

Deutscher Wetterdienst



Berichte des Deutschen Wetterdienstes

209

**Genauigkeit und Verfügbarkeit
von Windprofiler/RASS-Messungen**

von
U. Görldorf

Zur Herstellung dieses Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

ISSN 0072-4130

ISBN 3-88148-358-6

Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck, auch auszugsweise, verboten. Kein Teil dieses Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Deutschen Wetterdienstes in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm, oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Für den Inhalt ist der Autor verantwortlich.

Herausgeber und Verlag:

Deutscher Wetterdienst
Frankfurter Str. 135
63067 Offenbach am Main

Anschrift des Autors:

Dr. Ulrich Görldorf
Deutscher Wetterdienst
Meteorologisches Observatorium Lindenberg
Am Observatorium 12
15864 Lindenberg

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis

Zusammenfassung

Abstract

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Motivation und Ziel der Arbeit | 5 |
| 1.2 | Kurzer geschichtlicher Rückblick und gegenwärtiger Stand der Windprofiler/RASS Nutzung | 6 |
| 2 | Theoretische Grundlagen | 10 |
| 2.1 | Elektromagnetische Wellen in ihrer Wechselwirkung mit der Atmosphäre . . | 10 |
| 2.1.1 | Streuung an Klarluft-Echos | 10 |
| 2.1.2 | Streuung an Hydrometeoren | 13 |
| 2.1.3 | Relevanz der Streuprozesse für Windprofiler | 14 |
| 2.1.4 | Brechungsindexvariationen durch akustische Wellen - Das RASS-Prinzip | 16 |
| 2.2 | Das Empfangssignal unter Berücksichtigung der Systemeigenschaften | 19 |
| 2.2.1 | Radargleichung für Volumenrückstreuung | 19 |
| 2.2.2 | Das Dopplerprinzip | 22 |
| 2.3 | Signalverarbeitung und Ableitung meteorologischer Größen | 25 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.3.1 | Ableitung der Momente | 26 |
| 2.3.2 | Berechnung des Windes und der virtuellen Temperatur | 29 |
| 2.3.2.1 | Konsensus-Mittelung | 30 |
| 2.3.2.2 | Berechnung der kartesischen Windkomponenten | 30 |
| 2.3.2.3 | Berechnung der virtuellen Temperatur | 32 |
| 2.3.3 | Qualitätskontrolle | 35 |
| 3 | Beschreibung der Meßsysteme und des Datenmaterials | 36 |
| 3.1 | Meßsysteme | 36 |
| 3.1.1 | Windprofiler Radar/RASS | 36 |
| 3.1.1.1 | Technischer Aufbau | 37 |
| 3.1.1.2 | Signalverarbeitung und Systemsteuerung | 41 |
| 3.1.2 | Rawinsonde | 42 |
| 3.1.3 | Fesselballonsystem | 44 |
| 3.2 | Modelle | 46 |
| 3.3 | Datenmaterial | 46 |
| 4 | Bestimmung der Meßgenauigkeit | 49 |
| 4.1 | Zur Definition der Meßfehler | 49 |
| 4.2 | Fehlerursachen bei der Wind- und Temperaturmessung | 54 |
| 4.2.1 | Meßfehler bei der Momentschätzung | 54 |
| 4.2.2 | Interne und externe Störeinflüsse | 55 |
| 4.2.2.1 | Bodenechos (Groundclutter) | 55 |
| 4.2.2.2 | Eigenclutter - Entfernungsnebenkeulen bei der Pulskodierung | 56 |
| 4.2.2.3 | Elektromagnetische Interferenz | 56 |
| 4.2.2.4 | Punktziele | 57 |
| 4.2.2.5 | Zugvögel | 57 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.2.2.6 | Niederschlag | 58 |
| 4.2.3 | Interpretationsfehler | 59 |
| 4.2.3.1 | Verletzung der Homogenitätsvoraussetzung | 59 |
| 4.2.3.2 | Fehlerhafte zeitliche und räumliche Zuordnung der Meßwerte | 59 |
| 4.2.3.3 | Fehler infolge der endlichen Ausdehnung des Meßvolumens | 60 |
| 4.3 | Bestimmung der Meßgenauigkeit nach den verschiedenen Methoden | 61 |
| 4.3.1 | Ableitung der Meßgenauigkeit nach dem Gesetz der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung | 61 |
| 4.3.2 | Vergleiche mit Rawinsondierungen | 64 |
| 4.3.2.1 | Wind | 65 |
| 4.3.2.2 | Virtuelle Temperatur | 77 |
| 4.3.3 | Vergleich mit Modellen | 80 |
| 5 | Verfahren zur Verbesserung der Genauigkeit von RASS-Temperaturmessungen | 86 |
| 5.1 | Allgemeines | 86 |
| 5.2 | Fehlerursachen und entsprechende Korrekturen | 87 |
| 5.2.1 | Ungenauigkeiten der Signalverarbeitung | 87 |
| 5.2.2 | Approximationen in den Gleichungen zur Berechnung der virtuellen Temperatur aus den spektralen Informationen | 91 |
| 5.2.2.1 | Abhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von Temperatur und Luftfeuchte | 91 |
| 5.2.2.2 | Annahme eines idealen Gases | 93 |
| 5.2.2.3 | Gesamteffekt der Approximationen | 96 |
| 5.2.3 | Vernachlässigung des Vertikalwindes | 98 |
| 5.2.4 | Vereinfachungen in der Beschreibung der Wechselwirkung von elektromagnetischen und akustischen Wellen | 101 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.2.4.1 | Nichtberücksichtigung der Systemgeometrie, d.h. des Abstandes zwischen (virtueller) Schallquelle und Vertikalachse der Radarantenne | 102 |
| 5.2.4.2 | Vernachlässigung des Horizontalwindes | 102 |
| 5.2.4.3 | Vernachlässigung des Horizontalwindes in Verbindung mit Turbulenz | 103 |
| 5.2.4.4 | Vernachlässigung der Turbulenz | 103 |
| 5.2.5 | Fehler der räumlichen und zeitlichen Zuordnung der Meßwerte | 105 |
| 5.2.5.1 | Variabler Höhenfehler infolge des Gradienten in der Reflektivität | 105 |
| 5.2.5.2 | Experimentelle Bestätigung des variablen Höhenfehlers . . . | 111 |
| 5.2.5.3 | Konstanter Höhenfehler | 116 |
| 5.3 | Verifikation der Korrekturen durch Vergleiche mit Radiosondenmessungen . | 117 |
| 5.3.1 | Datensatz 1: August bis Oktober 1995 | 118 |
| 5.3.2 | Datensatz 2: Januar bis Dezember 1997 | 122 |
| 5.3.3 | Meßbeispiele | 127 |
| 5.3.4 | Zusammenfassung der Verifikationsergebnisse | 129 |
| 6 | Verfügbarkeit der Windprofiler/RASS-Messungen | 133 |
| 6.1 | Wind | 134 |
| 6.1.1 | Theorie | 134 |
| 6.1.2 | Ergebnisse | 136 |
| 6.2 | Virtuelle Temperatur | 139 |
| 6.2.1 | Theorie | 139 |
| 6.2.2 | Ergebnisse | 142 |
| 7 | Schlußfolgerungen | 144 |
| A | Abbildungen zum Vergleich WPR/RASS - Rawinsonde | 157 |

| | | |
|----------|---|------------|
| B | Approximationsgleichung zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit | 163 |
| C | Abbildungen zur Verfügbarkeit von WPR/RASS | 165 |

Symbolverzeichnis

Variablen

| | |
|-------------|---|
| δn | Funktion für Brechungsindex-Irregularitäten |
| \vec{v}_H | Vektor der horizontalen Windgeschwindigkeit |
| A_e | effektive Antennenfläche |
| B_n | Bandbreite des Empfängers |
| c | Lichtgeschwindigkeit |
| c_0 | Lichtgeschwindigkeit im Vakuum |
| c_a | Schallgeschwindigkeit |
| c_n^2 | Strukturkonstante des Brechungsindex |
| c_T | Strukturkonstante der Temperatur |
| c_v | Strukturkonstante des Windes |
| c_{na}^2 | Strukturkonstante des akustischen Brechungsindex |
| D_B | höhenabhängige Breite des Radarstrahls |
| D_i | Durchmesser des i-ten Tropfens |
| D_n | Strukturfunktion |
| e | Wasserdampfpartialdruck |
| E_R | Feldstärke des rückgestreuten elektrischen Feldes |
| E_T | Feldstärke des einfallenden elektrischen Feldes |
| f | Frequenz |
| f_d | Dopplerfrequenz |
| f_N | Nyquist-Frequenz |
| G_a | akustische Amplitudenmodulationsfunktion |
| G_e | elektromagnetische Amplitudenmodulationsfunktion |
| g_t | Antennengewinn |
| h | Höhe |
| k | Boltzmannkonstante |
| K | Konstante |
| k_a | akustische Wellenzahl |
| k_e | Wellenzahl des elektrischen Feldes |
| l | Hilfsvariable |
| m | komplexer Brechungsindex |
| M | molare Masse |
| M_n | n-tes Moment |
| n | Brechungsindex |
| N | Hilfsvariable |

| | |
|-----------|--|
| N_F | Anzahl der Meßpunkte |
| N_k | Anzahl der kohärenten Integrationen |
| N_n | Refraktivität |
| N_s | Anzahl der spektralen Integrationen |
| N_T | Teilchendichte |
| N_u | Gesamtanzahl der Messungen |
| N_{HTS} | Anzahl der Höhentore |
| p | Luftdruck |
| P_n | Rauschleistung |
| P_r | Rückstreuleistung |
| P_t | Sendeleistung |
| r | Entfernung |
| R | Abstand zwischen elektromagnetischer Quelle und dem Streuvolumen |
| r_6 | 6 dB Höhenintervall |
| R_a | allgemeine Gaskonstante |
| R_s | spezielle Gaskonstante |
| S_i | Leistungsdichte |
| S_r | Leistungsdichte an der Empfangsantenne |
| t | Zeit |
| T | absolute Temperatur |
| T_p | Pulswiederholperiode |
| T_s | Schalltemperatur |
| T_v | virtuelle Temperatur |
| T_{sys} | Systemrauschtemperatur |
| u | Zonalkomponente des Windvektors |
| v | Meridional Komponente des Windvektors |
| V | Volumen |
| v_N | Nyquist-Geschwindigkeit |
| v_r | Radialgeschwindigkeit |
| W | Gewichtsfunktion |
| Z | Reflektivitätsfaktor |

Griechische Buchstaben

| | |
|-------------------|--|
| η | Volumenreflektivität |
| η_a | Reflektivität infolge akustischer Wellen |
| $f(\theta, \phi)$ | Antennenstrahlungsdiagramm |

| | |
|----------------|---|
| γ | Verhältnis der spezifischen Wärmen |
| Γ | Gammafunktion |
| λ | Wellenlänge |
| ϕ | Elevationswinkel |
| ρ | Luftdichte |
| ρ_0 | transversale Kohärenzlänge |
| ρ_t | horizontale Entfernung zwischen Schallquelle und Radarantenne |
| σ | Streuquerschnitt |
| σ_w | spektrale Breite |
| σ_x | Standardabweichung |
| σ_{v_n} | mit dem Nyquistintervall normierte spektrale Breite |
| τ_s | Zeit zwischen Senden und Empfang eines Pulses |
| θ | Azimutwinkel |
| ω | Vertikalkomponente des Windvektors |
| ω_a | akustische Kreisfrequenz |
| ω_b | Dopplerfrequenz |
| ω_e | elektromagnetische Kreisfrequenz |
| τ | Pulslänge |

Abkürzungen

| | |
|------|--|
| DBS | Doppler Beam Swinging |
| LAP | Lower Atmospheric Profiler (1290 MHz Windprofiler-Radar) |
| MBDV | mittlerer Betrag des Differenzvektors |
| MOL | Meteorologisches Observatorium Lindenberg |
| RASS | Radio-Acoustic-Sounding System |
| SNR | Signal to Noise Ratio |
| STD | Standardabweichung |
| TWP | Tropospheric Windprofiler (482 MHz Windprofiler-Radar) |
| var | Varianz |
| WPR | Windprofiler-Radar |

Zusammenfassung

Windprofiler Radar/RASS (WPR/RASS) sind bodengebundene Fernerkundungssysteme, die Vertikalprofile von Wind und Temperatur mit einer hohen zeitlichen und vertikalen Auflösung messen. In der vorliegenden Arbeit ist die Meßgenauigkeit und Verfügbarkeit eines 1290 MHz WPR/RASS (LAP) und eines 482 MHz WPR/RASS (TWP) auf der Grundlage mehrjähriger Messungen untersucht worden. Für die Temperaturmessung wurde eine Korrektur entwickelt, die zu einer signifikanten Verbesserung der Meßgenauigkeit führt.

Der vertikale Meßbereich von WPR/RASS und dessen zeitliche Schwankungen werden wesentlich durch die Systemeigenschaften und die atmosphärischen Bedingungen bestimmt. Mit dem TWP ist es möglich, den Wind mit einer vertikalen Auflösung von 500 m (High Mode) bis in eine Höhe von ca. 10 km mit einer Verfügbarkeit von 80 % und bis 12 km mit einer Verfügbarkeit von 70 % zu messen. Bei einer vertikalen Auflösung von 250 m (Low Mode) wird ein Meßbereich von 500 m bis nahe 8 km abgedeckt. Der LAP, ausgelegt für Messungen in der Grenzschicht, liefert Meßwerte in einer im Vergleich zum TWP nochmals gesteigerten vertikalen Auflösung von 100 m im Höhenbereich von 200 m bis ca. 1 km.

Die Temperaturmessung erreicht auf Grund der Schwächung akustischer Wellen in der Atmosphäre nicht die Meßhöhen der Windprofiler. Legt man eine Verfügbarkeit von größer 80 % zugrunde, erstreckt sich der kombinierte Meßbereich beider WPR/RASS von 200 m bis 2200 m.

Mit den hier betrachteten Systemen ist somit eine kontinuierliche Sondierung des Windes innerhalb der Troposphäre und der virtuellen Temperatur im Bereich der Grenzschicht möglich, wobei systembedingt die unteren Meßhöhen bei 200 m bis 400 m liegen.

Der horizontale Windvektor wird mit einer Genauigkeit gemessen, die gleich, in größeren Höhen sogar besser als die Meßgenauigkeit von Rawinsondierungen ist. Die systematischen Abweichungen zur Rawinsonde sind bei der Windgeschwindigkeit in allen Höhen in ihrem Betrag kleiner 0,5 m/s und bei der Windrichtung, mit Ausnahme der untersten Höhen, geringer als 2°. Die Standardabweichung der Windgeschwindigkeitsdifferenzen variiert zwischen 1,2 m/s und 2 m/s. Unter Berücksichtigung des Meßfehlers der Rawinsonde und der atmosphärischen Variabilität kann somit ein zufälliger Meßfehler von kleiner 1 m/s angegeben werden.

Die Messung der virtuellen Temperatur mit dem RASS ist bei Verwendung der derzeit allgemein gebräuchlichen Auswertelgorithmen im Vergleich zu Radiosondierungen durch einen höhenabhängigen systematischen Fehler gekennzeichnet. Dabei wird in mittleren und oberen Höhen eine Überschätzung der Temperatur um bis zu 1 K und in den unteren Höhen ein zu geringer Temperaturgradient beobachtet. In der Literatur vorgeschlagene Korrekturen konnten diesen Fehler bislang nicht erklären bzw. eliminieren.

In der vorliegenden Arbeit konnte experimentell nachgewiesen werden, daß der vor allem in den unteren Höhen auftretende Temperaturmeßfehler auf eine an die Volumenmessung des RASS nicht angepaßte Höhenzuordnung zurückzuführen ist. Unter Berücksichtigung der Höhengewichtsfunktion und des Profils der Reflektivität wurde eine entsprechende Höhenkorrektur entwickelt, mit dem Ergebnis einer signifikanten Reduzierung der systematischen Abweichung zur Radiosonde auf kleiner 0,3 K und einer nahezu vollständigen Eliminierung der Höhenabhängigkeit des Fehlers. Darüber hinaus führte die Korrektur zu einer Abnahme des zufälligen Fehlers von RASS-Temperaturmessungen auf 0,4 bis 0,75 K.

Abstract

Wind profiler radar/RASS (WPR/RASS) are remote sensing systems to measure vertical profiles of wind and temperature with high temporal and vertical resolution. In the present work the accuracy and the availability of a 1290 MHz WPR/RASS (LAP) and a 482 MHz WPR/RASS (TWP) were investigated on the base of measurements over several years. For RASS temperature measurements a correction was developed which leads to a significant improvement of the accuracy.

The vertical range of WPR/RASS and its temporal variations are a function of the system properties and the atmospheric conditions. The TWP provides wind values with a vertical resolution of 500 m (High Mode) up to about 10 km with a availability greater than 80% and up to 12 km with a availability of 70%. Measurements with a vertical resolution of 250 m (Low Mode) are available in a range between 500 m and 8 km. The LAP operating with a vertical resolution of 100 m gives wind data between 200 m and 1 km.

The maximum heights for temperature measurements are lower than for the wind due to the attenuation of acoustic waves. An availability greater than 80% can be observed between 200 m and 2200 m if the vertical ranges of both systems are combined.

The accuracy of wind measurements is comparable to that of rawinsoundings. At upper heights the accuracy of wind measurements is even better than rawinsonde measurements. The systematic deviations related to rawinsondes are smaller than 0.5 m/s for wind speed and 2° for wind direction except at the lowest ranges. The standard deviation of wind speed differences varies between 1.2 m/s and 2 m/s. If measuring errors of rawinsoundings are considered, the random measuring error of WPR measurements is smaller than 1 m/s.

The RASS measured temperature is characterized by a height dependent systematic error when standard algorithm for the temperature calculation are used. At middle and upper heights an overestimation of temperature up to 1 K and at lower heights a too small temperature gradient was observed. Corrections suggested in the literature could not explain and eliminate this error.

In the present work it was experimentally proved, that the temperature error at lower heights is caused by a range error. An improved range correction was developed taking into account the range weighting function of the receiver and the profile of reflectivity. The application of this correction yields a reduction of the systematic error to smaller than 0.3 K and a nearly complete elimination of the height dependence of the error. Furthermore, the random error of RASS temperature measurements was reduced to 0.4 to 0.75 K.

Kapitel 1

Einleitung

Die Kenntnis des dreidimensionalen, zeitlich und räumlich variablen Druck-, Wind-, Temperatur- und Feuchtefeldes der Atmosphäre bildet die Grundlage für viele Anwendungen in der Meteorologie. Insbesondere die numerische Wettervorhersage ist in erheblichem Maße auf aerologische Meßinformationen für die Beschreibung des atmosphärischen Anfangszustandes angewiesen. Diese aerologischen Daten werden derzeit vor allem durch Radiosondierungen an weltweit ca. 800 Stationen bereitgestellt.

Zur Verbesserung der Wettervorhersage wird vor allem die räumliche Auflösung der numerischen Modelle ständig vorangetrieben. Wurden bis vor wenigen Jahren lediglich Prozesse in der *Meso- β* Skala ($magn\Delta s = 100\text{ km}$, $magn\Delta t = 10^4\text{ s}$) aufgelöst, wird durch eine weitere Reduzierung der Gitterpunktabstände der Modelle versucht, auch Prozesse in der *Meso- γ* Skala ($magn\Delta s = 10\text{ km}$, $magn\Delta t = 10^3\text{ s}$) mathematisch-physikalisch zu beschreiben bzw. entsprechende Vorhersagen abzuleiten¹.

Die Betrachtung immer kleinskaligerer Prozesse durch die Modelle setzt allerdings voraus, daß die für die Initialisierung und Aktualisierung der Modelle erforderlichen Daten in einer adäquaten Skala und mit hoher Meßgenauigkeit bereitgestellt werden. Konventionelle Sondierungstechniken, wie Radiosondierungen können diese Forderungen nicht mehr erfüllen, weil eine weitere Steigerung der räumlichen als auch zeitlichen Auflösung schon unter rein wirtschaftlichen Aspekten auf Grund des dafür erforderlichen personell-technischen Aufwandes nicht möglich ist. Diese erhöhten Anforderungen an die Meßsysteme wird man zukünftig

¹Diese Entwicklung spiegelt sich auch in der Modellentwicklung des Deutschen Wetterdienstes wieder, wo 1999 die bisherige Modellkette bestehend aus dem Globalmodell(GM), dem Europamodell(EM) und dem Deutschlandmodell(DM) mit charakteristischen Gitterpunktabständen von 210 km, 50 km bzw. 14 km durch ein Globalmodell in der Auflösung des Europamodells (GME) und ein Lokalmodell (LM) mit Gitterpunktabständen von 55 km und 7 km bzw. perspektivisch von 27 km und 2,5 km abgelöst wird.

nur durch den Einsatz indirekt messender Systeme erfüllen können. Die satellitengebundene Sondierung spielt dabei schon seit Jahren eine wichtige Rolle - jedoch können nicht alle Parameter mit der notwendigen Genauigkeit, insbesondere in den unteren, für mesoskalige Prozesse interessanten Atmosphärenschichten gemessen werden. Dafür scheinen vor allem bodengebundene aktive und passive Fernerkundungssysteme geeignet. Der technische Entwicklungsstand von Windprofiler-Radargeräten ist dabei bereits auf einem solch hohen Niveau, daß der Einsatz als operationelles Meßsystem in verschiedenen Ländern forciert wird. Auch der Deutsche Wetterdienst plant die Installation von mehreren Windprofiler-Radarsystemen als Ergänzung des bestehenden aerologischen Meßnetzes.

Windprofiler-Radarsysteme (WPR) sind spezielle Radargeräte, mit denen der dreidimensionale Windvektor in der Atmosphäre in hoher zeitlicher Folge ($\leq 60 \text{ min}$) gemessen werden kann. Am häufigsten kommen derzeit gepulste Radargeräte, die nach dem Verfahren des sogenannten „Doppler Beam Swinging“ arbeiten, zum Einsatz. Bei diesem Verfahren werden in mindestens drei bzw. auch fünf verschiedenen Strahlrichtungen elektromagnetische Impulse ausgesandt, die an turbulenten Inhomogenitäten des Brechungsindexfeldes der Atmosphäre gestreut werden. Die rückgestreuten Wellen erfahren dabei in Abhängigkeit von der durch den Wind bestimmten Bewegung der turbulenten Strukturen eine Frequenzverschiebung (Dopplereffekt), so daß aus der Analyse des rückgestreuten Signals die radiale Windgeschwindigkeit für jede Strahlrichtung ermittelt werden kann. Durch Kombination der Radialgeschwindigkeiten von drei oder fünf Strahlrichtungen kann schließlich der dreidimensionale Windvektor berechnet werden. Die erforderliche Höhenzuordnung ergibt sich aus der Laufzeit des elektromagnetischen Signals. Der vertikale Meßbereich, insbesondere die maximal erreichbare Meßhöhe wird in erster Linie durch die Betriebsfrequenz der Systeme vorgegeben und variiert zwischen 3 km und 16 km bei UHF-Profilern (400 MHz .. 1300 MHz) bzw. ca. 25 km bei VHF-Systemen (50 MHz).

Windprofiler-Radargeräte können mit Schallquellen zu einem Radio-Akustischen-Sondierungssystem (RASS) zur Messung der Temperatur ergänzt werden. Die ausgesandten akustischen Wellen erzeugen künstliche Inhomogenitäten im Brechungsindexfeld, die sich mit Schallgeschwindigkeit ausbreiten. Durch das Windprofiler-Radar läßt sich nun, analog zur Messung des Radialwindes, die Schallgeschwindigkeit bestimmen und aus dem physikalischen Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und Temperatur das vertikale Temperaturprofil ableiten. Die vertikale Reichweite ist hierbei auf Grund der starken Schwächung der akustischen Signale jedoch deutlich geringer als bei der Windmessung. Je nach System werden im allgemeinen Meßhöhen von einigen hundert Metern bis max. 5 km erreicht.

Windprofiler-Radarsysteme kombiniert mit RASS (WPR/RASS) zeichnen sich gegenüber

konventionellen, direkt messenden Systemen, wie den Radiosonden, durch folgende Eigenschaften aus:

- kontinuierliche Messungen mit hoher zeitlicher Auflösung (5 min - 60 min),
- Messungen erfolgen senkrecht über dem Meßstandort innerhalb eines definierten Luftvolumens und in allen Höhen gleichzeitig,
- automatischer, unbeaufsichtigter Betrieb und damit geringe Kosten pro Messung,
- Bereitstellung zusätzlicher Informationen (z.B. Vertikalwind, Rückstreuleistung) mit der Möglichkeit der Ermittlung abgeleiteter meteorologischer Größen (z.B. turbulente Impuls- und Wärmeflüsse).

Inbesondere die kontinuierliche Messung von Wind- und Temperaturprofilen mit einer Auflösung von minimal etwa 5 min ist ein wesentlicher Vorteil im Vergleich zu Radiosondierungen. Dadurch wird es möglich, zeitliche Strukturen im Wind- und Temperaturfeld zu erfassen, wie dies mit Radiosondierungen, die routinemäßig im Abstand von 12 h, minimal 6 h gestartet werden, niemals realisiert werden könnte. Abb. 1.1 zeigt anhand eines Meßbeispiels die mögliche Variabilität sowohl des Windvektors als auch der Temperatur und die Fähigkeit von WPR/RASS, derartige Strukturen aufzulösen. An diesem Tag befand sich der Meßort auf der Vorderseite eines über Südwesteuropa liegenden bodennahen komplexen Tiefdrucksystems, während die Höhenströmung durch einen mit seiner Achse von Nordosteuropa über Deutschland nach Spanien verlaufenden Trog gekennzeichnet war. Auf Grund der Nähe des Meßortes zur Trogachse resultiert aus den räumlichen Änderungen des Troges ein sehr variables Windfeld oberhalb 1000 m.

