but for other applications.

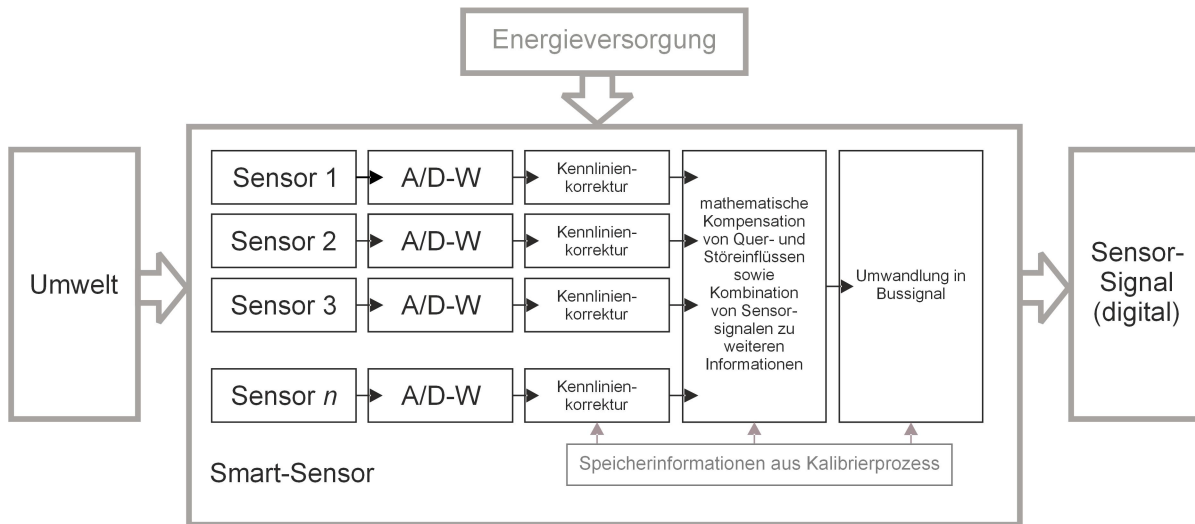


Bild 1. Schaltbild eines Smart-Sensors

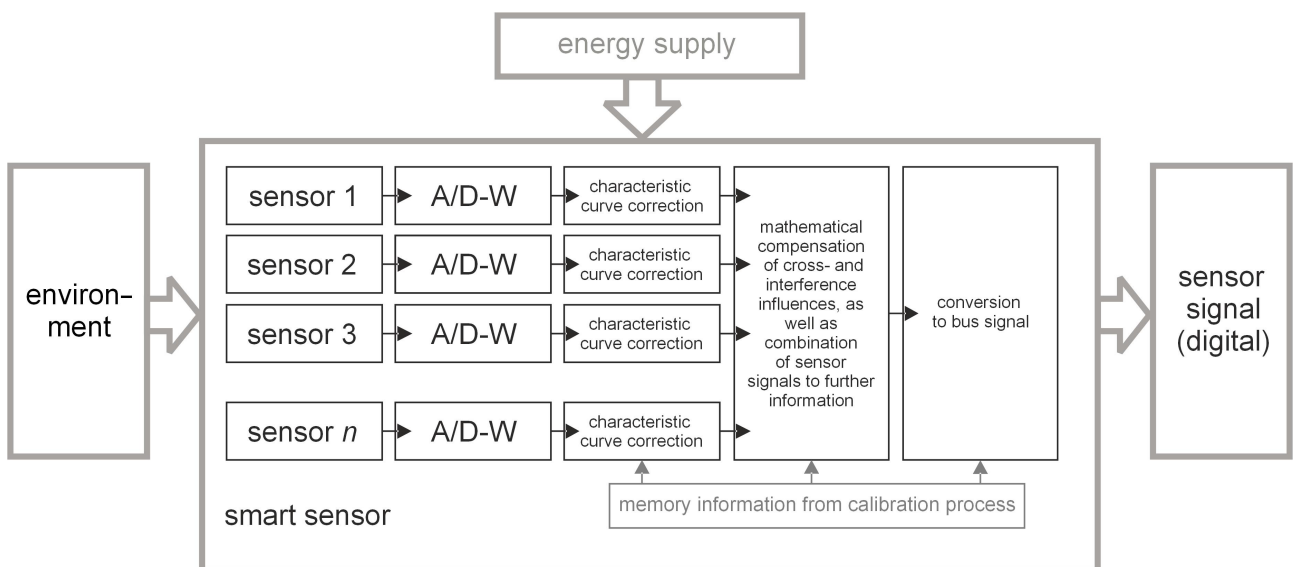


Figure 1. Schematic diagram of a smart sensor

Beispielhaft sei hier der barometrische Drucksensor erwähnt, der zur Höhenmessung konzipiert wurde, sich allerdings auch sehr gut zur eigentlichen Luftdruckmessung eignet.

### 6.1.1 Druckmessung

Mikroelektromechanische Drucksensoren (MEMS – Micro Electro Mechanical Systems), die mit den Methoden der Mikrosystemtechnik hergestellt werden, basieren zumeist auf dem piezoresistiven Prinzip (Widerstandswert ist von mechanischen Spannungen aufgrund von Verformungen abhängig) (VDI 3786 Blatt 16, [9]). Eine kleine und dünne Siliziummembrane verbiegt sich, sobald ein Druckunterschied zwischen ihrer Vorder- und Rückseite anliegt. Diese Durchbiegung wird durch in die Membrane implantierte Widerstände gemessen, die ihren Wert aufgrund der auftretenden Verformung und zugehörigen mechanischen Spannungen ändern. Zumeist sind vier dieser piezoresistiven Widerstände zu einer Messbrücke verschaltet, die ein dem Druckwert proportionales Ausgangsspannungssignal liefert. Dieses Signal wird in einem anwendungsspezifischen Schaltkreis (ASIC) verarbeitet (verstärkt, A/D gewandelt, linearisiert, temperaturkompensiert) und in ein standardisiertes (Bus-)Signal umgewandelt. Der Druck kann gegen verschiedene Referenzwerte gemessen werden: beispielsweise Vakuum – Absolutdrucksensor, Luftdruck – Relativdrucksensor. Die Druckmessbereiche derartiger Drucksensoren überstreichen einen Bereich von sehr niedrigen Drücken (Vakuummessungen) bis hin zu sehr hohen Drücken (Einspritzdruck Kfz-Motoren und Bremssystem); allerdings sind hier Anpassungen in Membrangröße und -dicke notwendig (Berstdruck, Überlastschutz).

Für die Luftdruckmessung in meteorologischen Systemen sind die sogenannten barometrischen Drucksensoren geeignet. Diese wurden hauptsächlich zur Höhenmessung (Navigation in Hochhäusern, auf Hochstraßen und im Gebirge) entwickelt. Sie decken den Messbereich der typischen Luftdruckwerte ab ((900...1100) hPa) mit einer Auflösung von typisch 10 Pa (Messungen bis 300 hPa mit größeren Messfehlern möglich). Sie sind somit auch sehr gut zur Wetterbeobachtung geeignet. Als Referenzdruck wird ein Vakuum verwendet, das einen zeitlich und über die Temperatur stabilen Bezugswert darstellt (Absolutdrucksensor). Auch hier wird die Genauigkeit über die Herstellerkalibrierung und Signalverarbeitung erreicht. Barometrische Drucksensoren sind in Standardgehäusen mit Metalldeckeln aufgebaut. Da der Luftdruck iso-quasistatisch wirkt (allseitige Ausbreitung, geringe Dynamik) kann er sehr einfach zum Drucksensor gelangen.

One example of this is the barometric pressure sensor, which was designed for altitude measurement, but is also very suitable for actual air pressure measurement.

### 6.1.1 Pressure measurement

Microelectromechanical pressure sensors (MEMS – Microelectromechanical Systems), which are manufactured using the methods of microsystems technology, are mostly based on the piezoresistive principle (resistance value depends on mechanical stresses due to deformations) (VDI 3786 Part 16, [9]). A small and thin silicon membrane bends as soon as there is a pressure difference between its front and back. This deflection is measured by resistors implanted in the membrane, which change their value due to the occurring deformation and associated mechanical stresses. In most cases, four of these piezoresistive resistors are connected to form a measuring bridge that provides an output voltage signal proportional to the pressure value. This signal is processed (amplified, A/D converted, linearised, temperature compensated) in an application-specific integrated circuit (ASIC) and converted into a standardised (bus) signal. The pressure can be measured against various reference values: for example, vacuum – absolute pressure sensor, air pressure – relative pressure sensor. The pressure measurement ranges of such pressure sensors span a range from very low pressures (vacuum measurements) to very high pressures (injection pressure automotive engines and brake system); however, adjustments in membrane size and thickness are necessary here (burst pressure, overload protection).

So-called barometric pressure sensors are suitable for measuring air pressure in meteorological systems. These were mainly developed for altitude measurement (navigation in high-rise buildings, on elevated roads and in mountains). They cover the measuring range of typical air pressure values ((900...1100) hPa) with a resolution of typically 10 Pa (measurements up to 300 hPa are possible with larger measuring errors). They are therefore also very well suited for weather observation. A vacuum is used as the reference pressure, which represents a reference value that is stable over time and temperature (absolute pressure sensor). Here, the accuracy is also achieved through manufacturer calibration and signal processing. Barometric pressure sensors are built in standard housings with metal lids. Since the air pressure is iso-quasi-static (all-round propagation, low dynamics) it can easily reach the pressure sensor. A defined opening in the

Hierzu ist eine definierte Öffnung im Geräte-/Modulgehäuse empfohlen. Solange dieser Druckzugang zum Sensorchip gewährleistet ist (Versiegelung der Löcher durch Verschmutzungen ist zu vermeiden, aber in der Regel unwahrscheinlich), ist nicht mit systematischen Messfehlern zu rechnen. Temperaturschwankungen, die die eigentliche Druckmessung beeinflussen, werden im ASIC kompensiert (Einsatztemperaturbereiche sind typisch  $(-40\dots90)$  °C). Zur Erhöhung der Zuverlässigkeit befinden sich oft feinmaschige Filter in den barometrischen Drucksensoren, um Partikelablagerungen auf der Membran zu vermeiden.

### 6.1.2 Temperaturmessung

Zur meteorologischen Temperaturmessung können Messwiderstände, insbesondere PT100 (PT1000) als Platinmesswiderstand mit einem Wert von  $100\ \Omega$  ( $1000\ \Omega$ ) bei  $0\ \text{°C}$  zum Einsatz kommen. Diese Messwiderstände sind standardisiert (DIN EN IEC 60751, VDI 3786 Blatt 3, [10]) und bedürfen keiner Exemplarkalibrierung und für den meteorologischen Messbereich keiner Kennlinienkorrektur. Sie sind in miniaturisierter Bauform erhältlich und können Energieversorgung und Digitalisierungselektronik anderer Smart-Sensors mitnutzen. Thermoelemente sind aufgrund der Problematik der Vergleichsstellentemperatur (geht direkt in das Messergebnis ein) nicht geeignet für meteorologische Messungen.

Für Smart-Sensors-Anwendungen kommen jedoch zumeist nicht die klassischen Widerstandsthermometer zum Einsatz, sondern es werden Elemente in den integrierten Schaltkreisen, die ohnehin eine Temperaturabhängigkeit aufweisen, genutzt. Prinzipiell weisen viele Schaltungselemente, wie Poly-Siliziumwiderstände, Dioden oder Transistoren, einen messbaren Temperaturkoeffizienten für verschiedene elektrische Parameter auf. Um möglichst genaue Messungen zu erreichen, wird aber zumeist ein Band-Gap-Temperatursensor verwendet. Dieser nutzt die Temperaturabhängigkeit des Abstands des Leitungs- und Valenzbands des Siliziums, die wiederum genau physikalisch definiert ist und somit nur im geringen Maße technologischen Schwankungen unterliegt. Die Nutzung dieses Prinzips hat den Vorteil, dass der Temperatursensor Teil des Auswerteschaltkreises ist und somit kaum Kosten und Montageaufwand verursacht. Die Temperaturauflösung derartiger Temperatursensoren liegt bei ca.  $0,02\ \text{K}$  bei einer absoluten Genauigkeit von etwa  $0,5\ \text{K}$  im interessanten Bereich von  $-20\ \text{°C}$  bis  $80\ \text{°C}$ .

Wie bei allen Temperaturmessungen ist zu beachten, dass auch hier die Temperatur des Sensorelements (im Fall des Band-Gap-Sensors eines Ele-

ment/module housing is recommended for this purpose. As long as this pressure access to the sensor chip is guaranteed (sealing of the holes by dirt is to be avoided, but usually unlikely), systematic measuring errors are not to be expected. Temperature fluctuations that affect the actual pressure measurement are compensated for in the ASIC (operating temperature ranges are typically  $(-40\dots90)$  °C). To increase reliability, there are often fine-mesh filters in the barometric pressure sensors to avoid particle deposits on the membrane.

### 6.1.2 Temperature measurement

For meteorological temperature measurement, measuring resistors, especially PT100 (PT1000) as platinum measuring resistor with a value of  $100\ \Omega$  ( $1000\ \Omega$ ) at  $0\ \text{°C}$  can be used. These measuring resistors are standardised (DIN EN IEC 60751, VDI 3786 Part 3, [10]) and do not require any specimen calibration or characteristic curve correction for the meteorological measuring range. They are available in miniaturised design and can share the power supply and digitisation electronics of other smart sensors. Thermocouples are not suitable for meteorological measurements due to the problem of the reference junction temperature (goes directly into the measurement result).

For smart sensor applications, however, mostly not the classic resistance thermometers are used, but elements in the integrated circuits that already have a temperature dependency. In principle, many circuit elements, such as poly-silicon resistors, diodes, or transistors, have a measurable temperature coefficient for various electrical parameters. However, in order to achieve measurements that are as accurate as possible, a band-gap temperature sensor is usually used. This uses the temperature dependence of the distance between the conduction and valence bands of the silicon, which in turn is precisely physically defined and thus only subject to minor technological fluctuations. The use of this principle has the advantage that the temperature sensor is part of the evaluation circuit and thus hardly causes any costs and installation effort. The temperature resolution of such temperature sensors is about  $0,02\ \text{K}$  with an absolute accuracy of about  $0,5\ \text{K}$  in the interesting range of  $-20\ \text{°C}$  to  $80\ \text{°C}$ .

As with all temperature measurements, it is to be noted that the temperature of the sensor element (in the case of the band-gap sensor of an element on an

ments auf einem integrierten Mikrochip) gemessen wird und nicht unbedingt die Temperatur der Umgebungsluft. Zum einen ist dafür zu sorgen, dass das Sensorsystem so gut durchlüftet ist, dass die Luft bis zum Sensorelement gelangen kann und gut ausgetauscht wird. Zum anderen ist zu vermeiden, dass die Elektronik zu einer Erwärmung führt. Die Mikrochips sind in der Regel klein und gut thermisch leitfähig aufgebaut, sodass hierdurch nur von geringen statischen und dynamischen Messfehlern ausgegangen werden kann. Allerdings muss auch bei der Gesamtsystemkonfiguration darauf geachtet werden, Messfehler gering zu halten. Der Sensor bedarf eines effektiven Wetterschutzes. Es müssen beispielsweise Strahlungseinflüsse (Sonnenstrahlung) vermieden werden, wozu für exakte meteorologische Temperaturmessungen ein Strahlenschutz (kleine Wetterhütte, [10]), gegebenenfalls belüftet, notwendig ist. Es ist darauf zu achten, dass der Sensor nicht im Wärmekontakt mit den Lamellen der Hütte ist und preisgünstige Hütten nicht direkt von der Sonne bestrahlt werden (Bild 2).

### 6.1.3 Feuchtemessung

Die Feuchtemessung in Smart-Sensors erfolgt zu meist als kapazitive Messung (VDI 3786 Blatt 4, [11]). Hierbei kann ein spezielles Dielektrikum (meist spezielles Polymer) Feuchte aufnehmen und abgeben, wobei sich seine Dielektrizitätskonstante ändert.

integrated microchip) is measured and not necessarily the temperature of the ambient air. On the one hand, it is to be ensured that the sensor system is well ventilated so that the air can reach the sensor element and is well exchanged. On the other hand, it is to be avoided that the electronics cause heating. The microchips are usually small and have good thermal conductivity, so that only small static and dynamic measurement errors can be assumed. However, care shall also be taken in the overall system configuration to keep measurement errors low. The sensor requires effective weather protection. For example, radiation influences (solar radiation) shall be avoided, for which a radiation protection, ventilated where appropriate (small weather screen, [10]), is necessary for exact meteorological temperature measurements. It is to be ensured that the sensor is not in thermal contact with the louvres of the screen and that inexpensive screens are not directly irradiated by the sun (Figure 2).

### 6.1.3 Humidity measurement

Humidity measurement in smart sensors is usually carried out as a capacitive measurement (VDI 3786 Part 4, [11]). Here, a special dielectric (usually a special polymer) can absorb and release moisture, whereby its dielectric constant changes.



Bild 2. Beispiel für eine einfache und preisgünstige Wetterhütte (Quelle: TFA Dostmann, Wertheim)

Figure 2. Example of a simple and inexpensive weather screen (source: TFA Dostmann, Wertheim)

Mittels interdigitaler oder beidseitiger Elektroden (wobei die obere feuchtedurchlässig sein muss – strukturiert oder porös) lässt sich ein Kondensator realisieren, dessen Kapazitätswert stark von der Luftfeuchte abhängt. Das Feuchteverhalten des Polymers ist als komplex anzusehen, daher kommen hier stets Sensoren mit integrierter Elektronik zum Einsatz, die Kennlinien-, Hysterese- und Drift-Kompensationen erlauben. Die Kondensatoranordnung sitzt direkt auf dem Elektronikchip und ist über ein Loch im Gehäuse direkt für die Umgebungsluft zugänglich – beim Einbau in Geräte und Sensormodule ist zu beachten, dass dieses nicht verschlossen wird. Darüber hinaus ist für einen guten Luftaustausch zu sorgen. Mit derartigen Sensoren lassen sich Auflösungen von etwa 0,1 % relativer Luftfeuchte erreichen, wobei die absolute Genauigkeit bei etwa  $\pm 2$  % relativer Luftfeuchte liegt. Obwohl die Sensoren in einem Temperaturbereich von  $-40$  °C bis  $125$  °C eingesetzt werden können, ist die maximale Feuchteaufnahme des Polymers begrenzt, das heißt, bei hoher Temperatur, bei denen die Luft große Mengen Wasser aufnehmen kann, können hohe relative Feuchtwerte nicht mehr richtig erfasst werden. Der Messbereich des Sensors ist somit von der absoluten Feuchte (Feuchtemaße siehe VDI 3786 Blatt 4, [11]) abhängig. Da insbesondere zur Messung der relativen Feuchte eine Temperaturmessung benötigt wird, ist stets ein Temperatursensor im ASIC verbaut (Band Gap). Dieser kann somit zur Messung der Temperatur ausgelesen und verwendet werden. Somit erfüllen diese Feuchtesensoren eine Doppelfunktion. Die Sensoren sollten auch in einer Wetterhütte montiert werden.

#### 6.1.4 Umgebungssensoren

Umgebungssensoren vereinen zumeist die Messung der in Abschnitt 6.1.1 bis Abschnitt 6.1.3 genannten meteorologischen Größen Luftdruck, Lufttemperatur und Luftfeuchte. Typische Abmessungen dieser kombinierten Sensoren sind  $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ , wobei die Auswerteelektroniken mit enthalten sind. Die Gehäuse entsprechen denen, die bei den Drucksensoren beschrieben sind. Zunehmend wird Feinstaub- und Gassensorik mit integriert, allerdings zunächst wegen zu geringer Empfindlichkeiten bzw. hoher Querempfindlichkeiten (z.B. Feuchte, Wind, Strahlung) eher für die Innenraumüberwachung und hierbei für organische Gase (u.a. Ausgasungen aus Plastik, Farben, Anstrichen, Möbeln). Andere Gase wie  $\text{CO}_2$  lassen sich mit diesen miniaturisierten Sensoren nicht messen.

