

DIN ISO 28902-3

Diese Norm ist Bestandteil des VDI/DIN-Handbuches Reinhaltung der Luft, Band 1b.

ICS 07.060

Einsprüche bis 2018-02-01

Entwurf

**Luftqualität –
Umweltmeteorologie –
Teil 3: Bodengebundene Fernmessung des Windes mittels
Dauerstrich-Doppler-Lidar (ISO/DIS 28902-3:2017);
Text Deutsch und Englisch**

Air quality –
Environmental meteorology –
Part 3: Ground-based remote sensing of wind by continuous-wave Doppler lidar
(ISO/DIS 28902-3:2017);
Text in German and English

Qualité de l'air –
Météorologie de l'environnement –
Partie 3: Télédétection du vent par lidar Doppler à ondes entretenues basée sur le sol
(ISO/DIS 28902-3:2017);
Texte en allemand et anglais

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2017-12-01 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an krdl@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an die VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) - Normenausschuss, 40002 Düsseldorf, Postfach 10 11 39, VDI-Platz 1, 40468 Düsseldorf.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 50 Seiten

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

Inhalt

	Seite
Nationales Vorwort.....	3
Vorwort	4
Einleitung	5
1 Anwendungsbereich.....	6
2 Begriffe	6
3 Grundlagen des heterodynem Doppler-Lidars.....	9
3.1 Übersicht.....	9
3.2 Überlagerungsempfang.....	10
3.3 Spektralanalyse.....	13
3.4 Zielgrößen.....	15
3.5 Quellen für Rauschen und Unsicherheiten	15
3.5.1 Schottrauschen am lokalen Oszillator.....	15
3.5.2 Empfängerrauschen.....	16
3.5.3 Relatives Intensitätsrauschen (RIN)	16
3.5.4 Speckle.....	16
3.5.5 Laserfrequenz.....	16
3.6 Entfernungsbestimmung.....	16
3.7 Bekannte Einschränkungen.....	17
4 Systemspezifikationen und Prüfungen.....	18
4.1 Systemspezifikationen.....	18
4.1.1 Laserwellenlänge.....	18
4.1.2 Sender-/Empfängercharakteristika	18
4.1.3 Ausrichtungscharakteristika des Systems	18
4.2 Leistungskennzahlen	20
4.3 Präzision und Verfügbarkeit von Messungen	20
4.3.1 Messgenauigkeit der Radialgeschwindigkeit.....	20
4.3.2 Datenverfügbarkeit	20
4.3.3 Maximale Reichweite zur Ableitung der Windgeschwindigkeit	21
4.4 Prüfverfahren	21
4.4.1 Festzielecho	21
4.4.2 Beurteilung der Genauigkeit durch Vergleichsversuche mit anderen Geräten	21
4.4.3 Validierung der maximalen Reichweite zur Ableitung der Windgeschwindigkeit.....	23
5 Messplanung und Installationsanweisungen.....	24
5.1 Anforderungen an den Einsatzort.....	24
5.2 Grenzbedingungen für den allgemeinen Betrieb.....	24
5.3 Wartung und Funktionsprüfung	24
5.3.1 Allgemeines	24
5.3.2 Wartung	24
5.3.3 Funktionsprüfung.....	25
5.3.4 Unsicherheit	25
Literaturhinweise.....	26

Nationales Vorwort

ISO 28902-3 wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 146 „Luftbeschaffenheit“, Unterkomitee SC 5 „Meteorologie“, in der Arbeitsgruppe WG 6 „Lidar“ erarbeitet. Die Obmannschaft und das Sekretariat liegen bei Deutschland.

An der Erstellung dieser Norm waren die deutschen Experten des Unterausschusses NA 134-02-01-22 UA „Bodengebundene Fernmessung meteorologischer Parameter“ des Fachbereiches II „Umweltmeteorologie“ der VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) – Normenausschuss maßgeblich beteiligt.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung des Norm-Entwurfs beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfs gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

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* ausgearbeitet.