Den genannten Vorteilen von WPR/RASS stehen jedoch auch einige einschränkende Eigenschaften gegenüber, die bei einem operationellen Einsatz der Systeme berücksichtigt werden müssen:

- Die Störanfälligkeit der WPR/RASS-Messungen durch atmosphärische Einflüsse und die Umgebungsbedingungen ist größer als bei direkten Meßverfahren. Niederschlag führt beispielsweise dazu, daß neben der Rückstreuung am Brechungsindexfeld auch Rückstreuung an den Niederschlagsteilchen auftritt und sich daraus gegebenenfalls Schwierigkeiten in der Signalanalyse ergeben. Punktziele (Flugzeuge, Vögel) im Rückstrevolumen können ebenso Störungen hervorrufen, wie der Einfluß von Bodenechos infolge schlecht abgeschirmter Antennen. Zu berücksichtigen ist außerdem, daß die Messung mit indirekten Verfahren generell eine Messung in einem durch

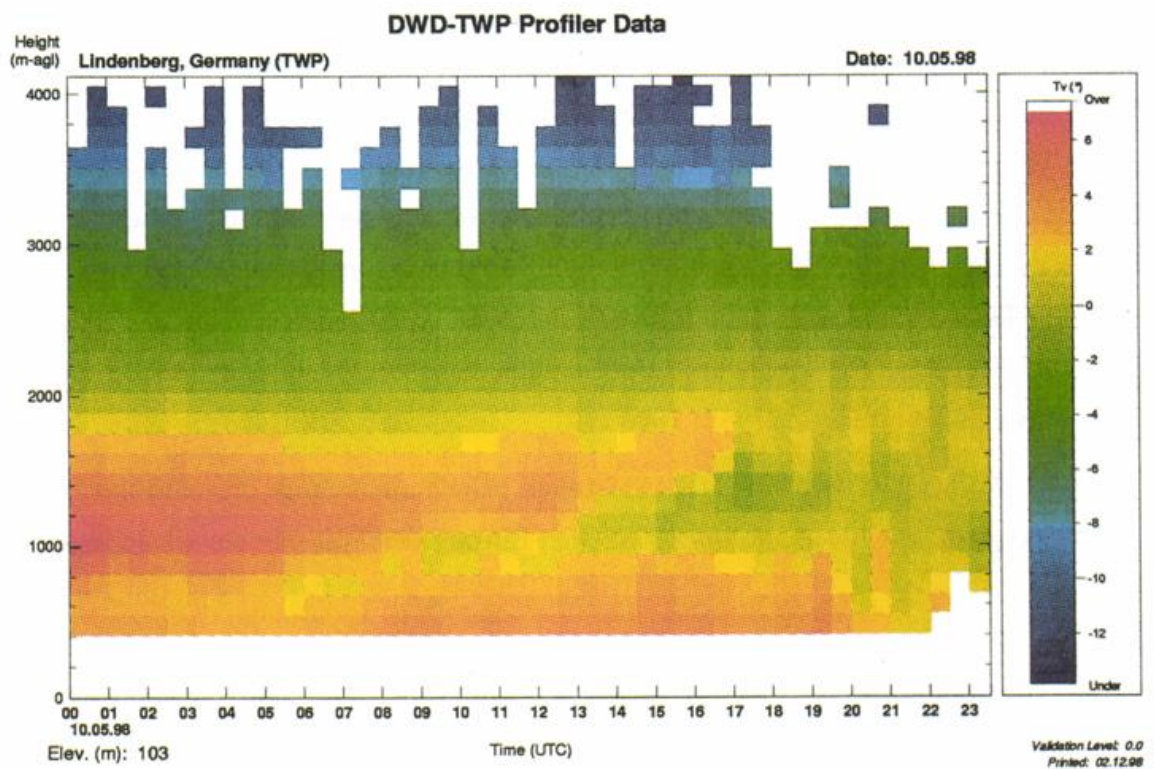
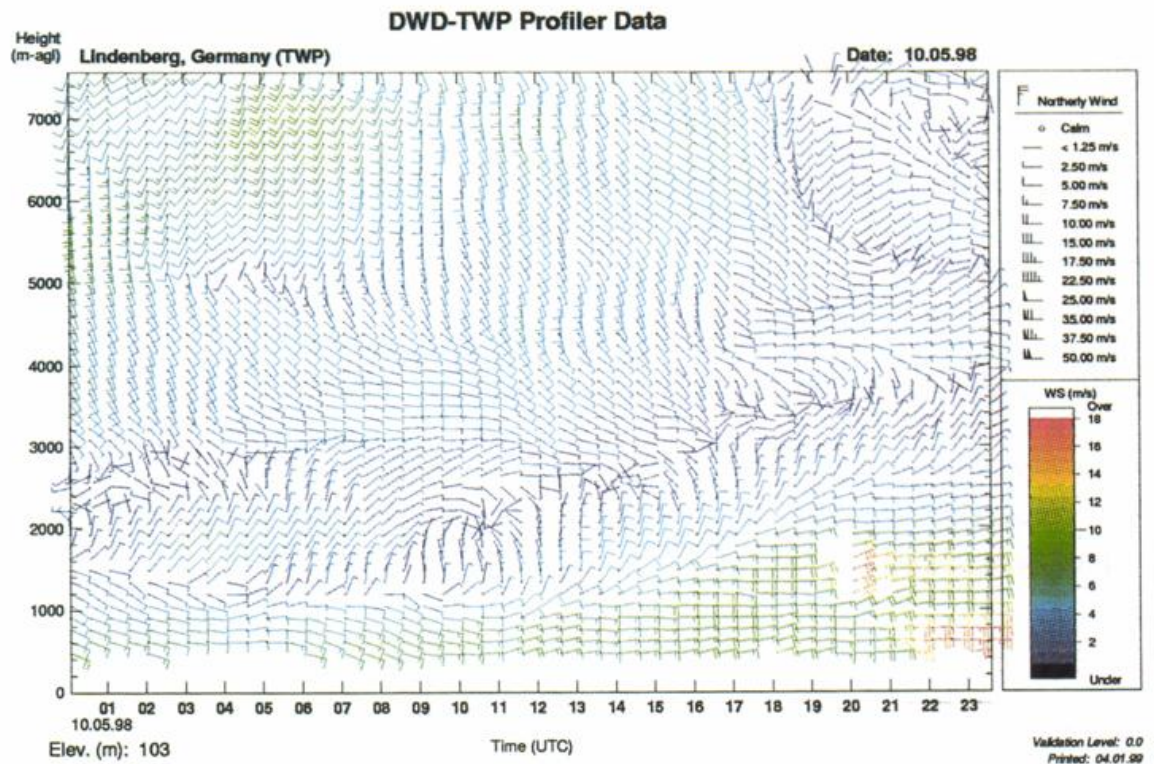


Abbildung 1.1: Zeit-Höhen Diagramm des horizontalen Windvektors (oben) und der virtuellen Temperatur (unten), gemessen mit einem 482 MHz WPR/RASS (TWP) am 5. Oktober 1998 in Lindenberg

verschiedene Gewichtsfunktionen vorgegebenen Volumen darstellt und sich dadurch grundsätzlich von in-situ Punktmessungen unterscheidet. Die Folge ist, daß einerseits die Meßgenauigkeit eine von den äußeren Bedingungen abhängige Größe ist, andererseits eine gewisse Wahrscheinlichkeit für das Auftreten grober Meßfehler existiert, wobei durch geeignete Maßnahmen in der Signalanalyse und der Qualitätskontrolle versucht wird, letztere zu erkennen.

- Die maximale Meßhöhe hängt von den meteorologischen Bedingungen ab.
- Bislang existieren nur verhältnismäßig wenige Untersuchungen von operationell betriebenen WPR/RASS hinsichtlich Meßgenauigkeit und Verfügbarkeit.

1.1 Motivation und Ziel der Arbeit

Auf Grund der im vorangegangenen Abschnitt dargestellten Eigenschaften von WPR/RASS scheinen diese Systeme hervorragend geeignet, das bestehende aerologische Netz von Radiosondenstationen zu ergänzen oder zum Teil sogar zu ersetzen, vorausgesetzt, daß die Meßgenauigkeit mindestens der der Radiosonden entspricht. Ziel der Arbeit war die Analyse der Genauigkeit und der Verfügbarkeit von WPR/RASS Messungen während des quasi-operationellen Betriebes für die verschiedenen in Mitteleuropa auftretenden meteorologischen Bedingungen. Falls erforderlich, sollten außerdem Maßnahmen vorgeschlagen oder Verfahren entwickelt werden, um die Meßgenauigkeit oder die Verfügbarkeit in dem Maße zu verbessern, wie dies der operationelle Einsatz erfordert. Die Analyse erfolgte auf der Grundlage von Messungen zweier WPR/RASS, die am Meteorologischen Observatorium Lindenberg (MOL) in den Jahren 1993 und 1996 zur Vorbereitung des Netzeinsatzes im Deutschen Wetterdienst (DWD) in Betrieb genommen worden sind.

Im Kapitel 2 dieser Arbeit werden zunächst die theoretischen Grundlagen für die betrachteten WPR/RASS dargestellt. Diese Systeme werden im Kapitel 3 näher hinsichtlich ihres technischen Aufbaus und der Betriebsparameter beschrieben. Darüber hinaus erfolgt eine kurze Charakterisierung der Meßsysteme, die für die Vergleiche herangezogen wurden.

Kapitel 4 widmet sich dann den Fragen der Meßgenauigkeit und deren Analyse nach verschiedenen Methoden. Einen besonderen Schwerpunkt bilden dabei Vergleiche mit Radiosondierungen, da am MOL mit vier Aufstiegen pro Tag eine auch im internationalen Vergleich einzigartige Datenbasis vorliegt. Im Ergebnis dieser Analyse wurde unter anderem festgestellt, daß die Genauigkeit der RASS Temperaturmessung nicht den Ansprüchen der meisten Anwendungen in der Meteorologie genügt. Aus diesem Grund erfolgt in Kapitel 5 eine tiefer-

gehende Betrachtung zum Temperaturmeßfehler des RASS und schließlich die Entwicklung von Korrekturen, die die Meßgenauigkeit signifikant verbessern.

Im Kapitel 6 werden die Ergebnisse zur Verfügbarkeit von Wind- und Temperaturmessungen beider WPR/RASS dargestellt.

1.2 Kurzer geschichtlicher Rückblick und gegenwärtiger Stand der Windprofiler/RASS Nutzung

Zur Einführung in die WPR/RASS Technologie als aerologisches Meßsystem sollen zunächst wichtige Abschnitte der Windprofiler/RASS Entwicklung und der Umfang der derzeitigen Nutzung dieser Systeme dargelegt werden. Für einen detaillierten geschichtlichen Überblick über die Entwicklung der in der Meteorologie eingesetzten Radartechnik wird auf Kapitel 17 in Atlas (1990) verwiesen.

Die Bezeichnung RADAR beruht auf einem Vorschlag von S.M. Taylor und F.R. Furth und ist 1940 als offizielle Abkürzung für „*R*ADio *D*etecting *A*nd *R*anging of objects“ (Dovjak and Zrnic, 1993) eingeführt worden. Die Entwicklung von Windprofiler-Radar Geräten ist eng mit der Entwicklung der Radartechnik zur Detektion von Punktzielen verknüpft. Die ersten Signale von Klarluftechos aus der Troposphäre wurden in den dreißiger Jahren bei Untersuchungen der Ionosphäre zunächst zufällig und später systematisch beobachtet (Collwell and Friend, 1939). Friend (1939) entdeckte auch den Zusammenhang zwischen der Stärke des rückgestreuten Signals und dem Vorhandensein von Grenzschichten in der Troposphäre. Im Rahmen von Untersuchungen der Funkwellenausbreitung in den fünfziger Jahren erkannte man, daß die Ausbreitung von Wellen in der Atmosphäre nicht nur durch Reflexion und Brechung, sondern auch durch die Streuung beeinflusst wird. Die erste allgemeine Theorie zur Streuung von elektromagnetischen Wellen durch Schwankungen des Brechungsindex wurde von Tatarskii (1961) aufgestellt. In den Folgejahren wuchs die Zahl der Experimente, die die Detektion von Klarluftechos zum Ziel hatten. 1964 gelang es durch empfindlichere Radargeräte sowohl die turbulente konvektive Grenzschicht als auch horizontale turbulente Schichten in der Troposphäre zu beobachten (Hardy et al., 1966). Mit Beginn der siebziger Jahre wurden zunehmend Systeme im VHF-Bereich, die ursprünglich für die Erforschung der Ionosphäre eingesetzt wurden, für Untersuchungen in der mittleren Atmosphäre genutzt. Das erste System dieser Art war das Jicamarca Radar in Peru, wobei mit diesem System erstmals durch Auswertung der Dopplerverschiebung des rückgestreuten Signals Windgeschwindigkeiten abgeleitet worden sind. Weitere derartige Geräte wurden in

der Folgezeit in den USA (z.B. Sunset Radar in Colorado), Deutschland (SOUSY - Radar bei Katlenburg-Lindau) und auch in Japan (MU-Radar in Shigaratti) gebaut. Ecklund et al. (1977) demonstrierten mit einem mobilen 50 MHz System in Platteville, Colorado, erstmals die Möglichkeit, mit Radargeräten automatisch und kontinuierlich Windprofile zu messen.

Anfang der achtziger Jahre entstand das erste (Mini-)Netzwerk, bestehend aus drei 50 MHz Windprofilern in Colorado mit dem Ziel, Mesoscale-Vorhersagen zu unterstützen. Auf den Erfahrungen mit diesem Netzwerk aufbauend wurde 1991 bis 1992 das „Wind Profiler Demonstration Network“ (WPDN)², das aus 31 Windprofilern mit einer Betriebsfrequenz von 404 MHz besteht, an verschiedenen Standorten im zentralen Teil der USA installiert. Ziel war und ist es, einerseits zeitlich hochaufgelöste Windprofile für Modellentwicklungen bereitzustellen und andererseits Erfahrungen beim operationellen Betrieb eines solchen Netzes zu sammeln (Schlatter and Zbar, 1994). In einem Simulationsexperiment konnte unter anderem der Nutzen von kontinuierlich bereitgestellten Winddaten für die Vorhersage nachgewiesen werden (Schlatter and Zbar, 1994).

Die europäischen Aktivitäten bei der Nutzung dieser neuen Technologie werden seit einigen Jahren in den von der EU geförderten COST³ Aktionen 74 und 76 koordiniert. An der gegenwärtig laufenden Aktion COST 76 mit dem Titel „Development of VHF/UHF wind profiler radars and other vertical sounders for use in European observing systems“ nehmen 13 Staaten teil, wobei gegenwärtig acht Teilnehmerländer ein oder mehrere Windprofiler-Systeme betreiben. In gemeinsamen Meßkampagnen wird dabei versucht, den operationellen Betrieb von WPR/RASS vorzubereiten. Während der dreimonatigen Kampagne CWINDE97 (Oakley et al., 1997) wurde u.a die Frage der Datenübertragung diskutiert und ein einheitliches Datenprotokoll realisiert, so daß im Ergebnis der Kampagne ein Datensatz für verschiedene Anwender, insbesondere für die Modellierer zur Verfügung steht. 1999 findet ein weiteres derartiges Experiment statt (s. Abb.1.2), wobei die Daten den Rechenzentren einzelner Wetterdienste „realtime“ zur Verfügung gestellt werden.

Viele vor allem im UHF-Bereich betriebene Windprofiler-Radar Systeme werden mit einem Radio-Akustischen-Sondierungssystem (RASS) zur Messung des Vertikalprofils der Temperatur ergänzt. Die Idee eines RASS geht auf Atlas (1962) zurück.

Erste Experimente mit einem RASS wurden in den siebziger Jahren an der Stanford-Universität mit einem 37 MHz Radar und 85 Hz Schallimpulsen durchgeführt, wobei Marshall et al. (1972) die Schallgeschwindigkeit aus der Dopplerverschiebung der an den Schallimpulsen reflektierten elektromagnetischen Strahlung ableiten konnten (Doppler-RASS). Die

²Heute wird dieses Netzwerk als NOAA Profiler Network (NPN) bezeichnet.

³„European co-operation in the field of scientific and technical research“



Abbildung 1.2: Standorte in Europa, an denen während der Meßkampagne CWINDE99 Windprofilersysteme operationell betrieben werden sollen.

erreichten vertikalen Reichweiten waren wegen der naturgemäß starken Schwächung des akustischen Signals sowie der Abdrift der Schallwellen mit dem Horizontalwind zunächst relativ gering. In Japan gelang es im Rahmen einer Studie, mittels eines 50 MHz Radars mit richtungsvariablem Radarstrahl und einer sehr leistungsstarken akustischen Quelle Höhen bis zu 25 km zu erreichen (Matuura et al., 1986). Die ersten experimentellen Erfahrungen mit RASS waren Anlaß für eine Vielzahl von theoretischen Arbeiten auf diesem Gebiet (z.B. Clifford and Wang (1977), Clifford et al. (1978), Nalbandyan (1977), Tatarskii (1971), Bonino et al. (1979)), Kon (1981), Makarova (1980), die zum Ziel hatten, die Leistungsfähigkeit des RASS zu verbessern. So führten Untersuchungen der wind- und höhenabhängigen Verschiebung des Empfangsfleckes des rückgestreuten elektromagnetischen Signals zur Anordnung von mehreren Schallquellen um die Radarantenne herum bzw. auch zu speziellen Drehvorrichtungen, die die Schallquelle zur Radarantenne immer im Luv positionieren. Beiträge zur Optimierung der Amplitude des Rückstreusignals eines RASS lieferten Kon and Nalbandyan (1978) und Peters et al. (1983). Während Kon and Nalbandyan (1978) analytische Ausdrücke für das Rückstreusignal eines sogenannten Frequenz-RASS entwickelten,

beschreiben Peters et al. (1983) ein RASS, das die Schallgeschwindigkeit aus der akustischen Frequenz bestimmt, bei der das rückgestreute Signal ein Maximum aufweist. Durch Aussenden eines ausreichend breiten akustischen Frequenzspektrums konnte somit erreicht werden, daß man aus jeder Höhe das maximal mögliche Rückstreusignal erhielt. Dadurch konnte man die maximale Meßhöhe deutlich steigern. Vorhandene Windprofiler-Radarsysteme können in relativ einfacher Weise mit diesem als BRAGG-RASS bezeichneten System ergänzt werden (May et al., 1990). Mit der zunehmenden Nutzung von RASS, insbesondere in Verbindung mit Windprofiler-Radargeräten, erfolgten verstärkt Untersuchungen zur Genauigkeit und Verfügbarkeit von RASS Messungen (May and Strauch, 1989; May et al., 1988). In den neunziger Jahren wurden dazu u.a. von Angevine and Ecklund (1994); Angevine et al. (1994); Lataitis (1993); Moran and Strauch (1994) und Peters and Angevine (1996) grundlegende Arbeiten zur Verbesserung der Meßgenauigkeit veröffentlicht, wobei atmosphärische Einflüsse auf die RASS Messung berücksichtigt werden.

Eine operationelle Nutzung von RASS Messungen ist derzeit noch nicht soweit fortgeschritten wie die der WPR. Dies ist nicht zuletzt auf die noch nicht befriedigende Meßgenauigkeit zurückzuführen. In dieser Arbeit soll deshalb speziell mit den Ergebnissen des Kapitel 5 ein Beitrag zur operationellen Nutzung derartiger WPR/RASS geleistet werden.

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

2.1 Elektromagnetische Wellen in ihrer Wechselwirkung mit der Atmosphäre

Die von Radargeräten gesendeten elektromagnetischen Wellen werden in der Atmosphäre durch Absorption, Streuung, Brechung und Reflexion hinsichtlich ihrer Ausbreitungsrichtung, der Signalstärke und der Phase beeinflusst. Je nach Radarwellenlänge, Struktur und Zusammensetzung der Atmosphäre wirken unterschiedliche Streumechanismen, wobei die Wirkungsweise der hier behandelten Windprofiler-Radar Systeme im wesentlichen auf der Rückstreuung von Radiowellen an sogenannten turbulenten Klarluft-Strukturen (weshalb Windprofiler oft auch als Clear-Air Radars bezeichnet werden) basiert. Bei UHF- zum Teil auch bei VHF-Systemen kann jedoch im Falle von Niederschlag auch die Rückstreuung an Hydrometeoren dominieren. In den nächsten Abschnitten wird ein kurzer Überblick zu den verschiedenen Streumechanismen gegeben, da deren Kenntnis wichtig für die Interpretation der Meßergebnisse ist. Die Rückstreuung elektromagnetischer Signale an akustischen Wellen wird in einem separaten Abschnitt behandelt. Detaillierte Abhandlungen und Herleitungen sind in den jeweils zitierten Arbeiten zu finden.

2.1.1 Streuung an Klarluft-Echos

Die Ausbreitung von Radiowellen im turbulenten Medium wird durch die Maxwell-Gleichungen beschrieben, deren exakte Lösung die Ableitung von Amplitude und Phase der gestreuten Welle zuläßt. Grundlegende theoretische Arbeiten zum Verständnis der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in der Atmosphäre stammen von Tatarskii (1961, 1971),

während man in Doviak and Zrnica (1993) eine zusammenfassende Darstellung zur Wellenausbreitung und Rückstreuung findet. Nach Tatarskii (1971) läßt sich allgemein das an Brechungsindex-Irregularitäten rückgestreute elektrische Feld an einem beliebigen Ort unter Zugrundelegung der Born'schen Approximation¹ durch die folgende Gleichung beschreiben:

$$E_R(t) = \frac{k_e^2}{4\pi} \int_V \frac{1}{R} e^{(ik_e R)} \delta n(R, t) E_T(R, t) dV \quad (2.1)$$

Darin ist E_T das einfallende elektrische Feld, k_e die Wellenzahl des elektrischen Feldes und R der Abstand zwischen elektromagnetischer Quelle und dem Streuvolumen. δn ist die Funktion für die Brechungsindex-Irregularitäten. Im Falle des Windprofilers zur Messung des Windes bilden die durch Turbulenz, Wellen oder differentielle Advektion (vgl. Muschinski (1998)) hervorgerufenen natürlichen Brechungsindexschwankungen die Grundlage der Rückstreuung, wogegen beim RASS durch akustische Signale künstliche Inhomogenitäten im Brechungsindexfeld erzeugt werden, die sich mit Schallgeschwindigkeit ausbreiten.

Der Brechungsindex n ist im VHF- und UHF- Frequenzband eine Funktion des Luftdruckes p , der absoluten Temperatur T und des Wasserdampfdruckes e und kann nach Bean and Dutton (1966) berechnet werden mit

$$n = 10^{-6} \left(77,6 \frac{p}{T} + 3,73 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2} \right) + 1 \quad (p \text{ in hPa; } e \text{ in hPa}) \quad (2.2)$$

Hierin ist der lediglich in der Ionosphäre relevante Einfluß freier Ladungsträger auf den Brechungsindex vernachlässigt worden. In der Troposphäre sind die stärksten Variationen von n auf Schwankungen der Temperatur und des Wasserdampfes zurückzuführen, während in der Stratosphäre Temperaturvariationen den größten Effekt auf Schwankungen des Brechungsindex haben. Der Anteil der Druckschwankungen ist gegenüber den Temperatur- und Feuchteschwankungen unbedeutend.

Eine sehr wichtige Größe in der Radartechnik stellt die empfangene Rückstreuleistung P_r dar, die direkt proportional zum Streuquerschnitt σ und bei einem im Vergleich zum Streuvolumen kleinen Streuelement (Punktziel) umgekehrt proportional zur 4. Potenz der Entfernung r zwischen Radar - Streuelement ist:

$$P_r \sim \frac{\sigma}{r^4} \quad (2.3)$$

¹Die Born-Approximation besagt, daß das rückgestreute Feld klein ist gegenüber dem einfallenden Feld und somit Mehrfachstreuungen vernachlässigt werden können.

In der Radarmeteorologie betrachtet man anstelle des Rückstreuquerschnitts von Punktzielen die von einem Volumen V ausgehende Volumenreflektivität η . Sind in einem Volumen N einzelne punktförmige Streuer mit dem Streuquerschnitt $\sigma_i (i = 1..N)$ homogen verteilt, ist die Volumenreflektivität in folgender Weise definiert:

$$\eta = \frac{1}{dV} \sum_{i=1}^N \sigma_i \quad (2.4)$$

In Abhängigkeit von der vertikalen Struktur des Brechungsindexfeldes können dabei verschiedene Mechanismen zur Streuung von elektromagnetischen Wellen in der Atmosphäre unterschieden werden (Röttger and Larsen, 1990):

- Fresnel-Streuung

Bei diesem, vor allem für den unteren VHF-Bereich relevanten Streuprozess existieren vertikale Diskontinuitäten im Brechungsindex über einem relativ großen horizontalen Gebiet. Auf Grund einer im Vergleich zur Wellenlänge großen horizontalen Ausdehnung dieser Diskontinuitäten nimmt die reflektierte Leistung bei Abweichung der Strahlrichtung von der Senkrechten rapide ab. Diese Abhängigkeit der reflektierten Leistung vom Elevationswinkel wird als Aspektempfindlichkeit bezeichnet und führt bei Nichtberücksichtigung zu einer systematischen Unterschätzung der horizontalen Windgeschwindigkeit. Eine entsprechende Korrektur wurde von Hocking et al. (1986, 1990) vorgeschlagen.