#### 6.1.5 Strahlung

Zur Messung der Sonneneinstrahlung (VDI 3786 Blatt 5, [12]) eignen sich vom physikalischen Prinzip her Fotodioden. Erreichen die Photonen des

By means of interdigital or double-sided electrodes (whereby the upper one shall be permeable to moisture – structured or porous), it is possible to realise a capacitor whose capacitance value strongly depends on the air humidity. The humidity behaviour of the polymer is to be regarded as complex, therefore sensors with integrated electronics are always applied here. These allow characteristic, hysteresis, and drift compensations. The capacitor arrangement is located directly on the electronic chip and is directly accessible to the ambient air via a hole in the housing. For installation in devices and sensor modules, it is to be ensured that this hole is not closed. Furthermore, a good exchange of air is to be ensured. With such sensors, resolutions of about 0,1 % relative humidity can be achieved, with an absolute accuracy of about  $\pm 2$  % relative humidity. Although the sensors can be used in a temperature range from  $-40$  °C to  $125$  °C, the maximum moisture absorption of the polymer is limited, i.e. at high temperatures, where the air can absorb large amounts of water, high relative humidity values can no longer be detected correctly. The measuring range of the sensor is therefore dependent on the absolute humidity (for humidity measurements see VDI 3786 Part 4, [11]). Since a temperature measurement is required in particular for measuring relative humidity, a temperature sensor is always built into the ASIC (band gap). This can therefore be read out and used to measure the temperature. Thus, these humidity sensors fulfil a double function. The sensors should also be mounted in a weather screen.

#### 6.1.4 Environmental sensors

Environmental sensors mostly combine the measurement of the meteorological quantities air pressure, air temperature and air humidity mentioned in Section 6.1.1 to Section 6.1.3. Typical dimensions of these combined sensors are  $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ , with the evaluation electronics included. The housings correspond to those described for the pressure sensors. Fine particles and gas sensors are increasingly being integrated, but initially used for indoor monitoring and thereby for organic gases (including outgassing from plastics, paints, coatings, furniture) because of too low sensitivities or high cross-sensitivities (e.g., humidity, wind, radiation). Other gases such as  $\text{CO}_2$  cannot be measured with these miniaturised sensors.

#### 6.1.5 Radiation

In terms of physical principle, photodiodes are suitable for measuring solar radiation (VDI 3786 Part 5, [12]). When the photons of light reach the space-

Lichts die Raumladungszone, generieren sie im Silizium (bzw. anderen Halbleitern) Elektronen-Lochpaare. Diese Ladungen driften aufgrund der Dotierungsverhältnisse zu den Anschlüssen (Anode und Kathode), wodurch sie getrennt werden, hierbei entsteht eine messbare elektrische Spannung als Maß für die Lichteinstrahlung. Alternativ kann bei einer externen Spannungsversorgung der Strom durch die Diode (Fotostrom) als Maß für die Lichteinstrahlung verwendet werden. Der Wellenlängenbereich für die am meisten verbreiteten siliziumbasierten Fotodioden liegt zwischen 190 nm und 1100 nm. Somit kann das sichtbare Licht (400 nm bis 750 nm) aber auch fast der vollständige UV-Bereich (UV-A und UV-B vollständig, UV-C teilweise – Bereich 100 nm bis 190 nm kann interpoliert werden) und ein kleiner Teil des nahen Infrarotlichts (nur unterer Teil IR-A) erfasst werden. Durch die Platzierung von Filtern vor den Fotodioden werden bestimmte Wellenlängenbereiche erfasst. Die Kombination mehrerer Filter in einem Sensor ermöglicht die Messung spektraler Anteile. Derartige Smart-Sensoren werden als Ambient Light Sensors (Umgebungslichtsensoren, [13]) in allen mobilen Geräten mit Displays eingesetzt, um die Anzeigehelligkeit und eine umgebungslichtunabhängige Farbdarstellung zu erreichen. Somit sind sie massenhaft und preiswert verfügbar und liefern auch gute Werte für meteorologische Strahlungsmessungen, wenngleich nicht für den gesamten Wellenlängenbereich.

Hinsichtlich der Abdeckung des Infrarotstrahlungsbereichs (siehe VDI 3786 Blatt 5, [12]) sind Fotodioden aus anderen Materialien als Silizium denkbar. Allerdings handelt es sich hierbei um Speziallösungen, die nur begrenzt verfügbar und teuer sind und somit dem Crowdsourcing nicht zur Verfügung stehen. Alternativ können IR-Sensoren basierend auf Bolometern (freistehende temperaturabhängige Widerstände), Thermopile-Sensoren (mikrosystemtechnisch hergestellte Thermoelemente auf freistehenden Membranen) und pyroelektrische Sensoren (AlScN basiert) zur IR-Strahlungsmessung eingesetzt werden.

Bei den beschriebenen Mikrosensoren ist zu beachten, dass die Messfläche sehr klein ist ( $\ll 1 \text{ mm}^2$ ). Es muss sichergestellt sein, dass die zu messende Strahlung den Sensor erreicht, das heißt, dass keine Abschattungseffekte auftreten. Es ist denkbar, mehrere dieser Sensoren in einem Modul zu platzieren und ihre Signale zu kombinieren. Abschließend soll erwähnt werden, dass die Funktionsweise von Solarzellen auf dem gleichen Prinzip wie die Fotodiode basiert. Sie weisen eine größere Fläche auf, werden allerdings ohne Filter betrieben, da möglichst der gesamte spektrale Bereich des Sonnenlichts

charge zone, they generate electron-hole pairs in the silicon (or other semiconductors). These charges drift to the connectors (anode and cathode) due to the doping ratios, whereby they are separated, resulting in a measurable electrical voltage as a measure of the light irradiation. Alternatively, with an external power supply, the current through the diode (photocurrent) can be used as a measure of light irradiance. The wavelength range for the most common silicon-based photodiodes is between 190 nm and 1100 nm. This means that the visible light (400 nm to 750 nm) but also almost the entire UV range (UV-A and UV-B completely, UV-C partially – range 100 nm to 190 nm can be interpolated) and a small part of the near infrared light (only lower part IR-A) can be detected. By placing filters in front of the photodiodes, specific wavelength ranges are captured. The combination of several filters in one sensor enables the measurement of spectral components. Such smart sensors are used as ambient light sensors [13] in all mobile devices with displays to achieve display brightness and colour representation independent of ambient light. Thus, they are available in large quantities and at low costs and also provide good values for meteorological radiation measurements, although not for the entire wavelength range.

With regard to covering the infrared radiation range (see VDI 3786 Part 5, [12]), photodiodes made of materials other than silicon are conceivable. However, these are special solutions that are only available in limited quantities, that are expensive and thus not available for crowdsourcing. Alternatively, IR sensors based on bolometers (free-standing temperature-dependent resistors), thermopile sensors (microsystem-manufactured thermocouples on free-standing membranes) and pyroelectric sensors (AlScN-based) can be used for IR radiation measurement.

With the microsensors described, it is to be noted that the measuring area is very small ( $\ll 1 \text{ mm}^2$ ). It shall be ensured that the radiation to be measured reaches the sensor, i.e. that no shadowing effects occur. It is conceivable to place several of these sensors in one module and combine their signals. Finally, it shall be mentioned that the functioning of solar cells is based on the same principle as the photodiode. They have a larger surface area, but are operated without filters, since the entire spectral range of sunlight shall be used if possible. However, in order to be able to use the measurement for



genutzt werden soll. Um die Messung allerdings für quantitative meteorologische Messungen verwerten zu können muss sichergestellt sein, dass die spektrale Kennlinie bekannt ist und die Messfläche horizontal ausgerichtet ist bzw. der Winkel gegen die Horizontale bekannt ist.

### 6.1.6 Oberflächentemperatur

Im Bereich der Strahlungstemperaturmessung mittels Smart-Sensors hat es in den letzten Jahren sehr interessante Entwicklungen gegeben. Neuartige Thermopile-Sensoren [14] erlauben die sehr genaue Bestimmung der Oberflächentemperatur (Emissionskoeffizient muss bekannt sein). Hiermit ließen sich Anordnungen realisieren, die über spezielle Messflächen die Sonneneinstrahlung, Bodenerwärmung und andere Temperaturdaten erfassen [12].

### 6.1.7 Windmessung

Für die Windmessung gibt es keine Smart-Sensors, sodass alle üblichen Messverfahren Anwendung finden können, siehe VDI 3786 Blatt 2, Blatt 12, [15]. Zur Messung der Windgeschwindigkeit und Windrichtung eignen sich kleine klassische Propeller, die durch eine Windfahne in den Wind gedreht werden, bzw. die Kombination aus einem Schalenstern und einer Windfahne. Messtechnisch gesehen handelt es sich in beiden Fällen um eine Winkelmessung, wobei beim Propeller bzw. Schalenstern das Durchlaufen des vollen Winkelkreises gezählt und bei der Windfahne der Vollkreis (360°) in möglichst kleinen Winkelschritten aufgelöst wird. Zur Messung kommen zumeist so genannte inkrementelle Sensoren zum Einsatz. Diese beruhen auf einer Scheibe, die in Winkelsegmente geteilt ist, die sich beim Durchgang durch einen Sensor erfassen lassen. Durch Zählen der Durchgänge lässt sich auf den Winkel schließen. Durch einen zweiten, versetzten Sensor ist eine Richtungserkennung möglich. Je mehr Segmente vorhanden sind, desto größer die Winkelauflösung. Dies ist für die Windfahne wichtig. Für den Propeller bzw. Schalenstern mit seinen schnellen Bewegungen ist ein Segmentdurchgang pro Umdrehung ausreichend. Die Erfassung der Segmente kann optisch (transparente, nicht transparente Bereiche) oder magnetisch (Segmente mit unterschiedlichen Magnetisierungsrichtungen) erfolgen. Für die Messung der Windgeschwindigkeit ist auch das Dynamoprinzip möglich, bei dem in einem kleinen Generator eine windgeschwindigkeitsabhängige Spannung erzeugt wird.

Diese Art der Windmessung bringt jedoch aufgrund des Aufbaus mit bewegten Teilen zwei entscheidende Nachteile mit sich. Aufgrund der Reibung können geringe Windgeschwindigkeiten und geringe Windrichtungsänderungen bzw. Windrich-

quantitative meteorological measurements, it shall be ensured that the spectral characteristic curve is known, and the measuring surface is aligned horizontally or the angle to the horizontal line is known.

### 6.1.6 Surface temperature

There have been very interesting developments in the field of radiant temperature measurement using smart sensors in recent years. New types of thermopile sensors [14] allow the surface temperature to be determined very precisely (the emission coefficient shall be known). This could be used to realise arrangements that record solar radiation, ground heating and other temperature data via special measuring surfaces [12].

### 6.1.7 Wind measurement

There are no smart sensors for wind measurement, so that all the usual measurement methods can be used, see VDI 3786 Part 2, Part 12, [15]. Small classic propellers, which are turned into the wind by a wind vane, or the combination of a cup star and a wind vane are suitable for measuring wind speed and wind direction. In both cases, the measurement is an angular measurement, with the propeller or cup star counting the full angular circle and the wind vane resolving the full circle (360°) in the smallest possible angular steps. So-called incremental sensors are usually used for measurement. These are based on a disc that is divided into angular segments that can be recorded as they pass through a sensor. It is possible to determine the angle by counting the number of passes. A second, offset sensor makes it possible to detect the direction. The more segments there are, the greater the angular resolution. This is important for the wind vane. For the propeller or cup star with its fast movements, one segment pass per revolution is sufficient. The segments can be recorded optically (transparent, non-transparent areas) or magnetically (segments with different magnetisation directions). The dynamo principle is also possible for measuring the wind speed, in which a wind-speed-dependent voltage is generated in a small generator.

However, this type of wind measurement has two decisive disadvantages due to the construction with moving parts. Due to the drag, low wind velocities and small changes in wind direction or wind direction changes at low wind velocities cannot be

tungsänderungen bei geringen Windgeschwindigkeiten nicht erfasst werden. Zudem sind bewegliche Teile empfindlich hinsichtlich Verschleißes und Verunreinigungen. Diese können zu Messfehlern und Ausfällen führen. Ein alternatives Verfahren ist die Windmessung mit Ultraschall. Hierbei wird ein ausgesendeter Ultraschall dem Wind ausgesetzt, wobei der Wind zu einer Geschwindigkeitsänderung des Schalls führt. Diese weist einen Betrag (proportional der Windgeschwindigkeit) und eine Richtung (entsprechend der Windrichtung) auf. Für eine Messung sind mehrere Ultraschallmessstrecken in einer festen Konstruktion notwendig, um Windgeschwindigkeit und Richtung bestimmen zu können. Zudem sind auch Anordnungen in einer Ebene möglich. Um die Messung allerdings für quantitative meteorologische Messungen zu verwenden, muss sichergestellt sein, dass das Gerät horizontal ausgerichtet ist bzw. der Winkel gegen die Horizontale bekannt ist. Zur Windrichtungsmessung muss das Gerät eingemordet sein oder ein Kompasssignal aufgezeichnet werden.

#### 6.1.8 Niederschlag

Für die Niederschlagsmessung gibt es keine Smart-Sensoren, sodass alle üblichen Messverfahren Anwendung finden können, siehe VDI 3786 Blatt 7, [16]. Bei der Erfassung von Niederschlag ist zwischen seiner zeitlichen Detektion (wann und wie lange tritt Niederschlag auf) und seiner quantitativen Messung (Regenmenge pro Zeiteinheit) zu unterscheiden. Zur Detektion von Niederschlägen (Niederschlagsmelder) werden interdigitale Kondensatoren eingesetzt. Hierbei bilden zwei ineinandergeschobene Kammelektroden einen planaren Kondensator (Streukondensator), dessen Dielektrikum durch die Luft über seiner Oberfläche gebildet wird. Gelangt nun Niederschlag auf die Oberfläche, ändert sich das Dielektrikum und somit der Kondensatorwert, der als Detektionskriterium verwendet wird. Je nach Ausführungsform können verschiedene Niederschläge (Regen, Tau, Schnee, Vereisung) prinzipiell detektiert werden, allerdings ist die Änderung des Kondensatorwerts auch bei geringem Niederschlag sehr groß (einzelne Regentropfen reichen zum Auslösen), sodass dieses Prinzip meist als Regensensor verwendet wird. Alternativ gibt es auch optische Regensensoren, bei denen Regentropfen den optischen Pfad des Sensors verändern und so erfasst werden (Automobilanwendungen).

Für kontinuierliche und automatische Messungen von Regenmengen ist ein Verfahren notwendig, bei denen in kurzen Zeiträumen Wassermengen erfasst werden. Dies erfolgt zumeist mit einem modifizierten Wägesystem mit Wippenmechanismus, seltener

recorded. In addition, moving parts are sensitive to wear and contamination. These can lead to measurement errors and failures. An alternative method is to measure wind with ultrasound. Here, an emitted ultrasound is exposed to the wind, whereby the wind causes a change in the speed of the sound. This has a magnitude (proportional to the wind speed) and a direction (corresponding to the wind direction). For a measurement, several ultrasonic measuring sections in a fixed construction are necessary in order to be able to determine wind speed and direction. Arrangements in one plane are also possible. However, in order to use the measurement for quantitative meteorological measurements, it shall be ensured that the device is aligned horizontally or that the angle to the horizontal is known. For wind direction measurement, the device shall be oriented, or a compass signal shall be recorded.

#### 6.1.8 Precipitation

There are no smart sensors for precipitation measurement, so all common measurement methods can be used, see VDI 3786 Part 7, [16]. When detecting precipitation, a distinction is to be made between its temporal detection (when and for how long does precipitation occur) and its quantitative measurement (amount of rain per time unit). Interdigital capacitors are used to detect precipitation (precipitation detectors). Here, two comb electrodes pushed into each other form a planar capacitor (scattering capacitor) whose dielectric is formed by the air above its surface. If precipitation now reaches the surface, the dielectric changes and thus the capacitor value, which is used as a detection criterion. Depending on the design, different precipitations (rain, dew, snow, icing) can be detected in principle, however, the change of the capacitor value is very large even with small precipitations (single raindrops are sufficient to trigger), so that this principle is mostly used as a rain sensor. Alternatively, there are also optical rain sensors where raindrops change the optical path of the sensor and are thus detected (automotive applications).

For continuous and automatic measurements of rainfall amounts, a procedure is necessary in which water amounts are recorded in short periods of time. This is usually done with a modified weighing system with a tipping-bucket mechanism, more rarely

durch reine Wägesysteme (Ombrometer). Über eine definierte Fläche wird der Regen aufgesammelt und über einen Trichter gebündelt. Wird eine gewisse Wassermenge, genauer gesagt Masse, überschritten, kippt diese Auffangschale seitlich weg und das Wasser läuft aus. Im Kippvorgang gelangt eine zweite Auffangschale in den Wasserpfad und nimmt das Wasser auf, bis so viel Wasser gesammelt wurde, dass sie zurück kippt. Es befinden sich also zwei Auffangschalen auf den beiden Seiten einer Wippe und die Anzahl der Wippvorgänge (über bewegten Magnet und Magnetsensor gemessen) ist somit ein Maß für die Regenmenge. Regen lässt sich etwa im Bereich von 0,2 mm/h bis 900 mm/h mit einer Messgenauigkeit von 1 mm/h messen. Fester Niederschlag kann auf diese Weise nicht gut gemessen werden, da die Messung nur beim Tauen erfolgen kann (Zeitverzug und nicht alles Schmelzwasser wird erfasst).

### 6.1.9 Bodentemperatur und Bodenfeuchte

Bodenfeuchte und Bodentemperatur lassen sich mit Bodensonden messen [17], die aber keine Smart-Sensoren sind. Diese werden in Form von Einstechspießen in Leiterplattentechnologie hergestellt. Ähnlich wie bei dem Niederschlagsmelder kommt ein Interdigitalkondensator zum Einsatz. Sein Dielektrikum ist das Erdreich, dessen Dielektrizitätskonstante sich mit Wasseraufnahme bzw. -abgabe kontinuierlich ändert, was zu einem kontinuierlichen Kapazitätsmesssignal führt. Die Kalibrierung dieser Sensoren ist sehr schwierig, Trends lassen sich jedoch sehr gut ermitteln. Je nach Größe und Bauform lässt sich Feuchte in verschiedenen Tiefen messen und Temperatursensoren (Abschnitt 6.1.2) lassen sich (ebenfalls für unterschiedliche Tiefen) einfach integrieren. Stromversorgung und Signalversorgung befinden sich außerhalb des Erdreichs.

## 6.2 Sensoren und Plattformen aus verschiedenen Einsatzgebieten bzw. Gerätekonfigurationen

Obwohl eine Vielzahl an Sensoren (z.B für Temperatur, Feuchte, Luftdruck) heute in diversen Geräten verfügbar ist, stehen nicht alle Sensoren einem offenem Crowdsourcing wirklich zur Verfügung, da ihre Daten meist nur in geschlossenen Systemen verarbeitet werden und schon aus Gründen der Datensicherheit kein externer Zugriff möglich ist. Ein Überblick zur Verfügbarkeit bei verschiedenen Plattformen gibt Tabelle 4.

