



Meteorologische Messungen

Luftqualität
im Fokus

VDI-Agenda
Juli 2017

Vorwort

Die Höhe der Luftschadstoffkonzentration wird auf dem Transportweg (Transmission) von der Quelle (Emission) zu den jeweiligen Rezeptoren (Immission) von einer Reihe von Parametern bestimmt. Diese sind neben Parametern, die physikochemische Reaktionen und die Deposition bestimmen, insbesondere eine Vielzahl meteorologischer Parameter wie Windrichtung und Windgeschwindigkeit.

Für die Interpretation von Luftschadstoffmessungen, für prognostische Modellierungen, z. B. in Genehmigungsverfahren, sowie für Störfallfragestellungen sind meteorologische Informationen – die durch Messungen und durch Modellierungen gewonnen werden können – von besonderer Bedeutung. Im Kontext der Luftreinhaltung sind die Ergebnisse von meteorologischen Messungen als Eingangsdaten für Immissionsprognosen von Belang und rechtlich entsprechend vorgesehen (siehe z. B. TA Luft).

Neben dem Deutschen Wetterdienst (DWD) führen häufig auch Gutachter- und Ingenieurbüros sowie Forschungsinstitute meteorologische Messungen im Bereich der Luftreinhaltung und allgemein im Umweltschutz im Rahmen von Genehmigungsverfahren oder Gutachten durch. Landesbehörden betreiben im Routinedienst umfangreiche Luftqualitätsmessungen und beauftragen häufig zusätzlich Dritte für spezielle Untersuchungen. Hierbei erfolgen auch meteorologische Messungen, die zur Bewertung von Luftqualitätsmessungen notwendig sind.

Im direkten oder indirekten Zusammenhang mit der Luftreinhaltung werden meteorologische Messungen auch in Energiewirtschaft, Heizungs- und Klimatechnik, Wasser-, Land-, Forst- und Bauwirtschaft, im Verkehrswesen, in der Stadt- und Regionalplanung sowie zur Steuerung wetterabhängiger Abläufe benötigt. Nur eine weitestmögliche Einheitlichkeit von

Messstrategie, Messung und Auswertung führt zu aussagefähigen und vergleichbaren Ergebnissen. Diese Agenda richtet sich in diesem Zusammenhang an Behörden, Mess- und Prüflaboratorien, Gutachter- und Ingenieurbüros, Umweltverbände, Forschungsinstitute sowie Stadtplaner und Architekten.

Um vergleichbare Messungen durchführen zu können, müssen sowohl Messmethoden als auch Auswerteverfahren qualitätsgesichert und möglichst einheitlich gestaltet sein. In Kenntnis der Regelsetzungen der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) und des DWD ergab sich in den 1980er-Jahren die Notwendigkeit, eine eigene VDI-Richtlinienreihe für die speziellen Fragestellungen im Bereich der Luftreinhaltung im Fachbereich Umweltmeteorologie der VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft zu erarbeiten. Zahlreiche VDI-Richtlinien und DIN-ISO-Normen beschreiben die einzelnen Messparameter, Messstrategien und Auswerteverfahren im Hinblick auf die Luftreinhaltung.

Ausschlaggebend für die Erstellung dieser Agenda ist die Frage, wie die technische Regelsetzung für meteorologische Messungen bedarfsgerecht und zielführend weiterhin koordiniert und wie technische Innovationen stärker begleitet werden können. Mit dem Wissen um die zahlreichen Handlungsfelder blickt diese Agenda auf bereits behandelte, aktuelle und zukünftige Themen der technischen Regelsetzung und geht dabei auch auf die verstärkte Notwendigkeit internationaler Normung ein.

Die vorliegende Agenda soll zur transparenten Darstellung der inhaltlichen Fragestellungen beitragen und als Aufruf zur verstärkten Mitarbeit an Norm- und Richtlinienprojekten im Bereich der Umweltmeteorologie verstanden werden.

Düsseldorf im Juli 2017



Dipl.-Ing. Simon Jäckel
Verein Deutscher Ingenieure e.V.,
VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL)
– Normenausschuss)

Autoren

Dr. Thomas Einfalt, hydro & meteo GmbH & Co. KG, Lübeck
Vorsitzender der VDI-Arbeitsgruppe „Niederschlagsmessung mittels Radar“

Prof. Dr. Stefan Emeis, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Garmisch-Partenkirchen
Vorsitzender der VDI-Arbeitsgruppe „Bodengebundene Fernmessung meteorologischer Größen“

Prof. Dr. Thomas Foken, MikroMeteorologische Beratung, Bischberg, und Bayreuther Zentrum für Ökologie und
Umweltforschung der Universität Bayreuth
Vorsitzender der VDI-Arbeitsgruppe „Meteorologische Messungen“

Dipl.-Ing. Simon Jäckel, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf
Mitarbeiter der VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) – Normenausschuss

Dipl.-Met. Wolfgang J. Müller
Vorsitzender des Fachbeirats im Fachbereich Umweltmeteorologie der VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft
(KRdL) – Normenausschuss

Inhalt

Vorwort	1
Autoren	2
1 Bisherige Entwicklungen	4
1.1 Einführung	4
1.2 Windrichtung und -geschwindigkeit	5
1.3 Turbulente Flüsse	6
1.4 Strahlung	7
1.5 Niederschlag	7
1.6 Lufttemperatur	8
1.7 Luftfeuchte	8
1.8 Luftdruck	9
1.9 Meteorologische Sichtweite	9
1.10 Mischungsschichthöhe, Inversionen	9
1.11 Wolkenuntergrenze	10
1.12 Aerosole	10
1.13 Spurengase	10
1.14 Messgeräteträger und Plattformen	11
2 Handlungsfelder	12
2.1 Automatisierung	12
2.2 „Smart Sensors“ und „Citizen Science“	12
2.3 Niederschlagsverteilung aus Mobilfunknetzdaten ableiten	13
2.4 Standortsuche für Windparks	13
2.5 Messung der Turbulenz	13
2.6 Schlussfolgerungen	14
3 Regelsetzungsstrategie	15
3.1 VDI als Regelsetzer	15
3.2 VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft	15
3.3 VDI-Ausschüsse zu meteorologischen Messungen und nationale Regelung	15
3.4 Internationale Regelung	16
4 Inhalte der technischen Regelung	17
Literatur	19

1 Bisherige Entwicklungen

1.1 Einführung

Zu den klassischen Messverfahren gehören jene, die schon seit etwa 150 Jahren an meteorologischen Stationen eingesetzt werden, wie die zur Messung der Lufttemperatur, der Luftfeuchte, der Windgeschwindigkeit und -richtung und des Niederschlags. Vor allem Strahlungsmessungen sind in den letzten Jahrzehnten hinzugekommen. Viele Größen werden aber bereits seit mehreren hundert Jahren gemessen, obwohl die Messtechnik meist nicht mehr heutigen Ansprüchen genügt. Visuelle Beobachtungen sind schon seit der Antike bekannt.

Die Atmosphäre ist im Allgemeinen turbulent, das heißt: Alle meteorologischen Parameter schwanken erheblich in einem Zeitbereich von Zehntelsekunden bis nahezu einer Stunde. Bei üblichen meteorologischen Messungen versucht man, diese Schwankungen durch Mittelwertbildung über etwa 10 Minuten bis 30 Minuten auszufiltern. Häufig wird auch die Trägheit des Messwertgebers oder eine Tiefpassfilterung bei der Datenerfassung genutzt, um hochfrequente Schwankungen auszuschließen. Die hohe Variabilität meteorologischer Felder erfordert häufige Messungen im Abstand von 10 Minuten bis 60 Minuten, damit eine statistisch einwandfreie Datenerfassung gewährleistet ist. Lediglich bei klimatologischen Messungen sind drei bis vier Termine pro Tag zulässig, wobei diese so festgelegt sein müssen, dass das Tagesmittel über längere Zeitabschnitte dem Mittel über Stundenwerte entspricht.

Messungen in der Atmosphäre unterscheiden sich grundsätzlich von Messungen in anderen Medien. Durch das vorhandene Windfeld wird die Luft an den Messwertgeber (beziehungsweise das durch indirekte Messungen erfasste Volumenelement) herangeführt. Dieser integriert dann über eine bestimmte Messzeit (z.B. 10 Minuten). Somit werden nicht die Luft-eigenschaften über einem bestimmten Messpunkt gemessen. Damit sind die Unterlageneigenschaften an der windzugewandten Seite (Luv) bis zu einer Ausdehnung von etwa 100-facher Messhöhe für die jeweilige Messgröße bestimmend. Dies wird als „Footprint“ bezeichnet [1]. Messungen im Wetterdienst und für klimatologische Zwecke werden für die meisten Messgrößen in etwa 2 m Höhe durchgeführt (Wind in

10 m Höhe). Diese Höhen sollten auch für Zwecke der Reinhaltung der Luft für Messungen am Boden eingehalten werden, falls nicht zwingende Gründe dagegen sprechen. Weiterhin kommen Masten oder ballon- oder flugzeuggetragene Messsysteme zum Einsatz, um die unteren Atmosphärenschichten bis in einige Kilometer Höhe erfassen zu können.

Mittlerweile stellen bodengestützte und satellitenbasierte Fernmessverfahren eine große Gruppe von Messverfahren dar, deren Bedeutung immer weiter zunimmt.

Generell gibt es aktive und passive Fernmessung. Bei der **aktiven Fernmessung** wird eine wohldefinierte Strahlung in Richtung auf das Messvolumen ausgesandt und die Rückstreuung gemessen und ausgewertet. Die Entfernungsauflösung erfolgt in der Regel über die Laufzeit. Bei der **passiven Fernmessung** wird vom Messgerät nur die ankommende natürliche Strahlung erfasst. Die räumliche Auflösung ist geringer als bei der aktiven Fernmessung, da eine Entfernungszuordnung über Gewichtungsfunktionen erfolgen muss.

