

VEREIN
DEUTSCHER
INGENIEURE

Umweltmeteorologie
Meteorologische Messungen
Turbulenzmessung mit Ultraschall-Anemometern

Environmental meteorology
Meteorological measurements
Turbulence measurements with sonic anemometers

VDI 3786

Blatt 12 / Part 12

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 guideline has been subject to public scrutiny after announcement in the Bundesanzeiger (Federal Gazette).
The German version of this guideline 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
1 Anwendungsbereich	4	1 Scope	4
2 Formelzeichen und Abkürzungen	4	2 Symbols and abbreviations	4
3 Messprinzip	6	3 Measurement principle	6
4 Turbulenzgrößen für Ausbreitungsrechnungen.	8	4 Turbulent variables for dispersion modelling	8
5 Messgeräte	11	5 Measuring systems	11
6 Mit dem Ultraschall-Anemometer bestimmte Turbulenzgrößen	14	6 Turbulent variables determined using a sonic anemometer	14
6.1 Varianz der vertikalen Windkomponente	15	6.1 Variance of the vertical wind component	15
6.2 Vertikaler turbulenter Impulsfluss, Schubspannungsgeschwindigkeit	16	6.2 Vertical turbulent momentum flux, friction velocity	16
6.3 Fühlbarer Wärmefluss und Obukhov-Länge	17	6.3 Sensible heat flux and Obukhov length	17
6.4 Korrekturen, Umrechnungen	18	6.4 Corrections, conversions	18
7 Aufstellung und Standortwahl	21	7 Installation and selection of location	21
8 Wartung	21	8 Maintenance	21
9 Kalibrierung	22	9 Calibration	22
10 Störeinflüsse	22	10 Interferences	22
11 Verfahrenskenngrößen	23	11 Performance characteristics	23
11.1 Einsatzbereich	23	11.1 Range of application	23
11.2 Untere Erfassungsgrenzen und Messunsicherheit	23	11.2 Lower detection limits and measurement uncertainty	23
11.3 Fehlergrenzen	23	11.3 Error limits	23
11.4 Zeitliche und räumliche Auflösung	24	11.4 Temporal and spatial resolution	24
11.5 Stabilität	24	11.5 Stability	24
Anhang A Messbeispiele	25	Annex A Examples of measurement	25
Anhang B Nicht gerätespezifische Korrekturen.	27	Annex B Non device specific corrections	27
Schrifttum	28	Bibliography	28

Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normenausschuss KRdL

Arbeitsgruppe Meteorologische Messungen
Ausschuss Luftqualität

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 VDI-Richtlinie ist unter Wahrung des Urheberrechts und unter Beachtung der Lizenzbedingungen (www.vdi-richtlinien.de), die in den VDI-Merkblättern geregelt sind, möglich.

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

Einleitung

In Naturwissenschaft und Technik hat man früh erkannt, dass bei strömenden Gasen oder Flüssigkeiten zwei völlig unterschiedliche Strömungstypen auftreten, nämlich laminare und turbulente Strömungen. Den Unterschied der beiden Strömungsformen kann man deutlich erkennen, wenn man in einer Strömung die zeitliche Änderung des Abstands zweier anfangs benachbarter Teilchen des Mediums verfolgt. In einer laminaren Strömung ist diese Änderung relativ einfach zu beobachten und zu beschreiben – im Fall einer turbulenten Strömung ändert sich die Lage der Teilchen scheinbar zufällig und chaotisch.

Auch die Strömung in der Atmosphäre, das heißt der Wind, ist in den allermeisten Fällen turbulent, und die oben beschriebenen Verwirbelungen trifft man überall an. Daher spielt im Zusammenhang mit der atmosphärischen Turbulenz, im Gegensatz zu technischen Problemen, die Reynolds-Zahl, mit der man in vielen Fällen den Strömungszustand hinsichtlich laminar/turbulent beurteilen kann, praktisch keine Rolle.

Für viele Fragen in der Luftreinhaltung sind die Turbulenz und ihre messtechnische Erfassung von großer Bedeutung. In der turbulenten Atmosphäre sind die turbulenten Diffusionskoeffizienten um viele Größenordnungen größer als die entsprechenden molekularen Diffusionskoeffizienten, sodass Letztere vernachlässigt werden können.

Da die Turbulenz eine Strömungs- und keine Materialeigenschaft ist, sind auch die turbulenzbedingten physikalischen Größen, z.B. mittlere turbulente Energien oder turbulente Diffusionskoeffizienten für Luftbeimengungen, keine Materialkonstanten der Luft, sondern in weiten Bereichen variabel. Dies bedeutet, dass turbulenzbedingte Eigenschaften entweder in jedem Einzelfall gemessen oder mit empirischen Parametrisierungsschemata (z.B. das System der Ausbreitungsklassen) bestimmt werden müssen.

Preliminary note

The content of this guideline has been developed in strict accordance with the requirements and recommendations of the guideline 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 guideline without infringement of copyright is permitted subject to the licensing conditions specified in the VDI notices (www.vdi-richtlinien.de).

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

Introduction

In science and technology, it was recognized early that two entirely different types of flow occur in flowing gases or liquids, namely laminar and turbulent flows. The difference between the two types of flow can be clearly seen when monitoring the time change in the spacing of two initially neighbouring particles of the medium in a flow. In a laminar flow, this change can be observed and described relatively easily – in the case of a turbulent flow, the position of the particles changes in an apparently random and chaotic way.

