

DIN ISO 28902-2

Diese Norm ist Bestandteil des VDI/DIN-Handbuches Reinhaltung der Luft, Band 5.

ICS 07.060

**Luftqualität –
Umweltmeteorologie –
Teil 2: Bodengebundene Fernmessung des Windes mittels heterodyn
gepulstem Doppler-Lidar (ISO 28902-2:2017)**

Air quality –
Environmental meteorology –
Part 2: Ground-based remote sensing of wind by heterodyne pulsed Doppler lidar
(ISO 28902-2:2017)

Qualité de l'air –
Météorologie de l'environnement –
Partie 2: Télédétection du vent par lidar Doppler pulsé hétérodyne basée sur le sol
(ISO 28902-2:2017)

Gesamtumfang 50 Seiten

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

Inhalt

	Seite
Nationales Vorwort.....	4
Nationaler Anhang NA (informativ) Literaturhinweise	5
Vorwort	6
Einleitung	7
1 Anwendungsbereich.....	8
2 Normative Verweisungen	8
3 Begriffe	8
4 Grundlagen von heterodyn gepulsten Doppler-Lidarsystemen.....	11
4.1 Übersicht.....	11
4.2 Überlagerungsempfang.....	13
4.3 Spektralanalyse.....	15
4.4 Zielgrößen	17
4.5 Quellen für Rauschen und Unsicherheiten	17
4.5.1 Schrotrauschen am lokalen Oszillator.....	17
4.5.2 Empfängerrauschen.....	18
4.5.3 Relatives Intensitätsrauschen (en: relative intensity noise, RIN).....	18
4.5.4 Speckle.....	18
4.5.5 Laserfrequenz	19
4.6 Entfernungsbestimmung	19
4.7 Bekannte Einschränkungen.....	19
5 Systemspezifikationen und Prüfungen.....	20
5.1 Systemspezifikationen.....	20
5.1.1 Sendercharakteristika.....	20
5.1.2 Sender-/Empfängercharakteristika	21
5.1.3 Signalabtastungsparameter	21
5.1.4 Ausrichtungscharakteristika des Systems	22
5.2 Zusammenhang zwischen Charakteristika und Leistung des Systems.....	24
5.2.1 Leistungsmerkmal.....	24
5.2.2 Zeit-Bandbreiten-Austauschbeziehung.....	25
5.3 Präzision und Verfügbarkeit von Messungen	25
5.3.1 Messgenauigkeit der Radialgeschwindigkeit.....	25
5.3.2 Datenverfügbarkeit	26
5.3.3 Maximale Reichweite zur Ableitung der Windgeschwindigkeit	26
5.4 Prüfverfahren	27
5.4.1 Allgemeines	27
5.4.2 Validierung der Radialgeschwindigkeitsmessung.....	27
5.4.3 Beurteilung der Genauigkeit durch Vergleichsversuche mit anderen Geräten	29
5.4.4 Validierung der maximalen Reichweite zur Ableitung der Windgeschwindigkeit.....	31
6 Messplanung und Installationsanweisungen.....	33
6.1 Anforderungen an den Einsatzort	33
6.2 Grenzbedingungen für den allgemeinen Betrieb.....	34
6.3 Wartung und Funktionsprüfung.....	34
6.3.1 Allgemeines	34
6.3.2 Wartung	34

6.3.3 Funktionsprüfung	34
6.3.4 Unsicherheit.....	34
Anhang A (informativ) Kontinuierlich emittierendes Doppler-Windlidar.....	36
Anhang B (informativ) Erfassung des Windvektors.....	37
Anhang C (informativ) Anwendungen.....	42
Anhang D (informativ) Typische Einsatzbereiche und entsprechende Anforderungen.....	47
Literaturhinweise.....	49

Nationales Vorwort

Dieses Dokument enthält die deutsche Übersetzung der Internationalen Norm ISO 28902-2:2017, die vom Technischen Komitee ISO/TC 146, „Air quality“, Unterkomitee SC 5, „Meteorology“, Arbeitsgruppe WG 6, „Lidar“ erarbeitet wurde, deren Sekretariate von DIN (Deutschland) gehalten werden.

An der Erstellung dieser Norm waren die deutschen Experten der Arbeitsgruppe NA 134-02-01-022 UA „Bodengebundene Fernmessung meteorologischer Größen“ des Fachbereiches II „Umweltmeteorologie“ der VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) — Normenausschuss maßgeblich beteiligt.

Das in der vorliegenden Norm beschriebene Verfahren basiert auf der Richtlinie VDI 3786 Blatt 14 „Umweltmeteorologie — Bodengebundene Fernmessung des Windvektors — Doppler-Wind-Lidar“. Hinweise zu weiteren nationalen technischen Regeln zu Fernmessverfahren für die Überwachung der Luftqualität können dem Nationalen Anhang entnommen werden.