In Tabelle 4 wurden kleine automatische Wetterstationen nach VDI 3786 Blatt 13 [4] nicht aufgenommen, die für spezielle Anwendungen konfiguriert werden (siehe Tabelle 2 in VDI 3786 Blatt 13). Gleiches gilt für Wind- und Solarenergieanlagen und Wasserkraftwerke [31]. Bei beiden Anwendun-

with pure weighing systems (ombrometers). The rain is collected over a defined area and bundled via a funnel. If a certain amount of water, or more precisely mass, is exceeded, this collection tray tilts sideways, and the water runs out. In the tipping process, a second collection tray enters the water path and collects the water until so much water has been collected that it tips back. There are therefore two collecting bowls on both sides of a bucket and the number of tipping-buckets (measured via moving magnet and magnetic sensor) is thus a measure of the amount of rain. It is possible to measure rain in the range of 0,2 mm/h to 900 mm/h with a measurement accuracy of 1 mm/h. Solid precipitation cannot be measured well in this way because the measurement can only be made during thawing (time delay and not all melt water is recorded).

### 6.1.9 Soil temperature and soil moisture

Soil moisture and soil temperature can be measured with soil probes [17], but these are not smart sensors. These are produced in the form of insertion spikes using printed circuit board technology. Similar to the precipitation sensor, an interdigital capacitor is used. Its dielectric is the soil, whose dielectric constant changes continuously with water absorption or release, resulting in a continuous capacitance measurement signal. Calibration of these sensors is very difficult, but trends can be determined very well. Depending on the size and design, it is possible to measure moisture at different depths and temperature sensors (Section 6.1.2) can be easily integrated (also for different depths). Power supply and signal supply are located outside the ground.

## 6.2 Sensors and platforms from different areas of application or device configurations

Although a large number of sensors (e.g., for temperature, humidity, air pressure) are available in various devices today, not all sensors are really available for open crowdsourcing, as their data is usually only processed in closed systems and external access is not possible for reasons of data security alone. Table 4 provides an overview of the availability on various platforms.

Table 4 does not include small automatic weather stations according to VDI 3786 Part 13 [4], which are configured for special applications (see Table 2 in VDI 3786 Part 13). The same applies to wind and solar energy plants and hydropower plants [31]. Both applications typically use commercial tempera-

gen werden in der Regel kommerzielle Temperatur-, Feuchte-, Wind-, Strahlungs- und Niederschlagsensoren eingesetzt, die in den Richtlinien VDI 3786 Blatt 2, Blatt 3, Blatt 4, Blatt 5, Blatt 7 und Blatt 12 beschrieben sind. Derartige Daten könnten für Crowdsourcing verfügbar gemacht werden.

Für die kleinen (privaten) Wetterstationen nach Tabelle 4 gibt es unterschiedliche Komplexitäten und Ausbaustufen [18]. In der Regel sind in einfachen bzw. Basisausführungen Temperatur-, Druck- (oft in der Ausführungsform des Umgebungssensors) und gegebenenfalls Strahlungssensoren vorhanden. Für das Crowdsourcing ist es notwendig, dass diese Stationen ihre Daten ins Internet senden und diese dort abgerufen werden können (z.B. Netatmo). Wind- und Regenmessung sind eher in komplexen Wetterstationen zu finden (z.B. DNT Weather-Screen Pro) bzw. sind modular nachrüstbar (Netatmo).

Allerdings stehen beim Aufbau nicht immer die besten messtechnischen Lösungen im Vordergrund, sondern oft Fertigungsaspekte, um die Stationen kostengünstig und in großen Stückzahlen anbieten zu können. Für die gängigsten Wetterstationen sind Konstruktionsanalysen (Tear Down, [32]) verfügbar, die neben den Datenblättern eine bessere Einschätzung der messtechnischen Eigenschaften ermöglichen.

Des Weiteren ist unbedingt zu beachten, dass die zu messende Luft geeignet in den entsprechenden Sensor eingeleitet werden kann, sodass deren Eigenschaften korrekt gemessen werden. Ungeeignet ist beispielsweise der Temperaturfühler bei Smartphones, der in der Regel nicht mit der Außenluft in Verbindung steht.

Falls die Daten zugänglich sind, sind Smarthome und Gebäudetechnik von Interesse, wobei der Fokus auf Außentemperatur (Heizungssteuerung), Wind (Markisen, Fenster, Dachfenster), Niederschlag (Dachfenster), Sonnenstand/Bewölkung (Rollläden) liegt. Allerdings werden oftmals eher Detektoren als Messsysteme verwendet, die z.B. die Windgeschwindigkeit durch die Vibration von Jalousien oder Markisen messen. Somit liegen meist nicht die eigentlichen meteorologischen Daten, sondern bereits abgeleitete Informationen vor, die nur bedingte Erkenntnisse (z.B. zu starken Windereignissen) zulassen. Zudem muss festgestellt werden, dass bislang der Fokus im Smarthome-Bereich auf Innenraumsensoren [33] liegt und Außensensoren eher unterstützend eingesetzt werden. Letztere sind schwieriger einzubinden und zu montieren und liefern eher Zusatzinformationen für die Innenraumsteuerung.

ture, humidity, wind, radiation, and precipitation sensors described in the standards VDI 3786 Part 2, Part 3, Part 4, Part 5, Part 7, and Part 12. Such data could be made available for crowdsourcing.

For the small (private) weather stations according to Table 4, there are different levels of complexity and configuration [18]. Usually, simple or basic versions include temperature, pressure (often in the form of an environmental sensor) and possibly radiation sensors. For crowdsourcing, it is necessary for these stations to send their data to the internet, where it can be retrieved (e.g., Netatmo). Wind and rain measurement are more likely to be found in complex weather stations (e.g., DNT Weather-Screen Pro) or are modularly retrofittable (Netatmo).

However, not always the best metrological solutions are in the foreground during construction, instead often manufacturing aspects are decisive in order to be able to offer the stations cost-effectively and in large quantities. Design analyses (Tear Down, [32]) are available for the most common weather stations, which, in addition to the data sheets, allow a better assessment of the metrological properties.

Furthermore, it is essential to ensure that the air to be measured can be introduced into the corresponding sensor in a suitable manner so that its properties are measured correctly. Unsuitable, for example, is the temperature sensor on smartphones, which is usually not in contact with the outside air.

If the data is accessible, smarthome and building technology are of interest, focusing on outdoor temperature (heating control), wind (awnings, windows, skylight windows), precipitation (skylight windows), sun position/cloudiness (shutters). However, detectors are often used rather than measuring systems, which measure, e.g., the wind speed through the vibration of blinds or awnings. Thus, in most cases, the actual meteorological data is not available, but rather already derived information that only allows conditional findings (e.g., on strong wind events). In addition, it shall be noted that, so far, the focus in the smarthome sector has been on indoor sensors [33] and outdoor sensors are used more as a support. The latter are more difficult to integrate and install and tend to provide additional information for indoor control.

Tabelle 4. Geeignete Plattformen für Crowdsourcing

Geräte mit prinzipiell geeigneten Sensoren	Eignung	Verfügbarkeit
Private automatische Wetterstationen (auch Schulwetterstationen) mit Internetanschluss [18 bis 20]	<b>Gut geeignet</b> – konstruiert zur Messung von Wetterdaten, ausreichend genaue und langzeitstabile Sensoren verbaut, Aufstellort- und Betriebsbedingungen sind zu beachten.	offene Daten, jedoch in unterschiedlichen Netzen, keine einheitliche Infrastruktur
Smarthome (privat) [21; 22]	<b>Teilweise geeignet</b> – Fokus liegt auf Bereitstellung relevanter Daten für die Haussteuerung, oftmals Detektoren und keine quantitativen Sensoren (Regen, Wind), Positionierung eher anwendungsbezogen (nah an Dachfenstern) und somit nicht optimal zur Messung meteorologischer Größen.	Oft in geschlossenem Netz, Sicherheit steht momentan im Fokus (wichtig für Akzeptanz und Verbreitung) – Weitergabe Schnittstellen für ausgewählte Sensoren (insbesondere Außensensoren) denkbar.
Gebäudetechnik (öffentlich, gewerblich) [23]	<b>Geeignet</b> – oft zentrale Erfassung von Wetterdaten zur Verwendung verschiedenster Steueraufgaben, Verwendung von höherwertigen Sensoren.	Oft in geschlossenem Netz, insbesondere Weitergabe von definierten Außensensordaten von öffentlichen Gebäuden denkbar (Infrastruktur).
Smartphone [24]	<b>Kaum geeignet</b> – verbaute Sensoren sind nicht für die Wetterdatenerfassung gedacht, da Smartphone, wenn überhaupt, dann nur kurzfristig dem Wetter ausgesetzt ist; Sensoren, die Wetterdaten messen können, sind nicht für diese gedacht und optimiert.	Oft nicht direkt zugänglich, Freigabe über spezielle Apps in Internetportale möglich.
Smartwatches [25]	<b>Kaum geeignet</b> – verbaute Sensoren sind nicht für die Wetterdatenerfassung gedacht, da Uhr, wenn überhaupt, dann nur kurzfristig dem Wetter ausgesetzt ist; Sensoren, die Wetterdaten messen können, sind nicht für diese gedacht und optimiert.	Oft nicht direkt zugänglich, Freigabe über spezielle Apps in Internetportale möglich.
Auto [26; 27]	<b>Nicht geeignet</b> – verbaute Sensoren sind nicht für die Wetterdatenerfassung gedacht, Konstruktion und Betrieb des Fahrzeugs können zu Abweichungen führen (z. B. Temperaturmessung), oftmals eher Indikatoren (Scheibenwischergeschwindigkeit).	Nicht zugängliche Daten – Sicherheit hat oberste Priorität, selbst Apps der Autohersteller erlauben nur Zugriff bei stehendem Fahrzeug. Einzelne Hersteller haben Daten freigegeben [89].
E-Bike [28]	<b>Nicht geeignet</b> – keine relevanten Sensoren verbaut, gegebenenfalls als Träger für Sensorsysteme geeignet.	keine Konnektivität (wäre aber über Smartphone möglich)
Sensornetzwerke (LoRaWan) [18; 29]	<b>Gut bis sehr gut geeignet</b> – je nach Art der verwendeten Sensoren, und Aufbau der verfügbaren Sensorsysteme [30].	Ende-zu-Ende-Verschlüsselung, offene Plattformen verfügbar, eigene Infrastruktur, geringer Energiebedarf der Sensoren, begrenzte Datenrate (aber ausreichend)

Table 4. Suitable platforms for crowdsourcing

Devices with sensors that are suitable in principle	Suitability	Availability
Private automatic weather stations (also school weather stations) with Internet connection [18 to 20]	<b>Well suited</b> – designed to measure weather data, sufficiently accurate and long-term stable sensors installed, installation site and operating conditions shall be observed.	open data, but in different networks, no uniform infrastructure
Smarthome (private) [21; 22]	<b>Partially suitable</b> – focus is on providing relevant data for home control, often detectors and no quantitative sensors (rain, wind), positioning rather application-related (close to skylight windows) and thus not optimal for measuring meteorological variables.	Often in closed network, security is currently the focus (important for acceptance and dissemination) – transfer of interfaces for selected sensors (especially outdoor sensors) is conceivable.
Building technology (public, commercial) [23]	<b>Suitable</b> – often centralised collection of weather data for use in a wide variety of control tasks, use of higher-quality sensors.	Often in a closed network, especially transmission of defined external sensor data from public buildings is conceivable (infrastructure).
Smartphone [24]	<b>Hardly suitable</b> – built-in sensors are not intended for weather data collection, as smartphone is only exposed to the weather for a short time, if at all; sensors that can measure weather data are not intended and optimised for this.	Often not directly accessible, release possible via special apps in internet portals.
Smartwatches [25]	<b>Hardly suitable</b> – built-in sensors are not intended for weather data collection, as watch is only exposed to weather for a short time, if at all; sensors that can measure weather data are not intended and optimised for this.	often not directly accessible, release possible via special apps in internet portals
Car [26; 27]	<b>Not suitable</b> – installed sensors are not intended for weather data collection, design and operation of the vehicle can lead to deviations (e.g. temperature measurement), often rather indicators (windscreen wiper speed).	Inaccessible data – security has to be the top priority, even car manufacturer apps only allow access when the vehicle is stationary. Some manufacturers have released data [89].
E-bike [28]	<b>Not suitable</b> – no relevant sensors installed, possibly suitable as a carrier for sensor systems.	no connectivity (but would be possible via smartphone)
Sensor Networks (LoRaWan) [18; 29]	<b>Good to very good suitability</b> – depending on the type of sensors used, and the design of the available sensor systems [30].	end-to-end encryption, open platforms available, own infrastructure, low energy demand of sensors, limited data rate (but sufficient)

Im Außenbereich werden zunehmend smarte Systeme für Gärten angeboten. Hierbei geht es im Wesentlichen um die Automatisierung von Bewässerungs- und Rasenpflegevorgängen. Dies erfolgt basierend auf Bodenfeuchtesensoren und allgemein verfügbaren Wetterdaten. Somit werden hier nur wenige Daten erhoben, die zudem aufgrund der Automatisierung wenig relevant sind (beginnt der Boden trocken zu werden, wird er gewässert) und vermutlich auch nicht zugänglich sind.

### 6.3 Sensormodule

Aufgrund der massenhaften und preiswerten Verfügbarkeit von Sensoren, insbesondere auch von

In the outdoor sector, smart systems for gardens are increasingly being offered. This essentially involves the automation of watering and lawn care processes. This is based on soil moisture sensors and generally available weather data. Thus, only a few data are collected here, which are also not very relevant due to the automation (if the soil begins to dry, it is watered) and additionally are probably not accessible.

### 6.3 Sensor modules

Due to the mass and inexpensive availability of sensors, especially also environmental sensors for

Umweltsensoren zur Messung von Luftdruck, Temperatur und Feuchte, verbunden mit drahtlosen und drahtgebundenen Übertragungstechnologien, stehen vielfältige Sensormodule zur Verfügung, die für das Crowdsourcing von Wetter- und Klimasensoren eingesetzt werden können (Bild 3).

### 6.3.1 Kommerzielle LoRaWan – Sensormodule

Mit LoRaWan stehen sowohl ein Standard als auch eine Infrastruktur zur Übertragung von Sensordaten zur Verfügung, die vorteilhaft für die Wetter- und Klimaüberwachung eingesetzt werden können. Mittels LoRaWan werden Sensorsignale über recht weite Strecken (bis zu 10 km je nach Umgebung) übertragen und somit ein weiter Erfassungsbereich abgedeckt. Zudem ist der Funkstandard so ausgelegt, dass er in dem in Europa lizenzfreien Frequenzband 863 MHz bis 870 MHz (SRD-Band Europa) betrieben wird und dass nur zu bestimmten Zeiten die Messdaten übertragen werden. Hierbei handelt es sich typischerweise um kleine Datensätze. Diese Schmalbandigkeit der Datenübertragung spielt für kleine Messdatensätze keine Rolle, bringt jedoch den Vorteil mit sich, dass sehr wenig Energie für die Übertragung benötigt wird. Somit können Batterielaufzeiten von LoRaWan-Sensormodulen von bis zu zehn Jahren (wiederum abhängig von der Umgebung) erreicht werden. Alternativ lassen sich derartige Sensormodule z.B. auch mit Solarzellen bzw. am Stromnetz betreiben. Somit werden die für das Crowdsourcing relevanten Vorteile von langen Übertragungstrecken und geringem Leistungsbedarf ideal vereint, was noch durch ein recht offenes Anwendungskonzept unterstützt wird [34 bis 38].

Die Sensordaten werden aus einem Gebiet mittels des LoRaWan-Funkstandards an ein LoRaWan-Gateway übertragen (Basisstation für Gebiet, benötigt Netzstromversorgung). In der Regel erfolgt keine Speicherung der Daten auf dem Sensormodul.

measuring air pressure, temperature, and humidity, combined with wireless and wired transmission technologies, a wide variety of sensor modules are available that can be used for crowdsourcing weather and climate sensors (Figure 3).

### 6.3.1 Commercial LoRaWan – sensor modules

LoRaWan provides both a standard and an infrastructure for the transmission of sensor data that can be used advantageously for weather and climate monitoring. LoRaWan is used to transmit sensor signals over quite long distances (up to 10 km depending on the environment), thus covering a wide detection range. In addition, the radio standard is designed in a way to operate in the 863 MHz to 870 MHz frequency band (SRD band Europe), which is licence-free in Europe, and to transmit measurement data only at certain times. These are typically small data sets. This narrow bandwidth of data transmission is not important for small measurement data sets, but it has the advantage that very little energy is needed for transmission. Thus, battery runtimes of LoRaWan sensor modules of up to ten years (again depending on the environment) can be achieved. Alternatively, such sensor modules can also be operated with solar cells or on the power grid. Thus, the advantages of long transmission distances and low power requirements relevant for crowdsourcing are ideally combined, which is further supported by a rather open application concept [34 to 38].

The sensor data is transmitted from an area to a LoRaWan gateway using the LoRaWan radio standard (base station for area, requires mains power supply). Usually, the data is not stored on the sensor module.

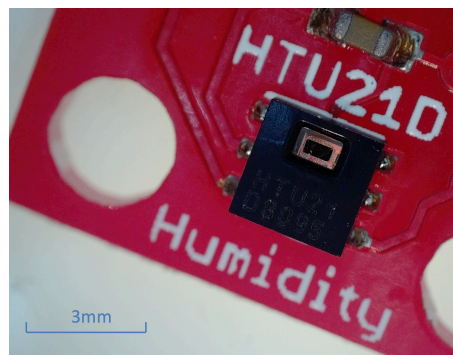


Bild 3. Beispiel für einen Feuchte- und Temperatursensor (Quelle: Knechtel, HS Schmalkalden)

Figure 3. Example of a humidity and temperature sensor (source: Knechtel, HS Schmalkalden)

Das LoRaWan-Gateway überträgt die gesammelten Daten mittels Internet auf einen Network-Server, der die Daten zwischenspeichert und die Sensoren verwaltet. Auf diese Network-Server können Applikations-Server zugreifen, auf denen dann spezielle Auswertungen erfolgen, Dash-Boards oder Protokolle erstellt und Analysen durchgeführt und weitergegeben werden.

Es sind vielfältige Sensorsysteme zur Erfassung von Wetter- und Umweltdaten kommerziell verfügbar, die Temperatur-, Feuchte- und Drucksensoren und gegebenenfalls weitere Messfunktionen in einem Gehäuse, zumeist auch mit der entsprechenden Stromversorgung vereinen. Nachteil dieser kompletten und professionellen Lösungen sind die recht hohen Kosten, die aktuell im Bereich kleiner Wetterstationen für professionelle Anwendungen liegen (VDI 3786 Blatt 13, [4]). Generell muss angemerkt werden, dass bis jetzt die LoRaWan-Anwendungen eher im professionellen bzw. kommerziellen Bereich zu finden sind. Dies liegt neben den hohen Sensorkosten auch daran, dass sowohl die Netzwerk- als auch die Applikations-Server kostenpflichtig sind. Offene und kostenfreie Lösungen sind bislang stark in der Anzahl der Sensoren eingeschränkt, die so gering ist, dass sich keine meteorologischen Messnetze aufbauen lassen. Da es sich hierbei jedoch um eine prinzipiell offene Architektur handelt, kann erwartet werden, dass offene Serverlösungen in den nächsten Jahren entstehen und es Verbindungen zwischen Smarthome und LoRaWan geben wird.

