

VEREIN
DEUTSCHER
INGENIEUREUmweltmeteorologie
Meteorologische Messungen
Turbulenzmessungen mit Ultraschallanemometern
Environmental meteorology
Meteorological measurements
Turbulence measurements with sonic anemometersVDI 3786
Blatt 12 / Part 12Ausg. 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
Vorbemerkung	2
Einleitung	3
1 Anwendungsbereich	3
2 Normative Verweise	4
3 Begriffe	4
4 Formelzeichen und Abkürzungen	5
5 Messprinzip	7
5.1 Funktionsweise	7
5.2 Messung turbulenter Größen	8
5.3 Bestimmung der Schalltemperatur	10
6 Aufstellung und Standortwahl	11
7 Messgeräte	11
8 Anforderungen an die Messungen	14
8.1 Einsatzbereich	14
8.2 Untere Erfassungsgrenzen und Auflösung	14
8.3 Messunsicherheiten	14
8.4 Zeitliche und räumliche Auflösung	15
8.5 Langzeitstabilität	15
8.6 Störeinflüsse	15
9 Durchführen der Messung, Überprüfung und Wartung	16
9.1 Datenerfassung	16
9.2 Koordinatentransformation und Korrekturen	16
9.3 Kalibrierung	19
9.4 Wartung	19
9.5 Qualitätskontrolle	20
10 Messaufgabe und Auswerteverfahren	21
11 Verfahrenskenngrößen	21
11.1 Windvektor	21
11.2 Varianz der Windkomponenten	22

Contents	Page
Preliminary note	2
Introduction	3
1 Scope	3
2 Normative references	4
3 Terms and definitions	4
4 Symbols and abbreviations	5
5 Measurement principle	7
5.1 Functionality	7
5.2 Measurement of turbulent variables	8
5.3 Determining the sound temperature	10
6 Installation and site selection	11
7 Measuring systems	11
8 Measurement requirements	14
8.1 Range of applications	14
8.2 Lower detection limits and resolution	14
8.3 Measurement uncertainties	14
8.4 Temporal and spatial resolution	15
8.5 Long-term stability	15
8.6 Interferences	15
9 Performing the measurements, inspections, and maintenance	16
9.1 Data acquisition	16
9.2 Coordinate transformation and corrections	16
9.3 Calibration	19
9.4 Maintenance	19
9.5 Quality control	20
10 Measurement task and analysis methods	21
11 Method parameters	21
11.1 Wind vector	21
11.2 Variance of the wind components	22

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

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

Inhalt	Seite
11.3 Vertikaler turbulenter Impulsstrom, Schubspannungsgeschwindigkeit.....	23
11.4 Auftriebsstrom	23
11.5 Obukhov-Länge	24
11.6 SND-Korrektur – fühlbarer Wärmestrom.....	24
11.7 Berechnung von Turbulenzgrößen für 30- bis 60-Minuten-Mittel aus kürzeren Mitteln.....	25
Anhang A Wichtige Turbulenzgrößen für Ausbreitungsrechnungen	26
Anhang B Messbeispiele	27
Anhang C Softwarepakete zur Auswertung von Turbulenzmessungen	29
C1 Softwarepakete zur Auswertung von Eddy-Kovarianz-Messungen.....	29
C2 Leicht zugängliche Footprintmodelle.....	29
Schrifttum	30

Contents	Page
11.3 Vertical turbulent momentum flow, shear velocity	23
11.4 Buoyancy flux.....	23
11.5 Obukhov length	24
11.6 SND correction – sensible heat flow	24
11.7 Calculation of turbulence variables for 30- to 60-minute means from shorter means	25
Annex A Important turbulence variables for dispersion calculations	26
Annex B Measurement examples.....	27
Annex C Software packages for analysing turbulence measurements	29
C1 Software packages for analysing eddy covariance measurements	29
C2 Easily accessible footprint models.....	29
Bibliography	30

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), 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 Blätter dieser Richtlinienreihe ist im Internet abrufbar unter www.vdi.de/3786.

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) 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 can be accessed on the Internet at www.vdi.de/3786.

