

Untersuchung der polaren sommerlichen Mesosphäre mit unterschiedlichen Radarverfahren im VHF-Bereich

Dissertation

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Ingenieurwissenschaften

der Universität Rostock

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Marius Zecha, geb. am 11.12.1968 in Rudolstadt.

angefertigt am

Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik Kühlungsborn
an der Universität Rostock (e.V.)

Kühlungsborn, den 4. Februar 1999

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	2
Verzeichnis der Symbole und Abkürzungen	7
0 Einführung	9
1 Die Atmosphäre	12
1.1 Die mittlere Atmosphäre der Erde	12
1.1.1 Die Struktur der Atmosphäre	12
1.1.2 Die Dynamik der Atmosphäre	14
1.1.3 Beobachtungsmöglichkeiten der Atmosphäre	14
1.2 Untersuchungen der mittleren Atmosphäre mittels Radartechnik	15
1.2.1 Streuprozesse in der Atmosphäre	15
1.2.2 Radarkonzepte	17
2 Meß- und Datenanalyse-Techniken	18
2.1 Doppler Beam Swinging Verfahren	18
2.2 Spaced Antenna Verfahren	28
3 Das ALOMAR SOUSY Radar	43
3.1 Historische Entwicklung und Standort des Radars	43
3.2 Technische Parameter und Steuerung des Radarsystems	44
4 Entwicklung eines Simultanbetriebs von DBS- und SA-Messungen	50
4.1 Kalibrierung des Radars	51
4.1.1 Empfangscharakteristik der Antenne	51
4.1.2 Kalibrierung der Empfänger	56
4.1.3 Phasenkalibrierung der Empfangskanäle	59
4.2 Wahl der Parameter für den Simultanbetrieb	60
4.2.1 Antennenfelder	60
4.2.2 Signaltechnische Parameter	61

4.2.3	Bearbeitungsablauf	63
4.3	Signalanalyse -und synthese	65
4.3.1	Korrektur der Zeitreihen	65
4.3.2	Korrektur der Spektren	67
4.3.3	Approximation der Korrelationsfunktionen	68
4.4	Fehlerbetrachtungen	69
4.4.1	Bestimmung der Signalleistung aus der AKF	69
4.4.2	Dreiecksgrößeneffekt der vollen Korrelationsanalyse	70
4.4.3	Auswahlkriterien der vollständigen Korrelationsanalyse	72
4.5	Messung eines zeitlich konstanten Windfeldes mit dem DBS- und dem SA-Verfahren in der Tropo- und unteren Stratosphäre	74
5	Ergebnisse simultaner PMSE-Untersuchungen mit DBS- und SA- Messungen	76
5.1	Signal-Rausch-Verhältnis	78
5.2	Räumliche Streueigenschaften und Aspektempfindlichkeit	78
5.3	Zeitliche Streueigenschaften und Turbulenz	83
5.4	Horizontale Windgeschwindigkeit	84
5.5	Vertikale Windgeschwindigkeit	93
5.6	Zusammenfassung der Ergebnisse	99
6	Zusammenfassung und Ausblick	100
	Literaturverzeichnis	104
	Danksagung	112
	Eidesstattliche Erklärung	113

Abbildungsverzeichnis

1.1	Die vertikale Temperaturstruktur der Erdatmosphäre (z. B. BRASSEUR und SOLOMON, 1986)	13
1.2	Die vertikale Struktur der mittleren Elektronenkonzentrationen für die Tag- und die Nacht-Ionosphäre (z. B. RICHMOND, 1987)	13
1.3	Auswirkungen von Bragg-Streuung, Fresnel-Reflexion und Fresnel-Streuung auf den Brechungsindex (nach RÖTTGER und LARSEN, 1990)	16
2.1	Bestimmung der Doppler-Parameter aus den Momenten des Leistungsdichtespektrums und aus der komplexen Autokorrelationsfunktion . . .	21
2.2	Leistungskurven von Radarstrahl (P_b), Rückstreuung (P_s) und effektivem Strahl (P_{sb}) in Abhängigkeit vom Zenitwinkel (nach RÖTTGER, 1981)	23
2.3	Bestimmung der Windkomponenten u , v und w in der Höhe h aus den radialen Geschwindigkeiten V_R , die mit einem Radarstrahl in mindestens drei verschiedenen Schwenkrichtungen mit dem Azimut ϕ und dem Zenitwinkel θ gemessen werden (Doppler Beam Swinging)	27
2.4	Überblick über verschiedene Spaced-Antenna-Analysetechniken nach VANDEPEER (1993) und HOLDSWORTH (1995a)	29
2.5	Bestimmung des Windes mit mehreren räumlich getrennten und vertikal ausgerichteten Antennen (Spaced Antenna)	31
2.6	Konturen eines isometrischen Streumusters (links). Die Konturen gleicher Korrelation für dieses Muster bilden Kreise (rechts), nach BRIGGS (1984).	32
2.7	Konturen eines anisometrischen Streumusters (links). Die Konturen gleicher Korrelation für dieses Muster bilden Ellipsen (rechts), nach BRIGGS (1984)	32
2.8	Ein stationäres, sich zeitlich zufällig veränderndes Streumuster (links). Die Konturen gleicher Korrelation für dieses Muster bilden Ellipsoidoberflächen (rechts).	33

2.9	Ein sich bewegendes und zeitlich veränderndes Streumuster (links). Die Konturen gleicher Korrelation für dieses Muster bilden die Oberflächen schiefer Ellipsoide (rechts).	34
2.10	Schematische Darstellung zur Ermittlung der Konstanten τ' und τ^* aus den direkt beobachtbaren zeitlichen Korrelationsfunktionen	36
2.11	Effektives Leistungsdiagramm und mittlere Empfangswinkel bei Messungen mit einem vertikal ausgerichteten Antennenstrahl	40
2.12	Prinzip der Bestimmung des Zenitwinkels θ und des Azimuts ϕ durch Messen der Phasendifferenz	41
3.1	Standort des ALOMAR SOUSY Radars auf Andoya (69.3°N, 16.0°E) .	44
3.2	Ansicht des ALOMAR SOUSY Radars an der Küste der nordnorwegischen Insel Andoya	45
3.3	Antennendiagramm des ALOMAR-SOUSY Radars	46
3.4	Speisesystem des ALOMAR SOUSY Radars (SINGER <i>et al.</i> , 1995) . . .	49
3.5	Blockdiagramm des ALOMAR SOUSY Radars (SINGER <i>et al.</i> , 1995) .	49
4.1	Bahnkurve von Cassiopeia A durch das Polardiagramm der um 8 Grad nach Süden geschwenkten Antenne	55
4.2	Empfangene Rauschleistung während des Durchlaufs des Radiosterns Cassiopeia A durch die Antennenhauptkeule	55
4.3	Kalibrierung der vier Empfänger am 18. April 1996	58
4.4	Bestimmung der mittleren Phasendifferenzen der Empfangskanäle . . .	60
4.5	Empfangsfelder für DBS- und SA-Messungen in der Tropo- und Stratosphäre	62
4.6	Empfangsfelder für DBS- und SA-Messungen in der Mesosphäre	62
4.7	Pulsschema des ALOMAR SOUSY Radars für simultane DBS- und SA-Messungen	64
4.8	Bearbeitungsablauf der kombinierten DBS- und SA-Messungen	64
4.9	Typische mit dem ALOMAR SOUSY Radar aufgenommene Signalzeitreihen	66
4.10	Typisches Amplitudenspektrum	67
4.11	Interpolation der Autokorrelationsfunktion zur Ermittlung des Signal-Rausch-Verhältnisses und des Normierungsfaktors	69
4.12	Höhenprofile des meridionalen, zonalen und vertikalen Windes für eine Messung in der Tropo- und Stratosphäre am 8. April 1997	74
5.1	Unterschiedliche räumliche Auflösung des DBS- und SA-Verfahrens am Beispiel einer Messung in 85 km Höhe mit dem ALOMAR SOUSY Radar	77

5.2	Signal-Rausch-Verhältnis der DBS-Messung für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997	79
5.3	Signal-Rausch-Verhältnis der SA-Messung für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997	79
5.4	Die charakteristische Korrelationslänge für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997	81
5.5	Achsenverhältnis der charakteristischen räumlichen Ellipse für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997	81
5.6	Nach der Dopplermethode bestimmte Aspektempfindlichkeit: Zenitwinkel θ_s für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997	82
5.7	Nach der Korrelationsmethode bestimmte Aspektempfindlichkeit: Zenitwinkel θ_s für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997	82
5.8	Bestimmung unterschiedlicher Aspektempfindlichkeitswerte bei unterschiedlichen Schwenkwinkeln (nach HOCKING <i>et al.</i> , 1990)	84
5.9	Charakteristische Korrelationszeit $T_{0,5}$ für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997	85
5.10	Schätzung der turbulenten Geschwindigkeit für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997	85
5.11	Meridionaler Wind nach dem DBS-Verfahren für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997	86
5.12	Zonaler Wind nach dem DBS-Verfahren für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997	86
5.13	Meridionaler Wind nach dem SA-Verfahren für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997	87
5.14	Zonaler Wind nach dem SA-Verfahren für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997	87
5.15	Mittlere Höhenprofile der zonalen und meridionalen Winde für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997	89
5.16	Korrelogramme halbstündlich gemittelter horizontaler Winde von DBS- und SA-Messungen	90
5.17	Lage der mittels DBS- und SA-Radarmessungen beobachteten Gebiete in 85 km Höhe und Bahnkurve der Folienwolke für eine Messung am 15. Juli 1997 von 12:52-13:00 UTC)	92
5.18	Vergleich der mittleren Höhenprofile der zonalen und meridionalen Winde von DBS-, SA- und Folienwolkenmessungen für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997	92

5.19 Vertikale Windgeschwindigkeit der DBS-Messungen, bestimmt aus den Empfangssignalen von fünf Schwenkrichtungen, für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997	93
5.20 Radiale Windgeschwindigkeit der DBS-Messungen, bestimmt aus dem Empfangssignal des vertikal ausgerichteten Antennenstrahls, für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997	94
5.21 Korrigierte vertikale Windgeschwindigkeit der DBS-Messungen für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997	94
5.22 Radiale Windgeschwindigkeit der SA-Messungen, bestimmt aus dem Empfangssignal der vertikal ausgerichteten Antennenstrahlen, für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997	95
5.23 Korrigierte vertikale Windgeschwindigkeiten der SA-Messungen für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997	95
5.24 Korrektur der vertikalen Windgeschwindigkeiten für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997	97

Verzeichnis der Symbole und Abkürzungen

λ	Radarwellenlänge
ϕ	Azimutwinkel (von Nord nach Ost)
ρ	Betrag der Korrelationsfunktion
τ	zeitliche Differenz
θ	Zenitwinkel
AKF	Autokorrelationsfunktion
ALOMAR	Arctic Lidar Observatory for Middle Atmosphere Research
DBS	Doppler Beam Swinging
e	partieller Druck des Wasserdampfs
f	Frequenz
FCA	Full Correlation Analysis
HF	High Frequency
HPHW	Half Power Half Width
KKF	Kreuzkorrelationsfunktion
MF	Middle Frequency
MST	Mesosphäre Stratosphäre Troposphäre
n	Brechungsindex
N_e	Elektronendichtezahl
NTD	normalized time discrepancy
p	Druck
P	Leistung
PMSE	polares mesosphärisches Sommerecho
rms	root mean square
SA	Spaced Antenna
SOUSY	Sounding System
SRV	Signal-Rausch-Verhältnis
T	Temperatur

TSE	triangle size effect
u	zonaler Wind (positiv: nach Osten)
UHF	Ultra High Frequency
UTC	Universal Time Coordinated
v	meridionaler Wind (positiv: nach Norden)
V	Windgeschwindigkeit
VHF	Very High Frequency
w	vertikaler Wind (positiv: nach oben)

0 Einführung

Die heute hauptsächlich zur Untersuchung der unteren und mittleren Atmosphäre eingesetzten kohärenten VHF-Radars haben ihren Ursprung in den sehr leistungsfähigen ionosphärischen Radargeräten (z.B. WOODMAN und GUILLEN, 1974). Neben sehr großen teuren Geräten wurden in den letzten Jahren aus Kostengründen jedoch auch wesentlich kleinere und kompaktere Radarsysteme aufgebaut. Ihre Anzahl hat sich seit den siebziger Jahren ständig erhöht, so daß inzwischen ein weltweites Netz zur Beobachtung der Struktur und Dynamik der Troposphäre, Stratosphäre und Mesosphäre entstanden ist (vgl. HOCKING, 1997).

Die Untersuchung der Atmosphäre ist mit diesen VHF-Radars gewöhnlich bis zu Höhen von etwa 20 km möglich. Darüber wird die Zahl der rückstreuenden Strukturen zu gering, um noch auswertbare Signale zu erhalten. Anfang der achtziger Jahre wurde jedoch beobachtet, daß im Sommer in polaren Breiten mit VHF-Radars besonders starke Echos aus 80-90 km Höhe empfangen werden können (ECKLUND und BALSLEY, 1981). Diese wurden daher polare mesosphärische Sommerechos (PMSE) genannt und in den folgenden Jahren mit verschiedenen Radarexperimenten beobachtet. Die Echos treten nur im Sommer und in atmosphärischen Regionen auf, in denen mit bis zu -150°C die kältesten natürlich vorkommenden Temperaturen der Erdatmosphäre gemessen wurden. Obwohl in den letzten Jahren durch vergleichende Beobachtungen neue Erkenntnisse gewonnen und mehrere Modellansätze zur Erklärung der PMSE-Entstehung entwickelt wurden (z.B. RÖTTGER und LAHOZ, 1990; CHO und KELLEY, 1993; RÖTTGER, 1994; BREMER *et al.*, 1996; CHO und RÖTTGER, 1997; HOCKING, 1997), konnten ihre Ursachen bisher noch nicht zweifelsfrei bewiesen werden.

Die Untersuchung der polaren Mesosphäre erfolgt beim Einsatz von VHF-Radars hauptsächlich durch die Kombination der Empfangssignale eines nacheinander in mehrere Richtungen geschwenkten Antennenstrahls (Doppler Beam Swinging Verfahren - DBS). Damit ist relativ kostengünstig eine zeitkontinuierliche Beobachtung der Struktur und Dynamik der der PMSE-Schichten möglich.

Daneben besteht aber auch die Möglichkeit, rückgestreute Signale zeitgleich mit mehreren räumlich getrennten Empfangsantennen aufzunehmen (Spaced Antenna Verfahren - SA) und zum Beispiel durch eine vollständige Korrelationsanalyse bzw. eine

interferometrische Auswertung der Empfangssignale Winde und Strukturparameter zu bestimmen. Dies ist zunächst mit einem höheren technischen und finanziellen Aufwand verbunden. Da die separaten, vertikal ausgerichteten Empfangsantennen der SA-Messungen meist kleiner als die Empfangsantenne der DBS-Messungen sind, treten zudem schwächere Empfangssignale auf. Durch theoretische Arbeiten und Messungen in der Tropo-/Stratosphäre wurde jedoch nachgewiesen, daß dieses Verfahren für physikalische Untersuchungen der Atmosphäre eine Reihe von Vorteilen bietet (z. B. BRIGGS, 1980; HOCKING, 1983; VAN BAELEN *et al.*, 1990; MAY, 1990). So können die Meßwerte zeitgleich und im selben Meßvolumen aufgenommen werden, außerdem wird durch den Verzicht auf geneigte Radarstrahlen eine Mittelung über einen großen Höhenbereich vermieden. Dies führt sowohl zu einer besseren räumlichen als auch zeitlichen Auflösung der Windwerte.

PMSE-Untersuchungen im VHF-Bereich mit dem Spaced Antenna Verfahren vor 1997 sind nicht bekannt. Das Anliegen der vorliegenden Arbeit war es daher auch, erstmals praktisch ihre Anwendbarkeit aufzuweisen. Für die Messungen wurde das ALOMAR SOUSY Radar in Andenes/Norwegen genutzt. Dieses Radar arbeitet im Routinebetrieb im DBS-Mode und wurde für die Spaced Antenna Messungen um zusätzliche Empfangseinheiten erweitert. Dadurch waren Messungen nach beiden grundlegenden Radarverfahren möglich.

Um die Ergebnisse beider Verfahren vergleichen zu können, wäre es denkbar, die Messungen bei konstanten Bedingungen im Beobachtungsmedium nacheinander durchzuführen. Da sich jedoch die räumlichen und zeitlichen Eigenschaften der PMSE-Strukturen im allgemeinen relativ schnell verändern, sind diese konstanten Bedingungen nicht gegeben und es mußte nach anderen Vergleichsmöglichkeiten gesucht werden. Es wurde daher im Rahmen dieser Arbeit ein spezieller Bearbeitungsablauf entwickelt, der es ermöglicht, weltweit erstmalig simultane DBS- und SA-Messungen im VHF-Bereich während des Auftretens polarer mesosphärischer Sommerechos durchzuführen. Dadurch wird ein direkter Vergleich der Ergebnisse beider Radarverfahren ermöglicht.

Neben den Rückstreuleistungen werden Winde sowie räumliche und zeitliche Variabilitäten der Echostrukturen untersucht. Besonders sensibel ist dabei die Bestimmung des vertikalen Windes. Da sich die gerichteten vertikalen Bewegungen zum Beispiel durch den Einfluß von Wellen in relativ kleinen räumlichen und zeitlichen Skalen ändern, können durch Messungen mit geschwenkten Radarstrahlen nur mittlere vertikale Winde bestimmt werden. Werden vertikal ausgerichtete Radarstrahlen zur Ermittlung der Vertikalbewegungen genutzt, ist zu beachten, daß aufgrund der Breite des Antennenstrahls der Empfangswinkel des Echos außerhalb des Zenits liegen kann und die so ermittelten Geschwindigkeiten durch die horizontalen Bewegungen beeinflusst sind. Im Gegensatz zum DBS-Betrieb können diese Empfangswinkel durch die Auswertung der

zeitgleich empfangenen Signale mehrerer Antennen (SA) bestimmt und somit die vertikalen Winde korrigiert werden. In dieser Arbeit wird gezeigt, daß diese Berichtigung zur korrekten Bestimmung der vertikalen Winde notwendig ist und nicht vernachlässigt werden kann. Erst durch sie werden vertikale Windstrukturen über den gesamten beobachtbaren Höhenbereich sichtbar.

Die vorliegende Arbeit wurde folgendermaßen untergliedert:

Im ersten Kapitel wird einführend die allgemeine Struktur und Dynamik der Erdatmosphäre beschrieben. Weiterhin werden unterschiedliche Beobachtungsmethoden aufgezählt. Insbesondere werden die Untersuchungsmöglichkeiten mittels Radartechnik dargestellt.

Die beiden grundlegenden Meß- und Datenanalyse-Techniken zur Bestimmung physikalischer Eigenschaften und Parameter der Atmosphäre werden im zweiten Kapitel zusammengefaßt.

Im dritten Kapitel werden nach einigen allgemeinen Informationen zur Entwicklung und zum Standort des Radars die seit 1994 durchgeführten Maßnahmen zum Aufbau und zur Erweiterung des ALOMAR SOUSY Radars beschrieben. Es wird gezeigt, daß das Radar technisch für DBS- und SA-Messungen eingesetzt werden kann.

Die Beschreibung der vom Autor durchgeführten Arbeiten zur Entwicklung eines Simultanbetriebs nach den DBS- und SA-Verfahren erfolgt im vierten Kapitel. Es werden die Maßnahmen zur Kalibrierung des Radars dargestellt und die Auswahl der Parameter für den Simultanbetrieb erläutert. Weiterhin werden die Korrektur und Verarbeitung der Empfangssignale beschrieben und mögliche Fehlerquellen aufgezeigt. Außerdem werden die Ergebnisse der ersten vergleichenden Windmessungen nach dem DBS- und SA-Verfahren mit dem ALOMAR SOUSY Radar in der Tropo-/Stratosphäre dargestellt.

Die Ergebnisse der weltweit erstmalig durchgeführten simultanen Messungen mit beiden Radarverfahren während des Auftretens polarer mesosphärischer Sommerechos werden im fünften Kapitel gezeigt und miteinander verglichen. Dabei werden sowohl horizontale als auch vertikale Winde nach beiden Verfahren bestimmt. Die vertikalen Winde werden anhand der ermittelten Empfangswinkel korrigiert und die Ergebnisse diskutiert. Außerdem werden die ermittelten räumlichen und zeitlichen Eigenschaften der Streuer beschrieben.

Im sechsten Kapitel werden schließlich die Resultate der Arbeit zusammengefaßt und Schlußfolgerungen für künftige Arbeiten gezogen.

1 Die Atmosphäre

1.1 Die mittlere Atmosphäre der Erde

1.1.1 Die Struktur der Atmosphäre

Die Atmosphäre der Erde besteht aus einem Gasgemisch, welches die feste Erde umgibt. Sie kann nach verschiedenen Kriterien in Teilbereiche untergliedert werden.

Am gebräuchlichsten ist die Klassifizierung auf der Basis der vertikalen Temperaturstruktur. Diese wird hauptsächlich durch Absorption von solarer Strahlung, ihrer Wechselwirkung mit der Atmosphäre und der Erdoberfläche sowie der Rückstrahlung im infraroten Spektralbereich bestimmt. Abb. 1.1 zeigt einen typischen Temperaturverlauf als Funktion der Höhe über der Erdoberfläche. Die Einteilung der Atmosphäre erfolgt in Höhenbereiche mit positiven bzw. negativen Temperaturgradienten. Diese Bereiche werden von unten nach oben als Troposphäre, Stratosphäre, Mesosphäre und Thermosphäre und ihre Übergänge entsprechend als Tropopause, Stratopause und Mesopause bezeichnet. Obwohl die generelle Struktur weitgehend unabhängig vom Längen- und Breitengrad und von der Jahreszeit ist, können die individuellen Profile aufgrund besonderer Wechselwirkungen und dynamischer Einflüsse stark variieren.

Ein zweites Einteilungsmerkmal ist die lokale Elektronenkonzentration (z. B. RISHBETH und GARRIOT, 1969). Elektronen werden zusammen mit positiven Ionen vor allem durch Ionisation von molekularem Sauerstoff und Stickstoffverbindungen durch einfallende kurzwellige solare und kosmische Strahlung gebildet. Die Elektronenkonzentration ist in der Nacht signifikant kleiner als am Tag, da das Fehlen solarer Strahlung eine verstärkte Rekombination von Elektronen und positiven Ionen ermöglicht. Der Bereich der Atmosphäre, der eine ausreichende Elektronenkonzentration enthält, um auf die Ausbreitung von Radiowellen einzuwirken, wird als Ionosphäre bezeichnet. Die Konzentration erreicht in bestimmten Höhen lokale Maxima. Die Regionen zwischen diesen Maxima werden entsprechend ihrer Höhe als D, E, F₁ und F₂-Schicht bezeichnet (vgl. Abb. 1.2). Die D-Schicht liegt zwischen 60 und 90 km und damit ungefähr im gleichen Höhenbereich wie die Mesosphäre. Beide Begriffe werden daher oftmals gleichberechtigt verwendet.

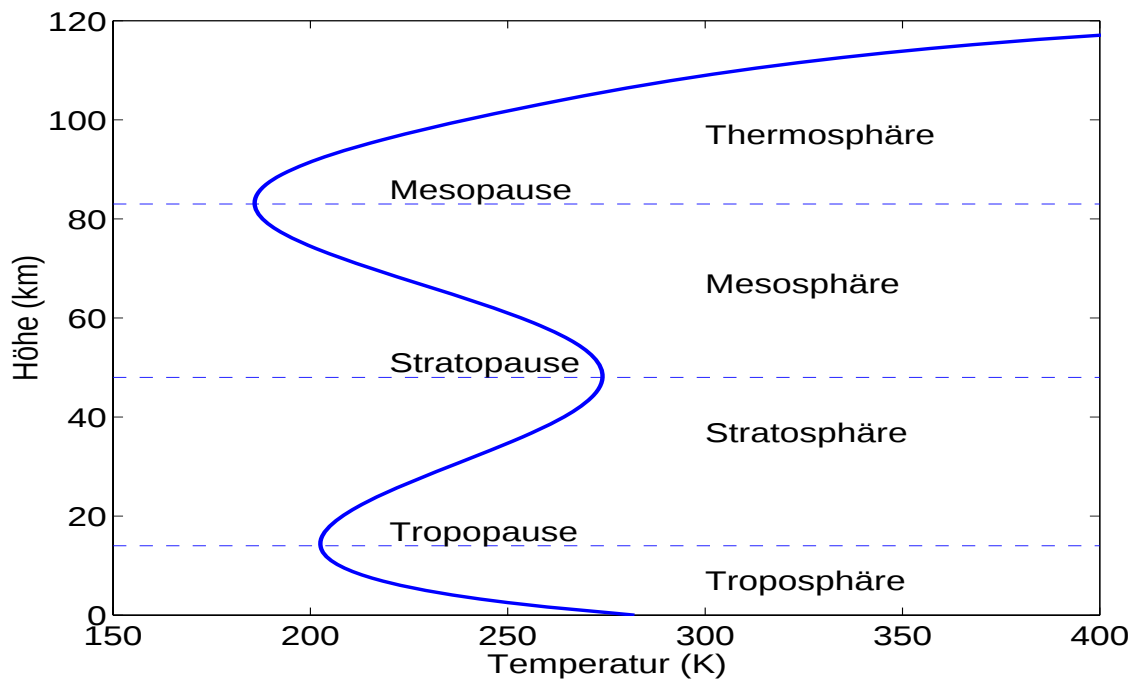


Abbildung 1.1: Die vertikale Temperaturstruktur der Erdatmosphäre (z. B. BRASSEUR und SOLOMON, 1986)

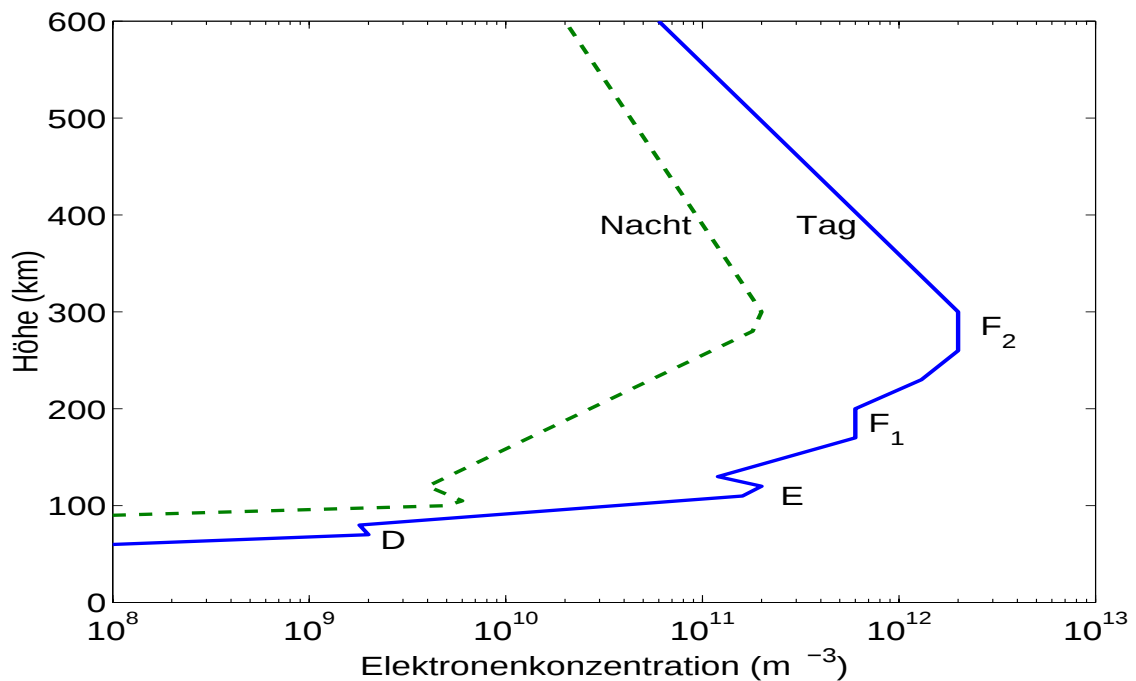


Abbildung 1.2: Die vertikale Struktur der mittleren Elektronenkonzentrationen für die Tag- und die Nacht-Ionosphäre (z. B. RICHMOND, 1987)

1.1.2 Die Dynamik der Atmosphäre

Neben temperatur- und chemisch bedingten Prozessen haben auch dynamische Prozesse wie die Erdrotation und unterschiedlichste wellenförmige Bewegungen Einfluß auf die allgemeinen Hintergrundbewegungen in der Atmosphäre. Großskalige Bewegungen sind häufig das Resultat von Energie, welche in die Atmosphäre eingebracht wurde. Bevor diese eventuell in Wärme umgewandelt wird, werden diese Bewegungen turbulent.

Die Grundbedingung für jede Art von Streuung und Reflexion eines Radarsignals ist die Existenz von räumlichen Variationen des Brechungsindex in Skalen der halben Radarwellenlänge. Diese Variationen können sowohl durch atmosphärische Wellen als auch durch Turbulenz auftreten. Sie erzeugen ein Medium, welches elektromagnetische Strahlung streut und somit eine Möglichkeit schafft, die lang- und kurzzeitige Variationen in der Atmosphäre wie auch die Wellen und atmosphärische Turbulenz selbst zu untersuchen und Informationen über die Streuer und deren räumliche und zeitliche Variabilität zu erhalten.

1.1.3 Beobachtungsmöglichkeiten der Atmosphäre

Die Messung physikalischer Eigenschaften der Atmosphäre kann in zwei Gruppen eingeteilt werden, sogenannte direkte („in-situ“) und indirekte („remote sensing“) Meßtechniken.

Beispiele für direkte Messungen sind raketen- und ballongestützte Techniken. Sie haben den Vorteil, daß die physikalische Größe (Temperatur, Druck, Dichte, Elektronenkonzentration, Windgeschwindigkeit usw.) meist mit hoher räumlicher Auflösung direkt im zu untersuchenden Medium gemessen werden kann. Nachteilig ist, daß die Messungen nicht kontinuierlich über einen längeren Zeitraum durchgeführt werden können.

Die indirekten Meßtechniken schätzen die physikalischen Parameter auf der Grundlage eines theoretischen Zusammenhangs zu anderen meßbaren Größen. Beispiele sind die Radioverfahren (Radars, Ionosonden) und die optischen Verfahren (Lidars, Spektrometer, Photometer). Die Messungen erfolgen meist boden- oder satellitengebunden. Ihr Vorteil besteht neben dem hohen räumlichen und zeitlichen Auflösungsvermögen vor allem in der Möglichkeit, weitgehend kontinuierliche Beobachtungen der physikalischen Parameter über einen längeren Zeitraum durchzuführen.

1.2 Untersuchungen der mittleren Atmosphäre mittels Radartechnik

1.2.1 Streuprozesse in der Atmosphäre

Die partiellen Reflexionen, die durch Atmosphärenradars beobachtet werden, stammen von der Rückstreuung von Brechungsindexinhomogenitäten. Diese Inhomogenitäten resultieren aus Mischprozessen durch Auftreten von Turbulenz und internen Schwellen und aufgrund der Existenz von stabilen Reflexionsschichten. Der Brechungsindex n der Radiowellen, die sich in der unteren und mittleren Atmosphäre im HF- bis UHF-Bereich ausbreiten, wird durch

$$n - 1 = \frac{3.73 * 10^{-1}e}{T^2} + \frac{77.6 * 10^{-6}p}{T} - 40.3 \frac{N_e}{f_0^2} \quad (1.1)$$

bestimmt (z.B. GAGE und BALSLEY, 1980), wobei e der partielle Druck des Wasserdampfs (in mb), T die absolute Temperatur (in K), p der atmosphärische Druck (in mb), N_e die Elektronendichtezahl (in m^{-3}) und f_0 die Radarfrequenz (in Hz) darstellen. Der erste Term der rechten Seite von Gleichung 1.1 dominiert in der unteren Troposphäre aufgrund der hohen Wasserdampfkonzentration und wird daher als „feuchter“ Term bezeichnet. Der zweite Term dominiert im Bereich von der mittleren Troposphäre bis etwa zur Stratopause und wird „trockener“ Term genannt. Der Brechungsindex ist hier hauptsächlich von der Temperatur und dem Druck abhängig. Der dritte Term ist der „Ionisationsterm“ und dominiert über der Stratopause aufgrund des zunehmenden Einflusses von Ionisationseffekten.

Die Streuer (engl.: scatter), die für die Rückstreuung verantwortlich sind und mit Atmosphärenradars beobachtbar sind, können in vier Gruppen eingeteilt werden:

- Turbulente Streuer oder „Bragg scatter“ resultieren von Irregularitäten im Brechungsindex in der Größenordnung der halben Radarwellenlänge, die zufällig im Radarbeobachtungsvolumen verteilt sind (z.B. BALSLEY und GAGE, 1980).
- Spiegelreflexionen oder „Fresnel reflection“ stammen von stabilen horizontalen Schichten mit scharfen Brechungsindexgradienten. Sie erzeugen ein starkes, nur langsam variierendes Signal.
- Diffuse Reflexionen oder „Fresnel scatter“ stammen von einer Ansammlung stabiler horizontaler Schichten, die starke kohärente Streusignale produzieren.
- „Thermische“ Streuer oder sogenannte „Thompson“-Streuer resultieren aus der Rückstrahlung freier Elektronen, welche in ihren Schwingungen durch den Einfluß des Sendesignals verstärkt werden. Diese Streuer werden im Gegensatz zu den anderen als „inkohärent“ bezeichnet.

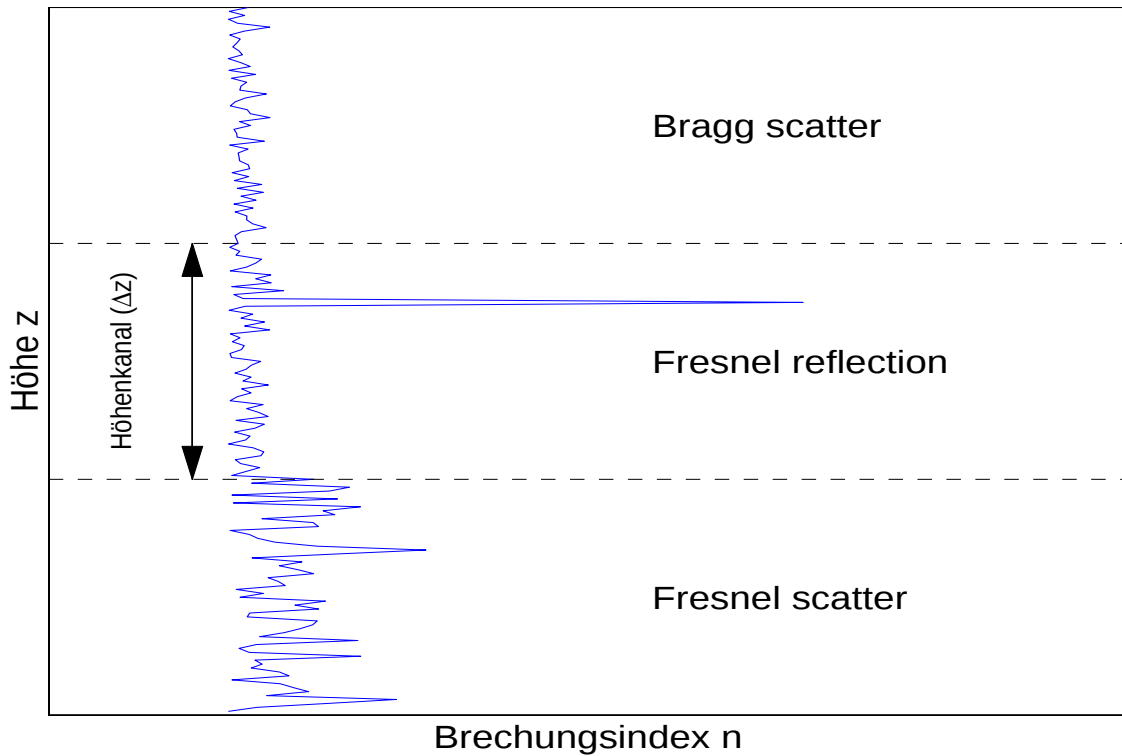


Abbildung 1.3: Auswirkungen von Bragg-Streuung, Fresnel-Reflexion und Fresnel-Streuung auf den Brechungsindex (nach RÖTTGER und LARSEN, 1990)

Die Effekte dieser Streumechanismen sind in Abb. 1.3 dargestellt. Die Spiegelreflexion („Fresnel reflection“) produziert eine scharfe Spitze in der vertikalen empfangenen Signalleistung, welche allerdings mit zunehmendem Zenitwinkel rapide abnimmt. „Fresnel scatter“ erzeugen eine Reihe kleinerer Spitzen, während „Bragg scatter“ ein langsam variierendes Leistungsprofil produzieren. Die Interpretation als „Fresnel scatter“ oder „Fresnel reflection“ ist abhängig von der Höhenauflösung (Δz) des Radarexperiments.

Die Stärke der Rückstreuung ist abhängig vom Zenitwinkel θ , mit dem die Streustrukturen beobachtet werden. Dies ist auf die Anisotropie und Schichtung der Streustrukturen zurückzuführen. Die Abhängigkeit der rückgestreuten Leistung vom Zenitwinkel wird als Aspektempfindlichkeit bezeichnet und in erster Näherung durch eine Gaußkurve angenähert. Ihr Grad wird durch den Winkel θ_s angegeben, für den die Rückstreuleistung auf $1/e$ des Ausgangswertes abgefallen ist. Ein großes θ_s nahe 90° bedeutet hochgradig isotrope Streuungen, während ein θ_s nahe 0° Streuungen identifiziert, die hauptsächlich aus der Vertikalen kommen, stark aspektempfindlich sind und auf ausgeprägte Schichtungen hinweisen.

1.2.2 Radarkonzepte

Aufgrund der Verschiedenartigkeit der Rückstreuungen kann die mittlere Atmosphäre mit Radargeräten sehr unterschiedlicher Frequenzbereiche untersucht werden. Einige Beispiele sind im folgenden genannt.

Mittel- und Hochfrequenzradars (MF- bzw. HF-Radars) arbeiten typischerweise auf Frequenzen zwischen 2 und 6 MHz und empfangen partielle Reflexionen aus Höhenbereichen zwischen 60 und 100 km. Trotz relativ geringer Höhenauflösung und tageszeitlich variabler Empfangsqualität aufgrund der Ionisationseffekte sind mit ihnen weitgehend kontinuierliche Beobachtungen in einem großen Höhenbereich möglich. Erste Untersuchungen gab es bereits seit den 50er Jahren.

Atmosphärenradars, die auf Frequenzen zwischen 40 und 230 MHz arbeiten, werden als VHF-Radars (engl.: very high frequency) bezeichnet. Mit ihnen sind konsistente zeitliche Beobachtungen zwischen etwa 1 und 20 km möglich. Erste Einsätze gab es schon Ende der 60er, Anfang der 70er Jahre. Während unter normalen atmosphärischen Bedingungen Messungen oberhalb von 20 km nur mit besonders leistungsstarken VHF-Radars möglich sind, können während des Auftretens der stark rückstreuenden mesosphärischer Sommerechos sogar mit relativ kleinen und kostengünstigen Systemen Untersuchungen zwischen etwa 80 und 90 km durchgeführt werden. Diese Geräte können daher für Beobachtungen in der Meso-, Strato- und Troposphäre genutzt werden und werden deshalb auch als MST-Radars bezeichnet.

UHF-Radars decken den Frequenzbereich zwischen 400 und 900 MHz ab. Sogenannte „Profilier“ arbeiten am unteren Ende dieser Frequenzskala und unterstützen konsistente Beobachtungen zwischen 500 m und 10 km. „Boundary layer“-Radars arbeiten am oberen Ende dieser Skala und unterstützen zeitliche Beobachtungen oberhalb von 4 km mit großer Höhenauflösung. Die Rückstreuung resultiert vor allem aus Feuchtigkeit, Niederschlag und Aerosolen.

2 Meß- und Datenanalyse-Techniken

Zur Untersuchung von Dynamik und Struktur der Atmosphäre mit VHF-Radargeräten haben sich zwei grundlegende Techniken etabliert. Doppler Beam Swinging Verfahren nutzen zur Windbestimmung Signale, die über einen nacheinander in mehrere Richtungen geschwenkten Antennenstrahl empfangen werden. Bei Spaced Antenna Verfahren erfolgt die Windbestimmung dagegen aus den zeitgleichen Empfangssignalen räumlich getrennter, in den Zenit ausgerichteter Antennen. Für Atmosphärenuntersuchungen mit dem ALOMAR SOUSY Radar (siehe Kapitel 3) konnten beide Techniken genutzt werden. Ihre grundlegenden Prinzipien werden daher in diesem Kapitel beschrieben. Für vertiefende Betrachtungen wird auf die angegebene Literatur verwiesen.

2.1 Doppler Beam Swinging Verfahren

Das Doppler Beam Swinging Verfahren (DBS) ist bei Messungen mit VHF-Radars sehr verbreitet. Das ist in erster Linie darauf zurückzuführen, daß in diesem Frequenzbereich mit relativ geringem Aufwand Antennenfelder aufgebaut werden können, mit denen sich schmale und elektrisch schwenkbare Radarstrahlen erzeugen lassen. Die ersten Windmessungen mit VHF-Radars in den siebziger Jahren wurden daher auch nach dem Doppler-Verfahren durchgeführt (WOODMAN und GUILLEN, 1974) und in den folgenden Jahren ständig weiterentwickelt (z.B. RÜSTER und WOODMAN, 1978; BALSLEY und GAGE, 1980; RÜSTER und REID, 1990). Einen umfassenden Überblick zum DBS-Verfahren, zur Datenanalyse und zur Windbestimmung gibt RÜSTER (1994).

Das DBS-Verfahren beruht auf der Messung und Auswertung der Dopplerverschiebung rückgestreuter Radarechos. Sie zeigen die Bewegung der Streuer im Meßvolumen des Radarstrahls an. Diese Bewegung ist neben dem allgemeinen Hintergrundwind auch durch zufällige Variationen beeinflusst, welche zum Beispiel auf Turbulenzen zurückzuführen sind. Wenn sich im Meßvolumen des Radarstrahls mehrere Streuer befinden, können sich diese deshalb mit etwas unterschiedlichen Geschwindigkeiten bewegen und

somit auch unterschiedliche Dopplerverschiebungen produzieren. Schwanken die zufälligen Bewegungen um einen Nullpunkt, dann wird die Leistungsdichte des Empfangssignals um eine mittlere Dopplerfrequenz zentriert sein. Ihre Streuung um diesen Mittelwert, die sogenannte spektrale Breite, wird durch die zufälligen Variationen in der Atmosphäre beeinflusst. Daneben gibt es aber noch weitere Faktoren, deren Bedeutung für die spektrale Breite zunächst vernachlässigt wurde.

So führen Variationen der horizontalen Windgeschwindigkeit als Funktion der Höhe zu unterschiedlichen Dopplerfrequenzen und damit, abhängig vom Vorzeichen dieser sogenannten Windscherung, zu einem breiteren oder schmaleren Spektrum. Besonders bedeutsam wird dieser Effekt bei geschwenkten Radarstrahlen, da das Meßvolumen dann einen größeren Höhenbereich einschließt.

Vertikale Bewegungen aufgrund von Auftriebswellen beeinflussen ebenfalls die spektrale Breite. Ihre Auswirkungen sind abhängig von ihrer Periodendauer im Verhältnis zur Dauer einer Empfangsreihe. So führen zum Beispiel Signalreihen über mehrere Wellenperioden zu einer Verbreiterung des Spektrums, ohne den Mittelwert zu verändern. Außerdem steigt die Bedeutung dieses Effekt mit zunehmender Breite des Radarstrahls (z. B. HOCKING, 1983).

Aber auch wenn sich alle Streuer in einer horizontalen Ebene mit derselben konstanten Geschwindigkeit ohne jegliche Fluktuationen bewegen, wird aufgrund der Breite der Antennenhauptkeule ein Spektrum mit endlicher Breite erzeugt. Streuer, die sich näher am Rand des Radarstrahls befinden, werden nicht exakt in der Schwenkrichtung des Strahls erfaßt und erzeugen daher andere Dopplerverschiebungen, als Streuer in der Mitte des Radarstrahls. Die Überlagerung der einzelnen Spektren führt daher zu einer größeren Streuung um eine mittlere Dopplerfrequenz (z. B. HOCKING, 1983).