Weiterhin unterscheidet man zwischen pfadmittelnden, sondierenden, scannenden und bildgebenden Verfahren. Bei **pfadmittelnden Verfahren** wird nur ein Mittelwert einer atmosphärischen Eigenschaft über den Ausbreitungsweg der empfangenen Strahlung hinweg bestimmt. Bei den **sondierenden Verfahren** wird entlang einer vorher gewählten feststehenden Blickrichtung (meistens in Richtung Zenit) eine entfernungsabhängige Messung vorgenommen. Bei **scannenden Verfahren** wird die Messung nacheinander entlang eines vorher festgelegten Musters von mehreren Blickrichtungen durchgeführt. **Bildgebende Verfahren** verfügen über eine Optik (oder ein entsprechendes elektromagnetisches Äquivalent), die die einkommende Strahlung aus verschiedenen Raumrichtungen innerhalb des Öffnungswinkels der Optik entfernungsunabhängig auf einem flächenhaften Detektor abbildet.

In den letzten Jahren sind einige Lehrbücher erschienen, die sowohl zu den Messprinzipien als auch zur Messung einzelner Größen bei Detailfragen herangezogen werden können [2 bis 6].

Relevante technische Regeln

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

VDI 3786 Blatt 1.1 (in Vorbereitung) Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Grundlagen; Fernmessverfahren

VDI 3786 Blatt 8:2017-02 Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Aerologische Messungen

VDI 3786 Blatt 9: 2007-10 Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Visuelle Wetterbeobachtungen

VDI 3786 Blatt 13:2006-08 Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Messstation

1.2 Windrichtung und -geschwindigkeit

Windrichtung und Windgeschwindigkeit gehören zu den wichtigsten Größen bei der Ausbreitung von Luftbeimengungen. Sie bestimmen den Ort und die Höhe der Konzentration im Lee von Quellen.

Der Wind muss möglichst repräsentativ im freien Windfeld erfasst werden. Dies ist möglich, je weniger Strömungshindernisse im Nahfeld des Messorts vorhanden sind. Im Gegensatz zu anderen Messgrößen liegt die standardisierte Messhöhe bei 10 m über Grund und muss gegebenenfalls in Abhängigkeit von Hindernissen in der Umgebung auch noch erhöht werden. Klassisch werden Schalensternanemometer und Windfahnen eingesetzt. Diese weisen eine gewisse Trägheit auf, die zu einer Zeitverzögerung (dynamischer Fehler) oder zu einem Einschwingverhalten in Abhängigkeit von der Dämpfung führt. Die dadurch entstehenden Fehler werden vor allem bei niedrigen Geschwindigkeiten relevant. Weiterhin

kommen Propelleranemometer mit integrierter Windfahne zum Einsatz, allerdings kaum in Deutschland.

Zunehmend werden mechanische Anemometer durch Ultraschallanemometer ersetzt, die weniger Wartung benötigen und – wenn nicht mechanisch beschädigt – eichstabil sind. Bei diesen wird ein Ultraschallsignal entlang einer Messstrecke in beide Richtungen gleichzeitig ausgesandt. Aus der Laufzeitdifferenz zwischen beiden Messsignalen wird die Windgeschwindigkeit berechnet. Wird die Messung in zwei horizontalen Richtungen durchgeführt, lässt sich die Windrichtung bestimmen. Wird noch die vertikale Windkomponente gemessen, eignen sich die Messsysteme auch zur Bestimmung von Energie- und Stoffflüssen. Die zeitliche Auflösung reicht bis etwa 100 Hz.

Die Windgeschwindigkeit eines Luftpakets lässt sich auch über die Dopplerverschiebung der Frequenz einer zurückgestreuten Strahlung ermitteln. Dies funktioniert sowohl mit Schallwellen (Sodar und der akustische Teil eines RASS), mit Lichtwellen (Windlidar) als auch mit Radiowellen (Windprofiler). Da der Wind eine dreidimensionale vektorielle Größe mit Betrag und Richtung ist, benötigt man für die Bestimmung von Windgeschwindigkeit und -richtung mindestens drei Messungen aus unterschiedlichen Richtungen. Sodar und Windprofiler schauen hierzu in drei oder fünf verschiedene Richtungen (wovon eine in der Regel genau vertikal ist, um die relativ kleine vertikale Windkomponente direkt zu bestimmen). Windlidare führen zur Erfassung der Vertikalkomponente hierzu oft eine konische Skannierung aus. Unter Annahmen zur horizontalen Homogenität der Strömung werden diese Informationen dann mittels trigonometrischer Berechnungen zum Windvektor zusammengeführt.

Windgeschwindigkeiten werden in m/s mit einer Genauigkeit je nach Gerätetyp von 0,1 m/s bis 0,5 m/s, seltener in km/h, gemessen. Die Windrichtung wird in Grad (Vollkreis 360°) mit 360° für Norden und 90° für Osten usw. angegeben.

Relevante technische Regeln

VDI 3786 Blatt 2:2016-11 Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Wind

VDI 3786 Blatt 11:2015-07 Umweltmeteorologie; Bodengebundene Fernmessung des Windvektors und der Vertikalstruktur der Grenzschicht; Doppelsodar

VDI 3786 Blatt 12:2017-08 (Entwurf) Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Turbulenzmessung mit Ultraschall-Anemometern

VDI 3786 Blatt 17:2007-02 Umweltmeteorologie; Bodengebundene Fernmessung des Windvektors; Wind-Profil-Radar

VDI 3786 Blatt 18:2010-05 Umweltmeteorologie; Bodengebundene Fernmessung der Temperatur; Radioakustische Sondierungssysteme (RASS)

DIN ISO 16622:2003-03 Meteorologie; Ultraschall-Anemometer/Thermometer; Abnahmeprüfverfahren für Messungen der mittleren Windgeschwindigkeit (ISO 16622:2002)

DIN ISO 17713-1:2007-10 Meteorologie; Windmessungen; Teil 1: Prüfverfahren in Windkanälen zur Ermittlung der Leistung von Rotationsanemometern (ISO 17713-1:2007)

DIN ISO 28902-2:2015-03 (Entwurf) Luftqualität; Umweltmeteorologie; Teil 2: Bodengebundene Fernmessung des Windes mittels gepulstem, mit Überlagerungsempfang arbeitendem Doppler-Lidar (ISO/DIS 28902-2:2015)

1.3 Turbulente Flüsse

Rasche Fluktuationen der Windgeschwindigkeitskomponenten sind ein Ausdruck der Turbulenz der Atmosphäre. Die Ausbreitung in der Atmosphäre wird durch Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Turbulenzzustand bestimmt. Die Windgeschwindigkeit und die atmosphärische Turbulenz bestimmen die Transportgeschwindigkeit und die Verdünnung der emittierten Stoffe.

Zu den turbulenten Flüssen gehören u. a. der Impulsaustausch (Reibung an der Unterlage), der fühlbare Wärmestrom (Wärmeaustausch) und der latente Wärmestrom (Wasserdampftransport). Die Größen werden zur Bestimmung der atmosphärischen Stabilität benötigt, die die Intensität des Transports von Luftbeimengungen bestimmt. Man verwendet dabei dreidimensionale Ultraschallanemometer und vorwie-

gend optische Gasmessgeräte. Die Auswertung erfolgt durch die Eddy-Kovarianz-Methode [7]. Turbulente Flüsse werden als Energieflussdichten angegeben. Stehen diese relativ aufwendigen Verfahren nicht zur Verfügung, so müssen die auf der atmosphärischen Stabilität beruhenden Ausbreitungsklassen durch visuelle Beobachtungen oder durch Parametrisierung aus anderen Größen bestimmt werden. Der Turbulenzzustand kann durch eine kontinuierliche Kenngröße, die Obukhov-Länge, charakterisiert werden.

Die vertikale Komponente der Windgeschwindigkeit kann auch mit Sodar, Windlidar, Windprofiler oder RASS direkt bestimmt werden, solange die direkt vertikale Messrichtung bei den genannten Messverfahren mit erfasst wird. Die horizontalen Komponenten der Windgeschwindigkeit sind für Turbulenzmessungen mit einzelnen Sodargeräten, Windlidaren, Windprofilern oder RASS jedoch nicht bestimmbar, da die hierzu mindestens notwendigen drei Informationen nicht von ein und demselben Punkt vorliegen und die Homogenitätsannahmen wegen der Kleinskaligkeit der Turbulenz hier nicht zulässig sind. Hier hilft nur die gleichzeitige Beobachtung ein und desselben Luftvolumens durch mindestens drei räumlich verteilte Fernmessgeräte, was aber sehr aufwendig ist.

Relevante technische Regeln

VDI 3786 Blatt 11:2015-07 Umweltmeteorologie; Bodengebundene Fernmessung des Windvektors und der Vertikalstruktur der Grenzschicht; Doppelsodar

VDI 3786 Blatt 12:2017-08 (Entwurf) Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Turbulenzmessung mit Ultraschall-Anemometern

VDI 3786 Blatt 17:2007-02 Umweltmeteorologie; Bodengebundene Fernmessung des Windvektors; Wind-Profil-Radar

VDI 3786 Blatt 18:2010-05 Umweltmeteorologie; Bodengebundene Fernmessung der Temperatur; Radioakustische Sondierungssysteme (RASS)

DIN ISO 16622:2003-03 Meteorologie; Ultraschall-Anemometer/Thermometer; Abnahmeprüfverfahren für Messungen der mittleren Windgeschwindigkeit (ISO 16622:2002)

DIN ISO 28902-2:2015-03 (Entwurf) Luftqualität; Umweltmeteorologie; Teil 2: Bodengebundene Fernmessung des Windes mittels gepulstem, mit Überlagerungsempfang arbeitendem Doppler-Lidar (ISO/DIS 28902-2:2015)

1.4 Strahlung

Die Strahlung hat einen wesentlichen Einfluss auf die Temperaturschichtung der bodennahen Atmosphäre und damit auf die Aufweitung von Abluffahnen. Die Strahlung der Sonne liefert die nötige Energie, um Prozesse der Verbreitung von Luftverunreinigungen überhaupt in Gang zu setzen.

