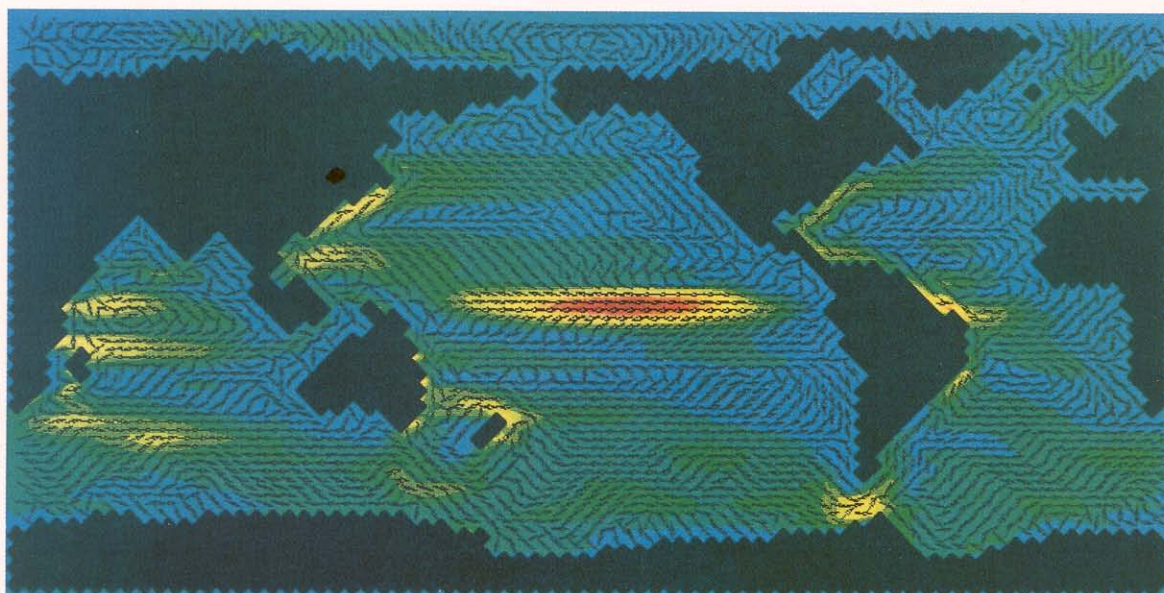


promet

1/2/3 '88

meteorologische fortbildung

Das Max-Planck-Institut für Meteorologie



cm/s

Herausgeber

Deutscher Wetterdienst

Hauptschriftleiter

Dipl.-Met. H.-D. Kirch

Redaktionsausschuß

Prof. Dr. A. Baumgartner (München)

Prof. Dr. J. Egger (München)

Prof. Dr. F. Fiedler (Karlsruhe)

Prof. Dr. H.-W. Georgii (Frankfurt)

Prof. Dr. H. Graßl (Geesthacht)

Dr. F. Kasten (Hamburg)

Dr. R. Paulus (Traben-Trarbach)

Dr. H. Reiser (Offenbach)

Dr. R. Simonis (Neustadt a. d. Weinstr.)

Prof. Dr. F. Wippermann (Darmstadt)

Zum Titelbild:

Oberflächenströmung des großskalig-geostrophischen Ozeanmodells (s. Beitr. 4). Die Pfeile bezeichnen die Richtung der Strömung und die Farbe ihre Geschwindigkeit.

promet erscheint im Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes - Zentralamt - Frankfurter Straße 135, 6050 Offenbach am Main. Bezugspreis pro Jahrgang (4 Hefte) im Abonnement DM 36,-, Einzelheft DM 10,-, Doppelheft DM 20,-, Dreifachheft DM 30,-. Für den Inhalt der Arbeiten sind die Autoren verantwortlich. Alle Rechte bleiben vorbehalten.

Druck: Weppert GmbH & Co. KG,
8720 Schweinfurt,
Zehntstraße 17

ISSN 0340-4552

Meteorologische Fortbildung

18. Jahrgang, Heft 1/2/3, 1988

Thema des Heftes:

Das Max-Planck-Institut für Meteorologie

(Fachliche Redaktion: K. Hasselmann, P. Lemke, Hamburg)

Beiträge:

	Seite
1 K. HASSELMANN, H. HINZPETER Entwicklung und Zielsetzung des Instituts	1
Klimadynamik	
2 K. HASSELMANN Übersicht über die Klimadynamik (Beiträge 3-9)	2
3 M. LATIF Wechselwirkung Ozean-Atmosphäre in den Tropen	4
4 J. OBERHUBER, K. HASSELMANN Ozeanmodelle	14
5 E. MAIER-REIMER Kohlenstoffkreislauf und Klima	22
6 M. HEIMANN Atmosphärische und ozeanische Spurenstoffe	29
7 K. HERTERICH Modellierung des Paläoklimas	37
8 P. LEMKE Über die Wechselwirkung zwischen dem Meereis und der ozeanischen Deckschicht	42
9 H. v. STORCH Statistische Diagnostik von Feldzeitreihen	49
Physik der Atmosphäre	
10 H. HINZPETER Übersicht zur Physik der Atmosphäre (Beiträge 11-14)	58
11 S. BAKAN, P. BECKER, A. CHLOND Organisierte Konvektion in der planetaren Grenzschicht	59
12 S. BAKAN, I. SCHULT Strahlung in getrübbten Atmosphären und in Wolken	70
13 G. PETERS FM-CW-Radar zur Fernmessung des Wind- und Temperaturprofils in der unteren Atmosphäre	74
14 J. BÖSENBERG Fernerkundung des Wasserdampfes mit einem Zweifrequenz-LIDAR	80
Kurzberichte	
Smog-Wetterlagen mit hohem Ferntransportanteil (P. BRUCKMANN)	85
Aus dem Deutschen Wetterdienst	
Der Smog-Warndienst beim Wetteramt Essen (K.-H. BOCK)	91
Die Bibliothek des Deutschen Wetterdienstes hat 150000 bibliographische Einheiten (H.-D. KIRCH)	94
Aus dem Geophysikalischen Beratungsdienst der Bundeswehr	
Geophysikalische Einflüsse beim Einsatz der DO 28 OU im Rahmen des Umweltschutzes (R. v. HOLT)	95
Buchbesprechungen - Neuerscheinungen	96

G. PETERS

13 FM-CW-RADAR zur Fernmessung des Wind- und Temperaturprofils in der unteren Atmosphäre

1 Einleitung

In den letzten Jahren haben sich neue Möglichkeiten für eine bodengebundene Fernerkundung von Wind und Temperatur gezeigt. Im folgenden soll nur auf die in Hamburg entwickelten Systeme und Methoden eingegangen werden.