- Bragg-Streuung

Voraussetzung für die Bragg-Streuung sind zufällig verteilte Fluktuationen des Brechungsindexfeldes innerhalb des Meßvolumens infolge von Turbulenz, wobei die Turbulenz richtungsunabhängig, d.h. isotrop ist. Entscheidend für die rückgestreute Leistung ist, daß im Turbulenzfeld Strukturen vorhanden sind, die der halben Wellenlänge des Sendesignals entsprechen, da in diesem Fall durch konstruktive Interferenz eine erhebliche Verstärkung des Signals auftritt. Diese Bedingung wird als Bragg-Gesetz bezeichnet.

Die Bragg-Streuung ist der dominierende Streumechanismus bei den in dieser Arbeit betrachteten Systemen. Der Zusammenhang zwischen der Volumenreflektivität η und den Fluktuationen des Brechungsindexes wurde theoretisch durch Tatarskii (1961) hergeleitet. Unter der Voraussetzung, daß die Größe der rückstreuenden Strukturen innerhalb des „in-

ertial subrange² liegt, ist η proportional zum Strukturparameter des Brechungsindex c_n^2 und umgekehrt proportional zur dritten Wurzel der Wellenlänge λ .

$$\eta = 0,38c_n^2\lambda^{-1/3} \quad (2.5)$$

Die Strukturkonstante c_n^2 beschreibt die Turbulenzintensität im „inertial subrange“ und ist durch die Strukturfunktion $D_n(l)$ der Turbulenz definiert (Gossard and Strauch, 1983).

$$D_n(l) = \langle [n(s) - n(s-l)]^2 \rangle \quad (2.6)$$

worin s eine beliebige Position im Streuvolumen und l den Abstand zu dieser Position darstellt. Im „inertial subrange“ sowie bei homogener und isotroper Turbulenz gilt für $D_n(l)$ entsprechend der Ähnlichkeitstheorie (vgl. Tatarskii (1961)):

$$D_n(l) = c_n^2 l^{2/3} \quad (2.7)$$

Der Zusammenhang zwischen der Volumenreflektivität und c_n^2 wurde durch Kropfli et al. (1968) experimentell eindeutig bestätigt. Es ist jedoch zu berücksichtigen, daß sich die Grenze zwischen dem „inertial subrange“ und dem kleinskaligen „viscous subrange“ mit zunehmender Höhe zu längeren Wellen hin verschiebt.

2.1.2 Streuung an Hydrometeoren

Die Rückstreuung elektromagnetischer Wellen an kugelförmigen Tropfen kann mit der Theorie nach Mie beschrieben werden. Die zur Rückstreuleistung proportionale Volumenreflektivität η ist eine Funktion der Wellenlänge λ , des komplexen Brechungsindex m der Partikel und des Verhältnisses von Tropfendurchmesser zur Wellenlänge (Serafin, 1990). Bei Gültigkeit der Rayleigh-Näherung³ kann η beschrieben werden durch

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 \sum_{i=1}^N D_i^6 \quad (2.8)$$

²Als „inertial subrange“ wird der Bereich des Turbulenzenergiespektrums bezeichnet, in dem Turbulenzenergie weder erzeugt noch vernichtet wird, sondern in kleinskaligen Wirbel zerfällt (dissipiert) (Stull, 1988).

³Die Rayleigh-Näherung gilt, wenn der Durchmesser des Teilchens sehr viel kleiner als die Wellenlänge ist ($d \ll \lambda$).

worin D_i der Durchmesser des i -ten Tropfens (Streuers) und K eine Konstante zur Beschreibung der optischen Eigenschaften des Streuers ist. Diese Konstante ergibt sich bei kugelförmigen Streuern aus

$$|K|^2 = \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 \quad (2.9)$$

mit m als komplexen Brechungsindex. Für Temperaturen im Bereich von 0 bis 20°C und eine Wellenlänge in der Größenordnung von 0,1 m ist

$$\begin{aligned} |K|^2 &\approx 0,93 \text{ für Wasser und} \\ |K|^2 &\approx 0,20 \text{ für Eis.} \end{aligned}$$

Der Term $\sum_{i=1}^N D_i^6$ wird in der Radarmeteorologie häufig als Reflektivitätsfaktor Z bezeichnet. Außerdem nutzt man anstelle der diskreten Tropfen- oder Partikelverteilung oft die kontinuierliche Funktion der Teilchendichte $N_T(D)$:

$$Z = \int_0^{\infty} N_T(D) D^6 dD \quad (2.10)$$

Damit wird die Volumenreflektivität für die inkohärente Streuung an Hydrometeoren beschrieben durch:

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 Z \quad (2.11)$$

Da sich mit einem kalibrierten Radar die Reflektivität Z bestimmen läßt, besteht die Möglichkeit, hieraus die Niederschlagsrate abzuleiten. Das setzt allerdings Kenntnisse über das Tropfenspektrum (Tropfengrößenverteilung) voraus. Richter and Peters (1994) nutzen zur Ableitung des Tropfenspektrums das komplette Doppler-Radar-Spektrum und den empirischen Zusammenhang zwischen Fallgeschwindigkeit und Größe der Tropfen unter Berücksichtigung des Vertikalwindes.

2.1.3 Relevanz der Streuprozesse für Windprofiler

Im allgemeinen spielt es zur Messung des Horizontalwindes keine Rolle, welcher Streuprozess dominiert, da eine horizontale Abdrift des streuenden Mediums mit der Windgeschwindigkeit sowohl bei der Bragg-Streuung (Taylor-Hypothese von „eingefrorener“ Turbulenz) als

auch bei der Rayleigh-Streuung (vernachlässigbare Trägheit der Regentropfen) vorausgesetzt wird. Dagegen ist die Kenntnis über den jeweilig vorherrschenden Streuprozess von Bedeutung, um z.B. zwischen vertikaler Windgeschwindigkeit und der Fallgeschwindigkeit von Hydrometeoren unterscheiden zu können. Außerdem treten, wie später noch gezeigt wird, beim Vorhandensein beider Streuprozesse in vergleichbarer Stärke Probleme in der Signalverarbeitung auf, die die Meßgenauigkeit eines WPR/RASS beeinflussen.

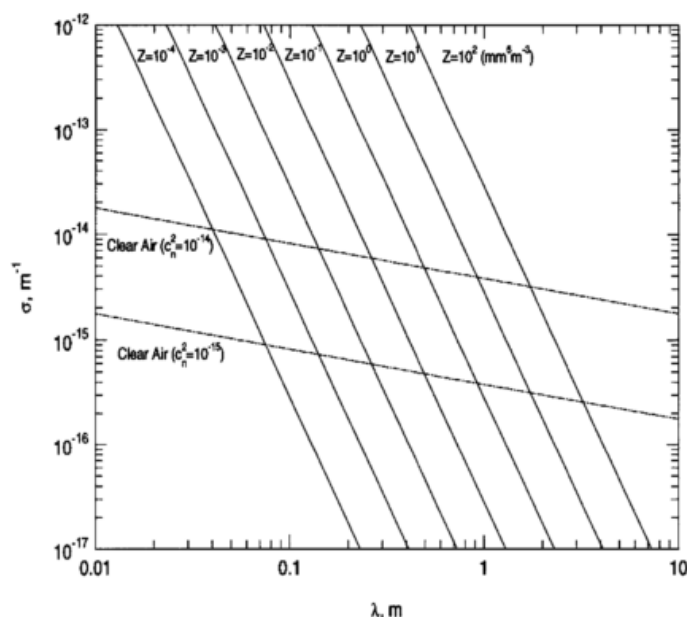


Abbildung 2.1: Rückstreuquerschnitt als Funktion der Wellenlänge für Rayleigh-Streuung (ausgezogene Linien) und für Bragg-Streuung (gestrichelte Linien), dargestellt für verschiedene Reflektivitäten Z und unterschiedlich stark ausgeprägte Turbulenz (nach Gossard and Strauch (1983)).

Aus dem Vergleich der Gleichungen (2.5) und (2.11) erkennt man bei der Bragg-Streuung in klarer Luft eine $\lambda^{-1/3}$ Abhängigkeit und bei der Streuung an Hydrometeoren eine λ^{-4} Abhängigkeit (s. Abb. 2.1). Das bedeutet, daß mit zunehmender Radarwellenlänge die Empfindlichkeit gegenüber Niederschlag wesentlich schneller abnimmt als bei Klarluft-Echos, weshalb Niederschlag bei Windprofilern im VHF-Bereich in geringerem Maße zur Rückstreuleistung beiträgt. Dagegen sind bei Wellenlängen zwischen 5 cm und etwa 50 cm Situationen denkbar, in denen Bragg- und Rayleigh-Streuung einen ähnlich großen Anteil am Rückstreusignal haben oder in denen die Rayleighstreuung sogar überwiegt. Legt man für den Zusammenhang zwischen der Reflektivität Z und der Regenrate R_r typische Z/R_r -Beziehungen zugrunde, entspricht beispielsweise ein $Z = 10^2 \text{ mm}^6 \text{m}^{-3}$ einer Regenrate von ca. 2 mm/Stunde.

2.1.4 Brechungsindexvariationen durch akustische Wellen - Das RASS-Prinzip

An dieser Stelle soll eine kurze und auf das wesentliche beschränkte Beschreibung zur Wirkungsweise des Radio-Akustischen-Sondierungs-Systems (RASS) gegeben werden. Sie folgt der durch May et al. (1990) gegebenen Herleitung für idealisierte atmosphärische Verhältnisse, d.h. unter Vernachlässigung von Horizontal- und Vertikalwind, von Turbulenzeffekten und dem atmosphärischen Temperaturgradienten. Für eine umfassendere und detailliertere theoretische Abhandlung zum RASS-Prinzip einschließlich der Berücksichtigung der eben genannten Effekte wird der Leser auf die Arbeiten von Peters et al. (1983) und Lataitis (1992) oder auf das Kapitel 5 dieser Arbeit verwiesen, wo verschiedene Korrekturen infolge des Einflusses von Wind und Temperatur diskutiert werden.

Ausgangspunkt für die folgenden Betrachtungen ist die Gleichung (2.1) für das rückgestreute elektrische Feld. Unter den eingangs genannten Voraussetzungen (kein Horizontalwind, keine Turbulenz) und einer am selben Ort wie das Radar positionierten Schallquelle können die durch eine akustische Punktquelle angeregten Brechungsindexinhomogenitäten δn approximiert werden durch

$$\delta n(r, t) \approx \operatorname{Re}\left\{\frac{1}{R}G_a e^{i(k_a r - \omega_a t)}\right\} \quad (2.12)$$

mit $k_a = \omega_a/c_a$ als akustische Wellenzahl, ω_a als Schallfrequenz und G_a als der akustischen Amplitudenmodulationsfunktion. Ähnlich läßt sich das einfallende elektrische Feld darstellen:

$$E_T(r, t) \approx G_e e^{i(k_e r - \omega_e t)} \quad (2.13)$$

worin G_e die elektromagnetische Amplitudenmodulationsfunktion und ω_e die elektromagnetische Frequenz ist. Zur weiteren Vereinfachung beschränkt man sich bei den Berechnungen auf ein Integrationsvolumen, dessen radiale Ausdehnung klein ist gegenüber dem Abstand R zwischen Sender und Streuvolumen. Damit kann der Faktor $1/R$ in Gleichung (2.1) und (2.12) als konstant angenommen werden. Durch Einsetzen von Gleichung (2.12) und (2.13) in (2.1) erhält man die elektromagnetische Rückstreuung an akustisch erzeugten Brechungsindexinhomogenitäten

$$E_R(t) \approx K \int_0^\infty e^{-i(\omega_e - \omega_a)t} G_a G_e e^{i(\Delta k r)} dr \quad (2.14)$$

worin K zeitlich und räumlich konstante Parameter zusammenfaßt und

$$\Delta k = 2k_e - k_a \quad (2.15)$$

ist. Man erkennt schnell, daß das Maximum der Amplitude des rückgestreuten Signals $E_R(t)$ genau dann erreicht wird, wenn Δk gleich Null wird, d.h. wenn die akustische Wellenzahl k_a doppelt so groß ist wie die elektromagnetische Wellenzahl k_e und somit eine phasenrichtige Überlagerung der rückgestreuten elektromagnetischen Wellen auftritt. Dieses Verhältnis von akustischer zur elektromagnetischen Wellenzahl wird als die **Bragg-Bedingung** für RASS bezeichnet.

Zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit aus der Dopplerverschiebung des rückgestreuten Signals muß die Phase oder Frequenzverschiebung des entsprechend Gleichung (2.14) rückgestreuten elektrischen Feldes bestimmt werden. Nach Peters et al. (1983) ist jedoch der Informationsgehalt der Frequenzverschiebung abhängig von der Form des akustischen Signals, d.h. von der akustischen Amplitudenmodulationsfunktion. In May et al. (1990) findet man für verschiedene Amplitudenmodulationsfunktionen der Schallimpulse eine einfache und anschauliche theoretische Herleitung zur Phasenverschiebung des rückgestreuten Signals. Hier werden ausgehend von der RASS-Gleichung (2.14) zwei Grundfälle dargestellt:

a) Kurze Schallimpulse

Für den Fall eines kurzen akustischen Rechteckimpulses der Länge $c_a t_0$ ist die akustische Amplitudenmodulationsfunktion G_a wie folgt definiert:

$$G_a = \begin{cases} 1 & r_{OG} + c_a(t - t_0) \leq r \leq r_{OG} + c_a t \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.16)$$

worin r_{OG} die Obergrenze des akustischen Pulses zum Zeitpunkt $t = 0$ ist. Nimmt man des weiteren ein kontinuierliches elektromagnetisches Signal an mit $G_e = 1$, so reduziert sich die Gleichung (2.14) auf

$$E_R(t) \approx K \int_{r_{OG} + c_a(t-t_0)}^{r_{OG} + c_a t} e^{-i(\omega_e - \omega_a)t} e^{i\Delta k r} dr \quad (2.17)$$

Nach der Integration in den angegebenen Grenzen, anschließendem Ausmultiplizieren und Zusammenfassen sowie Substitution von Δk entsprechend der Definition erhält man für $E_R(t)$ unter Vernachlässigung der zeitunabhängigen Terme

$$E(t) \approx K e^{i(-\omega_e + \omega_a + 2k_e c_a - k_a c_a)t} \quad (2.18)$$

Darin ist $2k_e c_a = \omega_b$ als Dopplerfrequenz und $k_a c_a = \omega_a$ als Schallfrequenz definiert, so daß Gleichung (2.18) weiter vereinfacht werden kann zu

$$E_R(t) \approx e^{-i(\omega_e - \omega_b)t} \quad (2.19)$$

Bei Verwendung kurzer Schallimpulse ist das rückgestreute Signal dopplerverschoben unabhängig von der akustischen Sendefrequenz und erlaubt somit die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit. Allerdings ist die Rückstreuleistung der an kurzen Schallimpulsen gestreuten Signale im allgemeinen sehr gering. Um ein ausreichend starkes Rückstreusignal zu erhalten, sollte die akustische Frequenz so gewählt werden, daß die Bragg-Bedingung erfüllt wird. Aufgrund der Temperaturänderung mit der Höhe und der damit verbundenen Schallgeschwindigkeitsänderung ist es erforderlich, ein Frequenzspektrum auszusenden, damit in jeder Höhenstufe des vertikalen Meßbereiches die Bragg-Bedingung erfüllt wird. Praktische Anwendung findet dieses als Doppler-RASS bezeichnete Prinzip z.B. bei Doppler-Sodar Geräten, welche mit einem elektromagnetischen Sende- und Empfangssystem zu einem RASS erweitert werden können (Peters et al., 1996). Die Höhenzuordnung erfolgt hierbei über die Laufzeit des Schalls. Wichtige Vorteile im Vergleich zum nachfolgend beschriebenen Bragg-RASS sind die hohe vertikale Auflösung (5 .. 20 m) und die geringe untere Meßhöhe.

b) Kontinuierliches Schallsignal

Durch das Aussenden längerer Schallimpulse oder gar eines kontinuierlichen akustischen Signals kann die rückgestreute Leistung erheblich gesteigert werden. Zur Beschreibung der Frequenzinformation bei Verwendung eines kontinuierlichen Schallsignals wird zusätzlich die elektromagnetische Amplitudenmodulationsfunktion in der Form

$$G_e = \begin{cases} 1 & r_1 \leq r \leq r_2 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.20)$$

eingeführt. Damit werden die Integrationsgrenzen bei einem kontinuierlichen akustischen Signal durch das Volumen des elektromagnetischen Pulses mit der Untergrenze r_1 und der Obergrenze r_2 vorgegeben, so daß aus Gleichung (2.14) folgt:

$$E_R(t) \approx K \int_{r_1}^{r_2} e^{[-i(\omega_e - \omega_a)t]} e^{(i\Delta kr)} dr \quad (2.21)$$

Der 2.Term unter dem Integral ist zeitunabhängig, so daß man für $E_R(t)$ schreiben kann

$$E_R(t) \approx e^{-i(\omega_e - \omega_a)t} \quad (2.22)$$

Aus der Gleichung (2.22) wird ersichtlich, daß bei einem kontinuierlichen akustischen Signal das rückgestreute Radarsignal keine Informationen über die Schallgeschwindigkeit enthält, sondern um den Betrag der Schallfrequenz frequenzverschoben ist. Nach Peters et al. (1983) muß jedoch nicht notwendigerweise die Schallgeschwindigkeit aus der Frequenzverschiebung des gestreuten Signals abgeleitet werden, sondern kann mit Hilfe der Wellenlängenabhängigkeit der rückgestreuten Signalstärke ermittelt werden. Das Maximum des Rückstreusignals

tritt nämlich genau dann auf, wenn die Bragg-Bedingung $2k_e = k_a$ erfüllt ist. Die empfangene Schallfrequenz ω_m ergibt sich dann zu

$$\omega_m = 2k_e c_a \quad (2.23)$$

In der Praxis wird die akustische Frequenz über einen Bereich variiert, der ω_m enthält, so daß man die Schallgeschwindigkeit mit Gleichung (2.23) berechnen kann. Die Realisierung dieses Prinzips wird insbesondere bei der RASS-Erweiterung von Windprofiler-Radar Systemen angewandt, da dies nur geringfügige Modifikationen am Windprofiler-Radar erfordert.

2.2 Das Empfangssignal unter Berücksichtigung der Systemeigenschaften

Im vorangegangenen Abschnitt wurden die Entstehung und die Eigenschaften des elektromagnetischen Rückstreusignals beschrieben. Nachfolgend wird der Einfluß der verschiedenen Systemkomponenten auf das hinter dem Empfänger anliegende Empfangssignal erläutert, um damit den Zusammenhang zwischen der mittleren Signalleistung am Ausgang des Empfängers, den Streueigenschaften der Atmosphäre und den Radarparametern darzustellen. Grundlage dieser Betrachtungen bildet ein gepulstes, kohärentes und monostatisches Doppler-Radar, wie es mit seinen wesentlichen Systemkomponenten z.B. in Doviak and Zrnic (1993) beschrieben wird.

2.2.1 Radargleichung für Volumenrückstreuung

Durch eine geeignete Antenne wird das elektromagnetische Wellenfeld in Ausbreitungsrichtung gebündelt. Der zu erwartende Leistungszuwachs bei Bündelung des Sendesignals im Vergleich zu einer in alle Richtungen strahlenden Antenne wird als Antennengewinn g_t definiert. Die Abhängigkeit der von der Antenne ausgehenden Leistungsdichte vom Azimutwinkel θ und dem Elevationswinkel ϕ wird durch das normierte Antennenstrahlungsdiagramm $f^2(\theta, \phi)$ charakterisiert, d.h. $f^2(\theta, \phi) = 1$ bei θ_0, ϕ_0 . Die nachfolgend angestellten Betrachtungen setzen voraus, daß sich die zu betrachtenden Streuelemente im sogenannten Fernfeld der Antenne befinden, da erst in diesem Bereich die Funktion $f(\theta, \phi)$ entfernungsunabhängig wird und im Vergleich zum Nahfeld kugelförmige Wellenfronten mit homogener Amplitudenverlagerung zu erwarten sind. Die Höhe r_F , ab der die Fernfeldbedingung für eine Antenne mit dem Durchmesser D gilt, ist gegeben durch

$$r_F = \frac{D^2}{\lambda} \quad (2.24)$$

Somit ergibt sich die in einer Entfernung r einfallende Leistungsdichte S_i bei einer Sendeleistung P_t

$$S_i(\theta, \phi) = \frac{P_t g_t f^2(\theta, \phi)}{4\pi r^2} \quad (2.25)$$

In der Atmosphäre vorhandene Streuer führen zu einer Rückstreuung des Signals, wobei die an der Empfangsantenne (beim monostatischen Radar ist dies auch die Sendeantenne) anliegende Leistungsdichte S_r proportional der Leistungsdichte S_i und dem Streuquerschnitt σ ist:

$$S_r = \frac{S_i \sigma(\theta', \phi')}{4\pi r^2} \quad (2.26)$$

Darin sind θ', ϕ' die Polarwinkel am Empfänger relativ zur Achse: Empfänger - Streuelement. Die am Ausgang der Antenne anliegende Leistung P_r ergibt sich aus dem Produkt von S_r und der effektiven Antennenfläche A_e

$$P_r = S_r(r, \theta, \phi) A_e(\theta, \phi) \quad (2.27)$$

Es kann gezeigt werden (z.B. Doviak and Zrnic (1993)), daß

$$A_e = \frac{g_r \lambda^2}{4\pi} f^2(\theta, \phi) \quad (2.28)$$

ist. g_r ist der Antennengewinn der Empfangsantenne und ist im Falle eines monostatischen Radars gleich g_t .

Durch Kombination der Gleichungen (2.27), (2.25), (2.26) und (2.28) erhält man die Radar-gleichung für einen Punktstreuer mit dem Rückstreuquerschnitt σ :

$$P_r = \frac{P_t g^2 \sigma \lambda^2 f^4(\theta, \phi)}{(4\pi)^3 r^4 l^2} \quad (2.29)$$

Darin ist zusätzlich der Parameter l enthalten, der die durch Gase und Hydrometeore hervorgerufenen, bei den Frequenzen der hier betrachteten Systeme jedoch zu vernachlässigenden Transmissionsverluste (s. auch Kapitel 6), berücksichtigt.

Die kleinste nachweisbare Leistung des Radars wird begrenzt durch das Rauschen P_n und ist insbesondere bei Klarluft-Radars mit vergleichsweise geringen Rückstreuleistungen von Bedeutung. Dominierend ist das sogenannte weiße Rauschen, das als zufälliges Zeitsignal mit frequenzabhängiger Leistung innerhalb der Bandbreite B_n des Empfängers in Erscheinung tritt. Zur Beschreibung der Rauschleistung P_n eines Systems wird die Systemrauschtemperatur T_{sys} verwendet, die nach Dicke et al. (1946) mit P_n im folgenden Zusammenhang steht:

$$P_n = kT_{sys}B_n \quad (2.30)$$

k ist hierin die Boltzmannkonstante ($= 1.38 \times 10^{-23} \text{WsK}^{-1}$). Die Systemrauschtemperatur beinhaltet dabei das auf das System zurückzuführende Rauschen.

Wie bereits erwähnt, werden in der Radarmeteorologie nicht Punktstreuer, sondern die in einem Meßvolumen verteilten Streuelemente betrachtet. Die räumliche Verteilung der aus einem Meßvolumen stammenden Rückstreuleistung wird zum einen durch die Verteilung der Reflektivität innerhalb des Meßvolumens und zum anderen durch eine kombinierte Gewichtsfunktion bestimmt, die eine

- Winkelabhängigkeit entsprechend dem Antennenstrahlungsdiagramm $f^2(\theta, \phi)$ und
- eine Höhenabhängigkeit entsprechend der Übertragungsfunktion des Empfängers und der Form des Sendeimpulses

aufweist.

Betrachtet man ein solches Meßvolumen, das an den Raumkoordinaten r_0, θ_0 und ϕ_0 zentriert ist, ergibt sich nach Doviak and Zrnica (1993) die über das Volumen integrierte Gesamtleistung $\bar{P}(r_0)$ durch das Volumenintegral

$$\bar{P}(r_0) = \int_0^{r_2} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \eta(r) I(r_0, r) dV \quad (2.31)$$

mit $dV = r^2 dr \sin\theta d\theta d\phi$.

$I(r_0, r)$ beschreibt darin eine zusammengesetzte Gewichtsfunktion und ist gegeben durch

$$I(r_0, r) = \frac{C f^4(\theta - \theta_0, \phi - \phi_0) |W(r_0, r)|^2}{l^2(r) r^4} \quad (2.32)$$

wobei C die von den Ortskoordinaten unabhängigen Radarparameter zusammenfaßt:

$$C = \frac{P_t g^2 \lambda^2}{(4\pi)^3} \quad (2.33)$$

und $|W(r_0, r)|^2$ die Höhengewichtsfunktion ist. Die Höhengewichtsfunktion resultiert aus der Übertragungsfunktion des Empfängers und wichtet die aus einem Höhenintervall reflektierte Leistung in Abhängigkeit von r . Die jedem System eigene Übertragungsfunktion wird zur

Optimierung des Signal-zu-Rausch Verhältnisses (SNR) in der Regel durch ein sogenanntes „Matched Filter“ modifiziert, in dem die Bandbreite des Empfängers B_n an die Bandbreite des Signals, d.h. letztlich an die Bandbreite des Sendepulses angepaßt wird. Für ein ideales Matched Filter und einen Rechteckpuls mit der Pulslänge τ beträgt die Bandbreite $B_n = \frac{1}{\tau}$ (vgl. z.B. Ludloff (1993)).