Man unterteilt die Strahlung in kurzwellige solare oder extraterrestrische Strahlung mit Wellenlängen von 0,3 μm bis etwa 3 μm und die langwellige terrestrische Strahlung mit Wellenlängen von etwa 3 μm bis 100 μm . Dabei unterscheidet man jeweils Strahlungsströme aus dem oberen und dem unteren Halbraum neben der direkten Sonnenstrahlung. Die kurzwellige Strahlung aus dem oberen Halbraum ist die Globalstrahlung, bei Ausblendung der direkten Sonnenstrahlung die Himmelsstrahlung. Aus dem unteren Halbraum kommt die an der Unterlage reflektierte Reflexstrahlung. Das Verhältnis aus Reflexstrahlung und Globalstrahlung wird als Albedo bezeichnet. Die langwellige Strahlung, die von der Temperatur der emittierenden Oberfläche abhängt, ist die Gegenstrahlung aus dem oberen Halbraum und die Ausstrahlung aus dem unteren Halbraum. Die Summe aller Strahlungskomponenten wird als Strahlungsbilanz bezeichnet.

Kurzwellige Strahlungsflüsse werden mit Pyranometern gemessen. Diese verwenden Messzellen, die sich durch die Einstrahlung erwärmen (im Gegensatz zu einer beschatteten Kontrollfläche). Langwellige Strahlungsflüsse werden mit Pyrgeometern bestimmt, die auf dem gleichen Prinzip beruhen. Allerdings wird hier nur die langwellige Strahlungsdifferenz zwischen dem Halbraum und der langwelligen Strahlung des Messgeräts bestimmt, sodass die Messgerätemperatur zur Korrektur benötigt wird. Pyranometer und Pyrgeometer unterscheiden sich voneinander durch Filter mit unterschiedlicher spektraler Durchlässigkeit (kurzwellig: Glas oder Quarz; langwellig: Silizium). Neuerdings werden für die kurzwellige Strahlung auch geeignete Siliziumelemente eingesetzt.

Strahlungsmessgeräte sind hinsichtlich ihrer Genauigkeit international einheitlich klassifiziert [8]. Insbesondere bei Pyrgeometern sind in den letzten Jahren deutliche Genauigkeitsverbesserungen erzielt worden, sodass diese für beide Strahlungsflüsse bei etwa 1 W/m^2 bis 2 W/m^2 liegt.

Strahlungsgrößen werden als Energieflussdichten in W/m^2 (entspricht $\text{J}/\text{m}^2\text{s}$) angegeben. Angaben in kWh sind im Solarenergiebereich gebräuchlich.

Relevante technische Regel

VDI 3786 Blatt 5:2015-10 Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Strahlung

1.5 Niederschlag

Da der Niederschlag eine sehr heterogene Struktur aufweist, ist die Repräsentativität einer punktuellen Messung prinzipiell eingeschränkt. Hinzu kommt, dass sich jeder Niederschlagsmesser im Windfeld unterschiedlich verhält. Es treten zwei gravierende Fehler auf: der Windfehler und der Verdunstungsfehler, das heißt Wasser verdunstet, bevor es gemessen wird. Beide betragen in der Regel 5 % bis 10 % [9], bei Schneefall können es über 50 % sein. Es gibt Korrekturverfahren, mit denen man standort- und klimazonenabhängig korrigieren kann, doch diese Korrekturen müssen vom Datennutzer durchgeführt werden und sind bei Messdaten nicht angebracht.

Der in Deutschland verbreitete klassische Niederschlagsmesser ist der nach Hellmann [10]. Er hat eine Auffangfläche von 200 cm^2 und wird in 1 m Höhe aufgestellt. Es gibt ihn als Messgerät mit Sammelkanne für Tagesmengen, als Registriergerät, mit Kippwaage oder Tropfenzähler zur Mengemessung und vermehrt mit Wägeprinzip. Vielfach werden auch 500 cm^2 Sammelfläche eingesetzt.

Regenmelder mit einer Leitfähigkeitsmessung bestimmen nur den Zeitpunkt des Niederschlags. Die Kombination aus Regenmelder und Niederschlagsmesser ermöglicht die Messung der nassen Deposition, indem sich der Regenwassersammler nur bei Regen öffnet. Somit können die Konzentrationen von Beimengungen im Niederschlagswasser erfasst werden. Mit Distrometern wird die Tropfengröße bestimmt, die in eine Niederschlagsmessung umgerechnet werden kann. Will man flächendeckend Niederschlag bestimmen, so nutzt man Fernmessverfahren, die dann quantitativ angeeicht werden müssen.

Klassische Wetterradargeräte und Mikro-Regen-Radare geben Aufschluss über die räumliche Verteilung des Niederschlags und empfangen die bei der Messung von flüssigen und festen Niederschlagsteilchen zurückgestreute Strahlung. Aus der Rückstreuung lässt sich auf die Größe und Menge der Niederschlagsteilchen schließen. Bei polarimetrischen Radargeräten kann zwischen verschiedenen Typen des Niederschlags (Regen, Schnee, Hagel, Graupel, usw.) unterschieden werden. Flüssige und feste Niederschlagsteilchen lassen sich beim Mikro-Regen-Radar auch über eine Bestimmung ihrer Fallgeschwindigkeit aus einer Analyse der Dopplerver-

schiebung auseinanderhalten. Auch einfache Rückstreuunglidare wie Ceilometer sind in der Lage, fallenden Niederschlag zu detektieren und die Nullgradgrenze zu erkennen.

Niederschlagsmessungen werden in mm (entspricht ℓ/m^2) über einen festen Zeitraum (Stunde, Tag) angegeben. Bei registrierenden Niederschlagsmessern können Intensitäten in mm/min oder mm/h angegeben werden.

Relevante technische Regeln

VDI 3786 Blatt 7:2010-12 Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Niederschlag

VDI 3786 Blatt 20:2014-09 Umweltmeteorologie; Bodengebundene Fernmessung des Niederschlags; Wetterradar

DIN ISO 19926-1 (in Vorbereitung) Meteorologie; Wetterradar; Systemleistung und Betrieb

1.6 Lufttemperatur

Die Lufttemperatur lässt sich nur schwer fehlerfrei messen. Sobald der Messfühler kurzweiliger Sonnenstrahlung ausgesetzt ist, absorbiert er Energie und heizt sich dabei auf. Deshalb ist in jedem Fall bei Temperaturmessungen ein Strahlenschutz vorzusehen. Diesen erhält man durch Montage des Messfühlers in Wetterhütten (weiß gestrichen mit Doppeljalousien), die aber den Temperaturwert immer noch um etwa 1 K verfälschen können (Hüttenfehler). Genauere Messungen benötigen neben dem Strahlungsschutz auch eine Belüftung mit $> 2,5$ m/s. Als Temperatursensoren werden neben den klassischen Flüssigkeitsthermometern in der Regel Widerstandsthermometer (Pt100) eingesetzt. Wegen der Schwierigkeit der Messungen sind maximale Genauigkeiten von nur 0,1 K möglich, auch wenn elektrisch eine deutlich höhere Auflösung möglich wäre. Während sich das Prinzip der Widerstandsmessung zur Temperaturbestimmung seit Jahrzehnten bewährt hat, sind Fortschritte vor allem bei der Miniaturisierung der Fühler und der elektrischen Signalverarbeitung zu verzeichnen. Dabei wurden Brückenschaltungen vollständig durch Messungen mit konstantem Strom ersetzt.

Neben der Lufttemperatur sind auch das tägliche Maximum und Minimum sowie das nächtliche Minimum in 5 cm Höhe von Interesse. Temperaturmessungen in mehreren Höhen gestatten die Bestimmung der atmosphärischen Stabilität.

Die Lufttemperatur kann bei Fernmessverfahren aktiv über die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit oder

die Auswertung von Raman-Streuung bestimmt werden, passiv mit der Analyse der ankommenden Mikrowellenstrahlung. Die Bestimmung des Vertikalprofils der Temperatur über die Schallgeschwindigkeit erfolgt mit einem radioakustischen Sondierungssystem (RASS). Hierbei wird die Ausbreitung einer Schallwelle mit einer Radarantenne verfolgt. Raman-Streuung ist eine inelastische Streuung an Luftmolekülen, bei der die ausgesandte Strahlung eine Rotation der Moleküle anregt. Wenn diese Moleküle dann in den Grundzustand zurückfallen, wird eine frequenzverschobene Strahlung emittiert, die temperaturabhängig ist. Allerdings ist diese Rückstrahlung relativ schwach, sodass diese Methode am besten nachts funktioniert, wenn die störende Strahlung von der Sonne fehlt. Passive Mikrowellenradiometer empfangen die temperaturabhängige Mikrowellenstrahlung aus der Atmosphäre.

Relevante technische Regeln

VDI 3786 Blatt 3:2012-10 Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Lufttemperatur

VDI 3786 Blatt 18:2010-05 Umweltmeteorologie; Bodengebundene Fernmessung der Temperatur; Radioakustische Sondierungssysteme (RASS)

DIN ISO 17714:2008-06 Meteorologie; Messungen der Lufttemperatur; Prüfverfahren zum Leistungsvergleich von Strahlungsschutzeinrichtungen bei Thermometern und Festlegung der charakteristischen Eigenschaften (ISO 17714:2007)

1.7 Luftfeuchte

Wasserdampf ist nicht nur das wichtigste Treibhausgas, er ist wesentlich an wichtigen Wetterphänomenen wie Wolkenbildung und Niederschlag beteiligt. Die Messung der Wasserdampfkonzentrationen in der Atmosphäre (Luftfeuchte) hat sich als besonders schwierig erwiesen, sodass sich die eingesetzten Messprinzipien mehrfach geändert haben. Bestand hatte lediglich das abmannsche Aspirationspsychrometer [11; 12], das auch nach mehr als 100 Jahren noch zu den genauesten Messgeräten gehört. Dabei werden zwei strahlungsgeschützte Thermometer mit einem Luftstrom von $> 2,5$ m/s belüftet, wobei das Thermometergefäß eines Thermometers mit einem befeuchteten Mullstrumpf versehen ist. Durch die Verdunstung des Wassers des Mullstrumpfs kühlt sich das Thermometer ab. Aus der Temperaturdifferenz beider Thermometer lässt sich die Luftfeuchte exakt bestimmen [13].