Diese sogenannte Strahlverbreiterung hat für vertikal ausgerichtete Antennenstrahlen den größten Einfluß auf die spektrale Breite (z. B. HOCKING, 1983; LESICAR, 1993). Die anderen dargestellten Effekte haben eine geringere Bedeutung (z. B. ATLAS, 1964; HOCKING, 1983; HOCKING *et al.*, 1989). Für breite Radarstrahlen kann selbst der Einfluß der zufälligen Variationen der Streuer auf die spektrale Breite gegenüber der Strahlverbreiterung vernachlässigt werden (z. B. HOCKING *et al.*, 1989; LESICAR und HOCKING, 1992).

Wird angenommen, daß das Leistungsdichtespektrum eines komplexen Empfangssignals nach Abzug der Rauschleistung P_R durch eine Gaußkurve der Form

$$S(f) = \frac{P_S}{\sqrt{2\pi}f_\sigma} \exp \left[\frac{-(f - f_D)^2}{2f_\sigma^2} \right] \quad (2.1)$$

angenähert werden kann, dann lassen sich die mittlere Dopplerfrequenz f_D und die spektrale Breite f_σ wie auch die Gesamtleistung P_S des Empfangssignals (nach WOODMAN und GUILLEN, 1974) aus den Momenten des Spektrums berechnen, wie in Abb.

2.1 dargestellt.

Die Signalleistung P_S entspricht dabei der Fläche unter der Kurve des Leistungsspektrums $S(f)$ und kann durch das nullte Moment

$$P_S = m_0 = \int_{-\infty}^{\infty} S(f) \, df \quad (2.2)$$

bestimmt werden. Über das erste Moment

$$m_1 = \int_{-\infty}^{\infty} f S(f) \, df \quad (2.3)$$

kann die Dopplerverschiebung f_D mit der Beziehung

$$f_D = \frac{m_1}{m_0} \quad (2.4)$$

und über das zweite Moment

$$m_2 = \int_{-\infty}^{\infty} f^2 S(f) \, df \quad (2.5)$$

die Standardabweichung f_σ der Leistungsspektrumkurve mit

$$f_\sigma = \sqrt{\frac{m_2}{m_0} - \left(\frac{m_1}{m_0}\right)^2} \quad (2.6)$$

berechnet werden. Die Momente können direkt durch näherungsweise Bestimmung aus den diskreten Werten des Spektrums oder über eine vorherigen Gaußapproximation des Leistungsspektrums ermittelt werden.

Signalleistung, Dopplerverschiebung und spektrale Breite können auch im Zeitbereich bestimmt werden, wie im folgenden gezeigt wird. Die inverse Fouriertransformation des Leistungsdichtespektrums $S(f)$ ergibt die komplexe Autokorrelationsfunktion $\rho(\tau)$ mit

$$\rho(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(f) e^{j2\pi f\tau} \, df \quad (2.7)$$

$$= P_S \exp \left[\frac{-\tau^2}{2 \left(\frac{1}{2\pi f_\sigma} \right)^2} \right] \exp(j2\pi f_D \tau). \quad (2.8)$$

Der Betrag dieser Funktion an der Stelle $\tau = 0$ entspricht der Signalleistung

$$P_S = |\rho(\tau = 0)|. \quad (2.9)$$

Die Rauschleistung P_R muß dabei zunächst wieder subtrahiert werden. Über den Phasenanstieg

$$\frac{d(2\pi f_D \tau)}{d\tau} = 2\pi f_D \quad (2.10)$$

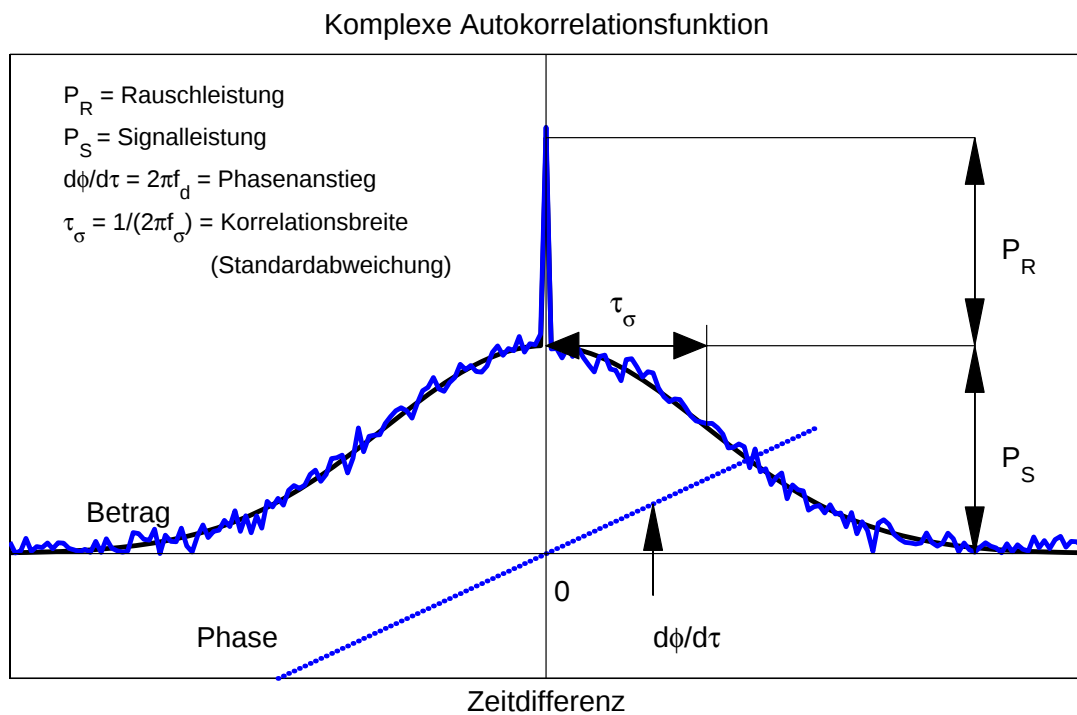
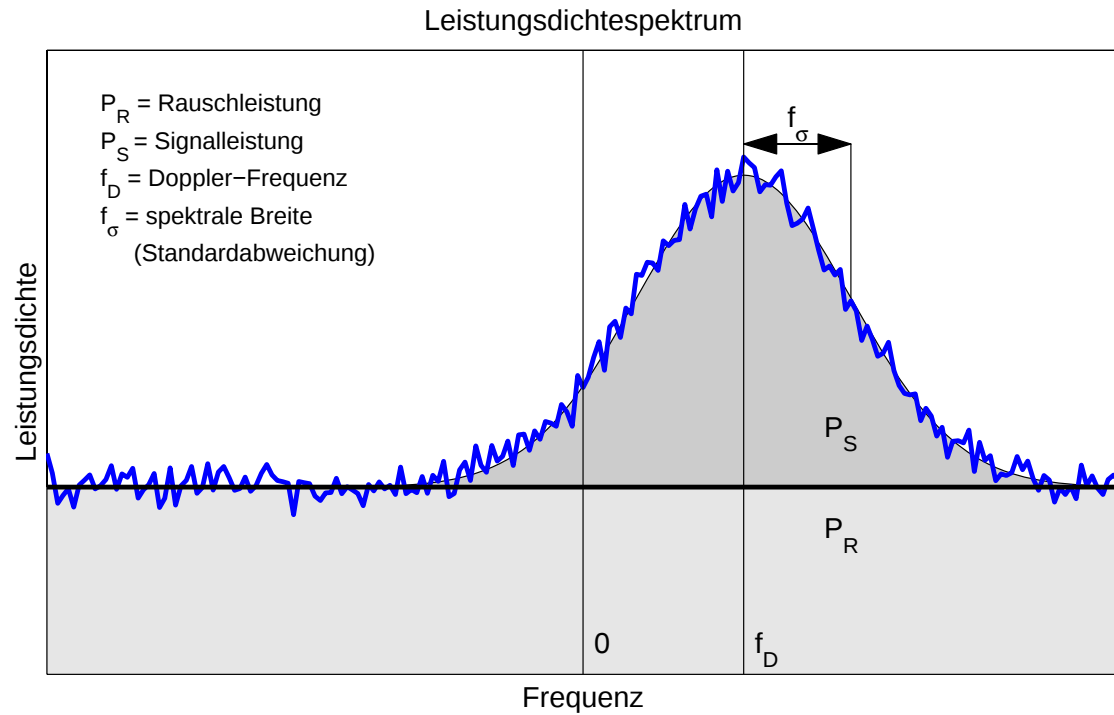


Abbildung 2.1: Bestimmung der Doppler-Parameter aus den Momenten des Leistungsdichtespektrums (oben) und aus der komplexen Autokorrelationsfunktion (unten)

läßt sich die mittlere Dopplerfrequenz f_D ermitteln. Die Standardabweichung τ_σ der gaußförmigen Autokorrelationsfunktion ist mit

$$\tau_\sigma = \frac{1}{2\pi f_\sigma} \quad (2.11)$$

umgekehrt proportional zur spektralen Breite.

Aspektempfindlichkeit und effektiver Schwenkwinkel

In Kapitel 1.2.1 wurde bereits auf mögliche Strukturen atmosphärischer Streuer und ihre Klassifizierung hingewiesen. Da die Aspektempfindlichkeit eine eindeutige Widerspiegelung der Streuerschichtung darstellt, ist es offensichtlich wünschenswert, sie physikalisch zu messen oder zu quantifizieren.

Die einfachste und verständlichste Methode besteht darin, die rückgestreute Leistung als Funktion des Zenitwinkels zu messen. Entweder wird ein Radarstrahl in die Vertikale und dann in verschiedene Richtungen geschwenkt, oder es werden verschiedene Strahlen simultan genutzt. Das effektive Leistungsdiagramm in Abhängigkeit vom Zenitwinkel ergibt sich dann aus der Multiplikation der Leistungsdiagramme der Streuerstruktur und des Radarstrahls. Da die Strahlbreite des Radars aber immer größer als Null und endlich ist, liefert das effektive Diagramm keine exakte Abbildung der Rückstreuung. RÖTTGER (1981) hat gezeigt, daß eine effektive Schwenkrichtung auftritt, wenn der Radarstrahl geneigt wird und die rückstreuende Struktur eine Winkelabhängigkeit besitzt, wie es in Abb. 2.2 dargestellt ist.

In einer ersten Näherung wird angenommen, daß die Zenitwinkelabhängigkeit des partiell reflektierenden Streuers unabhängig vom Azimut und symmetrisch um einen zentralen Winkel θ_{ms} und die Zenitwinkelabhängigkeit des Radarstrahls symmetrisch um einen zentralen Winkel θ_{mb} liegt. Vorausgesetzt, daß sowohl Streuer- als auch Radarstrahlabhängigkeit für kleine Winkel θ durch eine gaußförmige Funktion angenähert werden können, ergibt sich (mit der Näherung $\sin \theta \simeq \theta$ für $\theta < 10^\circ$) für das Leistungsdiagramm des Streuers

$$P_s(\theta) = P_s(\theta_{ms}) \exp \left[-\frac{(\theta - \theta_{ms})^2}{\theta_s^2} \right] \quad (2.12)$$

und für das Leistungsdiagramm des Radarstrahls

$$P_b(\theta) = P_b(\theta_{mb}) \exp \left[-\frac{(\theta - \theta_{mb})^2}{\theta_b^2} \right], \quad (2.13)$$

wobei θ_s bzw. θ_b das Argument für den $1/e$ -Wert des Maximums der entsprechenden Funktion symbolisiert.

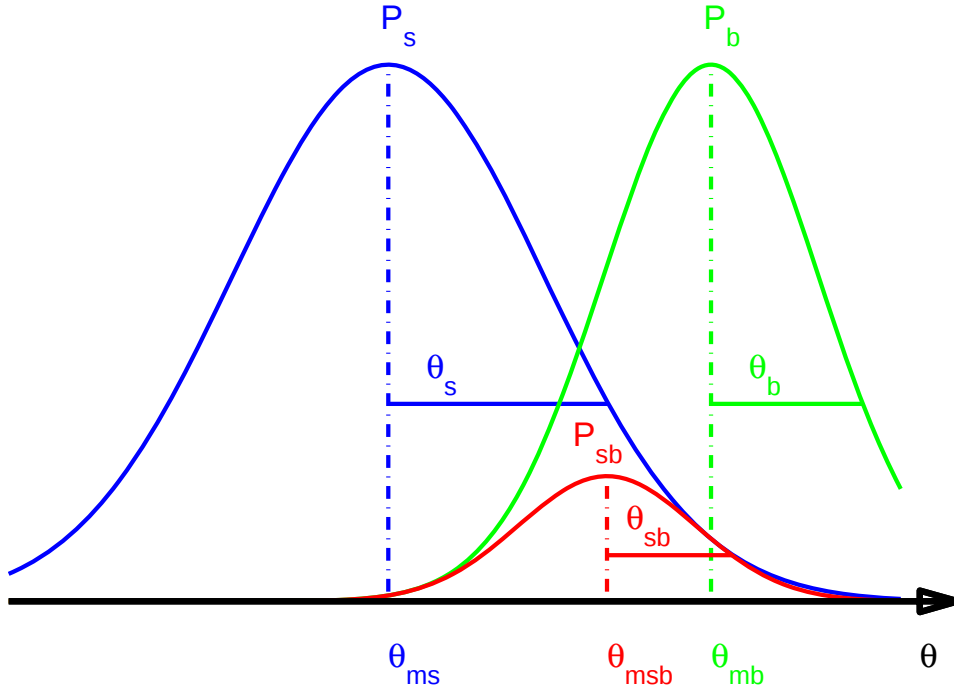


Abbildung 2.2: Leistungskurven von Radarstrahl (P_b), Rückstreuung (P_s) und effektivem Strahl (P_{sb}) in Abhängigkeit vom Zenitwinkel (nach RÖTTGER, 1981)

Das Leistungsdiagramm des Radarstrahls läßt sich durch Multiplikation der Leistungsdiagramme der Sende- und Empfangsantenne bestimmen. Als Antennenstrahlbreiten werden üblicherweise die Winkel $\theta_{b0,5T}$ bzw. $\theta_{b0,5R}$ angegeben, für die ihre Leistungen auf die Hälfte der Maxima abgefallen sind (half power half beam width). Die $1/e$ -Breite des kombinierten Sende-/Empfangsdiagramms ergibt sich dann zu

$$\theta_b = \frac{\theta_{b0,5T} \theta_{b0,5R}}{\sqrt{\ln 2} \sqrt{\theta_{b0,5T}^2 + \theta_{b0,5R}^2}}. \quad (2.14)$$

Das Produkt der beiden Funktionen 2.12 und 2.13 liefert

$$P_{sb}(\theta) = P_s(\theta_{ms}) P_b(\theta_{mb}) \exp \left[-\frac{(\theta - \theta_{ms})^2}{\theta_s^2} - \frac{(\theta - \theta_{mb})^2}{\theta_b^2} \right] \quad (2.15)$$

$$= P_s(\theta_{ms}) P_b(\theta_{mb}) \exp \left[-\frac{(\theta_{ms} - \theta_{mb})^2}{(\theta_s^2 + \theta_b^2)} \right] \exp \left[-\frac{(\theta - \theta_{msb})^2}{\theta_{sb}^2} \right] \quad (2.16)$$

mit der effektiven Schwenkrichtung

$$\theta_{msb} = \frac{\theta_{mb} \theta_s^2 + \theta_{ms} \theta_b^2}{(\theta_s^2 + \theta_b^2)} \quad (2.17)$$

und der effektiven Strahlbreite

$$\theta_{sb}^2 = \frac{\theta_s^2 \theta_b^2}{(\theta_s^2 + \theta_b^2)}. \quad (2.18)$$

bzw.

$$\frac{1}{\theta_{sb}^2} = \frac{1}{\theta_s^2} + \frac{1}{\theta_b^2}. \quad (2.19)$$

Bei bekanntem θ_b kann der Aspektempfindlichkeitsparameter θ_s also über eine Abschätzung von θ_{sb} ermittelt werden.

Der maximale Wert des effektiven Polardiagramms (P_{sb}) wird für $\theta = \theta_{msb}$ erreicht

$$P_{sb}(\theta_{msb}) = P_s(\theta_{ms})P_b(\theta_{mb}) \exp \left[-\frac{(\theta_{ms} - \theta_{mb})^2}{(\theta_s^2 + \theta_b^2)} \right]. \quad (2.20)$$

Die effektive Empfangsleistung P_{eff} als Integral über die Funktion $P_{sb}(\theta)$ ist dann proportional zu $P_{sb}(\theta_{msb})$ und θ_{sb} . Werden die Leistungen von zwei Empfangssignalen unterschiedlicher Schwenkrichtungen ins Verhältnis gesetzt, ergibt sich unter der Annahme, daß für beide Richtungen die technische Strahlbreite (θ_b) und damit auch die effektive Strahlbreite (θ_{sb}) näherungsweise konstant ist,

$$\frac{P_{eff1}}{P_{eff2}} = \frac{P_{b1}(\theta_{mb1})}{P_{b2}(\theta_{mb2})} \exp \left[-\frac{(\theta_{ms} - \theta_{mb1})^2 - (\theta_{ms} - \theta_{mb2})^2}{(\theta_s^2 + \theta_b^2)} \right]. \quad (2.21)$$

Die Umstellung dieser Gleichung nach der gesuchten Größe θ_s ergibt

$$\theta_s = \sqrt{\frac{(\theta_{ms} - \theta_{mb2})^2 - (\theta_{ms} - \theta_{mb1})^2}{\ln \frac{P_{eff1}}{P_{eff2}} - \ln \frac{P_{b1}(\theta_{mb1})}{P_{b2}(\theta_{mb2})}} - \theta_b^2}. \quad (2.22)$$

Wird nun angenommen, daß keine geneigten Schichten auftreten und die Zenitwinkelabhängigkeit der partiell reflektierenden Streuer somit symmetrisch um den Zenit liegt ($\theta_{ms} = 0$) und daß die Leistungen der beiden Radarstrahlen näherungsweise gleich sind ($P_{b1} = P_{b2}$), vereinfacht sich dies zu der von HOOPER und THOMAS (1995) angegebenen Gleichung

$$\theta_s = \sqrt{\frac{\theta_{mb2}^2 - \theta_{mb1}^2}{\ln \frac{P_{eff1}}{P_{eff2}}} - \theta_b^2}. \quad (2.23)$$

Damit läßt sich θ_s aus den Empfangsleistungen von zwei schrägen Radarstrahlen berechnen. Üblich ist jedoch die Ausnutzung eines vertikal ausgerichteten Antennenstrahls. Es ergibt sich dann für die vertikale Strahlrichtung ($1 = vert$) und geneigte Strahlrichtung ($2 = off$) mit $\theta_{b1} = \theta_{vert} = 0^\circ$ ein Aspektempfindlichkeitsgrad von

$$\theta_s = \sqrt{\frac{\theta_{mb_{off}}^2}{\ln \frac{P_{eff_{vert}}}{P_{eff_{off}}}} - \theta_b^2} \quad (2.24)$$

und eine Vereinfachung von Gleichung 2.17 mit einer effektiven Schwenkrichtung

$$\theta_{msb} = \theta_{mb_{off}} \frac{\theta_s^2}{\theta_s^2 + \theta_b^2} \quad (2.25)$$

$$= \theta_{mb_{off}} \left[1 + \frac{\theta_b^2}{\theta_s^2} \right]^{-1}. \quad (2.26)$$

Ohne Korrektur würde der effektive Schwenkwinkel um einen Faktor

$$R_1 = \left[1 + \frac{\theta_b^2}{\theta_s^2} \right] \quad (2.27)$$

überschätzt und der horizontale Wind entsprechend unterschätzt (z.B. HOCKING *et al.*, 1986). Unter Einbeziehung von Gleichung 2.23 kann der effektive Schwenkwinkel mit

$$\theta_{msb} = \theta_{mb_{off}} \left[1 - \frac{\theta_b^2}{\theta_{mb_{off}}^2} \ln \frac{P_{msb_{vert}}}{P_{msb_{off}}} \right] \quad (2.28)$$

direkt aus dem angenommenen Schwenkwinkel und der Breite des Radarstrahls sowie den Empfangsleistungen aus der vertikalen und geschwenkten Richtung berechnet werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Abschätzung der Aspektempfindlichkeit besteht in der Approximation für θ_{sb} (in Grad) anhand der horizontalen Windgeschwindigkeit V_h und der Breite τ_σ (Standardabweichung) der direkt beobachtbaren Autokorrelationsfunktion durch

$$\theta_{sb} = \frac{12.9\lambda}{|V_h|\tau_\sigma} \quad (2.29)$$

sowie der Berechnung von θ_s nach Gleichung 2.19 (z.B. HOCKING *et al.*, 1986; LESICAR, 1993). Diese Näherung basiert auf Modellierungen zur spektralen Verbreiterung bei dicken Streuerschichten und Antennenstrahlhalbwertsbreiten bis zu fünf Grad (z.B. HOCKING, 1983). Wie HOCKING *et al.* (1986) experimentell zeigen, liefert diese Näherung sogar für nichtgaußsche Spektren und Autokorrelationsfunktionen gute Ergebnisse. Da die spektrale Breite jedoch durch weitere Faktoren wie Turbulenzen, vertikale Auftriebsbewegungen und Windscherung beeinflusst wird, kann die Aspektempfindlichkeit durch diese Methode nur näherungsweise abgeschätzt werden.

Bestimmung des horizontalen und vertikalen Windes

Aus der mittleren Dopplerfrequenz f_D läßt sich mit der bekannten Radarwellenlänge λ über die Beziehung

$$V_R = -\frac{\lambda f_D}{2} \quad (2.30)$$

die mittlere Geschwindigkeit V_R der Streuer in der effektiven Schwenkrichtung berechnen. Wird der Strahl mit dem Azimutwinkel ϕ (in Uhrzeigersinn von Nord) geschwenkt,

dann ist die horizontale Geschwindigkeit V'_h in Azimutrichtung durch den horizontalen Schwenkwinkel ϕ , die Windrichtung ϕ_h und die horizontale Windgeschwindigkeit V_h mit

$$V'_h = V_h \cos(\phi - \phi_h) \quad (2.31)$$

bestimmt (vgl. Abb. 2.3 links unten). Wird unter Beachtung von Gleichung 2.25 ein Echo von einem effektiven Zenitwinkel $\theta = \theta_{msb}$ empfangen, dann setzt sich die radiale Geschwindigkeit V_R aus einer horizontalen Geschwindigkeitskomponente V_h^* und einer vertikalen Geschwindigkeitskomponente w^* mit

$$w^* = w \cos \theta \quad (2.32)$$

$$V_h^* = V'_h \sin \theta \quad (2.33)$$

zusammen (vgl. Abb. 2.3 rechts unten). Mit $u = V_h \sin \theta$ und $v = V_h \cos \theta$ ergibt sich schließlich für die radiale Geschwindigkeit

$$V_R = V_h \cos(\phi - \phi_h) \sin \theta + w \cos \theta \quad (2.34)$$

$$= u \sin \phi \sin \theta + v \cos \phi \sin \theta + w \cos \theta \quad (2.35)$$

mit der zonalen Windkomponente u (positiv: nach Osten), der meridionalen Windkomponente v (positiv: nach Norden) und der vertikalen Windkomponente w (positiv: nach oben).

Unter der Annahme eines konstanten Windfeldes können diese Komponenten nach Gleichung 2.34 aus den in verschiedenen Schwenkrichtungen gemessenen radialen Geschwindigkeiten bestimmt werden (Abb. 2.3 oben). Dazu wurden von mehreren Autoren (z.B. PETERSON und BALSLEY, 1979; KOSCIELNY *et al.*, 1984) verschiedene Lösungsansätze entwickelt, von denen hier einige dargestellt werden (nach RÖTTGER und LARSEN, 1990):

Wird ein konstantes Windfeld mit einem festen Zenitwinkel $\theta = \theta_0$ und variablen Azimutwinkeln ϕ beobachtet, variiert die radiale Geschwindigkeit

$$V_R(\phi) = (u \sin \theta_0) \sin \phi + (v \sin \theta_0) \cos \phi + (w \cos \theta_0) \quad (2.36)$$

harmonisch mit dem Azimutwinkel ϕ . Die Fourieranalyse einer Datenreihe $V_R(\phi)$ ergibt dann bei bekanntem Zenitwinkel θ_0 den ostwärts gerichteten Wind u und den nordwärts gerichteten Wind v aus den Fourierkoeffizienten sowie den vertikalen Wind w aus dem konstanten Offset.

Da die Gleichung 2.36 mit den Windkomponenten genau drei unbekannte Größen enthält, ist es auch möglich, nur drei feste Schwenkpositionen zu nutzen und das entsprechende Gleichungssystem nach u , v und w zu lösen. Liegt eine dieser Schwenkpositionen bei $\theta = 0^\circ$ und die anderen beiden orthogonal zueinander bei $\theta \neq 0^\circ$, kann

3D-Darstellung zur Bestimmung des dreidimensionalen Windfeldes

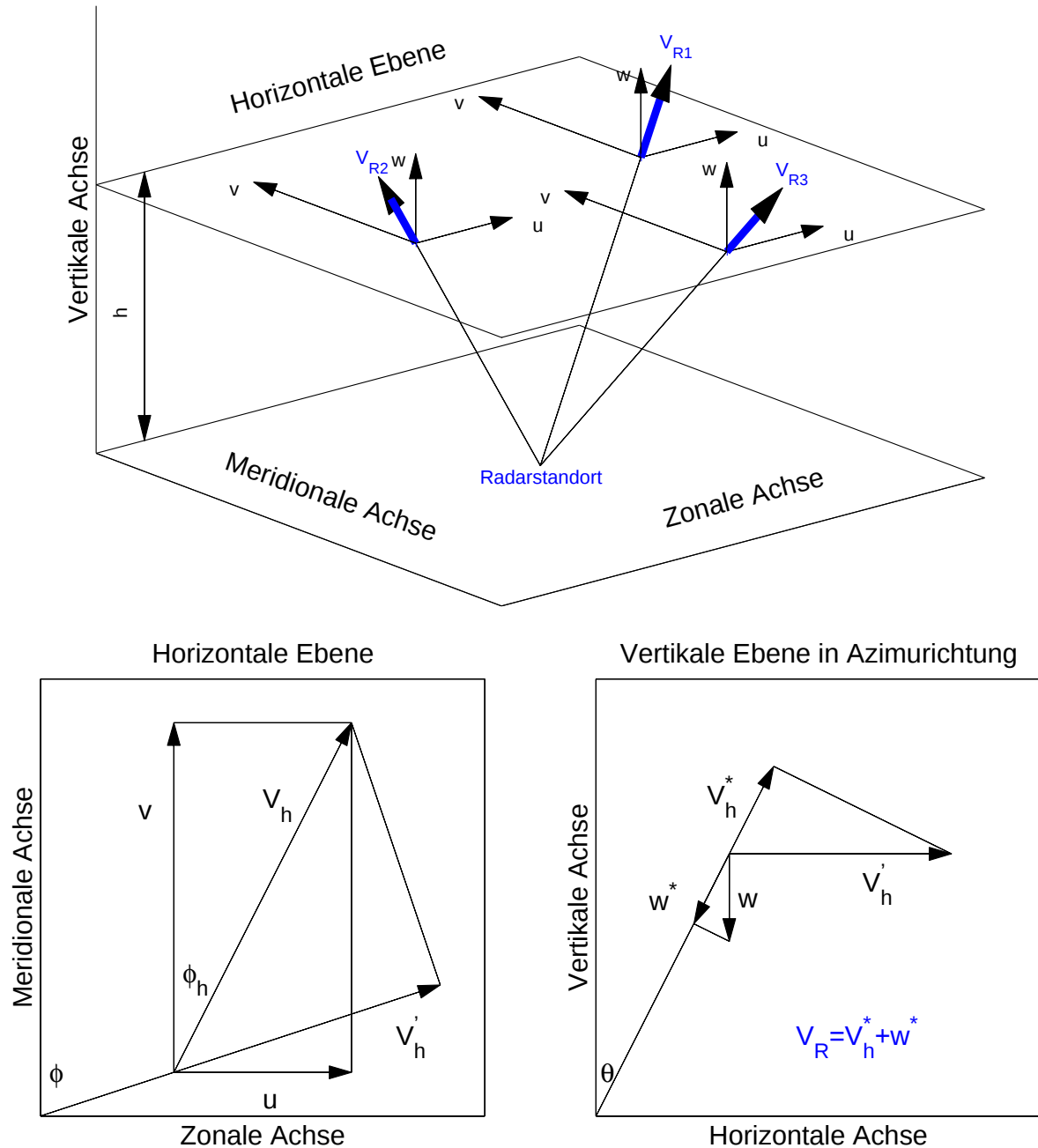


Abbildung 2.3: Bestimmung der Windkomponenten u , v und w in der Höhe h aus den radialen Geschwindigkeiten V_R , die mit einem Radarstrahl in mindestens drei verschiedenen Schwenkrichtungen mit dem Azimut ϕ und dem Zenitwinkel θ gemessen werden (Doppler Beam Swinging)

der Rechenaufwand weiter reduziert werden. Unter der Voraussetzung, daß die vertikale Geschwindigkeit vernachlässigbar ist, kann die Methode sogar auf die Verwendung von nur zwei Schwenkrichtungen vereinfacht werden.

In der Praxis werden meistens zwei bis fünf Schwenkrichtungen benutzt. Am häufigsten ist die Ausrichtung in die Vertikale und vier orthogonale Azimutrichtungen mit gleichem Zenitwinkel. Dies erlaubt die Fehler zu reduzieren, die aufgrund von Ungleichförmigkeiten und geneigten Schichten auftreten.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, bei konstantem Azimutwinkel ϕ_0 die Zenitablage θ von $-\theta_{max}$ bis $+\theta_{max}$ zu variieren und die entsprechenden radialen Geschwindigkeiten

$$V_R(\theta) = (u \sin \phi_0 + v \cos \phi_0) \sin \theta + w \cos \theta \quad (2.37)$$

zu bestimmen. Eine Approximation der sinusförmigen Änderungen führt zu $(u \sin \phi + v \cos \phi)$ und w . Der Vorteil dieser Methode liegt darin, daß die vertikale Geschwindigkeit w genauer abgeschätzt werden kann. Durch eine Erweiterung auf zwei Azimutrichtungen können auch hier u und v separat bestimmt werden.

Die vorstehenden Ableitungen gehen von einem konstanten Windfeld über den gesamten Beobachtungsbereich aus. Dieses kann bei räumlich weit auseinanderliegenden Meßvolumina jedoch nicht allgemein angenommen werden. Insbesondere der vertikale Wind kann zum Beispiel durch Wellen starken Schwankungen ausgesetzt sein. Die Berechnung durch Kombination der Meßwerte aus den einzelnen Schwenkrichtungen und damit aus weit voneinander entfernt liegenden Volumina wird daher nur einen mittleren vertikalen Wind liefern. Eine bessere Abschätzung kann dadurch erfolgen, daß die radiale Geschwindigkeit für den vertikal ausgerichteten Antennenstrahl als vertikale Geschwindigkeit angenommen wird, wenn der Antennenstrahl schmal ist.

2.2 Spaced Antenna Verfahren

Aufgrund der verwendeten Wellenlängen und der damit verbundenen optimalen Antennenabmessungen und -anordnungen haben sich insbesondere im Lang- und Mittelfrequenzbereich Meß- und Datenanalyseverfahren entwickelt, die nicht auf das Schwenken eines Sende- und Empfangsantennenstrahls zurückgehen, sondern simultan die Empfangssignale räumlich getrennter Antennen (engl.: Spaced Antenna - SA) aufnehmen und analysieren. Diese Verfahren wurden seit dem Ende der vierziger Jahre bis heute in verschiedenen Frequenzbereichen ständig weiterentwickelt und ergänzt. Einen umfassenden Überblick über die verschiedenartigen Techniken (Abb. 2.4) gibt HOLDSWORTH (1995a) auf der Grundlage einer Zusammenstellung von VANDEPEER (1993).

Es hat sich gezeigt, daß die Spaced-Antenna-Techniken eine Reihe von Vorteilen gegenüber den DBS-Verfahren bieten und mit ihnen einige physikalische Parameter

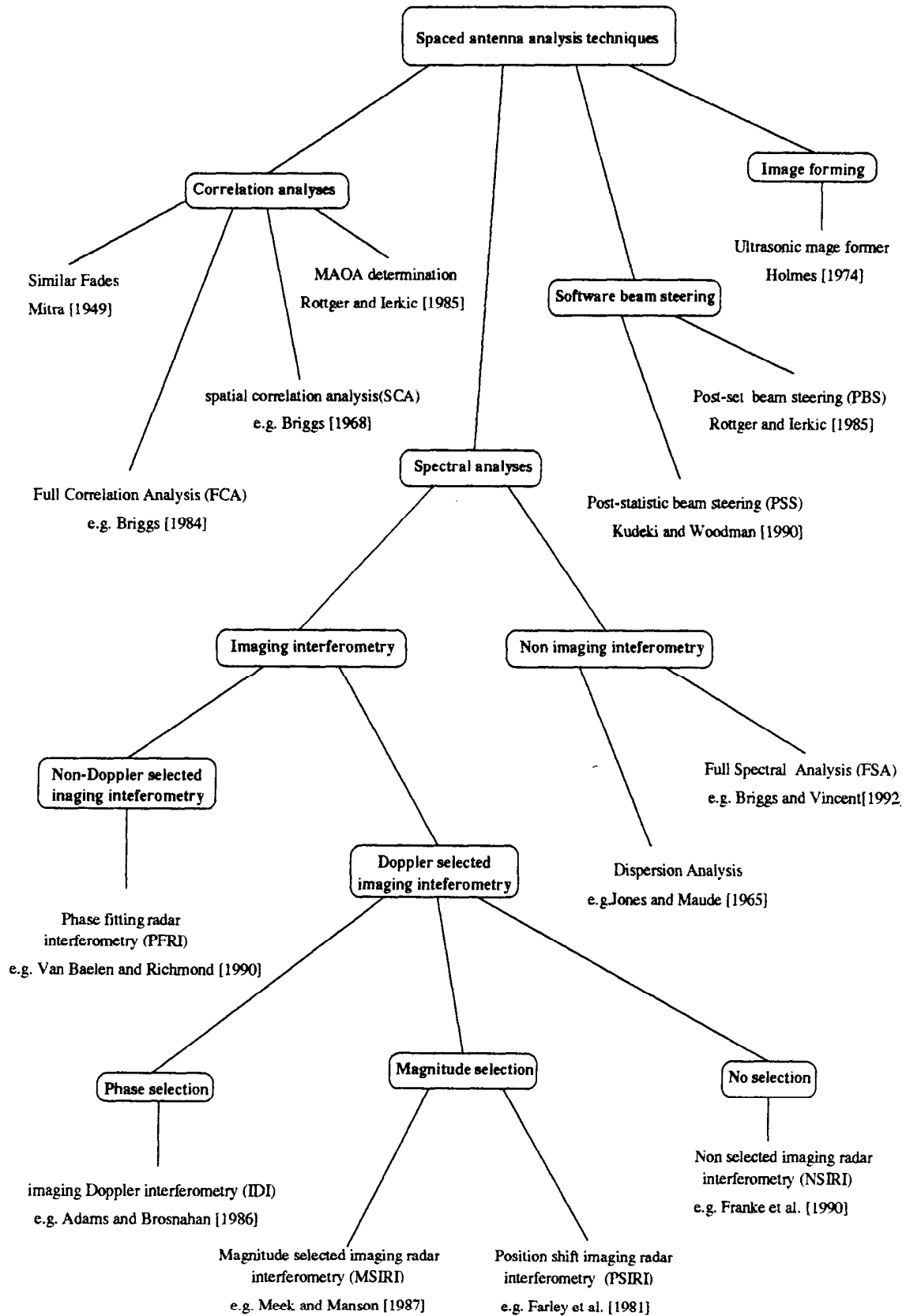


Abbildung 2.4: Überblick über verschiedene Spaced-Antenna-Analysetechniken nach VANDEPEER (1993) und HOLDSWORTH (1995a)

genauer bestimmt werden können. Daher wurden in den letzten Jahren trotz des wesentlich höheren technischen und finanziellen Aufwands gegenüber den DBS-Verfahren auch im VHF-Bereich Radarsysteme konstruiert, mit denen Messungen nach den SA-Verfahren möglich sind. Im folgenden werden insbesondere die Verfahren beschrieben, die für die Messungen und Datenanalysen mit dem ALOMAR SOUSY Radar angewandt und vom Autor dieser Arbeit rechentechnisch umgesetzt wurden: die sogenannte „vollständige Korrelationsanalyse“ zur Ermittlung des horizontalen Windes und die interferometrischen Methoden zur Bestimmung des mittleren Empfangswinkels und der vertikalen Geschwindigkeit. Für genauere Betrachtungen der weiteren Verfahren wird auf die angegebene Literatur verwiesen.

Die vollständige Korrelationsanalyse (engl.: full correlation analysis - FCA) hat sich aus der einfachen Korrelationsanalyse und der „similar fade“ Technik entwickelt. Bei diesen wird davon ausgegangen, daß vom Hintergrundwind mitgeführte reflektierende und streuende Irregularitäten am Boden ein sich bewegendes Interferenzmuster (engl.: pattern) produzieren, welches von mehreren vertikal ausgerichteten Empfangsantennen aufgenommen werden kann (Abb. 2.5). Die zeitlichen Differenzen zwischen den Empfangssignalmaxima bzw. -minima der einzelnen Antennen bzw. die Verschiebungen der Maxima der Kreuzkorrelationsfunktionen liefern dann bei bekannten Antennenabständen die Informationen über den horizontalen Wind. Diese Verfahren sind sehr robust und werden seit vielen Jahren im Routinebetrieb erfolgreich eingesetzt (z. B. SPRENGER und SCHMINDER, 1969; SCHMINDER und KÜRSCHNER, 1984). Ihr Nachteil besteht in erster Linie in der Nichtberücksichtigung der Anisometrie der Interferenzmuster und ihrer zeitlichen Veränderlichkeit. Die so ermittelten Werte werden daher oft als „scheinbare“ Windgeschwindigkeit V_a (apparent velocity) bezeichnet.

Um die räumlichen und zeitlichen Variabilitäten der Interferenzmuster in die Windberechnung einzubeziehen, wird bei der vollständigen Korrelationsanalyse aus den Signalen der räumlich getrennten Empfangsantennen eine Raum-Zeit-Korrelationsfunktion geschätzt. Da dieses Verfahren bei SA-Messungen mit dem ALOMAR SOUSY Radar zum Einsatz kam, soll es an dieser Stelle kurz vorgestellt werden. Die folgenden Ausführungen beziehen sich dabei auf BRIGGS (1984) und BRIGGS (1992).

Die zweidimensionale räumliche Korrelationsfunktion ist durch

$$\rho(\xi, \eta) = \frac{\langle f(x, y)f(x + \xi, y + \eta) \rangle}{\langle |f(x, y)|^2 \rangle} \quad (2.38)$$

definiert und spiegelt die Korrelation zwischen einem Muster und demselben, aber um eine Distanz ξ in x-Richtung und η in y-Richtung verschobenen Muster, wider. Ihr maximaler Wert $\rho_{max} = 1$ wird für $\xi = \eta = 0$ erreicht. Nimmt die lineare Abhängigkeit beider Muster mit wachsendem ξ und η ab, fällt die Funktion. Sie nähert sich dem Wert Null, wenn das Muster so verschoben wurde, daß keine Korrelation mehr auftritt.

Bestimmung des horiz. Windes durch Korrelationsanalyse

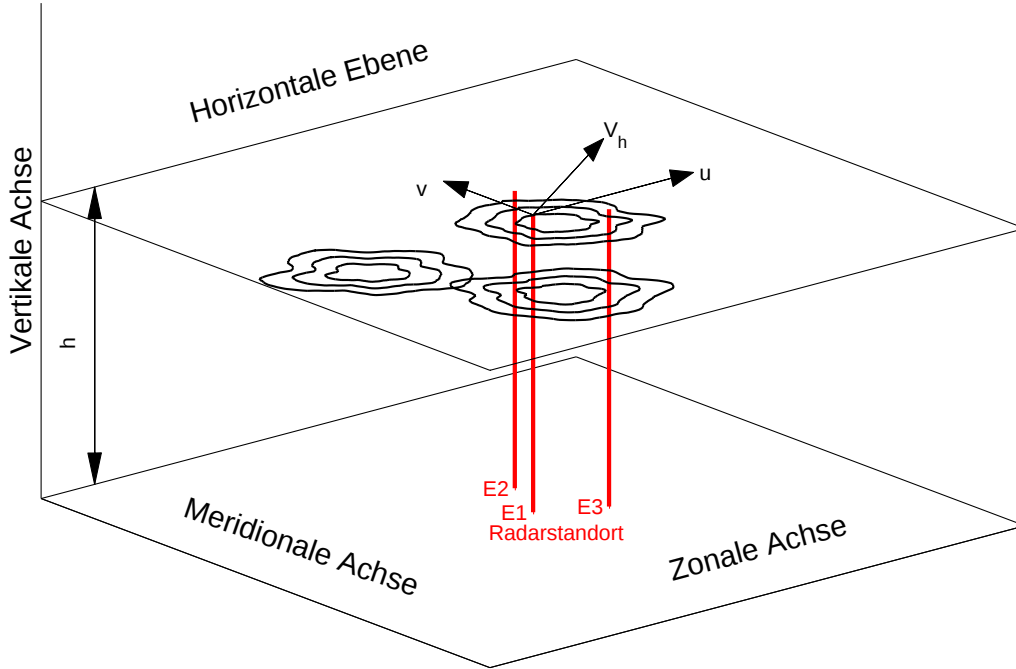


Abbildung 2.5: Bestimmung des Windes in der Höhe h mit mehreren räumlich getrennten und vertikal ausgerichteten Antennen $E1$, $E2$ und $E3$ (Spaced Antenna)

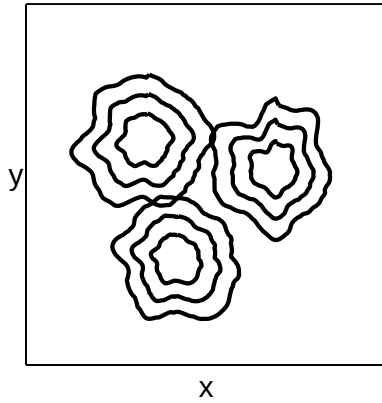
Für ein stationäres, sich nicht bewegendes und isometrisches Interferenzmuster ist die zweidimensionale räumliche Korrelationsfunktion zwischen den Positionen $P(x, y)$ und $P(x + \xi, y + \eta)$ nur von deren Abstand abhängig. Konturen gleicher Korrelation können daher in einem kartesischen (ξ, η) -Diagramm als konzentrische Kreise dargestellt werden (Abb. 2.6) und für die räumliche Korrelationsfunktion ergibt sich

$$\rho(\xi, \eta) = \rho(A(\xi^2 + \eta^2)). \quad (2.39)$$

Wenn das Muster anisometrisch ist, gilt Gleichung 2.39 nicht. Unter der Annahme, daß es sich dann in erster Näherung um eine einfache Streckung des isometrischen Musters in eine Vorzugsrichtung handelt, können Konturen gleicher Korrelation als Ellipsen dargestellt werden (Abb. 2.7). Für Positionsdifferenzen (ξ, η) , die auf einer Ellipse mit $(A\xi^2 + B\eta^2 + 2H\xi\eta) = \text{const}$ liegen, ergeben sich konstante Korrelationswerte:

$$\rho(\xi, \eta) = \rho(A\xi^2 + B\eta^2 + 2H\xi\eta). \quad (2.40)$$

Konturplot des Interferenzmusters



Konturplot der Korrelationsfunktion

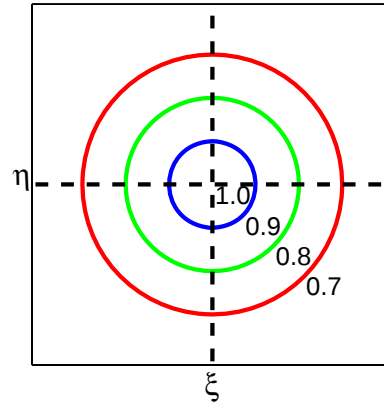
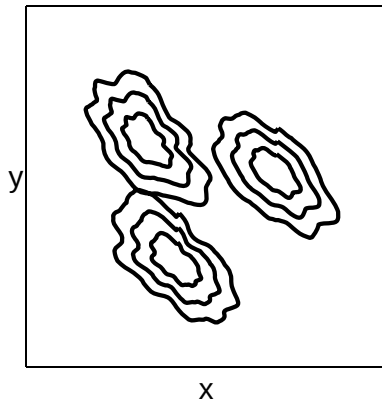


Abbildung 2.6: Konturen eines isometrischen Streumusters (links). Die Konturen gleicher Korrelation für dieses Muster bilden Kreise (rechts), nach BRIGGS (1984).