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

Einleitung

Lidarsysteme (en: „Light Detection And Ranging“) – 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, wie z. B. Wolken, Aerosolen, Gasen und (wenn die Dopplertechnik verfügbar ist) Wind. Umfassende optische und physikalische Eigenschaften der abgetasteten Ziele, wie Größenverteilung, chemische Zusammensetzung, Partikelform, Gaskonzentration und optische Eigenschaften der Atmosphäre, wie Sicht, Extinktion und Rückstreuung können unter Verwendung von Lidarsystemen bestimmt werden. Atmosphärische Ziele, wie die oben genannten, können räumlich entlang ihrer Strahlachse aufgelöst werden, z. B. indem der Dauerstrichstrahl auf den gewählten spezifischen Bereich gerichtet wird. 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 Dauerstrich-Doppler-Windlidar, Direkttempfang-Doppler-Windlidar und Resonanz-Doppler-Windlidar (häufig verwendet für Messungen der mesosphärischen Natrium-Schicht). Für weitere Informationen wird auf die Literaturhinweise [1] und [2] verwiesen.

Dieser Teil der ISO 28902 beschreibt die Verwendung von Dauerstrich Doppler-Lidarsystemen.

1 Anwendungsbereich

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

In diesem Dokument wird die Bestimmung der Strahlachsen-Windgeschwindigkeit¹⁾ (Radialwindgeschwindigkeit) beschrieben.

Dieses Dokument behandelt nicht die Ermittlung des Windvektors.

Diese Internationale Norm kann für folgende Anwendungsbereiche eingesetzt werden:

- Wetterberatung, z. B. für Flüge, Flughafensicherheit, Marineeinsätze, Ölplattformen;
- Windkraftausbeute, z. B. Anlagenbewertung, Bestimmung der Leistungskennlinien;
- Routinemessungen von Windprofilen an meteorologischen Stationen;
- Überwachung der Luftverschmutzungsausbreitung;
- industrielles Risikomanagement (direkte Datenüberwachung oder durch Aufnahme in die mikroskaligen Strömungsmodelle);
- Austauschprozesse (Treibhausgasemissionen).

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

2 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>

2.1 Datenverfügbarkeit
Verhältnis der tatsächlich betrachteten Messdaten mit einer vorher festgelegten Datenqualität dividiert durch die Anzahl der erwarteten Messdaten während einer *vorgegebenen Messdauer* (3.10)

Anmerkung 1 zum Begriff: In der Windindustrie wird dieser Begriff gemeinhin auf über einen genormten Zeitraum von 10 Minuten gemittelte Messungen angewendet.

[QUELLE: ISO 28902-2:2017, 3.1, geändert]

2.2 angezeigte Entfernungsauflösung
Räumliches Intervall zwischen den Zentren von zwei aufeinanderfolgenden Entfernungsmessungen

1) Die Ableitung des Windvektors aus einzelnen Strahlachsenmessungen wird in dieser Internationalen Norm nicht beschrieben, da dies für eine bestimmte Wind-Lidarkonfiguration äußerst spezifisch ist. Ein Beispiel für die Ermittlung des Windvektors ist ISO 28902-2, Anhang B, zu entnehmen.

2.3

effektive Entfernungsauflösung

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

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

2.4

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, geändert]

2.5

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, geändert]

2.6

Integrationszeit

benötigte Zeit, um einen unabhängigen Wert der Strahlachsen-Windgeschwindigkeit abzuleiten

2.7

maximale Erfassungsreichweite

R_{MaxA}

maximale Entfernung, bei der das Lidarsignal aufgenommen und verarbeitet werden kann

Anmerkung 1 zum Begriff: Dies ist vor allem von der Laserwellenlänge und der Transmitteraperturgröße ab sowie in gewissem Maße von den Erfassungspunkten und der Abtastfrequenz

2.8

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.

[QUELLE: ISO 28902-2:2017, 3.8]

2.9

maximale Reichweite zur Ableitung der Windgeschwindigkeit

R_{MaxO}

maximale Entfernung, bei der eine Windgeschwindigkeit gesichert vom 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 hängt von den Lidarparametern aber auch von den atmosphärischen Bedingungen und insbesondere vom Extinktionskoeffizienten ab.