### 6.3.2 Sensormodule und Evaluierungsboards von Sensorherstellern

Ursprünglich gedacht für die Evaluierung von Smart-Sensoren, bieten kommerziell verfügbare Sensormodulsysteme verschiedener Hersteller komplette Lösungen für das Erfassen, Speichern und Übertragen von Sensordaten. Dabei sind Sensoren zum Erfassen von Temperatur, Feuchte, Luftdruck und Strahlung integriert. Zudem sind weitere Sensoren wie Mikrofone und Bewegungssensoren vorhanden, die gegebenenfalls für die Gewinnung zusätzlicher Informationen verwendet werden können. Hierbei handelt es sich um Komplettlösungen mit Gehäuse, Stromversorgung, Datenspeicherung (z.B. Speicherkarten) und Datenübertragungsmöglichkeiten (gegebenenfalls durch Zusatzmodule). Somit stehen Lösungen zur Verfügung, Sensordaten geeignet zu erfassen und in freie Datenbanksysteme zu übertragen. Hier kann dann eine Auswertung und die Kombination der Daten erfolgen. Diese Lösung kann eingesetzt werden, um auf einfache Art und Weise Sensornetzwerke aufzubauen und einzusetzen [39 bis 42].

The LoRaWan gateway transmits the collected data via the internet to a network server that caches the data and manages the sensors. These network servers can be accessed by application servers on which special evaluations are carried out, dashboards or protocols are created, and analyses are carried out and passed on.

A variety of sensor systems for the acquisition of weather and environmental data are commercially available, which combine temperature, humidity, and pressure sensors, and, if necessary, other measuring functions in one housing, usually also with the corresponding power supply. The disadvantage of these complete and professional solutions is the rather high cost, which is currently in the range of small weather stations for professional applications (VDI 3786 Part 13, [4]). In general, it shall be noted that up to now LoRaWan applications are more likely to be found in the professional or commercial sector. Apart from the high sensor costs, this is also due to the fact that both the network and the application servers are subject to a charge. Open and free solutions have so far been severely limited in the number of sensors, which is so small that no meteorological measurement networks can be set up. However, since this is an open architecture in principle, it can be expected that open server solutions will emerge in the next few years and that there will be connections between Smarthome and LoRaWan.

### 6.3.2 Sensor modules and evaluation boards from sensor manufacturers

Originally intended for the evaluation of smart sensors, commercially available sensor module systems from various manufacturers offer complete solutions for the acquisition, storage, and transmission of sensor data. Sensors for recording temperature, humidity, air pressure and radiation are integrated. In addition, further sensors such as microphones and motion sensors are available, which can be used to obtain additional information if necessary. These are complete solutions with housing, power supply, data storage (e.g., memory cards) and data transmission options (if necessary, through additional modules). Thus, solutions are available to capture sensor data in a suitable way and to transfer it to free database systems. Here, an evaluation and the combination of data can take place. This solution can be used to set up and apply sensor networks in a simple way [39 to 42].



Eine Ebene darunter sind Evaluierungsboards für Sensorsysteme anzusetzen. Hierbei handelt es sich um kommerzielle Leiterplatten, auf denen entweder Sensoren vorhanden sind oder angeschlossen werden können. Hierbei wird der Betrieb der Sensoren und die Datenauswertung und die Verknüpfung der Sensordaten (oftmals auch bereits mit KI-Methoden) mit einem Mikrocontroller realisiert. Somit lassen sich auch komplexere Zusammenhänge erfassen und darstellen. Dies zeigt, dass hier eine größere Flexibilität gegeben ist, aber auch, dass ein höherer Verständnis- aufwand sowie ein höherer Entwicklungsaufwand benötigt wird. Hierbei sind Gehäuse, Energieversorgung und Datenübertragung fallspezifisch selbst zu lösen. Dies gibt aber die Freiheit, die Daten in offene Systeme einzubringen und die Wirkung der Messgröße auf den Sensor bestmöglich zu gestalten [43; 44].

### 6.3.3 Eigenbaulösungen

Basierend auf der Verfügbarkeit von Mikrocontrollern (z.B. Arduino, Raspberry Pi) und Mikrosensoren ist eine flexible an konkrete Messaufgaben und -situationen angepasste Lösung zur Erfassung von Wetter- und Umweltdaten auf einfache Weise möglich. Die Sensoren sind zumeist auf kleinen Leiterplatten (Breakout-Boards) verfügbar. Dies erlaubt die optimale Platzierung der Sensoren bezüglich der Messaufgabe sowie eine einfache elektrische Verbindung zum Mikrocontroller (Löten oder Stecken). Die Datenübertragung erfolgt zumeist mittels I2C-Bus (vier Leitungen insgesamt für Energieversorgung und Datenübertragung) und erlaubt es, mehrere gleichartige oder verschiedene Sensoren an einem Mikrocontroller zu betreiben. Sensorspezifische Bibliotheken können für die Programmerstellung verwendet werden, was diese vereinfacht und einen sicheren Sensorbetrieb ermöglicht. Im eigentlichen Programm können wieder die Sensordaten kombiniert werden. Datenübertragungsmöglichkeiten sind je nach Board-Konfiguration des Mikrocontrollers vorhanden bzw. können einfach ergänzt werden. Für ein geeignetes Gehäuse und die Stromversorgung ist zu sorgen. Mit diesem Ansatz lassen sich spezialisierte Messstationen mit verteilten Sensoren aufbauen und die Daten auf offene Plattformen übertragen.

## 6.4 Prinzipien der Datenerfassung

Bei der Datenerfassung werden zwei grundlegende Prinzipien unterschieden (VDI 3786 Blatt 1):

- Die Messsignale der Sensoren werden in einer Datenaufbereitungseinheit digitalisiert und dann als digitales Signal weitergeleitet. Das Prinzip entspricht dem Aufbau eines Smart-Sensors (Bild 1).

One level below this are evaluation boards for sensor systems. These are commercial circuit boards on which sensors are either present or can be connected. Here, the operation of the sensors and the data evaluation and linking of the sensor data (often already with AI methods) is realised with a microcontroller. In this way, more complex correlations can also be recorded and displayed. This shows that there is greater flexibility here, but also that a higher level of understanding is required as well as a higher development effort. Here, the housing, energy supply and data transmission shall be solved case-specifically. However, this gives the freedom to integrate the data into open systems and to design the effect of the measured variable on the sensor in the best possible way [43; 44].

### 6.3.3 Self-build solutions

Based on the availability of microcontrollers (e.g. Arduino, Raspberry Pi) and microsensors, a flexible solution adapted to concrete measuring tasks and situations for the collection of weather and environmental data is easily possible. The sensors are mostly available on small circuit boards (breakout boards). This allows the optimal placement of the sensors with regard to the measuring task as well as a simple electrical connection to the microcontroller (soldering or plugging). Data transmission is mostly via I2C bus (four lines in total for power supply and data transmission) and allows several similar or different sensors to be operated on one microcontroller. Sensor-specific libraries can be used for programme creation, which simplifies this and enables safe sensor operation. In the actual programme, the sensor data can again be combined. Data transfer options are available depending on the board configuration of the microcontroller or can be easily added. A suitable housing and power supply is to be provided. With this approach, specialised measuring stations with distributed sensors can be set up and the data transferred to open platforms.

## 6.4 Principles of data collection

Two basic principles are distinguished in data acquisition (VDI 3786 Part 1):

- The measurement signals from the sensors are digitised in a data processing unit and then forwarded as a digital signal. The principle corresponds to the structure of a smart sensor (Figure 1).

- Jeder Sensor erzeugt ein eigenes digitales Signal mit entsprechender Kennung, das über einen Datenbus weitergeleitet wird.

Für das Crowdsourcing sind die Schnittstellen wichtig, über die von den einzelnen Sensoren oder Kombinationen aus Sensoren Daten abgegriffen werden können. Eine entsprechende Aufstellung (VDI 3786 Blatt 1 und Blatt 13) ist in Tabelle 5 für das Crowdsourcing angepasst.

- Each sensor generates its own digital signal with corresponding identification, which is forwarded via a data bus.

For crowdsourcing, the interfaces through which data can be tapped from the individual sensors or combinations of sensors are important. A corresponding list (VDI 3786 Part 1 and Part 13) is adapted for crowdsourcing in Table 5.

Tabelle 5. Techniken der Datenübertragung vom Sensor zum Server

Bezeichnung	Eigenart	Typische Übertragungsrate in s <sup>-1</sup>	Typische Reichweite	Bemerkungen
<b>Drahtgebunden</b>				
Ethernet (IEEE 802.3)	mindestens 4-adrig	100 Mbit	maximal 100 m über Kupfer	TCP/IP, MODBUS TCP, PoE möglich, Geschwindigkeit wird durch Kabel- und Komponentenqualität bestimmt, z. B. Cat5, Cat6a/e, Cat7.
	nominal 8-adrig	1/5/10 Gbit	mehrere km über Glasfaser	
<b>Drahtlos (Reichweite abhängig von Antenne und Sendeleistung) <sup>a)</sup></b>				
Bluetooth (IEEE 802.15.1) ab 4.0 (stromsparend)	Frequenz 2,4 GHz	(1...50) Mbit	(1...10) m (nach Klassen gestaffelt bis 400 m)	Übertragungsrate entfernungsabhängig
Wi-Fi 4 802.11n Wi-Fi 5 802.11ac Wi-Fi 6 802.11ax	Frequenzen: 2,4 GHz N/AX  5 GHz AC/AX	N bis 600 Mbit AC bis 3467 Mbit AX bis 4804 Mbit	P2MP 500 m P2P 20 km	TCP/IP
Radio-Modem	Frequenzen: 150 MHz (2-m-Band) 433 MHz (70-cm-Band) 866 MHz (35-cm-Band)	9,6 kbit bis 1 Mbit	(300...15000) m	lizenzfreie (ISM) und lizenzpflichtige Frequenzen
GSM/ LTE/5G	Frequenzen: mehrere Bänder: (0,7...6,0) GHz, (24...80) GHz	LTE (auch 4G): 500 Mbit LTE-A (auch LTE+, 4G oder 4G+): LTE- Advanced 1 Gbit 5G bis zu 10 Gbit	einige km; über Relaisstationen weltweit	Software Defined Radio (SDR)
LoRaWan <sup>b)</sup>	(863...870) MHz	datenpaketbasierte Übertragung Datenpakete bis 1 kByte begrenzte Datenmenge pro Zeiteinheit	einige km; theoretisch bis max. 15 km, in flachen, unbebauten Geländen	Low Power Wide Area Network, Niedrigenergieweitverkehrsnetzwerk, typisch Sternarchitektur, Sensoren kommunizieren mit einem Gateway und dieser mit dem Internet.

a) Funklösungen sind immer unter Beachtung der am Standort geltenden gesetzlichen Vorschriften auszugestalten.

b) Gegenwärtig noch geringe Signalabdeckung, gegebenenfalls Installation eines eigenen LoRaWan-Netzwerks sinnvoll.

Table 5. Data transmission techniques from the sensor to the server

Designation	Character	Typical transmission rate in s <sup>-1</sup>	Typical range	Comments
<b>Wired</b>				
Ethernet (IEEE 802.3)	at least 4-wire  nominal 8-wire	100 Mbit  1/5/10 Gbit	maximum 100 m above copper several km via fibre optics	TCP/IP, MODBUS TCP, PoE possible, speed is determined by cable and component quality, e.g., Cat5, Cat6a/e, Cat7.
<b>Wireless (range depends on antenna and transmission power) <sup>a)</sup></b>				
Bluetooth (IEEE 802.15.1) from 4.0 (power-saving)	Frequency 2,4 GHz	(1...50) Mbit	(1...10) m (staggered by class up to 400 m)	transmission rate depending on distance
Wi-Fi 4 802.11n Wi-Fi 5 802.11ac Wi-Fi 6 802.11ax	Frequencies: 2,4 GHz N/AX  5 GHz AC/AX	N up to 600 Mbit AC up to 3467 Mbit AX up to 4804 Mbit	P2MP 500 m P2P 20 km	TCP/IP
Radio modem	Frequencies: 150 MHz (2 m band) 433 MHz (70 cm band) 866 MHz (35 cm band)	9,6 kbit to 1 Mbit	(300...15000) m	licence-free (ISM) and licence-required frequencies
GSM/ LTE/5G	Frequencies: Multiple bands: (0,7...6,0) GHz, (24...80) GHz	LTE (also 4G): 500 Mbit LTE-A (also LTE+, 4G or 4G+): LTE-Advanced 1 Gbit 5G up to 10 Gbit	several km; via relay stations worldwide	Software Defined Radio (SDR)
LoRaWan <sup>b)</sup>	(863...870) MHz	data-packet-based transmission data packets up to 1 kByte limited amount of data per time unit	a few km; theoretically up to max. 15 km, in flat, undeveloped terrain	Low Power Wide Area Network, typically star architecture, sensors communicate with a gateway and the gateway communicates with the Internet.

a) Radio solutions shall always be designed in compliance with the legal regulations applicable at the location.

b) Currently still low signal coverage, if necessary installation of own LoRaWan network makes sense.

## 7 Wartung

Da ein komplett wartungsfreier Betrieb der Sensoren und Sensormodule zumeist nicht sichergestellt werden kann, muss dies bei der Aufstellung der Sensoren mitberücksichtigt werden. Neben einer bestmöglichen Platzierung unter meteorologischen Aspekten sollten sie auch leicht zugänglich sein.

Die Sensoren sind bei den Messaufgaben den Wetter- und Umweltbedingungen ausgesetzt, sie können verschmutzen, Korrosion unterliegen oder mechanisch beschädigt werden. Derartige Beeinträchtigungen lassen sich durch die Kombination von Daten erkennen, entweder im Sensorsystem (lange Zeiten mit konstanten Werten, widersprüchliche Messwerte z.B. von Luftfeuchte und Lufttemperatur, unwahrscheinliche Dynamiken) oder im Vergleich unterschiedlicher Messpunkte (Ausreißer). In den

## 7 Maintenance

Since a completely maintenance-free operation of the sensors and sensor modules can usually not be guaranteed, this shall be taken into account when installing the sensors. In addition to the best possible placement from a meteorological point of view, they should also be easily accessible.

The sensors are exposed to weather and environmental conditions during measurement tasks, they can become dirty, subject to corrosion or mechanically damaged. Such impairments can be detected by combining data, either in the sensor system (long periods with constant values, contradictory measured values, e.g., of air humidity and air temperature, improbable dynamics) or by comparing different measuring points (outliers). Methods for error detection shall be included in the signal processing

Signalverarbeitungsalgorithmen sind Methoden zur Fehlererkennung mit zu berücksichtigen, um fehlerhafte Messwerte zu eliminieren und die betroffenen Sensoren zu ersetzen oder reparieren zu können. Mit dieser Bewertung der Messwerte ist perspektivisch sogar die Kalibrierung der Sensoren im Anwendungsfall sowie ihre Justage denkbar. Auch hier ist neben dem Vergleich mit benachbarten Messpunkten eine interne Kalibrierung über das Erkennen spezieller Muster denkbar (z.B. Temperaturkonstanz über gewisse Zeit beim Durchschreiten des Gefrierpunkts von Wasser 0 °C). Hierfür wird aber viel Rechenleistung benötigt, die so (noch) nicht in den Sensoren vorhanden ist.

Als minimaler Wartungsaufwand ist wöchentlich bis monatlich eine mögliche Verschmutzung zu kontrollieren und gegebenenfalls zu beseitigen. Bei Fehlfunktionen sind die Sensoren auszutauschen. Weitere Wartungshinweise sind der angegebenen Literatur und/oder der Bedienungsanleitung zu entnehmen (siehe Abschnitt 6.1).

## 8 Bewertung der Datenqualität

Zur Bewertung der Datenqualität gibt es einige Grundvoraussetzungen, die im Wesentlichen mit der Datenverfügbarkeit und Repräsentativität im Zusammenhang stehen und in Tabelle 6 dargestellt sind. Es ist möglich, dass die geforderte Qualität nur durch die Verbindung mehrerer Datenquellen erreichbar ist.

### 8.1 Ursachen von Messunsicherheiten

Messunsicherheiten haben ihre Ursachen sowohl im Sensor selbst als auch in der Aufstellung des Sensors und der Umgebung des Aufstellungsorts. Die wichtigsten sensorbezogenen Ursachen für Messunsicherheiten sind in Tabelle 7 dargestellt.

Weitere Kriterien für die Datenqualität sind die Wahl des Standorts und die Exposition des Messwertgebers [2; 45]. Beiden Quellen liegt das annähernd gleiche Grundprinzip zugrunde, dies ist in Tabelle 8 bezüglich der Standortwahl von Temperatur- und Niederschlagsmessungen dargestellt. Für Wind- und Strahlungsmessungen sollte den Richtlinien der WMO und ISO gefolgt werden (ISO 19289, [2]).

algorithms in order to eliminate incorrect measured values and to be able to replace or repair the affected sensors. With this evaluation of the measured values, even the calibration of the sensors in the application and their adjustment is conceivable. In addition to comparison with neighbouring measuring points, internal calibration by recognising special patterns is also conceivable here (e.g., constant temperature over a certain time when passing through the freezing point of water 0 °C). However, this requires a lot of computing power, which is not (yet) available in the sensors.

As a minimum maintenance effort, possible contamination is to be checked weekly to monthly and removed if necessary. In case of malfunctions, the sensors shall be exchanged. For further maintenance instructions, refer to the literature provided and/or the operating instructions (see Section 6.1).

## 8 Data quality assessment

There are some basic requirements for assessing data quality, which are essentially related to data availability and representativeness and are shown in Table 6. It is possible that the required quality can only be achieved by combining several data sources.

### 8.1 Causes of measurement uncertainties

Measurement uncertainties have their causes in the sensor itself as well as in the installation of the sensor and the environment of the installation site. The most important sensor-related causes of measurement uncertainties are shown in Table 7.

Further criteria for data quality are the choice of location and the exposure of the transmitter [2; 45]. Both sources are based on approximately the same basic principle, this is shown in Table 8 with regard to the choice of location for temperature and precipitation measurements. For wind and radiation measurements, the WMO and ISO Standards shall be followed (ISO 19289, [2]).