Konturplot des Interferenzmusters



Konturplot der Korrelationsfunktion

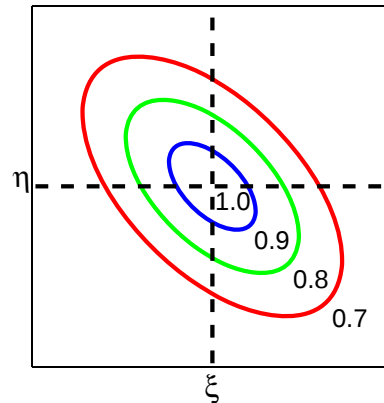


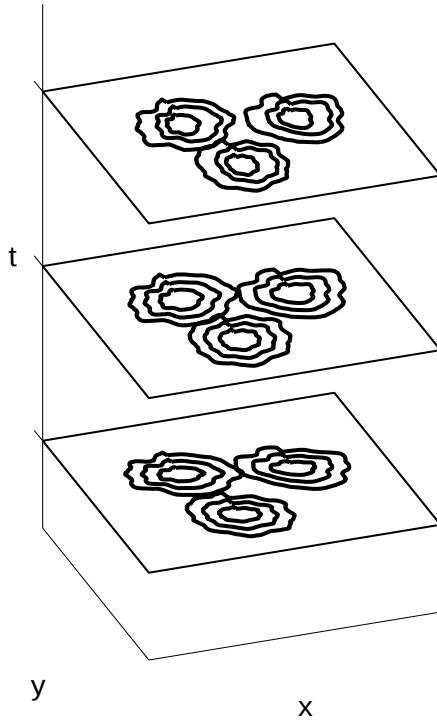
Abbildung 2.7: Konturen eines anisometrischen Streumusters (links). Die Konturen gleicher Korrelation für dieses Muster bilden Ellipsen (rechts), nach BRIGGS (1984)

Wird nun zusätzlich zur räumlichen auch die zeitliche Variabilität des Interferenzmusters berücksichtigt, läßt sich eine Raum-Zeit-Korrelationsfunktion

$$\rho(\xi, \eta, \tau) = \frac{\langle f(x, y, t) f(x + \xi, y + \eta, t + \tau) \rangle}{\langle |f(x, y, t)|^2 \rangle} \quad (2.41)$$

definieren. Diese Funktion stellt den Ausgangspunkt für alle weiteren Überlegungen dar. Unter der Annahme, daß es sich um einen ergodischen Prozeß handelt, ist sie durch die Bestimmung der Funktionswerte an drei Stellen eindeutig festgelegt. Dabei wird davon ausgegangen, daß die zeitliche und räumliche Korrelation die gleiche funktionelle

Konturplots des Interferenzmusters



Konturplots der Korrelationsfunktion

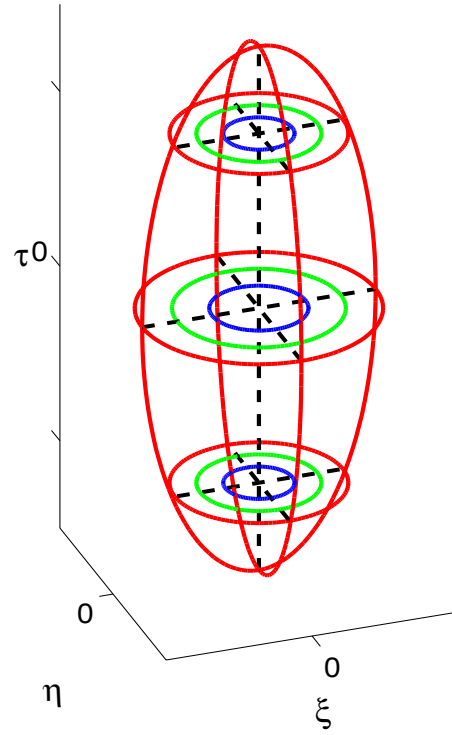


Abbildung 2.8: Ein stationäres, sich zeitlich zufällig veränderndes Streumuster (links). Die Konturen gleicher Korrelation für dieses Muster bilden Ellipsoidoberflächen (rechts).

(z. B. gaußsche) Form haben. Der notwendige experimentelle Aufwand kann durch diese Annahme auf die Schätzung der Korrelationen an drei räumlich getrennten Punkten reduziert werden.

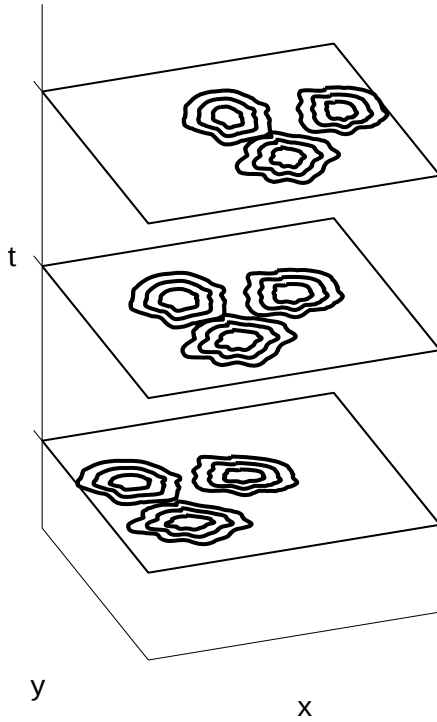
Bei den zeitlichen Variationen werden zufällige und durch Wind verursachte Bewegungen unterschieden. Interferenzmuster, die sich zufällig verändern, aber keine gerichtete Bewegung ausführen, liefern für einen einzelnen räumlichen Punkt eine symmetrische zeitliche Korrelationsfunktion $\rho(0, 0, \tau) = \rho(K\tau^2)$. Die räumliche und zeitliche Korrelation wird dann durch die Funktion

$$\rho(\xi, \eta, \tau) = \rho(A\xi^2 + B\eta^2 + 2H\xi\eta + K\tau^2). \quad (2.42)$$

beschrieben. Konstante Korrelationswerte werden für $(A\xi^2 + B\eta^2 + 2H\xi\eta + K\tau^2) = \text{const}$ durch Ellipsoide beschrieben (Abb. 2.8).

Dieselbe Korrelation würde ein Beobachter registrieren, der sich auf einem vom Hintergrundwind mitgeführten Interferenzmuster mitbewegt. Ein stationärer Beobachter

Konturplots des Interferenzmusters



Konturplots der Korrelationsfunktion

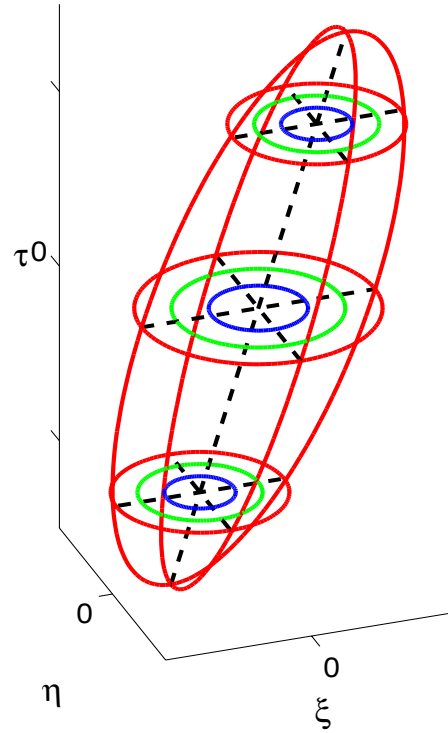


Abbildung 2.9: Ein sich bewegendes und zeitlich veränderndes Streumuster (links). Die Konturen gleicher Korrelation für dieses Muster bilden die Oberflächen schiefer Ellipsoide (rechts).

ermittelt dagegen mit $\xi \rightarrow (\xi - V_x \tau)$ und $\eta \rightarrow (\eta - V_y \tau)$ eine Korrelationsfunktion

$$\rho(\xi, \eta, \tau) = \rho(A(\xi - V_x \tau)^2 + B(\eta - V_y \tau)^2 + 2H(\xi - V_x \tau)(\eta - V_y \tau) + K\tau^2), \quad (2.43)$$

wobei V_x die Windgeschwindigkeit in x-Richtung und V_y die Windgeschwindigkeit in y-Richtung darstellen. Diese Gleichung läßt sich mit

$$C = AV_x^2 + BV_y^2 + 2HV_x V_y + K^2 \quad (2.44)$$

$$F = -2AV_x - 2HV_y \quad (2.45)$$

$$G = -2BV_y - 2HV_x \quad (2.46)$$

in die Raum-Zeit-Korrelationsfunktion

$$\rho(\xi, \eta, \tau) = \rho(A\xi^2 + B\eta^2 + C\tau^2 + 2F\xi\tau + 2G\eta\tau + 2H\xi\eta). \quad (2.47)$$

überführen. Konstante Korrelationswerte liegen auf schiefen Ellipsoiden (Abb. 2.9).

Die Ellipsoidparameter A bis H können auf C normiert und zur Vereinfachung durch

$$a = \frac{A}{C}, \quad b = \frac{B}{C}, \quad f = \frac{F}{C}, \quad g = \frac{G}{C}, \quad h = \frac{H}{C} \quad \text{und} \quad k = \frac{K}{C} \quad (2.48)$$

ersetzt werden. Sie lassen sich folgendermaßen aus den experimentell beobachtbaren Korrelationsfunktionen bestimmen: Die Autokorrelationsfunktion (AKF) ist für alle Empfänger gleich und ergibt sich aus Gleichung 2.47 zu

$$\rho(0, 0, \tau) = \rho(\tau^2). \quad (2.49)$$

Die Kreuzkorrelationsfunktion (KKF) zwischen den Empfängern i und j lautet nach Gleichung 2.47

$$\rho(\xi_{ij}, \eta_{ij}, \tau_{ij}) = \rho(a\xi_{ij}^2 + b\eta_{ij}^2 + \tau_{ij}^2 + 2f\xi_{ij}\tau_{ij} + 2g\eta_{ij}\tau_{ij} + 2h\xi_{ij}\eta_{ij}). \quad (2.50)$$

Das Maximum der Kreuzkorrelationsfunktionen befindet sich wegen $\partial\rho/\partial\tau_{ij} = 0$ bei einer Zeitverschiebung von

$$\tau'_{ij} = -(f\xi_{ij} + g\eta_{ij}). \quad (2.51)$$

AKF und KKF haben nach Gleichung 2.49 und 2.50 denselben absoluten Wert, wenn

$$\tau^2 = a\xi_{ij}^2 + b\eta_{ij}^2 + 2h\xi_{ij}\eta_{ij} + \tau_{ij}^2 + 2(f\xi_{ij} + g\eta_{ij})\tau_{ij} \quad (2.52)$$

gilt. Mit Gleichung 2.51 folgt daraus

$$a\xi_{ij}^2 + b\eta_{ij}^2 + 2h\xi_{ij}\eta_{ij} = \tau_{ij}^2 - 2\tau'_{ij}\tau_{ij} - \tau^2 = \tau_{ij}^{*2}. \quad (2.53)$$

Für eine feste geometrische Antennenanordnung ($\xi_{ij}, \eta_{ij} = \text{const.}$) und feste räumliche Korrelationseigenschaften ($a, b, h = \text{const.}$) ist der linke Term in Gleichung 2.53 konstant. Zur Bestimmung der beiden unbekannten Zeitkonstanten τ'_{ij} und τ_{ij}^* (vgl. auch Abb 2.10) wurden verschiedene Berechnungsmethoden entwickelt (z.B. FEDOR, 1967; CHANDRA und BRIGGS, 1978; MEEK, 1980; HOFFMANN, 1991), von denen im folgenden nur einige aufgeführt sind:

1. Es wird ein lineares Gleichungssystem 2.53 für Paare $[\tau, \tau_{ij}]$ aufgestellt, für die die AKF und die KKF den gleichen Betrag haben. Die Lösungen des Gleichungssystems liefern τ'_{ij} und τ_{ij}^{*2} .
2. Durch Interpolation des Maximums der KKF wird τ'_{ij} bestimmt und in Gleichung 2.53 zur Ermittlung von τ_{ij}^{*2} eingesetzt. Hierbei ist jedoch zu beachten, daß der Anstieg der KKF im Bereich ihres Maximums relativ klein und die Fehlerwahrscheinlichkeit für die Bestimmung der Stelle des Maximums der KKF daher sehr groß ist.
3. Wird in Gleichung 2.53 $\tau_{ij} = 0$ gesetzt, ergibt sich $\tau_i^2 = \tau_{ij}^{*2}$, das heißt, τ_{ij}^* ist genau diejenige Zeitdifferenz, für die der Betrag der AKF $\rho(0, 0, \tau_{ij}^*)$ gleich dem Betrag der KKF $\rho(\xi_{ij}, \eta_{ij}, 0)$ ist. Wird τ_{ij}^* für diesen Wert durch Interpolation aus der AKF bestimmt, dann kann τ'_{ij} anschließend nach Gleichung 2.53 berechnet

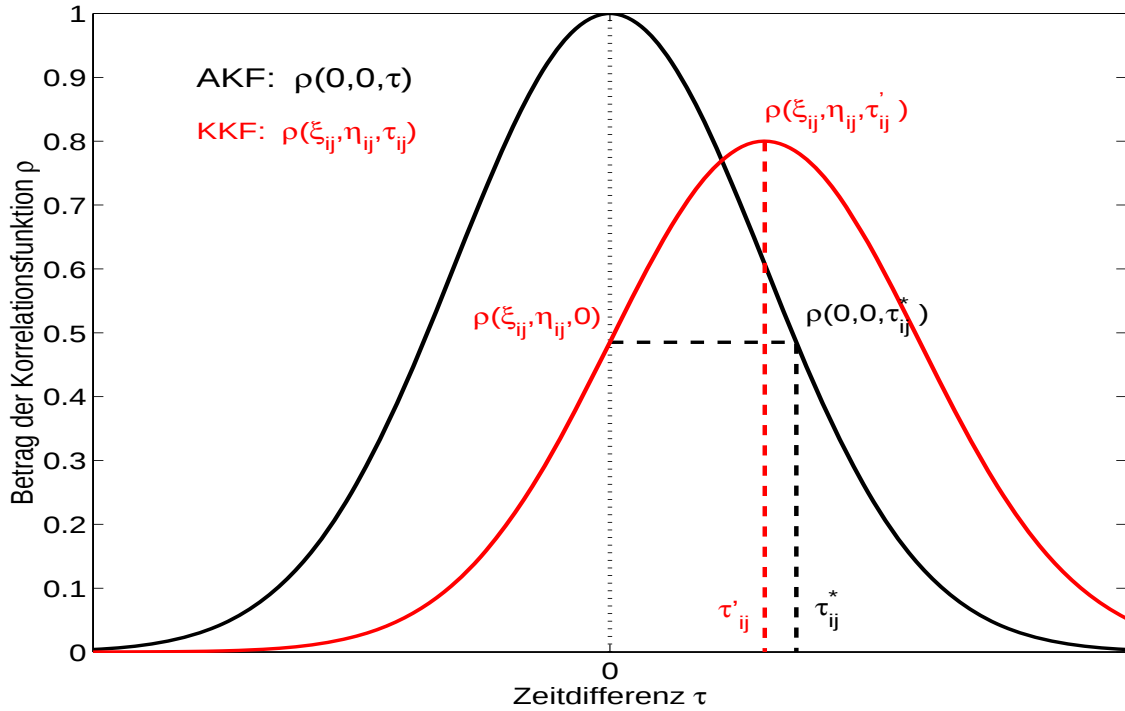


Abbildung 2.10: Schematische Darstellung zur Ermittlung der Konstanten τ' und τ^* aus den direkt beobachtbaren zeitlichen Korrelationsfunktionen

werden. Der Korrelationswert kann jedoch für große Zeitdifferenzen τ'_{ij} und relativ schnell abklingende Korrelationsfunktionen $\rho(\xi_{ij}, \eta_{ij}, \tau_{ij})$ sehr klein und aufgrund der zufälligen Fehler der KKF daher statistisch unsicher sein. Die Anwendung dieser Methode muß deshalb sehr kritisch überprüft werden.

4. Die Korrelationsfunktionen werden um ihr Maximum zum Beispiel durch gaussförmige Funktionen angenähert. Anhand der Gaußkurvenparameter kann dann τ'_{ij} direkt abgelesen und τ^{*2} nach Gleichung 2.53 berechnet werden.

Sind τ'_{ij} und τ_{ij}^{*2} für mindestens zwei bzw. drei Empfangspaare $[i, j]$ bestimmt, lassen sich durch ein lineares Gleichungssystem (2.51) die Werte für f und g sowie durch ein lineares Gleichungssystem (2.53) die Werte für a , b und h ermitteln. Aus diesen Korrelationsparametern können die folgenden physikalische Eigenschaften abgeleitet werden.

Streumustergröße und Aspektempfindlichkeit

Die räumlichen Eigenschaften des Interferenzmusters werden bei der vollen Korrelationsanalyse durch eine räumliche charakteristische Ellipse beschrieben. Die große Achse

r_{maj} und die kleine Achse r_{min} der Ellipse sind dabei durch

$$r_{maj} = \sqrt{\frac{2\tau_{0.5}^2}{a+b-r}} \quad (2.54)$$

und

$$r_{min} = \sqrt{\frac{2\tau_{0.5}^2}{a+b+r}} \quad (2.55)$$

mit

$$r = \sqrt{(a-b)^2 + 4h^2} \quad (2.56)$$

bestimmt. Die charakteristische Ellipse wird gewöhnlich durch das Achsenverhältnis R_{ax} und die Achsendrehung ϕ_{ax} angegeben. Das Achsenverhältnis

$$R_{ax} = \sqrt{\frac{a+b+r}{a+b-r}} \quad (2.57)$$

gibt die Relation der großen zur kleinen Achse der charakteristischen Ellipse an, die Achsendrehung

$$\phi_{ax} = 0.5 \arctan\left(\frac{2h}{b-a}\right) \quad (2.58)$$

die Ausrichtung der großen Achse zur Nordrichtung. Als charakteristische räumliche Korrelationslänge wird das geometrische Mittel der großen und kleinen Achse

$$S_{0.5} = \sqrt{r_{maj}r_{min}} \quad (2.59)$$

definiert. Die Größe symbolisiert somit den „mittleren Radius“ der charakteristischen Ellipse. Sie wird in der englischsprachigen Literatur als „pattern size“ oder „scatter size“ bezeichnet, obwohl sie nicht die Gesamtgröße des Streuers oder des Interferenzmusters angibt, sondern vielmehr die mittlere Länge, in der die räumliche Korrelationsfunktion auf die Hälfte abgefallen ist.

Eine theoretische Herleitung zur Bestimmung der Aspektempfindlichkeit mit Hilfe der räumlichen Korrelation beschreiben z. B. BRIGGS und VINCENT (1973): Die räumliche Autokorrelationsfunktion am Boden kann durch ein Feld von Empfangsantennen bestimmt werden, indem die Signale an jeder Antenne einzeln aufgenommen werden und die Korrelationsfunktionen zwischen ihnen berechnet werden. Die so bestimmte Autokorrelationsfunktion ist einfach die Fouriertransformierte des kombinierten Polardiagramms von Radar und Streuer. Unter der Voraussetzung, daß die Polardiagramme von Streuer, Radarsende- und Radarempfangsstrahl näherungsweise gaußförmig, azimutunabhängig und im Zenit zentriert sind, gibt BRIGGS (1992) dann die halbe 1/e-Breite des effektiven Polardiagramms θ_{sb} (in Grad) mit

$$\theta_{sb} \simeq \frac{15.2\lambda}{S_{0.5}} \quad (2.60)$$

an, wobei λ die Radarwellenlänge und $S_{0.5}$ die charakteristische räumliche Korrelationslänge darstellen. Zu dem gleichen Ergebnis kommen LESICAR und HOCKING (1992) nach einer Korrektur des vorherigen Wertes $12.0\lambda/\theta_{sb}$ von HOCKING (1987), welcher auf eine inkorrekte Anwendung der Fourier-Bessel-Transformation in der Veröffentlichung von BRIGGS und VINCENT (1973) zurückzuführen ist.

Der Aspektempfindlichkeitsgrad θ_s kann schließlich nach Gleichung 2.18 berechnet werden.

Mittlere Lebenszeit und Turbulenz

Aus den Ergebnissen der vollen Korrelationsanalyse können auch die mittleren zeitlichen Veränderungen des Interferenzmusters bestimmt werden. Als charakteristische Korrelationszeit oder sogenannte „mittlere Lebenszeit“ $T_{0.5}$ wird dabei oftmals diejenige Zeitdifferenz τ definiert, für welche die zeitliche Autokorrelationsfunktion mit

$$\rho(0, 0, T_{0.5}) = \rho(kT_{0.5}^2) \quad (2.61)$$

den Wert 0.5 annimmt.

Praktisch wird zunächst die Zeit $\tau_{0.5}$ bestimmt, für die die direkt beobachtbare Autokorrelationsfunktion auf den Wert 0.5 abfällt. Aus dieser sowie den ermittelten Windwerten und den Parametern der charakteristischen Ellipse wird dann mit $k = 1 - (aV_x^2 + bV_y^2 + 2hV_xV_y)$ die charakteristische Korrelationszeit durch

$$T_{0.5} = \tau_{0.5}/\sqrt{k} \quad (2.62)$$

ermittelt. Durch die Gleichung

$$v_{turb} = \frac{\lambda\sqrt{\ln 2}}{4\pi T_{0.5}} \quad (2.63)$$

läßt sich eine mittlere Geschwindigkeit abschätzen, die auf Turbulenz zurückzuführen ist (z. B. HOCKING, 1983; HOLDSWORTH, 1995a).

Horizontale Windgeschwindigkeiten

Der Koeffizientenvergleich für $\xi\tau$ und $\eta\tau$ in den Gleichungen 2.43 und 2.47 ergibt

$$aV_x + hV_y = -f \quad (2.64)$$

$$hV_x + bV_y = -g. \quad (2.65)$$

Damit lassen sich die mittleren Geschwindigkeiten V_x und V_y berechnen. Dieser Geschwindigkeitsvektor wird als „wahre“ Geschwindigkeit bezeichnet. Wenn x die Ausrichtung in zonaler Richtung und y die Ausrichtung in meridionaler Richtung beschreibt, dann stellt V_x den zonalen Wind u und V_y den meridionalen Wind v dar. Die Angabe in Windgeschwindigkeit und -richtung kann durch $V_h = \sqrt{u^2 + v^2}$ und $\phi_h = \arctan(u/v)$ erfolgen.

Mittlerer Empfangswinkel und vertikale Geschwindigkeit

Wenn die Abhängigkeit der Rückstreuung vom Zenitwinkel (Aspektempfindlichkeit) im Mittel als symmetrische Funktion angenommen werden kann, dann ist nach Gleichung 2.25 bei vertikal ausgerichteter Antenne der effektive Schwenkwinkel $\theta_{msb} = 0$, wie in Abb. 2.11 (oben) dargestellt. Eine Abschätzung der vertikalen Geschwindigkeit kann dann bei komplexen Signalen ähnlich dem DBS-Verfahren dadurch erfolgen, daß die radiale Geschwindigkeit über die mittlere Dopplerfrequenz f_D oder den Phasenanstieg $d\phi/d\tau$ der Korrelationsfunktionen bestimmt und für vertikal ausgerichtete Antennenstrahlen als vertikale Geschwindigkeit angenommen wird (z.B. HOFFMANN, 1991).

Die Aspektempfindlichkeitskurve ist jedoch nur als mittlere Abhängigkeit der Rückstreuung vom Zenitwinkel über einen längeren Zeitraum zu verstehen. Eine momentane Funktion wird zusätzlich durch die aktuelle zufällige Verteilung der Streuer im Meßvolumen bestimmt, wie in Abb. 2.11 (unten) dargestellt. Das Maximum des effektiven Empfangsleistungsdiagramms liegt trotz vertikal ausgerichtetem Antennenstrahls aufgrund seiner endlichen Breite im allgemeinen nicht im Zenit. Somit wird die gemessene radiale Geschwindigkeit neben dem vertikalen auch durch einen horizontalen Geschwindigkeitsanteil beeinflusst (vgl. hierzu auch Abb. 2.3 rechts unten). Sie ist analog zu Gleichung 2.34 des DBS-Verfahrens durch

$$V_R = V_h \cos(\phi - \phi_h) \sin \theta + w \cos \theta \quad (2.66)$$

$$= u \sin \phi \sin \theta + v \cos \phi \sin \theta + w \cos \theta \quad (2.67)$$

festgelegt. Die vertikale Geschwindigkeit kann demzufolge nicht exakt bestimmt werden, wenn die mittleren Empfangswinkel (Azimutwinkel ϕ und Zenitwinkel θ) unbekannt sind.

In den theoretischen und praktischen Arbeiten zur Windbestimmung durch Radarinterferometrie wurde nachgewiesen, daß sich diese Winkel aus den Phasen $\delta_{ij}(\tau = 0)$ der komplexen Kreuzkorrelationsfunktionen berechnen lassen. Erste Messungen mit VHF-Radars unter Anwendung dieser Methode wurden von RÖTTGER und VINCENT (1978) und VINCENT und RÖTTGER (1980) beschrieben. Später wurden unterschiedliche interferometrische Berechnungsmethoden abgeleitet (z.B. FRANKE *et al.*, 1990; VAN BAELEN und RICHMOND, 1991, vgl. auch Abb. 2.4).

Diese Methode ist in Abb. 2.12 skizziert. Sie läßt sich auf die hier beschriebenen SA-Messungen übertragen: Im dreidimensionalen Fall kann der mittlere Empfangswinkel aus den Phasen der Kreuzkorrelationsfunktionen für $\tau=0$ durch Lösen der Gleichung

$$\begin{pmatrix} \delta_{01} \\ \delta_{12} \\ \delta_{20} \end{pmatrix} = \frac{2\pi}{\lambda} \begin{pmatrix} \xi_{01} & \eta_{01} \\ \xi_{12} & \eta_{12} \\ \xi_{20} & \eta_{20} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l \\ m \end{pmatrix} \quad (2.68)$$

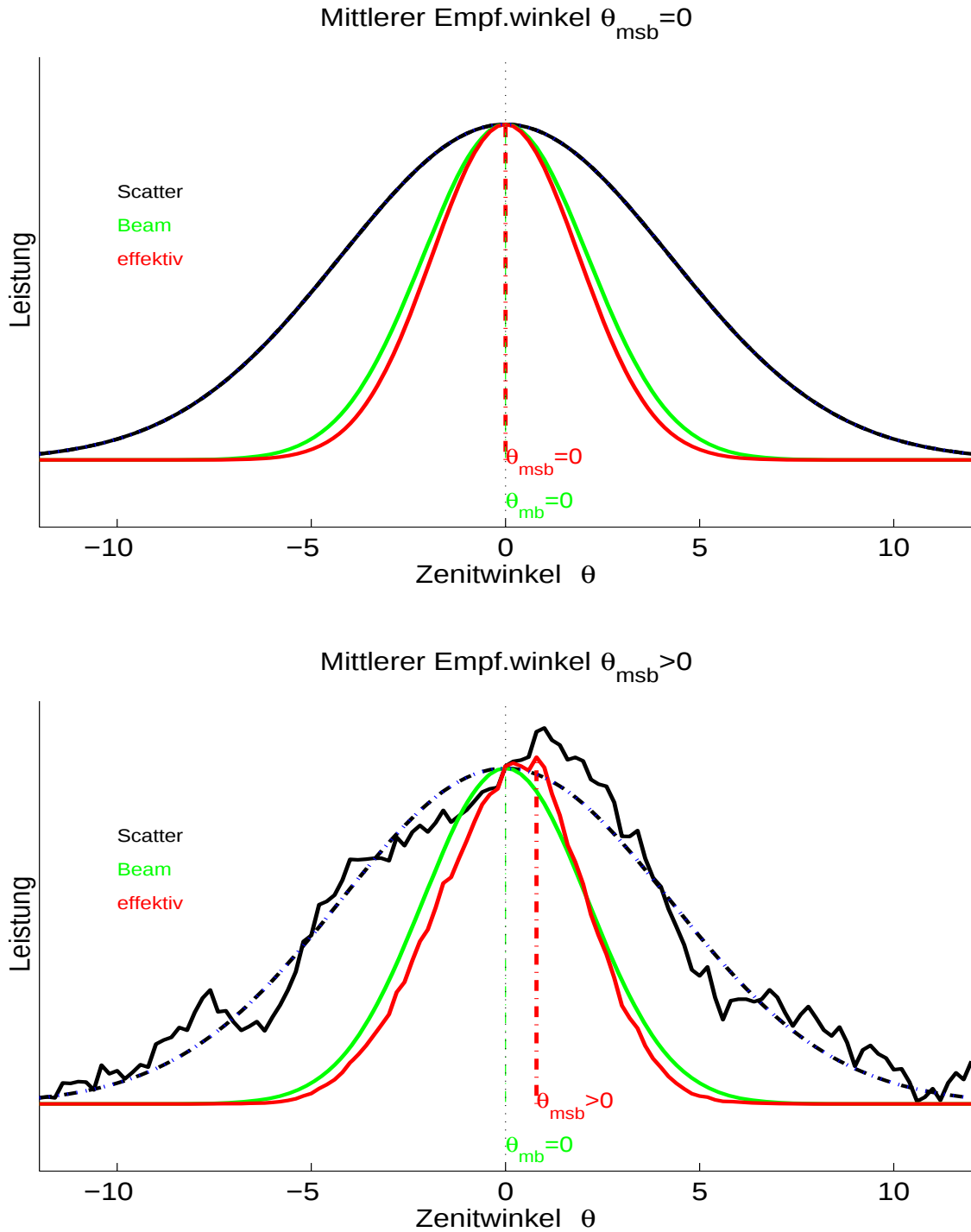


Abbildung 2.11: Effektives Leistungsdiagramm und mittlerer Empfangswinkel bei Messungen mit einem vertikal ausgerichteten Antennenstrahl ($\theta_{mb} = 0$); oben: bei gleichmäßig verteilten Streuern und symmetrischer Aspektempfindlichkeitskurve ist der mittlere Empfangswinkel $\theta_{msb} = 0$, unten: wenn die momentane Streuerverteilung zufällig ist und die momentane Rückstreuelfunktion um die mittlere Aspektempfindlichkeitskurve schwankt, kann der mittlere Empfangswinkel $\theta_{msb} > 0$ sein

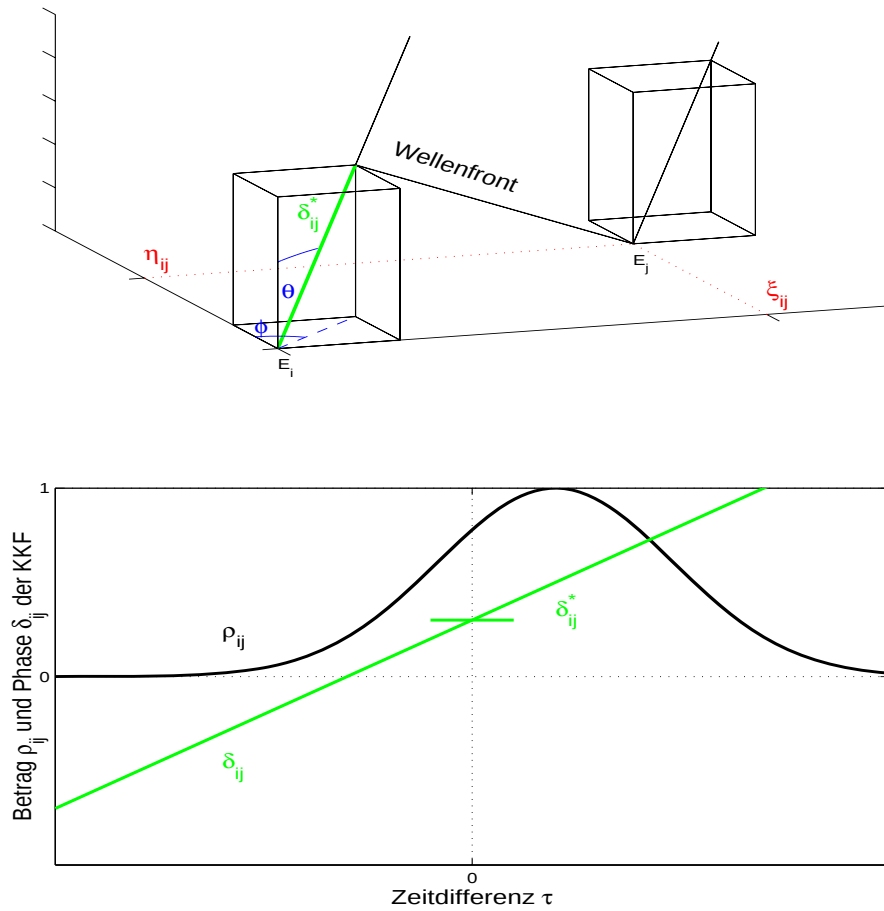


Abbildung 2.12: Prinzip der Bestimmung des Zenitwinkels θ und des Azimuts ϕ unter Annahme einer geraden Wellenfront durch Messen der Phasendifferenz der KKF $\delta_{ij}(\tau = 0) = \delta_{ij}^*$ (Interferometrie). Die Signale werden mit den räumlich getrennten Empfangsantennen E_i und E_j aufgenommen.

bestimmt werden, wobei $l = \sin(\phi) \sin(\theta)$ den zonalen und $m = \cos(\phi) \sin(\theta)$ den meridionalen Richtungskosinus des Empfangswinkel darstellen und (ξ_{ij}, η_{ij}) die Abstände der Antennen i und j in zentraler und meridionaler Richtung symbolisieren. Mit

$$\theta = \arcsin(\sqrt{l^2 + m^2}) \quad (2.69)$$

und

$$\phi = \arctan\left(\frac{l}{m}\right) \quad (2.70)$$

können die Zenitablage θ und das Azimut ϕ des Empfangswinkels bestimmt werden.

Die vertikale Geschwindigkeit w läßt sich nun über Gleichung 2.66 berechnen, wobei die mittels vollständiger Korrelationsanalyse ermittelten horizontalen Windwerte (V_h und ϕ_h bzw. u und v) genutzt werden.

3 Das ALOMAR SOUSY Radar

3.1 Historische Entwicklung und Standort des Radars

Historische Entwicklung

Für Untersuchungen in der unteren und mittleren Atmosphäre wurde 1975 vom Max-Planck-Institut für Aeronomie in Katlenburg-Lindau (MPAE) das stationäre „Sounding System Radar“ (SOUSY-Radar) entwickelt und nach erfolgreichen Messungen im Sommer 1977 komplettiert. Es befindet sich 26 km östlich von Lindau im Harz (51.7°N, 10.5°E), besteht aus 196 Vier-Elemente-Yagis und arbeitet auf einer Frequenz von 53.5 MHz mit einer Pulsspitzenleistung von 600 kW und bei einer Strahlbreite von 5° (SCHMIDT *et al.*, 1979).

Um die Flexibilität zu erhöhen und die Möglichkeit zu haben, an internationalen wissenschaftlichen Forschungsprogrammen teilzunehmen, wurde 1980 ein ähnliches zweites System, das „mobile SOUSY Doppler Radar“, entwickelt. Es wurde 1983 vollendet und bestand aus 576 Vier-Elemente-Yagis, arbeitete ebenfalls auf einer Frequenz von 53.5 MHz mit einer Pulsspitzenleistung von 200 kW bei einer Strahlbreite von 3° (CZECHOWSKY *et al.*, 1984). Das Radar wurde in mehreren wissenschaftlichen Meßkampagnen erfolgreich eingesetzt.

Für kontinuierliche Beobachtungen der Reflektivität und Dynamik der arktischen Tropo-, Strato- und Mesosphäre wurde 1994 vom Institut für Atmosphärenphysik Kühlungsborn (IAP) in Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für Aeronomie das ALOMAR SOUSY Radar auf der Basis der Sende/Empfangseinheit des „mobilen SOUSY Doppler Radars“ entwickelt und in den folgenden Jahren für Spaced-Antenna-Anwendungen erweitert. Dieses Radar wurde vom IAP bis 1997 erfolgreich betrieben.

Standort

In Andenes auf der nordnorwegischen Insel Andoya (Abb. 3.1) befindet sich die 1962 gegründete Andoya Rocket Range (69.3°N, 16.0°E). Sie liegt in einem Gebiet mit guter

Infrastruktur und relativ mildem Klima und stellt die nördlichste permanent betriebene Einrichtung für Raketenexperimente und Ballonstarts dar. 1994 wurde unweit der Andoya Rocket Range das ALOMAR Observatorium eingeweiht (ALOMAR = Arctic Lidar Observatory for Middle Atmosphere Research). In dieser internationalen Einrichtung werden atmosphärische Eigenschaften wie Dichte, Temperatur, Aerosolgehalt und Wind mit Hilfe verschiedener optischer Geräte im Höhenbereich von 8 bis 90 km untersucht (VON ZAHN *et al.*, 1995; VON ZAHN, 1997). Ebenfalls 1994 wurde das ALOMAR SOUSY Radar in unmittelbarer Nähe der Rocket Range und des ALOMAR Observatoriums installiert (SINGER *et al.*, 1995). Somit sind vielfältigste kontinuierliche und hochauflösende Messungen in sehr nahe beieinanderliegenden Meßvolumina mit unterschiedlichen Meßinstrumenten möglich. Ergebnisse können gut miteinander verglichen werden, durch Kombination können Informationen über einen sehr großen Höhenbereich gewonnen werden, was mit Einzelexperimenten nicht möglich ist.

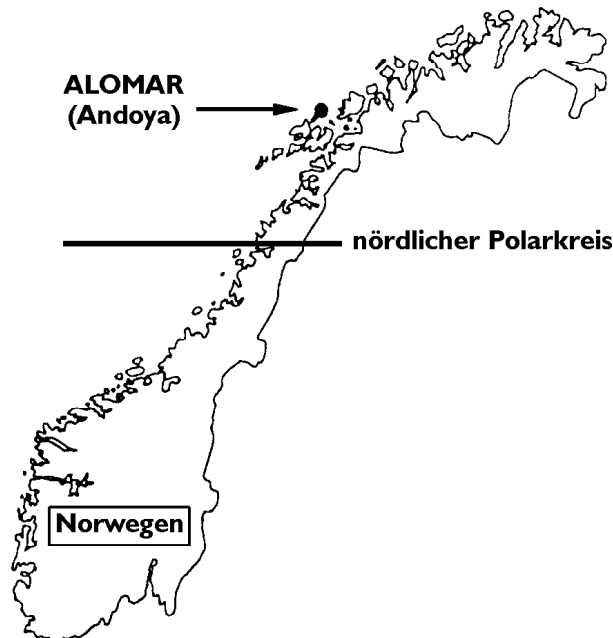


Abbildung 3.1: Standort des ALOMAR SOUSY Radars auf Andoya (69.3°N, 16.0°E)

3.2 Technische Parameter und Steuerung des Radarsystems

Das Ziel bei der Entwicklung des ALOMAR SOUSY Radars bestand darin, eine kostengünstige Anlage für kontinuierliche Untersuchungen der Meso-, Strato- und Troposphären zu konstruieren, welche wartungsarm und unbeaufsichtigt arbeiten kann, aber

trotzdem flexibel für unterschiedliche Meßexperimente ist. Dabei konnten einige in sehr kompakter Ausführung vorhandene Sende-, Empfangs- und Datenverarbeitungselemente des „mobilen SOUSY Radar“ übernommen und entsprechend ergänzt werden. Das komplette System inklusive mehrerer optionaler Arbeitsplätze wurde in zwei Standard-Containern installiert.

Eine umfassende technische Beschreibung geben SINGER *et al.* (1995). Die wesentlichen Punkte werden hier noch einmal zusammengefaßt.

Das Radar arbeitete im VHF-Bereich mit einer Frequenz von 53.5 MHz. Es bestand aus einem Feld von 148 Vier-Elemente-Yagi-Antennen mit einem Antennenabstand von $\lambda/\sqrt{2} = 3.96$ m. Abb. 3.2 zeigt eine Fotografie der Radaranlage.



Abbildung 3.2: Ansicht des ALOMAR SOUSY Radars an der Küste der nordnorwegischen Insel Andoya

Aus Kostengründen wurden jeweils vier Yagis zu einer Gruppe mit gleichem Leistungsniveau und gleicher Phasenansteuerung zusammengefaßt. Durch eine Staffelung der Leistungsniveaus der Vierergruppen wurde eine Verbesserung der Richtcharakteristik des Radars mit einer Halbwertsbreite des Hauptstrahls von 6.5° und einem Antennengewinn von 29 dB erreicht. Abb. 3.3 zeigt das Antennenpolardiagramm des Radars. Die größte Nebenkeule liegt etwa 26 dB unter dem Maximum der Hauptkeule. Durch differenzierte Phasenbeaufschlagung der Signale über die Radarhardware ließ sich der Radarstrahl sowohl zum Senden als auch zum Empfangen elektrisch in den Zenit sowie um je 8° nach Norden, Süden, Osten und Westen schwenken.

Das Netzwerk ist in Abb. 3.4 dargestellt. Es bestand aus einer sechsstufigen Kas-

Antennendiagramm des ALOMAR SOUSY Radars (148 Yagis)

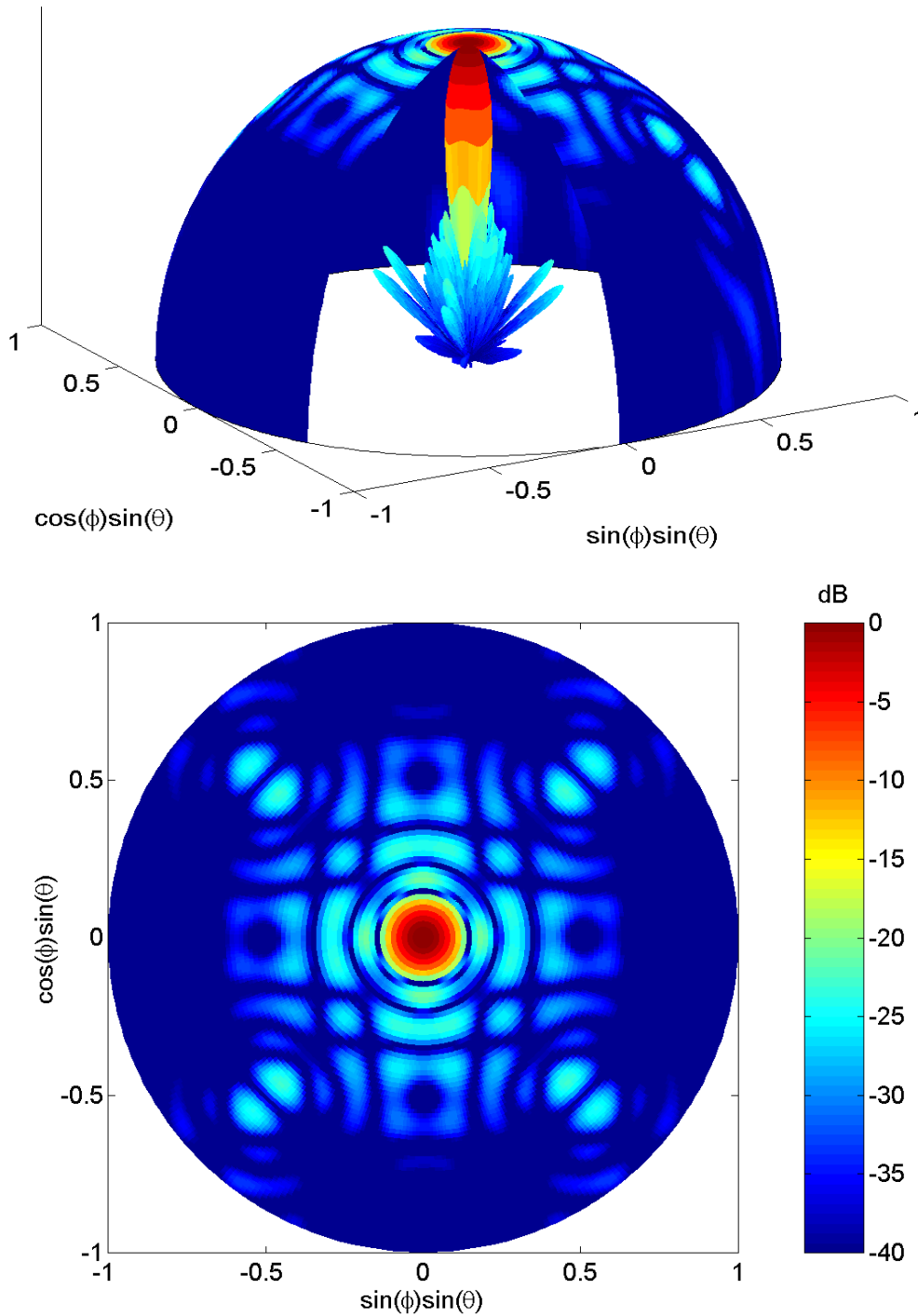


Abbildung 3.3: Antennendiagramm des ALOMAR-SOUSY Radars: Sende- bzw. Empfangsleistung in Abhängigkeit vom Zenitwinkel θ und vom Azimutwinkel ϕ (oben: 3D-Darstellung der Haupt- und Nebenkeulen, unten: Polardiagramm)

kade von 3-dB-Richtungskopplern, Vierfach-Leistungsteilern und Phasenschiebern. Die Richtungskoppler ermöglichten die Wichtung des Antennenfeldes in 3-dB-Schritten von den inneren zu den äußeren Antennenviergruppen. Als Phasenschieber wurden Relais genutzt, über die zusätzliche Leitungsschleifen in das Netz eingefügt, die entsprechenden Signallaufzeiten somit verlängert und die Hauptkeule in die gewünschte Richtung geschwenkt werden konnte. Die Vierfach-Leistungsteiler dienten der Aufteilung der Leistung auf die vier Antennen einer Gruppe.

