

Aktueller Stand und neue Entwicklungen in der SODAR-Messtechnik und in ihren Anwendungen

Hans-Jürgen Kirtzel, Metek Meteorologische Messtechnik GmbH

Zusammenfassung

Der nachfolgende Bericht gibt einen kurzen Überblick in der bisherigen SODAR-Entwicklung und zeigt am Beispiel eines mobilen SODAR-Systems auf Basis einer einfachen PC-Soundkarte (Typ: PCS.2000-24, Hersteller: Metek GmbH), welche Randbedingungen von einem Hersteller bei der Entwicklung und vom Nutzer beim langfristigen Einsatz moderner SODAR-Systeme zu beachten sind. Dabei werden auch die besonderen Anforderungen angesprochen, die sich bei einem Einsatz als Störfall-instrumentierung an einer kerntechnischen Anlage ergeben.

1 Einleitung

Die SODAR-Messtechnik wurde ab 1970 als kostengünstiges zuverlässiges Fernmessverfahren zur Erfassung vertikaler Strukturen in der atmosphärischen Grenzschicht bis ca. 1000 m Höhe über Grundeingeführt. Seither haben sich SODAR-Systeme in gleichem Maße im operationellen Betrieb wie in der Forschung bewährt.

SODAR-Systeme liefern als direkte Messgrößen neben den akustischen Rückstreuintensitäten die Windrichtung und die Windgeschwindigkeit sowie die Vertikalwindvarianz. Als abgeleitete Größe wird vor allem die Diffusionsklasse verwendet, um das Ausbreitungsverhalten von Schadstoffen in Modellrechnungen abzuschätzen. Als wesentliche Vorteile eines SODARs gelten neben dem entscheidenden Vorteil, eine Mastinstrumentierung ersetzen zu können, vor allem der kontinuierliche automatische Betrieb und die gute räumliche und zeitliche Auflösung sowie bei mobilen Instrumentierungen der einfache und sichere Aufbau.

Grundlegende Schwierigkeiten in der operationellen Anwendung bestehen allerdings nach wie vor bei der messtechnischen Ermittlung weiterer Turbulenzgrößen (z. B. turbulenter Impulsstrom, turbulenter Wärmestrom) und der Höhe der sog. Mischungsschicht, die vor allem in den modernen Ausbreitungsmodellen verwendet werden könnte. Auch die stetige Weiterentwicklung von Elektronik- und Rechnerkomponenten wird diese Einschränkung für operationell betriebene Systeme auf absehbare Zeit nur teilweise lösen können. Insofern ist künftig vor allem eine Leistungssteigerung im Hinblick auf die Genauigkeit bereits verfügbarer Messgrößen, auf den Betrieb unter erschwerten Wetter- oder Standortbedingungen und auf die Handhabung der Systeme (reduzierte Systemgröße) und Flexibilität der Betriebsarten zu erwarten.

Nachfolgend wird besonders die operationelle Anwendung von SODAR-Anlagen im monostatischen Betrieb betrachtet, bei der identische Antennen für die Erzeugung des Schallsignals und für den Empfang des aus der Atmosphäre zurückgestreuten Signals verwendet werden.

2 Entwicklung und Leistungsfähigkeit der SODAR-Technik

Aus den ersten Versuche zur Schallausbreitung konnte Tyndall (1875) zunächst nur die Vermutung ableiten, dass bestimmte beobachteten Phänomene nicht durch die Schallbrechung an Temperaturgradienten oder in Windscherungen, sondern durch nicht näher zu beschreibende „akustische Wolken“ verursacht wurden. Gilman, Coxhead und Willis konnten (1946) vermuteten aufgrund von ersten echten „SODAR“-Messungen mit getrennten akustischen Sender- und Empfängereinheiten, dass die beobachtete Schallintensität nicht von Schallbrechungseffekte herrühren konnte, sondern durch atmosphärische Dichteinhomogenitäten erklärt werden müsste.

Mit der inzwischen durch Kolmogorov (1941) formulierten Turbulenztheorie und die von Obukhov (1941) beschriebenen Wechselwirkung von Schall mit einem turbulenten Temperaturfeld konnte schließlich durch Tatarskii und Kallistratova (1959, 1961) die Schallstreuung und ihre Abhängigkeit von Frequenz, Streuwinkel und Streuquerschnitt experimentell nachgewiesen und formuliert werden, die dann von Monin (1962) abschließend behandelt wurde. Danach sind für den Spezialfall der Rückstreuung von Schallwellen nur turbulente Temperaturfluktuationen der Atmosphäre verantwortlich, deren Größe in etwa der Größe der verwendeten Schallwellenlänge entspricht.