Für die in diesem Dokument zitierten internationalen Dokumente wird im Folgenden auf die entsprechenden deutschen Dokumente hingewiesen:

IEC 60825-1	siehe	DIN EN 60825-1 (VDE 0837-1)
IEC 61400-12-1:2005	siehe	DIN EN 61400-12-1 (VDE 0127-12-1):2007-02
ISO 28902-1	siehe	DIN ISO 28902-1
ISO/DIS 28902-3:2017	siehe	E DIN ISO 28902-3:2018-01

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

Folgende DIN-Normen und VDI-Richtlinien zu Fernmessverfahren für die Überwachung der Luftqualität sind bereits erschienen:

DIN ISO 28902-1, *Luftqualität — Umweltmeteorologie — Teil 1: Bodengebundene Fernmessung der Sichtweite mit Lidar*

E DIN ISO 28902-3:2018-01, *Luftqualität — Umweltmeteorologie — Teil 3: Bodengebundene Fernmessung des Windes mittels Dauerstrich-Doppler-Lidar (ISO/DIS 28902-3:2017)*

DIN EN 15483, *Luftqualität — Messungen in der bodennahen Atmosphäre mit FTIR-Spektroskopie*

DIN EN 16253, *Luftqualität — Messungen in der bodennahen Atmosphäre mit der aktiven Differentiellen Optischen Absorptionsspektroskopie (DOAS) — Immissionsmessungen und Messungen von diffusen Emissionen*

DIN EN 60825-1 (VDE 0837-1), *Sicherheit von Lasereinrichtungen — Teil 1: Klassifizierung von Anlagen und Anforderungen*

DIN EN 61400-12-1 (VDE 0127-12-1):2007-02, *Windenergieanlagen — Teil 12-1: Messung des Leistungsverhaltens einer Windenergieanlage (IEC 61400-12-1:2005); Deutsche Fassung EN 61400-12-1:2006*

VDI 3786 Blatt 11, *Umweltmeteorologie — Bodengebundene Fernmessung des Windvektors und der Vertikalstruktur der Grenzschicht — Dopplersodar*

VDI 3786 Blatt 17, *Umweltmeteorologie — Bodengebundene Fernmessung des Windvektors — Wind-Profil-Radar*

VDI 3786 Blatt 18, *Umweltmeteorologie — Bodengebundene Fernmessung der Temperatur — Radioakustische Sondierungssysteme (RASS)*

VDI 3786 Blatt 19, *Umweltmeteorologie — Bodengebundene Fernmessung von meteorologischen Parametern — Partikelrückstreulidar*

VDI 3786 Blatt 20, *Umweltmeteorologie — Bodengebundene Fernmessung des Niederschlags — Wetterradar*

VDI 4210 Blatt 1, *Fernmessverfahren — Messungen in der Atmosphäre nach dem Lidar-Prinzip — Messen gasförmiger Luftverunreinigungen mit dem DAS-Lidar*

Folgende VDI-Richtlinien sind in Vorbereitung:

VDI 3786 Blatt 1.1, *Umweltmeteorologie — Bodengebundene Fernmessung von meteorologischen Parametern — Grundlagen*

VDI 3786 Blatt 23, *Umweltmeteorologie — Bodengebundene Fernmessung von meteorologischen Parametern — Mikrowellenradiometer*

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung nationaler Normungsorganisationen (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird üblicherweise von Technischen Komitees von ISO durchgeführt. Jede Mitgliedsorganisation, die Interesse an einem Thema hat, für welches ein Technisches Komitee gegründet wurde, hat das Recht, in diesem Komitee vertreten zu sein. Internationale staatliche und nichtstaatliche Organisationen, die in engem Kontakt mit ISO stehen, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet bei allen elektrotechnischen Themen eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) zusammen.

Die Verfahren, die bei der Entwicklung dieses Dokuments angewendet wurden und die für die weitere Pflege vorgesehen sind, werden in den ISO/IEC-Direktiven, Teil 1 beschrieben. Es sollten insbesondere die unterschiedlichen Annahmekriterien für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten beachtet werden. Dieses Dokument wurde in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC-Direktiven, Teil 2 erarbeitet (siehe www.iso.org/directives).

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren. Details zu allen während der Entwicklung des Dokuments identifizierten Patentrechten finden sich in der Einleitung und/oder in der ISO-Liste der erhaltenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname dient nur zur Unterrichtung der Anwender und bedeutet keine Anerkennung.