Wind

Bereits seit vielen Jahren werden sogenannte ST-Radargeräte (ST für „Stratospheric, Tropospheric“) betrieben, um aus der Streuung an natürlichen Brechungsindexinhomogenitäten in der Atmosphäre das Windfeld abzuleiten (GAGE u. BALSLEY, 1978; BALSLEY et al., 1982; FRISCH et al., 1986; STRAUCH et al., 1984). Diese äußerst leistungsfähigen Systeme mit Antennen von der Größe eines Fußballfeldes können mit der Sondierung allerdings erst oberhalb einer Meßhöhe von mehr als einem Kilometer beginnen.

Zur Untersuchung konvektiver Prozesse, die sich im unteren Teil der Troposphäre, und häufig auch nur in den unteren 1000 m abspielen, sind diese Meßsysteme daher nicht geeignet.

Mit dem hier beschriebenen hochauflösenden Radar wird die Lücke im bodennahen Bereich geschlossen. Es arbeitet im Gegensatz zu den herkömmlichen pulsmodulierten System nach dem FM-CW-Verfahren (Frequency Modulated Continuous Wave), bei dem der Sender im Dauerstrich betrieben wird.

Temperatur

Die Temperatur beeinflusst die Schallgeschwindigkeit in der Atmosphäre. Ist die Schallgeschwindigkeit als Funktion der Höhe bekannt, so kann hieraus die Temperaturverteilung abgeleitet werden. Ein Verfahren, die Schallgeschwindigkeit aus der Streuung von elektromagnetischen Wellen an Schallwellen abzuleiten, ist unter dem Namen „RASS“ (Radio Acoustic Sounding System) bekannt geworden (FRANKEL UND PETERSON, 1976). Die Theorie dieses Verfahrens, die zunächst nur für spezielle Betriebsarten der beteiligten akustischen und elektromagnetischen Sender entwickelt worden war, wurde verallgemeinert (NALBANDYAN 1976; KON u. TATARSKIY, 1980; PETERS et al., 1983) und schließlich auch für das hier entwickelte und betriebene FM-CW-RADAR abgeleitet (PETERS et al., 1988).

Damit steht ein kombiniertes System zur Verfügung, mit dem die Wind- und Schallgeschwindigkeit im gleichen Streuvolumen simultan mit hoher räumlicher und zeitlicher

Auflösung in einem Höhenbereich zwischen 50 und 1000 m erfaßt werden können. Diese obere Grenze ist vor allem durch die Verdriftung des Schalls mit dem Wind bedingt, die zu einer Verletzung der geometrischen Reflexionsbedingungen führt.

Allerdings hat KON (1985) theoretisch gezeigt, daß mit einem hochempfindlichen Radar und bei ausreichender Turbulenz auch noch oberhalb des geometrisch möglichen Bereichs diffuse Echos von den Schallwellen empfangen werden können.

Zusätzliche Windmessung

Neben der Temperatur kann aus der Differenz der Schallgeschwindigkeiten in Richtung verschieden geneigter Radarstrahlen auch der Wind noch einmal abgeleitet werden. Dies ist insbesondere in den unteren Meßhöhen (<500 m) eine willkommene Ergänzung, da das Streusignal von natürlichen Brechungsindexstrukturen in diesem Höhenbereich durch Bodenechos überlagert sein kann.

Diese werden zwar im Zuge der Signalverarbeitung sehr wirksam unterdrückt, falls es sich dabei um feste Strukturen wie z. B. Gebäude oder Berge handelt. Bewegliche Objekte (Straßenverkehr, Bäume oder Fernsehantennen im Wind) können jedoch im Nahbereich die aus natürlicher Streuung abgeleitete Windmessung verfälschen. Das Echo an Schallwellen ist hiervon jedoch aufgrund der hohen Schallgeschwindigkeit leicht zu unterscheiden, so daß die daraus abgeleitete Windmessung in jedem Fall von Bodenechos unbeeinflusst ist.

2 Meßprinzip

2.1 Radiale Geschwindigkeitskomponenten

Für die Bestimmung sowohl der Windgeschwindigkeit als auch der Temperatur wird die Verlagerungsgeschwindigkeit der streuenden Strukturen parallel zum Radarstrahl gemessen. Im ersten Falle sind diese Strukturen passiv mit dem Wind mitgeführte, natürliche, turbulente, im zweiten Falle von den Schallwellen erzeugte Brechungsindexinhomogenitäten.

In beiden Fällen handelt es sich um räumlich kontinuierlich verteilte Strukturen und nicht um lokalisierbare Objekte wie z. B. ein Flugzeug oder einen Vogel, deren Geschwindigkeit aus der Änderung des Ortes mit der Zeit abgeleitet werden könnte. Dennoch kann ihre Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Ort aus der zeitlichen Phasenänderung des Echosignals abgeleitet werden, wobei die Messung der Phasenän-

derung zur Erreichung der erforderlichen Genauigkeit über ein Zeitintervall erfolgen muß, das groß gegen die Laufzeit des elektromagnetischen Signals ist.

Ein Radar, das hierzu in der Lage ist, wird als „kohärentes Radar“ bezeichnet. Synonym hierzu wird auch die Bezeichnung „Doppler-Radar“ verwendet, denn die zeitliche Phasenänderung des Streusignals stellt eine Frequenzverschiebung dar, die normalerweise der Dopplerverschiebung gleicht. Dies ist praktisch immer der Fall bei Streuung an „natürlichen“ Brechungsindexinhomogenitäten, bedingt durch turbulente Temperatur- und Wasserdampfschwankungen oder Niederschlag.