Gegenwärtig werden zur Bestimmung der Luftfeuchte kapazitative Messfühler aus keramischen Materialien

oder Dünnschichtpolymeren verwendet. Diese liefern ein weitgehend lineares Messsignal. In den letzten 10 bis 20 Jahren erreichten alle Hersteller eine hohe Zuverlässigkeit der Messwerte. Bei niedrigen Temperaturen werden die Fühler kurzzeitig beheizt, um Reifablagerung zu vermeiden (insbesondere bei Radiosonden eingesetzt).

Das klassische Haarhygrometer wird kaum noch verwendet. Weiterhin im Einsatz sind mechanische registrierende Geräte und Innenraummessungen.

Für die Luftfeuchte stehen ebenfalls zwei gut entfernungsauflösende aktive Verfahren (DIAL oder DAS-Lidar und Raman-Lidar) sowie das Mikrowellenradiometer zur Verfügung. Beim DIAL wird Strahlung bei zwei nahe beieinanderliegenden Wellenlängen ausgesandt, wobei die eine Wellenlänge genau einer Absorptionslinie von Wasserdampf entspricht und die andere dicht daneben liegt. Von der Strahlung, die vom Wasserdampf absorbiert wird, wird weniger zurückgestreut als von der Strahlung bei der benachbarten Wellenlänge. Aus der Differenz kann das Vertikalprofil des Wasserdampfs in der Atmosphäre abgeleitet werden. Die Feuchtebestimmung mit den anderen beiden Verfahren verläuft ähnlich wie die Temperaturbestimmung, wobei bei der Raman-Streuung die Moleküle zuvor zu einer Vibration statt einer Rotation angeregt worden waren.

Die Luftfeuchte wird als relative Feuchte in Prozent (der Sättigung der Luft) angegeben. Da Luft mit zunehmender Temperatur mit einer exponentiellen Abhängigkeit mehr Wasserdampf aufnehmen kann (Clausius-Clapeyron-Gesetz), sagt die relative Luftfeuchte nichts über den Wassergehalt der Luft aus. Zur Bestimmung verwendet man den Wasserdampfpartialdruck (in hPa) oder die absolute Feuchte (kg/m^3) sowie das Mischungsverhältnis. Die Genauigkeit ist stark von der Temperatur und der Luftfeuchte selbst abhängig.

Relevante technische Regeln

VDI 3786 Blatt 4:2013-06 Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Luftfeuchte

VDI 4210 Blatt 1:1999-06 Fernmessverfahren; Messungen in der Atmosphäre nach dem LIDAR-Prinzip; Messen gasförmiger Luftverunreinigungen mit dem DAS-LIDAR

1.8 Luftdruck

Der Luftdruck wird als notwendige Information bei luftchemischen Messungen zur Bestimmung der temperatur- und druckabhängigen Luftdichte benötigt.

Klassische Quecksilberbarometer sind nicht mehr im Einsatz und weitgehend durch piezoelektrische Geber verdrängt. Daneben gibt es weiterhin Anaeroidbarometer. Der Luftdruck wird mit einer Genauigkeit von etwa 0,1 hPa in Hektopascal gemessen.

Relevante technische Regel

VDI 3786 Blatt 16:2010-07 Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Luftdruck

1.9 Meteorologische Sichtweite

Die Sichtweite ist ein lokales Maß für die Lufttrübung der Atmosphäre und ist zur Trübung umgekehrt proportional. Die meteorologische Sichtweite dient dazu, feuchten Dunst (Nebel) und trockenen Dunst (Staub u. Ä.) bewerten zu können. Daneben ist sie für den gesamten Verkehrssektor ausgesprochen relevant. Als Messverfahren kommen neben der klassischen visuellen Beobachtung auch Messungen der Lichtstreuung infrage. Zum Einsatz kommen heute Transmissometer (Messung über längere Messtrecke, etwa 100 m), Sichtweitenlidare oder Streulichtmessungen am Messort. Der Messbereich liegt zwischen 10 m und 10 km bzw. 70 km.

Relevante technische Regeln

VDI 3786 Blatt 6:2017-05 (Entwurf) Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Trübung der bodennahen Atmosphäre; Meteorologische Sichtweite

DIN ISO 28902-1:2012-06 Luftqualität; Umweltmeteorologie; Teil 1: Bodengebundene Fernmessung der Sichtweite mit Lidar

1.10 Mischungsschichthöhe, Inversionen

Die Bestimmung der Lage von Temperaturinversionen und die Dicke der bodennahen, gut durchmischten Luftschicht sind für Studien zur Luftqualität sehr wichtig, da sie das Volumen für die Verdünnung emittierter Schadstoffe vorgeben. Temperaturinversionen streuen akustische Strahlung recht gut, sodass sie mit einem Sodar erfasst werden können, solange sie im Messbereich dieser Geräte (einige hundert Meter über Grund) liegen. Aus den mit einem RASS gemessenen vertikalen Temperaturprofilen können Inversionen direkt erkannt werden.

Die bodennahe, gut durchmischte Luftschicht enthält typischerweise viel mehr Aerosolteilchen als die dar-

überliegende freie Atmosphäre. Daher kann die Dicke dieser Schicht aus einer mit einem Lidar gemessenen erhöhten optischen Rückstreuung an den Aerosolteilchen abgeleitet werden. Da diese gut durchmischte Schicht auch turbulenter ist als die darüberliegende freie Atmosphäre, kann sie auch aus der mit einem Sodar gemessenen erhöhten akustischen Rückstreuung intensität detektiert werden.

Relevante technische Regeln

VDI 3786 Blatt 11:2015-07 Umweltmeteorologie; Bodengebundene Fernmessung des Windvektors und der Vertikalstruktur der Grenzschicht; Dopplersodar

VDI 3786 Blatt 18: 2010-05 Umweltmeteorologie; Bodengebundene Fernmessung der Temperatur; Radioakustische Sondierungssysteme (RASS)

VDI 3786 Blatt 19:2016-10 (Entwurf) Umweltmeteorologie; Bodengebundene Fernmessung meteorologischer Parameter; Partikelrückstreulidar

1.11 Wolkenuntergrenze

Einfache Rückstreulidare ohne Bestimmung der Dopplergeschwindigkeit nennt man auch Ceilometer, da sie ursprünglich für den Zweck der Bestimmung der Höhe der Wolkenuntergrenze (engl.: ceiling) konstruiert wurden und auch heute noch dafür eingesetzt werden. Die Wolkenuntergrenze liefert ein leicht detektierbares Rückstreusignal, das neben der Laufzeitbestimmung keiner weiteren Bearbeitung bedarf. Die Bestimmung der Wolkendicke und -obergrenze ist nur bei nicht optisch dichten (nicht opaken) Wolken möglich.

Relevante technische Regel

VDI 3786 Blatt 19:2016-10 (Entwurf) Umweltmeteorologie; Bodengebundene Fernmessung meteorologischer Parameter; Partikelrückstreulidar

1.12 Aerosole

Aerosolteilchen streuen sichtbares Licht und die Strahlung benachbarter Wellenlängenbereiche. Zur

Detektion von diesen Teilchen eignen sich somit alle optischen Fernmessverfahren wie Ceilometer und andere Rückstreulidare (auch Windlidare und Raman-Lidare bieten neben ihrem eigentlichen Zweck hierfür verwertbare Signale). Die Stärke der rückgestreuten Strahlung hängt von mehreren Aerosolteilchenparametern wie Anzahl, Form und Oberflächeneigenschaften ab.

Die Form der Teilchen lässt sich näherungsweise ermitteln, indem man mit zwei senkrecht zueinander polarisierten Lichtstrahlen misst und das Depolarisationsverhältnis der rückgestreuten Strahlung ausgewertet.

Relevante technische Regeln

VDI 3786 Blatt 19:2016-10 (Entwurf) Umweltmeteorologie; Bodengebundene Fernmessung meteorologischer Parameter; Partikelrückstreulidar

DIN ISO 28902-2:2015-03 (Entwurf) Luftqualität; Umweltmeteorologie; Teil 2: Bodengebundene Fernmessung des Windes mittels gepulstem, mit Überlagerungsempfang arbeitendem Doppler-Lidar (ISO/DIS 28902-2:2015)

1.13 Spurengase

Die entfernungsabhängige Messung von Spurengaskonzentrationen kann ähnlich wie bei der Luftfeuchte mit einem DIAL erfolgen. Dabei werden zwei dicht benachbarte Wellenlängen so gewählt, dass die eine Wellenlänge genau auf einer Absorptionslinie des zu messenden Gases liegt und die andere daneben. DIAL-Geräte werden häufig zur Bestimmung von Vertikalprofilen von Spurengasen eingesetzt. Profilmessungen bis in die untere Stratosphäre sind möglich.

Längengemittelte Spurengasmessungen sind für im optischen Bereich aktive Gase mit einem DOAS (differenzielles optisches Absorptionsspektrometer) bzw. für im Infrarotbereich aktive Gase (das sind unter anderem alle Treibhausgase) mit der FTIR (Fast-Fourier-Infra-Red)-Absorptionsspektrometrie ermittelbar. Da DOAS und FTIR bistatische Verfahren sind (beim DOAS wird ein Spiegel benötigt, bei der FTIR-Methode muss eine definierte Wärmequelle gegeben sein), werden diese beiden Verfahren in der Regel zur horizontalen Messung in Bodennähe eingesetzt.