Die Spitzenleistung des Radars betrug 150 kW. Der maximale Nutzfaktor (engl.: „duty cycle“) von 4% entspricht einer mittleren Leistung von 6 kW und konnte durch den Einsatz von kodierten Signalen (Komplementärkodes) voll ausgeschöpft werden. Die minimale Pulslänge betrug 1 μ s und die maximale Entfernungsauflösung somit 150 m. Sender bzw. Empfänger waren durch einen schnellen Sende-Empfangs-Umschalter mit einer Erholzeit von etwa 10 μ s mit der Antenne verbunden. Damit wurde eine Echodetektion bereits ab 1.5 km ermöglicht. In der folgenden Aufstellung sind die grundlegenden Parameter des ALOMAR SOUSY Radars noch einmal zusammengefaßt:

Frequenz	53.5 MHz
Pulsspitzenleistung	150 kW
max. Nutzfaktor	4%
Einzelelemente	Vier-Element-Yagi
Anzahl der Elemente im Sendebetrieb	max. 148
effektive Antennenfläche	2050 m ²
Antennengewinn	29 dB
Breite der Hauptkeule	6.5°
Schwenkrichtungen der Hauptkeule	5 (Vertikal, Nord, Süd, Ost, West)
Zenitablage der geschw. Hauptkeule	8°
Meßverfahren	Doppler-Beam-Swinging (DBS) und Spaced Antenna (SA) in der Tropo/Stratosphäre und Mesosphäre
abhängig von der Betriebsart:	
Höhenbereich	3-20 km und 60-95 km
Entfernungsauflösung	150, 300 oder 600 m
Pulsbetrieb	32, 16 oder 8 Bit Komplementär-Code, Einzelpulse oder kombinierter Betrieb
DBS Sendeantennen	132 oder 148 Yagis
DBS Empfangsantennen	132, 136 oder 148 Yagis
SA Empfangsantennen	4 oder 16 Yagis
Empfänger	4+1

Da die Möglichkeit eines kontinuierlichen Fernbetrieb des Radars geschaffen werden sollte, mußte die Übergabe der variablen Eingangsparameter, die Steuerung und Überwachung des Radars sowie der Transfer und die Sicherung der Empfangsdaten rechnergestützt erfolgen. Betriebsart, Empfangsantennenfelder, Auswahl der Schwenkrichtung, Pulslänge und -wiederholfrequenz, Anzahl der kohärenten Integrationen, Kodelänge usw. wurden daher über die Software vorgegeben und über eine Workstation (HP747i) an einen Echtzeitrechner (HP742rt) weitergegeben. Dieser diente zur Auswahl und Übergabe des Meßprogramms zum Radar-Controller und überwachte den Sende- und Empfangsbetrieb sowie die Antennensteuerung. Weiterhin wurden von ihm die über einen Analog-Digital-Konverter in digitale Signale umgewandelten und in einem Adder kohärent integrierten Empfangswerte übernommen, dekodiert und zur Workstation transferiert. Auf dieser wurden die Einzelmesswerte in Dateien zusammengefaßt und gesichert. Parallel dazu wurde auf der Workstation eine erste Datenanalyse und Visualisierung durchgeführt, um die Ergebnisse zur rückgestreuten Leistung, zum Signal-Rausch-Verhältnisses und zu den Winden quasi in Echtzeit verfolgen zu können. Durch die Anbindung an das Internet wurde die Möglichkeit des Fernzugriffs sowohl auf die Radarsteuerung als auch auf die Meßdaten und -ergebnisse geschaffen. Weiterhin ermöglichte eine automatische Wiederanlaufprozedur nach Fehlern den nahezu kontinuierlichen, unbeaufsichtigte Betrieb. Die Zusammenhänge sind in Abb. 3.5 dargestellt.

Im Routinebetrieb lief das Radar im DBS-Mode mit einem 16-Bit-Komplementär-Kode, einer Kodelänge von $2\ \mu\text{s}$ und einer Entfernungsauflösung von 300 m. Die Höhenbereiche 5.6 km - 23 km (Troposphäre/untere Stratosphäre) und 74 km - 96 km (Mesosphäre) wurden gleichzeitig beobachtet.

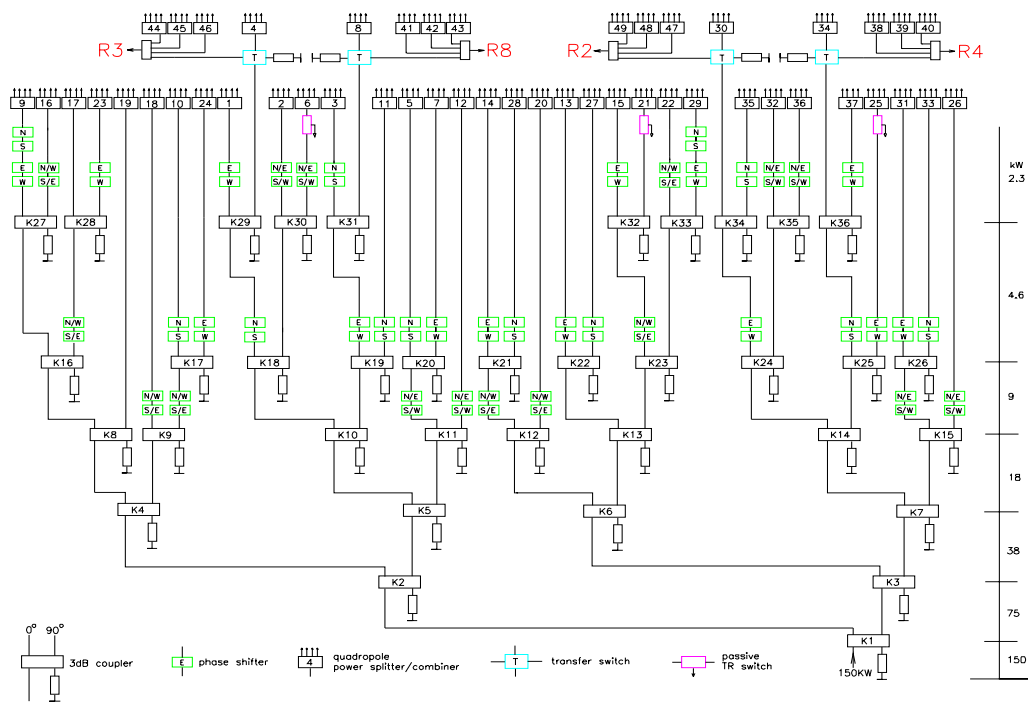


Abbildung 3.4: Speisesystem des ALOMAR SOUSY Radars (SINGER *et al.*, 1995)

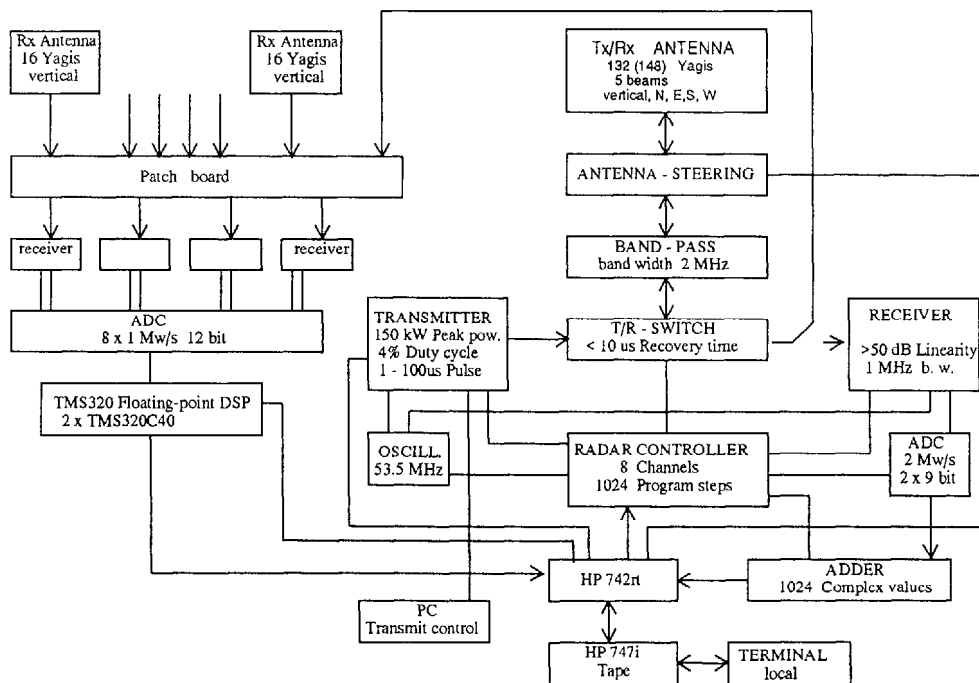


Abbildung 3.5: Blockdiagramm des ALOMAR SOUSY Radars (SINGER *et al.*, 1995)

4 Entwicklung eines Simultanbetriebs von DBS- und SA-Messungen mit dem ALOMAR SOUSY Radar

Die theoretischen Möglichkeiten zur Windmessung mit VHF-Radars nach dem Spaced Antenna Verfahren wurde von mehreren Autoren beschrieben (z.B. BRIGGS, 1980; VAN BAELEN *et al.*, 1990; HOLDSWORTH, 1995*b*). Ihre praktische Anwendbarkeit für Messungen in der polaren Mesosphäre wurde aber nach besten Wissen des Autors vor 1997 noch nicht überprüft. Durch die Erweiterung des ALOMAR SOUSY Radars um zusätzliche Antennenfelder und Empfangskanäle bestand nun die Möglichkeit, erstmals in der Mesosphäre neben den Doppler Beam Swinging auch Spaced Antenna Messungen im VHF-Bereich praktisch durchzuführen. Um beide Verfahren gut miteinander vergleichen zu können, sollten die Messungen unter gleichen Bedingungen durchgeführt werden. Da sich sowohl die PMSE-Strukturen selbst als auch die atmosphärischen Beobachtungsparameter wie horizontale Windgeschwindigkeit und -richtung, vertikale Windgeschwindigkeit, Aspektempfindlichkeit und Turbulenz in kurzen Zeitabständen sehr stark und sehr häufig ändern, wären durch zeitlich aufeinanderfolgende Messungen keine unmittelbaren Vergleiche der Ergebnisse möglich. Es wurde daher vom Autor darauf geachtet, daß neben der prinzipiellen Möglichkeit eines SA-Betriebes beide Verfahren auch simultan durchgeführt werden können, um somit zeitgleich Meßdaten von DBS- und SA-Experimenten zu erhalten und die Ergebnisse direkt vergleichen zu können. Die vom Autor durchgeführten Arbeiten zur Umsetzung dieser Aufgabe werden in diesem Kapitel beschrieben.

4.1 Kalibrierung des Radars

Bei der Analyse experimentell ermittelter Daten ist es wichtig, die Charakteristika, die auf Störungen durch Anlagen und Umgebung zurückzuführen sind, von den Eigenschaften zu trennen, die durch das zu untersuchende System (also die Atmosphäre) erzeugt wurden. Vorteilhaft ist es, die beeinflussenden Charakteristika schon vor den Messungen zu erkennen und die Ursachen zu beseitigen. Ist dies nicht möglich, müssen die entsprechenden Parameter für eine Korrektur der Daten ermittelt werden. Dies wird in diesem Abschnitt beschrieben.

4.1.1 Empfangscharakteristik der Antenne

Das Richtdiagramm eines VHF-Radars wird durch das komplexe Zusammenwirken der einzelnen Yagis bestimmt. Seine praktische Ausmessung und die Überprüfung der Schwenkrichtungen des Hauptstrahls sind wegen der großen Abmessungen des Radars und des damit verbundenen großen Fernfeldabstandes mit herkömmlichen Antennenmessungen allerdings nicht möglich. Für korrekte Messungen nach dem DBS-Verfahren ist jedoch die Kenntnis der tatsächlichen Schwenkrichtung der Antennenhauptkeule von großer Bedeutung.

Denkbar wäre, die vom Radar ausgesendeten Signale mit einer Empfangsantenne ohne Richtungsabhängigkeit aufzunehmen, die an einem Flugkörper befestigt ist. Der Flugkörper (z. B. Ballon, Hubschrauber oder Flugzeug) muß sich dabei im Fernfeld der Sendeantenne befinden. Die Stärke des Empfangssignals in Abhängigkeit von der Position des Flugkörpers spiegelt dann das Leistungsdiagramm der Sendeantenne wider. Für das ALOMAR SOUSY Radar beträgt jedoch die auszufliegende Fläche in 1 km Höhe (Beginn des Fernfeldes) allein für die Hauptkeule (maximaler Zenitwinkel 8°) etwa 62000 m^2 . Da diese Methode daher sehr arbeitsaufwendig und kostenintensiv ist, wurde sie in Andenes nicht angewandt.

Eine weitere theoretische Möglichkeit zur Bestimmung des Richtdiagramms wäre die Ausnutzung von Satelliten. Ihre aktuellen Positionen und Abstände zur Erde lassen sich aus bekannten Daten ermitteln. Datenbanken und Berechnungsprogramme hierzu stehen zum Beispiel im Internet zur Verfügung und werden ständig aktualisiert. Im Gegensatz zu Radiosternen treten Satelliten jedoch nicht als starke Strahlungsquellen auf, sondern wirken zum Beispiel als Reflektoren eines Sendesignals des Radars.

Es gibt eine Vielzahl verschiedener Satelliten. Sie haben unterschiedliche Größen, Formen und Materialien und reflektieren die Radarsignale daher unterschiedlich stark. Ein Vergleich der Empfangssignale von verschiedenen Satelliten ist somit schwierig. Die meisten bewegen sich zudem auf unterschiedlichen Bahnen um die Erde und verändern dadurch ihren Abstand zum Beobachtungspunkt (Radar). Die empfangene Lei-

stung eines vom Satelliten reflektierten Signals variiert daher nicht proportional zum Richtdiagramm des Radars für den entsprechenden Empfangswinkel, sondern muß in Abhängigkeit von der Entfernung des Satelliten korrigiert werden. Typische minimale Abstände sind 600-1200 km. Diese Entfernungen ändern sich für den Satelliten im Kulminationspunkt recht schnell. Typische Änderungen liegen bei 150 km/min. Bei Ausnutzung der vorhandenen Meßprogramme und Höhenkanäle ergibt sich eine kurze nutzbare Meßzeit, eine notwendige hohe zeitliche Auflösung der Meßwerte (keine Vorintegration) und ein beschränkter Höhenbereich für die Messungen. Weiterhin muß der Einfluß des Plasmas in den höchsten Atmosphärenschichten auf Ausbreitungsgeschwindigkeit und Dämpfung des Radarsignals beachtet werden. Um diese Störeinflüsse möglichst klein zu halten, sollten Satelliten ausgenutzt werden, die relativ groß sind, deren minimaler Abstand zum Beobachtungspunkt relativ klein ist, die sich möglichst langsam und mit möglichst geringen Entfernungsänderungen zum Radar bewegen.

Im Sommer 1996 und 1997 wurde versucht, von Satelliten reflektierte Radarsignale zu empfangen. Täglich fliegen etwa 5-10 Satelliten über den Radarstandort, deren Höhenwinkel 88° oder größer ist und für die die Wahrscheinlichkeit einer Beobachtbarkeit für einen vertikal ausgerichteten Antennenstrahl daher am größten ist. Die meisten dieser Satelliten sind allerdings zu klein oder haben einen zu großen Abstand, um ein auswertbares Echo zu empfangen. Am 7. August 1996 konnte ein vom Satelliten COSMOS 1151 reflektiertes Signal detektiert werden. Dieses Signal wurde um 5:55 Uhr UTC empfangen und damit genau zum Zeitpunkt des vorausberechneten Kulminationspunktes des Satelliten. Die Entfernung betrug 642 km. Für eine Kalibrierung des Radarstrahls war die Empfangszeit jedoch zu kurz. Weitere Meßversuche waren erfolglos. Es muß daher davon ausgegangen werden, daß die Sende-/Empfangsleistung des ALOMAR SOUSY Radars für die Detektion der meisten Satelliten zu gering ist.

Eine weitere Überprüfungsmöglichkeit besteht in der Ausnutzung der Radiostrahlung von Himmelskörpern (z.B. STIRNER, 1985). Dazu werden mit dem Radar keine Signale gesendet, sondern die Rauschsignale der Strahlungsquelle empfangen. Die Leistung des Empfangssignals ergibt sich aus der Multiplikation der Leistungsdiagramme des Radars und der Strahlungsquelle. Sind die Winkelabmessungen der Rauschquelle viel kleiner als die Breite der zu messenden Antennenhauptkeule, so kann diese näherungsweise als Punktquelle betrachtet werden und die empfangene Leistung entspricht direkt dem Leistungsdiagrammwert des Radars für den entsprechenden Azimut- und Zenitwinkel des Himmelskörpers. Läßt man die Strahlungsquelle mit der Erddrehung „durch das Richtdiagramm des Radars laufen“, erhält man die Werte für die entsprechenden Winkel der Bahnkurve des Himmelskörpers. Zum Zeitpunkt der maximalen Empfangssignalleistung wird von der Strahlungsquelle das Maximum des Leistungsdiagramms auf der Bahnkurve erreicht (z.B. GRAHL, 1958; PRIESE, 1964), zum Beispiel

bei einem nach Süden geschwenkten Antennenstrahl dann, wenn der Himmelskörper genau im Süden steht. Ist die Antenne nicht exakt nach Süden ausgerichtet, wird das Maximum entsprechend früher oder später erreicht.

Für eine Ausrichtung des Radars wurden unterschiedliche Himmelskörper in Betracht gezogen:

Die größte Strahlungsleistung kommt von der Sonne auf die Erde. Die mittlere Winkelabmessung für ihre halbe Strahlungsleistung liegt jedoch bei einigen Grad. Außerdem ist die Strahlungsleistung nicht konstant. Weiterhin liegt der Kulminationspunkt ihrer Bahn in höheren geographische Breiten oft zu niedrig, um Messungen eines schmalen, vertikal ausgerichteten oder nur leicht geneigten Antennenstrahls zu ermöglichen. Die Sonne ist daher für die Ermittlung des Richtdiagramms des Radars nicht geeignet.

Der Höhenwinkel des Mondes ist für radioastronomische Messungen einer schmalen, nahezu vertikalen Antennenhauptkeule in höheren geographische Breiten ebenfalls zu klein. Er wirkt außerdem hauptsächlich als Reflektor der Strahlung von der Sonne. Die Strahlung, die von ihm auf die Erde kommt, hat daher ähnliche negative Eigenschaften.

Die weit entfernten Radiosterne haben, von der Erde aus gesehen, sehr kleine Winkelabmessungen und relativ konstante Abstrahlleistungen. Sie sind daher gut zur Bestimmung der Schwenkrichtung geeignet. Für die nördliche Hemisphäre werden vor allem die in der folgenden Tabelle dargestellten Quellen genutzt (z.B. STIRNER, 1985).

Radiostern	Cassiopeia-A	Cygnus-A	Taurus-A	Virgo-A
astronomische Bezeichnung	23N5A	19N4A	05N2A	12N1A
Rektaszension	$23^h 21^m 11^s$	$19^h 57^m 44^s$	$05^h 31^m 31^s$	$12^h 28^m 17^s$
Deklination	$58^\circ 32' 48''$	$40^\circ 37' 24''$	$21^\circ 59' 00''$	$12^\circ 39' 54''$
Winkelabmessung (für halbe Strahlungsleistung)	4'	beide < 0,7' (Doppelquelle, Abstand 1,8')	4'	6'

Die Angaben beziehen sich auf das traditionelle Äquinoktium B1950. Dieses war lange Zeit in Gebrauch und wurde für viele Sternkataloge und Atlanten verwendet. Die Daten ändern sich jedoch geringfügig aufgrund der Verschiebung der Erdachse und der Ekliptik durch den Einfluß von Sonne, Mond und Planeten. Sie lassen sich durch Computerprogramme (z.B. MONTENBRUCK und PFLEGER, 1991) ermitteln. Aus den aktuellen Daten und dem geographischen Standort des Beobachters können schließlich die Positionsdaten der Sterne berechnet werden.

Für den Standort des Radars beträgt der im Jahresverlauf maximal erreichbare Höhenwinkel über dem Horizont 44.2° für die Sonne und 41.4° für den Mond. Die Leistung des geschwenkten Radars ist für diese kleinen Winkel zu gering, um die empfangene

Leistung vom Himmelskörper aus dem allgemeinen Rauschen zu detektieren. Gleiches trifft für die Radiosterne Cygnus-A (max. 61.6°), Taurus-A (max. 43.0°) und Virgo-A (max. 33.6°) zu.

Der Radiostern Cassiopeia-A erreicht in seinem Kulminationspunkt einen Höhenwinkel von 79.5° bei einem Azimut von 180° (Südrichtung) und liegt somit nur etwas unter dem Höhenwinkel des geschwenkten Radarstrahls, der bei 82° liegt ($= 8^\circ$ Zenitwinkel). Cassiopeia-A „läuft“ somit durch die Hauptkeule des Radars. Abb. 4.1 zeigt das Polardiagramm des Radars mit dem nach Süden geschwenkten Hauptstrahl und die Bahnkurve des Radiosterns durch die Hauptkeule.

Vom 28. Oktober bis zum 1. November 1994 wurden die Zeiten für das Erreichen des Kulminationspunktes berechnet und die Empfangsleistung für den Zeitraum von zwei Stunden vor bis zwei Stunden nach diesem Zeitpunkt aufgenommen (Abb. 4.2). Es ist zu erkennen, daß die maximale Empfangsleistung genau zum Kulminationszeitpunkt erreicht wird. Eine Korrektur der Schwenkrichtung war daher nicht erforderlich.

Die Hauptkeule des ALOMAR-SOUSY Radar läßt sich nur in vertikale Richtung und mit einem Zenitwinkel von acht Grad nach Norden, Süden, Osten und Westen schwenken. Ein Radiostern, der für die vorgegebene geographische Lage ($69^\circ\text{N}, 16^\circ\text{E}$) seinen Kulminationspunkt im Zenit oder acht Grad außerhalb des Zenits hat, konnte nicht gefunden werden. Eine Ausrichtung des Radar-Hauptstrahls direkt auf den Kulminationspunkt war daher nicht möglich. Ist der Zenitwinkel des Kulminationspunkts des Radiosterns kleiner als der maximale Schwenkwinkel des Radars (acht Grad), kann der Radiostern nicht durch das Maximum der Hauptkeule laufen.

Vom Radarstandort auf der sich drehenden Erde aus gesehen beschreibt ein sehr weit entfernter Radiostern näherungsweise eine geschlossene elliptische Bahnkurve. Abweichungen sind sehr gering. Für ein fest eingestelltes Radar (wie das ALOMAR SOUSY Radar) kann daher auch nur eine Bahnkurve des Polardiagramms ausgemessen werden. Um das komplette Richtdiagramm zu bestimmen, müßte der Radarstrahl beliebig schwenkbar sein und so geneigt werden, daß der Radiostern durch die gewünschten Antennenkeulenbereiche läuft. Das gemessene Diagramm könnte also durch mehrmaliges Schwenken in verschiedene Richtungen nach und nach vervollständigt werden. Für ein elektrisches Schwenken eines Antennenfeldes ändert sich aber die Richtcharakteristik geringfügig, ein Ausmessen des Polardiagramms anhand eines Radiosterns ist daher nicht exakt möglich. Unter der Annahme, daß die Änderung der Hauptkeulenform bei kleinen Schwenkwinkeln vernachlässigbar ist, ließe sich diese Richtcharakteristik jedoch näherungsweise bestimmen.

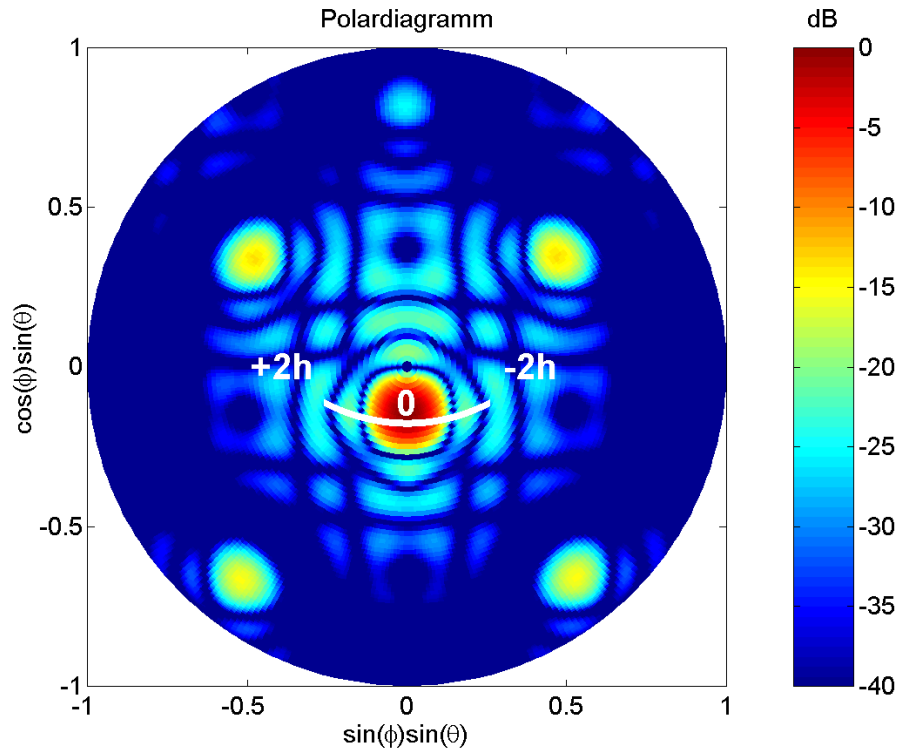


Abbildung 4.1: Bahnkurve von Cassiopeia A durch das Polardiagramm der um 8 Grad nach Süden geschwenkten Antenne

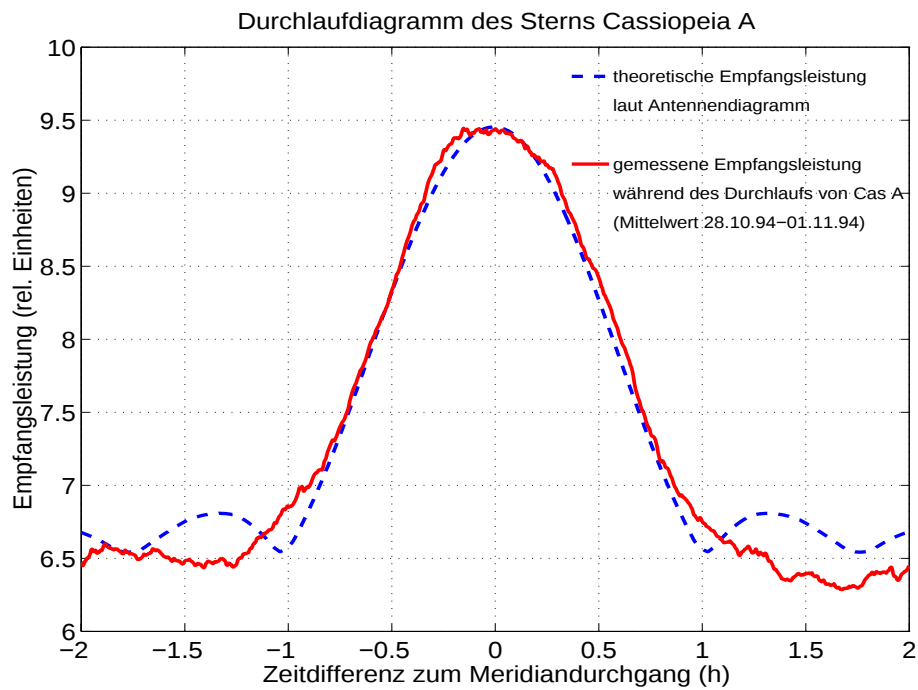


Abbildung 4.2: Empfangene Rauschleistung während des Durchlaufs des Radiosterns Cassiopeia A durch die Antennenhauptkeule

4.1.2 Kalibrierung der Empfänger

Aufgrund von Phasenfehlern und unterschiedlicher Verstärkungen der Kanäle des Quadraturdemodulators sind dessen Ausgangssignale im allgemeinen nicht amplitudenkonstant und orthogonal zueinander. Für eine korrekte Signalaufnahme müssen die Empfänger deshalb kalibriert werden. Das heißt, das Verhältnis der Verstärkungen von Real- und Imaginärteil sowie ihre Winkeldifferenz zueinander müssen bestimmt und so korrigiert werden, daß die Amplituden beider Komponenten gleich sind und ihre Phasendifferenz 90° beträgt.

Dazu können für eine feste Frequenz die Werte des Real- und Imaginärteils eines Empfangskanals aufgenommen werden. Die Darstellung zeitgleicher Werte gegeneinander in einem kartesischen Koordinatensystem (z.B. Oszillograph) ergibt dann im Idealfall einen Kreis (die Lissajous-Figur einer harmonischen Schwingung mit gleicher Frequenz). Stärkere Schwankungen der Amplituden führen zu einer „unscharfen“ Kreislinie. Sind die maximalen Auslenkungen von Real- und Imaginärteil unterschiedlich, wird der Kreis in eine Richtung gestreckt, es entsteht eine Ellipse. Wenn Real- und Imaginärteil nicht orthogonal zueinander liegen, entsteht eine geneigte Ellipse. Durch Variation der Einstellparameter direkt am Empfänger werden die Eigenschaften des Empfängers (am einfachsten unter zeitgleicher Kontrolle der Ausgangswerte am Oszillographen) nun so verändert, daß sie dem Idealfall (Kreis) möglichst nahe kommen (empirische Korrektur).

Es ist auch möglich, die konkreten Korrekturparameter aus den Meßgrößen zu berechnen. Ein Verfahren wurde erstmals von RÜSTER und WOODMAN (1978) beschrieben und von RÜSTER (1994) zusammengefaßt. Das Verfahren setzt keine harmonischen Schwingungen voraus. Das bedeutet, daß die Kalibrierungswerte zum Beispiel auch anhand von Rauschwerten ermittelt werden können. Weiterhin ist die Korrektur der Kalibrierungsparameter nicht unbedingt am Empfänger notwendig, sondern kann auch softwareseitig an den Empfangssignalen durchgeführt werden.

Dazu wird davon ausgegangen, daß sich das komplexe Empfangssignal $\underline{E}^i$ eines Empfängers zum Zeitpunkt t für den Höhenkanal r durch

$$\underline{E}^i(r, t) = \begin{pmatrix} E_R^i(r, t_j) \\ E_I^i(r, t_j) \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

darstellen läßt. Dieses Eingangssignal wird mit einer Matrix

$$B = \begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & -b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sin \theta & 0 \\ \cos \theta & 1 \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

multipliziert, so daß sich

$$\underline{E}(r, t) = B \cdot \underline{E}^i(r, t) \quad (4.3)$$

ergibt. Damit die korrigierte Signale $\underline{E}$ die oben beschriebenen Voraussetzungen erfüllen, müssen a , b und θ so bestimmt werden, daß

$$\langle E_R \cdot E_I \rangle = 0 \quad (4.4)$$

$$\langle E_R^2 \rangle = A^2 \quad (4.5)$$

$$\langle E_I^2 \rangle = A^2 \quad (4.6)$$

mit

$$A^2 = \frac{\langle E_R^2 \rangle + \langle E_I^2 \rangle}{2} \quad (4.7)$$

gilt. Dabei bezeichnet $\langle \rangle$ den Mittelwert des entsprechenden Datenensembles. Die Lösung von Gleichung 4.3 unter diesen Bedingungen ergibt

$$a^2 = \frac{A^2}{\langle E_R^2 \rangle - \frac{\langle E_R^i \cdot E_I^i \rangle^2}{\langle E_R^2 \rangle}}, \quad (4.8)$$

$$b^2 = \frac{A^2}{\langle E_I^2 \rangle - \frac{\langle E_R^i \cdot E_I^i \rangle^2}{\langle E_R^2 \rangle}}, \quad (4.9)$$

$$\cos \theta = -\frac{\langle E_R^i \cdot E_I^i \rangle^2}{\langle E_R^2 \rangle}. \quad (4.10)$$

Für orthogonal zueinander liegende Eingangssignale mit $\langle E_R \cdot E_I \rangle = 0$ würden sich die Gleichungen auf

$$a^2 = \frac{A^2}{\langle E_R^2 \rangle}, \quad (4.11)$$

$$b^2 = \frac{A^2}{\langle E_I^2 \rangle}, \quad (4.12)$$

$$\cos \theta = 0 \quad (4.13)$$

und für Eingangssignale mit gleicher Leistung im Real- und Imaginärteil ($\langle E_R^2 \rangle = \langle E_I^2 \rangle = A^2$) weiterhin auf

$$a^2 = 1, \quad (4.14)$$

$$b^2 = 1, \quad (4.15)$$

$$\cos \theta = 0 \quad (4.16)$$

reduzieren.

Die Empfänger in Andenes wurden mehrmals kalibriert. Abb. 4.3 zeigt als Beispiel eine Kalibrierung vom 18. April 1996. Es ist ersichtlich, daß die Phasenfehler der Empfänger sehr gering sind. Die unterschiedlichen Verstärkungen konnten hardwareseitig an den Empfangskanälen variiert und angeglichen werden. Somit war keine weitere softwareseitige Kalibrierung während der Messungen notwendig, wertvolle Rechenzeit konnte dadurch eingespart werden. Die Ermittlung der Kalibrierungsparameter wurde in zeitlichen Abständen wiederholt. Dabei zeigten sich keine größeren Veränderungen.

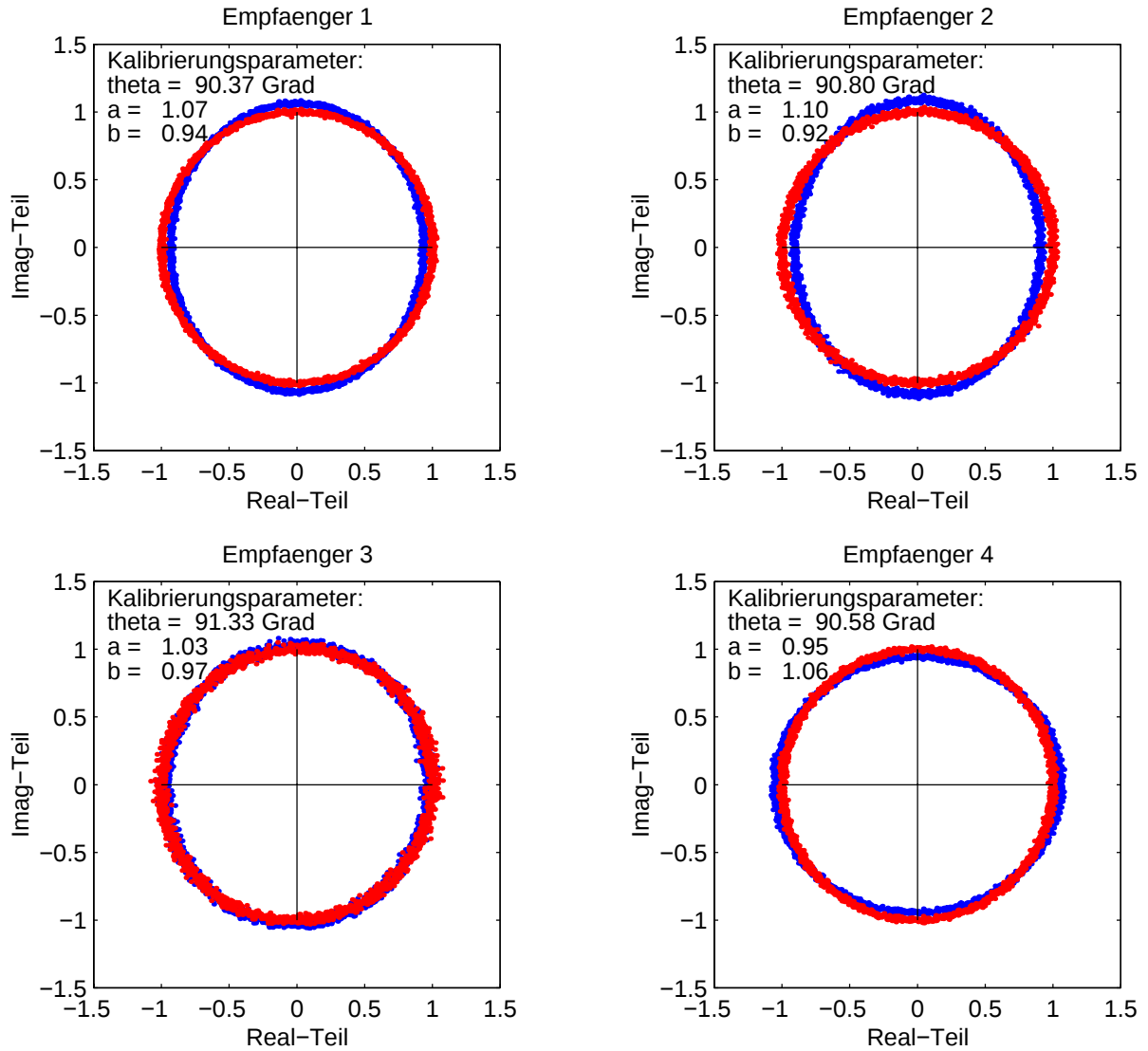


Abbildung 4.3: Kalibrierung der vier Empfänger am 18. April 1996: blau = harmonisches Empfangssignal vor der Kalibrierung, rot = harmonisches Empfangssignal nach der Kalibrierung

4.1.3 Phasenkalibrierung der Empfangskanäle

Wie in Kapitel 2 (Gleichung 2.69) dargestellt wurde, ist der Phasenwert der Kreuzkorrelationsfunktion für $\tau = 0$ neben der Radarwellenlänge λ vom Abstand der Empfangsantennen i und j und vom zonalen und meridionalen Richtungskosinus abhängig

$$\delta_{ij} = \frac{2\pi}{\lambda} \xi_{ij} \sin \phi_{ij} \sin \theta_{ij} + \eta_{ij} \cos \phi_{ij} \sin \theta_{ij}. \quad (4.17)$$

Daneben kann aber auch ein zusätzlicher Phasenoffset zum Beispiel aufgrund unterschiedlicher Eigenschaften der beiden Empfänger und Empfangskanäle und damit eine Differenzen in den Laufzeiten auftreten. Damit der mittlere Empfangswinkel korrekt bestimmt werden kann, müssen diese Phasenoffsets eliminiert werden.

Werden die mittleren Empfangswinkel ϕ_{ij} und θ_{ij} über einen längeren Zeitraum (z.B. mehrere Stunden) beobachtet, dann sollten sie bei zufälliger Streuerverteilung und nicht geneigten Streuschichten um die Mittelwerte $\phi_{ij} = 0$ und $\theta_{ij} = 0$ streuen. Der mittlere Empfangswinkel würde dann nach Gleichung 4.17 ebenfalls um den Mittelwert $\delta_{ij} = 0$ streuen. Wird nun bei der mehrstündigen Messung ein Mittelwert $\delta_{ij} \neq 0$ bestimmt, dann stellt dieser den allgemeinen Phasenoffset $\delta_{ij(offset)}$ zwischen den Empfangskanälen i und j dar.

Aufgrund zufälliger Fehler können bei den Einzelmessungen Phasenwerte bestimmt werden, die sehr weit vom Mittelwert entfernt liegen (sogenannte „Ausreißer“) und damit die Bestimmung des Mittelwertes stark beeinflussen oder verfälschen. Sie sollten daher in die Mittelwertbildung nicht mit eingebunden werden. Als Schranken könnten hier zum Beispiel die Standardabweichung oder die Quartile gewählt werden. Eine weitere Möglichkeit stellt die Bestimmung des Mittelwertes durch eine Gaußapproximation des Histogramms der Phasenwerte dar (z.B. THORSEN *et al.*, 1997). Diese Methode wurde bei der Kalibrierung der Empfangskanäle des ALOMAR SOUSY Radars angewandt.

Die Phasenoffsets zwischen den drei benutzten Empfangskanälen im SA-Mode wurden bei jeder Messung bestimmt. Dabei wurden nahezu konstante Werte ermittelt. Dies läßt auf konstante Differenzen in der Empfangshardware schließen. In Abb. 4.4 sind die Phasenoffsets für Messungen am 15. Juli 1997 dargestellt. Diese Werte können als fest angenommen werden und daher schon bei der Online-Berechnung von den Ergebnissen der Phasenwerte der entsprechenden Kreuzkorrelationen subtrahiert werden. Die mittleren Empfangswinkel lassen sich dann mit den korrigierten Werten nach Gleichung 2.69 berechnen.

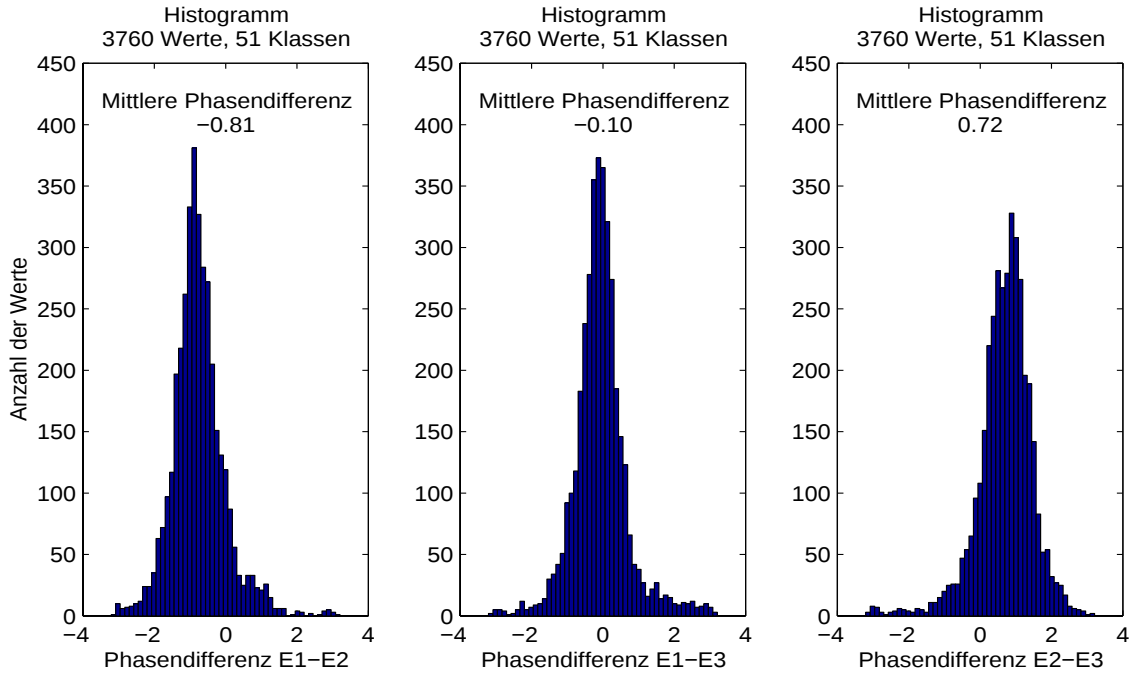


Abbildung 4.4: Bestimmung der mittleren Phasendifferenzen der Empfangskanäle

4.2 Wahl der Parameter für den Simultanbetrieb

4.2.1 Antennenfelder

Um maximale Sende- und Empfangsleistungen bei den Doppler Beam (DBS) und Spaced Antenna (SA) Messungen zu ermöglichen, wurde angestrebt, die Antennen für beide Verfahren so groß wie möglich zu wählen. Da simultane Messungen mit beiden Verfahren durchgeführt werden sollten, wurde zunächst eine günstige Anordnung der Empfangsfelder für die SA-Messungen ermittelt und dann die optimale Konfiguration der großen Sende-/Empfangsantenne für die DBS-Messungen gewählt.