2.10

Messdauer

Zeitintervall zwischen der ersten und der letzten Messung

[QUELLE: ISO 28902-2:2017, 3.10]

2.11

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 Dauerstrich-Lidaren wird die kleinste Reichweite durch die am nächsten liegende Position des Fokus bestimmt, die vom optischen Sender-Empfängersystem erreicht werden kann.

2.12

physikalische Entfernungsauflösung

Breite (Halbwertsbreite) der *Entfernungsgewichtungsfunktion* (3.15)

[QUELLE: ISO 28902-2:2017, 3.12]

2.13

Abtastlänge

Die Breite (FWHM) der räumlichen Gewichtungsfunktion, die die Region im Raum auswählt, die zur Windgeschwindigkeitsberechnung beiträgt

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Abtastlänge bezieht sich auf die Mitte der Messentfernung.

2.14

Entfernungsauflösung

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

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

2.15

Entfernungsgewichtungsfunktion

Gewichtungsfunktion der Radialwindgeschwindigkeit entlang der Strahlachse

[QUELLE: ISO 28902-2:2017, 3.15]

2.16

zeitliche Auflösung

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

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

2.17

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.

[QUELLE: ISO 28902-2:2017, 3.17]

2.18

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.

[QUELLE: ISO 28902-2:2017, 3.18]

2.19

Geschwindigkeitsauflösung

gerätebezogene Standardabweichung der Geschwindigkeit

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Geschwindigkeitsauflösung wird durch die Binbreite der Signalverarbeitung bestimmt.

2.20

Scherwind

Änderung der Windgeschwindigkeit über einer Ebene senkrecht zur Windrichtung

[QUELLE: ISO 28902-2:2017, 3.20]

3 Grundlagen des heterodyn Doppler-Lidars

3.1 Übersicht

Ein CW-Doppler-Lidarsystem sendet einen schmalen Laserstrahl aus (siehe Bild 1). Da sich dieser in der Atmosphäre ausbreitet, wird die Laserstrahlung von den Aerosolen und Molekülen und anderen streuenden Materialien in alle Richtungen gestreut. Ein Teil der gestreuten Strahlung kehrt in das Lidarsystem zurück, wird von einem Teleskop erfasst, bestimmt und analysiert. Da sich die Aerosole und Moleküle mit der Atmosphäre bewegen, resultiert eine Doppler-Verschiebung aus der Frequenzänderung des gestreuten Laserlichts.

Bei den für das kohärente, heterodyn arbeitende Doppler-Lidarsystem relevanten Wellenlängen (und somit Frequenzen), stellen Aerosole das wesentliche Ziel für die Messung des zurückgestreuten Signals dar.

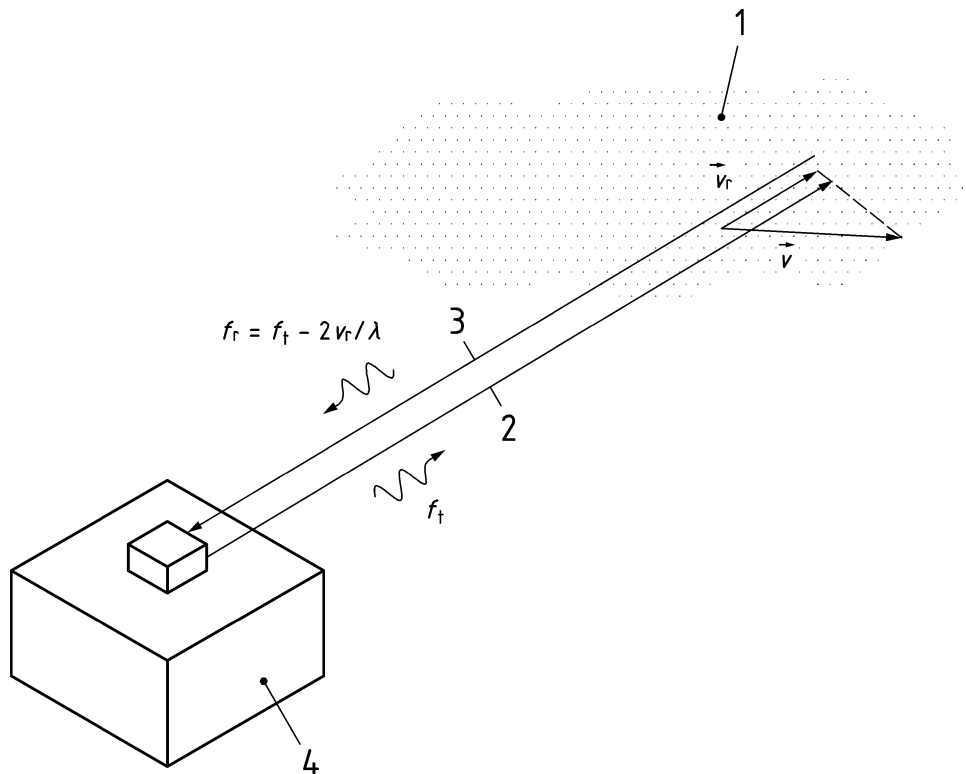
Die Analyse zielt darauf ab, die Differenz Δf zwischen den Frequenzen f_t des ausgesandten Laserpulses und f_r des zurückgestreuten Lichts zu messen. Nach der Doppler-Gleichung ist diese Differenz proportional zu der Strahlachsen-Windkomponente:

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

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

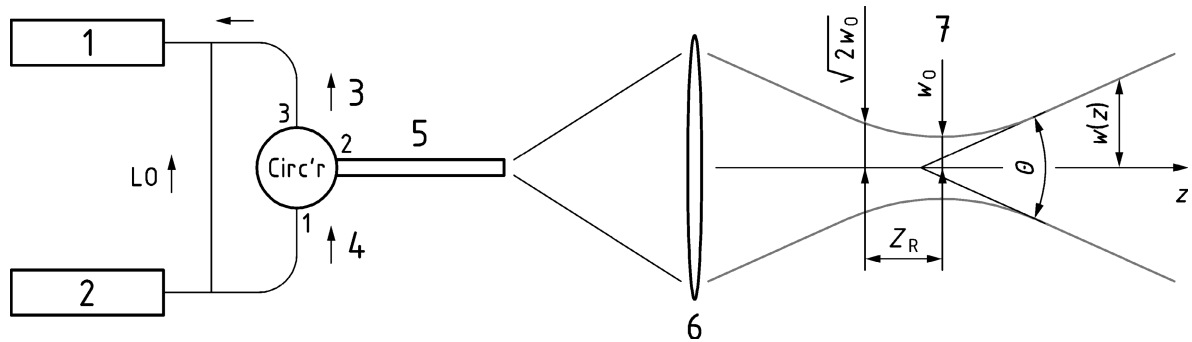
- 1 vom Wind getragene zurückstreuende Partikel
- 2 optischer Strahlengang des ausgesandten Laserstrahls
- 3 optische Achse des Empfängers
- 4 Lidar-Messgerät

Bild 1 — Messprinzip eines heterodyn Doppler-Lidars

Bei einem CW-Doppler-Lidarsystem wird der Messbereich in der Regel durch Fokussierung des Strahls bestimmt, um in der gewählten Entfernung eine Gürtellinie zu erstellen. Licht, das von diesen Regionen in nächster Nähe zur Gürtellinie zurückgestreut wird, wird effektiv im Empfänger wieder abgebildet; Licht aus einer wesentlich näheren oder größeren Entfernung zur Gürtellinie oder zum Fokus wird ineffizient erfasst.

3.2 Überlagerungsempfang

In einem mit Überlagerungsempfang arbeitenden Lidar-System ist die Bestimmung 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 frequenzstabilen, 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 eine elektrische Signalstromstärke erzeugt, die proportional zur Leistung der elektromagnetischen Welle ist, die die aktive Oberfläche des Detektors beleuchtet. Ein analoger Hochpass-Filter eliminiert dann die Signalanteile mit niedrigen Frequenzen und ein Tiefpassfilter verhindert Aliasing-Probleme, die in der anschließenden Signalverarbeitung verursacht werden.