Erst Little (1969, 1972) und McAllister (1969) konnten jedoch die SODAR-Technik als atmosphärisches Fernmessverfahren vorschlagen und einführen und mit Hilfe einer Schwärzungstechnik auf Faksimile-Papier verschiedenste meteorologische Phänomene der Grenzschicht darstellen. Diese SODAR-Systeme bestanden aus einer einzelnen vertikal ausgerichteten Schallantenne, die nach Aussenden des Schallsignals auf Empfangsbetrieb geschaltet wurde. Die Höhenzuordnung erfolgt dabei über eine einfache Messung der Laufzeit zwischen dem Zeitpunkt des Sendesignals und dem Zeitpunkt eines empfangenen Signals. In diesen ersten Anwendungen wurde lediglich die Intensität der Rückstreuamplitude ausgewertet, um Höhenbereiche mit unterschiedlicher Turbulenzintensität zu erkennen und daraus Rückschlüsse zur vertikalen Schichtung der Atmosphäre zu ziehen. Damit konnten auch Informationen über die Höhe der atmosphärischen Grenzschicht oder Höhenbereiche mit starker Windscherung gewonnen werden.

Da die vertikalen Rückstremuster aber in vielen Fällen keinen eindeutigen Rückschluss auf eine bestimmte Wettersituation erlaubten, war neben der Verifizierung der SODAR-Messungen anhand von zusätzlich gewonnenen meteorologischen Daten stets eine eingehende Interpretation der Rückstremuster durch umfassend trainiertes und erfahrenes Personal Voraussetzung. In der Regel handelte es sich daher um Untersuchungen, die eine bestimmte meteorologische Situation im Rückblick betrachteten oder lediglich statistische Größen lieferten, z. B. die Häufigkeiten von abhebenden Inversionen. Eine unmittelbare, möglichst automatisch erstellte Bewertung einer Ausbreitungssituation, durch die z. B. der Betrieb einer emittierenden Anlage vor dem Hintergrund einer möglichen Schadstoffbelastung der Umgebung gesteuert werden konnte, war dagegen nicht möglich.

1972 gelangte die SODAR-Technik an das Institut für Radiometeorologie und maritime Meteorologie an der Universität Hamburg (Peters, 1975) und erlaubte erste Anwendungen auf Schiffseinsätzen sowie zur Untersuchung der bodennahen Grenzschicht.

Seit Anfang der achtziger Jahre gehörte eine zuverlässige Spektralanalyse des Empfangssignals zur Bestimmung der Dopplerverschiebung aufgrund der leistungsfähigeren Elektronikkomponenten zum Stand der Technik. Die Dopplerverschiebung zwischen den Frequenzen des Sende- und des Empfangssignals entsteht, wenn die o.a. rückstreuenden Turbulenzstrukturen vom mittleren Windfeld mitgeführt werden und sich dabei relativ zur Schallantenne annähern, bzw. entfernen.

Bei Verwendung von drei unterschiedlich ausgerichteten monostatischen Schallantennen, von denen eine vorteilhafterweise vertikal auszurichten war, konnten nun aus den drei beobachteten radial gemessenen Dopplerverschiebungen die Stärke und die Richtung des mittleren Windes messtechnisch erfasst werden. Die vertikal ausgerichtete Antenne lieferte zudem aus der typischen Breite des Empfangsspektrums die vertikale Turbulenzintensität. Neben dem Transport von Schadstoffen (Advektion) konnte damit auch ein Maß für deren Vermischung (Dispersion) angegeben werden.

Typische Instrumentierungen wurden nun z. B. in der Umgebungsüberwachung von Industriestandorten mit potentiellen Gesundheits- oder Umweltrisiken vorgenommen, um on-line die Ausbreitungsparameter für Modellierungen der Schadstoffausbreitung bereitzustellen. Die SODAR-Technik wurde insbesondere als Störfallinstrumentierung an Kernkraftwerken eingeführt und in die KTA-Regel 1508 (1988) als Alternative zu einer Mastinstrumentierung aufgenommen.

Die zunehmende Integration von aktiven IC-Elementen und Mikroprozessoren im Bereich der SODAR-Technik ermöglichte seither eine kontinuierliche Leistungssteigerung der SODAR-Systeme. Dabei wurden einerseits die Höhenverfügbarkeit und Messwertgenauigkeit der bereits verfügbaren Messgrößen verbessert (z. B. durch rauschärmere Empfangsstufen oder durch komplexe Sendemuster und Spektralanalysen).

Gleichzeitig konnten auch die Dimensionen der Geräte durch Einführung von sog. Array-Antennen (Coulter, 1990) drastisch reduziert werden. Array-Antennen verwenden an Stelle von drei unabhängig zueinander ausgerichteten Schallantennen eine schachbrettartige Anordnung von Lautsprechern, deren Hauptstrahlrichtung (auch als „Antennenhauptkeule“ bezeichnet) durch einen steuerbaren Versatz in der Phasenlage, bzw. in der Zeitbasis zwischen den Reihen und Spalten des Arrays geändert werden kann. So wurde es möglich, mit einer einzelnen Antenne die drei benötigten unabhängigen Strahlrichtungen zu realisieren. Die Ausführung als Phasenarray kann an schwierigen Standorten auch zu Einschränkungen im Messbetrieb führen, da die stets erforderliche Antennenabschirmung immer nur in eine Richtung optimiert werden kann.