The flow in the atmosphere, i.e. the wind, is turbulent in very most cases, and the above described vortex effects are found everywhere. Therefore, in the context of atmospheric turbulence, the Reynolds number – which can be used in many cases to assess whether the flow state is laminar or turbulent – is virtually irrelevant. This is in contrast to technical problems.

Turbulence and its measurement are of great importance to many aspects of air pollution control. In the turbulent atmosphere, the turbulent diffusion coefficients exceed the corresponding molecular diffusion coefficients by many orders of magnitude, so that the latter can be disregarded.

Since turbulence is a property of flow and not of material, even the physical values governed by turbulence, such as mean turbulent energies or turbulent diffusion coefficients for particles, are not material constants of the air, but show variability within wide ranges. This means that properties due to turbulence either have to be measured in each individual case or have to be determined using empirical parameterization schemes (e.g. the system of dispersion classes).

Zwei Besonderheiten der Turbulenz sind herauszustellen:

- Unter gleichen Bedingungen ist die Turbulenz stärker, wenn die Windscherung größer ist und eine indifferente oder labile Temperaturschichtung herrscht. Eine stabile Temperaturschichtung, das heißt eine Zunahme der potenziellen Temperatur mit der Höhe, dämpft die Turbulenz. Kennzahlen, die die mechanisch (Windscherung) und die thermisch verursachte (Temperaturschichtung) Turbulenz berücksichtigen, sind die Fluss-Richardson-Zahl oder die Obukhov-Länge¹⁾.
- Turbulente Strukturen in der Atmosphäre kann man sich vereinfachend als wirbelartige Strukturen vorstellen, die auch als Turbulenzelemente bezeichnet werden. Die Wirkungen der Turbulenz sind nicht nur durch die mittlere turbulente kinetische Energie der Strömung bestimmt, sondern auch durch die spektrale Verteilung.

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. Die Reibung zwischen Atmosphäre und Erdoberfläche wird durch den turbulenten Impulstransport beschrieben. Durch die Reibung entwickeln sich Scherströmungen, die zu Deformationen von Schadgaswolken führen.

Der Impulstransport zwischen Atmosphäre und Oberfläche kann zur Aufwirbelung feinkörniger Substanzen und damit z. B. zur Resuspension von Schadstoffen von Halden und zur Erosion von Ackerboden führen.

Bauwerke können durch turbulente Windschwankungen belastet werden. Die Kenntnis des Turbulenzspektrums ist wichtig für die Auslegung hoher, schlanker Bauwerke.

Auch künstliche, in der atmosphärischen Grenzschicht entstehende Wirbel, z. B. durch startende oder landende Flugzeuge, können mit Turbulenzmessgeräten erfasst werden. Ein Beispiel hierfür sind die Wirbelschleppen hinter Flugzeugen, die besonders in der Start- und Landephase von Bedeutung sind, da sie die Landefrequenz begrenzen.

Für moderne Diffusionsmodelle benötigt man als Eingangsgrößen den aus Turbulenzmessungen ableitbaren Turbulenztensor und Informationen über die charakteristischen Zeit- und Längenmaßstäbe. Bei der Ausbreitung und Auflösung von Schwergaswolken ist

Two particular features of turbulence merit special attention:

- Under identical conditions, the turbulence is stronger if the wind shear is greater and neutral or unstable temperature stratification prevails. Stable temperature stratification, i.e. an increase in the potential temperature with height, damps the turbulence. The flux Richardson number and the Obukhov length¹⁾ are parameters which take account of the mechanical (wind shear) and the thermal (temperature stratification) sources of turbulence.
- In a simplified way, turbulent structures in the atmosphere can be assumed as vortex-type structures, which are also referred to as turbulent elements. The effects of turbulence are determined not only by the mean turbulent kinetic energy of the flow, but also by the spectral distribution.

Hence, in many areas of environmental meteorology, information about the turbulent fluctuations of meteorological parameters is required. The temporal variation of the spatial distribution of flow in the atmosphere determines the dispersion and dilution of pollution clouds. The friction between the atmosphere and the surface of the earth is characterized by the turbulent transport of momentum. Shear flows develop from the friction, and these lead to deformations of pollution clouds.

The transport of momentum between the atmosphere and the surface can stir up fine grain substances and can thus result e.g. in the resuspension of pollutants from stockpiles and in the erosion of cropping soil.

Buildings can be impacted by turbulent wind fluctuations. Knowledge of the turbulence spectrum is important to the design of tall, scrawny buildings.

Even artificial vortices caused in the atmospheric boundary layer, e.g. by starting or landing aircrafts, can be determined by means of turbulence anemometers. An example of this is the wakes behind aircrafts, which are of significance especially during the starting and landing phase because they limit the frequency of landing.

For modern diffusion models, the turbulence tensor which can be derived from turbulence measurements as well as information on the characteristic scales of time and length are required as input parameters. For the dispersion and dilution of heavy gas clouds, the

¹⁾ früher auch als Monin-Obukhov-Länge bezeichnet [1]

¹⁾ formerly also called Monin-Obukhov length [1]