Doviak and Zrnic (1993) haben gezeigt, daß für ein kreissymmetrisches und gaußförmiges Strahlungsdiagramm das Integral der Antennengewichtsfunktion wie folgt vereinfacht werden kann:

$$\int_0^\pi \int_0^{2\pi} f^4(\theta, \phi) d\theta d\phi = \frac{\pi \theta_1^2}{8 \ln 2} \quad (2.34)$$

worin θ_1 die 3 dB Breite des Antennenstrahls ist.

Für den hypothetischen Fall, daß die Bandbreite des Empfängers (bzw. Filters) sehr viel größer ist als τ^{-1} , kann das Integral $\int |W(r_0, r)|^2 dr$ durch den Ausdruck $c\tau/2$ ersetzt werden. Damit erhält man die gebräuchliche Radargleichung:

$$\bar{P}(r_0) = \frac{P_t g^2 \eta c \tau \pi \theta_1^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 r_0^2 l^2 16 \ln 2} \quad (2.35)$$

2.2.2 Das Dopplerprinzip

In den vorangegangenen Abschnitten galt die Aufmerksamkeit der empfangenen rückgestreuten Leistung in Abhängigkeit von den atmosphärischen Strukturen und Systemeigenschaften. Die Bestimmung des Windes erfordert jedoch die Analyse weiterer im Empfangssignal enthaltener Informationen, was mit verschiedenen Verfahren erfolgen kann. Die wohl am häufigsten genutzte und im weiteren näher erklärte Methode ist die des „Doppler Beam Swinging“ (DBS), bei welcher die Dopplerverschiebung des rückgestreuten Signals gegenüber der Sendefrequenz entlang der Strahlrichtung von wenigstens 3, häufig jedoch 5 Beams gemessen wird.

Alternativ dazu kann die „Spaced Antenna“ (SA)-Methode zur Windbestimmung genutzt werden (s. z.B. van Baelen (1991)). Bei diesem Verfahren wird die horizontale Windgeschwindigkeit durch Kreuzkorrelation der Streumuster aus den von räumlich getrennten Antennen empfangenen Signalen bestimmt. Ein wesentlicher Vorteil gegenüber dem DBS-Verfahren besteht darin, daß die empfangenen Signale an den drei Antennen aus ein und demselben Meßvolumen stammen. Beim DBS-Verfahren dagegen liegen der Windbestimmung Radialwindmessungen in voneinander getrennten Volumina zugrunde, so daß die Homogenität des Windfeldes eine wesentliche Voraussetzung für die Berechnung des Horizontalwindes ist. Außerdem sind mit dem SA-Verfahren wesentlich höhere zeitliche Auflösungen möglich. Als

Nachteil erweist sich der hohe technische Aufwand (wenigstens 3 separate Empfangssysteme) und die geringen vertikalen Reichweiten im Vergleich zu den nach dem DBS-Verfahren arbeitenden Systemen (Hirsch, 1995).

Die dieser Arbeit zugrundeliegenden Daten sind nach dem im weiteren näher erklärten „Doppler Beam Swinging“ (DBS)-Verfahren gemessen worden, eine Methode, welche heute bei den meisten Windprofiler-Radar-Geräten angewandt wird.

Die mit dem Radar gewonnenen Meßinformationen sind nur dann nützlich, wenn sie einer bestimmten Höhe bzw. Entfernung zum Radar und einem definierten Meßvolumen zuzuordnen sind. Die Bestimmung beider Größen erfolgt über die Laufzeit und die Länge des Sendeimpulses (Abb. 2.2).

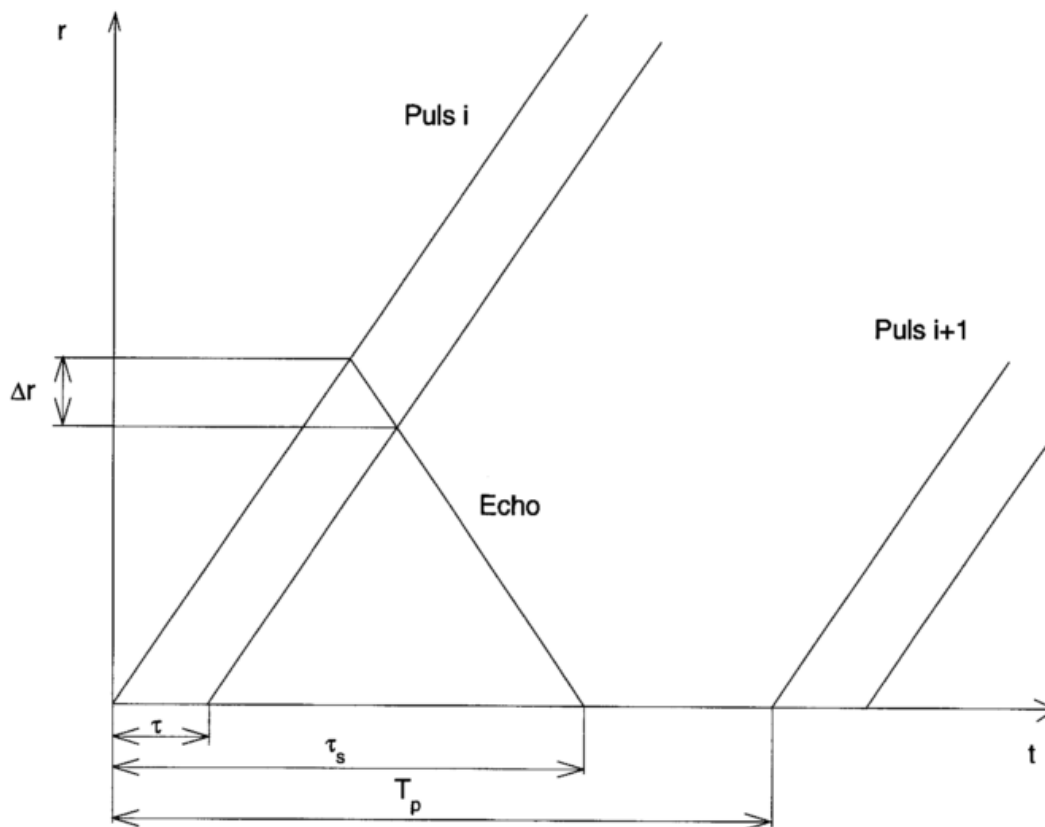


Abbildung 2.2: Höhen-Zeit Kurve der Sende- und Empfangspulse.

Ein gepulstes Dopplerradar sendet mit der Pulswiederholperiode T_p kurze elektromagnetische Pulse der Länge τ aus. Unter der Voraussetzung, daß $|n-1| \ll 1$ gilt⁴, ist die Entfernung r eines stationären Punktziels gegeben durch

⁴d.h., die Lichtgeschwindigkeit in der Atmosphäre läßt sich gut durch die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum approximieren.

$$r = \frac{c\tau_s}{2} \quad (2.36)$$

Dabei ist c die Lichtgeschwindigkeit und τ_s die Zeit zwischen dem Aussenden und dem Empfang des Pulses. In der Praxis muß zur Bestimmung von r die Laufzeit innerhalb des Systems (das sogenannte „Systemdelay“) von τ_s subtrahiert werden. Die maximale, eindeutig bestimmbare Entfernung r_a ergibt sich aus der Pulswiederholperiode nach

$$r_a = \frac{cT_p}{2} \quad (2.37)$$

T_p muß deshalb so groß gewählt werden, daß vor dem Aussenden des Folgepulses alle signifikanten Rückstreusignale des vorangegangenen Pulses empfangen worden sind. Wird diese Bedingung verletzt, spricht man von „range aliasing“.

Das die vertikale Auflösung bestimmende Meßintervall ΔR in Richtung des Radarstrahls, aus dem das Radarecho stammt, ist durch die Pulslänge τ folgendermaßen definiert:

$$\Delta R = \frac{c\tau}{2} \quad (2.38)$$

Einer Erhöhung der Auflösung durch eine Verringerung von τ sind Grenzen gesetzt, weil:

- einerseits mit einer Reduzierung von τ die Rückstreuleistung entsprechend Gleichung (2.35) und damit die Reichweite verringert wird und
- andererseits die Bandbreite des Pulses vergrößert wird, so daß vorgegebene bzw. zugelassene Frequenzbänder überschritten werden.

Durch Abtasten des Radarechos zu den Zeiten τ_{s_i} ($i = 1..N_{HTS}$) erhält man für N_{HTS} Höhentore („range gates“) die gewünschten Meßinformationen. In der Praxis wird gewöhnlich $\Delta\tau_s = \tau_{s_{i+1}} - \tau_{s_i}$ so gewählt, daß der Abstand zwischen den Höhentoren gleich oder höchstens halb so groß ist wie die vertikale Auflösung ($0,5\tau < \Delta\tau_s \leq \tau$). Bei $\Delta\tau_s < \tau$ spricht man von „oversampling“.

Das Meßvolumen wird üblicherweise durch die Konturlinie der 6 dB-Abnahme der Höhen- und Antennengewichtsfunktion ($W^2(r)f^4(\theta, \phi)$) gegenüber dem Maximum definiert (Doviak and Zrnica, 1993). Für einen Rechteckimpuls und bei einer gaußförmigen Frequenzdurchlaßfunktion mit einer 6 dB Bandbreite von τ^{-1} beträgt die vertikale Auflösung

$$r_6 = 1,12 \frac{c\tau}{2} \quad (2.39)$$

Die in Strahlrichtung vorherrschende Radialgeschwindigkeit v_r wird unter Ausnutzung des Dopplereffektes bestimmt. Demnach ist das an einem sich bewegenden Streuer rückgestreute Signal zur Sendefrequenz um den Betrag f_d dopplerverschoben:

$$f_d = \frac{2f}{c} v_r \quad (2.40)$$

Die direkte Bestimmung der Dopplerverschiebung ist in der Praxis jedoch sehr schwierig bzw. unmöglich, da die Bandbreite des Sendepulses erheblich größer als die zu erwartende Dopplerverschiebung ist. Deshalb wird die Phasenänderung ($d\psi/dt$) aufeinanderfolgender Pulse ermittelt. Diese steht zur Bewegung des Streuers in folgender Beziehung:

$$\frac{\Delta\psi}{T_p} = \frac{4\pi}{\lambda} v_r = \omega_d = 2\pi f_d \quad (2.41)$$

Nach dem Abtasttheorem läßt sich $\Delta\psi$ nur dann eindeutig bestimmen, wenn $|\Delta\psi| < \pi$ ist. Fügt man diese Bedingung in Gleichung (2.41) ein, erhält man die Gleichung für die Nyquist-Frequenz:

$$f_N = \frac{1}{2T_p} \quad (2.42)$$

Es ist die Frequenz, bis zu der die Dopplerverschiebung eindeutig bestimmt werden kann. Durch Kombination von Gleichung (2.41) und (2.42) erhält man die Gleichung für die Nyquist-Geschwindigkeit v_N :

$$v_N = \frac{\lambda}{4T_p} \quad (2.43)$$

Zur Begrenzung der erforderlichen Rechenleistung werden im allgemeinen N_k Pulse kohärent gemittelt (Schmidt et al., 1979). Dadurch vergrößert sich der zeitliche Abstand zweier aufeinanderfolgender Pulse um den Faktor N_k . Somit gilt für v_N :

$$v_N = \frac{\lambda}{4N_k T_p} \quad (2.44)$$

2.3 Signalverarbeitung und Ableitung meteorologischer Größen

Durch Abwärtsmischung des Empfangssignals mit dem Sendesignal sowie mit dem um 90° verschobenen Sendesignal erhält man an jedem Höhentor eine komplexe, quasi stationäre und normalverteilte Zeitreihe. Eine derartige Zeitreihe läßt sich im Zeitbereich durch ihre

Autokorrelationsfunktion und im Frequenzbereich durch ihr Leistungsdichtespektrum, welches allgemein als Dopplerspektrum bezeichnet wird, charakterisieren. Die gewünschten meteorologischen Informationen sind in den ersten drei Momenten M_n des Dopplerspektrums $S(\omega)$ enthalten, die wie folgt definiert sind

$$M_n = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega)\omega^n d\omega \quad (2.45)$$

Das nullte Moment ist die empfangene Leistung, das erste Moment entspricht der mittleren Radialgeschwindigkeit des rückstreuenden Mediums und das zweite Moment enthält Informationen über die Varianz der Radialgeschwindigkeit. Aus dem 1. Moment werden in der nächsten Stufe der Signalverarbeitung der dreidimensionale Windvektor und die virtuelle Temperatur berechnet.

2.3.1 Ableitung der Momente

Nach der Wiener-Chinchine Relation⁵, ist es möglich die drei Momente auch aus den Ableitungen der Autokorrelationsfunktion $C(\tau)$ an der Stelle $\tau = 0$ zu bestimmen, ohne zuvor das Dopplerspektrum berechnet zu haben. Es existieren somit zwei prinzipiell unterschiedliche Verfahren zur Berechnung der Momente und zwar die Momentschätzung im Zeitbereich und die Momentschätzung im Frequenzbereich. Für jedes dieser Verfahren sind wiederum verschiedene Schätzmethode für die Momente anwendbar, deren Vor- und Nachteile man in einer Reihe von Arbeiten (Doviak and Zrnic, 1993; May, 1989; Woodman, 1985) ausführlich beschrieben findet.

Im weiteren werden die Signalverarbeitungsschritte für die Momentschätzung im Frequenzbereich kurz erläutert, die bei den untersuchten Systemen benutzt werden.

Die Verarbeitung der komplexen Zeitreihe am Ausgang des Empfängers bis zur Schätzung der Momente erfolgt in folgenden Schritten:

- Kohärente Integration
- Eliminierung des Gleichspannungsanteils
- Berechnung des Dopplerspektrums durch Fast-Fouriertransformation (FFT)
- Spektrale Integration
- Identifizierung von Clutter (Echos von bodennahen Festzielen)

⁵Die Wiener-Chinchine-Relation stellt einen Zusammenhang zwischen dem Leistungsspektrum einer stochastischen Funktion und ihrer Autokorrelierten her.

- Berechnung des mittleren Rauschlevels
- Berechnung der Momente

Kohärente Integration Bei der kohärenten Integration werden die im Abstand der Puls-wiederholzeit vorliegenden N_k Signale phasenrichtig (kohärent) addiert, wodurch die Datenmenge reduziert wird. Zwei Bedingungen sind bei der Wahl der Anzahl der kohärenten Integrationen zu beachten. Zum einem muß gewährleistet werden, daß innerhalb des zeitlichen Mittelungsintervalls das Signal korreliert ist. Nach Nathanson (1969) kann die Korrelationszeit τ_c aus der Wellenlänge abgeschätzt werden mit

$$\tau_c \approx 0,2\lambda \quad (\tau_c \text{ in s; } \lambda \text{ in m}) \quad (2.46)$$

Zum anderen ist zu beachten, daß sich mit steigender Anzahl der kohärenten Integrationen die Nyquist-Geschwindigkeit entsprechend Gleichung (2.43) reduziert. Die Mittelung im Zeitbereich stellt eine Art Kammfilterung dar, bei der Signalkomponenten mit einer Dopplergeschwindigkeit größer als die Nyquistgeschwindigkeit abgeschwächt werden (Schmidt et al., 1979).

Eliminierung des Gleichspannungsanteils Die I und Q Spannungskanäle weisen einen spezifischen „Offset“ auf, der zum Entstehen einer vom eigentlichen Signal unabhängigen spektralen Komponente bei der Nullfrequenz führt. Die Korrektur bei den hier betrachteten Systeme erfolgt im Frequenzbereich nach dem in Barth et al. (1994) beschriebenen Verfahren.

Berechnung des Dopplerspektrums durch Fouriertransformation In diesem Schritt wird für die Zeitreihe mittels der schnellen Fouriertransformation (FFT) an N_F Meßpunkten das Leistungsdichtespektrum $S(v)$ berechnet. Die Anzahl der Meßpunkte N_F resultiert aus einem Kompromiß zwischen vorhandener Rechenkapazität und der bestmöglichen Geschwindigkeitsauflösung Δv , welche gegeben ist durch

$$\Delta v = \frac{\lambda}{2N_F N_k T_p} \quad (2.47)$$

In der Praxis hängt die Anzahl der kohärenten Integrationen von der Wellenlänge λ und der Pulswiederholperiode T_p ab und variiert bei den in dieser Arbeit betrachteten Systemen etwa zwischen 7 und 180. Zur Vermeidung von nichtrealen Spektralanteilen wird außerdem ein Hanningfenster auf die Zeitreihe angewendet.

Spektrale Integration Vor der Weiterverarbeitung der Dopplerspektren erfolgt häufig eine auch als inkohärente Integration bezeichnete Mittelung mit dem Ziel, die Streuung der spektralen Leistungsdichte zu reduzieren. Allerdings führt die spektrale Mittelung zu einer Vergrößerung der spektralen Breite (Gossard and Strauch, 1983). Das Produkt aus Pulswiederholperiode T_p , der Anzahl der kohärenten und inkohärenten Integrationen N_k und N_s sowie der Anzahl der Meßpunkte N_F ergibt die Gesamtmittelungszeit („dwelltime“). Dies entspricht der Zeit, die notwendig ist, um in einer Strahlrichtung die Radialgeschwindigkeit des Windes oder die Schallgeschwindigkeit zu bestimmen. Sie liegt im Bereich von ca. 30 s.

Als Alternative zu diesem als „Mean Algorithmus“ bezeichneten Verfahren der spektralen Mittelung und Groundclutter-Unterdrückung wurde von Merritt (1995) ein sogenannter „Intermittent Clutter Reduction Algorithm“ entwickelt. Dieser Algorithmus prüft vor jeder spektralen Mittelung die statistische Verteilung der spektralen Leistungsdichte, die zwischen atmosphärischen Signalen und Störechos verschieden ist. Dadurch können Störechos, die beispielsweise von Vögeln herrühren (sogenannter „Intermittierender Clutter“) eliminiert werden.

Identifizierung von Groundclutter Groundclutter oder Festechos entstehen durch Reflexion der elektromagnetischen Strahlung, die in den Nebenkeulen der Antenne abgestrahlt wird, an ruhenden Objekten, wie z.B. Gebäude oder Bäume. Sie zeigen sich im Dopplerspektrum durch einen markanten, nur über wenige Spektralpunkte reichenden Peak am Nullpunkt und sind oftmals stärker als die atmosphärischen Signale.

Der Algorithmus zur Identifizierung von Groundclutter beginnt mit der Suche um den Nullpunkt zentrierter Peaks an einem vom Anwender frei wählbaren Höhentor r_{0i} und schreitet in Richtung geringerer Höhen fort. So gefundene Peaks werden als Groundclutter deklariert und für die Ermittlung des atmosphärischen Signals ausgeschlossen. Um Verwechslungen mit geringen Radialgeschwindigkeiten zu vermeiden, wird der Algorithmus nicht angewandt, wenn im darüberliegenden Höhentor r_{0i+1} die Radialgeschwindigkeit nahe dem Nullpunkt liegt. Der Algorithmus versagt, wenn die Dopplerverschiebung des Atmosphärensignals nahe Null liegt (was im Vertikalstrahl nahezu immer der Fall ist) oder die erste frei wählbare Höhe bereits ein Cluttersignal aufweist.

Berechnung des mittleren Rauschpegels Die Bestimmung des Rauschpegels folgt dem von Hildebrand and Sekhon (1974) beschriebenen Verfahren. Es basiert auf den statistischen Eigenschaften des weißen Rauschens, wonach die Varianz der spektralen Leistungsdichte gleich dem Erwartungswert der Leistungsdichte ist.

Ausgehend von dem Originalspektrum P_i wird sukzessiv eine Reihe weiterer Spektren derart konstruiert, daß gilt $P_i \leq P_{\text{Grenzwert}}$, wobei anfangs $P_{\text{Grenzwert}} = P_{\text{max}}$ ist. Der Wert $P_{\text{Grenzwert}}$ wird schrittweise erniedrigt, bis die Standardabweichung der Spektraldichte gleich dem Mittelwert der Spektraldichte ist. Aus den verbleibenden Punkten dieses Spektrums erfolgt dann mittels einer einfachen Mittelung die Berechnung des mittleren Rauschniveaus.

Anschließend wird das Dopplerspektrum für die Berechnung der spektralen Momente auf den spektralen Bereich eingegrenzt, der den mittleren Rauschpegel überschreitet und der Rauschpegel von der spektralen Leistungsdichte in diesem Bereich subtrahiert.

Berechnung der Momente Ausgehend von Gleichung (2.45) werden nun das nullte, erste und zweite Moment des Dopplerspektrums berechnet, welche die empfangene Leistung P_r , die Radialgeschwindigkeit v_r und die Geschwindigkeitsvarianz σ_v^2 repräsentieren.

$$P_r = \int_{v_l}^{v_h} S(v) dv \quad (2.48)$$

$$v_r = \int_{v_l}^{v_h} v S(v) dv \quad (2.49)$$

$$\sigma_v^2 = \frac{1}{S} \int_{v_l}^{v_h} (v - v_r)^2 S(v) dv \quad (2.50)$$

Darin definieren v_l und v_h den Geschwindigkeitsbereich des Signalspektrums, in dem die Rückstreuleistung den mittleren Rauschpegel überschreitet.

Die Anwendung des Verfahrens ist erfolgreich, wenn nur ein durch die Wind- oder Schallgeschwindigkeit hervorgerufener Peak im Dopplerspektrum existiert. Da jedoch in bestimmten Situationen mehrere, z.B. durch Niederschlag hervorgerufene Peaks auftreten können, werden gegenwärtig „intelligenter“ Verfahren zur Momentschätzung entwickelt (z.B. Multipleanalyse (Griesser, 1998), Wavelet-Analyse (Jordan et al., 1997)).

2.3.2 Berechnung des Windes und der virtuellen Temperatur

Zur Berechnung des dreidimensionalen Windvektors wird sukzessive in mindestens drei, häufig jedoch in fünf Strahlrichtungen die Radialgeschwindigkeit des Windes als Funktion der

Höhe gemessen. Zur Gewinnung von Mittelwerten über vorgegebene Zeitintervalle erfolgt gewöhnlich eine zeitliche Mittelung der Radialgeschwindigkeiten separat für jede Radarstrahlrichtung. Bei der RASS-Messung wird im allgemeinen die Schallgeschwindigkeit mit dem senkrechten Radarstrahl bestimmt.

2.3.2.1 Konsensus-Mittelung

Das erstmals von Strauch et al. (1984) auf Windprofilerdaten angewendete Mittelungsverfahren dient zur Berechnung der mittleren Momente. Durch die Konsensusmittelung werden auf relativ einfache Art und Weise Ausreißer eliminiert und damit der statistische Fehler reduziert. Das zeitliche Mittelungsintervall ist dabei abhängig von den Radarparametern und der Zuverlässigkeit der Einzelmessungen und schwankt im allgemeinen zwischen 10 min und 60 min.

Der Algorithmus arbeitet in zwei Schritten. Sind in dem Mittelungsintervall N Einzelmessungen vorhanden, wird zunächst für jeden Einzelwert x_k mit $k = 1..N$ geprüft, wieviele der restlichen Werte des Mittelungsintervalls innerhalb eines vorzugebenen Bereiches Δx um den Wert x_k liegen.

Für jeden Wert x_k wird eine Untermenge von n_k Einzelwerten x_i ermittelt für die die Bedingung

$$x_k - \Delta x < x_i < x_k + \Delta x \quad i = 1, \dots, N \quad (2.51)$$

gilt. Der Mittelwert wird berechnet aus der Untermenge mit dem größten n_k . Optional lassen sich sowohl der Bereich Δx als auch die notwendige Mindestanzahl n_k relativ zur Gesamtzahl der Einzelmessungen vorgeben. Eine wichtige Voraussetzung für die erfolgreiche Anwendung der Konsensusmittelung ist die Quasi-Stationarität der meteorologischen Parameter (Wind oder Temperatur) innerhalb des Mittelungsintervalls. Diese Bedingung ist zwar in der Regel erfüllt, jedoch treten gelegentlich Situationen mit markanten Änderungen von Wind und Temperatur, z.B. bei einem Frontdurchgang, auf, so daß die notwendige Anzahl n_k nicht erreicht wird. Aus diesem Grund wurde von Weber et al. (1993) die Anwendung der sogenannten Kontinuitätsmethode auf die Einzelmessungen vorgeschlagen (s. auch (2.3.3)).

2.3.2.2 Berechnung der kartesischen Windkomponenten

Der Zusammenhang zwischen den Radialgeschwindigkeiten der einzelnen Radarstrahlen v_r , und den horizontalen Windgeschwindigkeitskomponenten v_h , entlang der Verbindungsachse

gegenüberliegender Strahlen ist mit der Koordinatenfestlegung entsprechend der Abb. 2.3 gegeben durch

$$\begin{aligned}
 v_{r_0} &= -w \\
 v_{r_1} &= v_{h_1} \sin\theta - v_{r_0} \cos\theta \\
 v_{r_2} &= v_{h_2} \sin\theta - v_{r_0} \cos\theta \\
 v_{r_3} &= -v_{h_1} \sin\theta - v_{r_0} \cos\theta \\
 v_{r_4} &= -v_{h_2} \sin\theta - v_{r_0} \cos\theta
 \end{aligned}
 \tag{2.52}$$

θ ist darin der Zenitwinkel der geneigten Radarstrahlen und w ist die Vertikalgeschwindigkeit des Windes.