Umso überraschender war daher die Erfahrung, daß bei dem RASS-Verfahren ein hiervon abweichendes Verhalten auftreten kann:

Die Frequenzverschiebung der Radar-Echos an Schallwellen entspricht keineswegs immer dem Dopplereffekt. Z. B. ist bei Aussendung eines kontinuierlichen, sinusförmigen Schallsignals die Echo-Frequenzverschiebung exakt gleich der Schallfrequenz f_s . Sie enthält damit im Gegensatz zur Dopplerverschiebung keine Information über die Schallgeschwindigkeit und ist nicht zu ihrer Bestimmung geeignet. Im allgemeinen ist der Zusammenhang zwischen dem Schallfrequenzspektrum und dem Echofrequenzspektrum kompliziert und von schwer quantifizierbaren Einflußgrößen wie z. B. der turbulenzbedingten Kohärenzlänge der Schallwellen in der Atmosphäre abhängig.

Es hat sich jedoch gezeigt, daß bei bestimmten Formen des Schallfrequenzspektrums, bzw. bei bestimmten Modulationsmustern des Schallsignals dennoch eine eindeutige Ableitung des Schallgeschwindigkeitsprofils möglich ist. Hierzu gehört z. B. die Aussendung sehr kurzer Schallimpulse oder weißen Rauschens. In diesen Fällen ähnelt das Wellenzahlspektrum des Schallfeldes dem natürlicher Brechungsindexstrukturen und man erhält die zur Schallgeschwindigkeit proportionale Dopplerverschiebung. Allerdings ist diese Betriebsart nicht ökonomisch, da der größte Teil der gesendeten Schalleistung nicht zum Radarecho beiträgt. Das Echo wird nur von dem Teil des Wellenzahlspektrums der Brechungsindexstruktur hervorgerufen, das die sogenannte Bragg-Bedingung erfüllt. Bei Rückstreuung ist dies in einem Wellenzahlintervall der Breite $1/\Delta H$ der Fall, das bei der Braggwellenzahl k_B zentriert ist. Für diese gilt:

$$k_B = 2 \cdot k_e \quad (1)$$

Dabei ist ΔH die Tiefe des Streuvolumens und k_e die Wellenzahl der elektromagnetischen Strahlung.

In unserem Fall wird daher ein Schallsignal gesendet, das ein aus 8 Linien gleicher Intensität bestehendes Spektrum besitzt, wobei die Linienfrequenz in der Nähe der vermuteten Braggfrequenz gruppiert sind.

Im Echofrequenzspektrum ist der zu jeder Schallfrequenz gehörige Anteil wegen der oben erwähnten, festen Frequenzverschiebung wiederzufinden, so daß der Streuquerschnitt in Abhängigkeit von der Wellenzahl der Brechungsindexstruktur bestimmt werden kann. Die Schallgeschwindigkeit kann nun aus der Lage des Maximums dieser Funktion, das sich bei der Bragg-Wellenzahl der streuenden

Struktur befindet, abgeleitet werden:

Über die Dispersionsrelation für Schallwellen

$$c_m = 2\pi \frac{f_s}{k_B} \quad (2)$$

und durch Einsetzen von Gl. (1) in Gl. (2) ergibt sich die gesuchte Schallgeschwindigkeit c_m .

2.2 Profil des Windvektors und der Temperatur

Als Windprofiler wird ein Radargerät bezeichnet, dessen Antennensteuerung und Signalauswertung speziell dafür ausgelegt sind, um aus dem Streusignal der Atmosphäre das vertikale Profil des Windvektors in einer Säule über dem Meßsystem abzuleiten. Zu diesem Zweck benötigt man mindestens drei nicht-koplanare Strahlrichtungen mit relativ geringem Zenitwinkel (0-30 Grad). Aus den parallel zu jeder Strahlrichtung r_i gemessenen Windkomponenten a_i wird dann jeweils für jede Höhenstufe unter Annahme horizontaler Homogenität des Windfeldes der Windvektor v errechnet:

$$\vec{r}_i \cdot \vec{v} = a_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

Die verschiedenen Strahlrichtungen werden bei Windprofilern meist durch schaltbare Phasenarrayantennen oder durch eine entsprechende Anzahl fest ausgerichteter Antennen erzeugt. Diese Antennenausführung ist der wesentlichste äußere Unterschied zu einem herkömmlichen Radar, das normalerweise über eine mechanisch

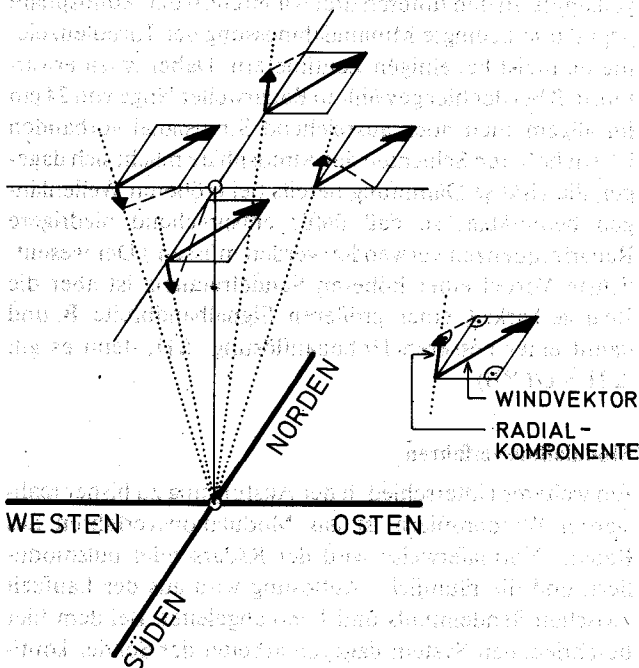


Abb. 1. Typische Strahlanordnung eines Windprofilers.

schwenkbare Antenne verfügt. Die damit mögliche kontinuierliche Einstellung von Strahlrichtungen ist für den Windprofiler nicht erforderlich. Außerdem hätte eine mechanische Schwenkung die Nachteile des Verschleißes und einer relativ großen Einstellzeit zur Folge.