Aufgrund des sogenannten „Dreiecksgrößeneffekts“ (Kapitel 4.4.2) ist bei der Nutzung von nur drei Empfangsfeldern im SA-Mode eine Anordnung als gleichseitiges Dreieck am günstigsten (z.B. BRIGGS, 1984). Auch HOLDSWORTH (1995a) zeigt anhand modellierter Daten, daß ungleichseitige Dreiecksanordnungen zu einer Überschätzung der horizontalen Winde und zu einem Bias in der Windrichtung führen können. Dieser kann z.B. für rechtwinklige Dreiecke größer als 25° sein, während er für gleichseitige Dreiecke kleiner als 4° ist. Er stellt jedoch auch fest, daß die Verwendung von gleichseitigen Dreiecken nicht den Bias im Axial-Verhältnis der Korrelationsellipse (vgl. Kapitel 2.2) reduziert und die Richtung ϕ_{ax} der charakteristischen Ellipse abhängig vom Antennenabstand ist.

Für Tropo- und Stratosphärenmessungen wurden sowohl die Empfangsfeldkombi-

nationen R1-R2-R3 (gleichseitiges Dreieck) als auch R2-R3-R4 (rechtwinkliges Dreieck) genutzt (vgl. Abb. 4.5). Die Antennenabstände lagen somit bei 35 bis 55 Metern. Diese entsprechen etwa den erwarteten charakteristischen Korrelationslängen $S_{0.5}$ in der Troposphäre und unteren Stratosphäre und stellen daher (nach HOLDSWORTH, 1995a) günstige Antennenabstände für Messungen in diesem Höhenbereich dar. Da die Empfangsfelder R2, R3 und R4 Yagi-Vierergruppen einschließen, die ursprünglich zur großen Sende/Empfangsantenne gehörten, mußten diese Vierergruppen aus dieser herausgeschaltet werden. Daher wurde zum Senden und Empfangen im DBS-Mode eine 132-Yagi-Antenne verwendet. Abb. 4.5 zeigt die Antennenordnung für Tropo- und Stratosphärenmessungen.

In der Mesosphäre liegt die charakteristische Korrelationslänge bei etwa 20 bis 40 Metern, die Seitenlängen des Empfangsdreiecks sollten daher ebenfalls in diesem Bereich liegen. Die Abstände der vorhandenen Empfangsfelder (R1 bis R8) waren dafür zu groß. Als Lösung wurde das Herausschalten einzelner Antennenvierergruppen aus der zentralen Sende- und Empfangsantenne während des Empfangs durch passive Sende-Empfangs-Umschalter und der Betrieb dieser Vierergruppen als separate Empfangsfelder gewählt. Da insgesamt vier Empfangskanäle genutzt werden konnten, wurden drei Vierergruppen für SA-Messungen herausgeschaltet und die verbleibenden 136 Yagis als Empfangsantenne für gleichzeitige DBS-Messungen eingesetzt. Da die herausgeschalteten SA-Vierergruppen nur im Empfangszeitraum zur Verfügung stehen mußten und sehr schnelle Sende-Empfangs-Umschalter zum Herausschalten genutzt wurden, konnte mit der kompletten Antenne mit 148 Yagis gesendet und somit die maximale Sendeleistung eingesetzt werden.

Aufgrund der Eigenschaften der Sende-Empfangs-Umschalter war es nicht möglich, diese an Vierergruppen mit dem höchsten Leistungsniveau in unmittelbarer Nähe des geometrischen Mittelpunktes der Sendeantenne anzubringen. Es mußten daher Gruppen ausgewählt werden, die auf der Hälfte bzw. einem Viertel des maximalen Leistungsniveaus liegen. Als Empfangsdreieck im SA-Mode wurde deshalb die Kombination der Antennen 6-21-25 gewählt (vergl. Abb. 4.6). Die Seitenlängen dieses Meßdreiecks betragen 22 bis 25 Meter, das Dreieck ist gleichschenkelig, wobei die Schenkel nur unwesentlich größer als die Basis sind. Ein exakt gleichseitiges Dreieck läßt sich aufgrund der kartesischen Rasteranordnung der Vierergruppen nicht finden. Die Abmessungen liegen in der Größenordnung der zu erwartenden charakteristischen Korrelationslänge. Dieses Dreieck stellt daher die bestmögliche Anordnung dar.

4.2.2 Signaltechnische Parameter

Die simultanen Messungen nach dem Doppler Beam Swinging und dem Spaced Antenna Verfahren mit dem ALOMAR SOUSY Radar (53.5 MHz, Spitzenleistung 150 kW)

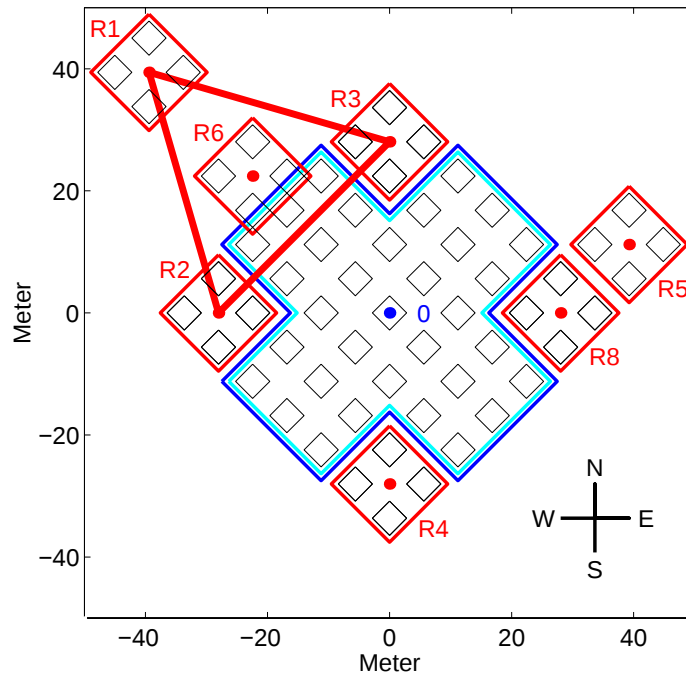


Abbildung 4.5: Empfangsfelder für DBS-Messungen (blau umrandet) und SA-Messungen (rot umrandet) in der Tropo- und Stratosphäre

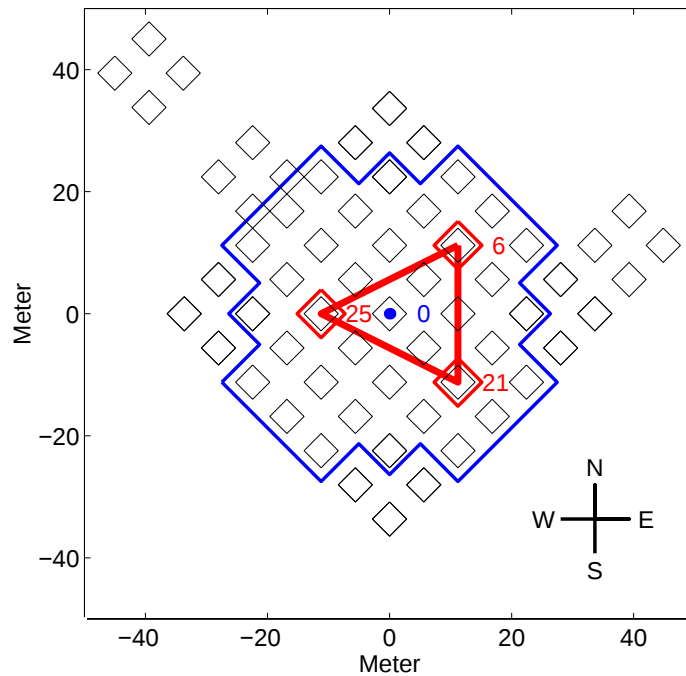


Abbildung 4.6: Empfangsfelder für DBS-Messungen (blau umrandet) und SA-Messungen (rot umrandet) in der Mesosphäre

erfolgten im gepulsten Radarbetrieb mit einer Pulslänge von $2\ \mu\text{s}$. Dies entspricht einer Entfernungsauflösung von 300 m. Es wurden komplexe Signalreihen für 135 Höhenkanäle von 5.9 km bis 46.1 km in der Tropo- und Stratosphäre und von 56.5 km bis 96.5 km in der Mesosphäre aufgenommen. Die Pulswiederholzeit lag bei $800\ \mu\text{s}$. Um den maximalen Duty Cycle von 4% auszunutzen, wurde ein 16-Bit-Komplementärkode verwendet (KUGEL *et al.*, 1978; SCHMIDT *et al.*, 1979). Zur Unterdrückung eines durch die Empfänger bedingten Offsets (Gleichspannungsanteils) wurde der Kode (CoCoI+ und CoCoII+) und der inverse Kode (CoCoI- und CoCoII-) ausgesendet. Zur Komprimierung des Datenflusses wurden pro Höhenkanal jeweils 31 kohärente Integrationen durchgeführt. Dies entspricht einer digitalen Filterung der Rohdaten und damit gleichzeitig einer Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses. Die Abtastzeit betrug 0.1065 s. Für Messungen in der Tropo- und Stratosphäre wurden 64 und für Messungen in der Mesosphäre 128 Datenpunkte zu einer Signalreihe zusammengefaßt. Dies ergibt entsprechende Dopplergeschwindigkeitsauflösungen von 0.42 bzw. 0.21 m/s und Zeitsignallängen von 6.8 bzw. 13.6 s (vgl. Abb. 4.7).

4.2.3 Bearbeitungsablauf

Der verwendete zeitliche Bearbeitungsablauf für simultane DBS- und SA-Messungen in der Mesosphäre ist in Abb.4.8 dargestellt. Die Hauptkeule der Sendeantenne wurde zunächst nacheinander mit einem Zenitwinkel von acht Grad in die vier Himmelsrichtungen Nord, Süd, Ost und West geschwenkt. Empfangen wurde gleichzeitig mit der großen Sende-/Empfangsantenne und drei kleinen Empfangsgruppen (vgl. Abb. 4.6). Dabei wurden jeweils 128 Meßwerte aufgenommen. Daraufhin wurden die Sendeantennen vertikal ausgerichtet und es wurden vier Meßreihen mit jeweils 128 Meßwerten mit dem großen Empfangsfeld und den drei kleinen Empfangsgruppen aufgenommen. Anschließend begann der Zyklus von vorn.

Für die Auswertung nach der DBS-Methode wurden die Meßwerte der großen Empfangsantenne aus den vier Himmelsrichtungen und der ersten Ausrichtung in die Vertikale verwendet. Die Meßwerte der kleinen Antennen aus den vier Himmelsrichtungen wurden verworfen. Da die Zeit für die Aufnahme von 128 Meßwerten einer Schwenkrichtung rund 13.6 Sekunden beträgt, ergibt sich unter Beachtung der Zeitverzögerungen aufgrund des Umschaltens der Schwenkrichtungen eine Gesamtzeit von etwa 75 Sekunden.

Für die Auswertung nach der SA-Methode wurden die Werte der Meßreihen der kleinen Antennen bei vertikaler Ausrichtung der Sende-/Empfangsantenne genutzt. Da kein Schwenkbetrieb auftritt und nur in vertikaler Richtung gemessen wird, kann eine entsprechend höhere zeitliche Auflösung erreicht werden. Um das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern und zufällige Fehler in der AKF aufgrund der zeitlichen

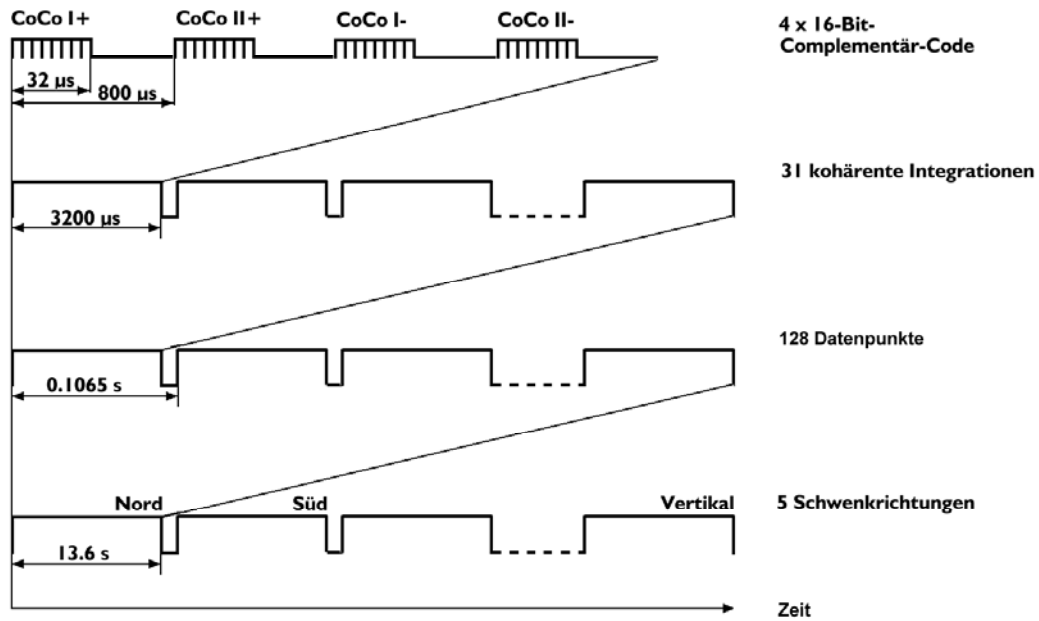


Abbildung 4.7: Pulsschema des ALOMAR SOUSY Radars für simultane DBS- und SA-Messungen

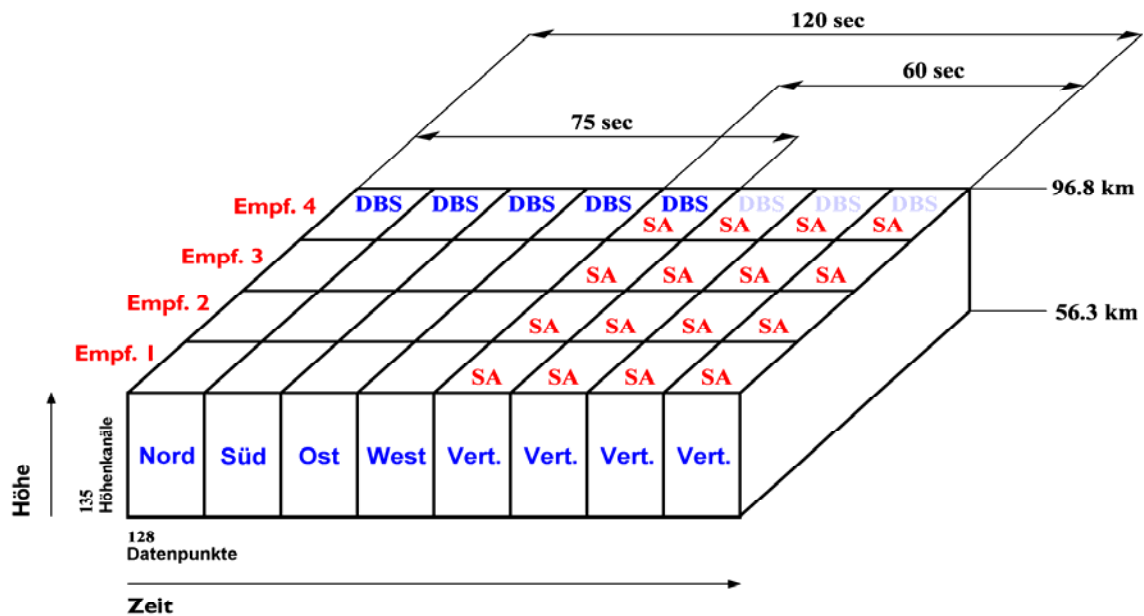


Abbildung 4.8: Bearbeitungsablauf der kombinierten DBS- und SA-Messungen

Begrenzung der Datenreihe zu verringern, wurden jedoch vier aufeinanderfolgenden Zeitreihen mit je 128 Abtastwerten zusammengefaßt, so daß die Zeitreihenlänge für die Signalanalyse 512 Werte umfaßt. Dies war möglich, da die Daten von den drei Empfängern gleichzeitig aufgenommen wurden und die Zeiten zwischen den aufeinanderfolgenden Zeitreihen mit 0.2 bis 0.3 s in der gleichen Größenordnung lagen wie die Zeitdifferenzen zwischen zwei Datenpunkten einer Zeitreihe.

Insgesamt ergibt sich damit eine Zeitdauer von etwa 60 Sekunden für die SA-Messungen. Theoretisch könnten auch die vier Meßreihen bei vertikaler Schwenkrichtung für die DBS-Messungen ausgenutzt werden. Im Standardbetrieb wurde jedoch darauf verzichtet, so daß sich eine Zeitdauer von etwa 75 Sekunden für DBS-Messungen ergibt. Die totale zeitliche Auflösung im Simultanbetrieb beträgt etwa 120 Sekunden. Damit wurde gewährleistet, daß die Datenaufnahme in zeitlich kompakter Form erfolgen konnte. Dies ist wichtig, um Fehler aufgrund von Windänderungen während der Messungen zu minimieren.

4.3 Signalanalyse -und synthese

4.3.1 Korrektur der Zeitreihen

Die Zusammenstellung der Einzelmeßwerte zu einer Zeitreihe wurde in den Abschnitten 4.2.2 und 4.2.3 beschrieben. Abb. 4.9 zeigt eine typische Zeitreihe während eines PMSE-Ereignisses. Es ist ersichtlich, daß sowohl im Realteil als auch im Imaginärteil des Signals eines Empfängers unabhängig voneinander und in unregelmäßigen Abständen Impulsspitzen („Spikes“) auftreten, die vermutlich anlagenbedingt sind. Diese können in den Spektren und Korrelationsfunktionen nicht explizit erkannt werden, beeinflussen aber andererseits die Breite der näherungsweise gaußförmigen Korrelationsfunktionen und die somit die Ermittlung der Zeitkonstanten τ' und τ^* (vgl. Kapitel 2.2). Eine Korrektur erfolgte daher in den Signalzeitreihen vor einer weiteren Datenverarbeitung.

Da die Impulsspitzen im Realteil und Imaginärteil unabhängig voneinander auftreten, erfolgt auch ihre Korrektur für beide Teile getrennt. Als erstes wird jeder Datenpunkt überprüft, ob er als Impulsspitze zu betrachten ist. Als Impulsspitze werden die Datenpunkte definiert, die entweder sehr viel größer oder sehr viel kleiner als ihre Vorgänger und Nachfolger sind. Es wird daher zunächst die Verteilung der Differenzen der Amplitudenwerte bestimmt. Um bei der Analyse den Einfluß der Impulsspitzen selbst auf die Statistik zu verringern, wird nur von den 90 Prozent der Werte, die der mittleren Differenz am nächsten liegen, die Standardabweichung berechnet. Liegen Differenzen außerhalb der doppelten Standardabweichung, wird der entsprechende Signalwert durch den arithmetischen Mittelwert seines Vorgängers und Nachfolgers ersetzt. In einer ersten Näherung entspricht der so ermittelte Wert dem fehlerfreien

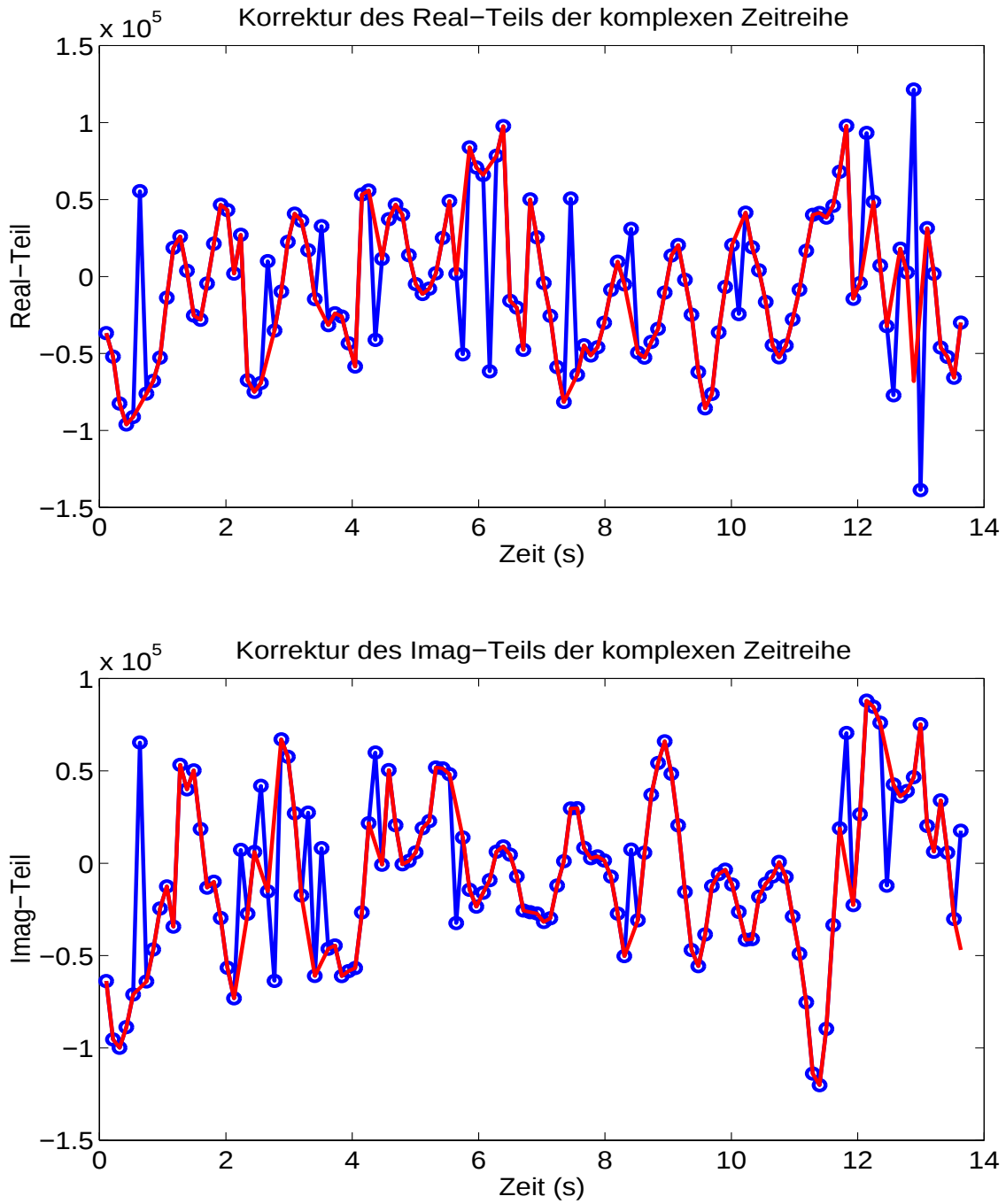


Abbildung 4.9: Typische mit dem ALOMAR SOUSY Radar aufgenommene Signalzeitreihen während eines PMSE-Ereignisses, blau: originale Zeitreihe mit „Spikes“, rot: korrigierte Zeitreihe

Wert. Wie Abb. 4.9 zeigt, können damit einzelne Spitzen sehr gut eliminiert werden. Treten jedoch mehrere Impulsspitzen hintereinander auf, wird die Korrektur durch den ebenfalls fehlerhaften Vorgänger bzw. Nachfolger beeinflusst.

4.3.2 Korrektur der Spektren

Zur Ermittlung der Korrelationsfunktionen wurden die Zeitreihen zunächst fouriertransformiert, im Spektralbereich multipliziert und anschließend rücktransformiert. Nach dem Wiener-Chintchin-Theorem sind die so ermittelten Korrelationsfunktionen mit den durch Multiplikation/Integration direkt bestimmten Korrelationsfunktionen identisch. Ein Vorteil besteht aber darin, daß im Spektralbereich Korrekturen vorgenommen werden und die Signale in einfacher Weise digital gefiltert werden können sowie ihr Mittelwert direkt ablesbar ist.

Der Mittelwert der Signale entspricht dem Amplitudenwert der Frequenz $f = 0$ Hz. Da durch Gleichspannungsanteile dieser Wert von Null verschieden sein kann und große Werte die Ergebnisse der weiteren Analyse beeinflussen, sollte dieser Wert korrigiert werden. In der Praxis wurde er nicht auf Null gesetzt, sondern durch den Mittelwert des Vorgängers und des Nachfolgers ersetzt (Abb. 4.10).

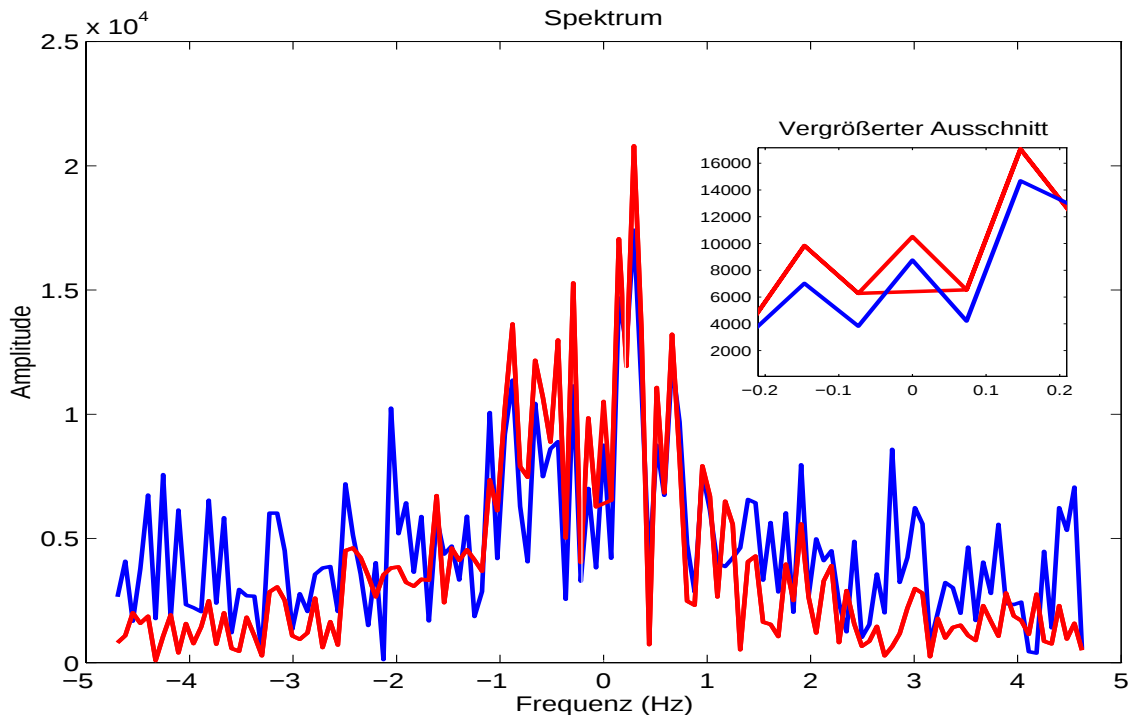


Abbildung 4.10: Typisches Amplitudenspektrum ohne Spike-Korrektur (blau) und mit Spike-Korrektur (rot); zusätzlich wird der Mittelwert der Reihe korrigiert (vergrößerter Ausschnitt)

Dies entspricht eher einem kontinuierlichen Spektralverlauf des Signals. Da zum Senden und Empfangen neben dem originalen Komplementärkode auch sein inverser Kode benutzt wurde, konnten Gleichspannungsanteile weitgehend ausgeschlossen werden. Die Korrekturwerte der Spektren waren daher nur gering, wie in dem vergrößerten Ausschnitt des Beispiels in Abb. 4.10 erkennbar ist.

4.3.3 Approximation der Korrelationsfunktionen

Im Idealfall entspricht die Autokorrelationsfunktion des Signals $\rho(\tau)$ einer gaußförmigen Kurve und der Betrag der AKF für die Zeitdifferenz $\tau = 0$ stellt die Summe der Leistungen von Signal und Rauschen dar (vgl. Abb. 2.1). Da das zu untersuchende Signal in der Praxis eine endliche Länge hat, ist die AKF jedoch von zufälligen Fehlern aufgrund der zeitlichen Begrenzung überlagert. Wird nun davon ausgegangen, daß diese zufälligen Fehler für große Korrelationswerte im Mittel Null sind, kann durch eine Gaußapproximation unter Ausschluß von $\rho(\tau = 0)$ die nicht fehlerbehaftete AKF des Signals gefunden werden. Unter der Annahme einer stetigen Funktion entspricht der Wert $\rho(\tau = 0)$ der approximierten AKF dann der Signalleistung P_S und die Differenz zwischen dem gemessenen und dem approximierten Wert stellt die Rauschleistung P_R dar. So läßt sich sowohl das Signal-Rausch-Verhältnis (SRV) mit

$$SRV[dB] = 10 \log_{10} \left(\frac{P_S}{P_R} \right) \quad (4.18)$$

als auch der Normierungsfaktor für die Korrelationsfunktionen (P_S) bestimmen. Da die absoluten Beträge der AKF betrachtet werden, mitteln sich die zufälligen Fehler für kleine Korrelationswerte nicht heraus. Sie sollten daher nicht in die Gaußapproximation einbezogen werden. Das Ergebnis der Signalleistungsbestimmung hängt also stark davon ab, wie schnell die Autokorrelationsfunktion abfällt und wieviele Werte in die Gaußapproximation einbezogen werden können.

Für Signale mesosphärischer Messungen mit dem ALOMAR SOUSY Radar betrug der mittlere Abfall der Korrelationsfunktionen auf ein Fünftel des Maximalwertes etwa 0.3 s. Wenn man davon ausgeht, daß sich die zufälligen Fehler für Korrelationswerte, die kleiner als ein Fünftel des Maximalwertes sind, nicht mehr zu Null ergänzen, kann die Bestimmung des Maximums der AKF (bei einer Zeitdifferenz von 0.1065 Sekunden zwischen zwei Datenpunkten) höchstens anhand der Werte $\rho(\tau = 0.1065 \text{ s})$, $\rho(\tau = 0.213 \text{ s})$ und $\rho(\tau = 0.3195 \text{ s})$ erfolgen (vgl. Abb. 4.11). Um fehlerhafte Endergebnisse aufgrund mangelhafter Gaußnäherungen zu vermeiden, wurden die Berechnungen abgebrochen, wenn die Beträge der AKF, die in die Approximation eingebunden werden sollten, keine monoton fallende Folge bildeten, oder wenn einer dieser Beträge größer war als die approximierte Signalleistung P_S .

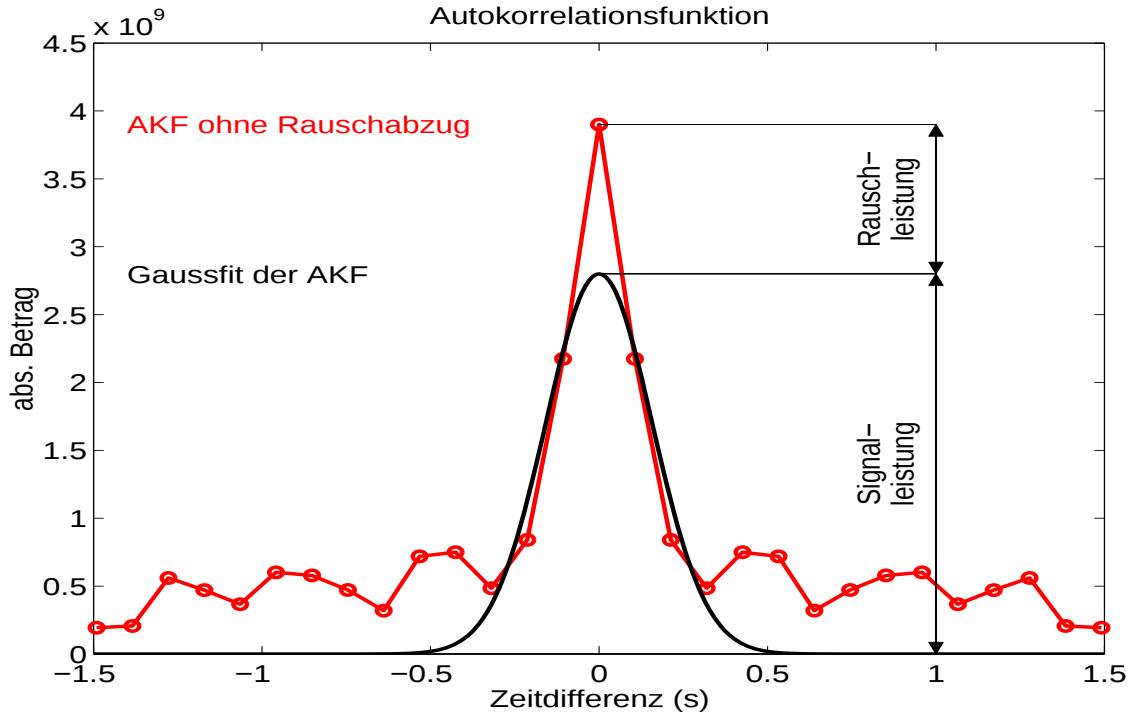


Abbildung 4.11: Interpolation der Autokorrelationsfunktion zur Ermittlung des Signal-Rausch-Verhältnisses und des Normierungsfaktors

4.4 Fehlerbetrachtungen

4.4.1 Bestimmung der Signalleistung aus der AKF

In Abschnitt 4.3.3 wurde bereits beschrieben, daß der Signalanteil in den Autokorrelationsfunktionen durch eine Gaußapproximation ermittelt werden kann. Anhand dieser Ergebnisse erfolgt die Normierung der Auto- und Kreuzkorrelationsfunktionen, daran anschließend die Bestimmung der maximalen Werte der Kreuzkorrelationsfunktionen und schließlich die Berechnung der „wahren“ Windwerte (vgl. Kapitel 2.2). Die genaue Bestimmung der Normierungsfaktoren ist daher von großer Bedeutung für eine korrekte Windberechnung.

Die Gaußapproximation kann um so exakter erfolgen, je mehr Werte für die Näherungsrechnung zur Verfügung stehen und je geringer ihre Abweichungen von einer Gaußkurve sind. Für Messungen in der Mesosphäre wurde jedoch festgestellt, daß bei einer Zeitdifferenz von 0.1065 Sekunden maximal drei Werte in die Approximation einbezogen werden können (vgl. Abschnitt 4.3.3). Die Interpolation der Signalleistung P_S und damit des Normierungsfaktors für die Korrelationsfunktionen kann daher fehlerbehaftet sein.

4.4.2 Dreiecksgrößeneffekt der vollen Korrelationsanalyse

Eine der Hauptursachen für Offsets bei der Anwendung der vollen Korrelationsanalyse (FCA) ist der sogenannte „Dreiecksgrößeneffekt“ (engl.: triangle size effect - TSE). Untersuchungen mit unterschiedlichen Abständen zwischen den Empfangsantennen haben ergeben, daß die berechneten Werte für die „wahre“ Windgeschwindigkeit, die charakteristische Korrelationszeit $T_{0.5}$ und die charakteristische Korrelationslänge $S_{0.5}$ mit sinkendem Antennenabstand kleiner werden. Ebenso ändern sich die Richtung des „wahren“ Windes ϕ_h und die Orientierung der charakteristischen Ellipse ϕ_{ax} systematisch. Obwohl diese Beobachtung bei unterschiedlichsten Antennenanordnungen gemacht wurde, wird sie etwas irreführend als „Dreiecksgrößeneffekt“ bezeichnet. Da sich dieser Begriff jedoch in der Literatur durchgesetzt hat, wird er auch in dieser Arbeit benutzt.

Der Dreiecksgrößeneffekt wurde von vielen Autoren beschrieben und von GOLLEY und ROSSITER (1970) mit den 89 Antennen eines MF-Radarfeldes untersucht, indem ähnliche rechtwinklige Dreiecke mit unterschiedlichen Seitenlängen aus den Empfangsantennen gebildet wurden. Sie fanden heraus, daß sich die „wahre“ Geschwindigkeit V_h und die charakteristische Korrelationslänge $S_{0.5}$ mit steigendem Antennenabstand einer oberen Schranke annähern. Die maximalen Werte für V_h wurden für Antennenabstände in der Größe des oberen Limits von $S_{0.5}$ erreicht. Für kleine Antennenabstände waren die charakteristischen Ellipsen in Richtung der Hypothense ausgerichtet. Diese Ausrichtung wurde auch von BEYNON und WRIGHT (1969) beobachtet, ebenso eine Vorzugsrichtung von ϕ_h rechthöckig zur Hypothense. In der Amplitude und Phase der „scheinbaren“ Geschwindigkeit zeigten sich dagegen keine Offsets.

Die „Dreiecksgrößeneffekte“ von GOLLEY und ROSSITER (1970) wurden dem Fakt zugeschrieben, daß der Wert der räumliche Korrelationsfunktion für $\tau = 0$ nicht extrapoliert wurde. Dieses Ergebnis ist zurückzuführen auf Empfängerrauschen und Differenzen in den Eigenschaften der Empfangs- und Digitalisierkanäle, welche die Korrelationsfunktionen der ursprünglichen Empfangssignale überlagern.

Der Effekt des Empfängerrauschens wurde von MEEK (1990) durch Nutzung einer eindimensionalen Formulierung für die Auto- und Kreuzkorrelationsfunktionen untersucht. Die resultierenden Gleichungen zeigten, daß der Fehler zur Korrektur des Rauschens Schätzungen von V_h und $S_{0.5}$ hervorruft, die mit den Antennenabständen in gleicher Weise variieren, wie es von GOLLEY und ROSSITER (1970) beschrieben wurde. Dies führte MEEK (1990) zu der Schlußfolgerung, daß das Rauschen die Hauptursache für den „Dreieckseffekt“ ist. Eine Anwendung der Rauschkorrektur würde den TSE ausschließen. Weiterhin zeigte sich, daß die Rauschfehlerkorrektur die gleichen Resultate produziert, wie sie von BEYNON und WRIGHT (1969) beschrieben wurden, wobei die Ausrichtung der großen Achse der charakteristischen Ellipse bevorzugt parallel zur

längsten Seite des Empfangsdreiecks erfolgte. Obwohl die eindimensionale Theorie von MEEK (1990) keine Untersuchung des Bias auf ϕ_h ermöglicht, wurde geschlußfolgert, daß ϕ_{ax} aufgrund der Fehler der Rauschkorrektur eine orthogonale Richtung zu ϕ_h bevorzugt. Diese Ergebnisse sind auf Effekte aufgrund von Differenzen in den Empfängercharakteristika übertragbar.

Der TSE wird ebenfalls durch Effekte der Antennenverkopplungen hervorgerufen. Dies sollte jedoch auch zu einer Verringerung der „scheinbaren“ Geschwindigkeit V_a führen, was von GOLLEY und ROSSITER (1970) nicht beobachtet wurde. Somit wäre dieser Effekt vernachlässigbar. Die Ergebnisse von VAN BAELEN *et al.* (1989) zeigen jedoch, daß V_a mit steigendem Antennenabstand kleiner wird, obwohl die Antennenverkopplungen nicht in den Analysen simuliert wurden.

Eine umfassende Untersuchung des TSE liefert HOLDSWORTH (1995a). Anhand modellgenerierter Daten ist es ihm möglich, Berechnungen unter gleichen Bedingungen für unterschiedlichste Antennenabstände durchzuführen und so verschiedene Einflüsse auf die Ergebnisse der FCA zu verfolgen. Seine Untersuchungen haben gezeigt, daß der TSE vor allem durch Empfängerrauschen, Unterschiede in der Charakteristik der Empfangskanäle, geringe Anzahlen von Digitalisierungsschritte und Empfängersättigung verursacht wird. Hinzu kommen technische Einflüsse aufgrund von Verkopplungen der Einzelantennen eines Empfangsfeldes, der Empfangsfelder untereinander, der unterschiedlichen Ausrichtung der Einzelantennen und Differenzen in den Empfangskanälen.

Zusammengefaßt ist der Dreiecksgrößeneffekt in erster Linie auf die nicht exakte Trennung von Signal- und Rauschanteil in der AKF und damit der ungenauen Normierung der AKF zurückzuführen. Damit ergibt sich ein unkorrektes Verhältnis zwischen den Maxima der AKF und KKF. Da dieses Verhältnis für die Bestimmung des „wahren“ Windes der FCA wesentlich ist, können kleine Fehler im Verhältnis große Abweichungen der Windwerte bewirken (HOLDSWORTH, 1995a). Wie groß diese Abweichungen sind, hängt auch von den Antennenabständen ab, die mit in die Berechnung eingehen (vgl. 2.2). Da die „similar fade“ Methode und die einfache Korrelationsanalyse auf die Anwendung des Korrelationsmaximaverhältnis verzichten, hat der Dreiecksgrößeneffekt auf diese Verfahren keinen Einfluß. Andererseits lassen sich durch beide Verfahren nur die sogenannten „scheinbaren“ Winde berechnen, da zufällige zeitliche und räumliche Variationen nicht berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 2.2).

Für das ALOMAR SOUSY Radar ließ sich der Dreiecksgrößeneffekt nicht überprüfen, da nur eine feste SA-Empfangsantennenanordnung existierte. Aufgrund der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Unsicherheiten bei der korrekten Trennung der Signalleistung P_S und der Rauschleistung P_R ist jedoch davon auszugehen, daß sich eventuell auftretende Fehler auch hier bei unterschiedlichen Dreiecksgrößen unter-

schiedlich stark auswirken würden. Durch die Wahl eines nahezu gleichseitigen Dreiecks (vgl. Abb. 4.6) sollten die Abweichungen nach den Modellanalysen von HOLDSWORTH (1995a) jedoch am geringsten sein.

4.4.3 Auswahlkriterien der vollständigen Korrelationsanalyse

Zunächst ließe sich aus jeder aufgenommenen Zeitreihe eine Windberechnung nach den dargestellten Algorithmen vornehmen. Einige ermittelte Werte müssen jedoch aussortiert werden, da bestimmte Zwischenergebnisse unrealistisch sind oder nicht den Modellvoraussetzungen entsprechen. Es wurden daher Kriterien formuliert (z.B. BRIGGS (1984), HOLDSWORTH (1995a), anhand derer eine Auswahl der glaubhaften Ergebnisse getroffen wird. Diese Kriterien werden im folgenden dargestellt.

1. Das Signal-Rausch-Verhältnis ist zu klein, die Bestimmung des Signalanteils aus der Autokorrelationsfunktion ist zu unsicher. Der Einfluß des Rauschens auf die weitere Signalverarbeitung ist zu groß und würde keine korrekte Windbestimmung ermöglichen. Als Grenzwert wurde ein Signal-Rausch-Verhältnis von -6 dB festgelegt.
2. Die geschätzte mittlere Halbwertsbreite der mittleren Autokorrelationsfunktion ist zu groß. Dies bedeutet, daß die Korrelationsfunktionen nur langsam abklingen, die einzelnen Empfangssignale einander zu ähnlich sind, ohne daß eine Zeitverschiebung zu bestimmen ist. Dies ist ein Hinweis auf Spiegelreflexion. Für die FCA werden aber Volumenstreuer vorausgesetzt. Spiegelstreuer produzieren generell Zeitreihen mit einer geringen Anzahl dominanter Frequenzkomponenten, daraus resultieren oszillierende Zeitreihen und Korrelationsfunktionen. Dadurch ist $\tau_{0.5}$ durch die Perioden der dominanten Frequenzen und nicht durch die mittlere Lebenszeit von Volumenstreuern beeinflusst. Somit werden durch dieses Kriterium auch oszillierende Korrelationsfunktionen ausgeschlossen. Als Grenzwert wurde $\tau_{0.5} = 1$ s festgelegt.
3. Mindestens eine der berechneten Kreuzkorrelationsmaximazeiten τ'_{ij} liegt außerhalb einer vorgegebenen Zeitdifferenz. Für Messungen in der Mesosphäre wurde hierfür 0.5 s und für Messungen in der Troposphäre und unteren Stratosphäre 2 s festgelegt.
4. Die Summe der Zeitdifferenzen τ'_{ij} sollte für die Empfangsantennenpaare der Seiten geschlossener Meßvielecke im Idealfall Null betragen. Da die ermittelten Korrelationsfunktionen nicht exakt dem Modell der theoretischen Raum-Zeit-Korrelationsfunktion entsprechen, wurde für dieses Kriterium von MEEK (1980)

praxisnäher eine „normalisierte Zeitdiskrepanz“ (NTD) definiert. Nur wenn

$$NTD = \frac{|\sum \tau'_{ij}|}{\sum |\tau'_{ij}|} > 0.3 \quad (4.19)$$

gilt, werden die Ergebnisse ausgeschlossen.