Relevante technische Regeln

VDI 4210 Blatt 1:1999-06 Fernmessverfahren; Messungen in der Atmosphäre nach dem LIDAR-Prinzip; Messen gasförmiger Luftverunreinigungen mit dem DAS-LIDAR

VDI 4211:2016-09 (Entwurf) Fernmessverfahren; Messungen in der Atmosphäre nach dem Passiv-FTIR-Prinzip; Messen gasförmiger Emissionen und Immissionen

DIN EN 16253:2013-09 Luftqualität; Messungen in der bodennahen Atmosphäre mit der aktiven Differentiellen Optischen Absorptionsspektroskopie (DOAS); Immissionsmessungen und Messungen von diffusen Emissionen; Deutsche Fassung EN 16253:2013

1.14 Messgeräteträger und Plattformen

Trotz erheblicher Fortschritte bei den indirekten Messverfahren sind Messungen mit Radiosonden weiterhin unverzichtbar. Sie liefern vor allem in der mittleren und oberen Troposphäre (3 km bis 12 km) zuverlässige Daten, die bei der Wettervorhersage, aber auch zur Vorhersage und Analyse von Luftschadstoffepisoden sowie als Eingangsdaten für Ausbreitungsmodellierungen unverzichtbar sind und durch andere Systeme nicht bereitgestellt werden können. Der größere zeitliche Abstand der Messungen

von 6 bis 12 Stunden ist in diesen Höhen unerheblich. Fortschritte bei der Feuchtemessung im Niveau der Zirruswolken sind gerade für Vorhersagen für die Solarenergienutzung von erheblicher Bedeutung.

Fernmessverfahren können von vielen unterschiedlichen Plattformen aus eingesetzt werden, insbesondere dann, wenn über GPS und Neigungssensoren der genaue Ort und die genaue Lage des Messgeräts zu jeder Zeit bekannt sind. Hierzu zählen im maritimen Bereich Schiffe und Bojen.

An Land ist die wesentliche Randbedingung, dass die Strahlausbreitung nicht durch Hindernisse jedweder Art eingeschränkt ist. Genauso ist der Einsatz der Messgeräte von Flugobjekten und von Satelliten aus möglich. Aktive Fernmessung vom Satelliten ist lediglich durch die zur Verfügung stehende Energieversorgung auf dem Satelliten limitiert.

Bereits etabliert ist die Nutzung von Messdaten aus Flugzeugen, die insbesondere beim Steig- und Sinkflug von großem Interesse sind.

Relevante technische Regeln

VDI 3786 Blatt 8:2017-02 Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Aerologische Messungen

VDI 3786 Blatt 13:2006-08 Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Messstation

2 Handlungsfelder

2.1 Automatisierung

Basis aller meteorologischen messtechnischen Untersuchungen im Bereich der Luftreinhaltung ist die Kombination aus visuellen Beobachtungen, Vorinformationen, Einschätzungen, Entwicklung einer Messstrategie und Auswahl für die Fragestellung repräsentativer Messorte/Messstrecken.

Abseits der typischen synoptischen Aufgabenstellung von Wetterdiensten werden in den entsprechenden Richtlinienreihen verstärkt Messmethoden in bebauten städtischen und/oder industriellen Strukturen bis hin zu mikroskaligen Straßenschluchtuntersuchungen beschrieben. Dies gilt auch für die Beschreibung des Windfelds und anderer Parameter wie Temperatur, Feuchte und Niederschlag in orografischen Strukturen. In Anlehnung an die Methoden zur Fernmessung von meteorologischen Parametern können auch z. B. Aerosolverteilungen erfasst und beschrieben werden.

Rationalisierungsmaßnahmen von Messnetzbetreibern sorgen weltweit für eine zunehmende Automatisierung atmosphärischer Messungen. Dieser Trend wird durch die rasante Entwicklung in der Elektronik sowie der Computertechnik und der damit einhergehenden Leistungssteigerung bei gleichzeitiger Miniaturisierung verstärkt. Durch die Automatisierung können große Einsparungen bei Personalkosten realisiert werden, da die Messgeräte ganz oder teilweise ohne Mitwirkung des Menschen bestimmungsgemäß arbeiten. Es bedarf in vielen Fällen lediglich einer Plausibilitätskontrolle der Daten sowie einer Funktionskontrolle aus der Ferne. Die Automatisierung bedarf daher veränderter Anforderungen an die Messtechnik und die Datenübertragung.

Die weitgehende Einstellung visueller Beobachtungen durch die Wetterdienste und ihre Ersetzung durch automatisierte registrierende Messtechniken stellt neue Aufgaben bei Fragen der Reinhaltung der Luft dar. Einerseits sollten visuelle Beobachtungen als einfachste Informationsquelle bei luftchemischen Messungen durchgeführt werden, andererseits müssen die nötigen Informationen, wie Stabilität der atmosphärischen Schichtung, Turbulenzzustand oder Ausbreitungsklasse, aus soweit verfügbaren kontinuierlichen Messungen im akuten Freisetzungsfall ermittelt werden. Alle Verfahren sind für den praktischen Einsatz geeignet und werden intensiv angewendet, können aber auch weiter verbessert werden. Wo eine Ersetzung der Messtechnik nicht ohne Weiteres möglich ist (wie bei Wolkenbeobachtungen) werden alternative Messverfahren eingesetzt (z. B. Wolkenkameratele oder Satellitenbilddauswertung).

2.2 „Smart Sensors“ und „Citizen Science“

Seit etwa zehn Jahren sind zunehmend kompakte Messsysteme auf dem Markt, bei denen auf kleinstem Raum Vorrichtungen für Wind-, Temperatur-, Feuchte-, Niederschlags- und Strahlungsmessungen inklusive Messsignalaufbereitung installiert sind und modular zusammengestellt werden können. Damit werden zwar notwendige Kriterien für Klima- und wetterdienstliche Messungen bezüglich der gegenseitigen Beeinflussung der Messungen und unterschiedlicher Messhöhen verletzt. Wenn man aber Genauigkeitseinbußen akzeptiert, haben diese kompakten Systeme durchaus Vorteile. Sie können sehr flexibel für kurzzeitige Messprogramme oder spezielle Anwendungszwecke (wie Verkehrswegeüberwachung) eingesetzt werden.

In den letzten Jahren rückt vermehrt die Fragestellung in den Fokus, ob Messnetze nicht auch durch Bürger betrieben werden können. Zwischenzeitlich existiert eine Vielzahl von Infrastrukturen, die sich prinzipiell auch für die Datenerfassung oder Datenweiterleitung eignen würden [14]. Neben den oben schon erwähnten Mobilfunknetzen können dies im öffentlichen Bereich beispielsweise auch Werbetafeln, Infoschilder an Bus- und Straßenbahnhaltstellen oder gar Toilettenhäuschen in Städten sein. Solche Infrastrukturelemente werden alle elektrisch betrieben und sind an das Internet angeschlossen. Wenn man geeignete miniaturisierte Sensoren entwickelt, die wenig kosten, und diese in größerer Zahl betreibt, so könnte man mit hoher räumlicher und zeitlicher Dichte meteorologische und lufthygienische Informationen sammeln. Auch technikaffine Bürger nehmen zurzeit immer stärker an „Citizen Science“-Netzwerken teil und geben ihre Messdaten der Allgemeinheit frei. Die einzelne Messung wird dabei von einer geringeren Qualität sein als die von den standardisierten Messgeräten in Messnetzen der Wetterdienste, Umweltbehörden und anderer Ämter. Mit geeigneten Datenverarbeitungsmethoden (Stichwort: „Big Data“) wird man diese Daten aufbereiten müssen. Dabei wird die Dichte der Messungen (hohe räumliche Auflösung) die geringere Qualität vermutlich weitgehend wieder wettmachen [15]. Erste Anwendungen dieser Art auf kommerzieller Basis existieren bereits, aber es fehlen noch umfangreiche Forschungen, die die Belastbarkeit solcher „Citizen Science“-Messnetze geprüft und bewertet haben. Solche Vorhaben befinden sich derzeit in der Planung, siehe beispielsweise das vom BMVI finanzierte Projekt „Smart Air Quality Network“ [29].

2.3 Niederschlagsverteilung aus Mobilfunknetzdaten ableiten

Mobilfunk basiert auf Mikrowellenstrahlung, die zwischen den Endgeräten und Umsetzern (häufig an Türmen und auf Hochhausdächern) sowie zwischen den Umsetzern vermittelt wird. Die Ausbreitung von Mikrowellen wird durch die Luftfeuchte und vor allem durch Niederschlag behindert [16]. Um die Qualität und Funktionsfähigkeit eines Mobilfunknetzes zu garantieren, regeln die Netzbetreiber die Intensität der Strahlung zwischen den Umsetzern so, dass immer eine konstante Datenqualität zur Verfügung steht. Die abgestrahlte Intensität an den Umsetzern ist somit zur Niederschlagsintensität proportional.

Seit etwa zehn Jahren wird von Forschergruppen in den Niederlanden, Israel, Deutschland und weiteren Ländern untersucht, inwieweit sich aus den Intensitätsdaten der an den Umsetzern abgestrahlten Mikrowellenstrahlung das räumliche Niederschlagsgeschehen ableiten lässt [17; 18]. Es konnte gezeigt werden, dass in dicht besiedelten Gebieten mit einem dichten Netz von Umsetzern eine zeitliche und räumliche Niederschlagsverteilung abgeleitet werden kann, die mit der eines Niederschlagsradarnetzes vergleichbar ist. Vorteil ist, dass die Daten aus dem Mobilfunknetz für den Niederschlag in Bodennähe repräsentativ sind, während Radardaten in größerer Entfernung der Radargeräte aus größeren Höhen stammen können und daher eventuelle Verdunstung während des Fallens zum Boden nicht berücksichtigt werden kann. Auch in geografisch komplexem Gelände kann die Mobilfunkmethode Vorteile haben, da Mobilfunknetze sich auch in Täler hinein erstrecken, die für die Radarüberwachung durch die davor liegenden Höhenzüge abgeschattet sind.

Damit ergibt sich perspektivisch die Möglichkeit, in Ländern, in denen kein Radarmessnetz besteht, aber ein relativ dichtes Mobilfunknetz vorhanden ist, eine Überwachung des Niederschlagsgeschehens aufzubauen. Es braucht hierzu aber vertragliche Abmachungen mit den Mobilfunknetzbetreibern. Datenschutzrechtliche Bedenken bestehen nicht, da nur die Intensität der Mikrowellenstrahlung benötigt wird, nicht aber Informationen über die übermittelten Daten.