Emittiert man auch Schallwellen parallel zu den Strahlrichtungen des Radars, dann können außerdem die zu den Radarstrahlen parallelen Schallgeschwindigkeitsprofile c_m

gemessen werden. Die vom Radar bestimmte Schallgeschwindigkeit setzt sich zusammen aus der (temperaturabhängigen) Geschwindigkeit relativ zum Medium c_a und der radialen Windkomponente $a_i = r_i \cdot v$, so daß man die Gleichungen

$$\bar{r}_i \cdot \bar{v} + c_a = c_{mi} \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad 4)$$

erhält.

Da zu den drei Komponenten des Windvektors die Schallgeschwindigkeit c_a als weitere Unbekannte hinzugekommen ist, sind zur eindeutigen Bestimmung vier Strahlrichtungen erforderlich.

Mit einem entsprechend konzipierten Phasenarray läßt sich ohne wesentlichen Mehraufwand auch noch eine fünfte Richtung einstellen, so daß man ein Richtungsschema entsprechend Abbildung 1 erhält.

3 Besondere Eigenschaften des hier realisierten Windprofilers

Sendefrequenz

Wegen des relativ geringen zu erfassenden Höhenbereichs kann eine höhere Sendefrequenz als bei herkömmlichen Windprofilern benutzt werden. Die praktikable Obergrenze für die Frequenz wird durch die Abmessungen der atmosphärischen Brechungsindexstrukturen gesetzt. Wegen der Viskosität der Luft werden Turbulenzelemente unterhalb einer gewissen charakteristischen Größe sehr stark gedämpft. In den unteren drei Kilometern der Atmosphäre liegt die so bedingte Minimalabmessung der Turbulenzelemente meist bei einigen Zentimetern. Daher ist zu erwarten, daß bei der hier gewählten Radarwellenlänge von 24 cm im allgemeinen noch ausreichend Streusignal vorhanden ist. (In höheren Schichten der Atmosphäre macht sich dagegen die viskose Dämpfung bereits bei größeren Wellenlängen bemerkbar, so daß dafür entsprechend niedrigere Radarfrequenzen verwendet werden müssen.) Der wesentlichste Vorteil einer höheren Sendefrequenz ist aber die Realisierbarkeit einer größeren Signalbandbreite B und damit einer besseren Höhenauflösung ΔH , denn es gilt $\Delta H = c/(2 \cdot B)$.

Modulationsverfahren

Ein weiterer Unterschied in der Ausführung zu bisher realisierten Windprofilern ist das Modulationsverfahren des Radars. Normalerweise wird der Radarsender pulsmoduliert, und die räumliche Auflösung wird aus der Laufzeit zwischen Sendepuls und Echo abgeleitet. Bei dem hier beschriebenen System dagegen arbeitet der Sender kontinuierlich, was eine separate Sende- und Empfangsantenne erfordert. Die räumliche Auflösung wird mit Hilfe einer sägezahnförmigen Frequenzmodulation des Senders erreicht. Diese bewirkt, daß die Frequenz des Streusignals gegenüber der des Sendesignals proportional zur Entfernung des Streuvolumens verschoben ist und somit zur Entfernungsbestimmung benutzt werden kann. Dieses Verfahren hat gegenüber dem Puls-Radar vor allem im Nahbereich folgende Vorteile:

Da der Sender kontinuierlich arbeitet, benötigt man für die gleiche Systemempfindlichkeit eine viel geringere Sendelei-

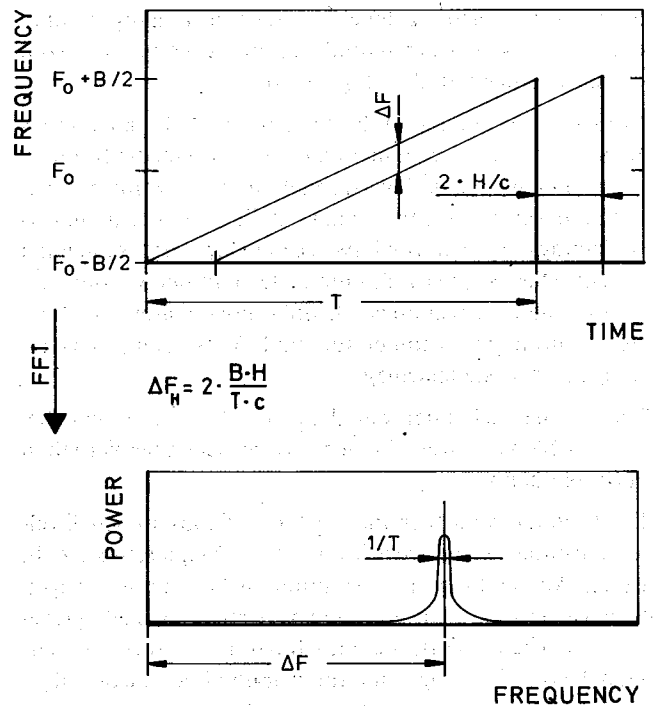


Abb. 2: Zeitlicher Verlauf der Sende- und Echofrequenz sowie Spektrum des Produktsignals eines FM-CW-Radars bei einem ruhenden, punktförmigen Objekt.

stung als beim gepulsten Radar. Die hohen Spitzenleistungen des gepulsten Radar können durch Festechos aus dem Nahbereich zur Übersteuerung des Empfängers führen, was den Empfang atmosphärischer Echos aus sehr niedrigen Höhen (einige hundert Meter) unmöglich macht. Diese Gefahr besteht beim FM-CW-RADAR praktisch nicht. Beim Puls-Radar vergeht eine gewisse Zeit zwischen dem Ende des Sendepulses und dem Einschalten des Empfängers. Diese sogenannte Totzeit setzt ebenfalls eine Grenze für die Höhe des niedrigsten, möglichen Streuvolumens. Dieses Problem tritt beim FM-CW-RADAR nicht auf, da zwischen Senden und Empfangen nicht umgeschaltet wird. Die Feldstärke der Seitenabstrahlung ist beim FM-CW-RADAR entsprechend der kleineren Sendeleistung geringer, was die Gefahr der Störung anderer Nutzer des Frequenzbandes vermindert.