Es muß darauf hingewiesen werden, daß dieses Kriterium nicht für Meßanordnungen angewandt werden kann, bei denen sich die Koordinatendifferenzen aller Empfangsantennenpaare nicht zu Null ergänzen. Allgemeiner wäre daher ein Kriterium, in welchem die geometrischen Antennenabstände beachtet werden. Damit ließen sich z.B. zusätzlich zu den Seiten auch die Diagonalen einer viereckigen Meßanordnung in eine Beurteilung einbinden.

Eine weitere Alternative zum NTD besteht in seiner strengeren Auslegung und Anpassung an das Korrelationsmodell. So kann $NTD = 0$ als notwendige Bedingung für die Ermittlung der Korrelationsmodellparameter definiert werden und bei der Bestimmung der KKF-Maxima berücksichtigt werden. Dadurch wird die Annahme einer geraden Wellenfront erzwungen. Diese Methode wurde bei den FCA-Berechnungen mit dem ALOMAR SOUSY Radar angewandt.

5. Die berechneten Koeffizienten der Raum-Zeit-Korrelationsfunktion entsprechen hyperbolischen und nicht elliptischen Konturen, das heißt $H^2 < AB$ (vgl. Kapitel 2.2).
6. Es ist keine Interpolation zur Ermittlung des Maximums der AKF oder der KKF möglich: Die Maxima werden durch eine Gaußapproximation bestimmt. Die Berechnungen wurden abgebrochen, wenn der Maximalwert der diskreten Korrelationsfunktionen und zwei seiner Nachbarwerte keine monoton fallende Folge bildeten, wenn weniger als drei Werte für die Approximation zur Verfügung standen, wenn das Maximum der approximierten AKF kleiner war als der maximale Betrag der Werte, die in die Approximation eingebunden wurden, oder wenn das Maximum der KKF über dem der AKF ermittelt wurde.
7. Die Korrektur der Windwerte durch die volle Korrelationsanalyse ist zu groß, das heißt, die berechneten „scheinbaren“ und „wahren“ Windwerte sind zu unterschiedlich. Die Ergebnisse wurden ausgeschlossen, wenn mindestens eine der folgenden Ungleichungen zutraf:

$$V_a \geq 3V \quad (4.20)$$

$$V_a \leq 0.5V \quad (4.21)$$

$$(\phi_a - \phi) \geq 45^\circ \quad (4.22)$$

4.5 Messung eines zeitlich konstanten Windfeldes mit dem DBS- und dem SA-Verfahren in der Tropo- und unteren Stratosphäre

In Kapitel 2 wurden die zwei grundlegenden Radarmeßverfahren beschrieben. Für eine Aussage zur Qualität der Verfahren können vergleichende Messungen mit beiden Verfahren bei nahezu konstanten Umgebungsbedingungen dienen. Untersuchungen dazu mit dem japanischen MU-Radar ($34.8^{\circ}\text{N}, 136.1^{\circ}\text{E}$) in der Tropo-/Stratosphäre wurden zum Beispiel von PALMER *et al.* (1998) beschrieben. Im Frühjahr 1997 wurden auch mit dem ALOMAR SOUSY Radar in Andenes mehrmals Messungen nach dem „Doppler Beam Swinging“ (DBS) und dem „Spaced Antenna“ (SA) Verfahren durchgeführt und Windgeschwindigkeiten entsprechend nach der Doppler-Analyse bzw. der vollständigen Korrelationsanalyse ermittelt. Da hierbei erstmals die prinzipielle Möglichkeit der Windmessung mit dem ALOMAR SOUSY Radar im SA-Mode getestet werden und ein erster Vergleich der beiden Verfahren stattfinden sollte, wurden die Messungen nur dann durchgeführt, wenn in den DBS-Routinemessungen ein nahezu konstantes Windfeld registriert wurde. Insgesamt handelt es sich um drei Einzelereignisse. Eine allgemeine Statistik der Windvergleiche wird daher an dieser Stelle nicht angegeben.

Als Beispiel werden hier die Ergebnisse für den 8. April 1997 präsentiert. Um einen möglichst guten Vergleich zwischen beiden Verfahren zu ermöglichen, wurden die Messungen nacheinander von 7:20 bis 8:20 UTC nach dem DBS-Verfahren, von 9:20 bis 10:00 UTC nach dem FCA-Verfahren und von 10:00 bis 11:00 UTC wiederum nach dem DBS-Verfahren durchgeführt. Während der Meßzeit war das Windfeld ungestört.

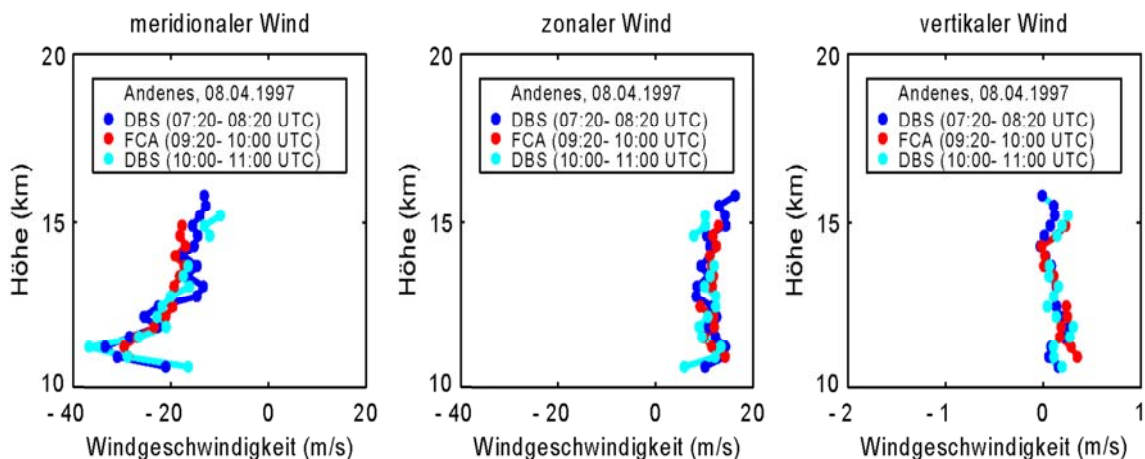


Abbildung 4.12: Höhenprofile des meridionalen, zonalen und vertikalen Windes für eine Messung in der Tropo- und Stratosphäre am 8. April 1997

In Abb. 4.12 sind die mit dem Komplementär-Code abgeleiteten und über den entsprechenden Meßzeitraum gemittelten Windwerte in der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre als Höhenprofile dargestellt. Die Ergebnisse für die meridionalen, zonalen und vertikalen Winde befinden sich in guter Übereinstimmung. Beide Verfahren zeigen, daß der stärkste meridionale Wind mit etwa 30 bis 40 m/s in 11.6 km auftritt und dann mit zunehmender Höhe auf Werte um 13-18 m/s abfällt. Der zonale Wind wird von beiden Verfahren für den gesamten Höhenbereich bei etwa 12 m/s ermittelt. Der vertikale Wind wird von beiden Verfahren mit -0.1 bis +0.3 m/s bestimmt. Oberhalb von 15 km lassen sich Windwerte nur mit dem DBS-Verfahren aufgrund der leistungsstärkeren Empfangsantenne ermitteln.

Die Experimente zeigen, daß SA-Verfahren trotz deutlich geringerer Leistung der Empfangsantennen über einen großen Höhenbereich qualitativ und quantitativ gleichwertige Meßergebnisse liefern. Ihre Anwendbarkeit soll daher im folgenden Kapitel auch für mesosphärische Messungen untersucht werden.

5 Ergebnisse simultaner PMSE-Untersuchungen mit DBS- und SA-Messungen

Die Temperaturen in der polaren sommerlichen Mesopausenregion stellen die niedrigsten der Erde dar. Sie stehen im Zusammenhang mit einigen interessanten Erscheinungen in der Atmosphäre. So können in nördlichen Breiten sogenannte „leuchtende Nachtwolken“ (NLC) visuell beobachtet und mit boden-, raketen- und satellitengestützt Geräten untersucht werden. Einen Überblick geben zum Beispiel GADSDEN und SCHRÖDER (1989) und THOMAS (1991).

Auch Radarsignale im VHF-Bereich können im Sommer von dieser Region besonders stark zurückgestreut werden. Diese Echos treten nur in den Sommermonaten in etwa 80 bis 90 km Höhe auf, sind stark aspektempfindlich und zeitlich relativ kontinuierlich. Sie wurden erstmals von ECKLUND und BALSLEY (1981) beschrieben. Da sie sich so deutlich von anderen Empfangssignalen im VHF-Bereich unterscheiden, wurden sie später „polare mesosphärische Sommerechos“ (PMSE) genannt. Einen aktuellen Überblick geben CHO und RÖTTGER (1997). Beide Phänomene, NLC und PMSE, stehen in einem engen Zusammenhang (z. B. LÜBKEN, 1995; NUSSBAUMER *et al.*, 1996).

Mit dem ALOMAR SOUSY Radar konnten weltweit erstmalig simultan Messungen nach dem DBS- und dem SA-Verfahren während des Auftretens polarer mesosphärischer Sommerechos durchgeführt werden. Der Vorteil des SA-Verfahrens liegt darin, daß mit mehreren räumlich getrennten Antennen im selben Meßvolumen gemessen wird und somit Fehler aufgrund kleinskaliger räumlicher Variationen atmosphärischer Parameter ausgeschlossen werden können. Im Gegensatz dazu werden beim DBS-Verfahren Messungen zeitlich nacheinander mit geschwenkten Radarstrahlen in verschiedenen Meßvolumen durchgeführt. Dadurch kommt es zu einer Mittelung der Werte, Feinstrukturen können nicht so gut wiedergegeben werden. Außerdem reduziert sich durch das Schwenken der Antennenkeule bei konstanter Entfernungsauflösung die effektive Höhenauflösung der DBS-Windmessungen.

In Abb. 5.1 (links) sind als Beispiel die Werte für mesosphärische Messungen mit dem ALOMAR SOUSY Radar in 85 km Höhe angegeben. Die Radarstrahlen werden um 8° geschwenkt. Dadurch liegt der Mittelpunkt des Meßvolumens in Schwenkrichtung 11.8 km horizontal und 0.9 km vertikal von Mittelpunkt des Meßvolumens in vertikaler Richtung entfernt. Außerdem überdecken die geschwenkten Radarstrahlen bei 300 m Entfernungsauflösung einen Höhenbereich von 1.3 km. Im SA-Verfahren werden dagegen nur vertikal ausgerichtete Antennen verwendet (Abb. 5.1 rechts), die Höhenauflösung entspricht damit annähernd der Entfernungsauflösung von 300 m und Schichtungen können besser wiedergegeben werden. Da mit mehreren Empfangsantennen gleichzeitig gemessen wird, kann außerdem die zeitliche Auflösung vergrößert werden.

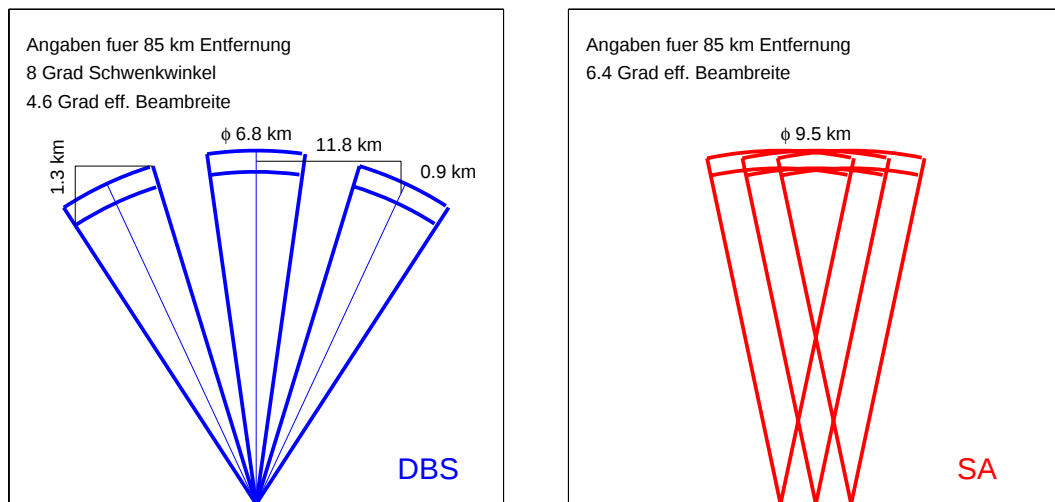


Abbildung 5.1: Unterschiedliche räumliche Auflösung des DBS- und SA-Verfahrens am Beispiel einer Messung in 85 km Höhe mit dem ALOMAR SOUSY Radar

Im Sommer 1997 wurden mit dem ALOMAR SOUSY Radar im Routinebetrieb PMSE-Untersuchungen im DBS-Mode durchgeführt. Wenn PMSE-Schichten über einen längeren Zeitraum beobachtet werden konnten, wurde auf den Betrieb mit gleichzeitigen DBS- und SA-Messungen umgeschaltet. Insgesamt konnten so im Juli 1997 etwa 60 Stunden simultan polare mesosphärische Sommerechos beobachtet werden.

Bei drei Ereignissen innerhalb dieses Zeitraums wurden Strukturen mit besonders starken vertikalen Bewegungen registriert, insbesondere am 15. Juli 1997 von 11:28 bis 14:10 UTC. Da an diesem Tag in der Nähe des Radarstandortes auch ein Folienvolkenexperiment durchgeführt wurde (siehe Kapitel 5.4) und damit unabhängige Vergleichsmessungen vorliegen, konzentriert sich der Autor im folgenden auf die von ihm durchgeführten Auswertungen für dieses Ereignis.

5.1 Signal-Rausch-Verhältnis

Die Bestimmung der Anteile von Signal- und Rauschleistung im Empfangssignal anhand der Autokorrelationsfunktion wurde im Abschnitt 4.3.3 beschrieben. Das Signal-Rausch-Verhältnis ist als

$$SRV[dB] = 10 \log_{10} \left(\frac{\text{Signalleistung}}{\text{Rauschleistung}} \right) \quad (5.1)$$

definiert. Dieses Verhältnis wurde sowohl für DBS- als auch für SA-Messungen bei vertikal ausgerichteter Antenne für einen Empfangskanal ermittelt. Die Abbildungen 5.2 (DBS) und 5.3 (SA) zeigen die Signal-Rausch-Verhältnisse für Meßreihen während des PMSE-Ereignisses am 15. Juli 1997 in Abhängigkeit von der Zeit und der Höhe.

Polare mesosphärische Sommerechos konnten während der gesamten Meßzeit variabel in Höhen zwischen 82 und 89 km beobachtet werden. Die rückgestreuten Signale variierten zeitlich und in der Höhe, sie lagen maximal 30 dB über dem Rauschen. Das Rauschen kann allgemein als eine Überlagerung von künstlich erzeugtem Rauschen, Rauschen natürlicher Quellen und natürlichem Empfängerrauschen aufgefaßt werden. Es wird näherungsweise als konstant angenommen. Die Variationen des Signal-Rauschverhältnisses spiegeln daher auch die Variationen der Echoleistung wider.

Die PMSE-Schicht verläuft zwischen 11:30 UTC und 13:40 UTC in einem nahezu konstanten Höhenbereich von 83 bis 85 km (10-dB-Niveau), wobei das SRV zwischen 83 und 84 km am stärksten ist.

Ab 13:30 UTC tritt eine zweite Schicht in etwa 87 km Höhe auf, während die bereits beobachtete Schicht um 83.5 km dünner wird. Beide Schichten sind zwischen 13:40 und 14:15 UTC etwa einen Kilometer dick und steigen in dieser Zeit um etwa einen Kilometer in der Höhe. In der unteren Schicht ist ein etwa 10 dB stärkeres Signal-Rausch-Verhältnis erkennbar.

Diese Strukturen werden von beiden Verfahren übereinstimmend wiedergegeben. Die geringere Leistung der kleinen Empfangsantennengruppen (vier Yagis) im SA-Betrieb gegenüber der Leistung des großen Empfangsfeldes (136 Yagis) im DBS-Betrieb konnte durch die längeren Zeitreihen (512 gegenüber 128 Datenpunkten) teilweise ausgeglichen werden. Die Signal-Rausch-Verhältnisse der SA-Messungen liegen etwa 5 dB unter denen der DBS-Messungen.

5.2 Räumliche Streueigenschaften und Aspektempfindlichkeit

Wie im Kapitel 2.2 diskutiert wurde, können anhand der Parameter der Raum-Zeit-Korrelationsfunktion der vollen Korrelationsanalyse direkt Aussagen zu räumlichen

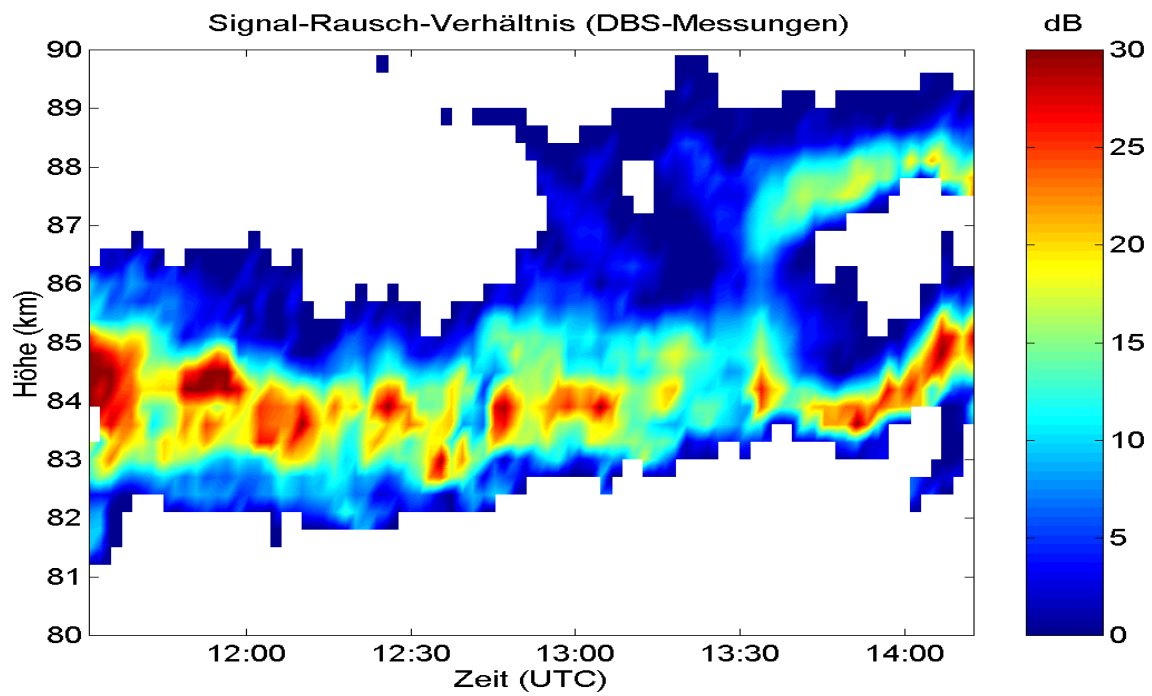


Abbildung 5.2: Signal-Rausch-Verhältnis der DBS-Messung für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997

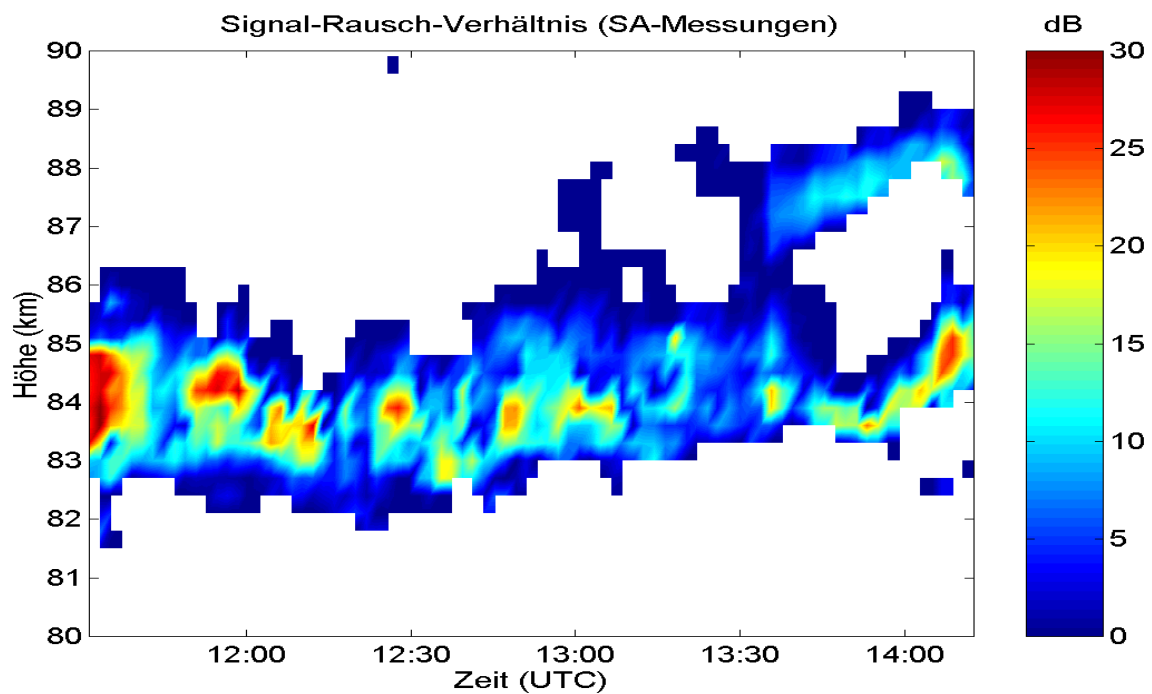


Abbildung 5.3: Signal-Rausch-Verhältnis der SA-Messung für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997

Streuereigenschaften getroffen werden. Die in Abb. 5.4 dargestellte charakteristische Korrelationslänge $S_{0.5}$ symbolisiert die räumliche Korrelation des Streuemusters. Sie beträgt etwa 20 bis 40 m. Die größten Werte treten an der Unterkante der PMSE-Schichten auf und zeigen dort eine stärkere horizontal geschichtete Ausrichtung der Streuer an.

Das Verhältnis der großen zur kleinen Achse der charakteristischen räumlichen Ellipse ist ein Maß für die Anisometrie des Rückstreumusters. Wie Abb. 5.5 zeigt, sind diese Verhältnisse für das PMSE-Ereignis zumeist kleiner als 1.5 und weisen daher auf die relativ isometrischen Eigenschaften der PMSE-Schichten hin. Bei derartig kleinen Verhältnissen sind keine ausgeprägten Vorzugsrichtungen ϕ_{ax} erkennbar. Auf die Darstellung der Achsendrehung der räumlichen charakteristischen Korrelationsfunktion wurde daher verzichtet.

Die Abb. 5.6 und 5.7 zeigen die nach der Dopplermethode (Kapitel 2.1) und der Korrelationsmethode (Kapitel 2.2) bestimmten Aspektempfindlichkeiten:

Der Winkel θ_s als Grad der Aspektempfindlichkeit beträgt im SA-Mode im gesamten Meßbereich zwischen 2° und 5° , nur vereinzelt werden an der Oberkante der PMSE-Schichten höhere Werte bis zu 10° erreicht. Er ist an der Unterkante der Schichten am kleinsten und nimmt zum oberen Rand zu.

Die nach der Doppler-Methode bestimmte Aspektempfindlichkeit zeigt ebenfalls die kleinsten Werte mit etwa 4° an der Unterkante der PMSE-Schichten. Die Werte steigen mit zunehmender Höhe aber schnell auf 10° an. Sie sind insgesamt größer als die mittels Korrelationsmethode ermittelten Werte.

Während der qualitative Verlauf der Ergebnisse also ähnlich ist, zeigen sich in den Quantitäten doch deutliche Unterschiede. Obwohl hier nur ein Einzelereignis untersucht wurde und daher keine Aussage über die mittlere Aspektempfindlichkeit getroffen werden kann, sollen die ermittelten Werte mit einigen veröffentlichten Ergebnissen anderer Untersuchungen verglichen werden:

Mit dem mobilen SOUSY Radar wurde im Juni 1987 nahe Andenes, nur fünf Kilometer vom späteren Standort des ALOMAR SOUSY Radars entfernt, eine zweitägige DBS-Messung durchgeführt. Da über diesen Zeitraum keine kontinuierliche PMSE-Schicht vorhanden war, enthielten die Messungen mehrere Unterbrechungen. Die nach der Doppler-Methode bestimmten Aspektempfindlichkeitswerte lagen im Bereich von 3° bis 9° , wobei Werte zwischen 5° und 6° am häufigsten auftraten. Außerdem wurde festgestellt, daß die Aspektempfindlichkeit mit zunehmender Höhe abnimmt (CZECHOWSKY *et al.*, 1988).

Untersuchungen zur Aspektempfindlichkeit wurden z.B. auch von HUAMAN und BALSLEY (1998) durchgeführt. Sie haben in Poker Flat (65°N , 147°W), Alaska, mit einem MST Radar die Aspektempfindlichkeit während des Auftretens von PMSE-

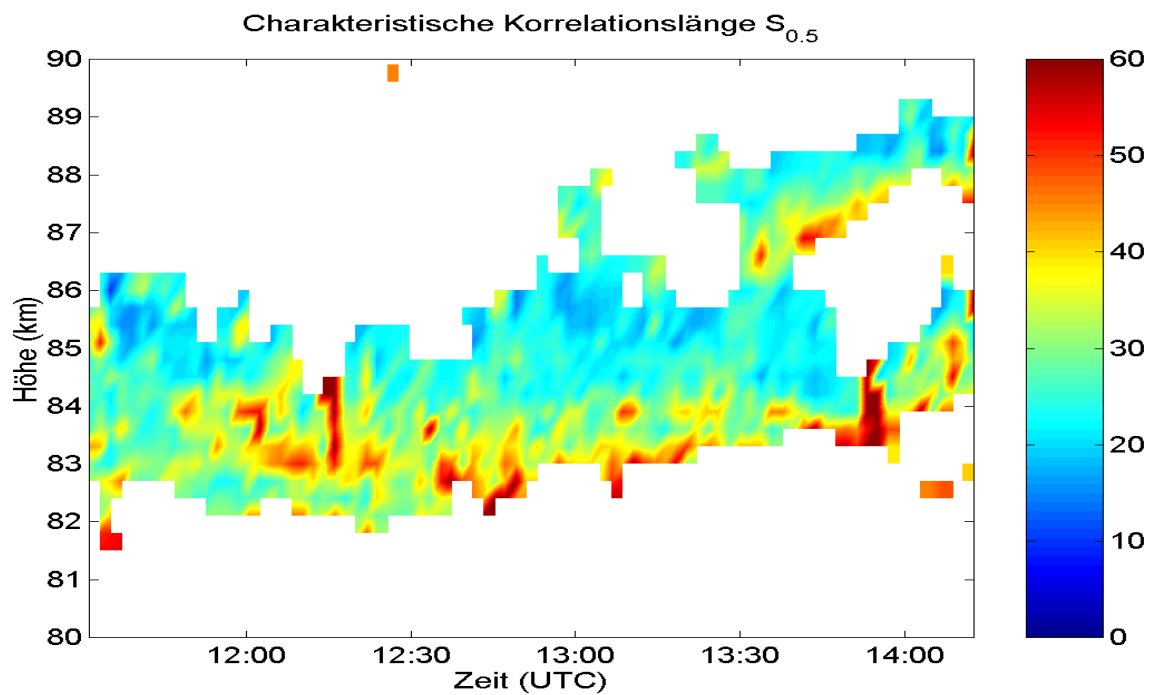


Abbildung 5.4: Die charakteristische Korrelationslänge für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997

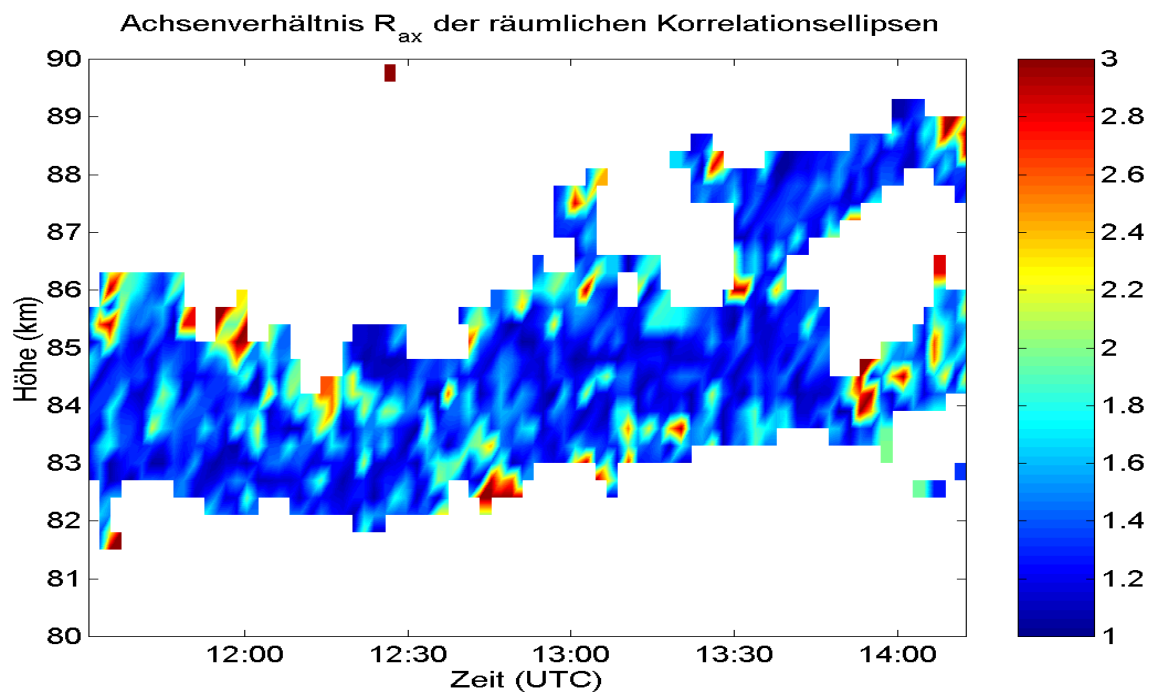


Abbildung 5.5: Achsenverhältnis der charakteristischen räumlichen Ellipse für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997

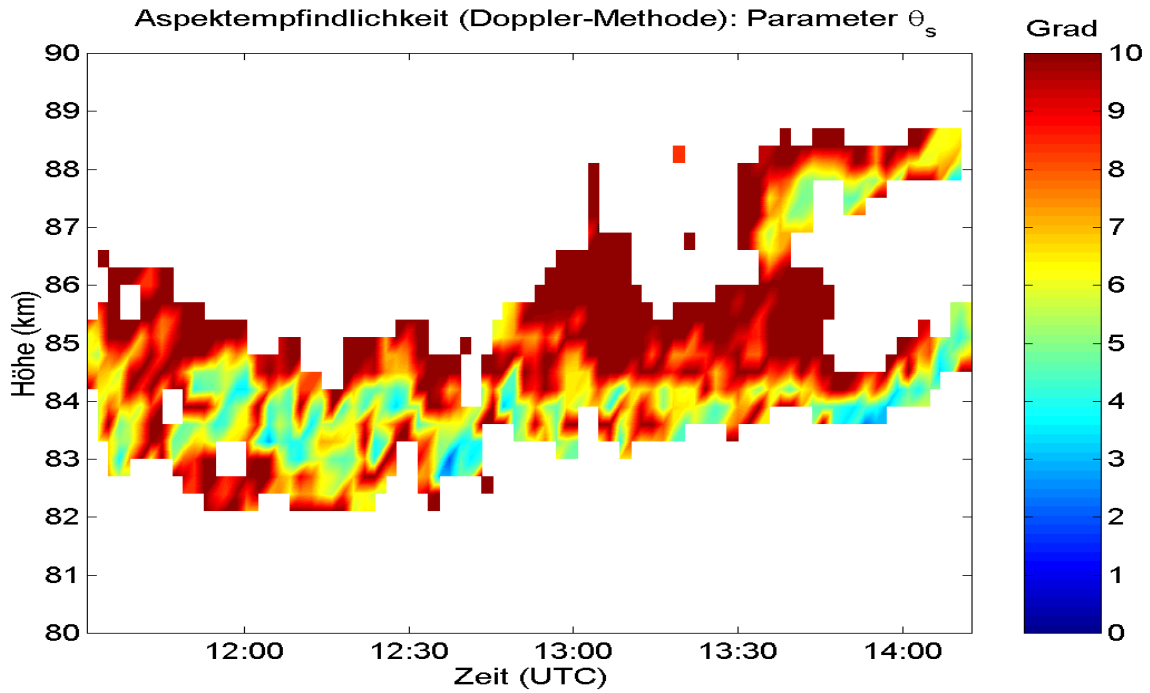


Abbildung 5.6: Nach der Dopplermethode bestimmte Aspekttempfindlichkeit: Zenitwinkel θ_s für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997

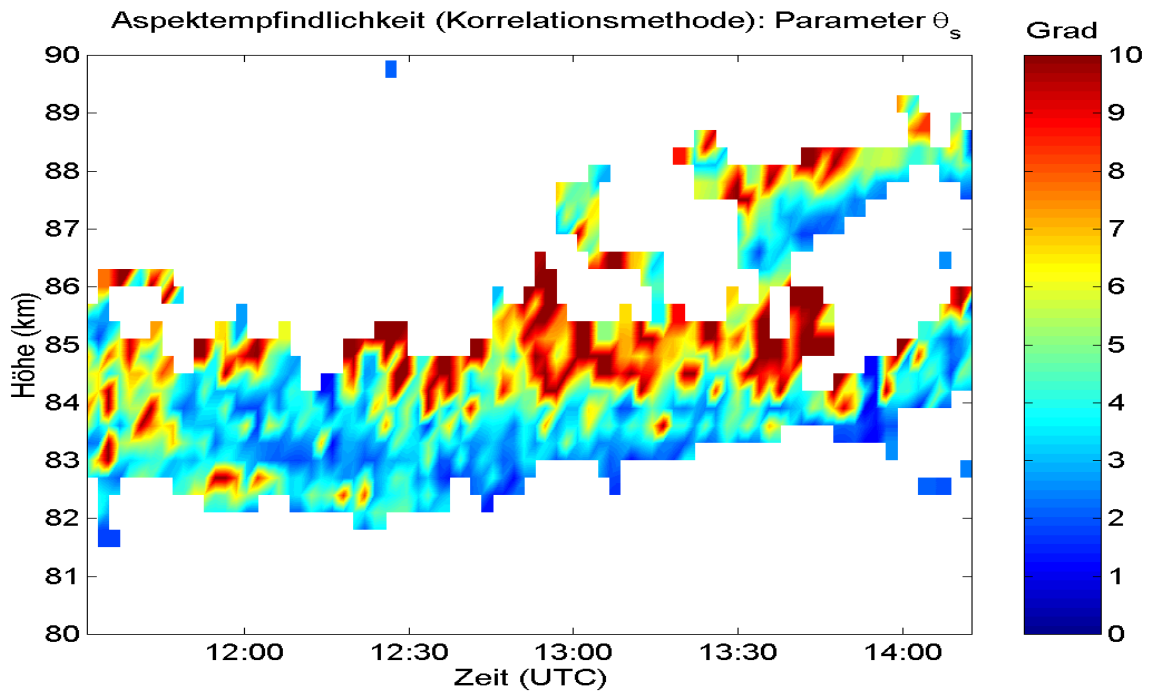


Abbildung 5.7: Nach der Korrelationsmethode bestimmte Aspekttempfindlichkeit: Zenitwinkel θ_s für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997

Schichten in den Sommermonaten von 1981-1984 untersucht und ebenfalls festgestellt, daß die Werte mit zunehmender Höhe steigen, von etwa 9° bis 12° in Höhen ab 80 km auf etwa 13° bis 18° in Höhen bis zu 90 km.

Damit werden die mit dem ALOMAR SOUSY Radar erhaltenen Ergebnisse bestätigt: Die stärker reflektierenden Streuer befinden sich im unteren Bereich und die mehr isotropen Streuer im oberen Bereich der PMSE-Schicht.

Bei der Beurteilung der Differenzen in den absoluten Werten weisen HUAMAN und BALSLEY (1998) darauf hin, daß die Messungen mit dem mobilen SOUSY Radar mit Schwenkwinkeln von $4^\circ - 5.6^\circ$ durchgeführt wurden, während die Antennenhauptkeule des Poker Flat MST Radars um 15° geneigt wurde. Die mit dem ALOMAR SOUSY Radar nach dem Doppler-Verfahren am häufigsten ermittelten Aspektempfindlichkeitswerte von etwa $6^\circ - 8^\circ$ bei einem Schwenkwinkel von 8° fügen sich in diese Reihen ein und bestätigen die Ergebnisse weiterer Studien (CHO und KELLEY, 1993), daß bei Berechnungen mit zunehmenden Schwenkwinkel die Streuer isotroper erscheinen, obwohl dies objektiv nicht möglich ist.

Eine Erklärung könnte darin liegen, daß die im Modell von HOCKING *et al.* (1986) verwendete Approximation einer Gaußfunktion die Abhängigkeit der rückgestreuten Leistung vom Zenitwinkel nur in einem kleinen Winkelbereich um den Zenit korrekt beschreibt. HOCKING *et al.* (1990) weist darauf hin, daß unterschiedliche Aspektempfindlichkeiten ermittelt werden, wenn die Annahme einer Gaußfunktion nicht zutrifft. Dies ist im logarithmischen Maßstab in Abb. 5.8 dargestellt. Anhand der ermittelten Leistungsverhältnisse werden Gaußfunktionen (im logarithmischen Maßstab sind das Parabeln) angenommen, die die tatsächliche Aspektempfindlichkeitskurve nicht korrekt beschreiben und bei unterschiedlichen Schwenkwinkeln zu unterschiedlichen Aspektempfindlichkeitsparametern führen (θ_{sb0} bis θ_{sb2}). Die Form der hier angegebenen tatsächlichen Aspektempfindlichkeitskurve wurde durch Messungen in der Tropo- und Stratosphäre mit dem japanischen MU Radar bestätigt (TSUDA *et al.*, 1997). Das bedeutet, daß ein quantitativer Vergleich der ermittelten Aspektempfindlichkeiten nach dem SA-Verfahren und dem DBS-Verfahren nicht möglich ist.

5.3 Zeitliche Streueigenschaften und Turbulenz

Die mit dem SA-Verfahren bestimmbare charakteristische Korrelationszeit $T_{0.5}$ („mittlere Lebenszeit“) ist in Abb. 5.9 dargestellt. Sie gibt die zeitlichen Veränderungen im Streumedium selbst wieder, die nicht auf die gerichtete Windbewegung zurückzuführen sind. Diese Zeit liegt bis 13:40 UTC im gesamten beobachtbaren Höhenbereich zwischen 0.1 s und 0.3 s, wobei die kürzesten Zeiten an der Unterkante der PMSE-Schicht erreicht werden. Ab 13:50 UTC treten in beiden Schichten deutlich größere Werte auf.

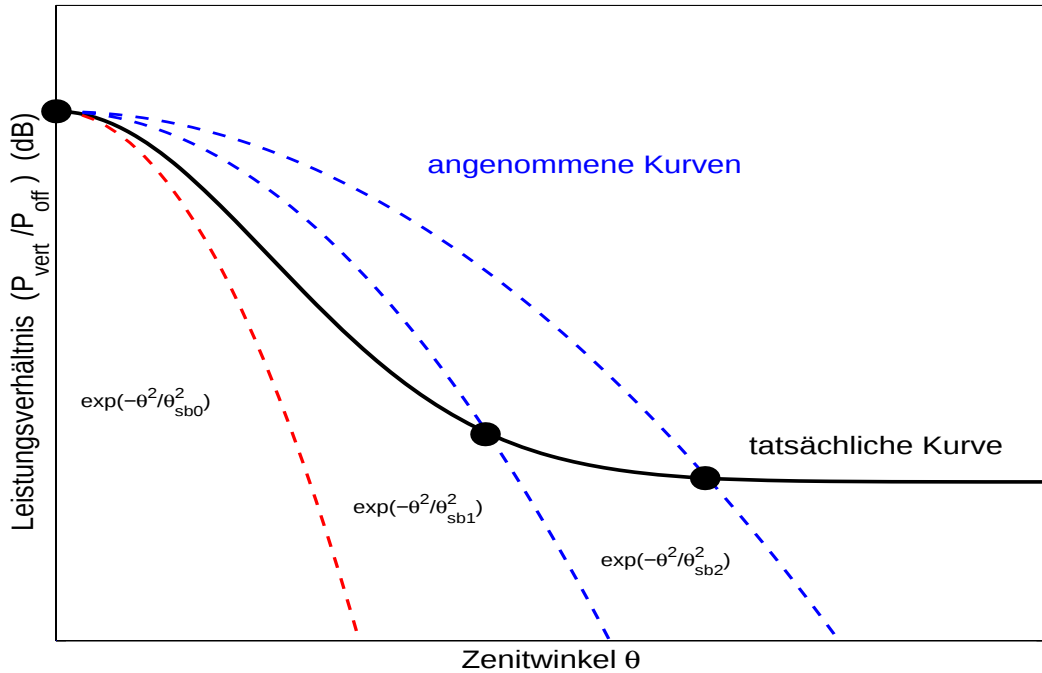


Abbildung 5.8: Bestimmung unterschiedlicher Aspektempfindlichkeitswerte bei unterschiedlichen Schwenkwinkeln (nach HOCKING *et al.*, 1990)

Sie liegen zwischen 0.3 s und 0.5 s, wobei die größten Zeiten in der oberen Schicht erreicht werden.

Da die zufälligen Bewegungen im Streuermuster hauptsächlich auf Turbulenzeffekte zurückzuführen sind, kann die turbulente Geschwindigkeit direkt aus $T_{0.5}$ geschätzt werden (siehe Kapitel 2.2). Sie liegt im gesamten Höhen- und Zeitbereich zwischen etwa 1 und 2.5 m/s (Abb. 5.10), wobei die größeren Werte im oberen Bereich der PMSE-Schicht ermittelt wurden. Mit der Ausbildung einer Doppelschicht treten ab etwa 13:40 UTC deutlich kleinere Werte im gesamten Höhenbereich auf.

5.4 Horizontale Windgeschwindigkeit

Die Abb. 5.11 bis 5.14 zeigen die Höhen-Zeit-Schnitte der nach dem DBS- und dem SA-Verfahren berechneten meridionalen und zonalen Windgeschwindigkeiten. Dabei bedeuten positive meridionale Geschwindigkeiten Winde von Süden nach Norden und positive zonale Geschwindigkeiten Winde von Westen nach Osten.