Tabelle 6. Grundvoraussetzungen zur Bestimmung der Datenqualität, aus [7]

Datenanforderung	Beschreibung
Interne Konsistenz	Konsistenz, die durch den Vergleich eines Messwerts mit anderen Messwerten beurteilt wird
Plausibilität	Ausmaß, in dem eine Bewertung ihre Ziele erreicht, indem sie das misst, was sie messen soll, und Ergebnisse liefert, die für den beabsichtigten Zweck verwendet werden können
Räumliche/zeitliche Repräsentativität	Fähigkeit einer Reihe von Beobachtungen, eine unverzerrte Schätzung eines Parameters einer bestimmten statistischen Grundgesamtheit zu liefern
Vollständigkeit	Ausmaß, in dem die enthaltenen Informationen den Datennutzer in die Lage versetzen, Schlussfolgerungen in Übereinstimmung mit der Ziel- und Umfangsdefinition zu ziehen
Abdeckung	räumliche und/oder zeitliche Verteilung der Messorte im Untersuchungsgebiet
Verfügbarkeit	Eigenschaft, auf Anfrage durch eine autorisierte Stelle zugänglich und nutzbar zu sein
Aktualität	unverzögerte und häufige Verfügbarkeit von Daten für den beabsichtigten Zweck zur Unterstützung des Informationsbedarfs und der Entscheidungen des Qualitätsmanagements
Zuverlässigkeit	Grad, in dem Daten in einer vereinbarten oder erwarteten Weise während eines bestimmten Zeitraums unter bestimmten Bedingungen bereitgestellt werden

Table 6. Basic requirements for determining data quality, from [7]

Data request	Description
Internal consistency	consistency assessed by comparison of a measured value to other parameter values at the same location
Validity	extent to which an assessment achieves its aims by measuring what it is supposed to measure and producing results which can be used for their intended purpose
Spatial/temporal representativeness	ability of a series of observations to provide an unbiased estimate of a parameter of a special statistical population
Completeness	extent to which the contained information enables the data user to draw conclusions in accordance with the goal and scope definition
Coverage	spatial and/or temporal distribution of measurement locations in the area under investigation
Availability	property of being accessible and useable upon demand by an authorized entity
Timeliness	undelayed and frequent availability of data for the intended use to support information needs and quality management decisions
Reliability	degree to which data is provided in an agreed or expected manner during a defined time period under specified conditions

Tabelle 7. Überblick über die Geräteeigenschaften, die zur Charakterisierung der Messunsicherheit verwendet werden, aus [7]

Instrumentencharakteristik	Beschreibung
Genauigkeit	Übereinstimmung zwischen dem Ergebnis einer Messung und einem wahren Wert der Messgröße, drückt die systematische Unsicherheit der Messung aus.
Präzision	Enge Übereinstimmung zwischen einer Reihe von Ergebnissen der gleichen Messgröße, drückt die zufällige Unsicherheit der Messung aus.
Empfindlichkeit	Quotient aus der Änderung einer Anzeige eines Messsystems und der entsprechenden Änderung eines Werts einer zu messenden Größe
Linearität	geradlinige Beziehung zwischen dem (mittleren) Messergebnis (Signal) und der zu bestimmenden Größe
Zeitliche Auflösung	gerätebezogene Größe, die das kürzeste Zeitintervall beschreibt, aus dem unabhängige Signalinformationen gewonnen werden können

Tabelle 7. Überblick über die Geräteeigenschaften, die zur Charakterisierung der Messunsicherheit verwendet werden, aus [7] (Fortsetzung)

<b>Instrumentencharakteristik</b>	<b>Beschreibung</b>
Schwellenwert (Threshold)	minimaler Eingangssignalwert, unterhalb dessen keine Änderung des Signalausgangs festgestellt werden kann
Drift	zeitliche Veränderung eines Merkmals (in der Regel einer Ausgangsgröße) des Messsystems
Stabilität	Fähigkeit eines Messsystems, seine Leistung über die gesamte spezifizierte Betriebszeit beizubehalten
Bereich oder Spanne	Werte einer Größe, für deren Messung ein Messsystem ausgelegt ist
Reaktionsgeschwindigkeit (Zeitkonstante)	Schnelligkeit, mit der ein Messsystem auf Änderungen der Messgröße reagiert
Messverzögerung (Totzeit)	zeitliche Verzögerung der Reaktion eines Messsystems auf Änderungen der Messgröße
Dynamischer Fehler	Differenz zwischen dem wahren Wert der sich mit der Zeit ändernden Größe und dem vom Messsystem angezeigten Wert, wenn kein statischer Fehler angenommen wird

Table 7. Overview of the device properties used to characterise the measurement uncertainty, from [7]

<b>Instrument characteristics</b>	<b>Description</b>
Accuracy	Closeness of the agreement between the result of a measurement and a true value of the measurand; expresses the systematic uncertainty of the measurement.
Precision	Closeness of agreement among a set of results of the same measurand; it expresses the random uncertainty of measurement.
Sensitivity	quotient of the change in an indication of a measuring system and the corresponding change in a value of a quantity being measured
Linearity	straight line relationship between the (mean) result of measurement (signal) and the quantity to be determined
Temporal resolution	equipment-related variable describing the shortest time interval from which independent signal information can be obtained
Threshold	minimum input signal value below which no signal output change can be detected
Drift	change over time of a characteristic (generally an output quantity) of the measuring system
Stability	ability of a measurement system to retain its performance throughout its specified operation time
Range or span	values of a quantity for which a measuring system is designed to measure
Speed of response (time constant)	rapidity with which a measurement system responds to changes in the measured quantity
Measuring lag (dead time)	retardation or time delay in the response of a measurement system to changes in the measured quantity
Dynamic error	difference between the true value of the quantity changing with time and the value indicated by the measurement system if no static error is assumed

Tabelle 8. Einschätzung der Standortwahl [45], die Reihenfolge der Nummerierung wurde umgekehrt, um die Klassen etwa den in [2] und ISO 19289 angegebenen Klassen zuordnen zu können

Qualitätsklasse der Exposition	Beschreibung
0	<b>Sehr offene Exposition</b> – keine Hindernisse (z. B. große Bäume oder Gebäude) innerhalb von 10-facher Hindernishöhe oder mehr von Temperatur- oder Niederschlagsmessgeräten
1	<b>Offene Exposition</b> – die meisten Hindernisse/beheizte Gebäude im Umkreis von 5-facher Hindernishöhe von Temperatur- oder Niederschlagsmessgeräten, keine innerhalb von 2-facher Hindernishöhe
2	<b>Standard-Exposition</b> – keine nennenswerten Hindernisse oder beheizte Gebäude innerhalb von 2-facher Hindernishöhe von Temperatur- oder Niederschlagsmessgeräten horizontal entfernt
3	<b>Eingeschränkte Exposition</b> – die meisten Hindernisse oder beheizte Gebäude kleiner als die 2-fache Hindernishöhe von Temperatur- oder Niederschlagsmessgeräten horizontal entfernt, keine innerhalb der einfachen Hindernishöhe
4	<b>Geschützte Exposition</b> – erhebliche Hindernisse oder beheizte Gebäude innerhalb der einfachen Hindernishöhe von Temperatur- oder Niederschlagsmessgeräten horizontal entfernt
5	<b>Sehr geschützte Exposition</b> – Hindernisse am Standort oder die Exposition der Sensoren schränken die Exposition gegenüber Sonne, Wind und Niederschlag stark ein
Dach	Dachstandorte für Temperatur- und Niederschlagssensoren sollten nach Möglichkeit vermieden werden.
Verkehr	Das Gerät befindet sich in der Nähe einer öffentlichen Straße.
Unbekannt	Exposition unbekannt oder nicht angegeben/nicht möglich anzugeben

Table 8. Assessment of site selection [45], the order of numbering has been reversed in order to approximately match the classes given in [2] and ISO 19289

Exposure quality class	Description
0	<b>Very open exposure</b> – no obstacles (e.g., large trees or buildings) within 10 times the obstacle height or more of temperature or precipitation gauges
1	<b>Open exposure</b> – most obstacles / heated buildings within 5 times the obstacle height of temperature or precipitation gauges, none within 2 times the obstacle height
2	<b>Standard exposure</b> – no significant obstacles or heated buildings within 2 times the obstacle height of temperature or precipitation gauges horizontally away
3	<b>Limited exposure</b> – most obstacles or heated buildings less than 2 times obstacle height away from temperature or precipitation gauges, none within single obstacle height
4	<b>Sheltered exposure</b> – significant obstacles or heated buildings located horizontally within the simple obstacle height of temperature or precipitation gauges
5	<b>Very sheltered exposure</b> – obstacles at the site or the exposure of the sensors severely limit the exposure to sun, wind, and precipitation
Roof	Roof locations for temperature and precipitation sensors should be avoided if possible.
Traffic	The unit is located near a public road.
Unknown	exposure unknown or not specified/not possible to specify

Für die einzelnen Messgrößen wird beispielhaft die Unterteilung nach [45] angegeben:

**Messungen der Lufttemperatur** (Standardinstrumente sind kalibrierte Temperatursensoren)

- A: Standardinstrumente in einer Wetterhütte für professionelle meteorologische Beobachtungen [10], Kalibrierung innerhalb der letzten 10 Jahre, Expositionsklasse am Standort mindestens 2
- B: Standardinstrumente in einer Wetterhütte für professionelle meteorologische Beobachtungen

For the individual measured variables, the subdivision according to [45] is given as an example:

**Air temperature measurements** (standard instruments are calibrated temperature sensors)

- A: standard instruments in a weather screen for professional meteorological observations [10], calibration within the last 10 years, exposure class at the site at least 2
- B: standard instruments in a weather screen for professional meteorological observations [10] or

[10] oder vom Hersteller der Wetterstation gelieferter Strahlungsschutz, Kalibrierung innerhalb der letzten 10 Jahre, Expositionsklasse am Standort 2 oder 3

- C: Standardgeräte einer Wetterhütte für professionelle meteorologische Beobachtungen [10] oder vom Hersteller der Wetterstation gelieferter Strahlungsschutz, Expositionsklasse am Standort 4 oder 5
- D: Nicht standardisierte Instrumente und/oder kein oder nicht standardisierter Strahlenschutz und/oder geschützter Standort, Expositionsklasse am Standort 4 oder 5
- U: Instrumente unbekannt oder nicht angegeben

#### Messungen der Niederschlagsmenge

- A: Standard-Regenmesser (z.B. nach *Hellmann*, VDI 3786 Blatt 7) mit manueller Ablesung oder kalibrierter Kippwaagen-Regenmesser, in Standardhöhe über dem Boden (1 m), Expositions-klasse 0 bis 2
- B: Standard-Regenmesser mit manueller Able-sung oder kalibrierter Kippwaage, in Standard-höhe über dem Boden (1 m) montiert, Expositi-onsklasse 2 oder 3
- C: Standard-Regenmesser mit manueller Able-sung oder kalibrierter Kippwaage, in Standard-höhe über dem Boden (1 m) montiert, Expositi-onsklasse 4 oder 5
- D: Nicht-Standard-Regenmesser und/oder Kipp-waage-Regenmesser, Expositions-klasse 4 oder 5
- U: Instrumente unbekannt oder nicht angegeben

#### Messungen des Winds

- A: Windsensoren, die innerhalb der letzten 10 Jahre kalibriert wurden und 10 m über dem Boden an einem Mast oder einer Stange ange-bracht sind, wobei sich in einem Umkreis von 100 m keine Hindernisse befinden dürfen
- B: Windsensoren, die über dem Boden an einem Mast oder einer Stange angebracht sind, wobei sich im Umkreis von 50 m keine Hindernisse be-finden dürfen
- C: Windsensoren, die an einem Gebäude oder ei-ner Wand angebracht sind
- U: Instrumente unbekannt oder nicht angegeben

Aus den Qualitätsklassen für die Exposition und für die Messgeräte lässt sich eine kombinierte Klasse der Datenqualität der Station/Standort erstellen. Diese sollte für jedes Messnetz definiert werden. Gewisse Hinweise für eine sinnvolle Kombination aus Exposition und Messgerät sind in [45] vorge-

radiation shield supplied by the weather station manufacturer, calibration within the last 10 years, exposure class at site 2 or 3

- C: standard equipment of a weather screen for professional meteorological observations [10] or radiation shield supplied by the weather station manufacturer, exposure class at site 4 or 5
- D: non-standardised instruments and/or no or non-standardised radiation protection and/or protected site, exposure class at site 4 or 5
- U: instruments unknown or not specified

#### Precipitation measurements

- A: standard rain gauge (e.g., according to *Hellmann*, VDI 3786 Part 7) with manual reading or calibrated tipping bucket rain gauge, at standard height above the ground (1 m), exposure class 0 to 2
- B: standard rain gauge with manual reading or calibrated tipping bucket, mounted at standard height above the ground (1 m), exposure class 2 or 3
- C: standard rain gauge with manual reading or calibrated tipping bucket, mounted at standard height above the ground (1 m), exposure class 4 or 5
- D: non-standard rain gauge and/or tipping bucket rain gauge, exposure class 4 or 5
- U: instruments unknown or not specified

#### Wind measurements

- A: wind sensors calibrated within the last 10 years and mounted on a mast or pole 10 m above the ground with no obstacles within a radius of 100 m
- B: wind sensors mounted above the ground on a mast or pole with no obstacles within a radius of 50 m
- C: wind sensors attached to a building or wall
- U: instruments unknown or not specified

From the quality classes for the exposure and for the measuring instruments it is possible to create a combined class of the data quality of the station/site. This should be defined for each measurement network. Certain indications for a reasonable combination of exposure and measuring device are given in [45].



geben. Danach sollten die beiden höchsten Klassen nur bei einwandfreien Temperatur- und Niederschlagsmessungen vergeben werden, abgestuft durch die Expositionsklasse. Gute Messungen erfordern die Expositionsclassen 0 bis 2 und bei der Temperatur einen zuverlässigen Strahlungsschutz. Alle anderen Kombinationen müssen niedriger bewertet werden. In städtischen Gebieten müssen spezielle Kriterien der Bewertung in analoger Weise entwickelt werden [46; 47].

## 8.2 Kalibrierung und Selektion

Bevor große Datensätze von Crowdsourcing-Daten verwendet werden, sollte die Datenqualität der eingesetzten Sensoren überprüft werden (z.B. [48 bis 51]). Hierfür eignen sich Labor-/Klimakammerexperimente und Vergleichsmessungen im Feld [52].

Labor- und Klimakammerexperimente bieten den Vorteil einer exakten Bestimmung z.B. des systematischen Offsets eines Sensors [48]. Systematische Vergleichsmessungen im Feld mit Referenzsensoren eignen sich insbesondere zur Untersuchung von Fehlern aufgrund von Einflüssen des Wetters oder des Jahresgangs [51]. Beide Verfahren bieten unterschiedliche Vorteile, weshalb eine Kombination aus beiden optimal ist. Im Idealfall sollte dies für jeden eingesetzten Sensor vor dem tatsächlichen Einsatz geschehen. Bei günstigen Sensoren kann die Datenqualität an sich gegebenenfalls schon erheblich verbessert werden, z.B. durch einfache Offset-Korrekturen [53].

Im Falle von Messungen über längere Zeiträume stellt sich zudem die Notwendigkeit nach einer erneuten Kalibrierung oder Vergleichsmessung. Die Frage nach Kalibrierstabilität spielt eine wichtige Rolle, kann pauschal jedoch nicht beantwortet werden, da sie stark von eingesetzter Sensorik, zu messender Größe und den Umweltbedingungen im Einsatz abhängt.

Je nach Sensor und zu messendem Phänomen sind a priori und nach einiger Zeit wiederholte Labor-/Klimakammerexperimente und Vergleichsmessungen im Feld gegebenenfalls extrem aufwendig oder sogar unmöglich, insbesondere wenn

- eine große Anzahl von (unterschiedlichen) Sensoren eingesetzt werden soll und/oder
- komplexe Abhängigkeiten (z.B. zu Jahresgängen) vorliegen und/oder
- die Sensorik nicht zentral „verteilt“ wird, sondern wie bei Crowdsourcing-Daten durchaus üblich, die die Betreibenden der Sensorik selbst für Anschaffung, Ausbringung und Wartung verantwortlich sind.

According to this, the two highest classes should only be assigned for perfect temperature and precipitation measurements, graded by the exposure class. Good measurements require exposure classes 0 to 2 and, for temperature, a reliable radiation shield. All other combinations shall be rated lower. In urban areas, special criteria of assessment shall be developed in an analogous way [46; 47].

## 8.2 Calibration and selection

Before using large crowd-sourced data sets, the data quality of the sensors used should be checked (e.g., [48 to 51]). Laboratory/climate chamber experiments and comparative measurements in the field are suitable for this [52].

Laboratory and climate chamber experiments offer the advantage of an exact determination of, e.g., the systematic offset of a sensor [48]. Systematic comparative measurements in the field with reference sensors are particularly suitable for investigating errors due to influences of the weather or the annual cycle [51]. Both methods offer different advantages, which is why a combination of both is optimal. Ideally, this should be done for each sensor used before actual deployment. For low-cost sensors, the data quality itself can be improved considerably, e.g., by simple offset corrections [53].

In the case of measurements over longer periods of time, there is also the need for renewed calibration or comparative measurement. The question of calibration stability plays an important role, but cannot be answered in general terms, as it is highly dependent on the sensor technology used, the quantity to be measured and the environmental conditions in use.

Depending on the sensor and the phenomenon to be measured, repeated laboratory/climate chamber experiments and comparative measurements in the field may be extremely costly or even impossible a priori and after some time, especially if

- a large number of (different) sensors are to be used and/or
- there are complex dependencies (e.g., on annual cycles) and/or
- the sensor technology is not “distributed” centrally, but, as is quite common with crowdsourcing data, the operators of the sensor technology themselves are responsible for acquisition, deployment and maintenance.

Im Falle von Crowdsourcing-Daten einer Datenquelle, bei der die gleiche Sensorik eingesetzt wird (z.B. Netatmo), kann trotzdem mithilfe von Labor-/Klimakammerexperimenten und Vergleichsmessungen eine hinreichend genaue Aussage bezüglich Sensorgenauigkeit des Crowdsourcing-Datensatzes getroffen werden. Dies trifft insbesondere für den Fall zu, wenn mehrere Exemplare des eingesetzten Sensors untersucht werden [48].

Hinsichtlich der Ebene, auf der eine mögliche Anpassung (Justierung, im Folgenden als auch in der englischsprachigen Literatur auch „Kalibrierung“ genannt) durchgeführt wird, das heißt, ob auf den Messgeräten selbst oder auf einer zentralen Ebene, die alle Daten sammelt, werden unterschiedliche Begriffe verwendet [52]. Einige Autoren sprechen von „Device-level-“ und „System-level-Kalibrierung“ [54], in anderen Quellen sind die Begriffe „Mikro- und Makrokalibrierung“ zu finden [55]. „Kalibrierverfahren“ ohne zentrale Instanz, die Peer-to-Peer-Kommunikation (P2P) verwenden, werden als „verteilte Kalibrierung“ bezeichnet [56]. Darüber hinaus wird der Begriff der „lokalen Kalibrierung“ in einigen Arbeiten auch für die „Kalibrierung“ auf den Messgeräten selbst verwendet [54].

In verteilten Systemen mit mobilen Messkomponenten kann ein Ansatz verfolgt werden, bei dem die Kalibrierung zwischen Sensoren übertragen wird, wenn diese sich im gleichen Messkontext befinden [57]. „Treffen“ sich zwei Sensoren, das heißt, weisen sie eine dem zu messenden Phänomen entsprechend hinreichende räumliche und zeitliche Nähe zueinander auf, lassen sich ihre Messwerte vergleichen und darauf basierend die Kalibrierinformationen der Systeme anpassen (VDI 3785 Blatt 2) („Cross-Kalibrierung“, siehe auch DIN 18716). Dabei gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, auf welcher Grundlage dies erfolgen kann. Die offensichtlich einfachste Methode ist, beide beteiligten Sensoren in Richtung des jeweiligen anderen anzugleichen. Ausgefeiltere Verfahren stützen die Entscheidung auf zusätzliche Informationen wie das Kalibrieralter oder ein Vertrauensmaß, z.B. basierend auf der Geräteklasse [57; 58], und passen die Kalibrierung gegebenenfalls gewichtet oder sogar nur auf einem der beiden Systeme an. Unabhängig von den Details der Parameterübertragung ist für diesen Kalibrieransatz die Datendynamik ein zentraler Aspekt. Wenn die gemessenen Werte während des Treffens nicht ausreichend variieren, bestehen gegebenenfalls nicht genügend Informationen, um eine gute Kalibrierung durchzuführen [52].

Die Kalibrierung kann sowohl in Echtzeit auf der Sensorebene stattfinden als auch in Nachhinein auf einem gesamten Datensatz. Bei der Echtzeit-Kali-

In the case of crowdsourcing data from a data source that uses the same sensor technology (e.g., Netatmo), a sufficiently accurate statement regarding the sensor accuracy of the crowdsourced data set can still be made with the help of laboratory/climate chamber experiments and comparison measurements. This is particularly true if several examples of the sensor used are examined [48].

Different terms and definitions apply with regard to the level at which a possible adjustment (calibration) is carried out, i.e., whether on the measuring instruments themselves or on a central level that collects all the data [52]. Some authors speak of “device-level” and “system-level calibration” [54], in other sources the terms “micro- and macro-calibration” can be found [55]. “Calibration procedures” without a central authority that use peer-to-peer (P2P) communication are designated as “distributed calibration” [56]. In addition, the term “local calibration” is also used in some works for “calibration” on the measuring instruments themselves [54].