Signalanalyse bei Streuung an natürlichen Brechungsindexinhomogenitäten

Im oberen Teil der Abbildung 2 ist die Sendefrequenz und die Frequenz des Echos von einem punktförmigen Objekt als Funktion der Zeit aufgetragen. Man erkennt, daß das Echo gegenüber dem Sendesignal entsprechend der Objektentfernung zeitlich verschoben ist, im übrigen aber den gleichen zeitlichen Verlauf wie das Sendesignal hat.

Für die weitere Verarbeitung wird das tiefpaßgefilterte Produkt $p(t)$ aus dem Sendesignal und Echo verwendet. Das entsprechende Frequenzspektrum $P(f)$ ist im unteren Teil der Abbildung 2 dargestellt. Wenn das punktförmige Objekt in Ruhe ist, besteht es aus einer Linie der Breite $1/T$ bei der Frequenz $\Delta f_H = (2 \cdot H \cdot B)/(T \cdot c)$.

Diese Differenzfrequenz Δf_H zwischen Sendesignal und Echo ist somit ein Maß für die Entfernung H des streuenden

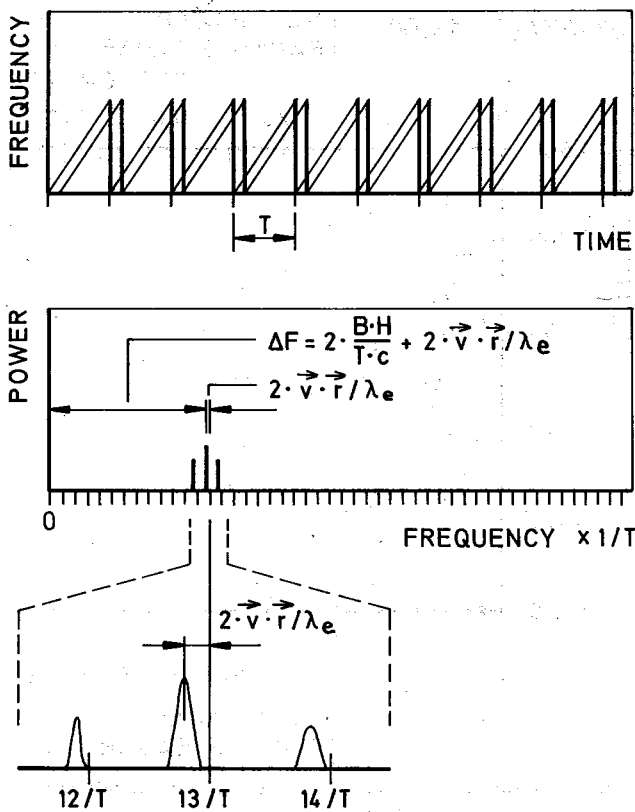


Abb. 3: Wie Abb. 2, jedoch mit einem Zeitfenster über mehrere „Sägezähne“ und punktförmigem Objekt mit Radialgeschwindigkeit $v \cdot r$. (λ_e = Länge der elektromagnetischen Wellen).

Objekts. Wenn aber das Objekt in Bewegung ist, kommt eine weitere Frequenzverschiebung Δf_H hinzu. Im Falle von monochromatischen Schallwellen wäre dies kein Problem, da die hierdurch bedingte Frequenzverschiebung bekannt ist. Wenn jedoch, wie im Falle natürlicher Brechungsindexstrukturen eine zusätzliche Frequenzverschiebung als Funktion der (unbekannten) Radialgeschwindigkeit a auftritt, können aus der gemessenen Summe $\Delta f = \Delta f_H + \Delta f_a$ der Ort und die Geschwindigkeit nicht eindeutig abgeleitet werden. Deshalb war man bis vor einigen Jahren auch der Ansicht, daß sich das FM-CW-RADAR nicht für Windmessungen eignet.

Dann zeigte jedoch STRAUCH (1976), daß die Kohärenzzeit des Streusignals groß genug ist, um die Phasen der Spektren $P(f)$ von aufeinanderfolgenden „Sägezähnen“ zu vergleichen.

Falls nämlich die streuende Struktur ruht, wiederholen sich die Echosignale exakt - einschließlich ihrer Phase. Im Falle einer radialen Bewegungskomponente verändert sich dagegen die Phase von Spektrum zu Spektrum. Damit kann die Geschwindigkeit, wie beim kohärenten Radar üblich, aus der zeitlichen Phasenänderung abgeleitet werden.

Der Übergang von einem punktförmigen Objekt zu einer räumlich verteilten Brechungsindexstruktur bringt keine besonderen Schwierigkeiten. Man erhält nur statt einer Linie ein kontinuierliches Frequenzspektrum, wobei jede Frequenz einer Meßentfernung entspricht und die zeitliche Änderung ihrer Phase ein Maß für die Geschwindigkeit in dieser Entfernung ist.