Eine Erläuterung zum freiwilligen Charakter von Normen, der Bedeutung ISO-spezifischer Begriffe und Ausdrücke in Bezug auf Konformitätsbewertungen, sowie Informationen darüber, wie ISO die Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO) hinsichtlich technischer Handelshemmnisse (TBT) berücksichtigt, enthält der folgende Link: www.iso.org/iso/foreword.html.

Dieses Dokument wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 146, *Air quality*, Unterkomitee SC 5, *Meteorology*, und von der World Meteorological Organization (WMO) als eine gemeinsame ISO/WMO-Norm im Rahmen der Vereinbarung zur Zusammenarbeit erarbeitet, die von WMO und ISO im Jahr 2008 unterzeichnet wurde.

Eine Auflistung aller Teile der Normenreihe ISO 28902 ist auf der ISO-Internetseite abrufbar.

Einleitung

Lidarsysteme (en: light detection and ranging, Lidar) – steht im Anwendungsbereich dieses Dokuments für Lidarsysteme in der Atmosphäre – haben sich in der Praxis für folgende Bereiche bewährt: die Fernmessung von Luftverunreinigungen, die Messung verschiedener meteorologischer Parameter, z. B. Wolken, Aerosole, Gase und (wenn die Dopplertechnik verfügbar ist) Wind. Da elektromagnetische Strahlung zur Sondierung von Zielen benutzt wird, sind die Messungen berührungslos und in beliebige Richtungen möglich. Lidarsysteme ergänzen somit die konventionelle In-situ-Messtechnik. Sie sind für eine große Anzahl von Anwendungen geeignet, die mit In-situ-Verfahren oder punktförmig messenden Verfahren nicht angemessen gelöst werden können.

Es gibt mehrere Verfahren, um zur Bestimmung des atmosphärischen Windes Lidarsysteme zu verwenden. Die vier üblicherweise eingesetzten Verfahren sind gepulstes und kontinuierlich emittierendes Doppler-Windlidar, Direktempfang-Doppler-Windlidar und Resonanz-Doppler-Windlidar (häufig verwendet für Messungen der mesosphärischen Natrium-Schicht). Weiterführende Literatur siehe Literaturhinweise [1] und [2].

Dieses Dokument beschreibt die Verwendung von heterodyn gepulsten Doppler-Lidarsystemen. Einige allgemeine Informationen zu kontinuierlich emittierenden Doppler-Lidarsystemen können Anhang A entnommen werden. Eine internationale Norm zu diesem Verfahren wird vorbereitet.

1 Anwendungsbereich

In diesem Dokument werden Anforderungen und Leistungsprüfverfahren an die heterodyn gepulste Doppler-Lidartechnik festgelegt und die Vorteile und Grenzen des Verfahrens vorgestellt. Der Begriff „Doppler-Lidar“, der in diesem Dokument verwendet wird, gilt nur für heterodyn gepulste Lidarsysteme, die Windmessungen über die Streuung von Laserlicht an Aerosolen in der Atmosphäre ermitteln. Die Beschreibung der Leistungsfähigkeit und Grenzen erfolgt auf Basis von atmosphärischen Normalbedingungen.

In diesem Dokument wird die Bestimmung der Strahlachsen-Windgeschwindigkeit (Radialwindgeschwindigkeit) beschrieben.

ANMERKUNG Die Ableitung des Windvektors aus einzelnen Strahlachsenmessungen wird in diesem Dokument nicht beschrieben, da dies für eine bestimmte Windlidarkonfiguration äußerst spezifisch ist. Ein Beispiel für die Ermittlung des Windvektors ist Anhang B zu entnehmen.

Dieses Dokument behandelt nicht die Ermittlung des Windvektors.

Dieses Dokument kann für folgende Anwendungsbereiche eingesetzt werden:

- Wetterberatung, z. B. für Luftfahrt, Flughafensicherheit, Marineeinsätze und Ölplattformen;
- Windkraftausbeute, z. B. Standortbewertung und Bestimmung von Leistungskennlinien;
- Routinemessungen von Windprofilen an meteorologischen Stationen;
- Überwachung der Ausbreitung von Luftverschmutzung;
- industrielles Risikomanagement (direkte Datenüberwachung oder durch Aufnahme in mikroskalige Strömungsmodelle);
- Austauschprozesse (Treibhausgasemissionen).

Dieses Dokument ist an Hersteller von heterodyn gepulsten Doppler-Lidarsystemen sowie an Institute, die die Konformität der Systeme prüfen und zertifizieren, gerichtet. Des Weiteren stellt dieses Dokument Empfehlungen für die Anwender zur angemessenen Nutzung dieser Messgeräte bereit.

2 Normative Verweisungen

Es gibt keine normativen Verweisungen in diesem Dokument.

