

VEREIN
DEUTSCHER
INGENIEURE

Umweltmeteorologie
Messwertgestützte Turbulenzparametrisierung
für Ausbreitungsmodelle

VDI 3783
Blatt 8 / Part 8

Environmental meteorology
Turbulence parameters for dispersion models
supported by measurement data

Ausg. deutsch/englisch
Issue German/English

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

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

Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.

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	2
1 Anwendungsbereich	5
2 Begriffe	6
3 Formelzeichen und Abkürzungen	10
4 Grenzschichtparameter	13
4.1 Vertikaler Aufbau der Grenzschicht	13
4.2 Meteorologische Variablen	17
4.3 Gleichung für die turbulente kinetische Energie	18
4.4 Skalierungsparameter	19
4.5 Schichtungsparameter	20
5 Messwertgestützte Ableitung von Grenzschichtparametern	21
5.1 Allgemeines	21
5.2 Profilmethode	22
5.3 Energiebilanzmethode	23
5.4 Rauigkeitslänge	25
5.5 Obukhov-Länge	26
5.6 Mischungsschichthöhe	27
5.7 Turbulenzparameter für Ausbreitungsmodelle	28
6 Grenzschichtmodell für Ausbreitungsmodellierungen	30
6.1 Allgemeines	30
6.2 Windgeschwindigkeit und Windrichtung	31
6.3 Geschwindigkeitsfluktuationen	32
6.4 Turbulente Diffusionskoeffizienten	33
6.5 Lagrange-Korrelationszeiten	34
6.6 Temperatur	34
6.7 Berücksichtigung der Verdrängungshöhe	36
6.8 Ausbreitungsparameter für Gauß-Modelle	36

Contents	Page
Preliminary note	2
Introduction	2
1 Scope	5
2 Terms and definitions	6
3 Symbols and abbreviations	10
4 Boundary layer parameters	13
4.1 Vertical structure of the boundary layer ..	13
4.2 Meteorological variables	17
4.3 Equation for the turbulent kinetic energy	18
4.4 Scaling parameters	19
4.5 Stratification parameters	20
5 Measurement-based derivation of boundary layer parameters	21
5.1 General	21
5.2 Profile method	22
5.3 Energy balance method	23
5.4 Roughness length	25
5.5 Obukhov length	26
5.6 Mixed layer height	27
5.7 Turbulence parameters for dispersion models	28
6 Boundary layer model for dispersion modelling	30
6.1 General	30
6.2 Wind velocity and wind direction	31
6.3 Velocity fluctuations	32
6.4 Turbulent diffusion coefficients	33
6.5 Lagrange correlation times	34
6.6 Temperature	34
6.7 Taking the zero displacement height into account	36
6.8 Dispersion parameters for Gaussian models	36

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

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

Inhalt	Seite
7 Handlungsanweisungen für die Praxis	37
7.1 Rauigkeitslänge	37
7.2 Verdrängungshöhe	38
7.3 Schubspannungsgeschwindigkeit	38
7.4 Obukhov-Länge	38
7.5 Mischungsschichthöhe	39
7.6 Übertragung auf eine andere Rauigkeitslänge	40
7.7 Wertebeschränkungen	41
Anhang A Beschreibung des Windprofils	42
Anhang B Erläuterungen zu den Parametrisierungen	45
Anhang C Grafische Darstellung der Turbulenzprofile	51
Anhang D Verifikationen, Validierungen und Vergleiche	54
Schrifttum	68

Contents	Page
7 Instructions for practical implementation	37
7.1 Roughness length	37
7.2 Zero displacement height	38
7.3 Friction velocity	38
7.4 Obukhov length	38
7.5 Mixed layer height	39
7.6 Transfer to a different roughness length	40
7.7 Value limiting	41
Annex A Description of the wind profile	42
Annex B Comments on the parameterisations	45
Annex C Graphic representation of the turbulence profiles	51
Annex D Verifications, validations, and comparisons	54
Bibliography	68

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/3783.

