

VEREIN
DEUTSCHER
INGENIEURE

Umweltmeteorologie
Bodengebundene Fernmessung des Windvektors
und der Vertikalstruktur der Grenzschicht
Dopplersodar

VDI 3786

Blatt 11 / Part 11

Environmental meteorology
Ground-based remote sensing of the wind vector
and the vertical structure of the boundary layer
Doppler sodar

Ausg. deutsch/englisch
Issue German/English

*Der Entwurf dieser Richtlinie wurde mit Ankündigung im Bundesanzeiger einem öffentlichen Einspruchsverfahren unterworfen.
Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.*

*The draft of this standard has been subject to public scrutiny after announcement in the Bundesanzeiger (Federal Gazette).
The German version of this standard shall be taken as authoritative. No guarantee can be given with respect to the English translation.*

Inhalt	Seite	Contents	Page
Vorbemerkung	2	Preliminary note	2
Einleitung	3	Introduction	3
1 Anwendungsbereich	4	1 Scope	4
2 Normative Verweise	5	2 Normative references	5
3 Begriffe	6	3 Terms and definitions	6
4 Formelzeichen	6	4 Symbols	6
5 Grundlagen der Sodarmessung	9	5 Fundamental principles of sodar measurements	9
5.1 Ausbreitungsbedingungen für Schallwellen in der Atmosphäre	9	5.1 Propagation conditions for sound waves in the atmosphere	9
5.2 Sodargleichung	11	5.2 Sodar equation	11
5.3 Strahlbildung	12	5.3 Beam formation	12
5.4 Dopplereffekt	14	5.4 Doppler effect	14
5.5 Signalanalyse	16	5.5 Signal analysis	16
5.6 Doppler-Beam-Swinging-Verfahren (DBS)	17	5.6 Doppler beam swinging technique (DBS)	17
5.7 Messvolumen und Homogenitätsannahme	19	5.7 Measured volume and homogeneity assumption	19
5.8 Höhenzuordnung und Höhenauflösung	20	5.8 Height determination and height resolution	20
5.9 Reichweite	21	5.9 Range	21
5.10 Zeitauflösung	23	5.10 Temporal resolution	23
5.11 Genauigkeit und Auflösung der Geschwindigkeit	23	5.11 Accuracy and velocity resolution	23
6 Verfahrensmerkmale	26	6 Characteristics of the method	26
6.1 Messgrößen	26	6.1 Measured variables	26
6.2 Zielgrößen	26	6.2 Target values	26
6.3 Hilfsgrößen	27	6.3 Auxiliary quantities	27
6.4 Mittelung	27	6.4 Averaging	27
6.5 Definition der Verfahrenskenngrößen	28	6.5 Definition of method parameters	28

Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normenausschuss KRdL

Fachbereich Umweltmeteorologie

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

	Seite
7 Systemausführungen	31
7.1 Aktiver, akustischer Teil der Sodarantennen	32
7.2 Passiver, akustischer Teil der Sodarantennen	33
8 Messplanung und Anforderungen an den Einsatzort	33
9 Qualitätssicherung und Auswertung	36
9.1 Standortbewertung	36
9.2 Systemüberwachung und -störungen	37
9.3 Datenprüfungen	37
9.4 Wartung	38
9.5 Auswertung	38
10 Verfahrenskenngrößen ausgewählter Systeme	39
10.1 Systemklassifizierungen	39
10.2 Vergleichstests	39
10.3 Konventionsreichweite	40
11 Messbeispiele	40
11.1 Windprofil	40
11.2 Turbulenz	40
11.3 Mischungsschichthöhe	42
11.4 Chinook	43
11.5 Windenergie	44
11.6 Berg- und Talwind	44
11.7 Land- und Seewind	47
Anhang A Berechnung der Dopplerverschiebung	49
Anhang B Temperatur- und Feuchteabhängigkeit der Schallabsorption	52
Schrifttum	53

	Seite
7 System designs	31
7.1 Active acoustic part of the sodar antenna	32
7.2 Passive acoustic part of sodar antennas	33
8 Measurement planning and requirements relating to the operating site	33
9 Quality assurance and evaluation	36
9.1 Site evaluation	36
9.2 System monitoring and interference	37
9.3 Data auditing	37
9.4 Maintenance	38
9.5 Analysis	38
10 Characteristics of selected systems	39
10.1 System classification	39
10.2 Comparative tests	39
10.3 Standardised range	40
11 Measurement examples	40
11.1 Wind profile	40
11.2 Turbulence	40
11.3 Mixing layer height	42
11.4 Chinook	43
11.5 Wind energy	44
11.6 Mountain wind and valley wind	44
11.7 Land breeze and sea breeze	47
Annex A Doppler shift calculation	49
Annex B Temperature- and humidity-dependence of sound absorption	52
Bibliography	53