Einleitung

Für viele Fragen in der Luftreinhaltung ist die Durchmischung von Luftmassen durch die natürliche atmosphärische Turbulenz von großer Bedeutung. Die Turbulenz als Strömungseigenschaft der Atmosphäre ist dadurch gekennzeichnet, dass Luftkörper von Millimetern bis Kilometern Größe unregelmäßige und zufällige Bewegungen um einen mittleren Zustand ausführen (Turbulenzelemente, turbulente Wirbel). Da die damit verknüpfte turbulente Diffusion viel stärker wirkt als die entsprechende molekulare Diffusion, wird Letztere bei der Abschätzung der Vermischung von Luftmassen vernachlässigt und hier nicht weiter behandelt.

Die Intensität und Größenverteilung der Turbulenzelemente sowie deren zeitliche Entwicklung und Höhenabhängigkeit werden durch das Zusammenwirken der mechanischen Reibung der Luftströmung an der rauen Erdoberfläche und der auftriebsbedingten Anregung durch Konvektion oder der auftriebsbedingten Abschwächung in einer stabil geschichteten Atmosphäre bestimmt. Es ist daher notwendig, die beteiligten Prozesse messtechnisch zu erfassen und zu quantifizieren.

Die turbulenzbedingten physikalischen Größen, z.B. mittlere turbulente Energien oder turbulente Diffusionskoeffizienten für Luftbeimengungen, variieren in weiten Bereichen. Dies bedeutet, dass turbulenzbedingte Eigenschaften entweder in jedem Einzelfall gemessen oder mit empirischen Parametrisierungsschemata (z.B. das System der Ausbreitungsklassen) bestimmt werden müssen.

Daher benötigt man in vielen Bereichen der Umweltmeteorologie Informationen über die turbulenten Schwankungen meteorologischer Größen. Die zeitliche Variation der räumlichen Verteilung der Strömung in der Atmosphäre bestimmt die Ausbreitung und Verdünnung von Schadstoffwolken.

1 Anwendungsbereich

Diese Richtlinie findet Anwendung bei der Messung des Windvektors und der virtuellen Temperatur mit hoher zeitlicher Auflösung und bei der Bestimmung von turbulenten Größen. Beispiele sind Messaufgaben zur Abschätzung der Ausbreitungssituation in der Luftreinhaltung für genehmigungsbedürftige Anlagen nach BImSchG und TA Luft, in der Überwachung kerntechnischer Anlagen (KTA 1508) und bei vielen agrarmeteorologischen, forstmeteorologischen und allgemeinen mikrometeorologischen Fragestellungen. Somit sind Ultraschallanemometer Bestandteil entsprechender Messstationen (siehe VDI 3786 Blatt 13). Weiterhin können Ultraschallanemometer bei der Be-

Introduction

The mixing of air masses due to natural atmospheric turbulence is of great importance in many applications in air pollution control. Turbulence as a flow property of the atmosphere is characterised by the fact that air masses whose size ranges from millimetres to kilometres perform irregular and random movements about a mean position (turbulence elements, turbulent vortices). Since the associated turbulent diffusion has a much stronger effect than the corresponding molecular diffusion, the latter is ignored when estimating the mixing of air masses and is not discussed further here.

The intensity and size distribution of the turbulence elements and their temporal development and altitude dependence are determined by the interaction of the mechanical friction of the air flow at the rough surface of the earth and the buoyancy-generated excitation due to convection or the buoyancy-generated attenuation in a stably stratified atmosphere. Therefore, it is necessary to capture the involved processes meteorologically and quantify these.

The turbulence-based physical variables, e.g. mean turbulent energies or turbulent diffusion coefficients for airborne substances, vary across wide ranges. This means that properties due to turbulence either have to be measured in each individual case or be determined using empirical parameterisation schemes (e.g. the system of dispersion classes).

In many areas of environmental meteorology, information is therefore required about the turbulent fluctuations of meteorological variables. The temporal variation in the spatial distribution of flow in the atmosphere determines the dispersion and dilution of pollutant clouds.