In distributed systems with mobile measurement components, an approach can be followed in which calibration is transferred between sensors if they are in the same measurement context [57]. If two sensors “meet”, i.e., if they have a sufficient spatial and temporal proximity to each other according to the phenomenon to be measured, their measured values can be compared and, based on this, the calibration information of the systems can be adjusted (VDI 3785 Part 2) (“cross calibration”, see DIN 18716). There are different possibilities on which basis this can be done. The obviously simplest method is to align both sensors involved in the direction of the other. More sophisticated methods base the decision on additional information such as the calibration age or a confidence measure, e.g., based on the device class [57; 58], and adjust the calibration weighted or even only on one of the two systems if necessary. Regardless of the details of parameter transfer, data dynamics is a key consideration for this calibration approach. If the measured values do not vary sufficiently during the meeting, there may not be enough information to perform a good calibration [52].

Calibration can take place both in real time at the sensor level and retrospectively on an entire data set. With real-time calibration, privacy issues can arise,

brierung können Privatsphärenproblematiken entstehen, für die es aber ebenfalls Lösungsansätze gibt [58]. Wird auf einem ganzen Datensatz gearbeitet, muss nicht zwingend ein individuelles Modell pro Sensor verwendet werden. Der Übergang zu anderen Verfahren ist allerdings fließend. Ansätze wie die Anpassung von Messwerten basierend auf einem Regionalisierungsmodell oder das Treiben eines Modells mit der relativen Dynamik individueller Messungen fallen nicht mehr unter den Begriff der Kalibrierung (vgl. Abschnitt 9).

### 8.3 Einschätzung der Datenqualität im Vergleich zu herkömmlichen Standards

Die Datenqualität wird nur in geringem Umfang durch den Sensor selbst bestimmt. Unterschiede in der möglichen Signalauflösung, Kalibrierstabilität oder Linearität zwischen herkömmlichen Sensoren und Smart-Sensoren sind deutlich geringer als die Anpassung des Sensors an das Messobjekt, das heißt die Atmosphäre, mittels Schutzeinrichtungen oder durch die Standortwahl. Ausschlaggebend für die Datenqualität ist auch die Anzahl der Sensoren in einem bestimmten Gebiet. Letztlich kann die Qualität der Messungen nur durch den Vergleich mit einer Referenzstation [59] oder mobile Vergleichsmessungen (VDI 3785 Blatt 2) ermittelt werden.

### 8.4 Verbesserung der Datenqualität durch Clustering

Falls ausreichend Messstationen vorhanden sind, lässt sich auch eine Verbesserung der Datenqualität erzielen, wenn räumlich ähnlich gelegene Stationen als ein Cluster getrennt von anderen Stationen hinsichtlich ihrer Datenqualität untersucht werden. Dies erfordert allerdings, dass durch umfassende Voruntersuchungen entsprechende Cluster ermittelt werden. Zum Beispiel für städtische Gebiete bieten sich hierbei Local Climate Zones (LCZ [60]) an, das heißt Stadtstrukturen und natürliche Landoberflächen einheitlicher Oberflächenbedeckung, Struktur, Material und menschlicher Aktivität, die sich über Hunderte von Metern bis zu mehreren Kilometern in der Horizontalen erstrecken und charakteristische Eigenschaften der Klimatelemente in Standardmesshöhe aufweisen:

Das LCZ-Konzept unterscheidet zwischen zehn bebauten und sieben natürlichen Landbedeckungstypen, z.B.:

- LCZ 2 („kompakte Bebauung mittlerer Höhe“): intensiv entwickelte, städtische Zone mit hoher Dichte mit 3- bis 9-geschossigen, angebauten oder eng stehenden Gebäuden, oft aus Ziegeln oder Stein, z.B. alter Stadtkern

but there are also solutions [58]. When working on an entire data set, an individual model per sensor does not necessarily have to be used. However, the transition to other methods is fluid. Approaches such as the adjustment of measured values based on a regionalisation model or driving a model with the relative dynamics of individual measurements no longer fall under the term calibration (cf. Section 9).

### 8.3 Assessment of data quality compared to conventional standards

The data quality is only determined to a small extent by the sensor itself. Differences in the possible signal resolution, calibration stability or linearity between conventional sensors and smart sensors are significantly less than the adaptation of the sensor to the measurement object, i.e., the atmosphere, by means of protective devices or by the choice of location. The number of sensors in a given area is also decisive for data quality. Ultimately, the quality of the measurements can only be determined by comparison with a reference station [59] or mobile comparison measurements (VDI 3785 Part 2).

### 8.4 Improving data quality through clustering

If sufficient measuring stations are available, it is also possible to improve the data quality by examining spatially similar stations as a cluster separately from other stations with regard to their data quality. However, this requires that appropriate clusters are identified through comprehensive preliminary investigations. For urban areas, for example, Local Climate Zones (LCZ [60]), i.e., urban structures and natural land surfaces of uniform surface cover, structure, material, and human activity, which extend over hundreds of metres to several kilometres in the horizontal and have characteristic properties of the climatic elements at standard measurement altitudes, are a suitable approach:

The LCZ concept distinguishes between ten built-up and seven natural land cover types, e.g.:

- LCZ 2 (“compact midrise”): intensively developed, high-rise urban zone with 3- to 9-storey, attached or close-standing buildings, often made of steel or stone, e.g., old town centre

- LCZ 6 („offene Bebauung mittlerer Höhe“): offene Anordnung von Gebäuden mit niedriger Bebauungsdichte am Stadtrand mit 1- bis 3-stöckigen Häusern, umgeben von (Garten-)Vegetation, z.B. Vorstadtsiedlungen
- LCZ D („niedrige Pflanzen“): offene Landschaft mit niedriger Vegetation und kaum Bäumen, z.B. natürliches Grasland oder landwirtschaftlich genutzte Felder

Für die weiteren Zonen sei auf die entsprechende Literatur verwiesen [60].

## 9 Algorithmen zur Bearbeitung von Massendaten

### 9.1 Vorbemerkungen

Für die Bearbeitung von Crowdsourcing-Massendaten können Algorithmen zur Einschätzung, als auch zur Verbesserung der Qualität des Gesamtkollektivs eingesetzt werden. Die Algorithmen eignen sich insbesondere bei großen Datensätzen von mehreren hundert bis tausend Stationen anstelle anderer Qualitätsprüfungs- und Qualitätskontrollverfahren (z.B. Qualitätsprüfung von Zeitreihen einzelner Stationen). Bei der Anwendung der Algorithmen werden potenziell fehlerhafte Daten auf Basis des gesamten Datenkollektivs erkannt, markiert und gegebenenfalls aus dem Datensatz herausgefiltert oder korrigiert. Durch geeignete Verfahren der Rauschanalyse oder durch Cross-Kalibrierung (siehe auch Abschnitt 8.2) kann die Qualität der Daten einzelner Stationen verbessert werden.

Algorithmen zur Bearbeitung von Massendaten sollten typische Fehler in den Daten(sätzen) wie Fehler in Metadaten, systematische Messwertabweichungen, Strahlungsfehler bei Lufttemperaturmessungen oder falsche Nullwerte bei Niederschlags- und Windgeschwindigkeitsmessungen adressieren. Insbesondere bei Crowdsourcing-Daten, für die wenige oder keine Metadaten beispielsweise zur Aufstellung oder Exposition vorhanden sind (beispielsweise Netatmo-Daten), ist eine Qualitätskontrolle der Daten unerlässlich.

Im Allgemeinen kann bei den Algorithmen zur Bearbeitung von Massendaten zwischen zwei Verfahren unterschieden werden:

- a) Verfahren, die potenziell fehlerhafte Crowdsourcing-Daten mithilfe von atmosphärischen Referenzdaten (z.B. professionell erhobene Daten im Rahmen der Wetterbeobachtung oder Forschungsmessnetze) erkennen (siehe auch Abschnitt 9.2) und
- b) Verfahren, die ohne solche Zusatzdaten auskommen und rein auf Basis des Gesamtkollektivs

- LCZ 6 (“open low-rise”): open arrangement of low-rise buildings on the suburban with 1 to 3-storey houses surrounded by (garden) vegetation, e.g., suburban settlements
- LCZ D (“low plants”): open landscape with low vegetation and hardly any trees, e.g., natural grassland or agricultural fields

For the other zones, please refer to the relevant literature [60].

## 9 Algorithms for processing mass data

### 9.1 Annotation

For the processing of crowdsourced mass data, algorithms can be used to assess as well as improve the quality of the overall collective. The algorithms are particularly suitable for large data sets of several hundred to a thousand stations instead of other quality assessment and quality control procedures (e.g., quality assessment of time series of individual stations). When applying the algorithms, potentially erroneous data is detected on the basis of the entire data collective, marked and, if necessary, filtered out of the data set or corrected. The quality of the data of individual stations can be improved by suitable noise analysis procedures or by cross calibration (see also Section 8.2).

Crowdsourcing data processing algorithms should address typical errors in the data (sets) such as errors in metadata, systematic measurement deviations, radiation errors in air temperature measurements or incorrect zero values in precipitation and wind speed measurements. Especially in the case of crowdsourced data for which little or no metadata is available, for example on placement or exposure (such as Netatmo data), data quality control is essential.

In general, crowdsourcing algorithms can be distinguished between two methods:

- a) procedures that detect potentially erroneous crowdsourcing data with the help of atmospheric reference data (e.g., professionally collected data in the context of weather observation or research measurement networks) (see also Section 9.2), and
- b) procedures that manage without such additional data and function purely on the basis of the entire

funktionieren (englisch: „knowledge of the crowd“, siehe auch Abschnitt 9.3).

collective (“knowledge of the crowd”, see also Section 9.3).

**9.2 Algorithmen mit Nutzung von atmosphärischen Referenzdaten**

**9.2 Algorithms with use of atmospheric reference data**

Sind atmosphärische Referenzdaten in geeigneter Qualität und zeitlicher Abdeckung vorhanden, können diese zur Qualitätsprüfung von Crowdsourcing-Daten eingesetzt werden. Tabelle 9 gibt einen Überblick über eine Auswahl an Algorithmen für die Filterung von stationsbasierten Crowdsourcing-Daten. Meist bestehen die Algorithmen aus mehreren Teilschritten. Essenziell für eine korrekte Qualitätsprüfung von Crowdsourcing-Daten ist, dass die verwendeten Referenzdaten im Vorhinein einer eigenen Qualitätskontrolle (z.B. [7; 61; 62], VDI 3786 Blatt 1) unterzogen werden.

If atmospheric reference data of suitable quality and temporal coverage are available, they can be used to check the quality of crowdsourcing data. Table 9 gives an overview of a selection of algorithms for filtering station-based crowdsourcing data. Most of the algorithms consist of several sub-steps. It is essential for a correct quality check of crowdsourcing data that the reference data used is subjected to its own quality control in advance (e.g., [7; 61; 62], VDI 3786 Part 1).

Tabelle 9. Überblick über Algorithmen von Qualitätsprüfungsverfahren für Massendaten mit Nutzung atmosphärischer Referenzdaten je nach Messgröße <sup>a)</sup>

Table 9. Overview of algorithms of quality-check procedures for mass data with use of atmospheric reference data depending on the measurand <sup>a)</sup>

Messgröße(n)	Referenzdaten	Quelle
Luftdruck	Analysedaten	[63]
Lufttemperatur	Stationsdaten Messnetz	[64]
Lufttemperatur	Stationsdaten Messnetz, Globalstrahlung einer Station	[48]
Lufttemperatur	Stationsdaten Messnetz	[65]
Lufttemperatur	Stationsdaten Messnetz, gerasterte Globalstrahlung (satellitenbasiert)	[66]
Lufttemperatur	Stationsdaten Messnetz	[67]
Niederschlag	Stationsdaten Messnetz	[68]
Windgeschwindigkeit	Stationsdaten einer Station (Niederschlag, Luftfeuchte)	[50]
Windgeschwindigkeit	Stationsdaten Messnetz	[69]
Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur	Stationsdaten Messnetz	[70]
Lufttemperatur, Niederschlag	Modelldaten, Radardaten	[71]
Luftdruck, Lufttemperatur, Luftfeuchte	Stationsdaten Messnetz	[72]

Measurand(s)	Reference data	Source
Air pressure	analysis data	[63]
Air temperature	station data measuring network	[64]
Air temperature	station data measuring network, global radiation of a station	[48]
Air temperature	station data measuring network	[65]
Air temperature	station data measuring network, gridded global radiation (satellite-based)	[66]
Air temperature	station data measuring network	[67]
Precipitation	station data measuring network	[68]
Wind speed	station data of a station (precipitation, humidity)	[50]
Wind speed	station data measuring network	[69]
Air pressure, wind speed, air temperature	station data measuring network	[70]
Air temperature, precipitation	model data, radar data	[71]
Air pressure, air temperature, air humidity	station data measuring network	[72]

<sup>a)</sup> Atmosphärische Referenzdaten betreffen, soweit nicht anders angegeben, die zu filternde Messgröße.

<sup>a)</sup> Atmospheric reference data refer to the measurand to be filtered, unless otherwise stated.

### 9.3 Algorithmen ohne Nutzung von atmosphärischen Referenzdaten

Sofern keine Referenzdaten in ausreichender Qualität und Quantität für den Untersuchungsraum vorhanden sind oder um eine maximale Übertragbarkeit von Untersuchungsmethoden auf andere Regionen oder Zeiträume zu gewährleisten, sollten Algorithmen ohne Verwendung von atmosphärischen Referenzdaten Anwendung finden. Tabelle 10 gibt einen Überblick über eine Auswahl an solchen Algorithmen für die Filterung von stationsbasierten Crowdsourcing-Daten. Diese Algorithmen ermöglichen die Nutzung von Crowdsourcing-Daten in Gebieten, in denen keine Referenzdaten vorhanden sind. Dies betrifft insbesondere städtische Räume, in denen klassische meteorologische Messstationen kaum vorzufinden sind, die klimatischen Bedingungen jedoch heterogen sind.

Für die Anwendung von Algorithmen ohne Referenzdaten bekommt der Umfang des Crowdsourcing-Datensatzes eine zunehmend wichtige Rolle. Je umfangreicher ein Datensatz ist, desto wahrscheinlicher ist es, dass die Mehrheit der darin enthaltenen Daten von geeigneter Qualität sind und somit die Detektion von potenziell fehlerhaften Daten möglich ist (ausreichend großes Wissen der Crowd).

Zu bemerken ist zudem, dass nach Anwendung der Algorithmen auch weiterhin potenziell fehlerhafte Daten im Datensatz enthalten sein könnten, diese aber auf Basis des vorhandenen Datensatzes nicht automatisch detektiert werden können.

Tabelle 10. Überblick über Algorithmen von Qualitätsprüfungsverfahren für Massendaten ohne Nutzung atmosphärischer Referenzdaten je nach Messgröße.

Messgröße(n)	Bemerkung	Quelle
Lufttemperatur	Filterung anderer annähernd normalverteilter Messgrößen ist unter Umständen möglich.	[73]
Lufttemperatur	Weiterentwicklung der Qualitätskontrolle nach [75]	[74]
Niederschlag		[49]
Niederschlag	gegebenenfalls mit Niederschlagsradar als Referenz	[76]
Lufttemperatur, Niederschlag	Einige Funktionen sind nur mit Referenzdaten (siehe Abschnitt 9.2) möglich.	[71]

### 9.3 Algorithms without the use of atmospheric reference data

Unless reference data of sufficient quality and quantity are available for the study area, or to ensure maximum transferability of study methods to other regions or time periods, algorithms without the use of atmospheric reference data should be applied. Table 10 gives an overview of a selection of such algorithms for filtering station-based crowdsourcing data. These algorithms enable the use of crowdsourcing data in areas where no reference data is available. This applies in particular to urban areas where classical meteorological measuring stations are rarely to be found, but the climatic conditions are heterogeneous.

For the application of algorithms without reference data, the size of the crowdsourcing data set becomes increasingly important. The more extensive a dataset is, the more likely it is that the majority of the data is of suitable quality and thus the detection of potentially erroneous data is possible (sufficiently large knowledge of the crowd).

It is also to be noted that after applying the algorithms, potentially erroneous data could still be included in the data set, but these cannot be automatically detected based on the existing data set.

Table 10. Overview of algorithms of quality check procedures for mass data without use of atmospheric reference data depending on the measured quantity.

Measurand(s)	Comment	Source
Air temperature	Filtering of other approximately normally distributed measured variables may be possible.	[73]
Air temperature	Further development of quality control according to [75]	[74]
Precipitation		[49]
Precipitation	if necessary, with precipitation radar as a reference	[76]
Air temperature, precipitation	Some functions are only possible with reference data (see Section 9.2).	[71]

#### 9.4 Alternative Sichtweisen

Welche Maßnahmen zur Qualitätssicherung oder nachträglichen Verbesserung von Messdaten auch immer eingesetzt werden, im Allgemeinen wird die Qualität von Messdaten aus Low-cost-Sensoren und/oder Crowdsourcing hinter der etablierten Messtechnik zurückbleiben bzw. ihre Unsicherheit vergleichsweise hoch bleiben. Der direkte Vergleich auf der Geräteebene könnte daher immer als Argument dienen, von solchen Messungen abzusehen.

Ein alternativer Ansatz ist, von „klassischen“, harten Anforderungen an die Datenqualität abzurücken. Werden Daten stattdessen als das betrachtet, was sie sind – relativ hochauflösende Daten aus nicht genau definierten Signalquellen, die lokale Dynamik abbilden – rückt der Fokus von der Betrachtung des individuellen Messwerts auf den potenziellen Nutzen der gesamten Daten. Die Frage, die sich stellt, ist, ob diese Daten in irgendeiner Form einen potenziellen Mehrwert bringen, oder umgekehrt, was das Schlimmste ist, was bei ihrer Einbeziehung passieren kann. Die Frage der Datenqualität verschiebt sich bei dieser Betrachtung von einer absoluten Einstufung hin zu einer anwendungsabhängigen Kosten-Nutzen-Abwägung. Ein zentraler Punkt ist hierbei die konkrete Anwendung: Was mit der Analyse der Daten bzw. deren Ergebnis angefangen werden kann, bestimmen maßgeblich die Anforderungen.

So kann es am Ende beispielsweise nicht mehr so sehr darum gehen, 100 % korrekt zu messen, sondern vielmehr darum, Daten zu erheben, um nachvollziehbare Entscheidungen zu treffen und Handlungsmaßnahmen ergreifen zu können. Ebenso kann die richtige Kommunikation ein wichtiges und geeignetes Mittel sein, um mit fragwürdiger Datenqualität umzugehen: Kennzeichnet man klar die Unzulänglichkeiten „schlechter“ Daten und legt dar, warum sie für den konkreten Anwendungsfall dennoch insgesamt zur Verbesserung der Datenlage beitragen, oder klare Schlüsse zulassen, handelt es sich am Ende eben doch um „gute“ Daten.

Diese Betrachtungsweise ist im Zusammenhang mit einer technischen Regel nicht ohne ihre Schwierigkeiten, da sie naturgemäß harter Kriterien entbehrt und allgemeine Handlungsempfehlungen äußerst schwierig sind. Nichtsdestotrotz ist sie insbesondere im Kontext von massenhaften verteilten Messungen in Verbindung mit Anwendungen der künstlichen Intelligenz gegebenenfalls deutlich zielführender als die klassische Betrachtung von Datenqualität auf Geräteebene.

#### 9.4 Alternative perspectives

Whatever measures are used for quality assurance or subsequent improvement of measurement data, the quality of measurement data from low-cost sensors and/or crowdsourcing will, in general, lag behind established measurement technology, or their uncertainty will remain comparatively high. Direct comparison at the device level could therefore always serve as an argument to refrain from such measurements.

