

VEREIN
DEUTSCHER
INGENIEURE

Umweltmeteorologie
Bodengebundene Fernmessung
meteorologischer Parameter
Partikelrückstreulidar
Environmental meteorology
Ground-based remote sensing of
meteorological parameters
Particle backscatter lidar

VDI 3786

Blatt 19 / Part 19

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	5	1 Scope	5
2 Normative Verweise	6	2 Normative references	6
3 Begriffe	6	3 Terms and definitions	6
4 Formelzeichen und Abkürzungen	8	4 Symbols and abbreviations	8
5 Grundlage des Rückstreulidars	10	5 Fundamentals of the backscatter lidar	10
5.1 Einführung	10	5.1 Introduction	10
5.2 Auswahl geeigneter Wellenlängen	13	5.2 Choice of suitable wavelengths	13
5.3 Gedämpfter Rückstreuoeffizient	14	5.3 Attenuated backscatter coefficient	14
5.4 Rückstreuoeffizient	14	5.4 Backscatter coefficient	14
5.5 Partikelextinktionskoeffizient	22	5.5 Particle extinction coefficient	22
5.6 Lineares Depolarisationsverhältnis	22	5.6 Linear depolarisation ratio	22
5.7 Ångström-Exponent und Farbverhältnis	23	5.7 Ångström exponent and colour ratio	23
6 Zielgrößen und Verfahrensmerkmale	25	6 Target variables and method characteristics	25
6.1 Messgröße	25	6.1 Measurement variables	25
6.2 Primäre Zielgrößen	25	6.2 Primary target variables	25
6.3 Abgeleitete Zielgrößen	25	6.3 Derived target variables	25
6.4 Hilfsgrößen	27	6.4 Auxiliary variables	27
6.5 Definition der Verfahrenskenngrößen	29	6.5 Definition of performance characteristics	29
7 Systemkomponenten	37	7 System components	37
7.1 Strahlungsquelle(n)	37	7.1 Radiation source(s)	37
7.2 Sendeoptik	38	7.2 Transmitting optics	38
7.3 Empfangsoptik	38	7.3 Receiving optics	38
7.4 Filter	38	7.4 Filters	38
7.5 Detektoren	39	7.5 Detectors	39
7.6 Datenerfassung, Steuerung	41	7.6 Data acquisition, control system	41
7.7 Mechanisches Grundgerüst, Infrastruktur	41	7.7 Mechanical structure, infrastructure	41
7.8 Zusätzliche Systemkomponenten	42	7.8 Additional system components	42
7.9 Systemkomponenten typischer Ausführungsformen	42	7.9 System components of typical layouts	42

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

Fachbereich Umweltmeteorologie

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

Inhalt	Seite
8 Messplanung und Anforderungen an den Einsatzort	46
8.1 Allgemeine Hinweise	46
8.2 Anforderungen an Einsatzort und Messsystem	47
8.3 Anpassung des Messsystems an den Zustand der Atmosphäre	48
9 Einflussgrößen und Unsicherheitsbetrachtung	48
9.1 Unsicherheitsbetrachtung zu Partikelrückstreuoeffizienten	48
9.2 Unsicherheitsbetrachtung zum Depolarisationslidar	49
9.3 Einfluss von Druck und Temperatur der Atmosphäre	49
10 Qualitätssicherung und Systemüberwachung	50
10.1 Justierung	50
10.2 Funktionsprüfung	50
10.3 Wartung	51
10.4 Kalibrierung	51
10.5 Qualitätssicherung	51
11 Messbeispiele	53
11.1 Einfluss des Überlapps auf den Einsatzpunkt der Messung	53
11.2 Aerosolschichten	54
11.3 Zeitreihe des Partikelrückstreuoeffizienten nach <i>Klett</i>	55
11.4 Mehrwellenlängen-Lidar und Depolarisationslidar	56
11.5 Rückstreuoeffizient mit Kalibrierung an Wasserwolken	57
11.6 Rückstreuoeffizient mit relativer Kalibrierung	59
11.7 Wolkenuntergrenzen	59
11.8 Wolkenobergrenzen von optisch dünnen Wolken	59
11.9 Grenzschichthöhe, Mischungsschichthöhe (MLH)	62
Schrifttum	63