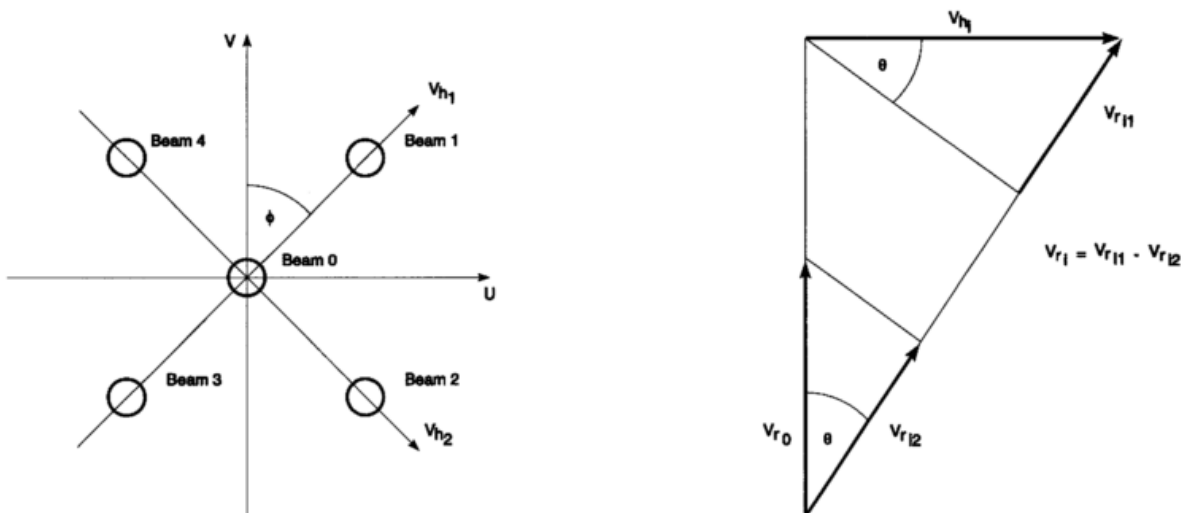


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung einer 5-Beamkonfiguration in der Draufsicht (links) und die geometrischen Verhältnisse in der Seitenansicht (rechts)

Aus den Gleichungen wird sofort ersichtlich, daß, wie bereits erwähnt, der dreidimensionale Windvektor eindeutig aus den Radialgeschwindigkeitsmessungen von drei Strahlen abgeleitet werden kann. Häufig werden jedoch die Radialgeschwindigkeiten aller 5 Beams verwendet, wobei eine gewichtete Mittelung entsprechend der Anzahl der gültigen Werte im Konsensusfenster N_{cns_i} erfolgt. Die Geschwindigkeitskomponenten werden dann wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned}
v_{h_1} &= \frac{N_{cns_1}(v_{r_1} + v_{r_0} \cos\theta) - N_{cns_3}(v_{r_3} + v_{r_0} \cos\theta)}{(N_{cns_1} + N_{cns_3}) \sin\theta} \\
v_{h_2} &= \frac{N_{cns_2}(v_{r_2} + v_{r_0} \cos\theta) - N_{cns_4}(v_{r_4} + v_{r_0} \cos\theta)}{(N_{cns_2} + N_{cns_4}) \sin\theta}
\end{aligned}
\tag{2.53}$$

Die Wichtung der einzelnen Beams ist jedoch nur dann von Vorteil, wenn die mit dem Vertikalstrahl gemessenen Radialgeschwindigkeiten richtige Werte aufweisen. Aufgrund der geringen absoluten Beträge von w und der damit vorhandenen Probleme bei der Unterscheidung zwischen einem Groundclutter-Echo und dem atmosphärischen Signal ist die Fehlerhäufigkeit bei der Bestimmung der Radialgeschwindigkeit des Vertikalstrahls deutlich größer als bei den geneigten Strahlen. Deshalb erscheint es sinnvoller, v_{h_1} und v_{h_2} aus den Einzelmessungen der Radialgeschwindigkeiten, nachdem die Konsistenz der Radialgeschwindigkeiten gegenüberliegender Strahlen geprüft wurde, zu berechnen. Die Konsistenz ist nämlich nur dann gegeben, wenn das Windfeld innerhalb des von den Strahlen aufgespannten Volumens homogen ist und die Radialgeschwindigkeiten richtig bestimmt worden sind.

Griesser (1998) wies anhand von Vergleichen mit Radiosondierungen nach, daß diese Methode der Windberechnung zwar zu einer um etwa 10 % geringeren Verfügbarkeit führt, man andererseits jedoch qualitativ deutlich bessere Winddaten erhält.

Abschließend werden aus den Werten v_{h_1} und v_{h_2} und dem Azimutwinkel ϕ die kartesischen Windkomponenten u und v berechnet. Sind die Verbindungsachsen der Beams orthogonal zueinander, gilt

$$\begin{aligned}
v &= v_{h_1} \cos\phi - v_{h_2} \cos(90^\circ - \phi) \\
u &= v_{h_1} \sin\phi + v_{h_2} \sin(90^\circ - \phi)
\end{aligned}
\tag{2.54}$$

2.3.2.3 Berechnung der virtuellen Temperatur

Die Berechnung der Temperatur basiert auf der für jedes Höhenintervall bestimmten Schallgeschwindigkeit c_a . Durch die klassische Formel von Laplace wird der Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und den Umgebungsbedingungen beschrieben.

$$c_a = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}}
\tag{2.55}$$

mit $\gamma = c_p/c_v$ als dem Verhältnis der spezifischen Wärmen, p dem Luftdruck und ρ der Luftdichte. Die Zustandsgleichung für ideale Gase ist definiert mit:

$$p = \rho R_s T \quad (2.56)$$

worin R_s die spezielle Gaskonstante ist. Diese kann durch die allgemeine Gaskonstante und die molare Masse des jeweiligen Gases ersetzt werden:

$$R_s = \frac{R_a}{M} \quad (2.57)$$

Eliminiert man nun in Gleichung (2.55) p durch (2.56) und substituiert R_s erhält man nach Umformen die Gleichung zur Berechnung der Temperatur:

$$T = \frac{c_a^2 M}{\gamma R_a} \quad (2.58)$$

In der realen Atmosphäre ist insbesondere M und im schwächeren Maße auch γ von der Luftfeuchte abhängig. Da bei einem Windprofiler/RASS a priori keine Feuchteinformation vorliegt, kann die molare Masse M_m für das aktuelle Wasserdampf-Luftgemisch nicht bestimmt werden. In der praktischen Anwendung wird deshalb nicht die „wahre“ Temperatur berechnet, sondern die virtuelle Temperatur (s. Gleichung 2.62).

Zur Verdeutlichung dieses Sachverhaltes soll der Zusammenhang zwischen den molaren Massen feuchter und trockener Luft und der Luftfeuchte hergeleitet werden.

Nach dem Daltonschen Gesetz ist die Dichte eines Gasgemisches gleich der Summe der Partialdichten der einzelnen Komponenten - im Falle feuchter Luft gilt also

$$\rho_m = \rho_d + \rho_w \quad (2.59)$$

Die Dichte ist proportional den Partialdrücken e und $p_d = p - e$, so daß man schreiben kann:

$$\rho_m = \frac{p - e}{R_a T} M_d + \frac{e}{R_a T} M_w = \frac{p}{R_a T} \left[1 - \frac{e}{p} \left(1 - \frac{M_w}{M_d} \right) \right] \quad (2.60)$$

M_d und M_w sind die mittleren molaren Massen für trockene Luft bzw. für Wasserdampf. Setzt man in den eckigen Klammern dafür die konkreten Werte ein ($M_d = 28,96 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$, $M_w = 18,016 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$) und substituiert ρ_m durch die Zustandsgleichung idealer Gase, so erhält man nach einigen Umformungen:

$$M_m = M_d \left(1 - 0,378 \frac{e}{p} \right) \quad (2.61)$$

Der in Klammern stehende Term ist die Proportionalitätskonstante zwischen der „wahren“ und der virtuellen Temperatur:

$$T = T_v \left(1 - 0,378 \frac{e}{p} \right) \quad (2.62)$$

Durch Einsetzen von Gleichung (2.62) und (2.61) in Gleichung (2.58) erhält man die Gleichung zur Berechnung der virtuellen Temperatur aus der Schallgeschwindigkeit.

$$T_v = \frac{c_a^2 M_d}{\gamma R_a} \quad (2.63)$$

Im Auswerteprogramm der in dieser Arbeit betrachteten Systeme wird diese Gleichung zur Berechnung der virtuellen Temperatur mit den in erster Näherung als konstant angenommenen physikalischen Größen $M_d = 28.96 \text{ kg/kmol}$ und $\gamma = 1.4$ verwendet, so daß sich (2.63) weiter vereinfacht zu

$$T_v \approx \frac{c_a^2}{401,94} \quad (2.64)$$

Die Feuchteabhängigkeit von γ bleibt darin unberücksichtigt und führt, wie später noch gezeigt wird, zu einem nicht zu vernachlässigenden Fehler.

In Bereichen, in denen es mehr auf die relative Genauigkeit als auf die absolute Bestimmung der Temperatur ankommt, wie z.B. bei mikrometeorologischen Messungen mit Ultraschallanemometern, berücksichtigt man den Feuchteinfluß auf γ , spricht jedoch von der virtuellen akustischen Temperatur (bekannt auch unter der Bezeichnung Schall- oder Sonictemperatur).

Für ein Wasserdampf-Luft Gemisch läßt sich γ_m berechnen mit der Gleichung

$$\gamma_m = \gamma_d \left(1 - 0,1 \frac{e}{p}\right) \quad (2.65)$$

worin γ_d das Verhältnis der spezifischen Wärmen für trockene Luft ist (vgl. Kallistratova and Kon (1985)).

Substituiert man γ in Gleichung (2.63) durch γ_m , so erhält man:

$$T_v = \frac{c_a^2 M_d}{\gamma_d \left(1 - 0,1 \frac{e}{p}\right) R_a} \quad (2.66)$$

Da nun T_s als virtuelle akustische Temperatur definiert wird mit

$$T_s = T_v \left(1 - 0,1 \frac{e}{p}\right) \quad (T_s, T \text{ in K; } e, p \text{ in hPa}) \quad (2.67)$$

reduziert sich Gleichung (2.66) auf

$$T_s = \frac{c_a^2 M_d}{\gamma_d R_a} \quad (2.68)$$

Zwischen den verschiedenen Temperaturen T , T_v und T_s bestehen in guter Näherung folgende Beziehungen (z.B. Kaimal and Gaynor (1991)):

$$\begin{aligned} T_s &\approx T + 0,1e \\ T_s &\approx T_v - 0,02e \end{aligned} \quad (2.69)$$

2.3.3 Qualitätskontrolle

Der Berechnung des Windvektors und der virtuellen Temperatur schließt sich in der Regel, nach der Konsensusmittelung eine weitere Qualitätskontrolle (QC) an, in der die zeitliche und räumliche Konsistenz der bereits gemittelten Meßwerte geprüft wird.

Das am weitesten verbreitete und auf Windprofiler/RASS-Daten angewendete Verfahren ist die in 2 Schritten ablaufende Kontinuitätskontrolle nach Weber and Wuertz (1991). Im ersten Schritt, der sogenannten Mustererkennung, werden im zeitlich und vertikal verteilten Feld des zu prüfenden Parameters (Windkomponenten oder Temperatur) Gebiete gesucht, die in sich konsistent sind, d.h. in denen die räumliche und zeitliche Änderung des Parameters einem vorgegebenen Kontinuitätsmodell genügt. Nachdem die in sich konsistenten Felder ermittelt worden sind, erhält jeder Punkt eine Wichtung, die der Größe des Feldes (Gebietes), zu dem er gehört, proportional ist. Im zweiten Schritt werden alle als Diskontinuität erkannten Werte zwischen den einzelnen Feldern durch Vergleich mit dem zwischen den Nachbarpunkten (vertikal und zeitlich) interpolierten Wert geprüft und bei Überschreiten eines Grenzwertes markiert, wobei die zuvor ermittelten Gewichte berücksichtigt werden.

Dieses Verfahren wird seit 1993 zur operationellen Qualitätskontrolle im „NOAA Windprofiler Demonstration Network“ und zum Teil auch bei den Windprofiler/RASS-Systemen am Meteorologischen Observatorium Lindenberg angewendet.

Die Leistungsfähigkeit des Weber und Wuertz-Algorithmus ist eingehend durch Miller et al. (1994) untersucht worden. Als eine wichtige Schlußfolgerung wurde u.a. eine „Multi-Stationen“- Qualitätskontrolle empfohlen, weil nur so, konsistente Felder von Meßfehlern im zeitlichen und vertikalen Feld der Wind- und Temperaturmessungen erkannt werden können.

Kapitel 3

Beschreibung der Meßsysteme und des Datenmaterials

3.1 Meßsysteme

3.1.1 Windprofiler Radar/RASS

Dieser Arbeit liegen Messungen zweier UHF-WPR/RASS zugrunde, die seit 1993 bzw. 1996 am MOL quasi operationell betrieben werden. Damit liegt ein umfassendes Datenmaterial vor, aus dem speziell zur Meßgenauigkeit (Kapitel 4 und 5) und Verfügbarkeit (Kapitel 6) weitgehendere Schlußfolgerungen gezogen werden können, als dies im Rahmen von Meßkampagnen während kürzerer Zeiträume bisher möglich war. Beide UHF-Systeme wurden von der amerikanischen Firma Radian Corporation, teilweise in Zusammenarbeit mit deutschen Firmen, hergestellt und installiert. Das eine System (LAP, Abb. 3.1) wird bei einer Frequenz von 1290 MHz betrieben und ist in erster Linie für Wind- und Temperatursondierungen in der atmosphärischen Grenzschicht ausgelegt. Das andere System (TWP, Abb. 3.2) mit einer Sendefrequenz von 482 MHz und einem wesentlich größeren Leistungsaperturprodukt ist für Windmessungen bis in die untere Stratosphäre geeignet.

Sowohl der prinzipielle technische Aufbau als auch die Signalanalyse und die Datenbearbeitung sind mit wenigen Ausnahmen bei beiden Systemen identisch. Auf die wesentlichen Unterschiede wird sowohl in 3.1.1.1 als auch in den entsprechenden Tabellen hingewiesen.

Beide Geräte stehen auf dem Windprofiler-Meßfeld ($52^{\circ}12'38''N$; $14^{\circ}07'48''E$) am südöstlichen Rand des MOL-Geländes in einer Entfernung von wenigstens 700 m zu Dienst- und Wohngebäuden. Die Höhe der Antennenplattformen über dem Meeresspiegel beträgt 103 m

(TWP) bzw. 107 m (LAP). Der Meßort wird zur einen Seite durch Wald und zur anderen Seite durch Ackerflächen begrenzt. Orographisch ist das Gelände durch den auf dem MOL-Gelände befindlichen Kalkberg mit einer Höhe von 122 m ü.NN gekennzeichnet, der sich zur unmittelbaren Umgebung um ca. 25 m abhebt. Der Rawinsondenstartplatz befindet sich etwa 600 m vom Windprofiler-Meßfeld in nordwestlicher Richtung.

3.1.1.1 Technischer Aufbau

Die wesentlichen Systemkomponenten der hier betrachteten WPR/RASS sind am Beispiel des TWP/RASS in Abb. 3.3 als Blockdiagramm dargestellt. Wichtige Systemmerkmale sind in Tabelle 3.1 zusammengefaßt. Der Aufbau des LAP/RASS weicht hiervon bzgl. der Sendefrequenz sowie der Konfiguration der Antenne und akustischen Quellen ab. Folgende Hauptbaugruppen können unterschieden werden:

- Antenne

Die Antenne besteht beim TWP aus 120 Dipolreihen und beim LAP aus 324 Flächenelementantennen (sogenannte „patches“, siehe auch Ecklund et al. (1988)). Die fünf Antennen-Strahlrichtungen werden durch eine Phasensteuerung von jeweils sechs Antennengruppen mit einer Phasendifferenz von jeweils 60° realisiert.

- Sendeeinheit (Modulator, T/R Unit und Final Amplifier)

Die mehrstufig ausgeführte Sendeeinheit dient zur Erzeugung einer zeit- und phasenmodulierten Hochfrequenzschwingung. Zur Reduzierung der Bandbreite des Sendepulses werden die Flanken des Rechteckpulses abgeflacht („Pulsshaping“), was zu einer wesentlichen Reduzierung der notwendigen Bandbreite¹ führt. Dies ist eine wesentliche technische Voraussetzung für den Betrieb von Windprofiler-Radar in den eng belegten europäischen Frequenzbändern. Die Verstärkung des Sendesignals erfolgt in mehreren Stufen, wobei beim LAP der Endverstärker ein Transistorverstärker beim TWP ein Röhrenverstärker ist. Durch einen sogenannten Zirkulator wird eine weitgehende Entkoppelung zwischen Sende- und Empfangszweig erreicht.

- Empfangseinheit (T/R Unit und Receiver/Modulator)

Der Empfänger dient zur Verstärkung und Aufbereitung des rückgestreuten Signals. Zum Schutz des Vorverstärkers vor dem vom Zirkulator während des Sendens durchgelassenen (Rest-)Sendesignal dienen aktive und passive Begrenzer („Limiter“). Weitere Komponenten der Empfangseinheit sind ein rauscharmer Vorverstärker, ein Bandpassfilter, das Frequenzen außerhalb des Profilerfrequenzbandes (z.B. externe RF)

¹„necessary bandwidth“



Abbildung 3.1: Der Grenzschichtwindprofiler (LAP) am MOL. Auf dem Drehgestell sind rechts die Radarantenne und links die akustische Quelle angeordnet. Sowohl die Azimutposition des Drehgestells als auch der Abstand zwischen Schallquelle und Radarantenne können variiert werden.

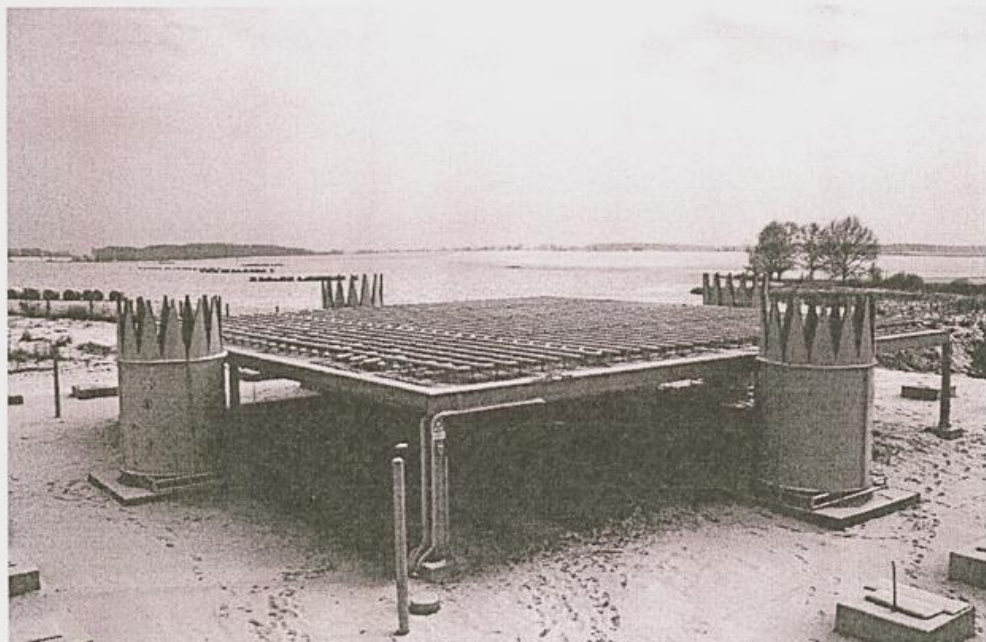


Abbildung 3.2: Troposphärenwindprofiler (TWP) am MOL vor der Installation des Clutterzauns. Erkennbar ist das aus 120 Dipolreihen bestehende Antennenfeld mit den vier akustischen Quellen.

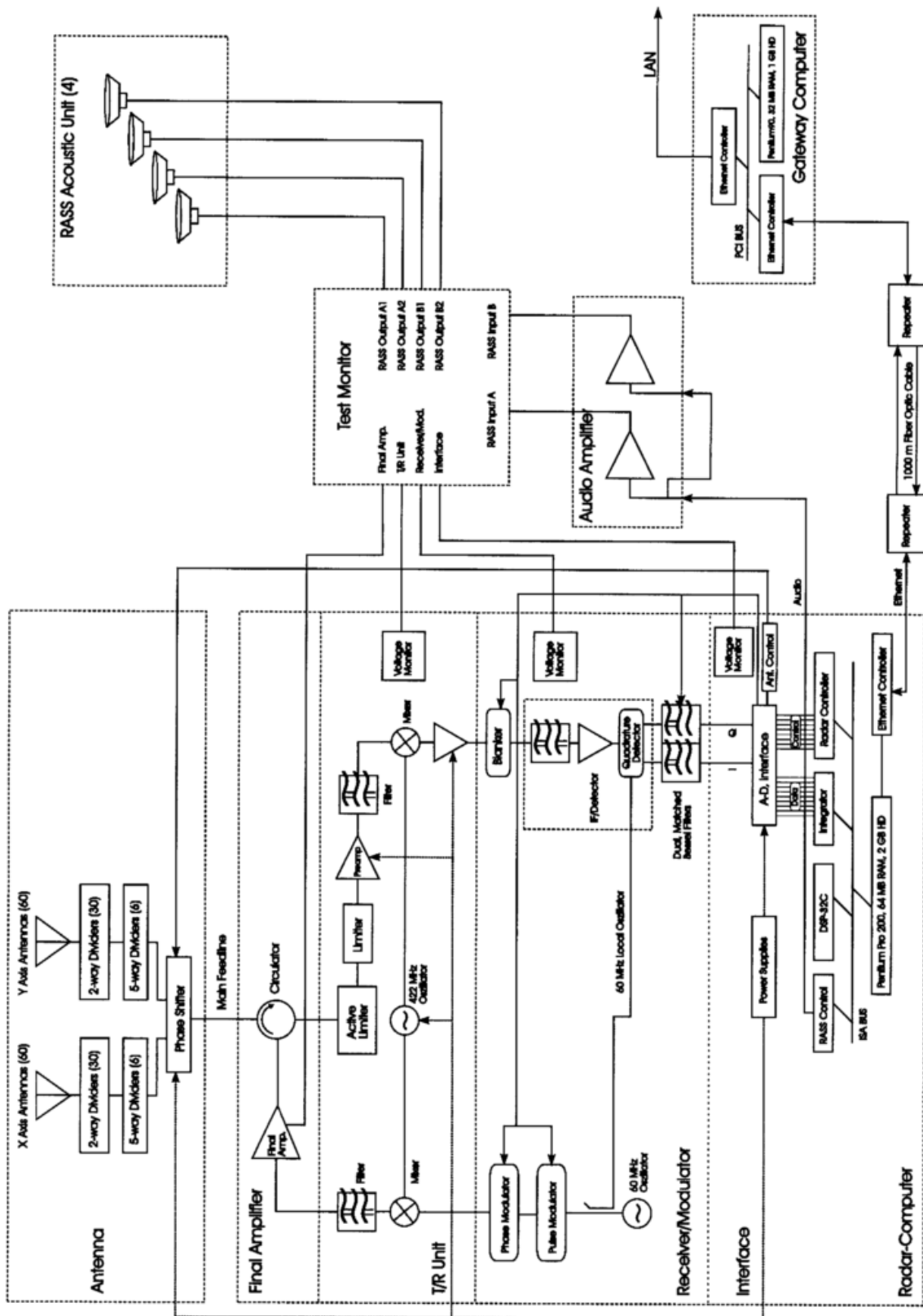


Abbildung 3.3: Blockdiagramm 482 MHz Profiler.

entfernt, ein Mischer zur Transformation des Signals auf die Zwischenfrequenzebene und ein Zwischenfrequenzverstärker. Auf der Zwischenfrequenzebene erfolgt im Phasendetektor eine Demodulation des Signals auf das als I und Q bezeichnete Basisband. Die I und Q Signale enthalten die Phasen- und Amplitudeninformationen des Empfangssignals. Ein für verschiedene Pulslängen abgestimmtes und angepaßtes Filter („matched filter“) erlaubt optimale Signal-Rausch-Verhältnisse bei unterschiedlichen Betriebsarten. Anschließend erfolgt mit einem 10 Bit Zweikanal A/D-Wandler die Digitalisierung der I/Q-Signale durch ein vom Radarcontroller gesteuertes Abtasten („sample and hold“-Prinzip). Die digitalisierten Daten werden danach zu einer Hardware-Additionskarte (DSP-Karte) im Radarcomputer geleitet.