An alternative approach is to move away from “classical”, hard data quality requirements. If data is instead seen for what it is – relatively high-resolution data from not well-defined signal sources that map local dynamics – the focus shifts from looking at the individual measured value to the potential benefit of the entire data. The question that arises is whether this data adds potential value in any way, or vice versa, the question of what could be the worst thing that could happen when it is included. The question of data quality shifts in this view from an absolute classification to an application-dependent cost-benefit consideration. A key point here is to consider the specific application: What can be done with the analysis of the data, or its result is largely determined by the requirements.

In the end, it may no longer be so much about measuring 100 % correctly, but rather about collecting data to make comprehensible decisions and take action. Likewise, proper communication can be an important and appropriate way to deal with questionable data quality: If the deficiencies of “poor” data are clearly labelled and it is explained why they nevertheless contribute to improving the data situation for the specific application, or why they allow clear conclusions to be drawn, then in the end it is “good” data after all.

This approach is not without its difficulties in the context of a technical rule, since it naturally lacks hard criteria, and it is extremely difficult to give general recommendations for action. Nevertheless, especially in the context of mass distributed measurements in conjunction with AI applications, it is to some extent much more effective than the classic consideration of data quality at the device level.

## 10 Beispiele

### 10.1 Netzwerk aus privaten Wetterstationen (z. B. Netatmo)

Das Netatmo-Netzwerk privater Wetterstationen ist in Europa insbesondere in urbanen Räumen von hoher Dichte. Die Netatmo-Wetterstation [59] besteht aus einem Innen- und einem Außenmodul, zusätzlich gibt es ein Modul zur Niederschlags- und eines zur Windmessung. Messgrößen der Wetterstation sind Lufttemperatur, Luftfeuchte (beides innen und außen), Luftdruck, CO<sub>2</sub>-Konzentration und Geräuschpegel (innen). Die Station misst automatisch in einem Intervall von fünf Minuten alle Größen und überträgt die Messwerte auf den Server des Herstellers mittels Internet-Verbindung. Jeder Stationsbesitzer kann seine Daten der Außenmodule öffentlich teilen [77], die dann auch mittels einer Programmierschnittstelle (API, [78]) kostenfrei abgerufen werden können. Zahlreiche Studien konnten zeigen, dass mittels Netatmo-Daten unterschiedliche meteorologische und (lokal-)klimatologische Fragestellungen und Anwendungen adressiert werden können, z. B. [48 bis 50; 68; 72; 73; 76; 79 bis 87]. Von besonderer Wichtigkeit ist die rigorose Qualitätskontrolle der Daten und das Herausfiltern fehlerhafter Daten aus einem Crowdsourcing-Datensatz von Netatmo-Daten. Geeignete Algorithmen sind in Abschnitt 9 zu finden. Insbesondere für Fragestellungen in städtischen Räumen ist der Nutzen der Vielzahl von Netatmo-Stationen hervorzuheben.

### 10.2 Citizen-Science-Netzwerk

„Citizen Science beschreibt die Beteiligung von Personen an wissenschaftlichen Prozessen, die nicht in diesem Wissenschaftsbereich institutionell gebunden sind. Dabei kann die Beteiligung in der kurzzeitigen Erhebung von Daten bis hin zu einem intensiven Einsatz von Freizeit bestehen, um sich gemeinsam mit Wissenschaftlerinnen bzw. Wissenschaftlern und/oder anderen Ehrenamtlichen in ein Forschungsthema zu vertiefen.“ [88]

In Deutschland werden die Aktivitäten durch „Bürger schaffen Wissen“ zusammengeführt.

(<https://www.buergerschaffenwissen.de/>)<sup>1)</sup>

In dem Projekt „BürgerWolke Soest“ werden 100 Low-cost-Sensor-Boxen an Bürger und Bürgerinnen verteilt, die über LoRaWan in Echtzeit Messdaten der Stadt Soest liefern. Die Sensoren messen Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Luftdruck und UV-Intensität. Die Messdaten werden online in einem Dashboard (<https://urbanedaten-soest.de/>)<sup>1)</sup> bereit-

## 10 Examples

### 10.1 Network of private weather stations (e.g. Netatmo)

The Netatmo network of private weather stations is of high density in Europe, especially in urban areas. The Netatmo weather station [59] consists of an indoor and an outdoor module, and there is also a module for measuring precipitation and one for measuring wind. Measured variables of the weather station are air temperature, humidity (both inside and outside), air pressure, CO<sub>2</sub> concentration and noise level (inside). The station automatically measures all variables at five-minute intervals and transmits the measured values to the manufacturer's server via an Internet connection. Each station owner can publicly share their data from the outdoor modules [77], which can then also be accessed free of charge via an application programming interface (API, [78]). Numerous studies have shown that Netatmo data can be used to address various meteorological and (local) climatological issues and applications, e.g., [48 to 50; 68; 72; 73; 76; 79 to 87]. Of particular importance is the rigorous quality control of the data and the filtering out of erroneous data from a crowdsourced dataset of Netatmo data. Suitable algorithms can be found in Section 9. Especially for questions in urban spaces, the benefit of the multitude of Netatmo stations is to be emphasised.

### 10.2 Citizen Science Network

“Citizen science describes the engagement of people in scientific processes who are not tied to institutions in that field of science. Participation can range from the short-term collection of data to the intensive use of leisure time in order to delve deeper into a research topic together with scientists and/or other volunteers.” [88]

In Germany, the activities are brought together by a project that would be translated as “Citizens Create Knowledge”.

(<https://www.buergerschaffenwissen.de/>)<sup>1)</sup>

In the project “BürgerWolke Soest”, 100 low-cost sensor boxes are distributed to citizens, which provide real-time measurement data of the city of Soest via LoRaWan. The sensors measure air temperature, relative humidity, air pressure and UV intensity. The measurement data is made available online in a dashboard (<https://urbanedaten-soest.de/>)<sup>1)</sup> and is to

<sup>1)</sup> abgerufen am / accessed on 11. September 2024



gestellt und sollen für Modellierungen verwendet werden.

(<https://digital-soest.de/projekte/projekte-infrastruktur/57-buergerwolke>)<sup>2)</sup>

Unter dem Titel „Smart Air Quality Network“ wurde unter Einbindung von Bürgern und Bürgerinnen in einem Forschungsprojekt in Augsburg ein Messnetz aus ca. 100 Sensoren aufgebaut. Das Ziel dieses Messnetzes ist die Überwachung der Luftqualität. Neben Intensiv-Messkampagnen wurden auch Bürger und Bürgerinnen zum Mitmachen aufgerufen, indem Low-cost-Sensoren aufgestellt wurden, die unter Anleitung selbst gebaut wurden. Das Projekt wurde 2020 abgeschlossen.

(<https://www.smartaq.net/de>)<sup>2)</sup>

Das Projekt „SmartRain“ hatte das Ziel, ein hochverdichtetes Niederschlagsmessnetz in Dresden aufzubauen und zu betreiben. SmartRain band Bürgern und Bürgerinnen direkt in die Messungen mit ein und bat um Mithilfe für die Suche nach Messstandorten sowie den Betrieb. Die Messdaten stehen allen Menschen der Stadt zur Verfügung.

(<https://tu-dresden.de/bu/umwelt/geo/geoinformatik/forschung/forschungsprojekte/smartrain>)<sup>2)</sup>

### 10.3 Professionell gehostete Geonetzwerke

Die Firma meteoblue bietet ein kommerzielles Messnetz zur modernen Stadtklimaüberwachung für smarte Städte namens „City Climate“ an. Dieses Messnetz ist kein Crowdsourcing oder Citizen Science, sondern wird durch die Firma meteoblue bereitgestellt. Das Prinzip ist allerdings ähnlich, da das Messnetz ebenfalls sehr hochaufgelöst ist und mit einfachen Sensoren umgesetzt wird. Die Städte Zürich und Basel verfügen z.B. über ein solches Messnetz.

(<https://www.meteoblue.com/de/products/cityclimate>)<sup>2)</sup>

be used for modelling.

(<https://digital-soest.de/projekte/projekte-infrastruktur/57-buergerwolke>)<sup>2)</sup>

Under the title “Smart Air Quality Network”, a measuring network consisting of about 100 sensors was set up in a research project in Augsburg with the involvement of citizens. The aim of this measuring network is to monitor air quality. In addition to intensive measurement campaigns, citizens were also invited to participate by setting up low-cost sensors that they built themselves under supervision. The project was completed in 2020.

(<https://www.smartaq.net/de>)<sup>2)</sup>

The aim of the project “SmartRain” was to set up and operate a high-density precipitation measurement network in Dresden. SmartRain involved citizens directly in the measurements and asked for their help in finding measurement sites and operating the network. The measurement data is available to everyone in the city.

(<https://tu-dresden.de/bu/umwelt/geo/geoinformatik/forschung/forschungsprojekte/smartrain>)<sup>2)</sup>

### 10.3 Professionally hosted geo-networks

The company meteoblue offers a commercial measurement network for modern urban climate monitoring for smart cities called “City Climate”. This monitoring network does not do crowdsourcing or citizen science, but is provided by the company meteoblue. However, the principle is similar, as the measurement network is also very high-resolution and is implemented with simple sensors. The cities of Zurich and Basel, for example, have such a measurement network.

(<https://www.meteo-blue.com/de/products/cityclimate>)<sup>2)</sup>

<sup>2)</sup> abgerufen am / accessed on 11. September 2024

## Schrifttum / Bibliography

### Technische Regeln / Technical rules

DIN 18716:2017-06 Photogrammetrie und Fernerkundung; Begriffe (Photogrammetry and remote sensing; Terms and definitions). Berlin: DIN Media

DIN EN IEC 60751:2023-06 Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und Platin-Temperatursensoren (IEC 60751:2022); Deutsche Fassung EN IEC 60751:2022 (Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors (IEC 60751:2022); German version EN IEC 60751:2022). Berlin: DIN Media

DIN EN ISO 19115-1/A2:2021-03 Geoinformation; Metadaten; Teil 1: Grundsätze; Änderung 2 (ISO 19115-1:2014/Amd 2:2020); Englische Fassung EN ISO 19115-1:2014/A2:2020 (Geographic information; Metadata; Part 1: Fundamentals; Amendment 2 (ISO 19115-1:2014/Amd 2:2020); English version EN ISO 19115-1:2014/A2:2020). Berlin: DIN Media

ISO 19289:2015-03 Air quality; Meteorology; Siting classifications for surface observing stations on land (Meteorologie; Standort-Klassifikationen für Bodenstationen an Land). Genf: ISO

VDI 1000:2021-02 VDI-Richtlinienarbeit; Grundsätze und Anleitungen (VDI Standardisation Work; Principles and procedures). Berlin: DIN Media

VDI 3783 Blatt 8:2017-04 Umweltmeteorologie; Messwertgestützte Turbulenzparametrisierung für Ausbreitungsmodelle (Environmental meteorology; Turbulence parameters for dispersion models supported by measurement data). Berlin: DIN Media

VDI 3783 Blatt 9:2017-05 Umweltmeteorologie; Prognostische mikroskalige Windfeldmodelle; Evaluierung für Gebäude- und Hindernisumströmung (Environmental meteorology; Prognostic microscale wind field models; Evaluation for flow around buildings and obstacles). Berlin: DIN Media

VDI 3785 Blatt 1:2008-12 Umweltmeteorologie; Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima (Environmental meteorology; Methods and presentation of investigations relevant for planning urban climate). Berlin: DIN Media

VDI 3785 Blatt 2:2023-07 Umweltmeteorologie; Methoden bodengebundener Stadt- und Standortklimamessungen mit mobilen Messsystemen (Environmental meteorology; Methods of urban and site-related ground-based climate measurements with mobile measurement systems). Berlin: DIN Media

VDI 3786 Blatt 1:2024-05 (Entwurf / Draft) Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Grundlagen (Environmental meteorology; Meteorological measurements; Fundamentals). Berlin: DIN Media

VDI 3786 Blatt 1:2013-08 Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Grundlagen (Environmental meteorology; Meteorological measurements; Fundamentals). Berlin: DIN Media

VDI 3786 Blatt 2:2018-05 Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Wind (Environmental meteorology; Meteorological measurements; Wind). Berlin: DIN Media

VDI 3786 Blatt 3:2024-04 Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Lufttemperatur (Environmental meteorology; Meteorological measurements; Air temperature). Berlin: DIN Media

VDI 3786 Blatt 4:2023-12 Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Luftfeuchte (Environmental meteorology; Meteorological measurements; Air humidity). Berlin: DIN Media

VDI 3786 Blatt 5:2022-04 Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Strahlung (Environmental meteorology; Meteorological measurements; Radiation). Berlin: DIN Media

VDI 3786 Blatt 7:2023-07 Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Niederschlag (Environmental meteorology; Meteorological measurements; Precipitation). Berlin: DIN Media

VDI 3786 Blatt 12:2019-06 Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Turbulenzmessungen mit Ultraschallanemometern (Environmental meteorology; Meteorological measurements; Turbulence measurements with sonic anemometers). Berlin: DIN Media

VDI 3786 Blatt 13:2019-11 Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Messstation (Environmental meteorology; Meteorological measurements; Measuring station). Berlin: DIN Media

VDI 3786 Blatt 16:2022-02 Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Luftdruck (Environmental meteorology; Meteorological measurements; Atmospheric pressure). Berlin: DIN Media

VDI 3786 Blatt 22:2021-05 Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Meteorologische Messungen mit unbemannten Flugobjekten (UAV) (Environmental meteorology; Meteorological measurements; Meteorological measurements with unmanned aerial vehicles (UAV)). Berlin: DIN Media

VDI 3787 Blatt 1:2015-09 Umweltmeteorologie; Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen (Environmental meteorology; Climate and air pollution maps for cities and regions). Berlin: DIN Media

VDI 3787 Blatt 2:2022-06 Umweltmeteorologie; Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung der thermischen Komponente des Klimas (Environmental meteorology; Methods for human-biometeorological evaluation of the thermal component of the climate). Berlin: DIN Media

VDI 3787 Blatt 5:2024-03 (Entwurf / Draft) Umweltmeteorologie; Lokale Kaltluft (Environmental meteorology; Local cold air). Berlin: DIN Media

VDI 3787 Blatt 5:2003-12 Umweltmeteorologie; Lokale Kaltluft (Environmental meteorology; Local cold air). Berlin: DIN Media

### Literatur / Literature

- [1] Muller, C.L.; Chapman, L.; Grimmond, C.S.B, Young, D. T.; Cai, X.: Sensors and the City: A Review of Urban Meteorological Networks. In: *Int. J. Climatol.* 33 (2013), pp. 1585–1600. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.3678>
- [2] WMO: Guide to Instruments and Methods of Observation, WMO-No. 8, Volume I – Measurement of Meteorological Variables. World Meteorological Organization. Geneva, 2021/2018, 548 pp.
- [3] Brotzge, J.A.; Fiebrich, C.A.: Mesometeorological networks. In: *Foken, T.* (ed.), Springer Handbook of Atmospheric Measurements. Springer Nature, Cham, 2021, pp. 1235 ff., [https://doi.org/10.1007/978-3-030-52171-4\\_45](https://doi.org/10.1007/978-3-030-52171-4_45)
- [4] Wichura, B.; Foken, T.: Atmospheric measurements for different purposes. In: *Foken, T.* (ed.), Springer Handbook of Atmospheric Measurements. Springer Nature Cham, 2021, pp. 1189 ff., [https://doi.org/10.1007/978-3-030-52171-4\\_43](https://doi.org/10.1007/978-3-030-52171-4_43)
- [5] Muller, C.L.; Chapman, L.; Johnston, S.; Kidd, C.; Illingworth, S.; Foody, G.; et al.: Crowdsourcing for Climate and Atmospheric Sciences: Current Status and Future Potential. In: *Int. J. Climatol.* 35 (2015), pp. 3185 ff., doi:10.1002/joc.4210