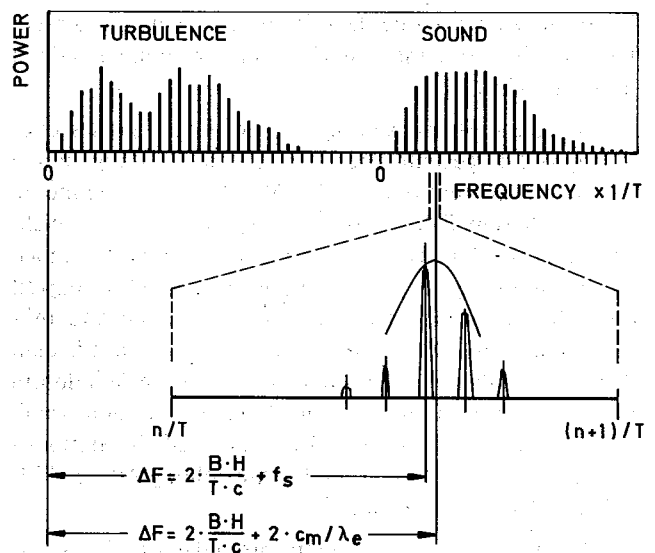


Abb. 4: Differenzfrequenzspektrum $p(f)$ bei Streuung an Turbulenz und an Schall.

In Abbildung 3 ist am Beispiel eines punktförmigen Objektes in der Meßhöhe $H = 13 \cdot c / (2 \cdot B)$ eine technische Möglichkeit dargestellt, diese Signalanalyse durchzuführen: Das Zeitfenster der Fourieranalyse wird hier über eine Folge von mehreren Sägezähnen ausgedehnt. Wenn die Brechungsindexstruktur in Ruhe ist, wiederholt sich das Echosignal exakt mit jedem Sägezahn und man erhält ein Linienspektrum, dessen Linienfrequenzen Vielfache der Sägezahn-Wiederholfrequenz $1/T$ sind. Wenn sich jedoch die Brechungsindexstruktur bewegt, weichen die Linienfrequenzen von n/T ab. Dies ist im unteren Teil der Abbildung 3 vergrößert dargestellt. Im Falle natürlicher (oder wie in diesem Beispiel punktförmiger) Brechungsindexstrukturen ist diese Abweichung gleich der Dopplerverschiebung und somit ein Maß für die Geschwindigkeit in der Meßhöhe H , die sich aus der Linienordnung n entsprechend

$$H = n^* \frac{c}{2 \cdot B} \quad (5)$$

ergibt.

Signalanalyse bei Streuung an Schallwellen

Nur Schallwellenlängen, die annähernd die Bragg-Bedingung erfüllen, tragen nennenswert zum Streusignal bei. Daher brauchen auch nur diese betrachtet zu werden. Die hierdurch bedingte Frequenzverschiebung ist groß gegen die von Echos an natürlichen Brechungsindexstrukturen, so daß die entsprechenden Beiträge zum Empfangssignal getrennt werden können. Ein typisches Spektrum das sowohl turbulente Streuung als auch Streuung an Schallwellen enthält, ist in Abbildung 4 dargestellt. In dem vergrößerten Ausschnitt erkennt man die Aufspaltung des Schall-Echospektrums in die dem Schall-Sendespektrum entsprechenden Linien, aus denen die Bragg-Frequenz in jeder Höhe bestimmt wird.

4 Meßbeispiel

Abbildung 5a zeigt ein Windprofil, das aus den Differenzen der Radialkomponenten in der Ost-West- und Nord-Süd-

Ebene abgeleitet wurde. Das Streusignal wurde in diesem Fall durch turbulente Brechungsindexinhomogenitäten hervorgerufen.

In Abbildung 5b ist dagegen ein bei Regen gemessenes Windprofil dargestellt. Hier überwog die Streuung an den (fallenden) Regentropfen. Die Vertikalwindkomponente kann in diesem Fall wegen der Fallgeschwindigkeit nicht abgeleitet werden. Trotz dieser Eigenbewegung ist jedoch die Bestimmung der Windrichtung und -geschwindigkeit möglich, da die Tropfen mit dem Horizontalwind mitgeführt werden. Dies wird durch den Vergleich mit dem durch das Ballonverfolgungsradar gemessene Windprofil bestätigt. Bei der Bewertung der Vergleiche in den Abbildungen 5a und 5b ist zu berücksichtigen, daß die Startposition der Ballone 30 km von dem Aufstellungsort des FM-CW-RADARs entfernt war.

In Abbildung 6 ist ein Temperaturprofil dargestellt, das aus dem Profil der zu einem vertikal gerichteten Radarstrahl parallelen Schallgeschwindigkeit abgeleitet ist. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Schallgeschwindigkeit nicht nur von der Temperatur sondern in geringem Maß auch vom Wasserdampf und von der zur Schallausbreitung parallelen Windkomponente (entsprechend Gl. (4)) beeinflußt wird.

Beeinflussung durch den Wasserdampf

Der Fehler, der bei Nichtberücksichtigung des Wasserdampfes entsteht, ist fast exakt gleich der Differenz zwischen der Virtuelltemperatur und der Temperatur, d. h. für viele Anwendungen wie z. B. die Stabilitätsbestimmung der Atmosphäre ist der Wasserdampf in durchaus erwünschter Weise im Meßwert enthalten. In diesem Fall wurde der mit der Radiosonde gemessene Wasserdampfgehalt zur Korrektur der Temperatur herangezogen. Im allgemeinen genügt aber eine aus den Bodenwerten der Wasserdampfkonzentration abgeschätzte Korrektur, um eine Genauigkeit von wenigen zehntel Kelvin zu erreichen.

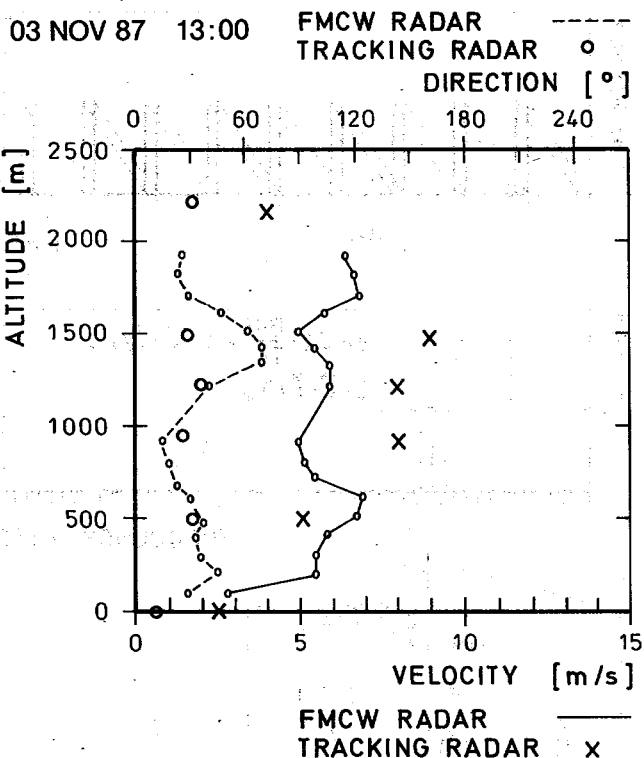


Abb. 5a: Profil der Windgeschwindigkeit und Windrichtung. Vergleich mit Ballonverfolgungsradar.