Während sich aber die eingangs genannten Ausbreitungsparameter Wind und Vertikalwindturbulenz mit hoher Genauigkeit erfassen lassen, bereitet die Messung weiterer Messgrößen wie Horizontalwindturbulenz, turbulenter Wärme- oder Impulsfluss oder die Ermittlung der atmosphärischen Grenzschicht und der vertikalen Temperaturschichtung große Probleme und ist in keiner operationellen Anwendung zu finden. Dies liegt zum einen in den auseinander weisenden Antennenrichtungen eines monostatischen SODARs, wodurch eine horizontale Homogenität der Atmosphäre hinsichtlich des (mittleren) Wind- und Temperaturfeldes vorausgesetzt werden muss. Weiterhin verlangen einige

Anwendungen, dass die von der Lufttemperatur und von der Luftfeuchtigkeit abhängige Schalldämpfung im gesamten Höhenmessbereich des SODARs bekannt sein muss. Mit den näherungsweise verwendeten Bodenwerten können sich nicht verifizierbare Messfehler ergeben, ein operationeller Betrieb ist somit ausgeschlossen. Eine Zusammenstellung zu verfügbaren Messgrößen wurde durch Neff (1994,1996) vorgenommen.

Tab. 1: Zusammenstellung wichtiger SODAR-Messgrößen

Messgröße	Voraussetzung	Betriebsart	Genauigkeit
(A) Windrichtung	horizontale Homogenität zwischen den drei Messvolumen	Operationell 600 - 1800 s	< 5 ... 10°, für Wind > 2.5 m/s
(B) Windgeschwindigkeit	siehe (A)	Operationell 600 - 1800 s	< 5 ... 10 % oder < 0.5 m/s
(C) Standardabweichung Vertikalwind	Keine Beiträge durch nichtturbulente Fluktuationen (also z. B. keine Schwerewellen) zulässig	Operationell 600 - 1800 s	< 0.1... 0.2 m/s
(D) Diffusionsklasse A ... F	Berechnung nach KTA-Tabelle, nur gültig für gleichartige Standorte und Messhöhe 100 m, bzw. angepasste Höhenzuordnungen	Operationell	≤ 1 ... 2 Klassen
(E) Standardabweichung der horizontalen Windkomponenten	(E1) Wenn direkt messtechnisch erfasst, dann Vernachlässigung von Kreuzprodukten der Windkomponenten	Nicht validierbar	Größenordnung wie der Messwert selbst
	(E2) Wenn aus (C) berechnet, muss Abhängigkeit von Höhe, Untergrund und Turbulenzzustand bekannt sein	Operationell möglich	< 0.15... 0.25 m/s
(F) Impulsstrom	Wenn direkt messtechnisch erfasst, dann Vernachlässigung von Kreuzprodukten der Windkomponenten	Nicht validierbar	Größenordnung wie der Messwert selbst
(G) Mischungsschicht	(G1) Bei konvektiven Bedingungen aus Mixed-Layer-Modell berechnet, mit Kenntnis über ein Turbulenzmasszahl	Operationell möglich	+ - 250 m
	(G2) Bei stabiler Grenzschicht nur möglich, wenn keine komplexe Struktur und kein LLJ (also starke Scherung) vorliegen	Operationell möglich im Einzelfall u.U. stark fehlerhaft.	+ - 100 m

Die Übersicht zeigt, welche Messgrößen gegenwärtig bestimmbar sind, bzw. welche zusätzlichen Anforderungen einzuhalten sind. Da Genauigkeiten u.a. von der gewählten Sendefrequenz, bzw. der Antennengröße abhängen, werden diese Werte für typische Geräteparameter angegeben. Die Angaben zur Mischungsschicht beruhen weitgehend auf eigenen Erfahrungen, ohne dass diese hier verifiziert werden. Eine ebenso nützliche wie vollständige Zusammenstellung der Vor- und Nachteile der Methoden zur Bestimmung der Mischungshöhe ist in Beyrich (1994, 1994,1995) zu finden. Andere Methoden zur Ableitung von Turbulenzparametern schlagen auch Engelbart (2002) und Kouznetsov (2002) vor.

3 Weiterentwicklung von SODAR-Systemen und der Einsatz an kerntechnischen Anlagen und Einrichtungen

Mit jeder Erweiterung von Systemfunktionen durch zusätzliche Bauteile oder Baugruppen muss berücksichtigt werden, dass der spätere Betrieb eines Systems u. U. von der Verfügbarkeit der betreffenden Bauteile oder Baugruppen abhängt. Damit schränkt sich unter Umständen die langfristige Fähigkeit zur Fehleranalyse und Reparatur des SODARs auf Bauteilebene, bzw. Baugruppenebene ein. Ohnehin werden für operationelle Anwendungen im Bereich der kerntechnischen Anlagen besondere Ansprüche an die Verifizierbarkeit und Überwachung von Systemfunktionen gestellt, deren langfristiger Nachweis mit erheblichem technischen Aufwand verbunden sein kann.