Einleitung

Mit dieser Richtlinie wird das Ziel verfolgt, Gleichungen anzugeben, mit denen diejenigen Größen bestimmt werden können, die bei einer Ausbreitungsrechnung im Rahmen der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) sowie vergleichbarer Regelwerke verfügbar sein müssen. Die Grundlage hierzu bildet die Ähnlichkeitstheorie nach *Monin* und *Obukhov* (Monin-Obukhov Similarity Theory – MOST; siehe auch [1 bis 3]), aus der messwertgestützt Grenzschichtparameter abgeleitet werden, die die Ausbreitungsverhältnisse in der bodennahen atmosphärischen Grenzschicht charakterisieren. Die Grenzschichtparameter wer-

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/3783.

Introduction

The objective of this standard is to provide equations which make it possible to determine the variables needed for dispersion calculations performed as part of the Technical Instructions on Air Quality Control (TA Luft) and comparable regulations. The foundation for this is formed by the Monin-Obukhov Similarity Theory (MOST; see also [1 to 3]), from which measurement-based boundary layer parameters are derived which characterise the dispersion circumstances in the near-ground atmospheric boundary layer. The boundary layer parameters are substituted into empirical equations with which the wind and turbulence profiles in the

den in empirische Gleichungen eingesetzt, mit denen die Wind- und Turbulenzprofile in der Grenzschicht festgelegt werden, die den atmosphärischen Ausbreitungsprozess luftgetragener Spurenstoffe über die Advektion (Wind) und Diffusion (Turbulenz) bestimmen. Die angegebenen Gleichungen können z.B. auch im Rahmen der Ertragsabschätzung bei der Windenergienutzung angewendet werden.

Die luftgetragene Ausbreitung eines in die Atmosphäre emittierten Spurenstoffs wird – abgesehen von Abreicherungsseffekten – durch zwei Größen bestimmt:

- mittleres Windfeld, das die Lage des Schwerpunkts einer Spurenstoffwolke oder die Fahnenachse einer Spurenstofffahne festlegt (Advektion)
- Fluktuationen der Luftströmung, die die Verdünnung einer Spurenstoffwolke oder -fahne durch turbulente Diffusion bestimmen

Unter Turbulenz wird die fortwährende wirbelbedingte Veränderung der Strömungsgeschwindigkeit und -richtung auf einer Zeitskala verstanden, die wesentlich kleiner ist als die Zeitskala, die der Festlegung des mittleren Windfelds zugrunde liegt.

Das Fundament einer physikalischen Beschreibung der Spurenstoffausbreitung in der Atmosphäre im Rahmen von Ausbreitungsmodellen besteht folglich zum einen aus der Bestimmung des Windfelds (siehe u.a. VDI 3783 Blatt 6 und Blatt 7). Zum anderen ist eine adäquate Parametrisierung der turbulenten Fluktuationen der Luftströmung notwendig (siehe z.B. VDI 3782 Blatt 1, VDI 3945 Blatt 1 und Blatt 3).

Die Turbulenzstruktur in der atmosphärischen Grenzschicht wurde in Deutschland in älteren technischen Regelwerken über sogenannte Diffusionskategorien (auch als Ausbreitungsklassen, Ausbreitungskategorien oder Stabilitätsklassen bezeichnet) beschrieben (siehe z.B. VDI 3782 Blatt 6; TA Luft; AVV zu § 47 StrlSchV; SBG; [4]). Diese Kategorien wurden ebenfalls auf der Grundlage meteorologischer Messungen abgeleitet, charakterisieren jedoch den Turbulenzzustand lediglich über sechs verschiedene Stabilitätsbereiche diskontinuierlich. Üblicherweise werden hierbei die in Tabelle 1 aufgeführten Bezeichnungen verwendet.

boundary layer are established; the latter determine the atmospheric dispersion process of airborne trace substances via advection (wind) and diffusion (turbulence). The equations contained in the standard can also be used, for instance, when estimating yield in wind energy utilisation.

The airborne dispersion of a trace substance emitted into the atmosphere is determined – aside from depletion effects – by two quantities:

- the mean wind field that determines the position of the centre of mass of a trace substance cloud or the axis of a trace substance plume (advection)
- fluctuations in the airflow which determine the dilution of a cloud or plume of a trace substance through turbulent diffusion

Turbulence is the continual vortex-associated change in flow velocity and direction on a time scale significantly shorter than that on which the definition of the mean wind field is based.