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

Die Richtlinienreihe VDI 3786 ist in mehrere Blätter gegliedert. Das vorliegende Blatt zu Dopplersodar-systemen ergänzt

- die in VDI 3786 Blatt 2 (Wind) und der Tabelle 3 von VDI 3786 Blatt 13 (Messstation) mitgeteilten Messverfahren bezüglich In-situ-Messungen der bodennahen horizontalen Windkomponenten,
- die in VDI 3786 Blatt 12 beschriebenen bodennahen Turbulenzmessungen mit Ultraschall-Anemometern bezüglich der Messung des Vertikalprofils der Turbulenz,
- die in VDI 3786 Blatt 14 (Dopplerlidar), Blatt 17 (Wind-Profil-Radar) und Blatt 18 (Radioakustische Sondierungssysteme – RASS) gemachten Angaben bezüglich bodengebundener Fernmessungen des Vertikalprofils des dreidimensionalen Windvektors.

Zu einer allgemeinen Übersicht über Wind- und Turbulenzmessverfahren siehe [1].

Die Abkürzung „Sodar“ leitet sich von Sonic Detection And Ranging¹⁾ her und ist in Analogie zu dem Begriff „Radar“ (Radio Detection And Ranging) gebildet. Mit Sodar werden Systeme bezeichnet, mit denen z. B.

- Vertikalprofile der drei Komponenten der mittleren Windgeschwindigkeit ($u(z)$, $v(z)$, $w(z)$),
- Vertikalprofile der Standardabweichung der vertikalen Windkomponente als Maß für die atmosphärische Turbulenz und
- Vertikalprofile der von kleinräumigen Temperaturgradienten abhängigen Rückstreuintensität

bestimmt werden. Das Messverfahren beruht auf der Aussendung gepulster akustischer Signale und dem Empfang der von der Atmosphäre an kleinen Temperaturgradienten reflektierten Anteile dieser Signale. Der Ort des Messvolumens wird aus der Abstrahlrichtung und der Laufzeit zwischen dem Aussenden des Sendesignals und dem Empfang des Streusignals bestimmt.

¹⁾ Die Abkürzung „Sodar“ wird mit „Sound Detection And Ranging“ oder mit „Sonic Detection And Ranging“ erklärt. Die Verwendung ist etwa gleich häufig. Dem Wortsinn nach erscheint die Wendung „Sonic Detection And Ranging“ eher angebracht, da es hier darum geht „mittels Schall“ (= „sonic“) und nicht den Schall (also eine Wellenart) selbst zu messen. Die Analogie zu „Radar“ ist ebenfalls gegeben, da der in der überwiegend üblichen und sinnvollen Erklärung „Radio Detection And Ranging“ vorkommende Begriff „Radio“ im englischen Sprachgebrauch auch eine Methode ist („mittels Radiowellen“) und nicht eine Wellenart. Es müsste sonst in der Erklärung „Radio wave Detection And Ranging“ heißen (was nur selten vorkommt). Widersprüchlich bleibt allerdings, dass „Sonar“ überwiegend mit „Sound Navigation And Ranging“ erklärt wird und „Lidar“ sich von „Light Detection And Ranging“ ableitet.

Introduction

The series of standards VDI 3786 is divided into several parts. This part dealing with Doppler sodar systems supplements

- the measurement method discussed in VDI 3786 Part 2 (Wind) and Table 3 in VDI 3786 Part 13 (Measuring station) regarding in-situ measurements of near-ground horizontal wind components,
- the near-ground turbulence measurements using ultrasound anemometers described in VDI 3786 Part 12 as regards measurement of the vertical profile of the turbulence,
- the information provided in VDI 3786 Part 14 (Doppler lidar), Part 17 (Wind profile radar) and Part 18 (Radio-acoustic sounding systems – RASS) regarding ground-based remote sensing of the vertical profile of the three-dimensional wind vector.

For a general overview of wind and turbulence measurement methods, see [1].

The abbreviation “sodar” derives from “sonic detection and ranging”¹⁾ and is analogous to radar (radio detection and ranging). Sodar systems are used to determine e. g.

- vertical profiles of the three components of the mean wind velocity ($u(z)$, $v(z)$, $w(z)$),
- vertical profiles of the standard deviation of the vertical wind components as a measure of atmospheric turbulence and
- vertical profiles of the backscatter intensity as a function of small-scale temperature gradients.

The measurement method relies on emitting pulsed acoustic signals and receiving the fraction of these signals that are reflected at small temperature gradients in the atmosphere. The location of the measured volume is determined from the direction of the emitted signal and the time interval between sending it and receiving the scattered signal.