Tab. 2: Anforderungen der KTA1508 an den SODAR-Betrieb

1. Funktion Antennenheizung überwachen
2. Funktion Lautsprecher überwachen
3. Azimuthausrichtung überwachen
4. Zenithausrichtung überwachen
5. Zusammenhang zwischen Messunsicherheit und Signal-/Rauschverhältnis verifizieren
6. Nachweis der Messfunktionen im Zuge der Wiederkehrenden Prüfungen
7. Systemänderungen erfordern ggf. genehmigungspflichtigen Änderungsantrag

Es sollte dabei darauf hingewiesen werden, dass einzelne Anforderungen (z. B. Antennenausrichtung) durch regelmäßigen Sichtkontrolle erfolgen kann, wenn diese mechanisch so festgelegt ist, dass Fehlmessungen ausgeschlossen werden können.

Die Begleitumstände einer kontinuierlichen Weiterentwicklung kollidieren daher fast zwangsläufig mit den Ansprüchen von operationellen Anwendungen in einem genehmigten Betrieb, so dass immer ein Kompromiss zwischen Weiterentwicklung und langfristiger technischer Ausrichtung gefunden werden muss.

Nachfolgend soll am Beispiel eines Phasenarray-SODARs ein Konzept vorgestellt werden, dass einerseits eine kontinuierliche Weiterentwicklung von bestehender Technik ermöglicht und andererseits eine langfristige Verfügbarkeit und Verifizierbarkeit sicherstellen soll.

Gleichzeitig sei darauf hingewiesen, dass generell kein Junktim zwischen den Begriffen „Modern“ und „Optimale Leistung über Gerätelebenszyklus“ besteht, da letztere Größe immer nur vor den besonderen Anforderungen einer individuellen Instrumentierung und nach Vorliegen ausreichender Betriebserfahrungen zu bewerten ist.

4 Kenngrößen von SODAR-Systemen

Die Grundlage der SODAR-Messtechnik wird durch die SODAR-Gleichung in [1] beschrieben, mit denen die empfangene akustische Leistung zur abgestrahlten akustischen Leistung in vereinfachten Form ins Verhältnis gesetzt wird:

$$P_E = P_S \cdot B \cdot \frac{A_e}{r^2} \cdot \sigma(\Theta) \cdot L \quad [1]$$

mit	P_E	Akustische Empfangsleistung	[W]
	P_S	Akustische Sendeleistung	[W]
	B	Dimension des Streuvolumens, bestimmt durch	[m]
	$\frac{c \cdot \tau}{2}$	mit c Schallgeschwindigkeit	[m/s]
		und τ effektive Pulslänge	[s]
	A_e	effektive Antennenfläche	[m ²]
	r	Entfernung Antenne - Streuvolumen	[m]
	$\sigma(\Theta)$	Streuquerschnitt	[1/m]
	L	Dämpfungsfaktor	[]

Nach obiger Gleichung ist also das Produkt zwischen der eingesetzten elektrischen Leistung und des Wirkungsgrades des eingesetzten Schallwandlers direkt proportional zur Empfangsintensität. Die gesamte akustische Empfangsleistung beträgt in obiger Gleichung bei typischen Geräteparametern ca. 10^{-14} - 10^{-16} W, sie liegt also nur um 2-3 Größenordnungen über dem thermischen Rauschen der Atmosphäre von rund 10^{-18} W und den typischen Beiträgen der internen Rauschleistung von Elektronikkomponenten. Größenordnungsmäßig liegt der Betrag des Rückstreuquerschnitts $\sigma(\Theta)$ um 10^{-10} W, er kann aber je nach Turbulenzgrad der Atmosphäre in kurzer Zeit um 2-3 !! Größenordnungen schwanken.

Nach (1) kann also selbst ein optimales SODAR in bestimmten Wettersituationen aufgrund von ausbleibender Turbulenz deutlich hinter der für den Benutzer erfahrbaren nominalen Leistung zurückbleiben. Diese Einschränkung macht sich oft bei guten Wetterbedingungen in den frühen Abendstunden bemerkbar, da dann die turbulenten Temperaturfluktuationen aufgrund der ausbleibenden Sonneneinstrahlung sehr gering werden können. Erst im Laufe der Nacht kann sich durch die zunehmende Stabilisierung der bodennahen Schichten und bei ausreichenden Windgeschwindigkeiten wieder ein mäßiger Anstieg der Temperaturfluktuationen entwickeln.

Die SODAR-Gleichung [1] beschreibt nur einen grundlegenden Zusammenhang zwischen den Sende- und Empfangsleistungen bei der Streuung einer Schallwelle im turbulenten Medium.