2.4 Standortsuche für Windparks

Die Standortsuche für Windgeneratoren bzw. Windparks verlangt Kenntnisse über das Windklima in Rotorhöhe. Hierzu stellte man bisher hauptsächlich bis etwa 100 m hohe Messmasten auf, die in mehreren Höhen mit Schalenkreuzanemometern instrumentiert wurden. Nach einem Messzeitraum, der von einigen

Monaten bis zu einem Jahr andauern kann, wurde durch Korrelationsbetrachtungen mit nahegelegenen Windmessstationen eine Klimareihe für den Standort erstellt. Diese ist dann Grundlage für die Auslegung der Anlage und auch für deren Ertragschancen sowie Finanzierung.

Moderne Windkraftanlagen haben Nabenhöhen von bis zu 150 m und Rotordurchmesser von bis zu 140 m. Damit muss bei der Standortbeurteilung das Windklima bis in 220 m Höhe bekannt sein [19]. Die oben genannten Messmasten eignen sich hier nicht mehr zur Datenerfassung, da der Auf- und Abbau der Masten zu aufwendig und damit zu teuer ist. Daher werden heute überwiegend bodengestützte Fernmessverfahren zur Windprofilmessung an den vorgesehenen Standorten eingesetzt. Wurden anfangs hierfür überwiegend Sodargeräte eingesetzt, verwendet man heute überwiegend Windlidare, da letztere eine höhere Datenverfügbarkeit haben und keine Belästigung der Messstellenumgebung durch Lärm verursachen. Mittlerweile lassen auch die meisten Richtlinien für Windkraftanlagen den Einsatz von Fernmessverfahren zu, auch wenn sie nicht wie die Schalenkreuzanemometer im Windkanal geeicht werden können [20].

2.5 Messung der Turbulenz

In ökologischen Netzwerken werden bereits seit etwa 20 Jahren Wasserdampf-, Kohlendioxid- und zunehmend auch Methanflüsse nach der Eddy-Kovarianz-Methode [7] bestimmt [21]. Dies sind die drei wichtigsten Treibhausgase. Der Ersatz zweidimensionaler Windmessgeräte durch dreidimensionale auf Ultraschallbasis könnte gerade auf dem Gebiet der Luftreinhaltung deutliche Fortschritte bringen, da sich Ausbreitungsklassen weitgehend direkt bestimmen lassen. Dieses Handlungsfeld ist im aktuellen Richtlinienwerk bereits inhaltlich abgedeckt und müsste lediglich durch den Deutschen Wetterdienst oder andere Messnetzbetreiber implementiert werden.

Die über eine Messstrecke von einigen hundert Metern gemittelte Turbulenz in Bodennähe kann mit einem Scintillometer gemessen werden. Hierzu wird ein Licht- oder Mikrowellenstrahl von einem Sender zu einem Empfänger gesendet. Kleinste Brechungsindexunterschiede aufgrund mit der Turbulenz fluktuierender Temperatur und Luftfeuchte führen zu Intensitätsschwankungen beim empfangenen Lichtstrahl. Die Stärke dieser Schwankungen ist proportional zu turbulenten Flüssen. Die Richtung der turbulenten Flüsse von Temperatur und Feuchte (hin oder weg vom Boden) kann nur mit Annahmen bestimmt werden.

2.6 Schlussfolgerungen

Die rasche Entwicklung neuer Gerätetechniken, insbesondere bei den indirekten Messtechniken und den nicht klassischen Verfahren, erfordert eine ständige Anpassung der Richtlinien bzw. die Neuerstellung von Richtlinien. Es ist dabei eine besondere Herausforderung, aktuelle Entwicklungen rechtzeitig zu erkennen, damit Richtlinien verfügbar sind, bevor die neuen Verfahren in großem Umfang eingesetzt werden. In Abschnitt 1 werden bereits einige nicht standardisierte Messverfahren bzw. Messparameter adressiert, deren Standardisierung einen Mehrwert liefern könnte. Diese sind das Mikrowellenradiometer, das Raman-Lidar und das Turbulenzmessverfahren zur Verdunstungsbestimmung (Wasserdampftransport in die Atmosphäre). Die Verdunstung konnte bislang nur aus Rechenverfahren ermittelt werden. Moderne Turbulenzmessverfahren ermöglichen nun auch mit entsprechender kommerzieller Messtechnik eine direkte Messung, sodass in einer neuen Richtlinie Mess- und Berechnungsverfahren gemeinsam erarbeitet werden können.

Eine rasante Entwicklung hat sich bei unbemannten Flugkörpern (UAV) ergeben. Diese stellen auch eine interessante Messplattform insbesondere bei lokalklimatischen Untersuchungen oder gegebenenfalls in Störfällen dar. UAV sind leichter handhabbar als bisher eingesetzte Fesselballone. Die Nutzlastbeschränkung wird durch die Miniaturisierung der Sensorsysteme teilweise ausgeglichen. Eine neue Richtlinie soll speziell die besonderen Anforderungen an die Messwertgeber und den zweckdienlichen Messablauf festlegen, damit diese Verfahren auch ihre entsprechende Anerkennung erfahren.

Atmosphärische Messtechniken sind trotz ihrer langen Tradition weiterhin Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. Dies betrifft weniger klassische In-

situ-Technik als vielmehr indirekte Messverfahren und spezielle Korrektur- und Auswerteverfahren. Oft sind diese bereits Bestandteil der Messgerätesoftware und müssen als solche in den Richtlinien zu den Messgeräten bewertet werden.

Datenverarbeitung und moderne Kommunikationstechniken eröffnen neue Möglichkeiten, meteorologische Informationen bereitzustellen. Viele Daten sind im Internet und auf Apps bereits in Realtime verfügbar. Die Entwicklung muss dahin gehen, dass von einer Vielzahl von räumlich verteilten Stationen auch für Ausbreitungssituationen relevante Informationen in geeigneter Weise dargestellt werden können.

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über mögliche zukünftige Inhalte von VDI-Richtlinien und DIN-Normen zu meteorologischen Messungen.

Tabelle 1. Aus den Handlungsfeldern abgeleitete mögliche zukünftige Inhalte von VDI-Richtlinien und DIN-Normen zu meteorologischen Messungen

Technische Regel	Titel
VDI 3786 Blatt 2X	Umweltmeteorologie - Bodengebundene Fernmessung meteorologischer Größen - Mikrowellenradiometer
VDI 3786 Blatt 2Y	Umweltmeteorologie - Meteorologische Messungen - Verdunstungsbestimmung
VDI 3786 Blatt 2Z	Umweltmeteorologie - Meteorologische Messungen - Unbemannte Flugobjekte (UAV)

3 Regelsetzungsstrategie

3.1 VDI als Regelsetzer

Der VDI als Europas größter technisch-wissenschaftlicher Verein ist einer der großen Regelsetzer in Deutschland. Mit mehr als 2.000 gültigen VDI-Richtlinien erhebt er den Anspruch, allgemein anerkannte technische Regeln mit Beurteilungs- und Bewertungskriterien und methodischen Grundlagen für nahezu alle Branchen zu schaffen und gibt auch über Ländergrenzen hinweg konkrete Handlungsempfehlungen. Das Themenspektrum reicht von Architektur und Abfallwirtschaft über Bautechnik, Bionik und Werkstoffsubstitution bis hin zu Zuverlässigkeit.

In VDI-Richtlinien wird der Stand der Technik laufender und zukünftiger Entwicklungen und der Stand der Wissenschaft beschrieben, in der Regel zweisprachig (deutsch und englisch). Das große VDI-Expertenetzwerk aus Wissenschaft, Industrie und öffentlicher Verwaltung erarbeitet ehrenamtlich und interdisziplinär VDI-Richtlinien. Dabei folgen die einzelnen Ausschüsse dem international gängigen Normungsprozess. Somit ist auch die Grundlage für die Eingabe eines deutschen Standpunkts für die internationale Normung gegeben.

Normen und Richtlinien sind die Sprache der Technik und dienen der Vereinheitlichung von Anforderungen an materielle und immaterielle Güter. Damit schaffen sie Vergleichbarkeit und erleichtern die Marktdurchdringung, da ein Waren- und Dienstleistungsverkehr im globalen Handelsnetzwerk nur mit gemeinsamen Standards funktioniert.

3.2 VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft

Die VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) ist als Gemeinschaftsgremium von VDI und DIN für die Erstellung von technischen Regeln wie VDI-Richtlinien, DIN-Normen, DIN-EN-Normen und DIN-ISO-Normen zum Thema „Luftreinhaltung“ zuständig. In der KRdL werden alle technischen und naturwissenschaftlichen Bereiche der Luftreinhaltung einschließlich angrenzender Gebiete in den vier Fachbereichen Umweltschutztechnik, Umweltmeteorologie, Umweltqualität sowie Umweltmesstechnik bearbeitet.

Das Wissenskompendium der KRdL umfasst heute etwa 450 VDI-Richtlinien und 150 DIN-Normen, die Antworten auf nahezu alle Fragen der Luftreinhaltung geben. Rund 1.300 ehrenamtliche Mitarbeiter stehen in einem engen, intensiven Kontakt. Wichtige Reprä-

sentanten aus Wirtschaft, Wissenschaft und Verwaltung sind in der KRdL vertreten und sichern in interdisziplinärer Arbeitsweise den systematischen Erkenntnisgewinn zum Thema „Luftreinhaltung“.

Die KRdL unterstützt das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit bei der Durchführung der Aufgaben auf dem Gebiet der Luftreinhaltung im Sinne von § 1 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. Im staatsentlastenden Auftrag stellt die KRdL den Stand von Wissenschaft und Technik in freiwilliger Selbstverantwortung und gemeinsam mit allen Beteiligten (Behörden, Wissenschaft und Industrie) fest und setzt ihn in Richtlinien und technische Normen um. Diese fließen in die Gesetzgebung und die Tätigkeit der Exekutive ein und werden als Normenentwürfe in die europäische und die internationale Normungsarbeit eingebracht.