Die zonale Windgeschwindigkeit ist in der unteren Schicht durchgehend größer als -50 m/s. Zwischenzeitlich treten Geschwindigkeiten bis zu -100 m/s auf. Das bedeutet, daß in dieser Schicht starke Ostwinde dominieren. In der oberen Schicht wurden dagegen positive zonale Windgeschwindigkeiten zwischen 0 und +30 m/s bestimmt. Hier

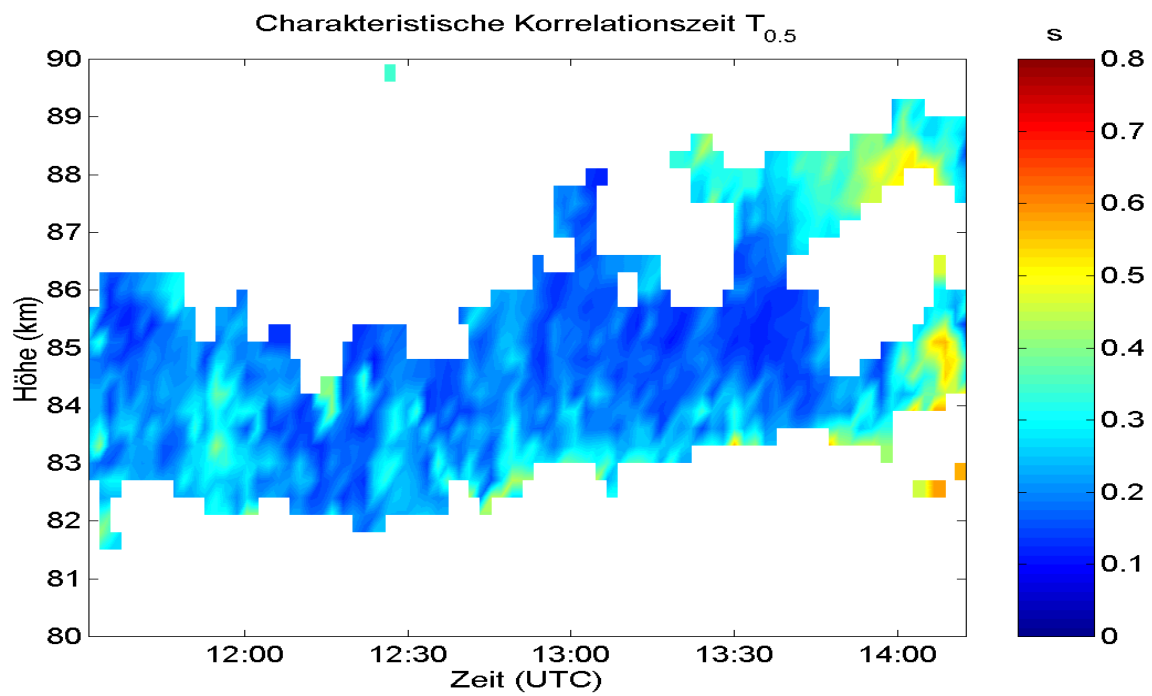


Abbildung 5.9: Charakteristische Korrelationszeit $T_{0.5}$ für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997

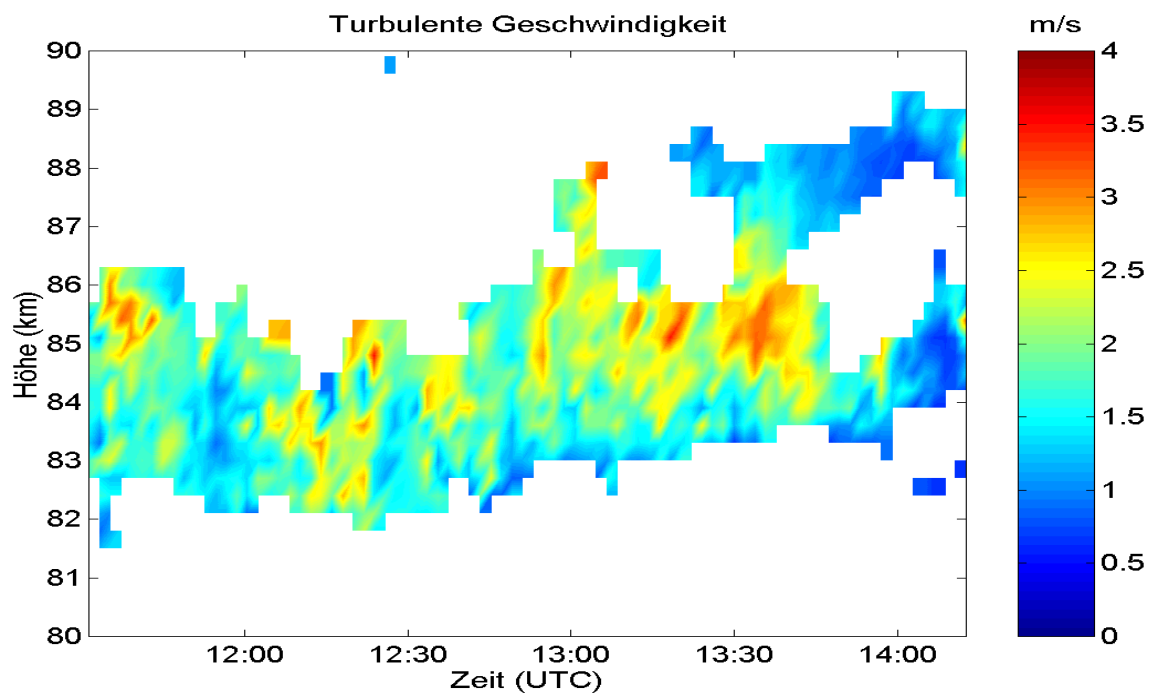


Abbildung 5.10: Schätzung der turbulenten Geschwindigkeit für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997

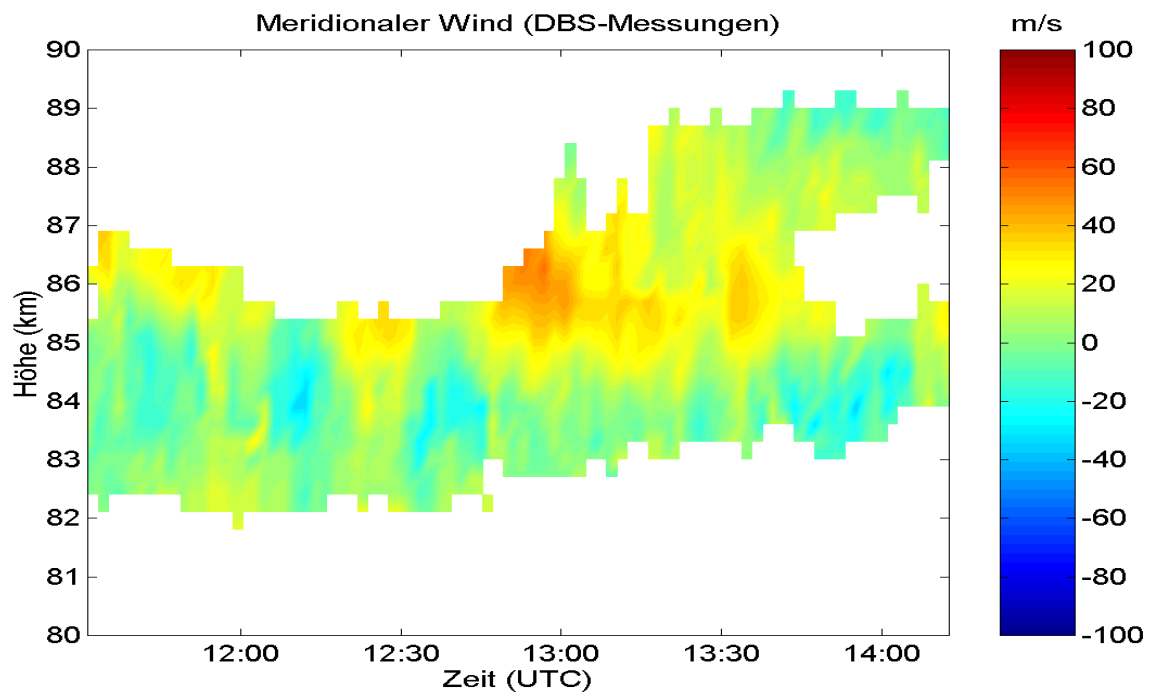


Abbildung 5.11: Meridionaler Wind nach dem DBS-Verfahren für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997

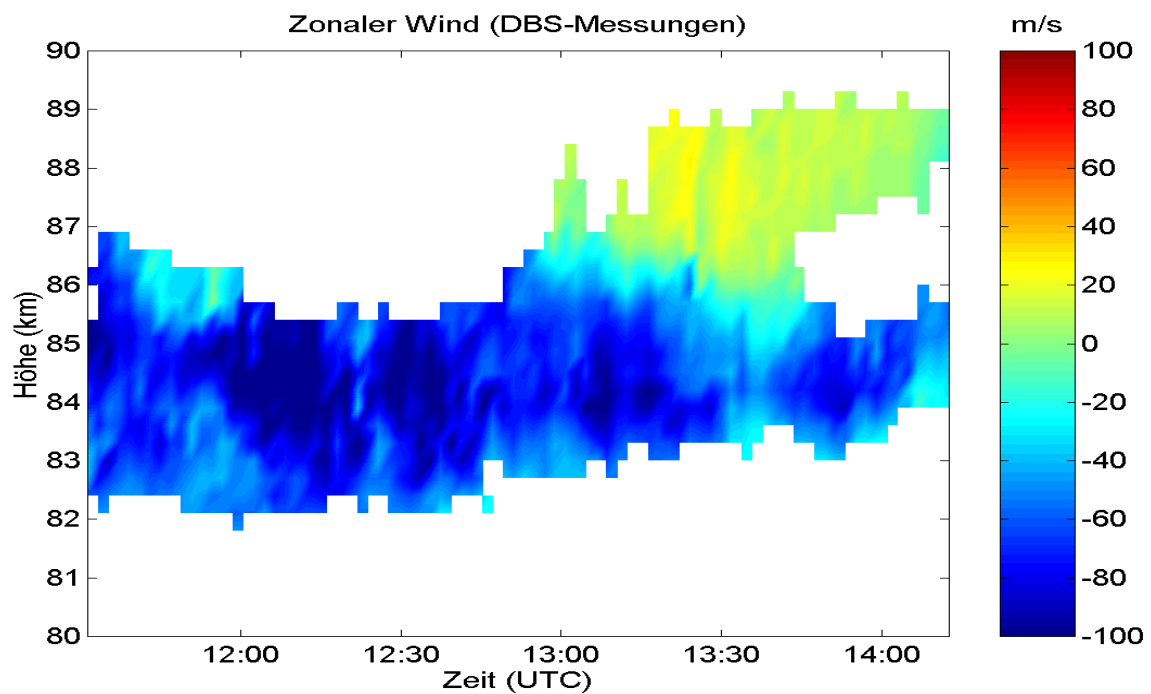


Abbildung 5.12: Zonaler Wind nach dem DBS-Verfahren für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997

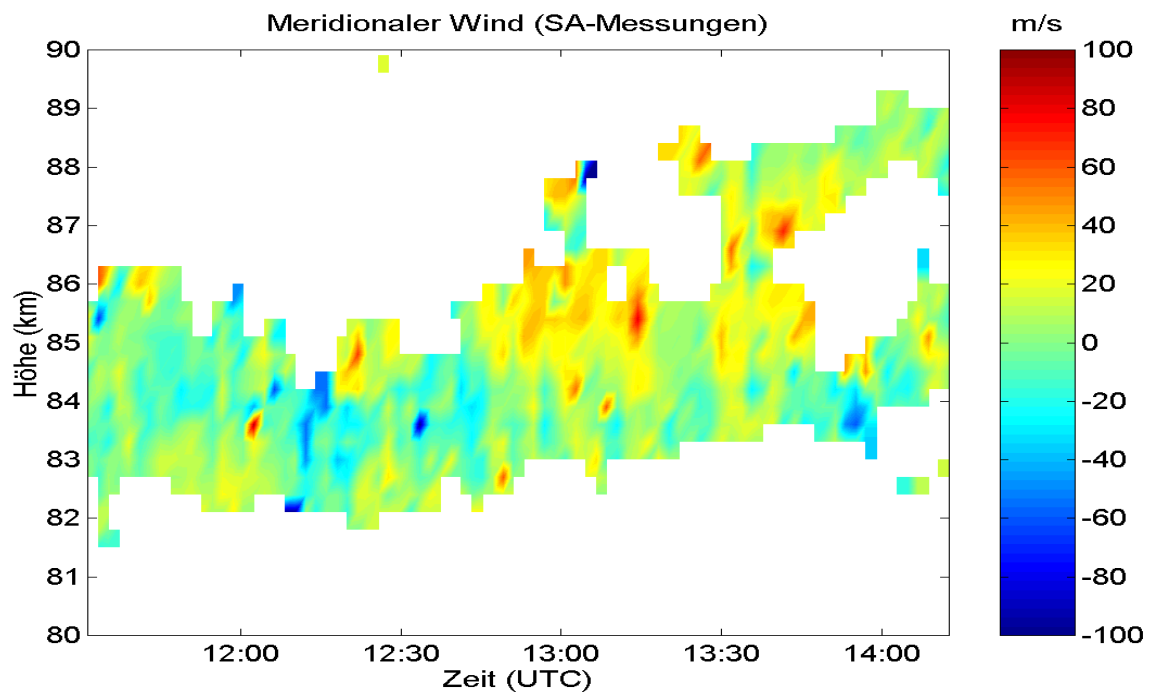


Abbildung 5.13: Meridionaler Wind nach dem SA-Verfahren für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997

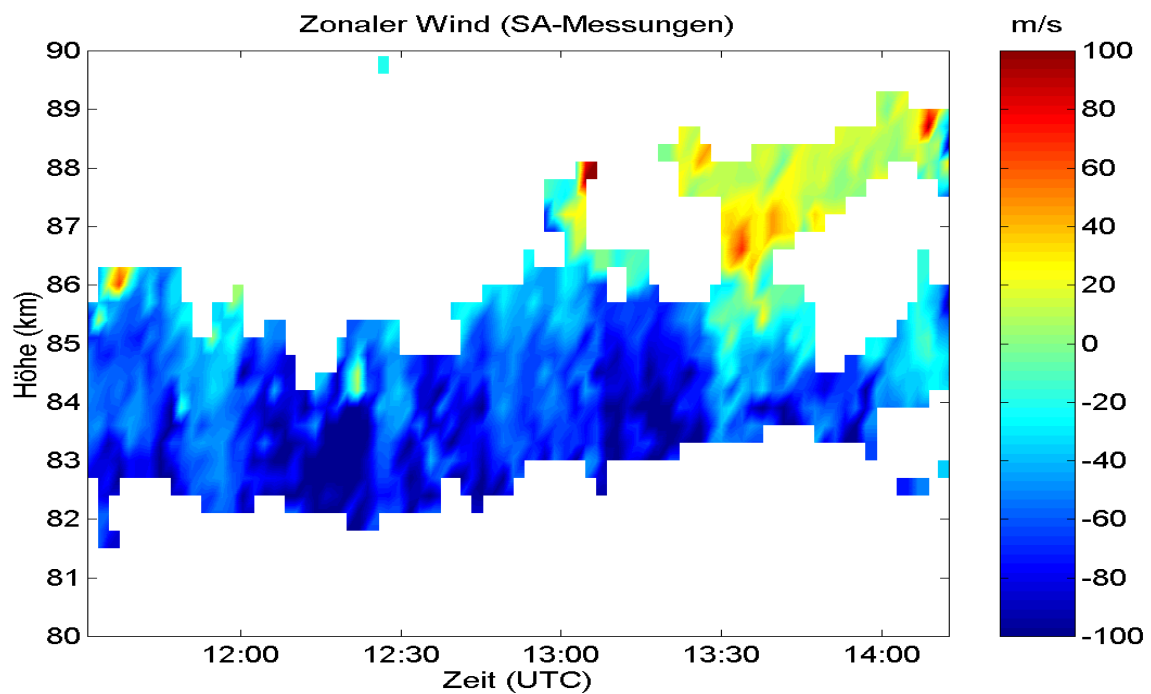


Abbildung 5.14: Zonaler Wind nach dem SA-Verfahren für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997

herrschen schwächere Westwinde vor.

Die meridionalen Winde sind wesentlich kleiner als die zonalen, sie liegen zwischen -20 und +20 m/s. Eine deutliche Unterscheidung der meridionalen Winde zwischen den beiden Schichten ist nicht erkennbar.

Die Abbildungen zeigen aber auch, daß mit dem DBS-Verfahren kleinere maximale Windwerte beobachtet werden als mit dem SA-Verfahren. Es erfolgt eine wesentlich stärkere zeitliche, horizontale und vertikale Mittelung der Windvariationen. Beim SA-Verfahren treten dagegen die Feinstrukturen der Winde, das heißt kurzzeitige Variationen der horizontalen Geschwindigkeitskomponenten, sehr deutlich hervor. Es wird erkennbar, daß dies Veränderungen in allen Höhenkanälen einer PMSE-Schicht nahezu gleichzeitig auftreten. Die SA-Resultate können die momentanen Windgeschwindigkeiten direkt über dem Beobachtungspunkt mit höherer zeitlicher und räumlicher Auflösung wiedergeben.

Ursache hierfür sind hauptsächlich die zeitlich nacheinander ausgeführten DBS-Messungen mit den geneigten Antennenstrahlen in räumlich voneinander entfernten Meßvolumen und die Höhenverschmierung aufgrund der Breite der Antennenkeule. Die SA-Messungen erfolgen dagegen zeitgleich und im selben Meßvolumen und aufgrund der vertikalen Strahlausrichtung mit einer wesentlich geringeren Glättung über der Höhe.

Für einen direkten Vergleich der DBS- und SA-Ergebnisse wurden die Mittelwerte der horizontalen Windkomponenten über 30 Minuten berechnet. Die Ergebnisse sind in Abb. 5.15 dargestellt. Sie zeigen eine sehr gute Übereinstimmung der meridionalen Windwerte im gesamten beobachtbaren Höhenbereich. Die Differenzen sind zumeist kleiner als die durch Fehlerbalken dargestellten Standardabweichungen der über eine halbe Stunde gemittelten Werte. Die mittleren Profile der zonalen DBS- und SA-Winde zeigen ebenfalls ähnliche Verläufe und teilweise gute Übereinstimmungen. Insbesondere bei starken Winden betragen die Abweichungen jedoch bis zu 50 m/s. Die DBS-Winde zeigen aufgrund der Mittelung über einen größeren Höhenbereich glattere Profile, während durch die SA-Methode ermittelte Winde die Feinstruktur der Profile besser wiedergeben.

Diese Ergebnisse werden auch durch die Korrelogramme in Abb. 5.16 bestätigt. Die meridionalen Windgeschwindigkeiten (links oben) und die Windrichtung (rechts unten) stimmen sehr gut überein. Die Gegenüberstellungen der zonalen Windgeschwindigkeiten (rechts oben) und der absoluten Windgeschwindigkeiten (links unten) zeigen jedoch auch, daß die Streuung sich mit zunehmenden Geschwindigkeitswerten erhöht.

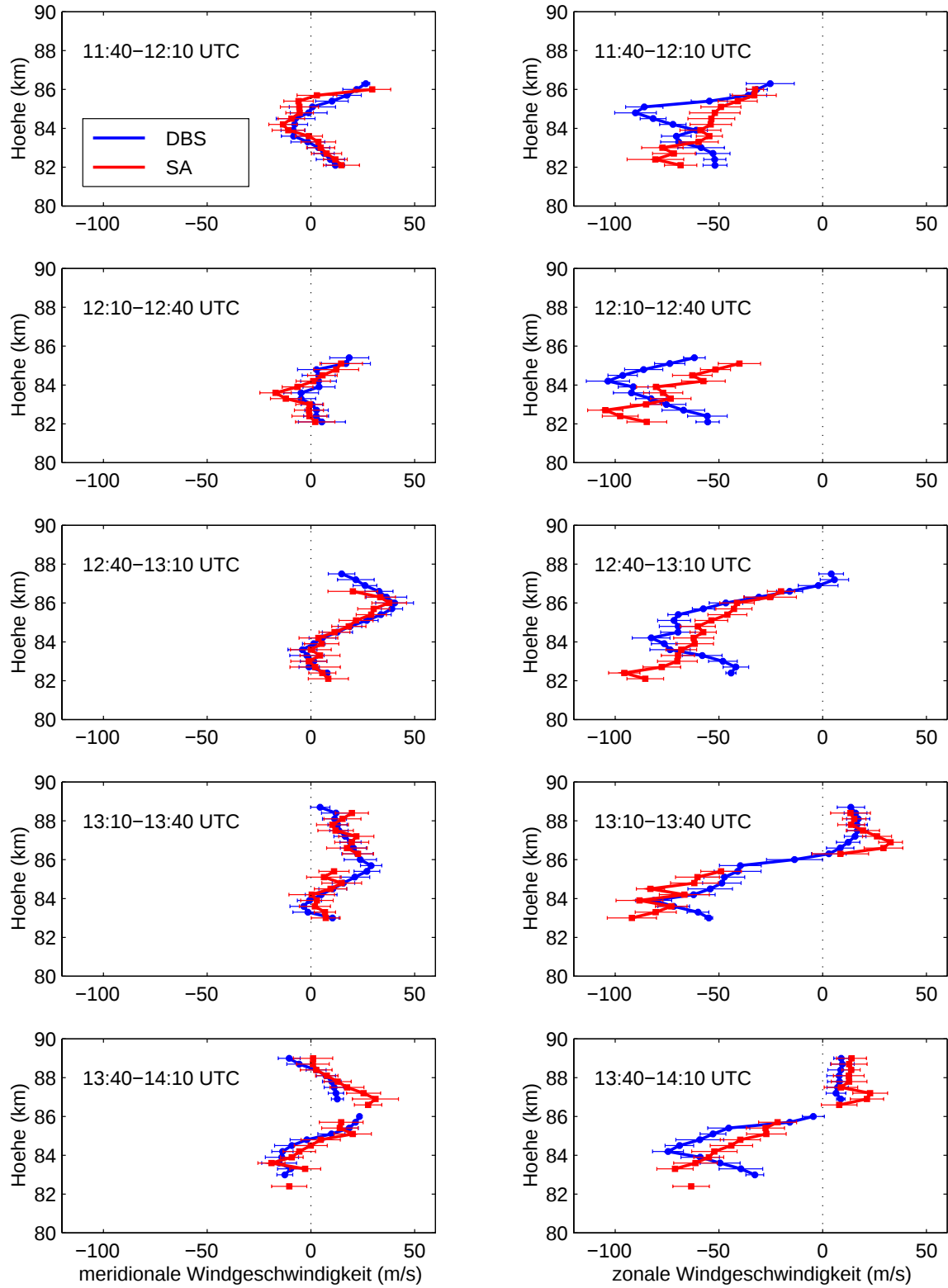


Abbildung 5.15: Mittlere Höhenprofile der zonalen und meridionalen Winde für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997

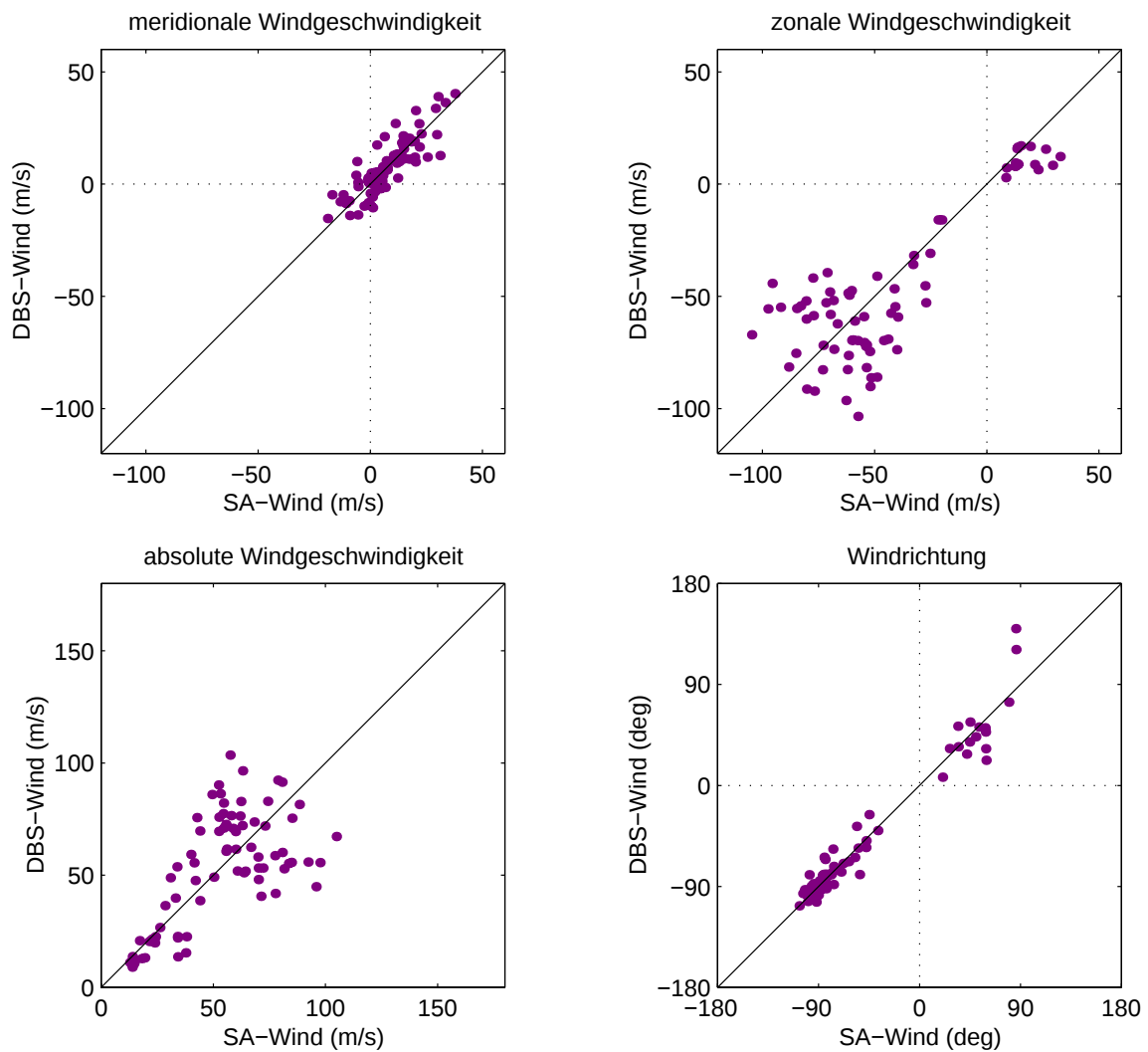


Abbildung 5.16: Korrelogramme halbstündlich gemittelter horizontaler Winde von DBS- und SA-Messungen für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997. links oben: meridionale Windgeschwindigkeit; rechts oben: zonale Windgeschwindigkeit; links unten: absolute Geschwindigkeit; rechts unten: Windrichtung

Vergleich mit Windmessungen anhand einer Folienwolke

Neben der Beobachtung natürlicher atmosphärischer Streuer ist eine Windbestimmung auch durch die Verfolgung stark reflektierender Medien möglich, die künstlich in die Atmosphäre eingebracht werden. So werden zum Beispiel von Raketen Folienwolken ausgeworfen, die vom Wind mitgeführt werden und deren Ausbreitungsrichtung während des Absinkens mit hochauflösenden Radars verfolgt werden kann (WIDDEL, 1985, 1990).

Am 15. Juli 1997 wurde in Andenes im Rahmen einer Meßkampagne ein Folienwolkenexperiment durchgeführt. Die Bewegung der Wolke konnte von 12:52-13:00 UTC im Höhenbereich zwischen 88 und 82 km verfolgt werden (MÜLLEMAN und LÜBKEN, 1998). Damit standen neben den indirekt durch das ALOMAR SOUSY Radar ermittelten Windwerten zusätzliche in-situ Windbestimmungen anhand der Folienwolke mit einer effektiven Höhenauflösung von etwa 2 km zur Verfügung.

Bei einem Vergleich der Windergebnisse muß beachtet werden, daß die Messungen nicht im selben Meßvolumen erfolgten. In Abb. 5.17 sind die in 85 km Höhe beobachteten Gebiete zusammen mit der in eine horizontale Ebene projizierten Bahnkurve der Folienwolke dargestellt. Die horizontale Entfernung der Folienwolke zum ALOMAR SOUSY Radar beträgt zum Beginn der Messungen etwa 40 km in nördlicher Richtung und vergrößert sich mit dem Absinken der Folienwolke auf etwa 60 km in nordwestlicher Richtung.

Weiterhin muß auf die unterschiedlichen Zeitskalen hingewiesen werden. Bei den Folienwolkenmessungen wurden momentane Windwerte ermittelt (MÜLLEMAN und LÜBKEN, 1998), während bei der DBS- und SA-Windbestimmung mit dem ALOMAR SOUSY Radar Mittelwerte für die acht Minuten berechnet wurden, in denen die Folienwolke durch den beobachteten Höhenbereich von 88 auf 82 km absinkt.

Die Ergebnisse sind in Abb 5.18 dargestellt. Es ist eine sehr gute Übereinstimmung der Meßwerte des meridionalen Windes über den gesamten beobachtbaren Höhenbereich erkennbar. Die Differenzen zwischen den momentanen Meßwerten anhand der Folienwolke und den Acht-Minuten-Mittelwerten der beiden VHF-Radarverfahren sind geringer als die Standardabweichungen der gemittelten Werte. Der qualitative Verlauf der Höhenprofile des zonalen Windes ist ebenfalls sehr ähnlich, es zeigen sich hier aber Abweichungen. Während die Differenzen oberhalb von 84 km maximal 10 m/s betragen, steigen sie unterhalb von 84 km auf 10-20 m/s. Dies kann in Zusammenhang mit der zunehmenden Entfernung der Folienwolke vom Radargerät während ihres Absinkens stehen (vgl. Abb. 5.17).

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, daß beide VHF-Radarmessverfahren Windwerte liefern, die mit direkten Messungen generell gut übereinstimmen. Die Unterschiede können auf räumliche und zeitliche Inhomogenitäten des horizontalen Windfeldes zu-

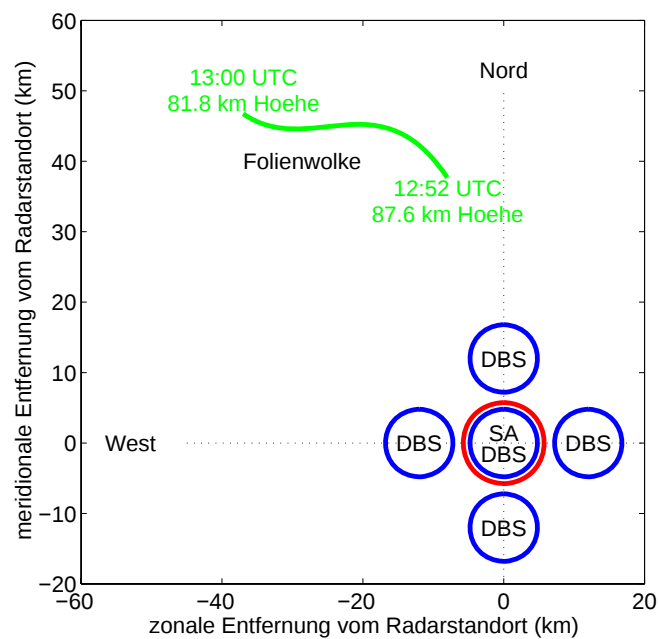


Abbildung 5.17: Lage der mittels DBS- und SA-Radarmessungen beobachteten Gebiete in 85 km Höhe und Bahnkurve der Folienwolke für eine Messung am 15. Juli 1997 von 12:52-13:00 UTC)

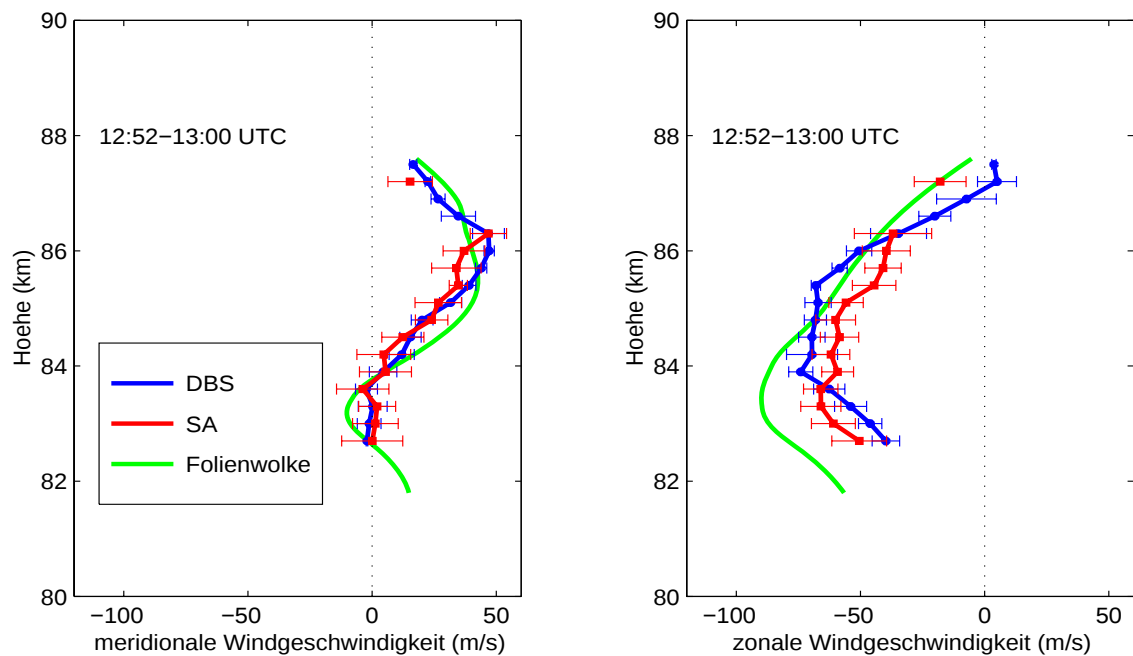


Abbildung 5.18: Vergleich der mittleren Höhenprofile der zonalen und meridionalen Winde von DBS-, SA- und Folienwolkenmessungen für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997

rückgeführt werden.

5.5 Vertikale Windgeschwindigkeit

Die nach DBS-Analyse durch Kombination der Meßwerte aus fünf Schwenkrichtungen berechneten vertikalen Winde sind in Abb. 5.19 dargestellt, wobei positive Geschwindigkeiten nach oben gerichtete Winde bezeichnen. Es sind wellenförmige Schwankungen um den Nullpunkt mit Werten von etwa -2 m/s bis $+2\text{ m/s}$ erkennbar. Die Messungen erfolgen mit dem vertikalen und den geneigten Antennenstrahlen in unterschiedlichen Meßvolumen, in denen deutlich unterschiedliche oder auch einander entgegengesetzt gerichtete vertikale Winde auftreten können. Der aus fünf Schwenkrichtungen berechnete vertikale Wind stellt daher eine Mittelungen über eine große horizontale Entfernungen dar und kann die momentane vertikale Bewegung über dem Beobachtungspunkt nicht exakt wiedergeben.

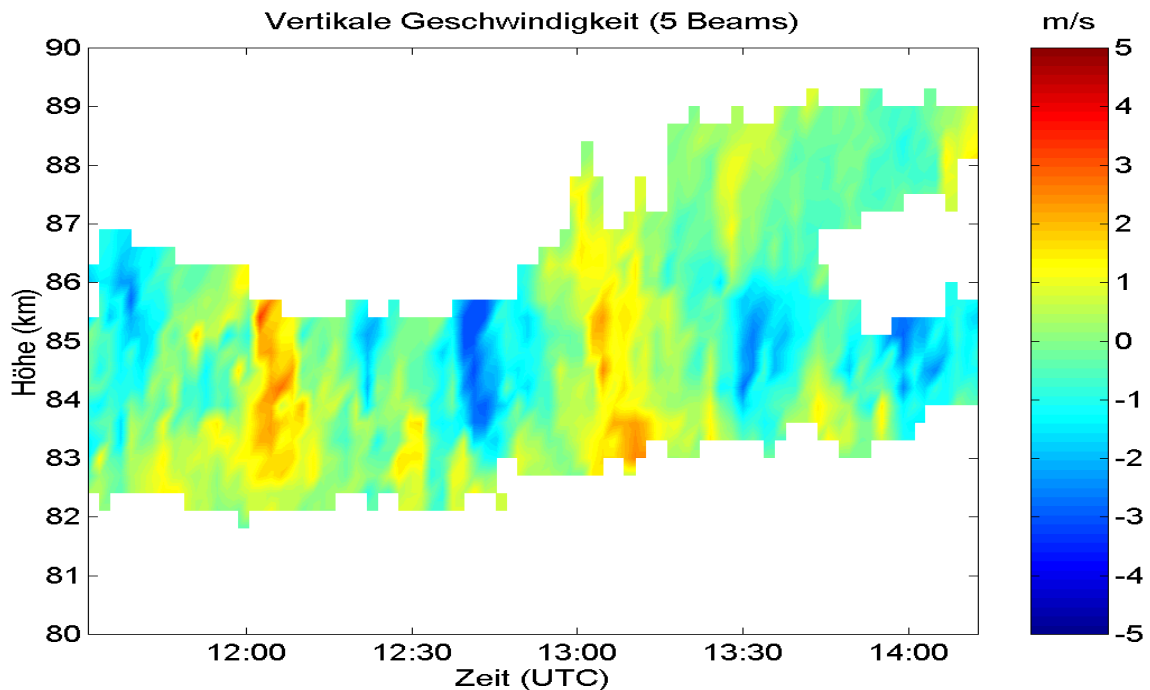


Abbildung 5.19: Vertikale Windgeschwindigkeit der DBS-Messungen, bestimmt aus den Empfangssignalen von fünf Schwenkrichtungen, für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997

Eine genauere Abschätzung erhält man, wenn man die radialen Geschwindigkeiten bei vertikaler Ausrichtung der Empfangsantennen als vertikale Geschwindigkeit annimmt. Dies ist sowohl für DBS-Messungen (Abb. 5.20) als auch für SA-Messungen

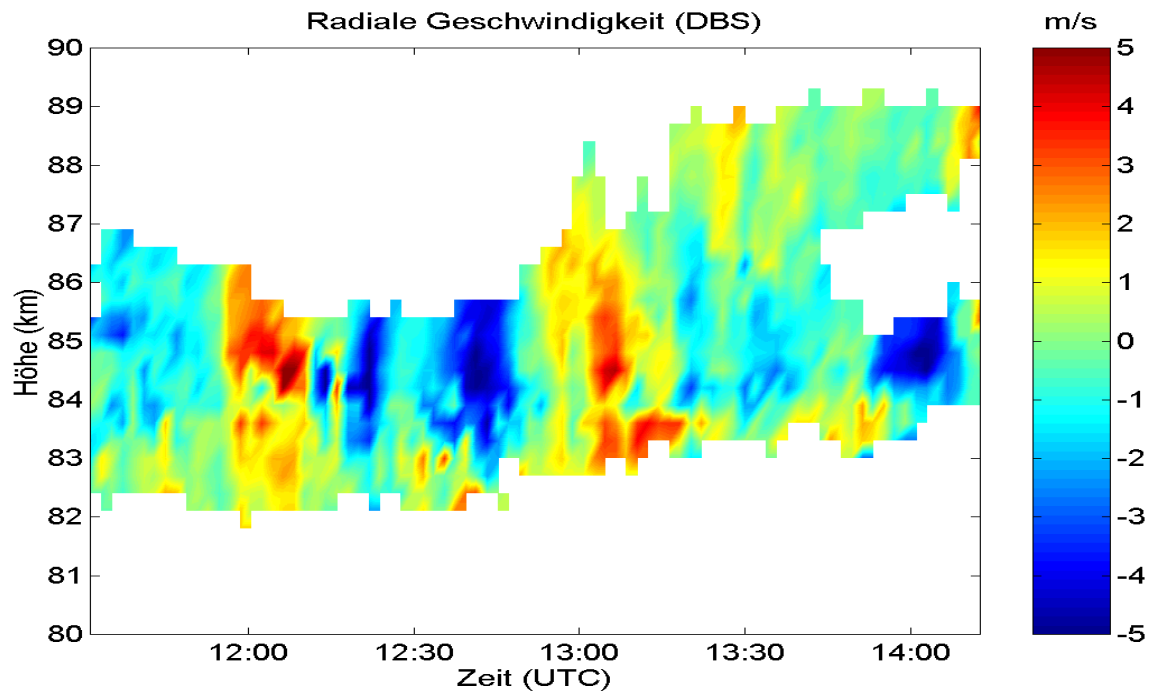


Abbildung 5.20: Radiale Windgeschwindigkeit der DBS-Messungen, bestimmt aus dem Empfangssignal des vertikal ausgerichteten Antennenstrahls, für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997

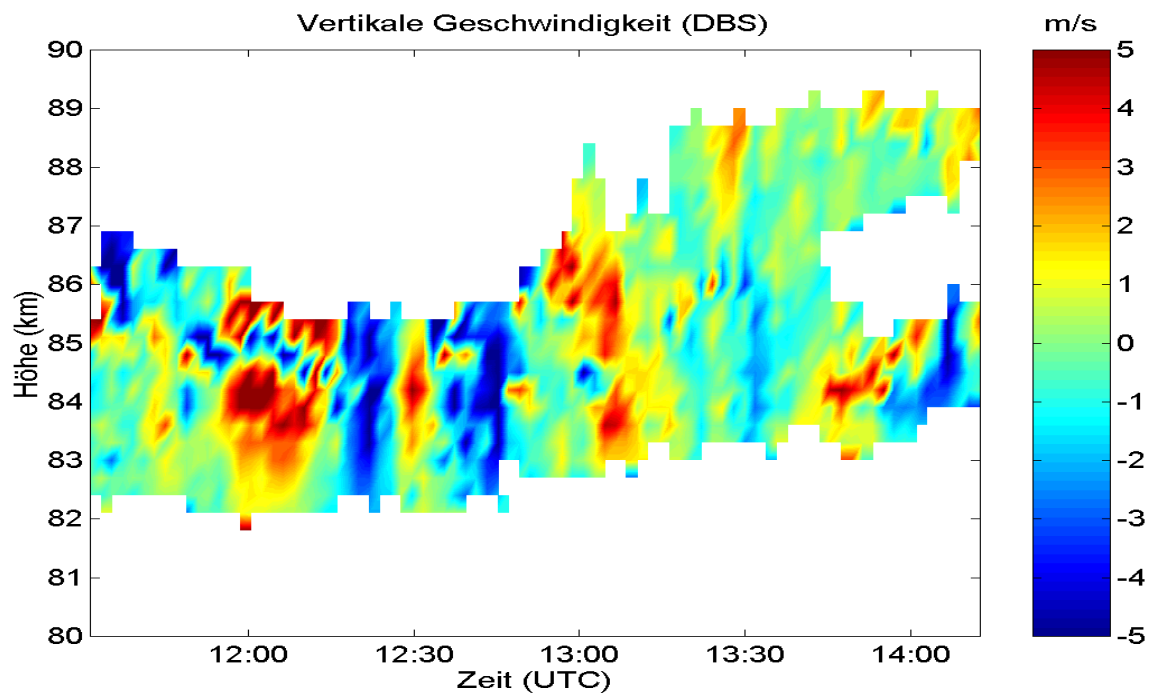


Abbildung 5.21: Korrigierte vertikale Windgeschwindigkeit der DBS-Messungen für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997

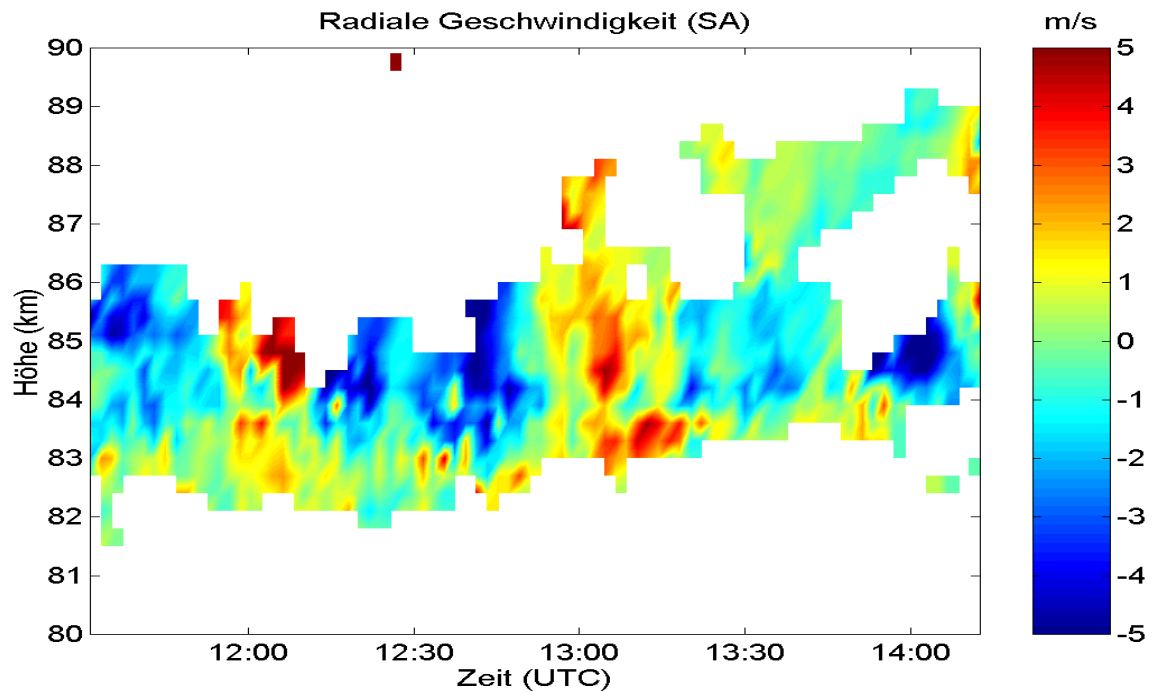


Abbildung 5.22: Radiale Windgeschwindigkeit der SA-Messungen, bestimmt aus dem Empfangssignal der vertikal ausgerichteten Antennenstrahlen, für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997

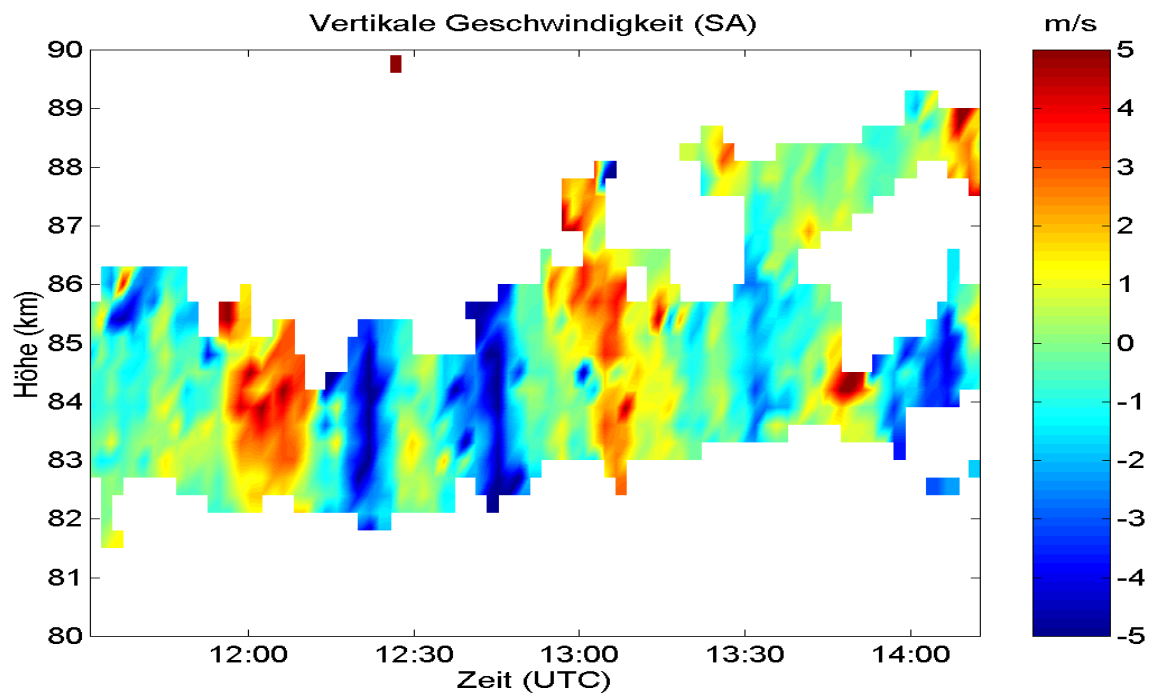


Abbildung 5.23: Korrigierte vertikale Windgeschwindigkeiten der SA-Messungen für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997

(Abb. 5.22) möglich, wenn der horizontale Anteil in der radialen Geschwindigkeit vernachlässigbar ist.