Sie gibt im übrigen keine Auskunft über weitere wichtige Kenngrößen eines SODARs:

- Effektivität der Schallabschirmung zur Entkoppelung gegen Umgebungslärm und Festechos
- Richtwirkung der Antennenkeule, Verfahren zur Nebenkeulenunterdrückung
- Höhe des internen Rauschpegels (vgl. thermisches Atmosphärenrauschen)
- Verfahren zur Signalerzeugung, zur Spektralanalyse und zur Messwertberechnung

5 Anforderungen an ein „modernes“ SODAR-System

Für eine Neu- oder Weiterentwicklung eines SODAR-Systems ergeben sich aus den vorstehenden Betrachtungen eine Vielzahl von Randbedingungen, die nicht immer gleichzeitig einzuhalten sind:

- Mindestens gleichwertige Leistungseigenschaften wie bisherige Systeme
- Reduzierung von Hardwarekomponenten
- Verwendung von ladengängigen Standards in den Baugruppen und PC-Einheiten (COTS)
- Kompatibilität von Hardwarekomponenten mit bestehenden Anlagen

- Kundenvertraute Systemumgebung und integrierte Bedienung, hier „WINDOWS XP“ als pre-emptives echtzeitfähiges Betriebssystem
- Integration von Datenspeicherung, Datenverwaltung und Datentransfer in den SODAR-Messbetrieb
- Kompatibilität der Datenendprodukte
- Download von Updates und Upgrades“, also vereinfachte Programmpflege und Programmerneuerung durch Kundenmaßnahme oder durch Fernzugang

- Erhöhung der Anzahl unabhängigerer Einzelmessungen bei hochreichenden Messungen durch Multi-Frequenzverfahren ohne Dynamikverlust
- Erhöhung der Anzahl unabhängigerer Einzelmessungen bei hochreichenden Messungen durch Multibeam-Verfahren ohne Dynamikverlust
- Pulsformung
- Verbesserte Verfahren zur Bestimmung der Dopplerkomponente, spektrale Mittelung, statistische Methoden (Consensus, Cluster, ...)

- Niedrige Anschaffung- und Unterhaltskosten
- Niedriger Stromverbrauch
- Skalierbarkeit zum –zeitweiligen- Betrieb größerer Antennenarrays

6 Realisierung eines mobilen SODAR-Systems PCS.2000-24

Der prinzipielle Aufbau eines SODAR-Systems nach o.a. Anforderungsliste wurde wie in Abb. 1 gewählt. Dabei wurde als grundlegende Neuerung der gesamte Aufgabenbereich der Signalerzeugung und Signalanalyse von den üblicherweise eingesetzten Multi I/O-Karten mit Digital/Analog-Wandlern auf eine handelsübliche Sound-Karte als Zubehör zu

einem Standard-PC gewählt. Voraussetzung dafür ist, dass die Soundkarte eine konstante interne Zeitverzögerung auf beiden Kanälen aufweist, die einmalig bestimmt werden kann und dann entsprechend in der internen Spektralanalyse zu berücksichtigen ist.

Um keinen Verlust an Signalqualität hinnehmen zu müssen ist weiter zu prüfen, ob das interne Rauschen der Karte im Empfangspfad klein gegen das Umgebungsrauschen ist, bzw. in gleicher Höhe wie das interne Rauschen der Antennenelektronik liegt.

Um auch für autark betriebene Stationen einen von der Messumgebung unabhängigen Messaufbau zu ermöglichen, wurde ein IP65-geprüftes Gehäuse vorgesehen, das sämtliche Elektronikkomponenten des PCS.2000-24 aufnehmen konnte.

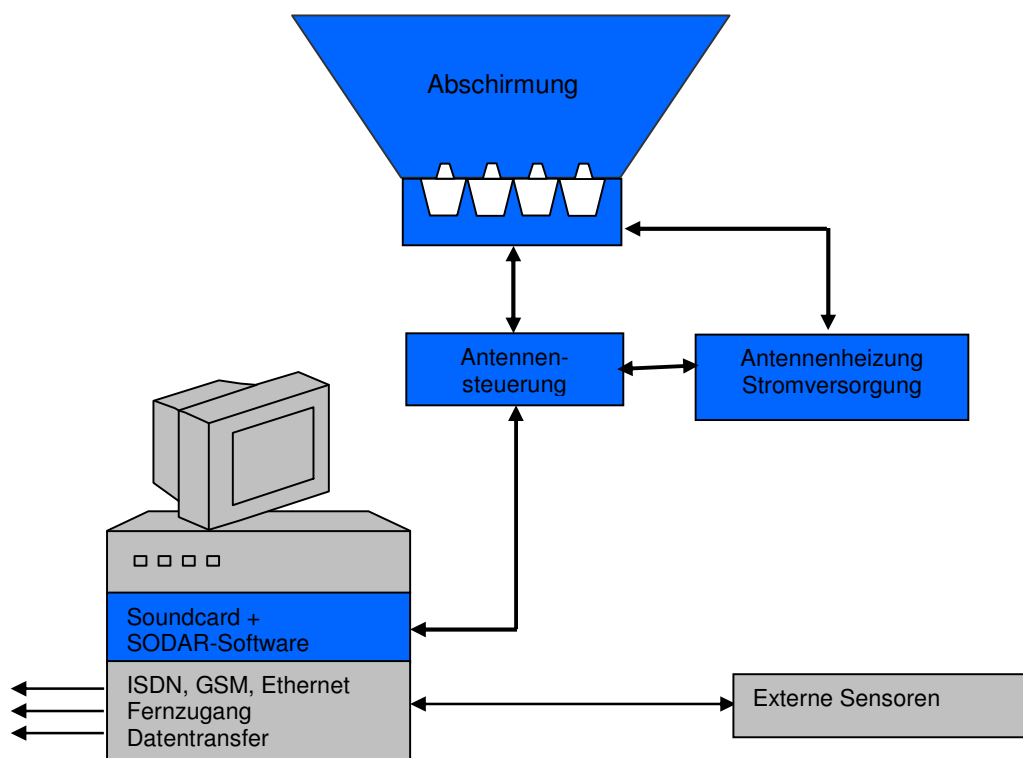


Abb. 1: Schematischer Aufbau eines PC-basierenden SODAR-Systems (blaue Färbung zeigt die eigentlichen SODAR-Komponenten)