1 Scope

This standard is used for measuring the wind vector and the virtual temperature with high temporal resolution and for determining turbulent variables. Examples include measurements undertaken for assessing the dispersion situation in air pollution control for installations requiring approval under BImSchG (Federal Immission Control Act) and TA Luft (Technical Instructions on Air Quality Control), in the monitoring of nuclear facilities (KTA 1508), and for many agro-meteorological, forest meteorological, and general micrometeorological investigations. Thus, sonic anemometers are a component of the relevant measuring stations (see VDI 3786 Part 13). Furthermore, sonic ane-

stimmung des mittleren Windvektors übliche mechanische Windgeber ersetzen (siehe VDI 3786 Blatt 2) und auch in Klima- und Wetterstationen nach internationalem Standard [1] eingesetzt werden.

Anwendungen, bei denen explizit das Spektrum der Turbulenz benötigt wird (z.B. dynamische Belastungen von Bauwerken), werden hier 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 folgenden Begriffe:

Abtastrate (Δt)

Anzahl unabhängiger Messwerte pro Zeiteinheit in äquidistantem Abstand

Anmerkung: Die Abtastrate Δt muss so groß sein, dass mindestens zwei Abtastungen innerhalb der kleinsten auftretenden Periode, die noch erfasst werden soll, vorhanden sind; zugleich muss die Abtastfrequenz größer als die doppelte Frequenz der Schwankungen sein, die noch erfasst werden soll.

Aliasing

Spiegelung im Linienspektrum von Frequenzanteilen aus dem Bereich oberhalb der halben \rightarrow Abtastrate $\Delta t/2$ in den Bereich unterhalb $\Delta t/2$

Anmerkung: Zur Vermeidung von Fehlern durch derartige Spiegelungen werden Antialiasing-Filter eingesetzt.

Ausbreitungsklasse

vereinfachte Charakterisierung des Turbulenzzustands und damit der Verdünnungsfähigkeit der Atmosphäre, z.B. nach der Klassierung von *Klug/Manier* [VDI 3782 Blatt 1]

Eddy-Kovarianz-Methode

Verfahren zur Bestimmung turbulenter Flüsse durch die Ermittlung der Kovarianz aus den turbulenten Schwankungen des Vertikalwinds und des Horizontalwinds (Schubspannung) oder der Temperatur (fühlbarer Wärmestrom)

Nyquist-Frequenz (f_N)

Frequenz $f_N = 1/(2\Delta t)$ mit der Bedingung, dass sie größer als die höchste aufzulösende Frequenz sein muss

Anmerkung: Höhere Frequenzen des Turbulenzspektrums können durch Tiefpassfilter oder Antialiasing-Filter entfernt werden.

mometers can replace the mechanical wind sensors commonly used in determining the mean wind vector (see VDI 3786 Part 2), and they can also be used in climate and weather stations in accordance with international standards [1].

Applications in which the turbulence spectrum is needed explicitly (e.g. dynamic loads on buildings), are not discussed here.

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 following terms and definitions apply:

sampling rate (Δt)

number of independent readings per unit of time at equidistant intervals

Note: The sampling rate Δt has to be large enough such that at least two samples are present within the smallest period that still has to be captured; at the same time, the sampling frequency has to be greater than twice the frequency of the fluctuations that still has to be captured.

aliasing

reflection in the line spectrum of frequency components from the region above half the \rightarrow sampling rate (i.e. $\Delta t/2$) in the region below $\Delta t/2$

Note: Antialiasing filters are used to prevent errors due to such reflections.

dispersion class

simplified characterisation of the turbulence state and thus of the diluting capacity of the atmosphere, for example according to the *Klug/Manier* classification [VDI 3782 Part 1]

eddy covariance technique

method for determining turbulent flows by determining the covariance from the turbulent fluctuations in the vertical wind and the horizontal wind (shear stress) or in the temperature (sensible heat flow)

Nyquist frequency (f_N)

frequency $f_N = 1/(2\Delta t)$ with the condition that it has to be greater than the highest frequency that can be resolved

Note: Higher frequencies in the turbulence spectrum can be removed by low-pass filters or antialiasing filters.