- RASS-Komponenten

Das akustische Signalspektrum wird durch eine DSP-Koprozessorkarte im Steuer- und Auswerterechner erzeugt, wobei zwei unterschiedliche Arten eines Frequenzspektrums generiert werden können. Zum einen ist die Erzeugung einer Zufallsfolge von Sinuswellen („pseudo-random mode“) und zum anderen die Erzeugung einer kontinuierlichen Frequenzänderung („sweep mode“) innerhalb eines vorzugebenden Frequenzbereiches möglich. Des weiteren lassen sich die Größe des Frequenzsprungs innerhalb des Frequenzbereiches und die Verweilzeit bei den einzelnen Frequenzen variieren. Die optimale Einstellung dieser Parameter wurde mit dem Ziel, eine maximale vertikale Reichweite zu erreichen, von Ulrych (1995) und Christoph (1995) am LAP/RASS und am TWP/RASS untersucht.

Von einem nachgeschalteten Audioverstärker werden die Signale verstärkt und zu den Lautsprechern geleitet. Beim LAP handelt es sich dabei um ein, aus neun Lautsprechern zusammengesetztes Array, das gemeinsam mit der Radarantenne auf einem Drehgestell montiert ist. Durch eine automatische Steuerung der Drehposition in Abhängigkeit von der Windrichtung erfolgt die Positionierung der Schallquelle im Luv der Radarantenne. Beim TWP wird eine suboptimale Position der Schallquelle in Abhängigkeit von der Windrichtung durch das Aufstellen von vier Schallquellen an jeder Seite der Antenne erreicht.

- Steuer- und Auswerterechner (Radar-Computer)

Der Steuer- und Auswerterechner enthält die Integratorkarte, die DSP-Karte sowie den RASS- und RadarController. Hier erfolgt die Auswertung der digitalisierten Signale einschließlich der Berechnung von Wind und Temperatur sowie die im nächsten Abschnitt beschriebene Steuerung des Radars und des RASS.

| | TWP | LAP |
|-----------------------------|--------------------|--------------------|
| Radar | | |
| Frequenz | 482 MHz | 1290 MHz |
| Spitzsendeleistung | 16 kW | 800 W |
| Max. mittlere Sendeleistung | 1,6 kW | 80 W |
| Anzahl Antennenelemente | 120 | 324 |
| effektive Antennenfläche | 140 m ² | 6,8 m ² |
| Radarstrahl-Neigungswinkel | 15° | 15,5° |
| Strahlöffnungswinkel | < 4° | < 6° |
| Anzahl der Strahlrichtungen | 5 | 5 |
| Vertikaler Meßbereich | 250 m ... 18 km | 100 m .. 6 km |
| mögliche Pulslängen | 1700 ns | 300 ns |
| | 2200 ns | 700 ns |
| | 3300 ns | 1400 ns |
| | 6700 ns | 2800 ns |
| RASS | | |
| Anzahl der akust. Quellen | 4 | 1 |
| Akustische Sendefrequenz | 1000 .. 1150 Hz | 2700 .. 3000 Hz |
| Akustische Sendeleistung | 4 × 30 W | 1 × 60 W |
| Strahlöffnungswinkel | 12° | 12° |

Tabelle 3.1: Wichtige Systemmerkmale des TWP/RASS und des LAP/RASS.

3.1.1.2 Signalverarbeitung und Systemsteuerung

Die Signalverarbeitung erfolgt im wesentlichen in der Integratorkarte und der DSP-Koprocessorkarte und ist in ihren Einzelheiten bereits in Kapitel 2 beschrieben worden. In der Integratorkarte wird das vom A/D-Wandler empfangene I/Q-Signal phasenrichtig (kohärent) N_k -mal aufsummiert und zur DSP-Koprocessorkarte weitergeleitet. Hier erfolgt für die für jedes Höhentor vorhandene Zeitreihe eine FFT und die Berechnung des Leistungsspektrums (Dopplerspektrums). Die Dopplerspektren werden im Radar-Computer N_s -mal gemittelt. Nach Abzug des Gleichspannungsanteils, der Eliminierung von Groundclutter und der Bestimmung des Rauschens erfolgt die Berechnung der drei Dopplermomente. Die Berechnungen in der DSP werden vom Radarkontrollprogramm gesteuert. Dieses Programm übernimmt auch die Speicherung der Rohdaten (wahlweise Spektren oder Momente) und die Berechnung der meteorologischen Parameter Wind und Temperatur entsprechend den im Abschnitt 2.3.2 angegebenen Algorithmen. Anschließend erfolgt die Weitergabe der Daten

an einen sogenannten „Gateway Computer“, wo deren weitere Be- und Verarbeitung erfolgt. Dazu zählt z.B die automatische und manuelle Qualitätskontrolle und die Aufbereitung der Daten für die Online-Übertragung in das GTS („Global Telecommunication System“).

Die Systemsteuerung erfolgt über den Radar- und RASS-Controller und dient zur Steuerung der Systemhardware. Beide Controller werden wiederum vom Radarkontrollprogramm gesteuert.

3.1.2 Rawinsonde

Am MOL wird im aerologischen Aufstiegsdienst das finnische Radiosondensystem RS80/-DigiCora genutzt, welches durch ein „Tracking“-Radar der Fa. Gematronic zur Windbestimmung ergänzt wird. Durch die Kombination des Radiosondensystems zur Messung von Temperatur- und Feuchteprofilen mit dem davon völlig unabhängigen Trackingradar wird oft, so auch in dieser Arbeit, der Begriff Rawinsonde anstelle von Radiosonde verwendet.

Die Radiosonde, die im Deutschen Wetterdienst gestartet wird, ist vom Typ RS80-15N. Die Sensoren und deren Meßgenauigkeit (Herstellerangaben) sind in Tabelle 3.2 zusammengefaßt. Die angegebenen Meßgenauigkeiten wurden unter Laborbedingungen ermittelt und

| Parameter | Sensortyp | Meßgenauigkeit (STD) | Zeitkonstante |
|------------|---------------------------|----------------------|---------------|
| Druck | Kapazitive Aneroiddose | 0,5 hPa | keine Angabe |
| Temperatur | Kapazitiver Widerstand | 0,2 K | 2,3 s |
| Feuchte | HUMICAP | 2 % | 1 s |

Tabelle 3.2: Die Meßsensoren der RS80.

können während eines Aufstieges in der Atmosphäre z.B. infolge des Strahlungseinflusses davon abweichen. So ergaben Auswertungen von Parallelaufstiegen (Antikainen and Hyvönen, 1983) für die Temperatur einen zufälligen Meßfehler von 0,14 K, für die Feuchte von 2,2% und für die Bestimmung der Höhe aus der Druckmessung einen Fehler von 5,5 m. Der systematische Meßfehler der Radiosondierung wird wesentlich durch die vor dem Start durchgeführte Kalibrierung bestimmt. Die von Vaisala empfohlene Feuchtekalibrierung bei 0 % relativer Luftfeuchte kann jedoch zu einem Meßfehler bis zu 10% führen (Dzingel and Leiterer, 1995). Ein Feuchtemeßfehler in dieser Größenordnung führt bei 0°C zu einem Fehler in der virtuellen Temperatur von 0,06 K, bei 20°C bereits zu einem Fehler von 0,3 K.

Da den Vergleichen mit dem RASS die virtuelle Temperatur zugrundeliegt, wurden bei der Berechnung der virtuellen Temperatur Feuchtwerte verwendet, die auf einer verbesserten Vorstart-Kalibrierung (Leiterer et al., 1997) basieren.

Die virtuelle Temperatur T_v wurde mit folgenden Gleichungen aus der von der Radiosonde gemessenen „wahren“ Temperatur und der relativen Feuchte U berechnet:

$$T_v = (1 + 0,608q)T \quad (3.1)$$

Darin ist q die spezifische Feuchte, die sich aus dem Wasserdampfpartialdruck e mit

$$q = \frac{0,622e}{p - 0,378e} \quad (3.2)$$

berechnen läßt. e kann aus der relativen Feuchte und dem bei der jeweiligen Temperatur herrschenden Sättigungsdampfdruck e_w berechnet werden.

$$e = \frac{e_w}{100}U \quad (U \text{ in } \%) \quad (3.3)$$

Der Sättigungsdampfdruck wurde mit der Magnusformel berechnet.

$$e_w(T) = 6,11 \times 10^a \frac{T-273,15}{b+T-273,15} \quad (e_w \text{ in hPa}) \quad (3.4)$$

a und b sind vom Temperaturbereich abhängige Konstanten. Für $T \geq 273,15$ K ist $a=7,5$ und $b=235$, für $T < 273,15$ K ist $a=9,5$ und $b=265,5$.

Die meteorologischen Daten werden vom Sender der Radiosonde seriell im zeitlichen Abstand von 1,5 s übertragen und für die weitere Auswertung im zeitlichen Raster von 10 s gespeichert. Bei einer Steiggeschwindigkeit von ca. 5 bis 6 m/s entspricht dies einer vertikalen Auflösung von etwa 50 m.

Der Wind wird, wie bereits erwähnt, mit einem „Trackingradar“ durch Verfolgen eines am Ballon befestigten Reflektors (Tripelspiegel) aus den Positionsänderungen bestimmt. Wesentliche technische Merkmale zum „Trackingradar“ enthält Tabelle 3.3.

Der Meßfehler des Windes kann mittels Fehlerfortpflanzung aus den Genauigkeitsangaben des Radars und den Gleichungen zur Berechnung des Windes abgeleitet werden (vgl. auch

| | |
|------------------------------------|------------------------------------|
| Typ | Radar „Meteor300 MFX“ , Gematronik |
| Frequenz | 9375 MHz |
| Sendeleistung | 60 kW |
| Antenne | Parabol |
| Genauigkeit der Antennenposition | 0,1° |
| Genauigkeit der Entfernungsmessung | 20 m |
| Max. zeitliche Auflösung | 10 s |

Tabelle 3.3: Wichtige Merkmale des „Trackingradars“

Klose and Hübel (1983)). Der Fehler wächst, je kürzer das Zeitintervall, für das der mittlere Wind berechnet werden soll, gewählt wird. Außerdem haben der Höhenwinkel, die Schrägentfernung des Ballons zum Radar und die Bewegungsrichtung des Ballons relativ zum Radar einen erheblichen Einfluß auf die Meßgenauigkeit. Allgemein kann gesagt werden, daß mit kleiner werdendem Höhenwinkel und zunehmender Schrägentfernung der Fehler wächst. Aus diesem Grund ist der Fehler bei starkem Wind größer als bei geringerem Wind, wie im Beispiel der Abb. 3.4 gezeigt wird. Die vom Trackingradar gemessenen Winde werden für Schichten berechnet, die vom Ballon in 30 s durchflogen werden. Dies entspricht einer vertikalen Auflösung von 150 - 180 m.

Im bodennahen Bereich beträgt der Fehler bei der Bestimmung des Windes ca. 0,2 m/s bis 0,3 m/s. Bei nur geringer horizontaler Abdrift des Ballons wächst dieser Fehler nur langsam auf ca. 0,4 m/s in 20 km Höhe. Im Falle einer starken Abdrift des Ballons infolge großer horizontaler Windgeschwindigkeiten ist jedoch eine deutliche Zunahme des Meßfehlers zu verzeichnen, in dem gezeigten Beispiel auf maximal 4 m/s in Höhen oberhalb von 12 km.

In den unteren Meßhöhen kann der Fehler infolge des manuellen „Einfangens“ des Ballons unmittelbar nach dem Start größer sein kann als in der Abbildung 3.4 dargestellt.

3.1.3 Fesselballonsystem

Zur Untersuchung der Temperaturmeßgenauigkeit des LAP/RASS (Kapitel 5) ist weiterhin ein Fesselballonsystem TMT5a der Firma AIR verwendet worden. Dieses System erlaubt die Sondierung von Wind, Temperatur und Feuchte gleichzeitig in sechs verschiedenen Höhen, so daß kontinuierlich Vertikalprofile der genannten Parameter durch direkte Messung gewonnen werden können. Die dazu erforderlichen Sonden werden am Halteseil des Ballons an beliebiger Stelle befestigt. Sie sind mit Sensoren zur Messung von Druck, Temperatur, Feuchte sowie Windrichtung und Windgeschwindigkeit ausgestattet (s. Tabelle 3.4).

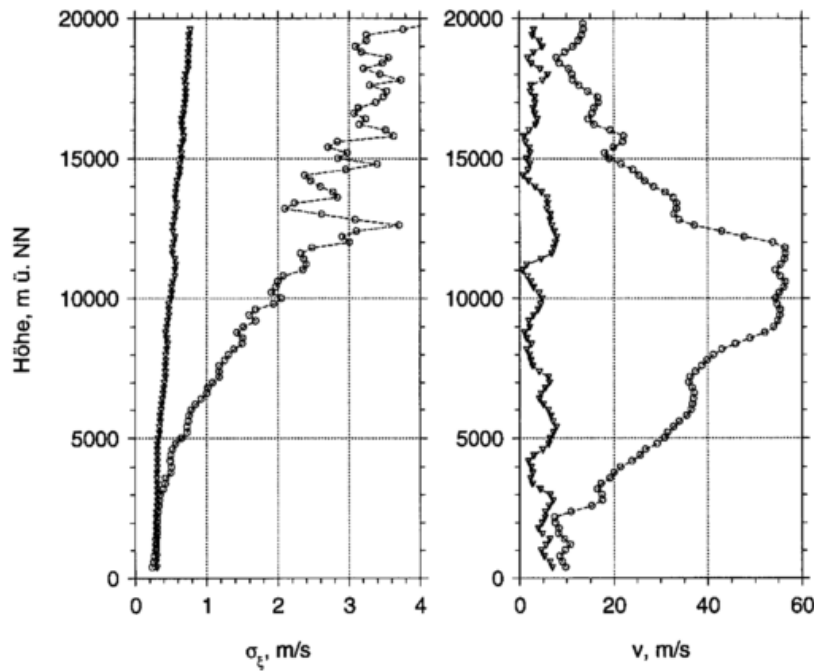


Abbildung 3.4: Mittlerer quadratischer Fehler ($\sigma_{\xi} = (\sigma_u^2 + \sigma_v^2)^{\frac{1}{2}}$) der Rawinsondenwindmessung (links) für eine Schwachwindlage (Dreiecke) sowie Starkwindlage (Kreise) entsprechend den vertikalen Windgeschwindigkeitsprofilen (rechts) und den in Tabelle 3.3 angegebenen Systemparametern.

| Parameter | Sensortyp | Meßgenauigkeit (STD) |
|------------|-------------|----------------------|
| Druck | Aneroiddose | 1,0 hPa |
| Temperatur | Thermistor | 0,5 K |
| Feuchte | HUMICAP | 3 % |

Tabelle 3.4: Die Meßsensoren der Fesselsonden TMT5a.

Die vom Hersteller angegebenen Meßgenauigkeiten wurden im Labor überprüft. Dabei zeigt sich, daß die zufälligen Fehler der Druck- und Temperaturmessung besser als die in der Tabelle angegebenen Werte sind und etwa dem der RS80 entsprechen. Die Übertragung der Meßinformationen erfolgt sequentiell alle 2 - 3 s, so daß bei sechs Sonden etwa alle 15 s ein vollständiges Vertikalprofil vorliegt. Für den Vergleich mit RASS-Messungen wurde eine angepaßte zeitliche Mittelung vorgenommen. Die Berechnung der virtuellen Temperaturen erfolgte mit den Gleichungen 3.1 bis 3.4.

3.2 Modelle

Der im Kapitel 4 beschriebene Modellvergleich wurde mit dem Deutschland-Modell(DM)/-Version 3 durchgeführt. Das DM ist das vom DWD operationell betriebene Modell mit der räumlich höchsten Auflösung (14 km). Es handelt sich dabei um ein hydrostatisches Regionalmodell für Deutschland und die benachbarten Gebiete. In der Vertikalen besitzt das Modell 20 mit der Orographie verlaufende Schichten („hybrid vertical coordinates“), wovon acht unterhalb von 1500 m liegen. Mit der Höhe findet ein gleitender Übergang von den DM- zu den EM (Europamodell)-Feldern statt (vertikales Nesting). Das DM wird stündlich mit den Randwerten des EM (Europamodell) - Vorlaufs versorgt. Zu den prognostischen Variablen gehören der Bodendruck, die horizontalen Windkomponenten, die totale Wärmemenge und der totale Wasserdampfgehalt. Täglich gibt es zwei Modellläufe zu den Anfangszeiten 00 und 12 UTC mit einer Integrationszeit bis zu 48 h und einer zeitlichen Auflösung des Modell-Outputs von 1 h. Der Modellvergleich erfolgte anhand der Analysen und der 12 h Vorhersagen der für den Gitterpunkt Lindenberg bereitgestellten Variablen.

3.3 Datenmaterial

Für die in der Einleitung formulierte Aufgabenstellung standen WPR/RASS- Messungen über unterschiedliche Zeiträume zur Verfügung (s. Tabelle 3.5 und 3.6). Beim TWP basieren alle Untersuchungen auf Wind- und Temperaturmessungen im Zeitraum Januar bis Dezember 1997. Die Windmessungen sind dabei innerhalb des 50 min Mittelungsintervalls zyklisch² wechselnd mit zwei verschiedenen Parametereinstellungen durchgeführt worden. Im sogenannten High Mode erfolgte die Windbestimmung mit einer relativ groben vertikalen Auflösung von 500 m, im Low Mode mit einer vertikalen Auflösung von 250 m mit einem jedoch reduzierten vertikalen Meßbereich im Vergleich zum High Mode. Die RASS Temperaturmessung erfolgte mit einer vertikalen Auflösung von 250 m. Durch Einstellung eines Höhentorabstandes („spacing“) von ca. 120 m wurden sich vertikal überlappende Höhenbereiche erzeugt. Dies führt zu einem detaillierteren Vertikalprofil der Temperatur, was vor allem in der Grenzschicht von Bedeutung ist. Das zeitliche Mittelungsintervall betrug beim Wind 50 min, bei der Temperatur 10 min. Die abschließende Qualitätskontrolle wurde beim TWP/RASS manuell durch Prüfung der zeitlichen und räumlichen Konsistenz durchgeführt.

Beim LAP/RASS wurde für die Vergleiche mit Rawinsondierungen und zur Untersuchung der Verfügbarkeit ein dreijähriger Zeitraum (Nov.'93 bis Okt.'96) zugrundegelegt. Messun-

²Ein Zyklus umfaßt dabei Messungen in alle fünf Strahlrichtungen.

| | TWP | | LAP | | LAP |
|----------------------------|---------------------|------------|-------------------|------------|-------------------|
| Zeitraum | Jan. '97 - Dez. '97 | | Nov.'93 - Okt.'96 | | Jan.'97 - Dez.'97 |
| Anzahl Meßmodi | 2 | | 2 | | 1 |
| | High Mode | Low Mode | High Mode | Low Mode | Low Mode |
| Anz. Vertikalprofile | 7362 | 7729 | 19885 | 20614 | 6379 |
| Vertikale Auflösung | 477 m | 246 m | 405 m | 101 m | 101 m |
| Spacing | 477 m | 246 m | 202 m | 43 m | 101 m |
| Min. Meßhöhe (ü.Gr.) | 2615 m | 456 m | 232 m | 123 m | 181 m |
| Max. Meßhöhe (ü.Gr.) | 18872 m | 8092 m | 5100 m | 1818 m | 2108 m |
| Mittelungszeit | 50 min | | 50 min | | 50 min |
| Anz. Meßpkt. FFT | 128 | 128 | 64 | 64 | 64 |
| Anz. d. koh. Int. | 34 | 134 | 110 | 180 | 113 |
| Anz. d. spektr. Int. | 32 | 32 | 93 | 93 | 90 |
| Pulswiederholp. | 264 μ s | 68 μ s | 41 μ s | 25 μ s | 41 μ |
| Consensusparameter | | | | | |
| Mindestanzahl n_k | 60 % | | 60 % | | 60 % |
| Δv_r (s.(2.3.2.1)) | 3 m/s | | 3 m/s | | 3 m/s |

Tabelle 3.5: Betrachtete Zeiträume der Windprofilermessungen und die entsprechenden Systemparameter.

gen ab Oktober 1996 wurden bewußt nicht verwendet, da ab November dieses Jahres keine Messungen im High Mode mehr erfolgten. Der entsprechende vertikale Meßbereich wird von dem im Juli in Betrieb genommenen TWP abgedeckt. Lediglich für den Modellvergleich wurde auf Messungen des Low Modes im gesamten Jahr 1997 zurückgegriffen, da Modellergebnisse nur für diesen Zeitraum zur Verfügung standen. Bei den LAP/RASS-Messungen erfolgte in den ersten Monaten nach der Inbetriebnahme die Berücksichtigung der vertikalen Windgeschwindigkeit bei der Bestimmung der virtuellen Temperatur aus der Schallgeschwindigkeit. Da jedoch keine automatische Niederschlagserkennung im Auswerteprogramm implementiert ist, sind in Situationen mit Niederschlag teilweise grobe Meßfehler aufgetreten (vgl. auch Kapitel 5). Der genannte Zeitraum wurde deshalb von der Analyse ausgeschlossen. Die Qualitätskontrolle erfolgte beim LAP/RASS automatisch mit dem Weber and Wuertz (1991)-Algorithmus.

Die Berechnung der RASS Temperaturen mit den im Kapitel 5 beschriebenen verbesserten Algorithmen basiert auf den Momenten, die von den Systemen nach jedem „dwell“ für jede Höhenstufe in einer Datei gespeichert werden.

| | TWP | LAP | LAP |
|--------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Zeitraum | Jan.'97 - Dez.'97 | Juni'94 - Okt-'96 | Jan.'97 - Dez.'97 |
| Anz. d. Vertikalprofile | 7679 | 16623 | 6151 |
| Vertikale Auflösung | 254 m | 105 m | 104 m |
| Spacing | 119 m | 45 m | 44 m |
| Minimale Meßhöhe (ü.Gr.) | 412 m | 127 m | 188 m |
| Maximale Meßhöhe (ü.Gr.) | 3652 m | 1253 m | 1313 m |
| Mittelungszeit | 10 min | 10 min | 10 min |
| Art d. Frequenzspektrums | | Pseudorandom | |
| Anz. Meßpkt. FFT | 2048 | 2048 | 2048 |
| Anz. d. koh. Int. | 10 | 7 | 8 |
| Anz. d. spektr. Mittel. | 16 | 30 | 32 |
| Pulswiederholperiode | 39 μ s | 20 μ s | 20 μ s |
| Consensusparameter | | | |
| Mindestanzahl n_k | 60 % | 60 % | 60 % |
| Δc_a | 2 m/s | 2 m/s | 2 m/s |

Tabelle 3.6: Betrachtete Zeiträume der RASS-Messungen und die entsprechenden Systemparameter.

Kapitel 4

Bestimmung der Meßgenauigkeit

Das Ergebnis einer Messung liefert den gesuchten Wert einer Meßgröße nur mit einer bestimmten Genauigkeit. Die Kenntnis der Genauigkeit eines Meßwertes ist Voraussetzung für jede Weiterverarbeitung oder Nutzung. Das trifft im besonderen Maße auf die Eingangswerte numerischer Modelle zu, da hier kleine Änderungen im Anfangszustand große Auswirkungen auf die Prognoseergebnisse haben können.

4.1 Zur Definition der Meßfehler

Zur Charakterisierung der Meßgenauigkeit wird oft der hierzu reziproke Begriff Meßfehler verwendet. Diese Bezeichnung erscheint etwas unglücklich, da Fehler hier nicht im Sinne von etwas „falsch gemacht zu haben“ gebraucht wird, sondern eher zur Beschreibung der Meßunsicherheit oder der Meßtoleranz (vgl. Hart et al. (1989)). Da sich dieser Begriff jedoch fest in unserem Sprachgebrauch etabliert hat, soll er auch in dieser Arbeit beibehalten werden.

Unter dem Meßfehler err versteht man die Abweichung der Meßgröße x_m vom sogenannten „wahren“ Wert der Meßgröße x_w .

$$err = x_m - x_w \quad (4.1)$$

Der wahre Wert einer Meßgröße, der in der Literatur auch häufig als Zielwert oder als richtiger Wert bezeichnet wird, ist ein Grenzwert, dem man sich nähern, den man aber nie erreichen kann. Um dennoch eine Aussage zum Meßfehler e treffen zu können, wird bei der Fehleranalyse versucht, den wahren Wert entweder aus theoretischen Überlegungen, z.B.

mit Hilfe von Modellen, abzuleiten oder ihn durch (Referenz-) Meßsysteme mit bekannter Genauigkeit vorzugeben.

Hinsichtlich ihres statistischen Verhaltens lassen sich Meßfehler in mehrere Beiträge unterteilen. Diese Einteilung erweist sich als nützlich, wenn es um die Analyse der Fehlerursachen und um die Minimierung der Fehler z.B. durch Entwicklung entsprechender Korrekturen geht. Folgende drei Arten von Meßfehlern kann man unterscheiden:

- *Systematische Fehler*

Systematische Fehler sind Abweichungen vom „wahren“ Wert in eine bevorzugte Richtung. Sie sind potentiell erkennbar und korrigierbar.

- *Zufällige Fehler*

Hierbei handelt es sich um Abweichungen ohne bevorzugte Richtung (stochastische Abweichungen). Zufällige Fehler können nicht eliminiert werden und bestimmen damit im wesentlichen die Meßgenauigkeit.