3.3 VDI-Ausschüsse zu meteorologischen Messungen und nationale Regelsetzung

Auch wenn grundsätzliche Festlegungen für meteorologische Messungen im WMO-Guide No. 8 für alle Staaten der Erde gelten müssen und damit sehr allgemein gehalten sind, erübrigte sich dadurch eine weitergehende nationale Standardisierungsarbeit nicht. So können z. B. nationale Besonderheiten und spezifische Anforderungen für Fragen der Reinhaltung der Luft besser und mit erhöhten Genauigkeitsforderungen umgesetzt werden.

National ist die technische Regelsetzung zu meteorologischen Messungen im Fachbereich Umweltmeteorologie der VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft angesiedelt. Der Deutsche Wetterdienst ist an der hiesigen Regelsetzung personell beteiligt.

Die Planungen zur Erarbeitung von VDI-Richtlinien zu meteorologischen Messungen wurden im Jahr 1975 gestartet, um sowohl den Anforderungen der meteorologischen Messungen der Luftmessnetze der Bundesländer und anderer Institutionen als auch den Richtlinien zur Ausbreitungsrechnung Messungen zur Seite zu stellen [22]. Bereits 1976 bestand das Arbeitsprogramm aus acht Blättern und es wurde festgelegt, dass eine Richtlinienreihe notwendig ist, die mit einem Blatt 1 zu den Grundlagen meteorologischer Messungen eine notwendige Übersicht erhält. Die so in den 1970er- und 1980er-Jahren entstandenen Richtlinien waren teilweise auf sehr spezielle Messwertgeber ausgerichtet und waren noch geprägt von einer analogen Datenerfassung und Auswertung.

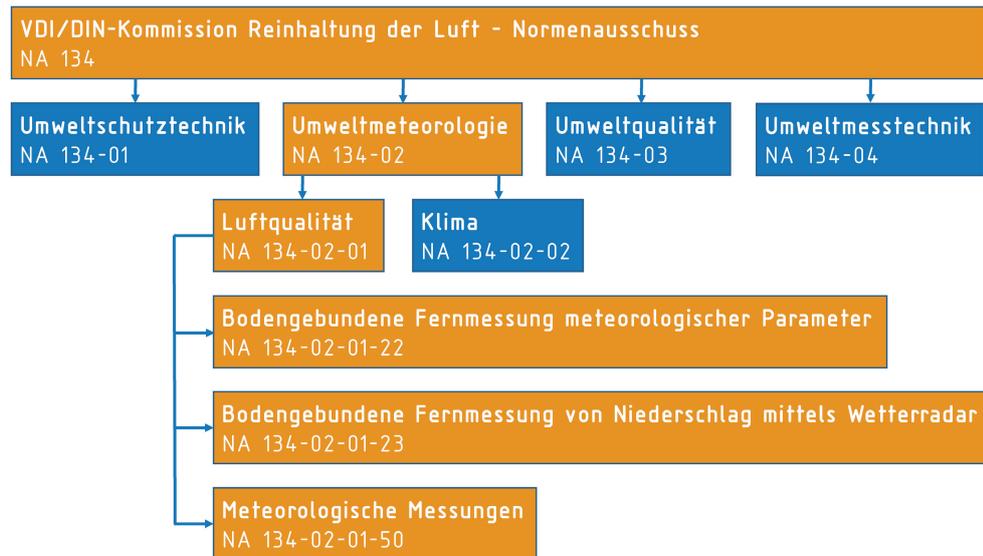


Bild 1. Gremienstruktur der technischen Regelsetzung zu meteorologischen Messungen in Deutschland

Da meteorologische Fernmessverfahren in den 1980er-Jahren zunehmend auch im Rahmen der Vorsorgeplanung und Überwachung der Luftqualität eingesetzt wurden, entstand hierdurch ein Bedarf nach VDI-Richtlinien in diesem Themenfeld [23]. Als erste VDI-Richtlinie zu meteorologischen Fernmessverfahren erschien die Richtlinie VDI 3786 Blatt 11 „Doppelsodar“. Aus dem kombinierten Einsatz dieser Methode zunächst für Fragen der Ausbreitung von radioaktiven Stoffen im Rahmen des Kernreaktorfernüberwachungssystems Niedersachsen ergaben sich parallel Einsätze zu Fragen des Ferntransports von Luftschadstoffen (Wintersmog) und der verbesserten Beschreibung des Windfelds bei der Hügelumströmung. Der anschließende Einsatz von Ultraschallanemometern war ein weiterer bis heute wichtiger Schritt zur besseren Beschreibung des Turbulenzzustands der bodennahen Atmosphäre. Nach erfolgreicher Richtlinienarbeit zum Thema „Sodar“ wurde ab 1997 auch das Thema „Lidar“ [24 bis 26] und schließlich ab 2009 auch das Thema „Wetterradar“ [27] gestartet.

Eine grundsätzliche Überarbeitung aller bis dahin erstellten Richtlinien begann Anfang der 2000er-Jahre. Die überarbeiteten Richtlinien trugen der raschen Entwicklung der digitalen Datenverarbeitung und der Sensortechnik Rechnung und konzentrierten sich nicht mehr auf Einzelgeräte, sondern auf einzuhaltende Messparameter, unabhängig vom jeweiligen Gerät. Technisch überholte Messverfahren, wie die Lithiumchlorid-Feuchtemessung, verschwanden völlig aus den Richtlinien und wurden durch modernere und weniger aufwendige Verfahren ersetzt. Insbesondere der Bereich der Qualitätssicherung und -kontrolle wurde umfassend weiterentwickelt.

Bei Interesse an einer Mitarbeit zum Thema „meteorologische Messungen“ melden Sie sich bitte direkt bei der Geschäftsstelle der VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (vdi.de/krdl).

3.4 Internationale Regelsetzung

Der Bedeutung des atmosphärischen Geschehens für praktisch alle Lebensbereiche entsprechend gibt es heute in fast allen Staaten der Welt meteorologische Dienste. Das diesen Staaten gemeinsame Interesse am Wettergeschehen führte im Jahr 1950 zur Gründung der Weltorganisation für Meteorologie (World Meteorological Organization – WMO), die über nationale Grenzen hinweg meteorologische Belange koordiniert. Die WMO gründete eine Kommission für Instrumente und Beobachtungsmethoden (Commission for Instruments and Methods of Observation – CIMO), deren Aufgabe es ist, die internationale Harmonisierung und Kompatibilität meteorologischer Messungen zu fördern. Hierzu wurde der WMO-Guide No. 8 [28] veröffentlicht, der regelmäßig überarbeitet wird.

Auch die Internationale Organisation für Normung (International Organization for Standardization, ISO) standardisiert meteorologische Messverfahren. Im Oktober 1993 beschloss das ISO/TC 146 „Air quality“ die Gründung des Unterkomitees ISO/TC 146/SC 5 „Meteorology“, das sich im Dezember 1994 konstituierte und sich seither mit der Standardisierung von meteorologischen Messungen befasst. Bei der Bearbeitung der ISO-Normen ab 1994 hatte der VDI mit den bereits existierenden Blättern der Richtlinienreihe VDI 3786 eine anerkannte Position beim Entwurf der Normen.

Seit Anfang 2014 hält die VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft das Sekretariat zur Standardisierung meteorologischer Messungen bei der Internationalen Organisation für Normung (ISO). Die KRdL engagiert sich seit der Übernahme des Sekretariats gemeinsam mit dem neuen Vorsitz aus den USA um eine thematische Neuausrichtung. Der Erfolg der Schwerpunktsetzung auf meteorologische Fernmessverfahren zeigt sich nicht nur in der steigenden Anzahl der Mitgliedsstaaten (im Jahr 2017 beteiligen sich 18 Nationen an der Standardisierungsarbeit), sondern auch im Wunsch der WMO nach einer enge-

ren Zusammenarbeit. Sämtliche aktuellen Normvorhaben werden ausnahmslos als gemeinsame Projekte von ISO und WMO bearbeitet und veröffentlicht. Der Fachbereich II Umweltmeteorologie der KRdL beabsichtigt, durch diesen direkten Zugang zur internationalen Normung Themen mit weltweiter Bedeutung auch verstärkt international umzusetzen. Zahlreiche Experten aus Deutschland unterstützen die fachliche Arbeit in den Arbeitsgruppen zu den verschiedenen Bereichen. Das nationale Spiegelgremium des ISO/TC 146/SC 5 ist der Fachbeirat des Fachbereichs II Umweltmeteorologie.

4 Inhalte der technischen Regelsetzung

Eine Übersicht aller bisher veröffentlichten bzw. in Vorbereitung befindlichen technischen Regeln zum Thema „meteorologische Messungen“ mit Stand Juli 2017 ist nachfolgend dargestellt. Alle technischen Regeln sind im VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der

Luft Band 1b „Umweltmeteorologie“ (siehe Tabelle 2) bzw. Band 5 „Umweltmesstechnik“ (Tabelle 3) veröffentlicht und werden alle fünf Jahre auf Aktualität geprüft und ggf. aktualisiert.