Abb. 2 zeigt das beschriebene System als Feldaufbau. Nicht abgebildet sind hier lediglich die notwendigen SOLAR-Panels bzw. die Generatoreinheit, aus denen das System mit Energie versorgt werden kann.



Abb. 2: Feldaufbau des PCS.2000-24

Als wichtige Systemmerkmale des PCS.2000-24 sind zu nennen:

- Kompaktes Mini-SODAR auf Basis eines WINDOWS-Betriebssystem
- 19" Einschub mit Ein-Platinen-PC, mit
 - 10 GB Festpl., 128 MB, 1.44 FD, DVD-RW
 - Ethernet, Festnetz+GSM-MODEM
 - Tastatur + TFT-Bildschirm
 - Sound-Card mit Adapterplatine
- 19" SODAR-Steuerung, 19" Stromversorgung 30 VDC, 19" Außengehäuse IP 65
- SODAR-Betrieb mit Datensicherung, -transfer, -management + Fernzugang
- Phasenarray-Antenne mit 2+4+6+6+4+2 Elementen
- 4 geneigte + 1 vertikale Abstrahlrichtung, Strahlrichtungen einzeln anwählbar, wobei Neigung der Abstrahlrichtungen je nach Sendefrequenz in 14 ... 22 ° variiert
- Einzel- und Multifrequenzbetrieb (Standard sind 5 Frequenzen)
- SOLAR- oder Generatorbetrieb
- Gehäuse 50 x 55 x 60 cm, 55 kg
- Antenne 78x78 cm, 50 kg
- Modulabschirmung, 80 kg, max. 170x185 cm, 16 einzelne Abschirmungsmodule
- 24 VDC/230 VAC, ca. 55 W, optionale Heizung 230 VAC/125 W
- Reine Aufbauzeit eine Stunde, ohne Einmessen und Optimierung !!

Hinsichtlich der Messgrößen und Messparameter bestehen dabei keinerlei Einschränkungen gegenüber den bisher eingesetzten SODAR-Systemen:

- Messzyklus einstellbar, 60 ... 1800 s, und/oder Einzelpulsanalyse
- Mittlere Spektren- und Cluster-Auswertung
- Max. Pulsfolge 1 Hz
- Sendefrequenz einstellbar in 1800 ... 2800 Hz
- Unterste Messhöhe 15 m
- Stufung 10 ... 50 m
- Oberste Messhöhen 200 ... 500 m, bei sehr guten Bedingungen höher

Verfügbar sind die Messgrößen:

Reflektivitäten, Radialkomponenten und Standardabweichung für jede Richtung
Windkomponenten, Windrichtung, Windgeschwindigkeit
Diffusionsklassen nach allen KTA-Tabellen
Signal-Rauschverhältnis, Signalverfügbarkeit, Plausibilitätstests