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- IEC Electropedia: unter <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online Browsing Platform: unter <http://www.iso.org/obp>

3.1**Datenverfügbarkeit**

Verhältnis zwischen den tatsächlich betrachteten Messdaten mit einer vorher festgelegten Datenqualität und der Anzahl der erwarteten Messdaten während einer vorgegebenen *Messdauer* (3.10)

3.2**angezeigte Entfernungsauflösung**

konstantes räumliches Intervall zwischen den Zentren von zwei aufeinanderfolgenden *Entfernungsintervallen* (3.13)

Anmerkung 1 zum Begriff: Die angezeigte Entfernungsauflösung ist ebenfalls die Größe eines Entfernungsintervalls auf dem Display. Sie ist durch die Länge des Entfernungsintervalls und die Überlappung von aufeinanderfolgenden Intervallen festgelegt.

3.3**effektive Entfernungsauflösung**

anwendungsbezogene Größe zur Beschreibung eines integrierten Entfernungsintervalls, für das die Zielgröße mit einer definierten Unsicherheit bereitgestellt wird

[QUELLE: ISO 28902-1:2012, 3.14]

3.4**effektive zeitliche Auflösung**

anwendungsbezogene Größe zur Beschreibung eines integrierten Zeitintervalls, für das die Zielgröße mit einer definierten Unsicherheit bereitgestellt wird

[QUELLE: ISO 28902-1:2012, 3.12, modifiziert]

3.5**Extinktionskoeffizient**

α

Maß für die Lufttrübung, ausgedrückt als natürlicher Logarithmus des Verhältnisses von einfallender Lichtintensität zu transmittierter Lichtintensität, je Einheit Lichtweglänge

[QUELLE: ISO 28902-1:2012, 3.10]

3.6**Integrationszeit**

benötigte Zeit, um die Strahlachsen-Windgeschwindigkeit abzuleiten

3.7**maximale Erfassungsreichweite**

R_{MaxA}

maximale Reichweite bis zu der das Lidarsignal aufgenommen und verarbeitet wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Sie hängt von der Anzahl der Erfassungspunkte und der Abtastfrequenz ab.

3.8**geringste Erfassungsreichweite**

R_{MinA}

geringste Reichweite aus der das Lidarsignal aufgenommen und verarbeitet wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Falls die geringste Erfassungsreichweite nicht angegeben ist, wird sie mit Null angenommen. Sie kann sich von Null unterscheiden, wenn der Empfang während der Pulsaussendung „blind“ ist.

3.9

maximale Reichweite zur Ableitung der Windgeschwindigkeit

R_{MaxO}

maximale Reichweite, bei der eine gesicherte Windgeschwindigkeit von dem Lidarsignal abgeleitet werden kann

Anmerkung 1 zum Begriff: Die maximale Reichweite zur Ableitung der Windgeschwindigkeit ist kleiner oder gleich der maximalen Erfassungsreichweite.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die maximale Reichweite zur Ableitung der Windgeschwindigkeit ist entlang einer für die Anwendung definierten Achse festgelegt. Sie wird vertikal für vertikal ausgerichtete Wind-Profiler gemessen. Sie wird horizontal für abtastende Lidargeräte gemessen, die in der Lage sind, in der gesamten Hemisphäre zu messen.

Anmerkung 3 zum Begriff: Die maximale Reichweite zur Ableitung der Windgeschwindigkeit kann durch Anhebung der Messdauer und/oder Herabstufung der Entfernungsauflösung vergrößert werden.

Anmerkung 4 zum Begriff: Die maximale Reichweite zur Ableitung der Windgeschwindigkeit hängt von den Lidarparametern aber auch von den atmosphärischen Bedingungen ab.

3.10

Messdauer

Zeitintervall zwischen der ersten und der letzten Messung

3.11

kleinste Reichweite zur Ableitung der Windgeschwindigkeit

R_{MinO}

kleinste Reichweite, bei der eine gesicherte Windgeschwindigkeit von dem Lidarsignal abgeleitet werden kann

Anmerkung 1 zum Begriff: Die kleinste Reichweite zur Ableitung der Windgeschwindigkeit wird auch als „Blindreichweite“ bezeichnet.

Anmerkung 2 zum Begriff: Bei gepulsten Lidarsystemen wird die kleinste Reichweite zur Ableitung der Windgeschwindigkeit durch das Streulicht im Lidarsystem während der Pulsaussendung durch die Tiefenschärfe oder durch die Schaltzeit des Detektors beim Senden/Empfangen eingeschränkt. Dies kann von der Pulsdauer (T_p) und der Breite des Entfernungsintervalls (en: range gate width, RGW) abhängen.