¹⁾ The abbreviation “sodar” stands for “sound detection and ranging” or “sonic detection and ranging”. Both are used fairly equally. Literally, the expression “sonic detection and ranging” seems more appropriate, since the method involves measurement “by means of sound” (= “sonic”) rather than measurement of the sound (i.e. a type of wave) itself. This is analogous with “radar”, since in English the term “radio” in the usual phrase “radio detection and ranging” is also a method (“by means of radio waves”) and not a type of wave: otherwise the phrase should have been “radio wave detection and ranging” (which is seen only rarely). Inconsistently, however, “sonar” is usually written out in full as “sound navigation and ranging” and “lidar” derives from “light detection and ranging”.

Die ersten Sodarsysteme wurden 1946 konstruiert [2]. Zunächst wurden nur Rückstreuintensitäten in Form von Zeit-Höhen-Schnitten der Rückstreuintensität (z. B. als Faksimile-Plots) dargestellt (siehe z. B. [3]) und in Bezug auf die Vertikalstruktur der atmosphärischen Grenzschicht (z. B. Inversionen) ausgewertet. Für eine Echtzeitauswertung der Dopplerverschiebung zur Messung der Windgeschwindigkeit fehlten anfangs noch die notwendigen Computerressourcen, sodass diese erst ab 1964 vorgenommen wurden [4; 5]. Der weitere Ausbau der Dopplersodartechnik, der auch zur Entwicklung von Phased-Antenna-Systemen und Multifrequenz-Sodarsystemen führte, ist in der Literatur beschrieben (z. B. [6 bis 8]).

Erweitert man ein Sodarsystem um eine elektromagnetische Sondierungskomponente, so erhält man das in VDI 3786 Blatt 18 behandelte Doppler-RASS oder Sodar-RASS, das erstmals in [9] beschrieben wurde und das zusätzlich zum Wind- und Turbulenzprofil auch das Temperaturprofil erfassen kann. Bei der Planung der Fernmessung des Windprofils ist eine Abwägung zu treffen, ob ein Sodar, ein Windprofil-Radar (WPR-System, siehe VDI 3786 Blatt 17) oder ein Dopplerlidar (siehe VDI 3786 Blatt 14) eingesetzt werden soll. Die Vorteile des Sodars gegenüber den anderen beiden Verfahren liegen in

- der geringen unteren Messhöhe,
- der guten Höhenauflösung und
- der relativ einfachen Auswerteelektronik.

Nachteile des Sodars gegenüber den anderen beiden Verfahren sind

- die durch die Schallabsorption in der Luft begrenzte Höhenreichweite,
- die mögliche Beeinträchtigung der Messung durch Umgebungsgeräusche und
- die Lärmbelastigung durch die im hörbaren Bereich liegenden akustischen Signale.

Verglichen mit Messungen von Radiosonden, Fesselballonen und Messflugzeugen liegt der große Vorteil des Sodars und der anderen erwähnten bodengebundenen Fernmessverfahren in der zeitlich kontinuierlichen Verfügbarkeit von Profilmessungen.

1 Anwendungsbereich

Diese Richtlinie beschreibt die aktive, vertikale akustische Sondierung der Atmosphäre mit Dopplersodarsystemen, im Folgenden kurz Sodar genannt. Diese Sodarsysteme sind zur Erfassung folgender Eigenschaften der Atmosphäre bis zu mehreren 100 m Höhe über Grund geeignet:

- Windprofile
- Turbulenzprofile

The first sodar systems were built in 1946 [2]. To begin with, only backscatter intensities were displayed in the form of time-height sections of the backscatter intensity, e. g. as facsimile plots (see e. g. [3]), and analysed in terms of the vertical structure of the atmospheric boundary layer (e. g. inversions). At the time, the computer resources needed for real time analysis of the Doppler shift in order to measure the wind velocity were not yet available, and this was only done starting in 1964 [4; 5]. Further extension of Doppler sodar technology, which also led to the development of phased antenna systems and multi-frequency sodar systems, is described in the literature (e. g. [6 to 8]).

Adding an electromagnetic sounding component to a sodar system yields a Doppler RASS or sodar RASS, discussed in VDI 3786 Part 18 and first described in [9], which in addition to the wind and turbulence profile can also record the temperature profile. When planning the remote sensing of the wind profile, a decision has to be made whether a sodar, a wind profile radar (WPR system, see VDI 3786 Part 17) or a Doppler lidar (see VDI 3786 Part 14) should be used. The advantages of sodar compared with the other two methods are

- the small minimum measurement altitude,
- the good height resolution, and
- the relatively simple analysing electronics.