Tabelle 2. Aktuelle Inhalte von VDI-Richtlinien und DIN-Normen zu meteorologischen Messungen im VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft 1b „Umweltmeteorologie“

Technische Regel	Titel	Veröffentlichungsdatum
VDI 3786 Blatt 1	Umweltmeteorologie - Meteorologische Messungen - Grundlagen	2013-08
VDI 3786 Blatt 1.1	Umweltmeteorologie - Meteorologische Messungen - Grundlagen - Fernmessverfahren	In Vorbereitung
VDI 3786 Blatt 2	Umweltmeteorologie - Meteorologische Messungen - Wind	2016-11 (Entwurf)
VDI 3786 Blatt 3	Umweltmeteorologie - Meteorologische Messungen - Lufttemperatur	2012-10
VDI 3786 Blatt 4	Umweltmeteorologie - Meteorologische Messungen - Luftfeuchte	2013-06
VDI 3786 Blatt 5	Umweltmeteorologie - Meteorologische Messungen - Strahlung	2015-10
VDI 3786 Blatt 6	Umweltmeteorologie - Meteorologische Messungen - Trübung der bodennahen Atmosphäre - Meteorologische Sichtweite	2017-05 (Entwurf)
VDI 3786 Blatt 7	Umweltmeteorologie - Meteorologische Messungen - Niederschlag	2010-12
VDI 3786 Blatt 8	Umweltmeteorologie - Meteorologische Messungen - Aerologische Messungen	2017-02
VDI 3786 Blatt 9	Umweltmeteorologie - Meteorologische Messungen - Visuelle Wetterbeobachtungen	2007-10

Tabelle 2. Aktuelle Inhalte von VDI-Richtlinien und DIN-Normen zu meteorologischen Messungen im VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft 1b „Umweltmeteorologie“ (Fortsetzung)

Technische Regel	Titel	Veröffentlichungsdatum
VDI 3786 Blatt 11	Umweltmeteorologie - Bodengebundene Fernmessung des Windvektors und der Vertikalstruktur der Grenzschicht - Dopplersodar	2015-07
VDI 3786 Blatt 12	Umweltmeteorologie - Meteorologische Messungen - Turbulenzmessung mit Ultraschall-Anemometern	2017-08 (Entwurf)
VDI 3786 Blatt 13	Umweltmeteorologie - Meteorologische Messungen - Messstation	2006-08
VDI 3786 Blatt 16	Umweltmeteorologie - Meteorologische Messungen - Luftdruck	2010-07
VDI 3786 Blatt 17	Umweltmeteorologie - Bodengebundene Fernmessung des Windvektors - Wind-Profil-Radar	2007-02
VDI 3786 Blatt 18	Umweltmeteorologie - Bodengebundene Fernmessung der Temperatur - Radioakustische Sondierungssysteme (RASS)	2010-05
VDI 3786 Blatt 19	Umweltmeteorologie - Bodengebundene Fernmessung meteorologischer Parameter - Partikelrückstreulidar	2016-10 (Entwurf)
VDI 3786 Blatt 20	Umweltmeteorologie - Bodengebundene Fernmessung des Niederschlags - Wetterradar	2014-09

Tabelle 3. Aktuelle Inhalte von VDI-Richtlinien zu meteorologischen Messungen im VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft 5 „Umweltmesstechnik“

Technische Regel	Titel	Veröffentlichungsdatum
VDI 4210	Fernmessverfahren - Messungen in der Atmosphäre nach dem LIDAR-Prinzip - Messen gasförmiger Luftverunreinigungen mit dem DAS-LIDAR	1999-06
VDI 4211	Fernmessverfahren - Messungen in der Atmosphäre nach dem Passiv-FTIR-Prinzip - Messen gasförmiger Emissionen und Immissionen	2016-09 (Entwurf)

Literatur

- [1] Leclerc, M.Y.; Foken, T.: *Footprints in Micrometeorology and Ecology*. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer-Verlag, 2014
- [2] Brock, F.V.; Richardson, S.J.: *Meteorological Measurement Systems*. New York: Oxford University Press, 2001
- [3] DeFelice, T.P.: *An introduction to meteorological instrumentation and measurement*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998
- [4] Emeis, S.: *Measurement Methods in Atmospheric Sciences*. Stuttgart: Borntraeger Science Publishers, 2010
- [5] Foken, T.: *Angewandte Meteorologie*. Berlin, Heidelberg: Springer-Spektrum, 2016, bzw. Foken, T.: *Micrometeorology*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2017
- [6] Harrison, G.R.: *Meteorological Measurements and Instrumentations*. Chichester: John Wiley and Sons, 2015
- [7] Aubinet, M.; Vesala, T.; Papale, D. (eds): *Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis*. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer-Verlag, 2012
- [8] Ohmura, A.; Dutton, E.G.; Forgan, B.; Fröhlich, C.; Gilgen, H.; Hegner, H.; Heimo, A.; König-Langlo, G.; McArthur, B.; Müller, G.; Philipona, R.; Pinker, R.; Whitlock, C.H.; Dehne, K.; Wild, M.: *Baseline Surface Radiation Network (BSRN/WCRP): New precision radiometry for climate research*. In: *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 79 (1998), pp. 2115–2136
- [9] Vuerich, E.; Monesi, C.; Lanza, L.G.; Stagi, L.; Lanzinger, E.: *WMO field intercomparison of rainfall intensity gauges*. In: *Instruments and Observing Methods Report 99* (2009), pp. 1–290
- [10] Hellmann, G.: *Ein neuer registrierender Regenschirm*. In: *Meteorol. Z.* 32 (1897), pp. 41–44
- [11] Assmann, R.: *Das Aspirationspsychrometer, ein neuer Apparat zur Ermittlung der wahren Temperatur und Feuchtigkeit der Luft*. In: *Das Wetter* 4 (1887), pp. 245–286
- [12] Assmann, R.: *Das Aspirationspsychrometer, ein neuer Apparat zur Ermittlung der wahren Temperatur und Feuchtigkeit der Luft*. In: *Das Wetter* 5 (1888), pp. 1–22
- [13] Sonntag, D.: *Advancements in the field of hygrometry*. In: *Meteorologische Zeitschrift* 3 (1994), pp. 51–66.
- [14] Budde, M.; Zhang, L.; Beigl, M.: *Distributed, Low-cost Particulate Matter Sensing: Scenarios, Challenges, Approaches*. In: *ProScience 1* (2014), pp. 230–236. doi:10.14644/dust.2014.038
- [15] Kumar, P.; Morawska, L.; Martani, C.; Biskos, G.; Neophytou, M.; Di Sabatino, S.; Britter, R.: *The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities*. In: *Environment International*, 75 (2015), pp. 99–205
- [16] Atlas, D.; Ulbrich, C.W.: *Path- and area-integrated rainfall measurement by microwave attenuation in the 1–3 cm band*. In: *J. Appl. Meteorol.* 16 (1977), pp. 1322–1331
- [17] Chwala, C.; Gmeiner, A.; Qiu, W.; Hipp, S.; Nienaber, D.; Siart, U.; Eibert, T.; Pohl, M.; Selmann, J.; Fritz, J.; Kunstmann, H.: *Precipitation observation using microwave backhaul links in the alpine and pre-alpine region of Southern Germany*. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16 (2012), pp. 2647–2661, doi:10.5194/hess-16-2647-2012
- [18] Overeem, A.; Leijnse, H.; Uijlenhoet, R.: *Country-wide rainfall maps from cellular communication networks*. In: *PNAS* 110 (8) (2013), pp. 2741–2745; doi:10.1073/pnas.1217961110
- [19] Emeis, S.: *Wind Energy Meteorology - Atmospheric Physics for Wind Power Generation*. Series: Green Energy and Technology. Heidelberg etc.: Springer-Verlag, 2012
- [20] IEC 61400-12 Wind turbines - Part 12-1: *Power performance measurements of electricity producing wind turbines*. Intern. Electrotechnical Commission.
- [21] Baldocchi, D.: *Measuring Fluxes of Trace Gases and Energy between Ecosystems and the Atmosphere - the State and Future of the Eddy Covariance Method*. In: *Global Change Biology* 20 (2014) 12, pp. 3600–3609
- [22] VDI-Kommission Reinhaltung der Luft (1975): *Tätigkeitsbericht*. Düsseldorf, 41 pp.
- [23] Peters, G.: *Anwendungsmöglichkeiten von SODAR-Messverfahren*. In: *Umweltmeteorologie. Schriftenreihe Band 15* (1990), Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN
- [24] Münkel, C.; Engelbart, D. A.; Woppowa, L.: *Standardisation work on ground-based remote-sensing techniques in Germany*. In: *Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XIV* (2009), doi: 10-1117/12.830367

- [25] Althausen, D.; Emeis, S.; Behrendt, A.; Jäckel, S.; Münkel, C.; Wiegner, M.: Lidar-Techniken zur entfernungs aufgelösten Fernmessung atmosphärischer Größen und erste technische Regeln. Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft 75, Nr. 6 (2015), pp. 235–240
- [26] Althausen, D.; Emeis, S.; Flentje, H.; Guttenberger, J.; Jäckel, S.; Lehmann, V.; Mattis, I.; Münkel, C.; Peters, G.; Ritter, C.; Wiegner, M.; Wille, H.: Standards – An important step the the (public) use of lidars. In: EPJ Web of Conferences 119 (2016), 23023, DOI: 10.1051/epjconf/ 2016111923023
- [27] Einfalt, T.; Hagen, M.; Jäckel, S.; Quirnbach, M.: Grundlagen der Radarmessung des Niederschlages und Anwendungen in der Wasserwirtschaft. In: Korrespondenz Wasserwirtschaft (7), Nr. 12 (2014), pp. 729-736, doi: 10.3243/kwe2014.11.004
- [28] WMO (2008) Guide to meteorological instruments and methods of observation (updated 2010, 2012). WMO, No. 8:7th edition.
- [29] Förderprojekt des BMVI (Bundesministerium für Verkehr und Infrastruktur) „Smart Air Quality Network“ <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund/smart-air-quality-network-smartaqnet.html?nn=326002> (zuletzt abgerufen am 13.06.2017)

Der VDI

Sprecher, Gestalter, Netzwerker

Die Faszination für Technik treibt uns voran: Seit 160 Jahren gibt der VDI Verein Deutscher Ingenieure wichtige Impulse für neue Technologien und technische Lösungen für mehr Lebensqualität, eine bessere Umwelt und mehr Wohlstand. Mit rund 155.000 persönlichen Mitgliedern ist der VDI der größte technisch-wissenschaftliche Verein Deutschlands. Als Sprecher der Ingenieure und der Technik gestalten wir die Zukunft aktiv mit. Mehr als 12.000 ehrenamtliche Experten bearbeiten jedes Jahr neueste Erkenntnisse zur Förderung unseres Technikstandorts. Als drittgrößter technischer Regelsetzer ist der VDI Partner für die deutsche Wirtschaft und Wissenschaft.

VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL)
- Normenausschuss
Dipl.-Ing. Simon Jäckel
Tel. +49 211 6214-535
jaeckel@vdi.de
www.vdi.de

VDI-Agenda Meteorologische Messungen
Juli 2017
ISBN 978-3-931384-87-6