3.12

physikalische Entfernungsauflösung

Breite (Halbwertsbreite) der *Entfernungsgewichtungsfunktion* (3.15)

3.13

Entfernungsintervall

Breite (FWHM) der Gewichtungsfunktion, bei der die Punkte in den Zeitfolgen für die spektrale Auswertung und Windgeschwindigkeitsberechnung ausgewählt werden

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Messdistanz bezieht sich auf die Mitte des Entfernungsintervalls.

Anmerkung 2 zum Begriff: Das Entfernungsintervall ist festgelegt durch die Zahl der diskreten Abschnitte oder äquivalenter Abstände bei dem Entfernungsintervall.

3.14

Entfernungsauflösung

gerätebezogene Größe zur Beschreibung des kürzesten Entfernungsintervalls, über das unabhängige Signalinformationen empfangen werden können

[QUELLE: ISO 28902-1:2012, 3.13]

3.15**Entfernungsgewichtungsfunktion**

Gewichtungsfunktion der Radialwindgeschwindigkeit entlang der Strahlachse

3.16**zeitliche Auflösung**

gerätebezogene Größe zur Beschreibung des kürzesten Zeitintervalls, über das unabhängige Signalinformationen erhalten werden können

[QUELLE: ISO 28902-1:2012, 3.11]

3.17**systematische Geschwindigkeitsabweichung**

maximaler Geräte-Offset bei Geschwindigkeitsmessungen

Anmerkung 1 zum Begriff: Die systematische Geschwindigkeitsabweichung sollte durch entsprechende Kalibrierung, z. B. an einem festen Ziel, minimiert werden.

3.18**Geschwindigkeitsbereich**

Bereich, festgelegt durch die geringste messbare Windgeschwindigkeit, durch die maximal messbare Windgeschwindigkeit und durch die Bedingung, das Geschwindigkeitsvorzeichen eindeutig zu messen

Anmerkung 1 zum Begriff: Abhängig von der Lidaranwendung kann der Geschwindigkeitsbereich anhand der Radialwindgeschwindigkeit (abtastendes Lidar) oder anhand der horizontalen Windgeschwindigkeiten (Wind-Profiler) festgelegt sein.

3.19**Geschwindigkeitsauflösung**

gerätebezogene Standardabweichung der Geschwindigkeit

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Geschwindigkeitsauflösung hängt von der Pulsdauer, dem Träger-Rausch-Verhältnis und der Integrationszeit ab.

3.20**Scherwind**

Änderung der Windgeschwindigkeit über einer Ebene senkrecht zur Windrichtung

4 Grundlagen von heterodyn gepulsten Doppler-Lidarsystemen**4.1 Übersicht**

Ein gepulstes Doppler-Lidarsystem sendet einen schmalen Laserpulsstrahl aus (siehe Bild 1). Während seiner Ausbreitung in der Atmosphäre, wird die Laserstrahlung von den Aerosolen und Molekülen in alle Richtungen gestreut. Ein Teil der gestreuten Strahlung kehrt in das Lidarsystem zurück, wird von einem Teleskop erfasst, detektiert und analysiert. Da sich die Aerosole und Moleküle mit der Atmosphäre bewegen, resultiert eine Doppler-Verschiebung in der Frequenz des gestreuten Laserlichts.

Bei den für das heterodyne, kohärente Doppler-Lidarsystem relevanten Wellenlängen (und somit Frequenzen), stellt das Aerosolsignal das wesentliche Ziel für die Messung des zurückgestreuten Signals dar.