Beeinflussung durch den Wind

Die Beeinflussung durch den Wind muß dagegen für die Temperaturableitung in jedem Falle eliminiert werden, was auf zwei Weisen geschehen kann: Bei vertikal gerichtetem Schallstrahl kann man entweder nach genügend langer Mittelungszeit die vertikale Windkomponente vernachlässigen oder man leitet diese simultan aus der Turbulenzstreuung ab und führt eine entsprechende Korrektur durch. Dies ist besonders für zeitlich hoch aufgelöste Messungen, z. B. zur Bestimmung des turbulenten Wärmestroms wichtig.

Die Beeinflussung der Schallgeschwindigkeit ist allerdings nicht nur ein Nachteil, sondern aus den Differenzen der

15 JAN 88 15:00

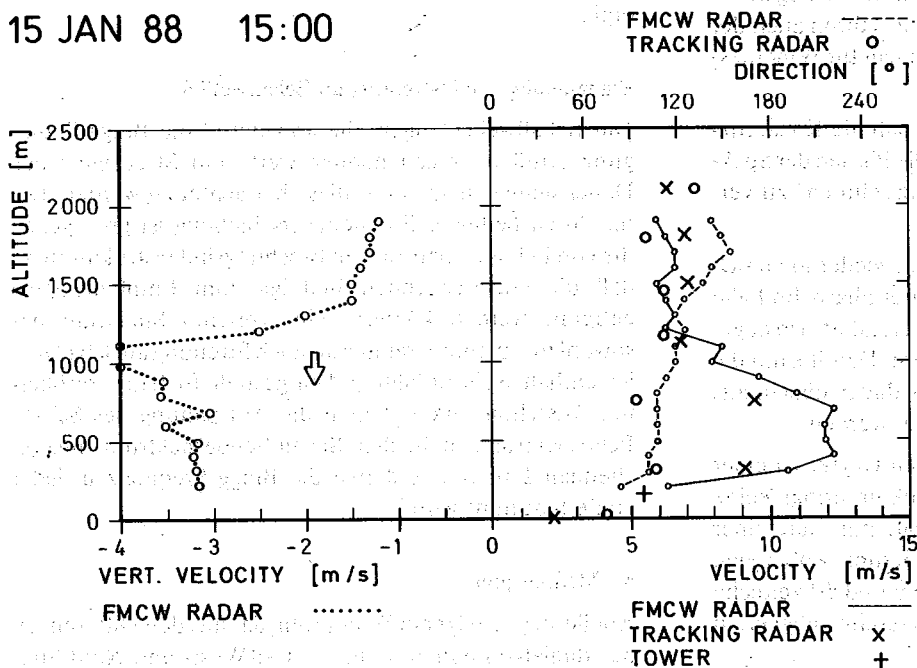


Abb. 5b: Wie Abb. 5a, jedoch bei Regen.

10 JAN 84 12:00

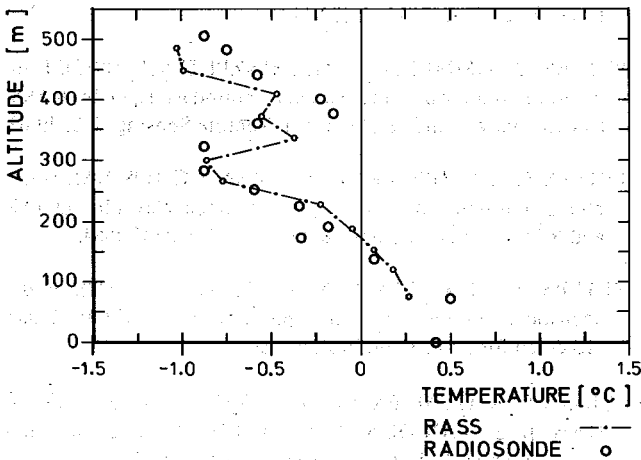


Abb. 6: Temperaturprofil, aus Profil der vertikal gerichteten Schallgeschwindigkeit abgeleitet. Mittelungsintervall 10 min.

unter verschiedenen Strahlrichtungen gemessenen Schallgeschwindigkeitsprofile kann der Windvektor eindeutig bestimmt werden. Wie aus Gl. (4) hervorgeht, enthalten die Differenzen $c_{mi} - c_{mj}$ nicht c_a und sind daher nicht von der Temperatur und Feuchte sondern nur vom Windvektor abhängig. Ein Beispiel eines so abgeleiteten Windprofils ist in Abbildung 7 dargestellt. Diese Messungen sind vor allem im unteren Höhenbereich nützlich, in denen auch Reflexionen an bewegten Bodenstrukturen, wie z. B. Fahrzeugen oder im Wind schwankenden Bäumen Verfälschungen des Streusignals an Turbulenz auftreten können. Die Schallgeschwindigkeitsmessungen sind gegen solche Einflüsse völlig immun.

5 Abschließende Bemerkung

In den obigen Meßbeispielen sind die äußerst vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten dieses kombinierten Meßsystems nur angedeutet.

Nachdem das Meßsystem erst vor kurzem in Betrieb genommen wurde, müssen sie weiter erprobt werden. Dies gilt vor allem für die Ableitung des turbulenten Impuls- und Wärmestroms sowie der Varianzen und gegebenenfalls höherer Momente.