The disadvantages of sodar compared with the other two methods are

- the limited altitude range, due to sound absorption in the air,
- possible impairment of the measurement through ambient noises, and
- noise nuisance due to acoustic signals lying in the audible range.

Compared with measurements made by means of radiosondes, tethered balloons and aircraft, the great advantage of sodar and the other ground-based remote measuring methods listed above is the temporal continuous availability of profile measurements.

1 Scope

This standard describes the active, vertical acoustic sounding of the atmosphere with Doppler sodar systems, referred to below in brief as sodar. These sodar systems are suitable for recording of the following properties of the atmosphere up to an altitude of several hundred metres above ground level:

- wind profiles
- turbulence profiles

- Mischungsschichthöhe
- thermische Strukturen, z.B. Höhe von Inversionen

Besondere Bedeutung haben folgende Einsatzgebiete sowohl als Ersatz oder Ergänzung von Messungen mit meteorologischen Masten, Fesselballonen und Luftfahrzeugen:

- Ausbreitungsrechnung, z.B. für Genehmigungsverfahren nach BImSchG, 9. BImSchV, StrlSchV und TA Luft (Ausbreitungszeitreihen (TA Luft, Anhang 3 Nr. 1), Mischungsschichthöhe (TA Luft, Anhang 3 Nr. 8.5))
- Bereitstellung von Ausbreitungsparametern bei der Anlagenüberwachung (z.B. im kerntechnischen Bereich geregelt durch KTA 1508)
- Standortgutachten für den Immissionsschutz und Umweltverträglichkeitsprüfungen
- Flugsicherheit, z.B. Windscherung, Verlagerung von Wirbelschleppen, Advektion von Nebel
- Windenergie, z.B. Windenergiepotenzial, Leistungskennlinien, vertikale Windscherung
- Untersuchung des Vertikalaufbaus der atmosphärischen Grenzschicht
- astronomische Sicht

Anwendungsbeispiele, die diese Einsatzmöglichkeiten verdeutlichen, sind in Abschnitt 11 aufgeführt.

Diese Richtlinie beschreibt keine passive Sondierung und auch keine horizontale Sondierung (z.B. akustische Tomografie), die derzeit nur im Bereich der Forschung von Bedeutung sind. Weiterhin werden auch keine Sodar-Systeme mit räumlich getrennten Send- und Empfangsanlagen beschrieben, da diese wegen des deutlich erhöhten Aufwands bei Installation und Betrieb nicht verbreitet sind.

Sicherheitstechnische Probleme werden nicht behandelt. Hier wird auf einschlägige Normen und gesetzliche Vorgaben wie die EU-Lärmschutz-Richtlinie 2003/10/EG, BImSchG oder VDI 2058 Blatt 2 verwiesen. Besondere Frequenzzulassungsvorschriften sind im Gegensatz zum RASS nicht zu beachten.

Der Betreiber von Sodarssystemen muss darauf achten, dass die für den vorgesehenen Einsatzort und Zweck geltenden Vorschriften und Richtlinien eingehalten werden. Es wird auf das Schrifttum verwiesen.

2 Normative Verweise

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

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

- mixing layer height
- thermal structures, e.g. the height of inversions

The following applications are particularly important, either as a substitute for or to supplement measurements made using meteorological masts, tethered balloons and aircraft:

- dispersion calculations, e.g. for licensing procedures under BImSchG (German Federal Immission Safety Act), 9. BImSchV (9th German Federal Immission Safety Ordinance), StrlSchV (German Radiation Protection Ordinance) and TA Luft (dispersion time series (TA Luft, Annex 3 no. 1), mixing layer height (TA Luft, Annex 3 no. 8.5))
- preparation of dispersion parameters in facilities monitoring (e.g. regulated by KTA 1508 in the nuclear engineering field)
- site assessment for immission safety and environmental compatibility testing
- aviation safety, e.g. wind shear, displacement of wake turbulence, advection of fog
- wind energy, e.g. wind energy potential, power curves, vertical wind shear
- investigating the vertical structure of the atmospheric boundary layer
- astronomic visibility

Examples that illustrate these applications can be found in Section 11.

This standard does not describe passive sounding nor horizontal sounding (e.g. acoustic tomography), which currently are important only in research. Furthermore, it does not describe sodar systems with spatially separated transmitting and receiving systems, since these are not commonly encountered in installation and operation due to their significantly higher cost.

Safety issues are not discussed. The reader is referred to the relevant standards and statutory regulations such as the EU's Noise Directive 2003/10/EC, BImSchG or VDI 2058 Part 2. Unlike RASS, there are no special frequency licensing regulations that need to be observed.

Operators of sodar systems must ensure that the regulations and standards applicable to the envisaged site and purpose are observed. The reader is referred to the Bibliography.

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