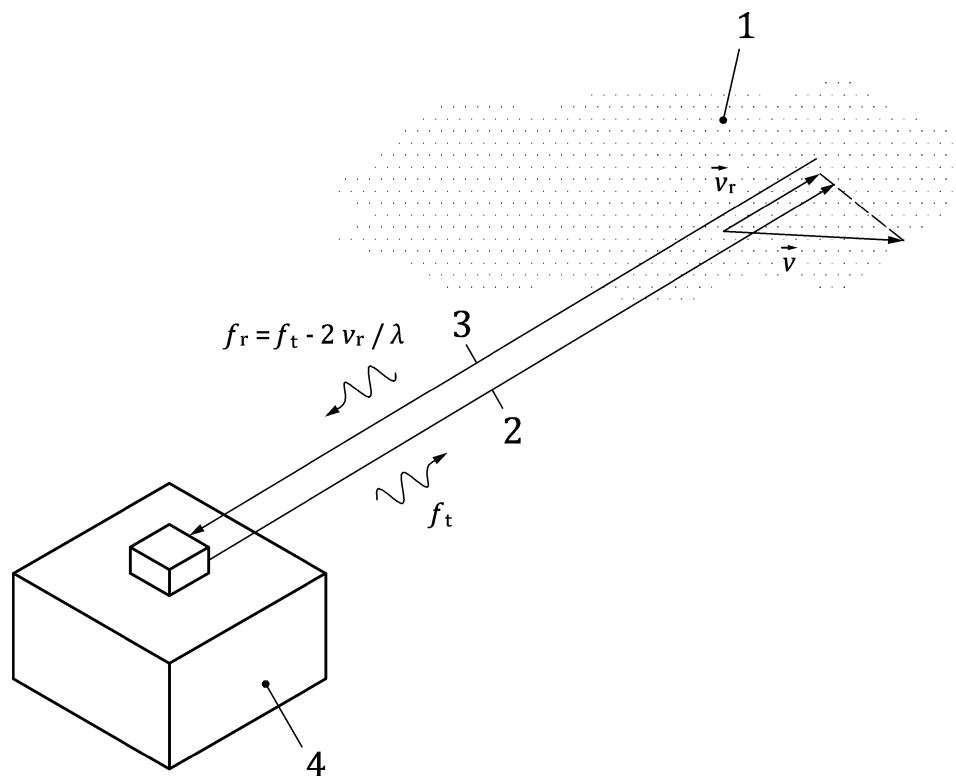
Die Analyse zielt darauf ab, die Differenz, Δf , zwischen den Frequenzen des ausgesandten Laserpulses, f_t , und des zurückgestreuten Lichts, f_r , zu messen. Nach der Doppler-Gleichung ist diese Differenz proportional zu der Strahlachsen-Windkomponente, wie in Gleichung (1) gezeigt:

$$\Delta f = f_r - f_t = -2v_r/\lambda \quad (1)$$

Dabei ist

λ die Laserwellenlänge;

v_r die Strahlachsen-Windkomponente (Komponente des Windvektors, $\vec{v}$, entlang der Achse des Laserstrahls; mit positivem Vorzeichen, wenn der Wind vom Lidarsystem weg weht).



Legende

- 1 vom Wind getragene zurückstreuende Partikel
- 2 optischer Strahlengang des ausgesandten Laserpulses (Laserstrahl)
- 3 optische Achse des Empfängers
- 4 Lidar-Messgerät

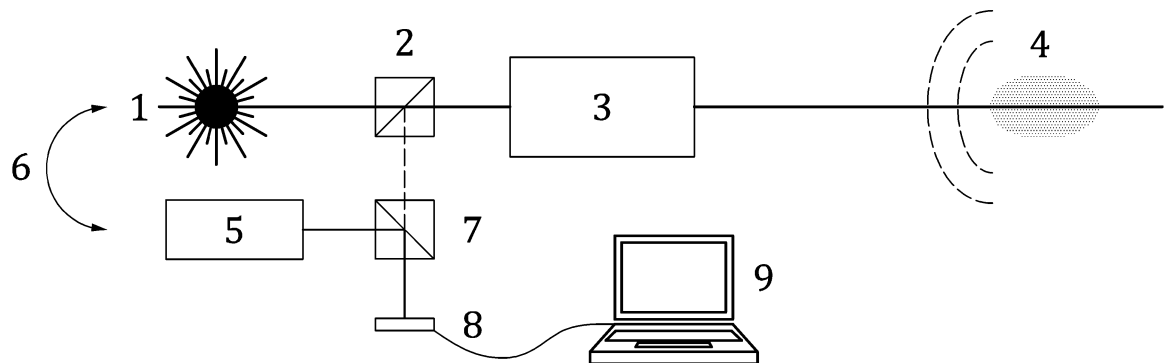
Bild 1 — Messprinzip eines heterodyn gepulsten Doppler-Lidarsystems

Die Messung ist entfernungs aufgelöst, da die zur Zeit t empfangene zurückgestreute Strahlung nach der Aussendung des Laserpulses vom Lidar zu den Aerosolen (in der Entfernung x) und zurück zum Lidar mit Lichtgeschwindigkeit c gelaufen ist. Gleichung (2) zeigt die lineare Beziehung zwischen Entfernung und Zeit.

$$x = c \cdot \frac{t}{2} \quad (2)$$

4.2 Überlagerungsempfang

In einem heterodynen Lidarsystem ist die Detektion des Lichts, das vom empfangenden Teleskop erfasst wird (bei Frequenz $f_r = f_t + \Delta f$), schematisch in Bild 2 beschrieben. Das empfangene Licht wird mit dem Strahl eines äußerst stabilen, kontinuierlich emittierenden Lasers, eines sogenannten „lokalen Oszillators“ überlagert. Die Summe der beiden elektromagnetischen Wellen – zurückgestreute und die vom lokalen Oszillator – wird mithilfe eines Quadratur-Detektors in ein elektrisches Signal konvertiert (hierbei wird ein elektrischer Strom erzeugt, der proportional zur Leistung der elektromagnetischen Welle ist, die die empfindliche Oberfläche des Detektors beleuchtet). Ein analoger Hochpass-Filter wird dann angewendet, um die Signalanteile mit niedrigen Frequenzen zu eliminieren.