Contents	Page
8 Measurement planning and site requirements	46
8.1 General notes	46
8.2 Requirements relating to the site and the measurement system	47
8.3 Adapting the measurement system to atmospheric conditions	48
9 Factors and uncertainty considerations	48
9.1 Uncertainty considerations relating to particle backscatter coefficients	48
9.2 Uncertainty considerations relating to the depolarisation lidar	49
9.3 The effect of atmospheric pressure and temperature	49
10 Quality assurance and system monitoring	50
10.1 Adjustments	50
10.2 Functional tests	50
10.3 Maintenance	51
10.4 Calibration	51
10.5 Quality assurance	51
11 Measurement examples	53
11.1 Effect of the overlap on the measurement's onset point	53
11.2 Aerosol layers	54
11.3 Time series of the particle backscatter coefficient in accordance with <i>Klett</i>	55
11.4 Multi-wavelength lidar and depolarisation lidar	56
11.5 Backscatter coefficient with calibration at water clouds	57
11.6 Backscatter coefficient with relative calibration	59
11.7 Cloud bases	59
11.8 Upper boundaries of optically thin clouds	59
11.9 Boundary layer height, mixing layer height (MLH)	62
Bibliography	63

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.

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.

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.

Einleitung

Lidarsysteme („Light Detection And Ranging“) werden schon seit vielen Jahren für die Fernmessung von Luftverunreinigungen, verschiedenen meteorologischen Parametern wie Feuchte und Windgeschwindigkeit und von optischen Eigenschaften der Atmosphäre wie Partikelextinktionskoeffizient und Partikelrückstreuungskoeffizient eingesetzt. Der besondere Vorteil der Lidarverfahren besteht darin, dass sie orts aufgelöste Fernmessungen ermöglichen. Da elektromagnetische Strahlung des ultravioletten, sichtbaren oder infraroten Spektralbereichs zur Sondierung benutzt wird, sind die Messungen berührungslos und in beliebige Richtungen möglich. Damit sind Lidarsysteme für eine große Anzahl von Messaufgaben geeignet, die mit punktförmig messenden In-situ-Verfahren nicht adäquat gelöst werden können. Lidarsysteme können konventionelle, punktförmig messende Verfahren ergänzen. Anwendungsfelder sind z.B. Messungen, bei denen die orts aufgelöste Information wichtig ist; Messungen, bei denen große Areale und Raumwinkelbereiche schnell und repräsentativ abgetastet werden sollen; Messungen an Orten und in Richtungen, die der konventionellen Messung nur schwer zugänglich sind, z.B. in vertikaler Richtung. Anwendungsbeispiele, die diese Einsatzmöglichkeiten verdeutlichen, sind in Abschnitt 11 aufgeführt.

Seit den ersten Lidarmessungen in den 1960er-Jahren hat diese Messtechnik beträchtliche Fortschritte erzielt. Mittlerweile existieren für verschiedene Messaufgaben feldtaugliche, kommerzielle Systeme.

Diese Richtlinie beschreibt das auf der elastischen Streuung basierende Rückstreulidar. Seine Wirkungsweise wird erklärt und es wird dargestellt, wie belastbare Messergebnisse zu erhalten sind. Weiterhin werden Verfahrenskenngrößen angegeben sowie charakteristische Anwendungsbeispiele aufgezeigt. Sicherheitstechnische Probleme werden nicht detailliert behandelt, hier wird verwiesen auf einschlägige Normen wie

- DIN EN 60825-1 bzw. VDE 0837-1,
- DIN EN 55011 bzw. VDE 0875-11,
- DIN EN 61010-1 bzw. VDE 0411-1,
- DIN EN 61326-1 bzw. VDE 0843-20-1 oder
- DIN ISO 10109

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.

Introduction

Lidar (light detection and ranging) systems have been utilised for many years in the remote sensing of air pollution, of various meteorological parameters such as humidity and wind speed and of the optical properties of the atmosphere, such as particle extinction and particle backscatter coefficients. The special advantage of lidar methods consists in the fact that they permit spatially resolved remote sensing. Since electromagnetic radiation in the ultraviolet, visible or infrared spectral range is used for sounding, the measurements are non-contact and can be conducted in arbitrary directions. This makes lidar systems suitable for a large number of measurement tasks that cannot be carried out adequately with point-like measuring *in situ* methods. Lidar systems can complement conventional, point-like measuring methods. The applications include e.g. measurements where spatially-resolved information is important; measurements in which large areas and angular ranges are to be sampled rapidly and representatively; and measurements at sites and in directions that are difficult to access using conventional techniques, e.g. in the vertical direction. Examples that illustrate these applications are discussed in Section 11.

This technology has made considerable strides since the first lidar measurements in the 1960s. There now exist commercial systems that can be used in the field for a variety of measuring tasks.

This standard describes the backscatter lidar, which is based on elastic scattering. It explains the lidar's mode of operation and discusses how reliable results can be obtained. In addition, the method's parameters are described and typical applications discussed. Technical security issues are not covered in detail; the reader is referred to relevant standards such as

- DIN EN 60825-1 and VDE 0837-1,
- DIN EN 55011 and VDE 0875-11,
- DIN EN 61010-1 and VDE 0411-1,
- DIN EN 61326-1 and VDE 0843-20-1, or
- DIN ISO 10109,

sowie auf Gesetze, Verordnungen und Verwaltungsvorschriften wie

- 26. BImSchV,
- BEMFV,
- OStrV oder
- BGV B 11.