- *Grobe Meßfehler*

Grobe Meßfehler sind dadurch gekennzeichnet, daß die Abweichungen vom „wahren“ Wert größer sind als ein bestimmter Schwellenwert. Sie können systematische oder zufällige Fehler sein. Grobe systematische Fehler sind im allgemeinen auf eine Fehlfunktion des Meßsystems zurückzuführen und können meist korrigiert werden. Grobe zufällige Fehler treten sporadisch auf und sind darin begründet, daß der Meßvorgang durch zufällig auftretende äußere Einflüsse gestört ist. Grobe zufällige Fehler können wegen ihrer deutlichen Abweichung vom „wahren“ Wert relativ leicht erkannt und mittels geeigneter Verfahren (Qualitätskontrolle) eliminiert werden.

Werden die Meßfehler hinsichtlich ihrer Behandlungsart unterteilt, lassen sich vermeidbare, korrigierbare und nicht vermeidbare Fehler unterscheiden. Diese Art der Einteilung erscheint sinnvoll, wenn es um die Verbesserung der Meßgenauigkeit, d.h. um die Korrektur von Meßfehlern geht.

Eine terminologische Zusammenfassung der Meßfehler ist in der Abb. 4.1 gegeben. Sie erleichtert die Formulierung der Zielstellung der in diesem Kapitel beschriebenen Fehleranalyse bzw. Untersuchung der Meßgenauigkeit. Gesucht ist, wie bereits eingangs erwähnt, die das Meßergebnis charakterisierende Meßunsicherheit der Meßgröße. Diese ergibt sich aus den verschiedenen Fehleranteilen, die wiederum hinsichtlich ihres zeitlichen Verhaltens und bzgl. ihrer Erfäßbarkeit unterteilt werden können. Die zufälligen Fehler sind grundsätzlich an einer Einzelmessung nicht korrigierbar und tragen deshalb direkt zur Meßunsicherheit

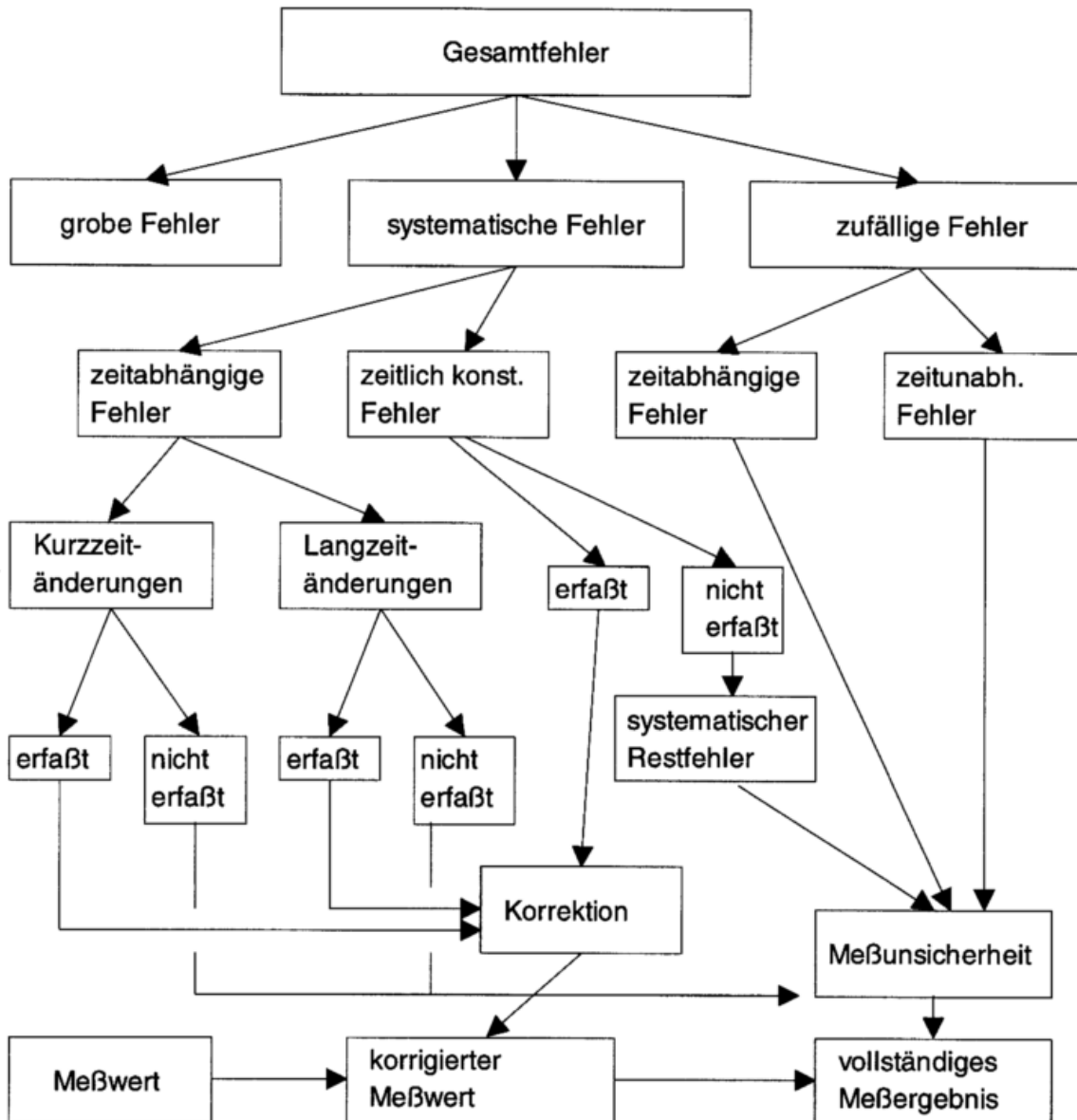


Abbildung 4.1: Gesamtübersicht über die verschiedenen Fehleranteile und ihre Berücksichtigung im vollständigen Meßergebnis (in Analogie zu Hart et al. (1989), S.37)

des Meßergebnisses bei. Bei den systematischen Fehlern muß zwischen den nicht erfaßbaren und erfaßbaren Anteilen unterschieden werden. Letztere können durch eine entsprechende Korrektur eliminiert werden. Außerdem lassen sich systematische Fehler in einen additiven und in einen multiplikativen Teil unterteilen, ersterer wird auch häufig als Nullpunktfehler, letzterer als Steigungsfehler bezeichnet. Ein wesentliches Kriterium sowohl der systematischen als auch der zufälligen Fehler ist ihr zeitliches Verhalten. Auf Grund des komplexen Charakters der Meßwertgewinnung bei indirekten Meßverfahren muß mit einer Abhängigkeit der systematischen Fehler von den meteorologischen Bedingungen gerechnet werden, die man den Kurzzeitänderungen zuordnen kann. Unter Langzeitänderungen sind dagegen eher

Variationen des systematischen Fehlers zu verstehen, die auf allmähliche Veränderungen der Geräteeigenschaften zurückgeführt werden können und im allgemeinen als Driftfehler bezeichnet werden.

Die Abschätzung der Beträge der einzelnen Fehleranteile ist notwendig für die Analyse der verschiedenen Fehlerursachen und damit eine Voraussetzung für evtl. anzubringende Korrekturen. Für einige Anwendungen können einzelne Fehleranteile vernachlässigt werden. So wird bei der Berechnung von abgeleiteten Größen, wie beispielsweise Wärmeflüssen aus WPR/RASS Messungen nur die Varianz von Wind und Temperatur betrachtet, so daß in diesem Fall der Bias des systematischen Fehlers keine Rolle spielt. Dagegen ist für klimatologische Betrachtungen eher der systematische als der zufällige Fehleranteil für das Meßergebnis von Bedeutung. Ebenso unterschiedlich ist die Bedeutung der Fehleranteile bei der Nutzung als Eingangsdaten der numerischen Modelle. Das Vorhandensein eines systematischen Fehlers kann in gewissen Grenzen toleriert werden, sofern alle zu den Eingangsdaten beitragenden Meßsysteme einen derartigen Fehler in gleicher Größe aufweisen.

Jeder Fehleranteil kann mit den in Tabelle 4.1 angegebenen Relationen bezüglich eines Referenzwertes mathematisch beschrieben werden. Für die mathematische Beschreibung der zufälligen Fehler wird im allgemeinen vorausgesetzt, daß diese einer Gauß'schen Normalverteilung folgen. Außerdem sollte für die Abschätzung der Fehleranteile ein hinreichend umfangreicher Datensatz zur Verfügung stehen.

In der Tabelle ist eine Reihe weiterer Bezeichnungen aufgeführt, die häufig für die einzelnen Fehleranteile verwendet werden. Die Vielfalt der Bezeichnungen ist u.a. Ausdruck dafür, daß die Fehleranalyse noch keiner einheitlichen Terminologie folgt, was häufig zu Mißverständnissen und Fehlinterpretationen führt.

Neben den in der Tabelle aufgeführten Fehlerarten ist außerdem ein sogenannter Repräsentativitätsfehler zu berücksichtigen, der in dieser Arbeit jedoch nicht weiter betrachtet werden soll. Dieser spielt dann eine Rolle, wenn die Meßgröße hinsichtlich ihres Ortes und des Zeitpunktes variabel ist, was auf alle meteorologischen Parameter zutrifft. Der Repräsentativitätsfehler wird bestimmt durch das räumliche Meßvolumen, das zeitliche Mittelungsintervall und die zeitliche und räumliche Variabilität der Meßgröße. Für Radiosondierungen wurden Untersuchungen zur Repräsentativität u.a. durch Kitchen (1989) durchgeführt.

| Fehleranteil | Mathematische Beschreibung | andere, häufig verwendete Bezeichnungen |
|-----------------------|--|---|
| systematischer Fehler | Mittlere Abweichung: $\Delta x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - x_{B_i}) \quad (4.2)$ | Bias, Genauigkeit |
| zufälliger Fehler | Standardabweichung (STD): $\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \Delta x)^2} \quad (4.3)$ $\sigma_x = \sqrt{rmse^2 - (\Delta x)^2} \quad (4.4)$ | mittlerer quadratischer Fehler, Präzision, statistischer Fehler |
| grober Fehler | $e_{gi} \text{ für } x_i - x_{B_i} > 3\sigma_x \quad (4.5)$ Kriterium relativ willkürlich | Ausreißer, Höchstfehler, offensichtlicher Fehler |
| Gesamtfehler | „root-mean-square error“ : $rmse = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - x_{B_i})^2} \quad (4.6)$ $d = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i - x_{B_i} \quad (4.7)$ | mittlerer quadratischer Fehler, Meßunsicherheit, Vergleichbarkeit mittlerer absoluter Fehler |

Tabelle 4.1: Gleichungen für die Berechnung der einzelnen Fehlergrößen in Bezug auf einen Referenzwert x_{B_i} auf der Grundlage einer Stichprobe

4.2 Fehlerursachen bei der Wind- und Temperaturmessung

Vor einer Meßfehleranalyse soll ein Überblick über die Ursachen möglicher Meßfehler bei WPR/RASS-Messungen gegeben werden. Dabei beschränken sich die Ausführungen auf Fehlerquellen bei der Ableitung des Windes, da die möglichen Meßfehler bei der Bestimmung der virtuellen Temperatur in Kapitel 5 detailliert beschrieben werden. Lediglich die bei der Momentschätzung auftretenden Meßunsicherheiten gelten sowohl für die Wind- als auch für die Temperaturmessung.

4.2.1 Meßfehler bei der Momentschätzung

Jeder Momentschätzalgorithmus kann die einzelnen Momente des Dopplerspektrums nur mit einer begrenzten Genauigkeit bestimmen. Bei einem atmosphärischen Signal ist der Meßfehler abhängig von der Anzahl der unabhängigen Messungen (Anzahl der spektralen Punkte \times Anzahl der spektralen Mittelungen), der kohärenten Integrationszeit, der spektralen Breite und dem Signal-Rausch Verhältnis. Es existieren mehrere Arbeiten, die sich mit der Leistungsfähigkeit der verschiedenen Momentschätzalgorithmen befassen. May and Strauch (1989) erzeugen mit einem numerisches Modell Zeitreihen mit definierten Eigenschaften, um daran verschiedene Momentschätzalgorithmen zu testen. Unter anderem ist auch der als „First Moment“ (FM) bezeichnete Algorithmus, der den in dieser Arbeit betrachteten Systemen zugrundeliegt, im Vergleich zu anderen in May et al. (1989) ausführlich beschriebenen Methoden, wie „Pulse Pair“-Algorithmus (PP), „Poly-Pulse Pair“-Algorithmus (PPP) und „Least-Square Fitting“ Verfahren (LSF), analysiert worden. Dabei wurde festgestellt, daß größere Unterschiede in der Genauigkeit der Momentschätzung zwischen den verschiedenen Verfahren lediglich bei geringen Signal-Rausch-Verhältnissen auftreten

Zur Berechnung der Varianz der Radialgeschwindigkeit geben Doviak and Zrnic (1993) bei Verwendung der Fouriertransformation der spektralen Auswertung eine Gleichung an. Unter der Voraussetzung eines Gauß'schen Signalspektrums mit geringer relativer spektraler Breite kann die Varianz der Radialgeschwindigkeit wie folgt abgeschätzt werden:

$$\text{var}(v_r) = \frac{\lambda^2}{4N_u T_p^2} \left[\frac{\sigma_{vn}}{4\sqrt{\pi}} + 2(\sigma_{vn})^2 \frac{N}{S} + \frac{1}{12} \left(\frac{N}{S} \right)^2 \right] \quad (4.8)$$

Darin ist N_u die Gesamtanzahl der Messungen (Anzahl der kohärenten Integrationen $N_k \times$ Anzahl der spektralen Integrationen $N_s \times$ Anzahl der spektralen Punkte N_F), T_p die

Pulswiederholperiode, S die mittlere Signalleistung, N die mittlere Rauschleistung und σ_{vn} ist die mit dem Nyquistintervall v_N normierte spektrale Breite

$$\sigma_{vn} = \frac{\sigma_v}{2v_N} = \sigma_v \frac{2N_k T_p}{\lambda}. \quad (4.9)$$

Die Gleichung zeigt, daß die Varianz der Radialgeschwindigkeit umgekehrt proportional dem Signal-Rausch Verhältnis $\frac{S}{N}$ und der Gesamtanzahl der Messungen N_u sowie proportional der spektralen Breite σ_v ist. Darüber hinaus bewirkt die Vergrößerung der Pulswiederholperiode T_p ebenfalls eine Verringerung der Radialgeschwindigkeitsvarianz, da entsprechend Gleichung (2.47) ein größeres T_p eine höhere Geschwindigkeitsauflösung (also kleineres Δv) zur Folge hat.

Die Meßgenauigkeit hängt damit sowohl von einer Reihe von einstellbaren Systemparametern als auch von einigen von der Atmosphäre beeinflussten Parametern ab.

4.2.2 Interne und externe Störeinflüsse

4.2.2.1 Bodenechos (Groundclutter)

Auf Grund von Antennennebenkeulen werden nicht nur Rückstreusignale aus der Atmosphäre empfangen, sondern auch von bodennahen festen Objekten. Derartige Störsignale sind durch einen markanten, nur über wenige Spektralpunkte reichenden Peak am Nullpunkt des Dopplerspektrums gekennzeichnet. Vor der Momentschätzung erfolgt deshalb in der Regel eine Eliminierung der Bodenechosignale nach dem im Abschnitt 2.3.1 beschriebenen Verfahren. Dieser Algorithmus versagt, wenn die vorzugebende Höhe, in der nach Groundclutter gesucht werden soll, zu klein gewählt wurde. Meßfehler dieser Art führen im allgemeinen zu einem deutlich fehlerhaften Wind (grober Meßfehler) und können durch eine Konsistenzprüfung meist erkannt werden.

Bei der Beseitigung von Bodenechos entsteht eine andere Fehlerquelle dadurch, daß der Peak eines Klarluftechos nahe Null liegt und deshalb als Groundclutter identifiziert werden kann. Derartige Situationen treten entweder bei Schwachwindlagen auf oder dann, wenn die Windrichtung orthogonal zum Azimutwinkel einer Strahlrichtungen ist. Die daraus resultierenden Meßfehler haben nur einen kleinen Betrag, so daß es später schwierig wird, sie als Meßfehler zu identifizieren. Simulationen von Barth et al. (1994) zur Abschätzung des Meßfehlers infolge der Anwendung des Groundclutter-Entfernungsalgorithmus ergaben Fehler bis zu maximal 0,5 m/s.

Zur Reduzierung des Störeinflusses durch Bodenechos wurde die Drehgestellsteuerung des LAP so konfiguriert, daß bei der Windmessung immer ein Winkel von näherungsweise 45° zwischen den Azimutwinkeln der Antennenstrahlrichtungen und der mittleren Windrichtung besteht.

4.2.2.2 Eigenclutter - Entfernungsnebenkeulen bei der Pulskodierung

Dieser Störeinfluß tritt nur in Verbindung mit der binären Phasenmodulation als eine Form der Pulskompression zur Erhöhung der vertikalen Reichweite bzw. Auflösung auf. Bei der binären Phasenmodulation wird der Sendepuls nach einem definierten Schema als Folge von Einzelpulsen kodiert. Nach dem Empfang des rückgestreuten Signals kann durch Dekodierung die vertikale Auflösung erhöht werden. Das Verfahren birgt jedoch die Gefahr des Auftretens von Entfernungsnebenkeulen (Ludloff, 1993) in sich, wobei in einer bestimmten Höhe Windwerte aus einem anderen Höhenbereich auftreten. Dieser Effekt, der besonders bei Verwendung der partiellen Dekodierung zu beobachten ist, tritt häufig an den unteren Höhentoren infolge der noch nicht vollständig abgeklungenen Erholungszeit des Empfängers und damit geringerer Verstärkung auf. Die Größe dieses Meßfehlers hängt sehr stark vom Vertikalprofil des Windes ab. Bei geringer vertikaler Windscherung fällt er nur wenig ins Gewicht, bei starker Windscherung kann er den Betrag eines groben Meßfehlers haben.

4.2.2.3 Elektromagnetische Interferenz

Bei elektromagnetischer Interferenz handelt es sich um interne oder externe Störsignale, die zu einem Peak im Dopplerspektrum führen. Externe Störungen können zum Beispiel von anderen Sendern mit einer Frequenz, die nahe der des Profilers liegt, herrühren oder durch kosmische Strahlung verursacht werden. Interne Interferenz kann dagegen beispielsweise von der Netzspannungsversorgung verursacht werden, wobei die im Dopplerspektrum des TWP zu beobachtenden Peaks bei 15,5 m/s liegen ¹.

Während des Betriebes der in dieser Arbeit betrachteten Systeme konnten vor allem interne, von der Netzspannung herrührende Interferenzen beobachtet werden. Die aus diesen Störungen resultierenden Winde sind jedoch in den meisten Fällen grob inkonsistent zu den anderen Winden und werden deshalb entweder in der manuellen oder der automatischen Qualitätskontrolle als grobe Meßfehler erkannt und entfernt.

¹entsprechend der Gleichung 2.40 zur Berechnung der Dopplerfrequenz ($= 2v_r/\lambda$)

4.2.2.4 Punktziele

Punktziele im Rückstreuivolumen, wie zum Beispiel Flugzeuge oder einzelne Vögel, führen zu einem teilweise mehrere Größenordnungen stärkeren Rückstreusignal als Klarluftechos, so daß mit den „einfachen“ Momentschätzalgorithmen nicht die durch den Wind, sondern die durch die Bewegung des Punktzieles verursachte Radialgeschwindigkeit gemessen wird. In der Praxis spielen diese Störungen jedoch keine Rolle, da im Zuge der verschiedenen Stufen der Signalverarbeitung und Auswertung derartige Störungen eliminiert werden.

4.2.2.5 Zugvögel

Im Gegensatz zu einzelnen Vögeln, die sich meist ungeordnet im Streuvolumen bewegen, sind bei dem im Frühjahr und Herbst vorkommenden Vogelzug große Schwärme in eine bevorzugte Richtung unterwegs. Infolge der dabei auftretenden hohen sogenannten „Vogeldichte“ können die Windprofilermessungen empfindlich gestört werden und grobe Meßfehler auftreten (Ecklund et al., 1990; Wilczak et al., 1995). Rawinsondenvergleiche mit dem vom LAP im High Mode gewonnenen Windwerten ergaben, daß innerhalb eines Jahres etwa 2% aller stündlichen Profile Differenzen von 8 m/s bis 12 m/s bzgl. des Rawinsondenwindes aufweisen (Engelbart et al., 1998). Diese Abweichungen können, wie von Engelbart et al. (1998) nachgewiesen wurde, auf den Einfluß von Zugvögeln zurückgeführt werden. Charakteristisch für Vogelzug ist die mit der Jahreszeit wechselnde Flugrichtung. Im Herbst wird im Raum des Meßortes eine Zugrichtung von Nordost nach Südwest, im Frühjahr von Südwest nach Nordost beobachtet.

Bei günstigen Witterungsbedingungen setzt in Mitteleuropa der Vogelzug etwa eine Stunde nach Sonnenuntergang ein und hält über mehrere Stunden, meist bis in die 2. Nachthälfte bei jedoch langsam abnehmender Intensität an (Bruderer and Liechti, 1990). Die Flughöhen können zwischen wenigen hundert Metern und maximal 6 km variieren. Die Störungen der Windmessung beschränken sich nicht auf ein Höhentor, sondern erstrecken sich auf Grund der großen Rückstreuleistung und des damit verbundenen „Übersprechens“ meist über mehr Höhentore. Da die zeitliche Dauer dieser Störungen größer ist als das Mittelungsintervall und die vertikale Erstreckung der Störungen mehrere Höhentore betrifft, werden die fehlerhaften Werte von der automatischen Qualitätskontrolle in der Regel nicht erkannt.

Wilczak et al. (1995) geben in Abhängigkeit von den Radarsystemparametern an, ab welcher Vogeldichte Störungen auftreten. Wenn man annimmt, daß der mittlere Wind nur dann durch Vogelzug kontaminiert wird, wenn sich während der Gesamtmittelungszeit der Einzelmessung („dwell time“) wenigstens ein Vogel im Radarrückstreuivolumen $V_R = \Delta x' \Delta y \Delta r$

aufhält, kann die minimale Vogeldichte $\rho_{(Vogel,Min)}$ (Anzahl Vögel pro m^3) für auftretende Störungen definiert werden mit:

$$\rho_{(Vogel,Min)} = \frac{1}{V_R} \quad (4.10)$$

Darin ist:

$$\Delta x' = \Delta x + v_{Vogel} \Delta t$$

und

$$\Delta x = \Delta y = r \sin \phi$$

mit ϕ als Strahlöffnungswinkel, r als Entfernung des betrachteten Höhentores, v_{Vogel} als mittlere Vogelzuggeschwindigkeit, Δr als Pulsbreite und Δt als Zeit für die spektrale Mittelung („dwell time“).

Die Gefahr von Vogelkontaminationen bei der Windmessung mit WPR wächst also mit der Pulslänge und mit der spektralen Mittelungszeit. Dies erklärt, daß die High Mode Messungen des LAP signifikant stärker durch Vogelzug gestört werden als die Messungen im Low Mode. Bei gleicher Mittelungszeit muß die Vogeldichte im Low Mode um den Faktor 4 größer sein als im High Mode, um im gleichen Höhenbereich Störungen zu verursachen.

Die Dopplerspektren der durch Vogelzug kontaminierten Messungen weisen gegenüber Klarluftechos ein hohes Signal-Rausch Verhältnis und eine Zunahme der spektralen Breite als Besonderheiten auf. Auf Grund dieser Merkmale ist von Merritt (1995) ein Algorithmus zur spektralen Mittelung entwickelt worden, der zwischen Klarluftechos und Vogelsignalen unterscheidet. Dieser Algorithmus wird seit 1996 in beiden hier betrachteten Windprofilern verwendet mit dem Ergebnis, daß beim LAP die Häufigkeit der auf Vogelzug zurückzuführenden Störungen deutlich reduziert wurde und beim TWP bisher keine derartigen Störungen festgestellt wurden. Darüber hinaus ist die Gefahr von Zugvogelstörungen beim LAP auch durch den Verzicht auf Messungen im High Mode nach Inbetriebnahme des TWP reduziert worden.

4.2.2.6 Niederschlag

Einen direkten Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Niederschlag und der Größe des Meßfehlers gibt es nicht, da sich die fallenden Hydrometeore im allgemeinen mit der horizontalen Windgeschwindigkeit bewegen. Jedoch können drei im Zusammenhang mit Niederschlag auftretende Effekte zu einem Meßfehler führen.

1. Bei Niederschlag kommt es zu einer Vergrößerung der Rückstreuleistung. Dies birgt die Gefahr des „range aliasings“ (siehe Abschnitt 2.2.2) in sich, falls die Pulswiederholperiode T_p nicht groß genug gewählt wurde. Bei einer im allgemeinen deutlichen Windzunahme mit der Höhe werden derartige Fehler in der Qualitätskontrolle jedoch meist erkannt und eliminiert.
2. Eine andere Fehlerquelle ist dadurch gegeben, daß bei Niederschlag zwei Rückstreuprozesse in vergleichbarer Größenordnung zur Rückstreuleistung beitragen und damit zwei Peaks im Dopplerspektrum auftreten können. Herkömmliche Momentschätzalgorithmen sind nicht in der Lage, zwischen den verschiedenen Peaks zu unterscheiden. Inwieweit das zu einer Verringerung der Meßgenauigkeit führt, wird im Abschnitt 4.3.2.1 statistisch nachgewiesen.
3. Bei konvektivem Niederschlag oder bei Niederschlag mit räumlich variabler Intensität besteht die Gefahr, daß die Homogenitätsbedingung des Windfeldes innerhalb des von den Radarstrahlen aufgespannten Volumens verletzt wird.