Legende

- 1 Empfänger
- 2 Laser
- 3 Lichtempfang
- 4 Lichtdurchlass
- 5 Einmodenfaser
- 6 Sende/Empfängeröffnung
- 7 Gaußprofil des Sendestrahls und des BPLO

Bild 2 — Grundsätze des Überlagerungsempfangs anhand einer beispielhaften CW-Lidar-Architektur und Fokuseometrie. Bei einem Gaußschen Strahl, der nicht abgeschnitten ist, ist die axiale Verschiebung der Empfindlichkeit eine Lorentz-Funktion (10), zentriert an der Strahlgürtellinie, wobei HWHM durch die Entfernung, über die sich der Strahlbereich verdoppelt (Rayleigh-Bereich Z_R) gegeben ist

Daraus resultiert ein Strom $i(t)$, bei der Radiofrequenz $f_t + \Delta f - f_{lo}$ (siehe Gleichung (8) in [3]):

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

Dabei ist

- t die Zeit;
- η die Quantenausbeute des Detektors;
- e die elektrische Ladung eines Elektrons;
- h das Planck'sche Wirkungsquantum;
- K die Gerätekonstante, die die Übertragungsverluste durch den Empfänger berücksichtigt;
- $\xi(t)$ die zufallsbedingte Modulation der Signalamplitude durch den "Speckle Effekt" (siehe Abschnitt 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 in [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 [4]). Bei starker atmosphärischer Turbulenz reduziert die Wirkung der Änderung des Brechungsindex den Überlagerungswirkungsgrad. Dies kann vorkommen, wenn das Lidar an einem warmen, sonnigen Tag in Bodennähe betrieben wird.

Für ein kohärentes CW-System ist der zeitliche Mittelwert der optischen Signalleistung, P_S , die von den Aerosolen in den Empfänger zurückgestreut wird, durch eine gute Näherung gegeben [5];[6] von:

$$P_S = \pi P_T \beta(\pi) \lambda \quad (3)$$

dabei ist P_T die ausgesandte Laserleistung und $\beta(\pi)$ der Rückstreuoeffizient der Atmosphäre in $\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}$. Es ist anzumerken, dass P_S sowohl vom Fokusbereich als auch der Systemaperturgröße unabhängig ist. Diese Näherung scheitert, wenn sich das System seiner maximalen Reichweite nähert. Mit einem Wert von $10^{-8} \text{ m}^{-1}\text{sr}^{-1}$ für $\beta(\pi)$ in der klaren Grenzluftschicht, einer ausgesendeten Leistung $P_T \sim 1 \text{ W}$ und $\lambda \sim 1,55 \mu\text{m}$, hat die empfangene Leistung P_S , die daraus abgeleitet ist, eine Größenordnung von 50 fW und hebt den Bedarf extrem hoher Empfindlichkeit hervor.

Das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR)²⁾ für eine Windgeschwindigkeitsmessung mit einem kohärenten Dauerstrich-Lidar, ist gegeben durch:

$$SNR = \frac{\eta P_S}{\frac{hc}{\lambda} \Delta\nu (1 + D(\nu) + R(\nu))} \quad (4)$$