Legende

- 1 gepulster Laser
- 2 optisches Element, das das empfangene und ausgesandte Licht trennt
- 3 Teleskop (benötigt für Aussendung und Empfang)
- 4 Streuer
- 5 Laser als lokaler Oszillator (kontinuierlich emittierender Laser)
- 6 Frequenzstabilisierung (dieses Gerät stellt die Differenz $f_t - f_{lo}$ ein)
- 7 optisches Element zur Ausrichtung des Strahls des lokalen Oszillators entlang der optischen Achse des empfangenen Lichts und deren Überlagerung
- 8 Quadratur-Detektor
- 9 Analog-Digital-Wandler und Verarbeitungseinheit für die digitalen Signale

Bild 2 — Schematische Darstellung des Überlagerungsempfangs

Daraus resultiert ein Strom $i(t)$, bei der Radiofrequenz $f_t + \Delta f - f_{lo}$:

$$i(t) = \frac{2 \cdot \frac{\eta \cdot e}{h \cdot f_t} \cdot K \cdot \xi(t) \cdot \sqrt{\gamma(t) \cdot P_r(t) \cdot P_{lo}} \cdot \cos[2\pi(\Delta f + f_t - f_{lo}) \cdot t + \varphi(t)] + n(t)}{i_{het}(t)} \quad (3)$$

Dabei ist

- t die Zeit;
- h das Plancksche Wirkungsquantum;
- η die Quantenausbeute des Detektors;
- e die elektrische Ladung eines Elektrons;
- K die Gerätekonstante, die die Übertragungsverluste durch den Empfänger berücksichtigt;

- $\xi(t)$ die zufallsbedingte Modulation der Signalamplitude durch den „Speckle Effekt“ (siehe 4.5.2);
- $\gamma(t)$ der Überlagerungswirkungsgrad;
- $P_r(t)$ die Leistung des zurückgestreuten Lichts;
- P_{lo} die Leistung des lokalen Oszillators;
- f_{lo} die Frequenz des lokalen Oszillators;
- $\varphi(t)$ die zufallsbedingte Phase;
- $n(t)$ das weiße Empfangsrauschen;
- $i_{het}(t)$ das Überlagerungssignal.

Der Überlagerungswirkungsgrad $\gamma(t)$ ist ein Maß für die Qualität der optischen Überlagerung des zurückgestreuten Lichts und der Wellenfelder des lokalen Oszillators auf der Empfänger Oberfläche. Er kann den Wert 1 nicht übersteigen. Für einen guten Überlagerungswirkungsgrad werden eine sorgfältige Bemessung und eine Ausrichtung des lokalen Oszillators auf die zurückgestreuten Wellen benötigt. Optische Überlagerungsbedingungen werden im Literaturhinweis [3] behandelt. Der Überlagerungswirkungsgrad ist nicht eine reine Gerätefunktion sondern hängt auch von der turbulenten Änderung des Brechungsindex (C_n^2) entlang des Laserstrahls ab (siehe Literaturhinweis [4]). Bei starker atmosphärischer Turbulenz reduziert die Wirkung der Änderung des Brechungsindex den Überlagerungswirkungsgrad. Dies kann vorkommen, wenn das Lidarsystem an einem warmen, sonnigen Tag in Bodennähe betrieben wird.

In Gleichung (4) wird $P_r(t)$ als momentane Leistung des zurückgestreuten Lichts wiedergegeben. Dies resultiert aus der Lidargleichung (siehe Literaturhinweis [3]).

$$P_r(t) = A \cdot \int_0^{+\infty} x^{-2} \cdot G(x) \cdot g\left(t - \frac{2x}{c}\right) \cdot \beta(x) \cdot \tau^2(x) dx \quad (4)$$

mit

$$\tau(x) = \exp\left[-\int_0^x \alpha(\zeta) d\zeta\right]$$

Dabei ist

- x die Entfernung zum Lidarsystem;
- A die aktive Fläche des empfangenden Teleskops;
- $G(x)$ die entfernungsabhängige Empfindlichkeitsfunktion ($0 \leq G(x) \leq 1$), bei der z. B. die Abschwächung des Empfängerwirkungsgrads bei kurzen Entfernungen zur Vermeidung der Sättigung des Empfängers in Betracht gezogen wird;
- $g(t)$ die Hüllkurve der Laserpulsleistung ($\int g(t) dt = E_0$, mit E_0 als Energie des Laserpulses);
- $\beta(x)$ der Rückstreukoeffizient des beprobten Ziels in der Atmosphäre;
- $\tau(x)$ der atmosphärische Transmissionsgrad als Funktion des Extinktionskoeffizienten, α .