Die Richtlinienreihe VDI 3786 besteht aus folgenden Blättern:

- | | |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Blatt 1 | Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Grundlagen |
| Blatt 1.1 | Umweltmeteorologie; Bodengebundene Fernmessung meteorologischer Parameter; Grundlagen (in Vorbereitung) |
| Blatt 2 | Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen für Fragen der Luftreinhaltung; Wind |
| Blatt 3 | Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Lufttemperatur |
| Blatt 4 | Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Luftfeuchte |
| Blatt 5 | Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Strahlung |
| Blatt 6 | Meteorologische Messungen für Fragen der Luftreinhaltung; Trübung der bodennahen Atmosphäre; Normsichtweite |
| Blatt 7 | Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Niederschlag |
| Blatt 8 | Meteorologische Messungen für Fragen der Luftreinhaltung; Aerologische Messungen |
| Blatt 9 | Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Visuelle Wetterbeobachtungen |
| Blatt 11 | Umweltmeteorologie; Bodengebundene Fernmessung des Windvektors und der Vertikalstruktur der Grenzschicht; Dopplersodar |
| Blatt 12 | Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Turbulenzmessung mit Ultraschall-Anemometern |
| Blatt 13 | Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Messstation |
| Blatt 16 | Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Luftdruck |
| Blatt 17 | Umweltmeteorologie; Bodengebundene Fernmessung des Windvektors; Wind-Profil-Radar |
| Blatt 18 | Umweltmeteorologie; Bodengebundene Fernmessung der Temperatur; Radioakustische Sondierungssysteme (RASS) |

and to laws, regulations and administrative provisions such as

- 26. BImSchV (26th Federal Immission Safety Ordinance: Electromagnetic Fields),
- BEMFV (Ordinance on Limiting Electromagnetic Fields),
- OStrV (Industrial Safety Ordinance on Artificial Visible Radiation), and
- BGV B 11 (Occupational Insurance Health & Safety Regulations: Electromagnetic Fields).

The series of standards VDI 3786 consists of the following parts:

- | | |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Part 1 | Environmental meteorology; Meteorological measurements; Fundamentals |
| Part 1.1 | Environmental meteorology; Ground-based remote sensing of meteorological parameters; Fundamentals (in preparation) |
| Part 2 | Environmental meteorology; Meteorological measurements concerning questions of air pollution; Wind |
| Part 3 | Environmental meteorology; Meteorological measurements; Air temperature |
| Part 4 | Environmental meteorology; Meteorological measurements; Air humidity |
| Part 5 | Environmental meteorology; Meteorological measurements; Radiation |
| Part 6 | Meteorological Measurements of Air Pollution; Turbidity of Ground-Level Atmosphere Standard Visibility |
| Part 7 | Environmental meteorology; Meteorological measurements; Precipitation |
| Part 8 | Environmental meteorology; Meteorological measurements; Aerological measurements |
| Part 9 | Environmental meteorology; Meteorological measurements; Visual weather observations |
| Part 11 | Environmental meteorology; Ground-based remote sensing of the wind vector and the vertical structure of the boundary layer; Doppler sodar |
| Part 12 | Environmental meteorology; Meteorological measurements; Turbulence measurements with sonic anemometers |
| Part 13 | Environmental meteorology; Meteorological measurements; Measuring station |
| Part 16 | Environmental meteorology; Meteorological measurements; Atmospheric pressure |
| Part 17 | Environmental meteorology; Ground-based remote sensing of the wind vector; Wind profiler radar |
| Part 18 | Environmental meteorology; Ground-based remote sensing of temperature; Radio-acoustic sounding systems (RASS) |

- Blatt 19** Umweltmeteorologie; Bodengebundene Fernmessung meteorologischer Parameter; Partikelrückstreulidar
- Blatt 20 Umweltmeteorologie; Bodengebundene Fernmessung des Niederschlags; Wetterradar
- Blatt 21 Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Verdunstung
- Blatt 22 Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Meteorologische Messungen mit unbemannten Flugobjekten (UAV) (in Vorbereitung)
- Blatt 23 Umweltmeteorologie; Bodengebundene Fernmessung meteorologischer Größen; Mikrowellenradiometer (in Vorbereitung)

Eine Liste der aktuell verfügbaren Blätter dieser Richtlinienreihe ist im Internet abrufbar unter www.vdi.de/3786.