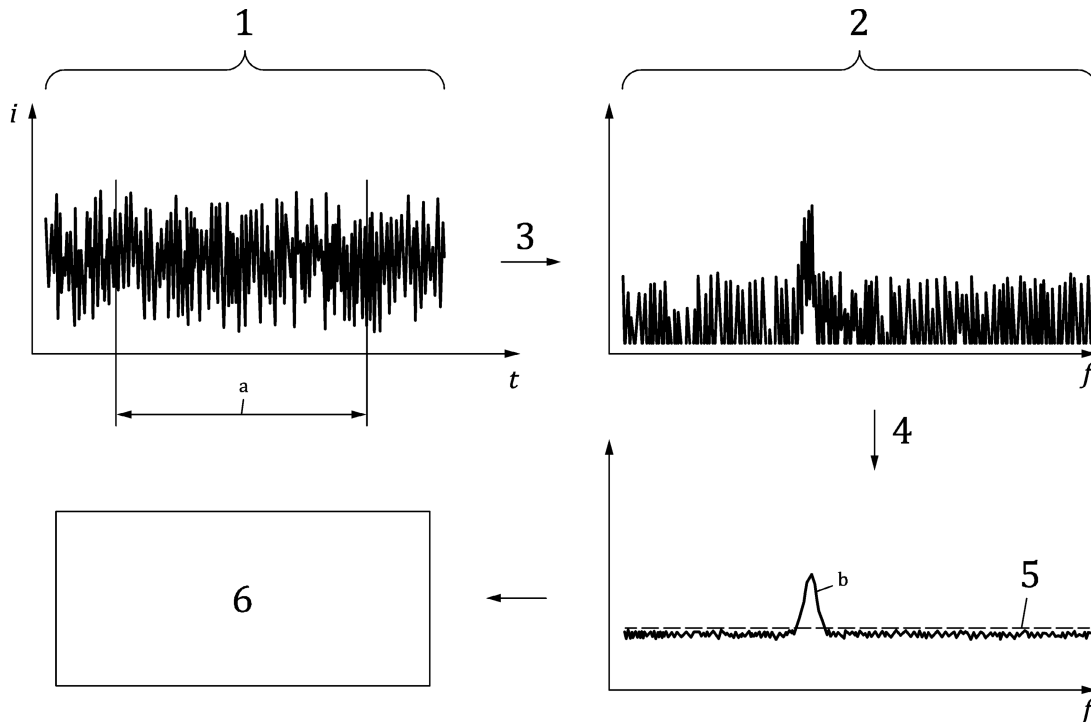
Hier ist η ein Wirkungsgradbegriff, der optische Verluste und die Empfindlichkeit des Photodetektors aufnimmt (typischerweise $\eta \sim 0,5$, Näherungseinheit, nur für ein „perfektes“ System), P_S ist die Eingangssignalleistung und (hc/λ) ist die Lichtquantenenergie, in der Größenordnung $1,3 \times 10^{-19} \text{ J}$ bei einer Wellenlänge von $1,55 \mu\text{m}$. Die Signalbandbreite $\Delta\nu$ wird durch drei Beiträge bestimmt (Gerätebreite, Laufzeitverbreiterung und Turbulenzverbreiterung) und der Term in eckigen Klammern gibt die verschiedenen Schallquellen an. $D(\nu)$ und $R(\nu)$ stellen die spektrale Dichte der Leistung (bei Frequenz ν) aus dem Dunkelrauschen und RIN jeweils in den Einheiten der spektralen Dichte des Schottrauschens des lokalen Oszillators dar. Idealerweise sollten sowohl $D(\nu)$ als auch $R(\nu) \ll 1$ über dem Doppler-Frequenzbereich des vorrangigen Interesses liegen, damit das Schottrauschen die dominante Schallquelle ist.

SNR, wie hier definiert, ist die spektrale Dichte der Leistung an der Doppler-Spitze, geteilt durch die im umgebenden Grundrauschen. Der arithmetische Mittelwert vieler Spektren (wie in den folgenden Abschnitten beschrieben) stellt sicher, dass die gute Leistung aufrechterhalten werden kann, selbst wenn das SNR weit unterhalb der Einheit liegt. Beispielsweise überschreitet ein SNR von 0,1 leicht eine Standardabweichung $5 (5\sigma)$ Schwellenwert (z. B.) für gemittelte 4000 Spektren. Aus den Daten oben lässt sich ein ungefährender Wert von $\beta(\pi)_{\min} \sim 10^{-9} \text{ m}^{-1}\text{sr}^{-1}$ für die kleinste erfassbare Rückstreuung ableiten, wobei eine übertragene Dichte von 1W und eine Messdauer von 20 ms angenommen wird.

2) In der Lidar-Gemeinschaft wird dies gemeinhin und besser bezeichnet als Träger-Rausch-Verhältnis (CNR) bezeichnet