The foundation of a physical description of trace substance dispersion in the atmosphere in dispersion models lies, therefore, on the one hand in establishing the wind field (see inter alia VDI 3783 Part 6 and Part 7). On the other hand it depends on an adequate parameterisation of the turbulent fluctuations of the airflow (see e.g. VDI 3782 Part 1, VDI 3945 Part 1 and Part 3).

The turbulence structure in the atmospheric boundary layer was described in Germany in older technical regulations by means of diffusion categories, also referred to as dispersion classes, dispersion categories or stability classes (see e.g. VDI 3782 Part 6; TA Luft; AVV (General Administrative Regulation) to section 47, StrlSchV (Radiation Safety Ordinance); SBG (Calculation Guidelines for Emergency Situations); [4]), which were also derived from meteorological measurements but characterised the turbulence discontinuously via six different stability regions. The usual terminology employed is the one listed in Table 1.

Tabelle 1. Zuordnung zwischen Diffusionskategorien – verwendet in verschiedenen Regelwerken – und atmosphärischen Stabilitätsbereichen

Stabilität der Atmosphäre	TA Luft	Kerntechnische Regelwerke
Sehr stabil	I	F
Stabil	II	E
Indifferent/stabil	III/1	D
Indifferent/labil	III/2	C
Labil	IV	B
Sehr labil	V	A

Im Rahmen der Ähnlichkeitstheorie stehen für Ausbreitungsrechnungen statt der Diffusionskategorien andere Kenngrößen – sogenannte Grenzschichtparameter (siehe Abschnitt 4) – zur Verfügung, die eine kontinuierliche und damit realitätsnähere Modellierung der Wind- und Turbulenzstruktur der Atmosphäre erlauben. Sie können wie die Diffusionskategorien (siehe z.B. [5 bis 7] oder Abschnitt 5) mittels meteorologischer Präprozessoren aus den gleichen meteorologischen Messungen abgeleitet werden. Die Präprozessoren können unterschiedliche Messgrößen (z.B. synoptische Daten, Wind-, Temperatur- oder Feuchteprofile in der Prandtl-Schicht und Turbulenzmessungen mit einem Ultraschallanemometer) als Eingangsdaten berücksichtigen. Sie basieren auf der Ähnlichkeitstheorie nach *Monin* und *Obukhov*.

In dieser Richtlinie werden für verschiedene Typen von Ausbreitungsmodellen dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechende Verfahren zur Parametrisierung der Turbulenz angegeben. Es werden funktionale Abhängigkeiten der die turbulente Diffusion charakterisierenden, modellspezifischen Turbulenzparameter von den in Abschnitt 4 eingeführten Grenzschichtparametern spezifiziert.

Bei Vorgabe einer standortspezifischen Rauiglängelänge z_0 und Verdrängungshöhe d_0 werden unter Benutzung standardisierter meteorologischer Messdaten Ansätze zur Bestimmung derjenigen Grenzschichtparameter angegeben, die den Turbulenzzustand der Atmosphäre beschreiben (siehe Abschnitt 4). Einen typischen Satz charakteristischer Grenzschichtparameter bilden:

- Schubspannungsgeschwindigkeit u_*
- konvektive Skalierungsgeschwindigkeit w_*
- Obukhov-Länge L
- Mischungsschichthöhe h_m

Ausgehend von meteorologischen Messungen ist in Bild 1 die Turbulenzparametrisierung über Diffu-

Table 1. Correlation between diffusion categories – used in various regulations – and atmospheric stability regions

Atmospheric stability	TA Luft	Nuclear regulations
Very stable	I	F
Stable	II	E
Neutral/stable	III/1	D
Neutral/unstable	III/2	C
Unstable	IV	B
Very unstable	V	A

In similarity theory, instead of diffusion categories, dispersion calculations can rely on other parameters, known as boundary layer parameters (see Section 4), which permit continuous and therefore more realistic modelling of the wind and turbulence structure of the atmosphere. By means of meteorological preprocessors, they can be derived from the same meteorological measurements as the diffusion categories (see e.g. [5 to 7] and Section 5). The preprocessors can take into account various observations (e.g. synoptic data, wind, temperature or humidity profiles in the Prandtl layer and turbulence measurements with an ultrasonic anemometer) as input data. They are based on the Monin-Obukhov similarity theory.