Ein Vergleich beider Abbildungen zeigt große Ähnlichkeiten in den Strukturen der radialen Geschwindigkeiten von DBS- und SA-Messungen. Da keine räumliche Mittelung erfolgt, treten zeitliche Änderungen deutlicher hervor als in der Bestimmung unter Einschluß der geneigten Radarstrahlen. Die maximalen Beträge sind größer, sie liegen bei ± 3 m/s.

Im Kapitel 2 wurde bereits darauf hingewiesen, daß sich bei der Signalaufnahme mit Radargeräten die Leistungsdiagramme von Antenne und Streuer überlagern. Während das Leistungsdiagramm der vertikal ausgerichteten Antenne um den Zenit zentriert liegt, ist dies für das momentane Leistungsdiagramm der Streuer aufgrund deren zufälliger Anordnung im allgemeinen nicht der Fall. Besitzt eine Antenne eine relativ breite Hauptkeule, dann muß davon ausgegangen werden, daß trotz vertikal ausgerichteter Antenne die Position des Maximums der Empfangsleistungsfunktion, auch als mittlerer Empfangswinkel bezeichnet, nicht exakt im Zenit liegt. Die gemessene radiale Verschiebung des Echos enthält dann einen horizontalen und einen vertikalen Anteil. Wie in Kapitel 2.2 gezeigt wurde, läßt sich die vertikale Windgeschwindigkeit aus der gemessenen radialen Geschwindigkeit berechnen, wenn die horizontale Geschwindigkeit und der mittlere Empfangswinkel bekannt sind. Der Empfangswinkel variiert zeitlich zufällig und läßt sich nicht allein aus den DBS-Messungen bestimmen. Das bedeutet, daß eine Korrektur der vertikalen Winde der DBS-Messungen nur möglich ist, wenn simultan SA-Messungen durchgeführt werden.

In Abb. 5.24 ist die in Kapitel 2.2 beschriebene Korrektur der Windwerte anhand von vier charakteristischen Höhen dargestellt. Zur besseren Veranschaulichung wurden die Werte hier nicht geglättet. In den Werten der unkorrigierten radialen Geschwindigkeiten (obere Abbildung) sind Zeiträume mit überwiegend positiven bzw. negativen Winden erkennbar, diese treten jedoch in den vier dargestellten Höhen nicht gleichzeitig auf. Außerdem ist eine starke Variabilität in Höhe und Zeit erkennbar. Wie in Kapitel 2.2 beschrieben wurde, müssen diese Werte zur korrekten Bestimmung der vertikalen Windgeschwindigkeiten korrigiert werden, da sie eine Projektion der horizontalen Geschwindigkeit in Richtung des mittleren Empfangswinkels enthalten.

In der mittleren Abbildung sind in einem kartesischen Koordinatensystem mit den Achsen $x = \sin \theta \sin \phi$ und $y = \sin \theta \cos \phi$ alle ermittelten Empfangswinkel θ und ϕ aus den vier Höhenkanäle über den gesamten Meßzeitraum durch Punkte symbolisiert. Es ist erkennbar, daß die Empfangssignale vorwiegend aus einem Zenitwinkelbereich von 0° bis 2° kommen. Ihre Häufigkeit verringert sich mit zunehmendem Zenitwinkel θ , ist aber weitgehend unabhängig vom Azimut ϕ . Die Länge der Linie an einem Empfangspunkt in Abb. 5.24 beschreibt die durch die volle Korrelationsanalyse ermittelte Geschwin-

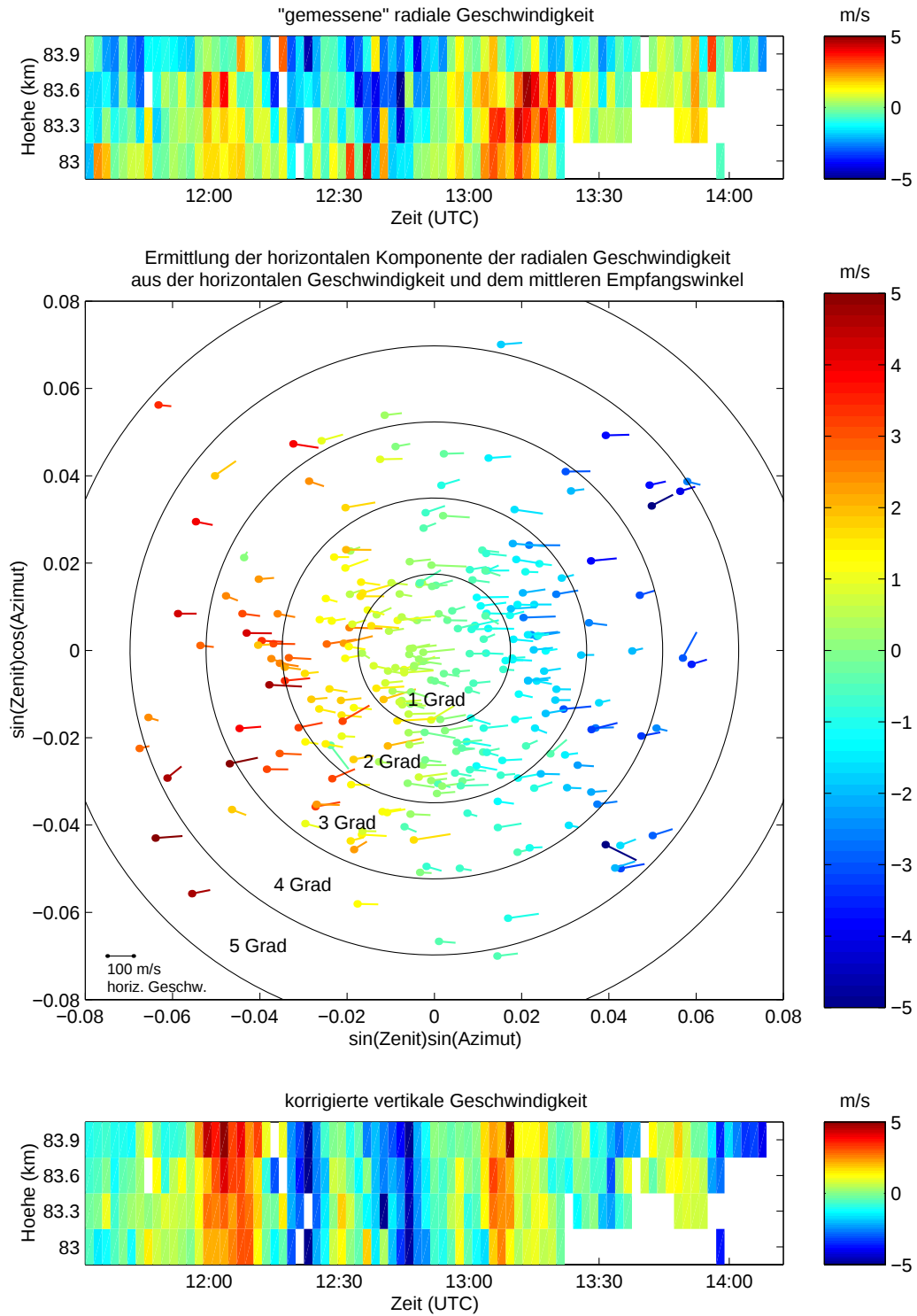


Abbildung 5.24: Korrektur der vertikalen Windgeschwindigkeiten am Beispiel von vier Höhenkanälen der SA-Messungen für ein PMSE-Ereignis am 15. Juli 1997: oben: zeitlicher Verlauf der unkorrigierten radialen Geschwindigkeit, mitte: Korrektur anhand der ermittelten horizontalen Geschwindigkeiten und mittleren Empfangswinkel, unten: zeitlicher Verlauf der korrigierten vertikalen Geschwindigkeiten

digkeit des horizontalen Windes, die Richtung der Linie entspricht der Richtung, aus der der horizontale Wind kommt. Es ist erkennbar, daß Ostwinde vorherrschen. Mit der Näherung $\cos \theta \simeq 1$ für Empfangszenitwinkel $\theta < 10^\circ$ kann Gleichung 2.66 in

$$V_R - w = V_h \cos(\phi - \phi_h) \sin \theta \quad (5.2)$$

$$= u \sin \phi \sin \theta + v \cos \phi \sin \theta \quad (5.3)$$

überführt werden. Damit ergibt das Produkt von V_h , $\cos(\phi - \phi_h)$ und $\sin \theta$ die Differenz zwischen der gemessenen radialen Geschwindigkeit V_R und der korrigierten vertikalen Geschwindigkeit w und damit den Fehler, den man macht, wenn man die gemessene radiale Geschwindigkeit als vertikale Windgeschwindigkeit annimmt.

Die Farbe der Punkte und Linien in Abb.5.24 (Mitte) symbolisiert diesen Wert. Um diesen Anteil der Projektion des horizontalen Windes in der gemessenen radialen Geschwindigkeit muß die radiale Geschwindigkeit korrigiert werden, damit korrekte vertikale Geschwindigkeiten bestimmt werden können. Es ist erkennbar, daß sich dieser Wert bei nahezu konstantem horizontalen Wind in Windrichtung linear in Abhängigkeit vom Abstand vom Koordinatenursprung ändert, während er orthogonal zur Windrichtung annähernd konstant bleibt. Das bedeutet in Übereinstimmung mit Gleichung 5.2, der Fehler bei der Abschätzung der vertikalen Geschwindigkeit ohne Anwendung der Korrektur ist um so größer, je weiter der Empfangswinkel in Windrichtung vom Koordinatenursprung entfernt liegt. Er beträgt im beschriebenen Beispiel bis zu ± 5 m/s, liegt damit im gleichen Größenbereich wie die ermittelten radialen Windwerte selbst und kann daher nicht vernachlässigt werden.

Die Auswirkungen der Korrektur sind in der unteren Abbildung ersichtlich. Die zeitliche Variabilität der korrigierten vertikalen Geschwindigkeit ist deutlich geringer als die der radialen Geschwindigkeit und Bereiche mit positiven bzw. negativen vertikalen Geschwindigkeiten treten nahezu gleichzeitig in allen vier Höhenkanälen auf. Dadurch werden Wellenstrukturen im vertikalen Windfeld wesentlich besser reproduziert.

Die Darstellungen der korrigierten vertikalen Winde der DBS-Messungen (Abb. 5.21) und der SA-Messungen (Abb. 5.23) zeigen eine deutliche Verbesserung der Feinstruktur. Es wird erkennbar, daß die wellenförmigen zeitlichen Variationen in allen beobachtbaren Höhen einer Schicht nahezu gleichzeitig auftreten, obwohl die Werte der einzelnen Höhen völlig unabhängig voneinander berechnet wurden. Die vertikale Geschwindigkeit in der unteren Schicht schwankt dabei über den gesamten Beobachtungszeitraum zwischen etwa -5 m/s und +5 m/s. Die Periodendauer beträgt etwa 30 bis 40 Minuten. Die obere Schicht zeigt etwas kleinere vertikale Winde (max. ± 2 m/s) und geringere Variationen im Meßzeitraum.

5.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß durch das DBS- und das SA-Verfahren die gleiche Struktur der PMSE-Schicht mit der maximalen Leistung im unteren Bereich um etwa 84 km und ab etwa 13:30 UTC eine zweite Schicht um 87 km beobachtet wird.

Beide Verfahren zeigen eine ausgeprägte Schichtstruktur mit einer erhöhten Aspekt-empfindlichkeit am unteren Rand der PMSE-Schicht. Die mit dem SA-Verfahren bestimmbaren charakteristischen Korrelationslängen liegen hier bei etwa 50-60 m, sonst bei etwa 20-40 m.

Mit dem SA-Verfahren läßt sich weiterhin aus der charakteristischen Korrelationszeit eine turbulente Geschwindigkeit abschätzen. Sie ist am Unterrand der PMSE-Schicht am geringsten und nimmt mit steigender Höhe zu. Isotropere Streuer befinden sich somit im oberen Bereich der PMSE-Schicht in qualitativer Übereinstimmung mit der Abnahme der Aspektempfindlichkeit. Zusätzlich ändert sich die turbulente Geschwindigkeit zeitlich im gesamten Höhenbereich. Mit dem Auftreten der Doppelschicht nimmt die turbulente Geschwindigkeit ab.

Die Horizontalwinde sind durch starke Ostwinde mit Geschwindigkeiten von bis zu 100 m/s und schwächere meridionale Winde bis ± 40 m/s bestimmt. Ihre Feinstruktur wird durch die SA-Messungen aufgrund der höheren räumlichen und zeitlichen Auflösung besser wiedergegeben.

Die aus vertikalen Antennenstrahlen bestimmten radialen Geschwindigkeiten müssen anhand der mittleren Empfangswinkel und der horizontalen Geschwindigkeiten korrigiert werden. Die Bestimmung der mittleren Empfangswinkel ist nur mit SA-Messungen möglich, die Korrektur kann bei simultanen Messungen aber auch auf die DBS-Werte angewandt werden. Die vertikalen Windgeschwindigkeiten zeigen dann starke vertikale Bewegungen über den gesamten Höhenbereich an, die auf Wellenaktivitäten mit hoher räumlicher und zeitlicher Stabilität zurückzuführen sind. Die Wellenlängen betragen im untersuchten Ereignis etwa 30-40 Minuten.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war es, erstmals die Möglichkeit simultaner Messungen nach den beiden grundlegenden Radarmesstechniken, Doppler Beam Swinging (DBS) und Spaced Antenna (SA) Verfahren, während des Auftretens polarer mesosphärischer Sommerechos aufzuweisen und die erhaltenen Ergebnisse miteinander zu vergleichen. Dabei wurde erläutert, daß beim SA-Verfahren gegenüber dem DBS-Verfahren einerseits ein höherer finanzieller und technischer Aufwand notwendig ist, andererseits aber physikalische Struktur- und Dynamikeigenschaften besser und mit höherer zeitlicher und räumlicher Auflösung bestimmt werden können. Insbesondere ist die korrekte Bestimmung des vertikalen Windes bei relativ breiten Antennenstrahlen nur über interferometrische Methoden bei der gleichzeitigen Messung mit räumlich getrennten Empfangsantennen möglich.

Nach einem kurzen Überblick über die Erdatmosphäre und über Möglichkeiten ihrer Beobachtung im ersten Kapitel wurden in Kapitel 2 die Messtechniken und die Verfahren zur Windbestimmung mit VHF-Radargeräten beschrieben. Bei der Doppler Beam Swinging Technik wird der Hauptstrahl der Sende/Empfangsantenne nacheinander in verschiedene Richtungen geschwenkt. Aus den Empfangssignalen kann ein dreidimensionales Windfeld bestimmt werden. Da die Messungen zeitlich versetzt und in räumlich getrennten Meßvolumen erfolgen, können nur entsprechend gemittelte Winde bestimmt werden. Bei der Spaced Antenna Technik werden Rückstreuungssignale gleichzeitig mit räumlich getrennten Antennen aus dem gleichen Meßvolumen empfangen. Aus ihnen läßt sich zum Beispiel durch eine vollständige Korrelationsanalyse (FCA) der horizontale Wind berechnen. Es wurde gezeigt, daß bei der FCA neben dem horizontalen Wind auch die Streueranisometrie und die zufällige turbulente Bewegung berücksichtigt und berechnet werden kann. Durch Interferometrie ist die Bestimmung mittleren Empfangswinkel der Rückstreuungssignale möglich. Anhand dieser Empfangswinkel und der horizontalen Geschwindigkeiten lassen sich die radialen Geschwindigkeiten korrigieren, die mit relativ breiten, vertikal ausgerichteten Antennenstrahlen gemessen werden.

Um mit dem ALOMAR SOUSY Radar Spaced Antenna Messungen durchführen zu können, mußte das bestehende System um neue Antennenfelder, Empfangskanäle

und Verarbeitungseinheiten erweitert werden. Dies wurde in Kapitel 3 beschrieben.

Im vierten Kapitel wurden die vom Autor durchgeführten Arbeiten zur Entwicklung eines Simultanbetriebes nach der Doppler Beam Swinging und der Spaced Antenna Technik erläutert. Die Ausrichtung der Antennenhauptkeule wurde mit radioastronomischen Verfahren überprüft. Dabei stellte sich heraus, daß sich der Radarstrahl exakt in die vorgegebene Richtung schwenken läßt. Weiterhin wurden die notwendigen Maßnahmen zur Empfängerkalibrierung beschrieben und gezeigt, daß die durch die Hardware bedingten Abweichungen gering waren und nicht durch prinzipiell mögliche rechentechnische Maßnahmen korrigiert werden mußten. Außerdem wurde gezeigt, daß anhand der mittleren Empfangswinkel auch eine Phasenkalibrierung vorgenommen werden kann.

Es wurde die Wahl der technischen Parameter erklärt und die günstigste Antennenfeldkonfiguration für SA-Messungen in der Mesosphäre ermittelt. Dabei wurde ein annähernd gleichseitiges Meßdreieck mit Seitenlängen von 22-25 Metern ausgewählt. Das vorgestellte Meßregime ermöglichte es, während des DBS-Empfangs aus der vertikalen Richtung gleichzeitig SA-Messungen durchzuführen.

Es wurde gezeigt, wie durch Impulse gestörte Empfangssignale und Spektren korrigiert werden können, um auswertbare Meßreihen zu erhalten. Außerdem wurde erläutert, daß aufgrund der relativ großen Abtastzeiten im Verhältnis zu den schmalen Autokorrelationsfunktionen und der dadurch bedingten geringen Anzahl nutzbarer Korrelationsfunktionswerte sich die notwendigen Approximationen der AKFs und damit auch die FCA-Windberechnungen sehr kompliziert gestalteten und die Werte fehlerbehaftet sind. Es wurde darauf hingewiesen, daß eine kürzere Abtastzeit, welche durch eine geringere Anzahl kohärenter Integrationen erreicht werden kann, die statistische Sicherheit der FCA-Windwerte deutlich verbessern würde. Schließlich wurden Fehlermöglichkeiten im Zusammenhang mit der Auswahl des Meßdreiecks erläutert und Auswahlwahlkriterien zur Qualität der Zwischen- und Endergebnisse der FCA-Windbestimmung beschrieben. Diese Bewertungskriterien führten zu einer deutlichen Reduzierung der Rechenzeit, zu zuverlässigeren SA-Ergebnissen und damit zu einer besseren Vergleichsmöglichkeit der nach verschiedenen Verfahren ermittelten Winde.

Die Ergebnisse der simultanen DBS- und SA-Messungen wurden in Kapitel 5 dargestellt. Dabei wurden sowohl die Signal-Rausch-Verhältnisse als auch die horizontalen und vertikalen Winde sowie die Aspektempfindlichkeitsparameter diskutiert. Es zeigte sich, daß die mit beiden Verfahren ermittelten Windergebnisse sehr gut übereinstimmen. Aufgrund der zeitgleichen Messungen im selben Meßvolumen vertikal über den Radarstandort werden durch SA-Messungen bessere räumliche und zeitliche Auflösungen erreicht und Feinstrukturen in den Meßergebnissen erkennbar.

Es wurde auch gezeigt, daß zur korrekten Bestimmung des vertikalen Windes die

im radialen Wind enthaltene horizontale Komponente eliminiert werden muß. Das ist nur möglich, wenn der mittlere Empfangswinkel des Echos bekannt ist. Dieser Winkel kann durch interferometrische Methoden aus den SA-Signalen bestimmt werden. Es wurde gezeigt, daß der so ermittelte Empfangswinkel auch zur Korrektur der vertikalen DBS-Winde genutzt werden kann. Im Gegensatz zu den radialen Winden zeigten die vertikalen Winde nach der Korrektur Signaturen mit besserer zeitlicher und räumlicher Auflösung. Ausgeprägte Wellenstrukturen konnten über den gesamten Höhenbereich erkannt werden.

Die mit beiden Verfahren bestimmten Aspektempfindlichkeiten zeigten ebenfalls ein ähnliches Verhalten. Die aspektempfindlichsten Streuer befinden sich an der Unterseite der PMSE-Schicht. Es wurde aber auch ein Offset zwischen den absoluten Werten erkennbar. Die häufigsten Aspektempfindlichkeitswerte der SA-Messungen lagen bei etwa $3-4^\circ$, die der DBS-Messungen dagegen bei etwa $6-8^\circ$. Eine Ursache hierfür kann unter anderem sein, daß die Approximation der Rückstreuung in Abhängigkeit vom Zenitwinkel durch eine Gaußkurve ungenau ist und nur für einen kleinen Zenitwinkelbereich mit der Realität übereinstimmt.

Weiterhin wurde gezeigt, daß durch das FCA-Verfahren aus den SA-Daten sehr einfach eine Abschätzung der zeitliche Streueigenschaften und der Turbulenz ermittelt werden können.

Im fünften Kapitel wurden außerdem Ergebnisse raketengestützter Windmessungen mittels Folienwolken mit denen der DBS- und SA-Radarmessungen verglichen. Es wurde gezeigt, daß die meridionalen Winde sehr gut übereinstimmen und die Abweichungen der zonalen Windwerte gering sind und auf die geometrischen Entfernungen der Meßvolumina zurückgeführt werden könnten. Damit wurden die ermittelten Radarmeßwerte durch unabhängige Messungen bestätigt.

Aus den Erfahrungen der Datenanalyse der Messungen mit dem ALOMAR SOUSY Radar 1997 sollten bei der Durchführung zukünftiger simultaner DBS- und SA-Messungen folgende Punkte berücksichtigt werden:

1. Eine bessere Trennung von Signal- und Rauschanteil und genauere Ermittlung der Maximalwerte der Korrelationsfunktionen läßt sich durch eine Verkürzung der Abtastzeiten und der damit verbundenen Zunahme der Werte der Korrelationsfunktionen, die für eine Interpolation nutzbar sind, erreichen. Die Abtastzeit sollte deutlich unter 0.1 s liegen. Dies ist durch eine Reduzierung der kohärenten Integrationen möglich. Das geringere Signal-Rausch-Verhältnis kann dann durch die zusätzlich zur Verfügung stehenden Korrelationswerte mehr als kompensiert werden.
2. Die möglichst genaue Angleichung der Leistungs- und Übertragungseigenschaften der einzelnen Antennen, Empfänger und Empfangskanäle kann den sonst

notwendigen rechentechnischen Aufwand stark reduzieren. Außerdem sollte darauf geachtet werden, daß weder Hardware- noch Softwarekomponenten in die Nähe der Übersteuerung oder Sättigung gelangen, da sich die Rückstreuleistung polarer mesosphärischer Sommerechos sehr schnell über mehrere Zehnerpotenzen verändern kann.

3. Insbesondere für SA-Messungen könnte der Einsatz größerer Empfangsantennen das Signal-Rausch-Verhältnis erhöhen und die Auswertbarkeit der Signale verbessern.
4. Neben dem FCA-Verfahren können auch andere SA-Methoden, wie die volle Spektralanalyse, die räumliche Korrelationsanalyse, die verschiedenen Arten interferometrischer Messungen und das Post-Beam-Steering (PBS) zur Windbestimmung genutzt werden. Durch ihren Einsatz könnten möglicherweise auch Winde berechnet werden, wenn einige Auswahlkriterien der vollen Korrelationsanalyse nicht erfüllt werden. Für eine Beschreibung dieser in Abbildung 2.4 zusammengefaßten Verfahren wird auf die Literaturangaben verwiesen.
5. Beim DBS-Verfahren sollte überprüft werden, welchen Einfluß der Schwenkwinkel auf die Ergebnisse der PMSE-Messungen und insbesondere auf die Aspektempfindlichkeit hat. Dies ist allerdings nur mit Radars möglich, die um mehrere Zenitwinkel schwenkbar sind und daher einen höheren technischen Aufwand erfordern. Wenn der Radarstrahl jedoch bei mehrkanaligem Empfang durch Software geformt und geschwenkt werden kann, könnte auch das PBS-Verfahren (z. B. RÖTTGER und IERKIC, 1985; KUDEKI und WOODMAN, 1990) kostengünstig die direkte Bestimmung des effektiven Schwenkwinkels und damit eine bessere Abschätzung der Aspektempfindlichkeit ermöglichen.

Literaturverzeichnis

- ADAMS, G. W. und J. W. BROSNAN. Mesospheric observations using a 2.66 MHz radar as an Doppler interferometer. *Journal of Geophysical Research*, 91 (A2), 1671–1683, 1986.
- ATLAS, D. *Advances in Geophysics*, Kapitel 10, Seiten 317–438. Academic New York, 1964.
- BALSLEY, B. B. und K. S. GAGE. The MST radar technique: Potential for middle atmosphere studies. *Pure and Applied Geophysics*, 118, 452–493, 1980.
- BEYNON, W. J. G. und J. C. WRIGHT. Ionospheric drift measurements on adjacent aerial arrays. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 31 (1), 119–134, 1969.
- BRASSEUR, G. und S. SOLOMON. *Aeronomy of the middle atmosphere, Chemistry and Physics of the Stratosphere and Mesosphere*. Reidel, Dordrecht, Holland, zweite Auflage, 1986.
- BREMER, J., P. HOFFMANN, W. SINGER, C. E. MEEK und R. RÜSTER. Simultaneous PMSE observations with ALOMAR-SOUSY and EISCAT-VHF radar during the ECHO-94 campaign. *Geophysical Research Letters*, 23, 1075–1078, 1996.
- BRIGGS, B. H. On the analysis of moving patterns in geophysics -I. Correlation analysis. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 30, 1777–1788, 1968.
- BRIGGS, B. H. Radar observations of atmospheric winds and turbulence: A comparison of techniques. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 42, 823–833, 1980.
- BRIGGS, B. H. The analysis of spaced sensor records by correlation techniques. In *Handbook for MAP*, Band 13, Seiten 166–186. SCOSTEP Secr., Univ. of Ill., Urbana, 1984.
- BRIGGS, B. H. Radar measurements of aspect sensitivity of atmospheric scatterers using spaced-antenna correlation techniques. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 54, 153–165, 1992.

- BRIGGS, B. H. und R. A. VINCENT. Some theoretical considerations on remote probing of weakly scattering irregularities. *Australian Journal of Physics*, 26, 805–814, 1973.
- BRIGGS, B. H. und R. A. VINCENT. Spaced-antenna analysis in the frequency domain. *Radio Science*, 27 (2), 117–129, 1992.
- CHANDRA, H. und B. H. BRIGGS. The effect of filtering on ionospheric drift parameters determined by full correlation analysis. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 40, 541–548, 1978.
- CHO, J. Y. N. und M. C. KELLEY. Polar mesosphere summer radar echoes. observations and current theories. *Rew. Geophys.*, 31, 243–265, 1993.
- CHO, J. Y. N. und J. RÖTTGER. An updated review of polar mesosphere summer echoes: observation, theory, and their relationship to noctilucent clouds and subvisible aerosols. *Journal of Geophysical Research*, 102 (D2), 2001–2020, 1997.
- CZECHOWSKY, P., I. M. REID und R. RÜSTER. VHF radar measurements of the aspect sensitivity of the summer polar mesopause echoes over Andenes (69n,16e),norway. *Geophysical Research Letters*, 15, 1259–1262, 1988.
- CZECHOWSKY, P., G. SCHMIDT und R. RÜSTER. The mobile SOUSY doppler radar: Technical design and first results. *Radio Science*, 19 (1), 441–450, 1984.
- ECKLUND, W. L. und B. B. BALSLEY. Long-term observations of the arctic mesosphere with the MST radar at Poker Flat, Alaska. *Journal of Geophysical Research*, 86 (A9), 7775–7780, 1981.
- FARLEY, D. T., H. M. IERKIC und B. G. FEJER. Radar interferometry: A new technique for studying plasma turbulence in the ionosphere. *Journal of Geophysical Research*, 86 (A3), 1467–1472, 1981.
- FEDOR, L. S. A statistical approach to the determination of threedimensional ionospheric drift. *Journal of Geophysical Research*, 72, 5401–5415, 1967.
- FRANKE, P. M., D. THORSEN, M. CHAMPION, S. FRANKE und E. KUDEKI. Comparisons of time- and frequency-domain techniques for wind velocity estimation using multiple-receiver mf radar data. *Geophysical Research Letters*, 17 (12), 2193–2196, 1990.
- GADSDEN, M. und W. SCHRÖDER. *Noctilucent Clouds*. Springer Verlag, New York, 1989.

- GAGE, K. S. und B. B. BALSLEY. On the scattering and reflection mechanisms contributing to clear air radar echos from the troposphere, stratosphere and mesosphere. *Radio Science*, 15, 243–258, 1980.
- GOLLEY, M. und D. E. ROSSITER. Some tests of methods of analysis of ionospheric drift records using an array of 89 aerials. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 32, 1215–1233, 1970.
- GRAHL, B.-H. Die Positionsgenauigkeit des 25-m-Radioteleskops der Sternwarte Bonn. *Telefunken-Zeitung*, 122, 226–232, 1958.
- HOCKING, W. K. On the extraction of atmospheric turbulence parameters from radar backscatter Doppler spectra, I. Theory. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 45, 89–102, 1983.
- HOCKING, W. K. Radar studies of small scale structure in the upper middle atmosphere and lower ionosphere. *Advances in Space Research*, 7, 327–338, 1987.
- HOCKING, W. K. Recent advances in radar instrumentation and techniques for studies of the mesosphere, stratosphere and troposphere. *Radio Science*, 32 (6), 2241–2270, 1997.
- HOCKING, W. K., S. FUKAO, T. TSUDA, M. YAMAMOTO, T. SATO und S. KATO. Aspect sensitivity of stratospheric VHF radio wave scatterers, particularly above 15-km altitude. *Radio Science*, 25 (4), 613–627, 1990.
- HOCKING, W. K., P. T. MAY und J. RÖTTGER. Interpretation, reliability and accuracies of parameters deduced by the spaced antenna method in middle atmosphere applications. *Pure and Applied Geophysics*, 130, 571–604, 1989.
- HOCKING, W. K., R. RÜSTER und P. CZECHOWSKI. Absolute reflectivities and aspect sensitivities of VHF radio wave scatterers measured with the SOUSY radar. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 48, 131–144, 1986.
- HOFFMANN, P. *Bestimmung des Windfeldes im Höhenbereich 70 bis 90 km nach Messungen partieller Reflexionen mit einem FM-CW Radar*. Dissertation, Universität Leipzig, 1991.
- HOLDSWORTH, D. A. *Signal analysis with applications to atmospheric radars*. Dissertation, Univ. of Adelaide, Adelaide, Australien, 1995a.
- HOLDSWORTH, D. A. A simple model of atmospheric backscatter: Description and application to the full correlation analysis of spaced antenna data. *Radio Science*, 30 (4), 1263–1280, 1995b.

- HOLMES, N. E. *An ultrasonic image forming system for ionospheric studies*. Dissertation, University of Adelaide, Adelaide, Australien, 1974.
- HOOPER, D. und L. THOMAS. Aspect sensitivity of VHF scatterers in the troposphere and stratosphere from comparisons of powers in off-vertical beams. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 57 (6), 655–663, 1995.
- HUAMAN, M. M. und B. B. BALSLEY. Long-term-mean aspect sensitivity of PMSE determined from Poker Flat MST radar data. *Geophysical Research Letters*, 25 (7), 947–950, 1998.
- KOSCIELNY, A. J., R. J. DOVIAK und R. RABIN. An evaluation of the accuracy of some radar wind profiling techniques. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technologies*, 1 (309-320), 1984.
- KUDEKI, E. und R. F. WOODMAN. A post-statistic steering technique for MST radar applications. *Radio Science*, 25 (4), 591–594, 1990.
- KUGEL, R. P., G. SCHMIDT und R. F. WOODMAN. Die Prozeßsteuerung und Datenerfassung der SOUSY-VHF-Radaranlage. *Kleinheubacher Berichte*, 21, 369–378, 1978.
- LÜBKEN, F.-J. Simultaneous measurements of noctilucent clouds, polar mesosphere summer echoes, and the temperature near the mesopause. In *Proc. of the 12th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research*, Lillehammer, Seiten 66–67. 1995.
- LESICAR, D. *Study of the structure of partial reflection radar scatterers and their application in atmospheric measurements*. Dissertation, Univ. of Adelaide, Adelaide, Australia, 1993.
- LESICAR, D. und W. K. HOCKING. Studies of seasonal behaviour of the shape of mesospheric scatterers using a 1.98 MHz radar. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 54 (3/4), 295–309, 1992.
- MAY, P. T. Spaced antenna versus Doppler radars: A comparison of techniques revisited. *Radio Science*, 25, 1111–1119, 1990.
- MEEK, C. E. An efficient method for analysing ionospheric drifts data. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 42, 835–839, 1980.
- MEEK, C. E. Triangle size effect in spaced antenna wind measurements. *Radio Science*, 25 (4), 641–648, 1990.

- MEEK, C. E. und A. H. MANSON. Mesospheric motions observed by simultaneous medium-frequency interferometer and spaced antenna experiments. *Journal of Geophysical Research*, 92D, 5627–5637, 1987.
- MÜLLEMAN, A. und F. J. LÜBKEN. Persönliche Mitteilung, 1998.
- MONTENBRUCK, O. und T. PFLEGER. *Astronomie mit dem Personalcomputer*. Springer Verlag, 1991.
- NUSSBAUMER, V., K. H. FRICKE, M. LANGER, W. SINGER und U. VON ZAHN. First simultaneous and common volume observations of noctilucent clouds and polar mesosphere summer echoes by lidar and radar. *Journal of Geophysical Research*, 101 (D14), 19161–19167, 1996.
- PALMER, R. D., M. F. LARSEN, S. FUKAO und M. YAMAMOTO. On the relationship between aspect sensitivity and spatial interferometric in-beam incidence angles. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 60, 37–48, 1998.
- PETERSON, V. L. und B. B. BALSLEY. Clear air Doppler radar measurements of the vertical component of wind velocity in the troposphere and stratosphere. *Geophysical Research Letters*, 6, 933, 1979.
- PRIESE, J. Über die Ermittlung der Antenneneigenschaften des Adlershofer 36-m-Radioteleskopes bei einer Wellenlänge von 53,67 cm. *Hochfrequenztechnik und Elektroakustik*, 73 (3), 79–90, 1964.
- RICHMOND, A. D. The ionosphere. In S. I. Akasofu und Y. Kamide, Herausgeber, *The solar wind and the Earth*. 1987.
- RISHBETH, H. und O. K. GARRIOT. *Introduction to ionospheric physics*, Band 14. Academic Press, New York, 1969.
- RÜSTER, R. Analysis and interpretation of VHF-radar data. *Annales Geophysicae*, 12, 725–732, 1994.
- RÜSTER, R. und I. M. REID. VHF radar observations of the dynamics of the summer polar mesopause region. *Journal of Geophysical Research*, 95, 10005–10016, 1990.
- RÜSTER, R. und R. F. WOODMAN. Digital filtering, calibration and correlation analysis of radar-echoes from tropo- and stratosphere. *Kleinheubacher Berichte*, 21, 239–246, 1978.
- RÖTTGER, J. Investigations of lower and middle atmosphere dynamics with spaced antenna drifts radars. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 43, 277–292, 1981.

- RÖTTGER, J. Polar mesosphere summer echoes: Dynamics and aeronomy of the mesosphere. *Advances in Space Research*, 14 (9), 123–137, 1994.
- RÖTTGER, J. und H. M. IERKIC. Postset beam steering and interferometer applications of VHF radars to study winds, waves and turbulence in the lower and middle atmosphere. *Radio Science*, 20 (6), 1461–1480, 1985.
- RÖTTGER, J. und C. LAHOZ. Characteristics of polar mesosphere summer echoes (pmse) observed with the EISCAT 224-MHz radar and possible explanations of their origins. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 52, 893–906, 1990.
- RÖTTGER, J. und M. F. LARSEN. UHF/VHF radar techniques for atmospheric research and wind profiler applications. In D. Atlas, Herausgeber, *Radar in Meteorology*, Seiten 235–281. American Meteorological Society, Boston, 1990.
- RÖTTGER, J. und R. A. VINCENT. VHF radar studies of tropospheric velocities and irregularities using spaced antenna techniques. *Geophysical Research Letters*, 5(11), 917–920, 1978.
- SCHMIDT, G., R. RÜSTER und P. CZECHOWSKY. Complementary code and digital filtering for detection of weak VHF radar signals from the middle atmosphere. *IEEE Trans. Geosci. Electron.*, GE-17, 154–161, 1979.
- SCHMINDER, R. und D. KÜRSCHNER. D1 LF Wind measurements in the 90 to 100 km height range. In *Handbook for MAP*, Band 13, Seiten 248–261. SCOSTEP Secr., University of Illinois, Urbana, 1984.
- SINGER, W., D. KEUER, P. HOFFMANN, P. CZECHOWSKY und G. SCHMIDT. The ALOMAR SOUSY radar: technical design and further developments. In *Proc. of the 12th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research*, Lillehammer, Seiten 409–415. 1995.
- SPRENGER, K. und R. SCHMINDER. On some relationships between correlation analysis and similar fade analysis results of drift measurements in the lower ionosphere. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 31, 1085–1098, 1969.
- STIRNER, E. *Antennen, Band 3: Meßtechnik*. Dr. Alfred Hüthig Verlag, Heidelberg, 1985.
- THOMAS, G. E. Mesospheric clouds and the physics of the mesopause region. *Rev. Geophys.*, 29, 553–575, 1991.

- THORSEN, D., S. FRANKE und E. KUDEKI. A new approach to MF radar interferometry for estimating mean winds and momentum flux. *Radio Science*, 32 (2), 707–726, 1997.
- TSUDA, T., T. E. VANZANDT und H. SAITO. Zenith-angle dependance of VHF specular reflection echoes in the lower atmosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 59 (7), 761–775, 1997.
- VAN BAELEN, J. S. und A. D. RICHMOND. Radar interferometry technique: Three-dimensional wind measurement theory. *Radio Science*, 26 (5), 1209–1218, 1991.
- VAN BAELEN, J. S., T. TSUDA, A. D. RICHMOND, S. K. AVERY, S. KATO und S. FUKAO. SAD and interferometry analysis with the MU radar: Simulations and preliminary results. In *Handbook for MAP*, Band 28, Seiten 416–423. SCOSTEP Secr., Univ. of Ill., Urbana, 1989.
- VAN BAELEN, J. S., T. TSUDA, A. D. RICHMOND, S. K. AVERY, S. KATO, S. FUKAO und M. YAMAMOTO. Comparison of VHF doppler beam swinging and spaced antenna observations with the MU radar: First results. *Radio Science*, 25 (4), 629–640, 1990.
- VANDEPEER, B. G. W. *A new Doppler radar for upper atmospheric research*. Dissertation, University of Adelaide, Adelaide, Australien, 1993.
- VINCENT, R. A. und J. RÖTTGER. Spaced antenna VHF radar observations of tropospheric velocities and irregularities. *Radio Science*, 15(2), 319–335, 1980.
- WIDDEL, H. U. Foil clouds as a tool for measuring wind structure and irregularities in the lower thermosphere (92–50 km). *Radio Science*, 20 (4), 803–812, 1985.
- WIDDEL, H.-U. Foil chaff clouds as a tool for in-situ measurements of atmospheric motions in the middle atmosphere: their flight behaviour and implications for radar tracking. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 52 (2), 89–101, 1990.
- WOODMAN, R. F. und A. GUILLEN. Radar observations of winds and turbulence in the stratosphere and mesosphere. *Journal of the Atmospheric Science*, 31, 493–505, 1974.
- VON ZAHN, U. Achievements of ALOMAR. In *Proc. of the 13th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research*, Seiten 141–160. 1997.

VON ZAHN, U., E. V. THRANE und R. SKATTEBOE. The ALOMAR facility: status and outlook. In *Proc. of the 12th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research, Lillehammer*, Seiten 379–385. 1995.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde am Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik Kühlungsborn angefertigt. Für die Themenstellung, Ermöglichung und Betreuung dieser Arbeit möchte ich mich bei Herrn Dr. W. Singer herzlich bedanken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. J. Röttger für die zahlreichen und überaus fruchtbaren Diskussionen und Anregungen. Durch seine Hinweise konnte diese Arbeit an vielen Stellen bereichert werden.

Allen Mitarbeitern der Arbeitsgruppe Radarsondierung des Instituts danke ich für das angenehme und freundschaftliche Arbeitsklima. Besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr. J. Bremer, Herrn Dr. P. Hoffmann und Herrn Dr. W. Singer für die wissenschaftlichen Diskussionen, Hinweise und Anregungen, bei Herrn Dr. P. Hoffmann für die Bereitstellung von Ergebnissen nach dem DBS-Verfahren und bei Herrn Dr. R. Latteck und K. Schulz-Schöllhammer für die Korrekturen und täglichen Motivationen.

Großer Dank gilt auch Herrn H. Bardey und Herrn D. Keuer für die Gewährleistung der technischen Möglichkeiten der Meßexperimente sowie Frau U. Scholze, Frau J. Schacht, Herrn T. Linow und Herrn B. Schmidt für die tatkräftige Unterstützung in Zusammenhang mit der Rechentechnik und der Bereitstellung der Daten.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, daß ich die vorliegende Dissertation selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Kühlungsborn, den 04.02.1999