3.3 Spektralanalyse

Die Ableitung einer Radialgeschwindigkeit aus Überlagerungssignalen erfordert eine Frequenzanalyse. Dies erfolgt konventionell im Digitalbereich nach der Analog-Digital-Umwandlung von Überlagerungssignalen. Eine Übersicht eines möglichen Verarbeitungsschemas ist in Bild 3 wiedergegeben. Ein ADC mit einer Abtastrate von 100 MHz ermöglicht die Spektralanalyse bis zu einer maximalen Frequenz von 50 MHz, dies entspricht einer Windgeschwindigkeit V_{LOS} von $\sim 38,8 \text{ ms}^{-1}$ für eine aufwärtsgerichtete Abtastung in einem Winkel von 30° (dabei ist $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$). Ein analoger Tiefpassfilter mit einer Abschneidfrequenz von 50 MHz, der zwischen Detektor und ADC eingesetzt wird, verhindert Aliasing. Spektren werden über digitale Fouriertransformationsverfahren (DFT) berechnet, ein 512-Punkt-DFT führt zu einem Anstieg auf 256 Punkte im Ausgabespektrum bei einer Behälterbreite von $\sim 200 \text{ kHz}$, dies entspricht einem Strahlachsen-Geschwindigkeitsbereich von $\sim 0,15 \text{ ms}^{-1}$. Jedes DFT stellt $\sim 5 \mu\text{s}$ an Daten dar, nachfolgende DFTs werden dann berechnet und die daraus resultierenden „Spannungs“-Spektren werden im Quadrat genommen, um ein Leistungsspektrum zu generieren. Diese Leistungsspektren werden anschließend gemittelt, um ein gemittelttes Spektrum für den gemittelten Zeitraum zu finden. Diese zufällige Schwankung im Schotgrundrauschen des Spektrums reduziert sich, wenn die Quadratwurzel der arithmetischen Mittelwerte und somit die Erkennungsempfindlichkeit um denselben Faktor steigt. Bei 4.000 arithmetischen Mittelwerten beträgt die Messdauer $\sim 20 \text{ ms}$ (eine Datenrate von $\sim 50 \text{ Hz}$). Dadurch ist es erforderlich, dass die Verarbeitung 100 % Lastzyklus liefern kann, der, zum Beispiel, mit einem schnellen Fouriertransformationsblock (FFT) innerhalb eines feldprogrammierbaren Gatterfeldes (FPGA) erreicht werden kann. Es hat sich gezeigt, dass ein herkömmlicher PC, der keine weiteren Aufgaben zu erledigen hat, eine ähnliche Leistung erreichen kann. Es ist möglich, angemessene Veränderungen in jeden der oben aufgeführten Parameter aufzunehmen (Abtastrate, DFT-Länge, Anzahl der arithmetischen Mittelwerte), während gleichzeitig 100 % Lastzyklus aufrechterhalten werden.



Legende

- 1 Digitalisierte Detektorausgabe
- 2 Spektralanalyse jeden Blocks
- 3 DFT
- 4 Mittelwertbildung über mehrere Blöcke
- 5 Angewendete Schwelle
- 6 Geschwindigkeitsabschätzung
- a Aufteilung in Blöcke von $\sim 5\mu s$
- b Windsignal

Bild 3 — Phasen der typischen CW-Lidarsignalverarbeitung: die DFT-Analyse wird von einem in das Lidarsystem integrierten Computer ausgeführt. Als Beispiel können 4.000 individuelle Spektren gemittelt werden, um selbst bei sehr klarer Luft eine hohe Empfindlichkeit und messbare Rückstreuungen zu erzielen. Dieser gesamte Prozess dauert lediglich 20 Millisekunden und ergibt ~ 50 Messungen der Strahlachsen-Windgeschwindigkeit pro Sekunde.

Aus dem Abschnitt oben wird ersichtlich, dass jede Messung der Strahlachsen-Windgeschwindigkeit, die über eine Zeitvorgabe von ~ 20 ms erhalten wird, ein Doppler-Spektrum generiert, das aus einer oder mehreren Spitzen unterschiedlicher Breite besteht, aufgesetzt auf ein Grundrauschen, das vorrangig weißes Rauschen ist, das aber spektrale Eigenschaften aufweisen kann, die aus RIN und Dunkelrauschquellen stammen. Dieser Abschnitt erläutert die Schritte, die für die Ableitung einer angemessenen Schätzung der Windgeschwindigkeit befolgt werden können. Es ist zu betonen, dass es sich hierbei lediglich um ein mögliches Verfahren handelt und viele weitere Optionen zur Verfügung stehen.