This standard provides, for various types of dispersion models, state-of-the-art methods for parameterising the turbulence. It specifies functional dependencies of the model-specific turbulence parameters that characterise turbulent diffusion, on the boundary layer parameters introduced in Section 4.

Given a location-specific roughness length z_0 and zero displacement height d_0 , and utilising standardised meteorological readings, approaches are provided for determining those boundary layer parameters that describe the turbulence of the atmosphere (see Section 4). A typical set of characteristic boundary layer parameters consists of:

- friction velocity u_*
- convective scaling velocity w_*
- Obukhov length L
- mixed layer height h_m

In reliance on meteorological measurements, Figure 1 is a schematic comparison between turbu-

sionskategorien dem Ansatz der Ähnlichkeitstheorie schematisch gegenübergestellt.

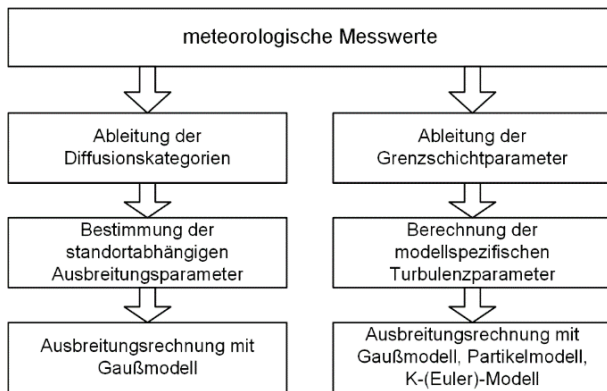


Bild 1. Schematische Gegenüberstellung zwischen der Turbulenzparametrisierung über Diffusionskategorien (links) und den Ansätzen auf der Basis der Ähnlichkeitstheorie (rechts)

In Abschnitt 5 werden allgemeine Grundlagen und Zusammenhänge zur messwertgestützten Ableitung von Grenzschichtparametern aufgeführt. In Abschnitt 6 wird dann explizit ein konkretes Grenzschichtmodell für den Einsatz in Ausbreitungsmodellen festgelegt. Abschnitt 7 gibt praktische Hinweise zur Anwendung des in Abschnitt 6 definierten Grenzschichtmodells.

In Anhang A ist die analytische Näherungslösung für das Windprofil gemäß Abschnitt 6 aufgeführt. Anhang B enthält Hintergrundinformationen zu den Parametrisierungen in Abschnitt 6 und Abschnitt 7. In Anhang C sind grafische Darstellungen der Vertikalprofile aus Abschnitt 6 aufgeführt. Anhang D enthält Evaluierungen und Validierungen zu dem in Abschnitt 6 festgelegten Grenzschichtmodell.

1 Anwendungsbereich

In dieser Richtlinie werden messwertgestützte Berechnungsmethoden für atmosphärische Kenngrößen (Turbulenz, Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Temperatur, Mischungsschichthöhe) dargestellt, die als Eingangsdaten für verschiedene Typen von Ausbreitungsmodellen (z.B. VDI 3945 Blatt 1 und Blatt 3) verfügbar sein müssen.

Hierbei wird von folgenden Vereinfachungen ausgegangen:

- Stationarität
- ebenes und homogenes Gelände
- Beschreibung der Oberflächenbeschaffenheit über eine mittlere Rauigkeitslänge und gegebenenfalls über eine Verdrängungshöhe
- Charakterisierung der Schichtungsstabilität über die Obukhov-Länge

lence parameterisation via diffusion categories and the similarity theory approach.

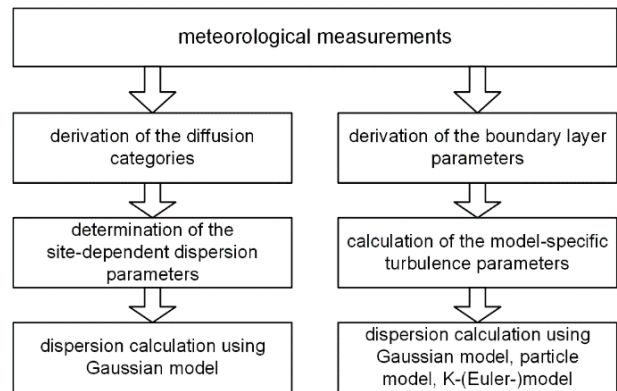


Figure 1. Schematic comparison between turbulence parameterisation via diffusion categories (left) and the similarity theory approach (right)

Section 5 discusses general principles and relationships for measurement-based derivation of boundary layer parameters. Section 6 defines explicitly a concrete boundary layer model for use in dispersion models. Section 7 provides practical information on the application of the boundary layer model defined in Section 6.