In weiteren Normen und Richtlinien werden die folgenden Fernmessverfahren standardisiert:

- DIN ISO 28902-1
- DIN ISO 28902-2
- DIN ISO 19926-1
- VDI 4210 Blatt 1

1 Anwendungsbereich

Diese Richtlinie beschreibt die Bestimmung höhenaufgelöster Profile der Rückstreuung der Atmosphäre mittels aktiver optischer Sondierung. Aus den Messdaten lassen sich folgende Eigenschaften der Atmosphäre bis zu mehreren Kilometern über Grund ableiten:

- Wolkenuntergrenzen
- Wolkenoberkanten von optisch dünnen Wolken
- Ober- und Untergrenzen sowie innerer Strukturen von Partikelschichten:
 - Höhe von thermischen Strukturen, z. B. Inversionen
 - Grenzschichthöhe, Mischungsschichthöhe (bei geeigneten Bedingungen)
- Partikelrückstreuoeffizienten
- Extinktionskoeffizient (erfordert zusätzliche Annahmen)

Weiterhin werden das Depolarisationslidar und der Mehrwellenlängeneinsatz behandelt. Dies ermöglicht die Bestimmung weiterer Parameter:

- Partikelgrößenklassifizierung (Ångström-Exponent, Farbverhältnis)
- Formklassifizierung (linearer Depolarisationsgrad)

- Part 19** Environmental meteorology; Ground-based remote sensing of meteorological parameters; Particle backscatter lidar
- Part 20 Environmental meteorology; Ground-based remote sensing of precipitation; Weather radar
- Part 21 Environmental meteorology; Meteorological measurements; Evaporation
- Part 22 Environmental meteorology; Meteorological measurements; Meteorological measurements with unmanned aerial vehicles (UAV) (in preparation)
- Part 23 Environmental Meteorology; Ground-based remote sensing of meteorological parameters; Microwave radiometers (in preparation)

A catalogue of all available parts of this series of standards can be accessed on the Internet at www.vdi.de/3786.

The following remote sensing methods are standardised in further documents:

- DIN ISO 28902-1
- DIN ISO 28902-2
- DIN ISO 19926-1
- VDI 4210 Part 1

1 Scope

This standard describes the determination of height-resolved profiles of atmospheric backscattering by means of active optical sounding. The measurements allow the following properties of the atmosphere up to several kilometres above ground to be derived:

- cloud bases
- upper boundaries of optically thin clouds
- upper and lower boundaries and internal structures of particle layers:
 - the height of thermal structures, e. g. inversions
 - boundary layer height, mixing layer height (under suitable conditions)
- backscatter coefficients of the particles
- extinction coefficient (requires further assumptions)

The standard goes on to discuss the depolarisation lidar and the use of multi-wavelength systems. This allows further parameters to be determined:

- particle size classification (Ångström exponent, colour ratio)
- shape classification (linear depolarisation degree)

Besondere Bedeutung haben folgende Einsatzgebiete:

- Überwachung der Luftqualität (vertikale Struktur der Grenzschicht)
- Flugsicherheit (Wolkenuntergrenze)
- Partikelgehalt und -transport (z.B. Vulkanstaub)
- Wettervorhersage- und Klimamodellierung (z.B. atmosphärische Grenzschicht, Wolkenuntergrenze)
- Satellitenfernerkundung (Validierung)

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

Diese Richtlinie beschreibt keine erweiterten Lidartechniken, die folgende Effekte quantitativ erfassen: inelastische Streueffekte (Raman-Streuung), Dopplerverschiebung, Mehrfachstreuung, Modulationstechniken und spektrale Trennung von Molekül- und Partikelrückstreuung (High Spectral Resolution Lidar – HSRL). Einige dieser erweiterten Lidartechniken wurden bereits oder werden in weiteren Blättern dieser VDI-Richtlinienreihe und der Normreihe DIN ISO 28902 beschrieben. Die Richtlinie behandelt nicht die Besonderheiten von flugzeuggetragenen oder satellitengestützten Systemen sowie nicht die von scannenden Systemen.

2 Normative Verweise

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

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

The following fields of application are particularly important:

- air quality monitoring (vertical structure of the boundary layer)
- aviation safety (cloud base)
- particle content and transport (e.g. volcanic dust)
- weather forecasting and climate modelling (e.g. atmospheric boundary layer, cloud base)
- satellite remote sensing (validation)

Examples that illustrate these applications are discussed in Section 11.

This standard does not describe extended lidar techniques that capture the following effects quantitatively: inelastic scattering effects (Raman scattering), Doppler shift, multiple scattering, modulation techniques and spectral separation of molecular and particle backscattering (HSRL = high spectral resolution lidar). Some of these extended techniques have already been or will be described in other parts of this VDI Series of Standards and the DIN ISO 28902 series. This standard does not deal with the special features of airborne or satellite-aided systems nor those of scanning systems.

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