- [6] *van de Giesen, N.; Hut, R.; Selker, J.*: The Trans-African Hydro-Meteorological Observatory (TAHMO). *Wiley Interdiscip. Rev. Water* 1 (2014), pp. 341–348. <https://doi.org/10.1002/wat2.1034>
- [7] *Sturtevant, C.; Metzger, S.; Nehr, S.; Foken, T.*: Quality assurance and control. In: *Foken, T.* (Ed.) *Springer Handbook of Atmospheric Measurements*. Springer Nature, Cham, 2021, pp. 49–92 [https://doi.org/10.1007/978-3-030-52171-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-52171-4_3)
- [8] *Meijer, G.* ed.: *Sensor systems*. John Wiley & Sons, 2008
- [9] *Torri, A.; Bange, J.; Foken, T.*: Pressure Sensors. In: *Foken, T.* (ed.), *Springer Handbook of Atmospheric Measurements*. Springer Nature, Cham, 2021, pp. 273–295. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-52171-4\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-52171-4_10)
- [10] *Foken, T.; Bange, J.*: Temperature sensors. In: *Foken, T.* (ed.): *Springer Handbook of Atmospheric Measurements*. Springer Nature, Cham, 2021, pp. 183–208 [https://doi.org/10.1007/978-3-030-52171-4\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-52171-4_7)
- [11] *Sonntag, D.; Foken, T.; Vömel, H.; Hellmuth, O.*: Humidity sensors. In: *Foken, T.* (ed.), *Springer Handbook of Atmospheric Measurements*. Springer Nature, Cham, 2021, pp. 209–242 [https://doi.org/10.1007/978-3-030-51171-4\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-51171-4_8)
- [12] *Behrens, K.*: Radiation sensors. In: *Foken, T.* (ed.), *Springer Handbook of Atmospheric Measurements*. Springer Nature, Cham, 2021, pp. 279–357 [https://doi.org/10.1007/978-3-030-52171-4\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-52171-4_11)
- [13] *Sengupta, S.; Ouh, H.; Johnston, M.L.*: An all-digital CMOS ambient light sensor using a single photon avalanche diode. *IEEE SENSORS*, 2017, pp. 1–3, <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2017.8234047>
- [14] *Kumar, A.; Kumar, A.*: Contactless temperature and distance measuring device: A low-cost, novel infrared –based “Badge”-shaped structural model for measuring physical distance and body temperature. *AIMS Electronics and Electrical Engineering*, 6(2021), pp. 43–60 <https://doi.org/10.3934/electreng.2022004>
- [15] *Foken, T.; Bange, J.*: Wind sensors. In: *Foken, T.* (ed.): *Handbook of Atmospheric Measurements*. Springer Nature, Cham, 2021, pp. 243–272 [https://doi.org/10.1007/978-3-030-52171-4\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-52171-4_9)
- [16] *Cauteruccio, A.; Colli, M.; Stagnaro, M.; Lanza, L.G.; Vuerich, E.*: In situ precipitation measurements. In: *Foken, T.* (ed.), *Springer Handbook of Atmospheric Measurements*. Springer Nature, Cham, 2021, pp. 359–400. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-52171-4\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-52171-4_12)
- [17] *Huwe, B.; Bogner, C.; Foken, T.*: Soil measurements. In: *Foken, T.* (ed.): *Springer Handbook of Atmospheric Measurements*. Springer Nature, Cham, 2021, pp. 1627–1658 [https://doi.org/10.1007/978-3-030-52171-4\\_61](https://doi.org/10.1007/978-3-030-52171-4_61)
- [18] Fachbeitrag: Stromsparendes IoT-System – LoRaWAN-Experimentierplattform LoRIS-Base LoRIS-BM-TRX1, *ELV Journal* (2021) 4, Beitrag 1
- [19] *Ioannou, K.; Karampatzakis, D.; Amanatidis, P.; Aggelopoulos, V.; Karmiris, I.*: Low-Cost Automatic Weather Stations in the Internet of Things. *Information* 12(2021), 146. <https://doi.org/10.3390/info12040146>
- [20] *Bell, S.; Cornford, D.; Bastin, L.*: The state of automated amateur weather observations. In: *Weather*, 68 (2013), pp. 36–41, <https://doi.org/doi:10.1002/wea.1980>
- [21] *Bertko, C.; Weber, T.*: *Home, Smart Home: der praktische Einstieg in die Hausautomation*. Hanser, 2017
- [22] *Lauckner, G.; Krimmling, J.*: Smart Home und Gebäudeleittechnik. In: *Raum- und Gebäudeautomation für Architekten und Ingenieure*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020, S. 283–321, [https://doi.org/10.1007/978-3-658-30143-9\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-658-30143-9_9)
- [23] *Dehli, M.*: Energieeffiziente Gebäudetechnik – Gebäudeautomation – Monitoringkonzepte beim Betrieb von Großgebäuden. In: *Energieeffizienz in Industrie, Dienstleistung und Gewerbe*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020, S. 653–686, [https://doi.org/10.1007/978-3-658-23204-7\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-658-23204-7_18)
- [24] *Stampfer, C.; Heinke, H.; Staacks, S.*: A lab in the pocket. In: *Nature Reviews Materials*. 5(2020), pp. 169–170, <https://doi.org/10.1038/s41578-020-0184-2>
- [25] *Aroganam, G.; Manivannan, N.; Harrison, D.*: Review on Wearable Technology Sensors Used in Consumer Sport Applications. In: *Sensors* 19(2019), 1983, <https://doi.org/10.3390/s19091983>
- [26] *Bhatt, G.; Manoharan, K.; Chauhan, P.S.; Bhattacharya, S.*: MEMS Sensors for Automotive Applications: A Review. In: *Bhattacharya, S.; Agarwal, A.; Prakash, O.; Singh, S.* (eds): *Sensors for Automotive and Aerospace Applications. Energy, Environment, and Sustainability*. Springer, Singapore, 2019. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-3290-6\\_12](https://doi.org/10.1007/978-981-13-3290-6_12)
- [27] *Martin, S.; Seifert, R.*: Sensorik am Auto: Wie Sensoren vernetzte Mobilität ermöglichen. *Atene KOM Schriftreihe, Digitalisierung und Mobilität 1* (2020), 1–6
- [28] *Kiefer, C.; Behrendt, F.*: Smart e-bike monitoring system: real-time open source and open hardware GPS assistance and sensor data for electrically-assisted bicycles. In: *IET Intelligent Transport Systems* 10(2016), pp. 79–88
- [29] <https://www.thethingsnetwork.org> (abgerufen am / accessed on 20. September 2024)
- [30] *Wixted, A.J.; Kinnaird, P.; Larijani, H.; Tait, A.; Ahmadinia, A.; Strachan, N.*: Evaluation of LoRa and LoRaWAN for wireless sensor networks. 2016 *IEEE SENSORS*, 2016, pp. 1–3, <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2016.7808712>
- [31] *Emeis, S.; Wilbert, S.*: Measurement systems of wind, solar and hydropower applications. In: *Foken, T.* (ed.): *Springer Handbook of Atmospheric measurements*. Springer Nature, Cham, 2021, pp. 1371–1391 [https://doi.org/10.1007/978-3-030-52171-4\\_51](https://doi.org/10.1007/978-3-030-52171-4_51)
- [32] <https://www.fictiv.com/teardowns/netatmo-weather-station-teardown-part-2-indoor-module> (abgerufen am / accessed on 20. September 2024)
- [33] *Ding, D.; Cooper, R.A.; Rasquina, P.F.; Fici-Pasquina, L.*: Sensor technology for smart homes. In: *Maturitas* 69 (2011) 2, pp. 131–136
- [34] *Linnemann, M.; Sommer, A.; Leufkes, R.*: Anwendungsfälle für LoRaWAN. In: *Einsatzpotentiale von LoRaWAN in der Energiewirtschaft*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019, S. 71–99, [https://doi.org/10.1007/978-3-658-26917-3\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-658-26917-3_5)
- [35] *Pietrosevoli, E.; Rainone, M.; Zennaro, M.*: On extending the wireless communications range of weather stations using LoRaWAN. *Proceedings of the 5th EAI International Conference on Smart Objects and Technologies for Social Good*. 2019
- [36] *Al-Qammar, A.; Darabkh, K.A.; Abualgah, L.; Khasawneh, A.M.; Zinonos, Z.*: An AI based irrigation and weather forecasting system utilizing LoRaWAN and cloud computing technologies. 2021 *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, 2021, pp. 443–448 <https://doi.org/10.1109/ElConRus51938.2021.9396431>
- [37] *Haxhibeqiri, J.; De Poorter, E.; Moerman, I.; Hoebeke, J.A.*: Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to

- Application. In: *Sensors* 18(2018), 3995  
<https://doi.org/10.3390/s18113995>
- [38] *Singh, R.K.; Aermouts, M.; De Meyer, M.; Weyn, M.; Berkvens, R.*: Leveraging LoRaWAN Technology for Precision Agriculture in Greenhouses. *Sensors* 20(2020), 1827. <https://doi.org/10.3390/s20071827>
- [39] *Baba, S.M.; Bandy, M.T.*: Application Development for Wearable Internet of Things using Hexiwear, 2020 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN), 2020, pp. 542–548, <https://doi.org/10.1109/SPIN48934.2020.9071090>
- [40] *Zornoza, J.; Mujica, G.; Portilla, J.; Riesgo, T.*: Merging smart wearable devices and wireless mesh networks for collaborative sensing, 32nd Conference on Design of Circuits and Integrated Systems (DCIS), 2017, pp. 1–6, <https://doi.org/10.1109/DCIS.2017.8311637>
- [41] *Franco da Silva, A.C.; Hirmer, P.; Schneider, J.; Ulusal, S.; Frigo, M.T.*: MBP: Not just an IoT Platform, 2020 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops), 2020, pp. 1–3, <https://doi.org/10.1109/PerComWorkshops48775.2020.9156156>
- [42] *Landaluce, H.; Arjona, L.; Perallos, A.; Falcone, F.; Angulo, I.; Muralter, F.*: A review of IoT sensing applications and challenges using RFID and wireless sensor networks. In: *Sensors* (2020), 20(9), 2495, <https://doi.org/10.3390/s20092495>
- [43] *Bolanakis, D.E.*: Evaluating performance of MEMS barometric sensors in differential altimetry systems. In: *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 32(2017), pp. 34–39, <https://doi.org/10.1109/MAES.2017.160248>
- [44] *Gartsev, I.B.; Safonov, I.V.*: Rapid Prototyping of the Learning-based Functionality for Wearable Devices IC-MSCE '17: Proceedings of the 2017 International Conference on Mechatronics Systems and Control Engineering, February 2017, pp. 42–46 <https://doi.org/10.1145/3045714.3045721>
- [45] <https://www.wow.metoffice.gov.uk/support/siteratings>  
<https://doi.org/doi:10.1002/wea.1980>
- [46] *Oke, T.R.*: Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. *Instruments and Observing Methods Rep. 81, WMO/ TD-1250*. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 2006
- [47] *Schlinzen, H., Grimmond, C.S.B., Baklanov, A.A.* (eds.): *Guidance to Measuring, Modelling and Monitoring the Canopy Layer Urban Heat Island (CL-UHI)*, Draft. World Meteorological Organization, Geneva, 2022, 97 pp.
- [48] *Meier, F.; Fenner, D.; Grassmann, T.; Otto, M.; Scherer, D.*: Crowdsourcing air temperature from citizen weather stations for urban climate research. In: *Urban Clim.* 19(2017), pp. 170–191, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.01.006>
- [49] *de Vos, L.; Leijnse, H.; Overeem, A.; Uijlenhoet, R.*: The potential of urban rainfall monitoring with crowdsourced automatic weather stations in Amsterdam. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21 (2017), pp. 765–777 <https://doi.org/10.5194/hess-21-765-2017>
- [50] *Droste, A.M.; Heusinkveld, B.G.; Fenner, D.; Steeneveld, G.-J.*: Assessing the potential and application of crowdsourced urban wind data. In: *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 146 (2020), pp. 2671–2688. <https://doi.org/10.1002/qj.3811>
- [51] *Bell, S., Cornford, D., Bastin, L.*: How good are citizen weather stations? Addressing a biased opinion. *Weather* 70 (2015), 75–84. <https://doi.org/10.1002/wea.2316>
- [52] *Budde, M.*: Crowdsourcing. In: *Foken, T.* (ed.), *Handbook of Atmospheric Measurements*. Springer Nature, Cham, 2021, pp. 1201 ff., [https://doi.org/10.1007/978-3-030-52171-4\\_44](https://doi.org/10.1007/978-3-030-52171-4_44)
- [53] *Budde, M.; Schwarz, A.D.; Müller, T.; Laquai, B.; Streibl, N.; Schindler, G.; Köpke, M.; Riedel, T.; Dittler, A.; Beigl, M.*: Potential and limitations of the low-cost SDS011 particle sensor for monitoring urban air quality. *ProScience*, 5(2018), pp 6–12
- [54] *Tan, R.; Xing, G.; Yuan, Z.; Liu, X.; Yao, J.*: System-level calibration for fusion-based wireless sensor networks. 2010 IEEE 31st Real-Time Systems Symposium, 2010, <https://doi.org/10.1109/RTSS.2010.29>
- [55] *Whitehouse, K.; Culler, D.*: Calibration as parameter estimation in sensor networks. In: *1st ACM Int. Workshop Wirel. Sens. Netw. Appl.*, 2002, <https://doi.org/10.1145/570738.570747>
- [56] *Miluzzo, E.; Lane, N.D. Campbell, A.T.; Olfati-Saber, R.*: *CaliBree*: A self-calibration system for mobile sensor networks. In: *Lect. Notes Comput. Sci.* 5067(2008), pp. 314–331, [https://doi.org/10.1007/978-3-540-69170-9\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-540-69170-9_21)
- [57] *Hasenfratz, D.; Saukh, O.; Thiele, L.*: On-the-fly calibration of low-cost gas sensors. In *European Conference on Wireless Sensor Networks*. Springer, 2012, pp. 228–244
- [58] *Markert, J.-F.; Budde, M.; Schindler, G.; Klug, M.; Beigl, M.*: Private rendezvous-based calibration of low-cost sensors for participatory environmental sensing. In *Proceedings of the Second International Conference on IoT in Urban Space*. 2016, 82–85, <https://doi.org/10.1145/2962735.2962754>
- [59] *Coney, J.; Pickering, B.; Dufton, D.; Lukach, M.; Brooks, B.; Neely III, R.R.*: How useful are crowdsourced air temperature observations? An assessment of Netatmo stations and quality control schemes over the United Kingdom. In: *Meteorological Applications*. 29(2022), e2075 <https://doi.org/10.1002/met.2075>
- [60] *Stewart, I.D.; Oke, T.R.*: Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society* (93) 2012, pp. 1879–1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- [61] *Zahumenský, I.*: *Guidelines on Quality Control Procedures for Data from Automatic Weather Stations*. World Meteorological Organization, CIMO/OPAG-SURFACE/ET ST&MT-1/Doc.6.1(2), 2004
- [62] *Estévez, J.; Gavilán, P.; Giráldez, J.V.*: Guidelines on validation procedures for meteorological data from automatic weather stations. In: *J. Hydrol.* 402 (2011), pp. 144–154. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.02.031>
- [63] *Madaus, L.E.; Hakim, G.J.; Mass, C.F.*: Utility of Dense Pressure Observations for Improving Mesoscale Analyses and Forecasts. *Mon. Weather Rev.* 142 (2014), pp. 2398–2413. <https://doi.org/10.1175/mwr-d-13-00269.1>
- [64] *Bell, S.J.*: *Quantifying Uncertainty in Citizen Weather Data*. PhD Thesis, Aston University, Birmingham, United Kingdom, 2015
- [65] *Hammerberg, K.; Brousse, O.; Martilli, A.; Mahdavi, A.*: Implications of employing de-tailed urban canopy parameters for mesoscale climate modelling: a comparison between WUDAPT and GIS databases over Vienna, Austria. In: *Int. J. Climatol.* 38 (S1) (2018), e1241-e1257. <https://doi.org/10.1002/joc.5447>
- [66] *Cornes, R.C.; Dirksen, M.; Sluiter, R.*: Correcting citizen-science air temperature measurements across the Netherlands for short wave radiation bias. In: *Meteorol. Appl.* 27(2020), e1814. DOI: 10.1002/met.1814

- [67] *Varentsov, M.; Fenner, D.; Meier, F.; Samsonov, T.; Demuzere, M.*: Quantifying local- and meso-scale drivers of Moscow's urban heat island with reference and crowdsourced observations. In: *Front. Environ. Sci.* 9 (2021), 716968 <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.716968>
- [68] *Bárdossy, A.; Seidel, J.; Hachem, A.E.*: The use of personal weather station observation for improving precipitation estimation and interpolation. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 25 (2021), pp. 583–601. <https://doi.org/10.5194/hess-25-583-2021>
- [69] *Chen, J.; Saunders, K.; Whan, K.*: Quality control and bias adjustment of crowdsourced wind speed observations. In: *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 147(2021), pp. 3647–3664. <https://doi.org/10.1002/qj.4146>
- [70] *Clark, M. R.; Webb, J. D. C.; Kirk, P. J.*: Fine-scale analysis of a severe hailstorm using crowd-sourced and conventional observations. *Meteorol. Appl.* 25 (2018), 472–492. <https://doi.org/10.1002/met.1715>
- [71] *Bäserud, L.; Lussana, C.; Nipen, T.N.; Seierstad, I.A.; Oram, L.; Aspelien, T.*: TITAN automatic spatial quality control of meteorological in-situ observations. In: *Adv. Sci. Res.* 17(2020), pp. 153–163. <https://doi.org/10.5194/asr-17-153-2020>
- [72] *Mandement, M.; Caumont, O.*: Contribution of personal weather stations to the observation of deep-convection features near the ground. In: *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 20(2020), pp. 299–322, <https://doi.org/10.5194/nhess-2019-229>
- [73] *Napoly, A.; Grassmann, T.; Meier, F.; Fenner, D.*: Development and Application of a Statistically-Based Quality Control for Crowdsourced Air Temperature Data. In: *Front. Earth Sci.* 6(2018), 118. DOI: 10.3389/feart.2018.00118
- [74] *Fenner, D.; Bechtel, B.; Demuzere, M.; Kittner, J.; Meier, F.*: CrowdQC+ – A quality-control for crowdsourced air-temperature observations enabling world-wide urban climate applications. In: *Front. Environ. Sci.* 9(2021), 720747, <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.720747>
- [75] *Napoly, A.; Grassmann, T.; Meier, F.; Fenner, D.*: Development and application of a statistically-based quality control for crowdsourced air temperature data. In: *Front. Earth Sci.* 6(2018), 118. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00118>
- [76] *de Vos, L.W.; Leijnse, H.; Overeem, A.; Uijlenhoet, R.*: Quality Control for Crowdsourced Personal Weather Stations to Enable Operational Rainfall Monitoring. In: *Geophys. Res. Lett.* 46 (2019), pp. 8820–8829 <https://doi.org/10.1029/2019gl083731>
- [77] <https://weathermap.netatmo.com/> (abgerufen am / accessed on 20. September 2024)
- [78] *Kolyvakis, P.; Mader, C.; Kiritsis, D.*: Semantic interoperability and open IoT APIs for smart cities applications. In: *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems*, Seoul, 2018, pp. 146–154 [https://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-99707-0\\_19](https://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-99707-0_19)
- [79] *Chapman, L.; Bell, C.; Bell, S.*: Can the crowdsourcing data paradigm take atmospheric science to a new level? A case study of the urban heat island of London quantified using Netatmo weather stations. In: *Int. J. Climatol.* 37 (2017), pp. 3597–3605. <https://doi.org/10.1002/joc.4940>
- [80] *Fenner, D.; Meier, F.; Bechtel, B.; Otto, M.; Scherer, D.*: Intra and inter 'local climate zone' variability of air temperature as observed by crowdsourced citizen weather stations in Berlin, Germany. In: *Meteorol. Z.* 26 (2017), S. 525–547. <https://doi.org/10.1127/metz/2017/0861>
- [81] *Fenner, D.; Holtmann, A.; Meier, F.; Langer, I.; Scherer, D.*: Contrasting changes of urban heat island intensity during hot weather episodes. In: *Environ. Res. Lett.* 14 (2019): 124013. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab506b>
- [82] *Feichtinger, M.; de Wit, R.; Goldenits, G.; Kolejka, T.; Hollósi, B.; Žuvela-Aloise, M.; Feigl, J.*: Case-study of neighborhood-scale summertime urban air temperature for the City of Vienna using crowd-sourced data. *Urban Clim.* 32(2020), 100597 <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100597>
- [83] *Venter, Z.S.; Brousse, O.; Esau, I.; Meier, F.*: Hyperlocal mapping of urban air temperature using remote sensing and crowdsourced weather data. In: *Remote Sens. Environ.* 242(2020), 111791 <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111791>
- [84] *Vulova, S.V.; Meier, F.; Fenner, D.; Nouri, H.; Kleinschmit, B.*: Summer Nights in Berlin, Germany: Modeling Air Temperature Spatially with Remote Sensing, Crowdsourced Weather Data, and Machine Learning. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 13(2020), pp. 5074–5087 <https://doi.org/10.1109/jstars.2020.3019696>
- [85] *Venter, Z.S.; Chakraborty, T.; Lee, X.*: Crowdsourced air temperatures contrast satellite measures of the urban heat island and its mechanisms. In: *Sci. Adv.* 7 (2021), eabb9569. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abb9569>
- [86] *Zumwald, M.; Knüsel, B.; Bresch, D.N.; Knutti, R.*: Mapping urban temperature using crowd-sensing data and machine learning. In: *Urban Clim.* 35(2021), 100739 <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100739>
- [87] *Nipen, T.N.; Seierstad, I.A.; Lussana, C.; Kristiansen, J.; Hov, Ø.*: Adopting citizen observations in operational weather prediction. In: *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 101(2020), E43–E57. <https://doi.org/10.1175/bams-d-18-0237.1>
- [88] *Bonn, A.; Richter, A.; Vohland, K.; Pettibone, L.; Brandt, M.; Feldmann, R.; Goebel, C.; Grefe, C.; Hecker, S.; Hennen, L.; Hofer, H.; Kiefer, S.; Klotz, S.; Kluttig, T.; Krause, J.; Küsel, K.; Liedtke, C.; Mahla, A.; Neumeier, V.; Premke-Kraus, M.; Rillig, M.C.; Röller, O.; Schäffler, L.; Schmalzbauer, B.; Schneidewind, U.; Schumann, A.; Settele, J.; Tochtermann, K.; Tockner, K.; Vogel, J.; Volkmann, W.; von Unger, H.; Walter, D.; Weisskopf, M.; Wirth, C.; Witt, T.; Wolst, D.; Ziegler, D.*: Grünbuch Citizen Science Strategie 2020 für Deutschland. Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ), Deutsches Zentrum für integrative Biodiversitätsforschung (iDiv) Halle-Jena-Leipzig, Leipzig, Museum für Naturkunde Berlin, Leibniz-Institut für Evolutions- und Biodiversitätsforschung (MfN), Berlin-Brandenburgisches Institut für Biodiversitätsforschung (BBIB), Berlin, 2016.
- [89] *Marquès, E.; Masson, V.; Naveau, P.; Mestre, O.; Dubreuil, V.; Richard, Y.*: (2022) Urban Heat Island Estimation from Crowdsensing Thermometers Embedded in Personal Cars. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 103 (4): E1098–E1113. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0174.1>