Annex A discusses the analytical approximate solution for the wind profile as per Section 6. Annex B provides background information on the parameterisations found in Section 6 and Section 7. Annex C provides graphic representations of the vertical profiles from Section 6. Annex D contains evaluations and validations for the boundary layer model defined in Section 6.

1 Scope

This standard discusses measurement-based calculation methods for atmospheric parameters (turbulence, wind velocity, wind direction, temperature, mixed layer height) which must be available as input data for various types of dispersion models (e.g. VDI 3945 Part 1 and Part 3).

The following simplifications are assumed:

- steady-state conditions
- even and homogeneous terrain
- description of surface texture through a mean roughness length and where relevant through a zero displacement height
- characterisation of the stratification stability using the Obukhov length

Neben der Topografie sollte auch die meteorologische Situation im Anwendungsgebiet im Mittel möglichst homogen sein. Insbesondere bei Vorliegen mesoskaliger Zirkulationsformen, z.B. Berg- und Talwinde, Land- und Seewindzirkulationen oder Fronten, können systematische Unterschiede zu den hier festgelegten Standardprofilen auftreten. Gegebenenfalls kann die Eignung der Profilansätze durch Vergleich mit einem dreidimensionalen Strömungsmodell geprüft werden.

Die angegebenen Profilkfunktionen für Wind und Turbulenz sind aus Annahmen und Messungen in der bodennahen atmosphärischen Grenzschicht abgeleitet worden. Im Bereich der Bestandsschicht sowie für größere Höhen werden pragmatische Ansätze gemacht, die gewährleisten, dass bei Anwendung der Profile die Ausbreitung im gesamten vertikalen Ausbreitungsraum beschrieben werden kann.

Die Parametrisierungen enthalten eine explizite Abhängigkeit von der Mittelungszeit der Messdaten. Die Mittelungszeit beträgt mindestens eine Minute und höchstens eine Stunde.

Generell ist zu beachten, dass das Ergebnis einer Ausbreitungsrechnung auf Basis dieser Parametrisierungen nicht eine reale Einzelsituation, sondern ein statistisches Mittel über die Realisierungen, die im Verlauf der Mittelungszeit auftreten können, beschreibt (Ensemblemittel). Daher kann z.B. aus den Ergebnissen nicht unmittelbar auf die Konzentrationsfluktuationen innerhalb der Mittelungszeit geschlossen werden. Bei kurzzeitigen Freisetzungen, etwa im Rahmen von Störfallrechnungen, ist ebenfalls zu beachten, dass die resultierenden Immissionsgrößen keine reale Einzelsituation, sondern in Bezug auf die gegebenen meteorologischen Bedingungen ein Ensemblemittel beschreiben.

In addition to the topography, the mean meteorological situation in the applicable region should also be as homogeneous as possible. Especially in the presence of mesoscale circulation forms, e.g. mountain and valley winds, land and sea breeze circulations or fronts, systematic deviations may occur from the standard profiles defined here. Where necessary, the suitability of the profile methods can be checked through comparison with a three-dimensional flow model.

The quoted profile functions for wind and turbulence were derived from assumptions and measurements in the near-ground atmospheric boundary layer. Within the canopy layer and for greater heights, pragmatic methods are provided which ensure that when using the profiles, the dispersion in the whole vertical dispersion space can be described.

The parameterisations contain an explicit dependence on the averaging period of the readings. This period is at least one minute and at most one hour.

In general, it should be noted that the result of a dispersion calculation based on these parameterisations describes not a real discrete situation but a statistical mean over the real events that may occur during the averaging period (ensemble mean). Therefore, it is impossible e.g. to draw from the results direct conclusions about the concentration fluctuations within the averaging period. In the event of short-term substance release, for example abnormal incident calculations, it should similarly be noted that the resulting immission values do not describe a real discrete situation, but only an ensemble mean by reference to the given meteorological conditions.