4.3 Spektralanalyse

Die Ableitung einer Radialgeschwindigkeit aus Überlagerungssignalen erfordert eine Frequenzanalyse. Dies erfolgt im Digitalbereich nach der Analog-Digital-Umwandlung von Überlagerungssignalen. Eine Übersicht zur Durchführung ist in Bild 3 wiedergegeben. Die Frequenzanalyse erfolgt in einem Zeitfenster $(t, t + \Delta t)$ und wird für eine konfigurierbare Zahl, N , von Pulsen des Lidars wiederholt. Das Fenster definiert ein Entfernungsintervall $(x, x + \Delta x)$ mit $x = c \cdot t / 2$ und $\Delta x = c \cdot \Delta t / 2$. N ist gekoppelt mit der Integrationszeit, $t_{\text{int}} = 1/f_{\text{PRF}}$, der Messung (f_{PRF} ist die Pulswiederholfrequenz). Die Signalanalyse besteht darin, dass die Leistungsdichtefunktionen der Signale jedes Entfernungsintervalls gemittelt werden. Zur Schätzung der zentralen Frequenz des Signalpeaks wird eine Frequenzschätzung vorgenommen. Es handelt sich um eine Schätzung, $\hat{f}_{\text{het}}$, oder die Frequenz, $f_{\text{het}} = \Delta f + f_t - f_{\text{lo}}$, des Überlagerungssignals (siehe Bild 3).

Aufgrund der Analog-Digital-Wandlung ist das von der Frequenzanalyse ermittelte Frequenzintervall auf $(0, +F_s/2)$ oder $(-F_s/2, +F_s/2)$ für komplex gewertete Signale begrenzt. Dies grenzt die geringsten und maximalen Wert von $\hat{f}_{\text{het}}$ und somit das Intervall messbarer Radialgeschwindigkeiten ein. Wie in Literaturhinweis [5] aufgezeigt, erfolgt die Schätzung des mittleren Entfernungsintervalls der wahren Radialwindgeschwindigkeit nach Gleichung (5):

$$\hat{v}_r = -\frac{\lambda}{2} (\hat{f}_{\text{het}} - f_t + f_{\text{lo}}) \quad (5)$$

Beispielsweise im Falle, dass das Signal reell gewertet ist (keine komplexe Demodulation), ist der Frequenz-Offset $f_t - f_{\text{lo}}$ auf etwa $F_s/4$, eingestellt, damit gilt $|\hat{v}_r| \leq \lambda F_s/8$. Alternativ fordert eine Systemspezifikation, die die Möglichkeit der Messung von Radialwinden von bis zu v_{max} erforderlich macht, $F_s \geq 8v_{\text{max}}/\lambda$.

Der mittlere „Kern“ ist die lineare Überlagerungsfunktion zwischen Pulsprofil und Profil der Entfernungsintervalle. Dessen Länge ist abhängig vom Puls-Empfangsbereich in der Atmosphäre Δr [siehe Gleichung (6)], vom Entfernungsintervall Δx und dem Wichtungsfaktor, κ . Dabei ist κ das Verhältnis zwischen der Breite des Intervalls bei halbem Maximum (Halbwertsbreite) und Δx .

$$\Delta r = \frac{c \cdot T_p}{2} \quad (6)$$

Dabei ist

T_p die Halbwertsbreiten-Dauer der momentanen Laserpulsintensität, $g(t)$.

Die Entfernungsauflösung, ΔR , ist definiert als Halbwertsbreite des mittleren „Kerns“. Für einen Gauß-Puls und ein ungewichtetes Entfernungsintervall ergibt sich ΔR nach Gleichung (7) [6]:

$$\Delta R = \frac{c}{2} \cdot \frac{\Delta t}{\text{erf}\left(\frac{\sqrt{\pi} \cdot \Delta t}{2T_p}\right)} = \frac{\Delta x}{\text{erf}\left(\frac{\sqrt{\pi} \cdot \Delta x}{2\Delta r}\right)} \quad (7)$$

Für einen Gauß-Puls und ein nach Gauß gewichtetes Entfernungsintervall ist ΔR nach Gleichung (8):

$$\Delta R = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{T_p^2 + (\kappa \cdot \Delta t)^2} = \sqrt{\Delta r^2 + (\kappa \cdot \Delta x)^2} \quad (8)$$