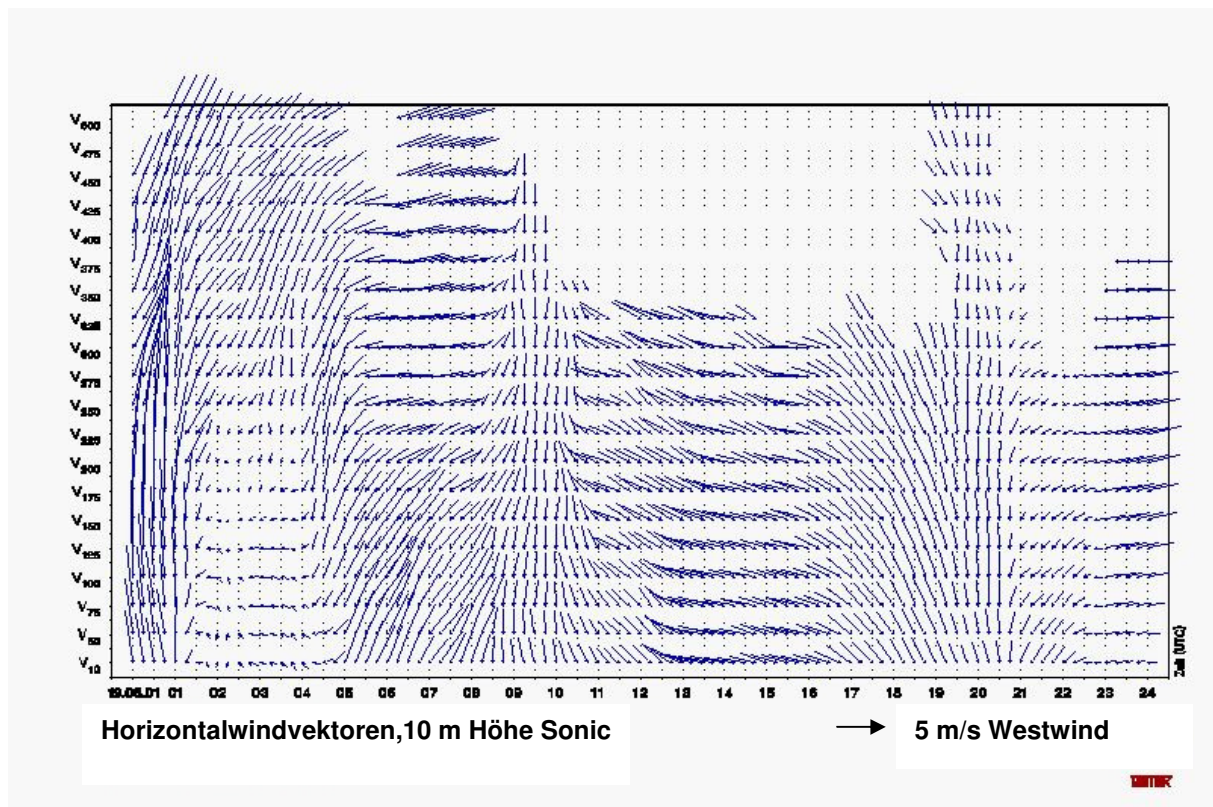


Abb. 3: Tagesgang Horizontalwindvektoren, Messbeispiel PCS.2000-24, eingesetzt in Marseille 2001 (ESCOMPTE)

Abb. 3 zeigt einen Tagesgang der gemessenen Horizontalwindvektoren, die am Standort direkt an der Küste zum Mittelmeer durch starke Land-See- und Berg-/Tal-Windsysteme bestimmt wurden. Anhand der Verfügbarkeit der Messwerte sind die starken tageszeitlichen Schwankungen in der erreichbaren Messhöhe zu erkennen, die größtenteils durch die atmosphärischen Turbulenzbedingungen und nur zu einem kleineren Teil durch Variationen des Hintergrundlärms bestimmt wurden.

Abb. 4 umfasst die tageszeitliche Entwicklung der Standardabweichung des Vertikalwindes über einen Zeitraum von 2 Wochen, der Zeitraum war durch eine andauernde Schönwetterperiode mit kräftigen Strahlungseinflüssen (am Tage freie Konvektion, nächtliche Auskühlung mit Stabilisierung) geprägt.

In beiden Abbildungen wurden in 10 m Höhe die Messwerte eines Ultraschallanemometers eingefügt. Die SODAR-Daten wurden nicht in originaler Form dargestellt, sondern unter Verwendung einer leichten Mittelung, die für jeden Punkt den ursprünglichen Wert mit dem Gewicht 0.5 und die direkt benachbarten Werte mit insgesamt 0.5 berücksichtigt. Grund hierfür war der Umstand, dass das Mittelungsintervall mit 15 Minuten etwas knapp gewählt worden war und die o. a. Annahme horizontaler Homogenität vor allem am Tage unter freier Konvektion nicht immer eingehalten wurde.