Ein weiterer Anwendungsbereich ist der Niederschlag. Wegen des bekannten Zusammenhangs zwischen Streuquerschnitt, Tröpfchengröße und Fallgeschwindigkeit können aus den Dopplerspektren mehrere Niederschlagsparameter abgeleitet werden. Durch die Kombination mit den vom Niederschlag beeinflussten Messungen der Schallgeschwindigkeit eröffnen sich neue Einblicke in das Feld der atmosphärischen turbulenten Geschwindigkeitsverteilung und der Fallgeschwindigkeitsverteilung des Niederschlags.

Anhang:

Systemparameter des FM-CW-RADARs

Stand: Januar 1988

Radar-Sendeantenne und -Empfangsantenne

Phasennarrays mit je 4 x 16 Hornstrahlern im Raster 30 cm x 40 cm

20 JAN 88 18:40

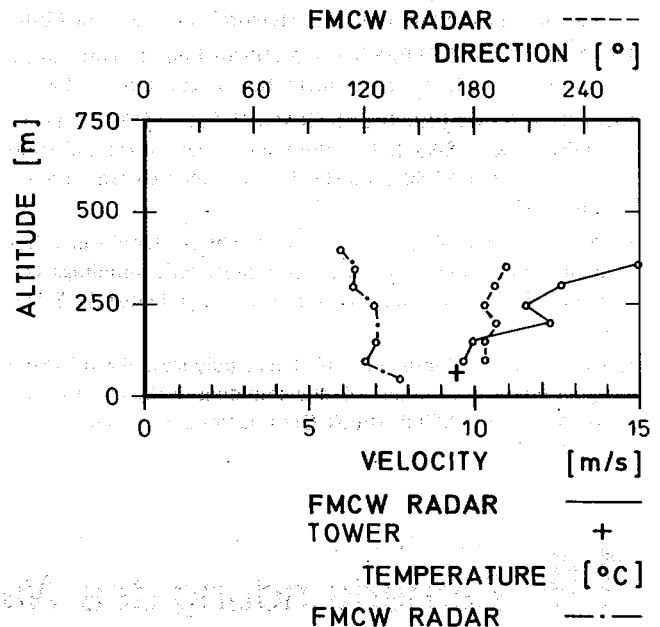


Abb. 7: Windprofil aus Schallgeschwindigkeitsdifferenzen.

Aktive Fläche: 1.6 m x 4.8 m
 Äußere Abmessungen: LxBxH 5.3 m x 2.5 m x 3.0 m

Gewicht pro Antenne einschließlich Fahrgestell ca. 1.8 to
 Strahlrichtungen elektrisch umschaltbar in folgenden fünf Richtungen:

0. Vertikal
1. Nord-Süd-Ebene + 8.6 Grad Zenitwinkel
2. Nord-Süd-Ebene - 8.6 Grad Zenitwinkel
3. Ost-West-Ebene +11.5 Grad Zenitwinkel
4. Ost-West-Ebene -11.5 Grad Zenitwinkel

Halbwertsbreite des Strahls in der Nord-Süd-Ebene ± 2.3 Grad

Halbwertsbreite des Strahls in der Ost-West-Ebene ± 0.8 Grad

Radar-Sende Signal

Sendeleistung: 200 W Dauerstrich
 Mittenfrequenz: 1240 MHz
 Modulation: Frequenzmodulation
 Frequenzhub: Bis zu 10 MHz je nach Höhenauflösung
 Modulations-Folgefrequenz: 50, 100, 200 Hz
 Modulationsfunktion: Sägezahn

Meßbereich und Auflösung

Windgeschwindigkeitsbereich: 0-40 m/s
 Vertikalwindbereich: 0-10 m/s
 Höhenbereich: typ. 50-2000 m
 Höhenauflösung: 15-200 m
 Zeitliche Auflösung: Pro Radialwindkomponente 10s

Literatur

- BALSLEY, B. B.; GAGE, K. S. (1982): On the use of radars for operational wind profiling. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 63, S. 1009-1018.
- FRANKEL, M. S.; PETERSON, A. M. (1976): Remote temperature profiling in the lower troposphere. *Radio Sci.*, 11, S. 157-166.
- FRISCH, A. S.; WEBER, B. L.; STRAUCH, R. G.; MERRIT, D. A.; MORAN, K. P. (1986): The altitude coverage of the Colorado wind profilers at 50, 405, and 915 MHz. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 3, S. 680-692.
- KON, A. I.; TATARSKIY, V. I. (1980): The scattered signal frequency spectrum for radio acoustical atmospheric soundings. *Izv. Acad. Sci. USSTR Atmos. Oceanic Phys., Engl. Transl.*, 16, S. 142-148.
- KON, A. I. (1985): Combined effect of turbulence and wind on the signal intensity in radio acoustic sounding of the atmosphere. *Izv. Acad. Sci. USSTR Atmos. Oceanic Phys., Engl. Transl.*, 21, S. 942-947.
- NALBANDYAN, O. G. (1977): The theory of radio acoustic sensing of the atmosphere. *Izv. Acad. Sci. USSTR Atmos. Oceanic Phys., Engl. Transl.*, 13, S. 172-177.
- PETERS, G.; TIMMERMANN, H.; HINZPETER, H. (1983): Temperature sounding in the planetary boundary layer by RASS-System analysis and results. *Int. J. Remote Sensing*, 4, S. 49-63.
- PETERS, G.; HINZPETER, H.; BAUMANN, G. (1985): Measurements of heat flux in the atmospheric boundary layer by SODAR and RASS: A first attempt. *Radio Sci.*, 20, S. 1555-1564.
- PETERS, G.; HASSELMANN, D.; PANG, S. (1988): Radio acoustic sounding of the atmosphere using a FM-CW-Radar. Accepted for publication in *Radio Sci.*
- STRAUCH, R. G.; MERRITT, D. A.; MORAN, K. P.; EARNSHAW, K. B.; VAN DE KAMP, D. (1984): The Colorado wind-profiling network. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 1, S. 37-49.