Zunächst wird das Grundrauschen „geweißt“, sodass jeder Spektralbehälter denselben gemittelten Schallpegel enthält. Dies wird erreicht, indem der Leistungswert in jedem Frequenzbehälter des Spektrums durch einen vorher gemessenen Wert für denselben Behälter, der mit geschlossener Blende erhalten wurde, geteilt wird. Anschließend wird ein flacher Schwellenwert auf einen vorher bestimmten Pegel über dem gemittelten Rauschen angewendet (siehe Bild 3). Eine geeignete und konservative Wahl für den Schwellenwert ist 5σ über dem gemittelten Schallpegel. Wenn kein Windsignal vorliegt (d.h. wenn die Ausgabe des Lidars blockiert ist), sorgt eine solche Einstellung für den Anstieg der vernachlässigbaren Ereignisse, bei denen das Rauschen allein den Schwellenwert überschreitet. Darauf folgt, dass bei einem Frequenzbehälter, dessen Pegel den Schwellenwert überschreitet, davon ausgegangen werden kann, dass

ein gültiger Beitrag zum Windsignal enthalten ist. Für jede Messung von 20 ms wird das Windspektrum rekonstruiert, indem der gemittelte Schallbeitrag vom Inhalt eines jeden Behälters, der den Schwellenwert überschreitet, abgezogen und eine geringe Korrektur für jede Verzerrung angewendet wird, die aus dem „Weißen des Rauschens“ resultiert. Um mit der nächsten Phase der Signalverarbeitung fortzufahren, wird ein einzelner Geschwindigkeitswert vom resultierenden Spektrum abgeleitet. Eine Vielzahl von Optionen steht zur Verfügung, darunter Spitzen- und Medianwerte; eine gängige Lösung ist die Berechnung des gemittelten (oder Schwerpunkt-) Wertes $\langle V_{LOS} \rangle$.

3.4 Zielgrößen

Das Ziel von überlagerten Doppler-Windlidarmmessungen ist die Charakterisierung des Windfeldes. In jedem Entfernungsintervall führt die Auswertung der Messgröße zu der Radialwindgeschwindigkeit.

Es gibt weitere Zielgrößen, wie die Änderung der Radialgeschwindigkeiten, die aber in diesem Teil der Norm nicht behandelt werden.

Die Zielgrößen können als Input für verschiedene Erfassungsverfahren verwendet werden, um meteorologische Daten für Fragestellungen abzuleiten, wie den Windvektor an einem Punkt oder in einer Linie (Profil), in einer beliebigen Ebene oder im gesamten Raum. Diese beinhaltet auch die Messung von Scherwinden, Wirbelschleppen von Flugzeugen sowie von Auf- und Abwindgebieten. Ein zusätzliches Ziel der Doppler-Windlidarmmessungen ist die Ermittlung von kinematischen Eigenschaften und Kenngrößen inhomogener Windfelder, wie die Divergenz und Rotation. In ISO 28902-2, Anhang C, sind Anwendungsbeispiele aufgenommen.

3.5 Quellen für Rauschen und Unsicherheiten

3.5.1 Schottrauschen am lokalen Oszillator

Das Schottrauschen ist in Gleichung (2) als $n(t)$ bezeichnet. Dessen Varianz ist zur Leistung des lokalen Oszillators (P_o) proportional.

$$\langle n^2_{SN} \rangle = 2eSP_oB \quad (5)$$

Dabei ist

S die Detektorempfindlichkeit; $S = \frac{\eta e}{hf_t}$

B die Empfangsbandbreite

Sie verursacht grobe Fehler und schränkt den maximalen Signalbereich ein. Wenn keine andere Geräuschquelle vorherrscht, wird die Stärke des Überlagerungssignals im Verhältnis zum Rauschpegel über das Signal-Rausch-Verhältnis, CNR , wie in Gleichung (4) in [7] aufgezeigt, gemessen

$$CNR = \frac{\eta \cdot K \cdot \gamma(t)}{h \cdot f_t \cdot B} P_r(t) \quad (6)$$

ANMERKUNG Manche Autoren verwenden die Bezeichnung Signal-Rausch-Verhältnis (SNR), das hier als Träger-Rausch-Verhältnis (CNR) definiert ist.