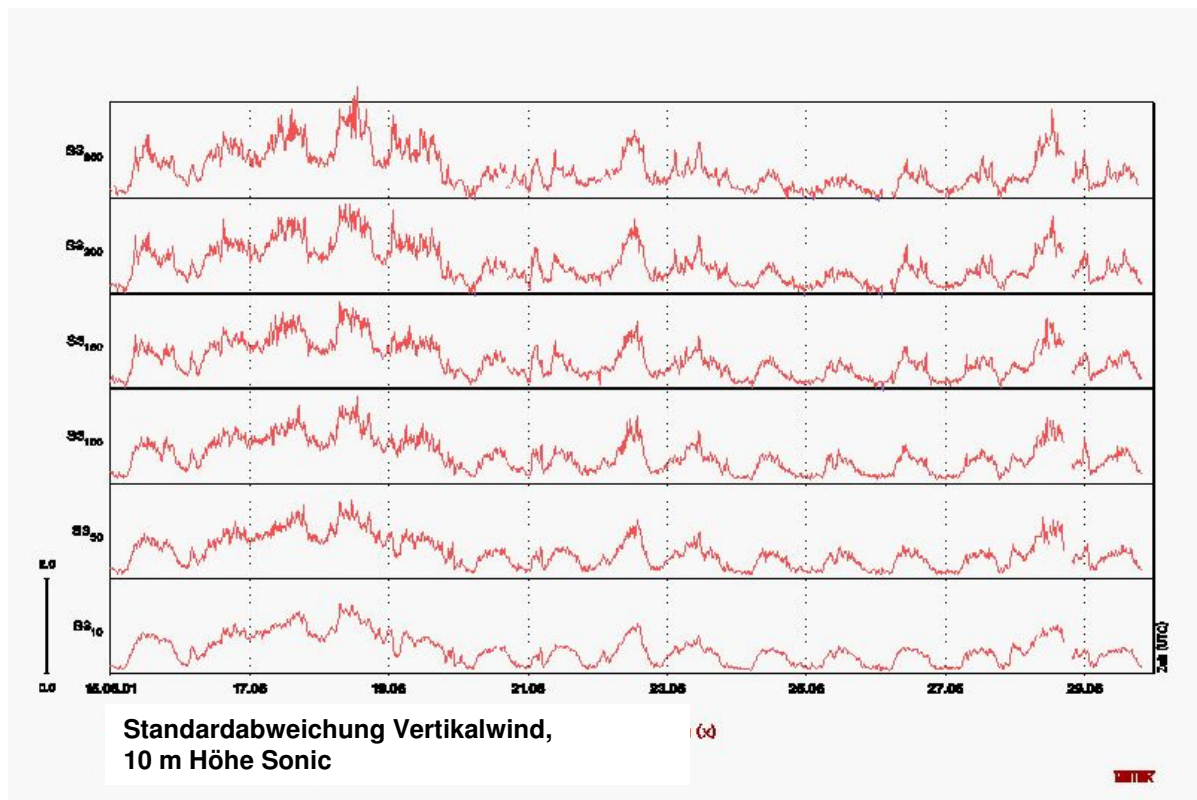


Abb. 4: 2-wöchige Zeitserien der Standardabweichung des Vertikalwindes, Messbeispiel PCS.2000-24, eingesetzt in Marseille 2001 (ESCOMPTE)

7 Literatur

Beyrich, F., 1994: Bestimmung der Mischungsschicht aus SODAR-Daten unter Verwendung numerischer Modellrechnungen, IFU Schriftenreihe, Band 28-94

Beyrich, F., 1993: On the use of sodar data to estimate mixing height, Appl. Phys. B57, 27 — 35.

Beyrich, F., 1995: Mixing height estimation in the convective boundary layer using sodar data, Bound. Lay. Meteorol., 74, 1 — 18. Appl. Met.

Coulter, R.L. (1990a): Minisodars – applications and potential. In: S.P. Singal (Ed.) Acoustic remote sensing, New Delhi: Tata McGraw-Hill, 88-96

Engelbart, D., Steinhagen, H., Kallistratova, M.: Proceeding ISARS 2002, LINEX-2000: Assessment of different methods for determination of reference Flux Profiles, 339-345

Gilman, G. W., Coxhead, H. B., Willis, F. H. (1946): Reflection of Sound Signals in the Troposphere. J. Acoust. Soc. Am. 18, 274-283

KTA1508 Sicherheitstechnische Regel des KTA, 1988: Instrumentierung zur Ermittlung der Ausbreitung radioaktiver Stoffe in der Atmosphäre;

Kolmogorov, A. N. (1941): The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers. Doklady Akademii Nauk SSSR. 30, 301-305

Kouznetsov, R. D., Engelbart, D., Beyrich, F.: Proceeding ISARS 2002, Experimental tests of a method for SODAR estimation of turbulent parameter profiles under neutral stratification, 351-354

Little, C. G. (1969): Acoustic Methods for the Remote Probing of the Lower Atmosphere. Proc. IEEE 57, 571-578

Little, C. G. (1972): On the Detectability of Fog, Cloud, Rain and Snow by Acoustic Echo-Sounding Methods. J. Atmos. Sci. 29, 748-755

McAllister, L. G., Pollard, J. R., Mahoney, A. R., Shaw, P. J. R. (1969): Acoustic Sounding – A New Approach to the Study of Atmospheric Structure. Proc. IEEE 57, 579-587

Monin, A. S. (1962): Characteristics of the Scattering of Sound in a Turbulent Atmosphere. Soviet Physics – Acoustics 7, 370-373

Neff, W. D. (1994): Mesoscale air quality studies with meteorological remote sensing systems. Int. J. Remote Sens. 15, 393-426

Neff, W.D., and R.L. Coulter, 1987: Acoustic Remote Sensing, in Probing The Atmospheric Boundary Layer, Lenschow (ed.), 201 — 239

Neff, W. D. (1996) : Advances in the Remote Sensing of the Antarctic Boundary Layer. Proc. 8th ISARS, Moscow, G.1-G.10

Obukhov, A. M. (1941): Scattering of sound in turbulent flow (in Russian). Doklady Akademii Nauk SSSR. 30, 611-614

Peters, G. (1975): Sodar- das akustische Messverfahren für die atmosphärische Grenzschicht., Techn. Mitt. Inst., Radiometeorol. & Marit. Meteorolo. Univ. Hamburg, Hamburg, 58 S

Tatarskii, V. I. (1961): Wave Propagation in a Turbulent Medium. McGraw-Hill Book Company, New York/Toronto/London, 163 p.

Tyndall, J. (1875): Der Schall. Verlag Friedrich Vieweg & Sohn, 3. Aufl. 1897 Braunschw.