4.2.3 Interpretationsfehler

4.2.3.1 Verletzung der Homogenitätsvoraussetzung

Eine wichtige Voraussetzung für die Berechnung des Windvektors entsprechend den Gleichungen (2.53) und (2.54) ist die räumliche Homogenität des Windfeldes innerhalb des von den geneigten Radarstrahlen aufgespannten Volumens sowie die Stationarität des Windes während der Dauer der Messung. Unter bestimmten Bedingungen wird diese Voraussetzung allerdings verletzt, wie z.B. beim Auftreten von stationären Leewellen hinter Gebirgsketten (Law, 1991; Weber et al., 1992), in Situationen mit ausgeprägter Konvektion oder beim Auftreten von räumlich ungleich verteiltem Niederschlag. Im allgemeinen wird jedoch angenommen, daß bei Mittelungszeiten von 50 min räumliche Inhomogenitäten weitgehend ausgeglichen werden.

4.2.3.2 Fehlerhafte zeitliche und räumliche Zuordnung der Meßwerte

Bei räumlich und zeitlich variablen Größen wie Wind und Temperatur ist die exakte Zuordnung der Meßwerte in Ort² und Zeit von immenser Bedeutung für die Meßgenauigkeit.

²in dem hier betrachteten Fall die Höhe

Fehler in der Höhenzuordnung können je nach vertikalem Gradienten der Meßgröße einen erheblichen Meßfehler zur Folge haben.

Des weiteren muß bei WPR/RASS Messungen berücksichtigt werden, daß die Meßinformationen eines Höhentores aus einem Meßvolumen stammen, das durch die Fernfeldcharakteristik der Antenne, den zeitlichen Verlauf des ausgesendeten Pulses und die Filtercharakteristik des Empfängers bestimmt wird. Darüber hinaus wird die durch die Gewichtsfunktion gegebene zentrale Höhe eines vertikalen Meßintervalls durch den Verlauf der Reflektivität in der Art beeinflusst, daß diese nicht mehr mit der geometrischen Mitte eines Höhenintervalls übereinstimmt.

Eine tiefere Betrachtung dieser Problematik erfolgt im Kapitel 5 (Abschnitt 5.2.5) im Zusammenhang mit der Temperaturmeßgenauigkeit des RASS.

4.2.3.3 Fehler infolge der endlichen Ausdehnung des Meßvolumens

Vertikale Änderungen des Volumenrückstreukoeffizienten können bei geneigten Strahlrichtungen auch dazu führen, daß das rückgestreute Signal nicht um den Zenitwinkel des Radarstrahls zentriert ist. Dieser u.a. von Fukao et al. (1988) detailliert beschriebene Effekt wird in der englischen Literatur als „finite volume effect“ bezeichnet und im Zusammenhang mit Messungen des MU Radars in Japan diskutiert. Bei diesem Effekt wird die Horizontalkomponente des Windes aus der Radialgeschwindigkeit (vgl. Gleichung 2.53) mit einem Fehler berechnet, der mit der Abweichung $\Delta\theta$ vom vorgegebenen Zenitwinkel θ in folgender Beziehung steht:

$$\Delta v_{hi} \approx \frac{v_r}{\cos\theta} \Delta\theta \quad (4.11)$$

Die Größe von $\Delta\theta$ hängt von der Pulslänge, der Strahlbreite und natürlich von der in erster Linie vertikalen Verteilung der Volumenreflektivität im Meßvolumen ab. Eine Abschätzung der Größe des Fehlers ist auf Grund fehlender, vertikal hochauflösender Messungen der Volumenreflektivität und des Windvektors schwierig.

4.3 Bestimmung der Meßgenauigkeit nach den verschiedenen Methoden

Die Bestimmung der Unsicherheit des Meßwertes bzw. einzelner Fehleranteile kann nach verschiedenen, mit Vor- und Nachteilen behafteten Verfahren erfolgen:

- Bei Kenntnis einzelner Fehleranteile durch Anwendung des Gesetzes der Fehlerfortpflanzung
- Vergleiche mit Radiosondierungen
- Vergleich mit Modelldaten
- Nutzung redundanter Meßinformationen (Ito, 1997; Strauch et al., 1987)
- Auswertung der Konsistenz der Messungen (Nash and Lyth, 1997)

Vergleiche mit Rawinsondierungen sind die einzige relativ zuverlässige Methode, um sowohl Aussagen zum systematischen als auch zum zufälligen Fehler zu erhalten. Des weiteren sind Vergleiche mit Rawinsonden eine wesentliche Voraussetzung für die geplante Ergänzung des überwiegend aus Rawinsondenstationen bestehenden aerologischen Netzes durch WPR/RASS. Da außerdem Rawinsondierungen eine hohe Kontinuität und Verfügbarkeit aufweisen, steht bereits nach kurzer Zeit ein umfangreicher Vergleichsdatensatz zur Verfügung, der u.a. auch die Untersuchung der Abhängigkeit der Meßgenauigkeit von der Jahres- und Tageszeit oder von verschiedenen meteorologischen Parametern erlaubt. Aus diesem Grunde bilden die Vergleiche zwischen WPR/RASS und Rawinsonde zur Abschätzung der Meßunsicherheit von WPR/RASS Messungen einen Schwerpunkt dieses Kapitels. Darüber hinaus soll mittels der Fehlerfortpflanzung die theoretisch mögliche Meßgenauigkeit abgeschätzt werden.

Abschließend wird in diesem Kapitel die Meßgenauigkeit von WPR und Rawinsonden durch Vergleiche mit numerischen Modellen gegenübergestellt.

4.3.1 Ableitung der Meßgenauigkeit nach dem Gesetz der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung

Der dreidimensionale Windvektor und die virtuelle Temperatur werden über einen gesetzmäßigen Zusammenhang rechnerisch ermittelt. Der Fehler der Meßgrößen läßt sich dann

unter gewissen Voraussetzungen aus den Meßfehlern der einzelnen Basisgrößen nach dem sogenannten Gesetz der Fehlerfortpflanzung ableiten. Der mittlere quadratische Fehler σ_y der Meßgröße y folgt aus den mittleren quadratischen Fehlern der Basisgrößen σ_{x_n} , aus denen die Zielgröße berechnet wird, nach

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 \sigma_{x_n}^2} \quad (4.12)$$

Vorausgesetzt wird, daß die Einzelwerte normalverteilt und statistisch voneinander unabhängig sind.

Der tatsächlich beobachtete Meßfehler ist jedoch größer, weil natürlich eine Reihe anderer Faktoren die Meßgenauigkeit beeinflussen, so daß letztlich der tatsächliche Meßfehler nur experimentell abgeschätzt werden kann. Der theoretisch abgeschätzte Fehler kann deshalb als Untergrenze des Meßfehlers betrachtet werden, der mit den gewählten Systemparametern erreicht werden kann.

Zur Abschätzung des zufälligen Meßfehlers bei der Windmessung werden die Gleichungen 2.53 und 2.54 verwendet. Zur Vereinfachung wird Φ gleich Null gesetzt und angenommen, daß die Anzahl der gültigen Werte nach der Consensusmittelung für alle Strahlrichtungen gleich ist. Somit folgt aus den beiden Gleichungen:

$$v = \frac{v_{r_1} - v_{r_3}}{2 \sin \theta} \quad (4.13)$$

$$u = \frac{v_{r_2} - v_{r_4}}{2 \sin \theta}$$

Als Fehlermaß, das den Meßfehler der beiden Windkomponenten u und v zusammenfaßt, wird die Größe σ_ξ eingeführt:

$$\sigma_\xi = \sqrt{\sigma_u^2 + \sigma_v^2} \quad (4.14)$$

Die Größe ist vergleichbar mit dem im Zusammenhang mit Vergleichen betrachteten mittleren Betrag des Differenzvektors (MBDV).

Wird nun die Fehlerfortpflanzung entsprechend Gleichung 4.12 auf 4.14 zur Berechnung von σ_u und σ_v angewendet, erhält man mit 4.15 die Gleichung zur Berechnung des mittleren quadratischen Fehlers der Windmessung:

$$\sigma_\xi = \frac{\sigma_{v_r}}{\sin \theta} \quad (4.15)$$

Dabei wurde vorausgesetzt, daß die Meßfehler der Radialgeschwindigkeiten σ_{v_r} an den einzelnen Radarstrahlen voneinander unabhängig sind und den gleichen Betrag aufweisen. Für die in dieser Arbeit betrachteten Systeme mit einem Strahlneigungswinkel $\theta = 15^\circ$ ergibt sich schließlich ein mittlerer quadratischer Fehler von:

$$\sigma_\xi = 3,86\sigma_{v_r} \quad (4.16)$$

Analog wurde die Gleichung zur Berechnung des mittleren quadratischen Fehlers für die virtuelle Temperatur hergeleitet. Ausgehend von Gleichung (2.64) und einer mittleren angenommenen Schallgeschwindigkeit von 340 m/s ist:

$$\sigma_{T_v} = 1,69\sigma_{c_a} \quad (\sigma_{T_v} \text{ in K; } c_a \text{ in m/s}) \quad (4.17)$$

Für typische Systemparameter (s. Tabellen 3.5 und 3.6) wurden nun mit Hilfe der Gleichungen (4.8), (4.16) und (4.17) für die Windmessungen des TWP Low Mode und die TWP/RASS-Temperaturmessung die mittleren quadratischen Fehler in Abhängigkeit vom Signal-Rausch Verhältnis und für verschiedene spektrale Breiten berechnet (Abb. 4.2). Dabei ist zu berücksichtigen, daß im Meßbetrieb durch die (Konsensus-) Mittelung der Meßfehler um den Faktor $1/\sqrt{N}$ weiter reduziert wird.

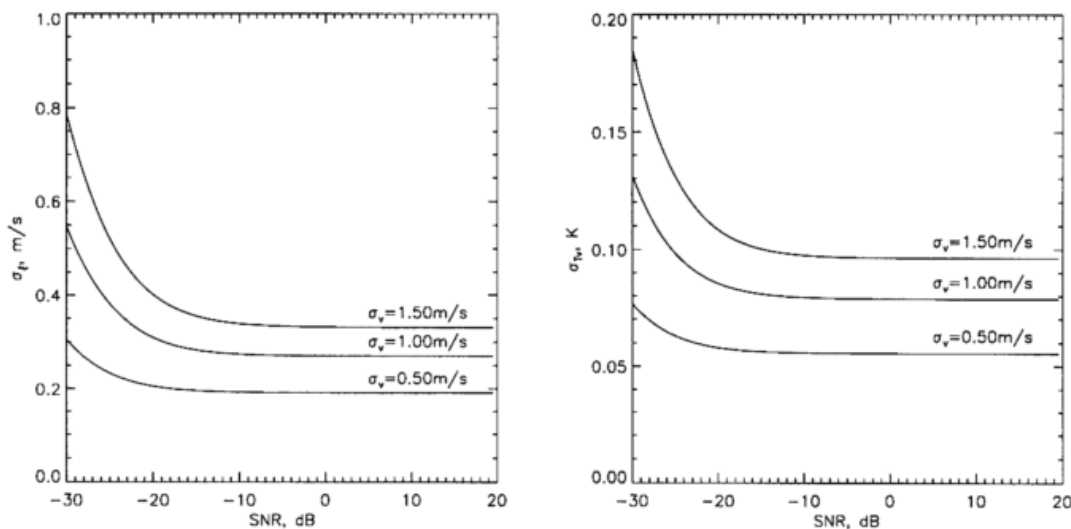


Abbildung 4.2: Standardabweichung des Windes(links) und der virtuellen Temperatur(rechts) für typische Systemparameter des TWP Low Mode und des TWP/RASS.

Die Abbildung zeigt sowohl bei der Temperatur als auch beim Wind eine geringe Abhängigkeit der Meßfehler vom SNR bei SNR-Werten größer -10 dB, während bei geringerem SNR

der Meßfehler exponentiell ansteigt. Legt man pro Mittelungsintervall etwa 10 Einzelmessungen („dwells“) zugrunde und nimmt weiterhin für die spektrale Breite $\sigma_{v_n} = 1$ m/s an, so ergibt sich beim Wind ein Fehler von ca. 0,1 m/s und bei der Temperatur von ca. 0,03 K. Wie bereits erwähnt, sind diese Werte als minimale Meßfehler zu betrachten.

4.3.2 Vergleiche mit Rawinsondierungen

Der besondere Vorteil von Rawinsondierungen liegt in deren allgemein hoher und meist gut abschätzbarer Meßgenauigkeit (vgl. Kap. 3). Des weiteren sind Rawinsondierungen das von den NWP-Modellen in der Datenassimilation genutzte aerologische Standardmeßverfahren, das zukünftig durch WPR/RASS ergänzt und teilweise ersetzt werden soll. Deshalb werden Vergleiche mit Rawinsonden häufig zur Beurteilung der Meßgenauigkeit von WPR/RASS genutzt (z.B. (Angevine and Ecklund, 1994; Astin and Thomas, 1991; Riddle et al., 1996; Steinhagen et al., 1994; Weber and Wuertz, 1990), obwohl beide Meßsysteme recht unterschiedliche Meßcharakteristika aufweisen. Während die Rawinsonde Druck, Temperatur, Feuchte und Wind entlang einer durch den Horizontalwind und die Aufwärtsbewegung des Ballons vorgegebenen Trajektorie sequentiell für endlich kleine (> 50 m) Höhenintervalle bestimmt, werden beim Windprofiler/RASS der Wind bzw. die Temperatur unmittelbar über dem Meßort für ein definiertes Volumen abgeleitet. Deshalb sind die bei einem Vergleich beobachteten Differenzen nicht nur durch die Meßgenauigkeit beider Systeme begründet, sondern auch eine Folge der an verschiedenen Orten und zu verschiedenen Zeiten stattfindenden Messung. Die für eine bestimmte Höhe berechnete Differenz eines beliebigen Parameters $\Delta X (= X_{WPR/RASS} - X_{Rawin})$ ist gleich der Summe aus den Differenzanteilen, die sich aus der räumlichen Trennung (ΔX_s), aus der zeitlichen Trennung (ΔX_t) und den Meßgenauigkeiten (ΔX_e) der Systeme ergeben:

$$\Delta X = \Delta X_s + \Delta X_t + \Delta X_e \quad (4.18)$$

Jeder Summand der Gleichung kann in einen mittleren und einen zufälligen Anteil zerlegt werden, so daß aus Gleichung (4.18) folgt:

$$\overline{\Delta X} + \Delta X' = \overline{\Delta X_s} + \Delta X'_s + \overline{\Delta X_t} + \Delta X'_t + \overline{\Delta X_e} + \Delta X'_e \quad (4.19)$$

Die Terme $\Delta X'_s$ und $\Delta X'_t$ beschreiben darin die auf die atmosphärische Variabilität zurückzuführenden Differenzen und $\Delta X'_e$ charakterisiert die zufälligen Meßfehler der Systeme.

Unter der Voraussetzung, daß die einzelnen Größen voneinander statistisch unabhängig sind, ergeben sich $\overline{\Delta X}$ und $\Delta X'$ aus den jeweiligen Summen der mittleren und zufälligen Komponenten auf der rechten Seite der Gleichung:

$$\overline{\Delta X} = \overline{\Delta X_s} + \overline{\Delta X_t} + \overline{\Delta X_e} \quad (4.20)$$

$$\Delta X' = \Delta X'_s + \Delta X'_t + \Delta X'_e \quad (4.21)$$

Aus Gleichung (4.20) kann auf den systematischen Unterschied zwischen beiden Systemen bzw. auf systematische Meßfehler des einen oder anderen Systems geschlossen werden, sofern $\overline{\Delta X_s}$ und $\overline{\Delta X_t}$ zu vernachlässigen sind. Diese Vernachlässigung ist gerechtfertigt, da weder innerhalb der Zeitspanne, in der die Vergleichsmessungen voneinander getrennt sind (max. etwa 60 min), noch über eine Distanz, die die Radiosonde während des Aufstiegs zurücklegt (max. ca. 200 km), eine mittlere Änderung von Wind und Temperatur in eine bevorzugte Richtung zu erwarten ist. Betrachtet man die Rawinsonde als Referenz, so beschreibt die mittlere Differenz den Bias (vgl. Gleichung 4.2) der Wind bzw. Temperaturmessung des WPR/RASS. Aus der mittleren Differenz kann somit auf evtl. vorhandene systematische Meßfehler der WPR/RASS-Messung geschlossen werden.

Dagegen ist es nicht möglich, den zufälligen Meßfehler von WPR/RASS-Messungen ΔX_e aus $\Delta X'$ abzuleiten, da sowohl $\Delta X'_s$, $\Delta X'_t$ als auch $\Delta X'_e(\text{Rawin})$ zu $\Delta X'$ beitragen. Die Standardabweichung der Differenzen ist deshalb die Summe der zufälligen Meßfehler beider Systeme und der atmosphärischen Variabilität. Der zufällige Meßfehler des WPR/RASS wird deshalb in jedem Falle kleiner sein als die aus dem Vergleich abgeleitete Standardabweichung der Differenzen.

Für die Berechnung mittlerer statistischer Größen wurden die Meßwerte des WPR/RASS und der Rawinsonde auf feste Höhenniveaus interpoliert, wobei deren Abstand der minimal vorkommenden vertikalen Auflösung der WPR/RASS-Messung angepaßt wurde. Ein Vergleich erfolgte mit dem der Rawinsondenmessung zeitlich am nächsten liegenden WPR/RASS-Messung, womit ein zeitlicher Abstand von 60 min nicht überschritten wurde.

4.3.2.1 Wind

Der Vergleich beim Wind erfolgte für Windrichtung und -geschwindigkeit. Die Meßmodi beider Systeme wurden separat betrachtet. Beim LAP liegen dem Vergleich Messungen im Zeitraum von November 1993 bis Oktober 1996, beim TWP von Januar bis Dezember 1997

| | LAP-HighM | | LAP-LowM | | TWP-HighM | | TWP-LowM | |
|--------------------------|-------------------|-------|----------|-------|-------------------|-------|----------|-------|
| | v | d | v | d | v | d | v | d |
| Zeitraum | Nov.'93 - Okt.'96 | | | | Jan.'97 - Dez.'97 | | | |
| Anzahl d. Vergleiche. | 3067 | | 3033 | | 1089 | | 1127 | |
| Bias, $ms^{-1}/^{\circ}$ | 0,07 | -1,22 | 0,35 | 0,91 | -0,11 | 0,64 | -0,16 | 0,89 |
| STD, $ms^{-1}/^{\circ}$ | 1,501 | 19,46 | 1,529 | 20,96 | 1,566 | 9,44 | 1,349 | 12,96 |
| MBDV, $ms^{-1}/^{\circ}$ | 2,09 | | 2,19 | | 2,07 | | 1,75 | |
| Gauß-Fit | | | | | | | | |
| Bias, $ms^{-1}/^{\circ}$ | 0,09 | -0,92 | 0,48 | 0,95 | -0,27 | -0,06 | -0,16 | 0,06 |
| STD, $ms^{-1}/^{\circ}$ | 1,221 | 6,96 | 1,231 | 7,51 | 1,289 | 4,52 | 1,125 | 5,88 |

Tabelle 4.2: Ausgewählte mittlere statistische Parameter des Vergleichs: WPR - Rawinsonde (v: Windgeschwindigkeit; d: Windrichtung).

zugrunde. Weitere Angaben zur Berechnung des Windes und zur Qualitätskontrolle sind im Kapitel 3 zusammengefaßt. In der Tabelle 4.2 sind mittlere, d.h. für den gesamten Zeitraum und über den gesamten Höhenbereich gemittelte statistische Parameter des Vergleichs angegeben.

Die Abbildungen A.1 bis A.8 im Anhang zeigen die Korrelogramme für Windgeschwindigkeit und -richtung zwischen den Windprofilern und der Rawinsonde sowie die Häufigkeitsverteilungen der entsprechenden Differenzen, wobei die Werte aller Höhenniveaus zusammengefaßt wurden. Der Häufigkeitsverteilung ist eine Gauß-Kurve angepaßt worden. Erwartungswert und Dispersion dieser Gauß-Kurve weisen in einigen Fällen zu den in der Tabelle 4.2 angegebenen arithmetischen Mittelwerten und Standardabweichungen Unterschiede auf, da die Häufigkeitsverteilungen der Differenzen nicht vollkommen der Gauß'schen Normalverteilung folgen und damit Mittelwert und Standardabweichung nur mit einer gewissen Ungenauigkeit als Schätzwerte für den Erwartungswert und die Dispersion verwendet werden können. Die Abweichung von der Normalverteilung kann durch das überdurchschnittlich häufige Auftreten von größeren Differenzen (sogenannten Ausreißern) erklärt werden. Um dennoch Mittelwert und Standardabweichung zur Beschreibung der Häufigkeitsverteilung verwenden zu können, wurden alle Differenzen $> 5 m/s$, $> 100^{\circ}$ und $> 2 K$ eliminiert. Zum anderen sind bei der Mittelwertberechnung von Bias und Standardabweichung in Tabelle 4.2 die Werte aller Höhenniveaus mit gleichem Gewicht berücksichtigt worden, obwohl die Verfügbarkeit mit der Höhe deutlich abnimmt.

Die gute Übereinstimmung von Windwerten der WPR und der Rawinsonde wird in den Korrelogrammen durch die im allgemeinen dicht entlang der Diagonalen verlaufenden Punk-

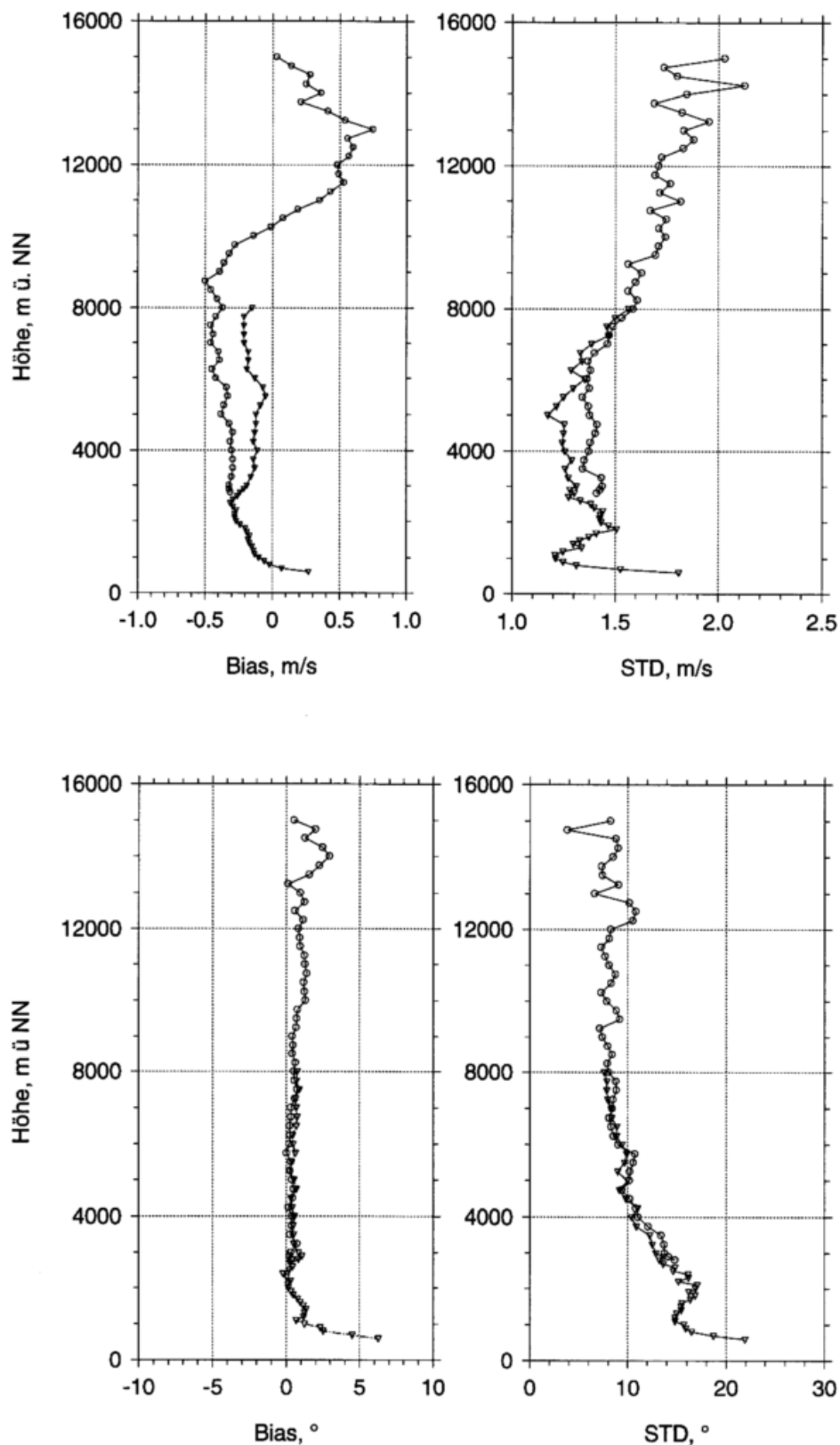


Abbildung 4.3: Bias (WPR minus Rawin) und Standardabweichung zwischen den vom TWP und der Rawinsonde gemessenen Windgeschwindigkeiten (oben) und -richtungen (unten), berechnet aus 1089 bzw. 1127 Vergleichen für den Zeitraum: Januar 1997 - Dezember 1997; Kreise: TWP - High Mode, Dreiecke: TWP Low Mode.

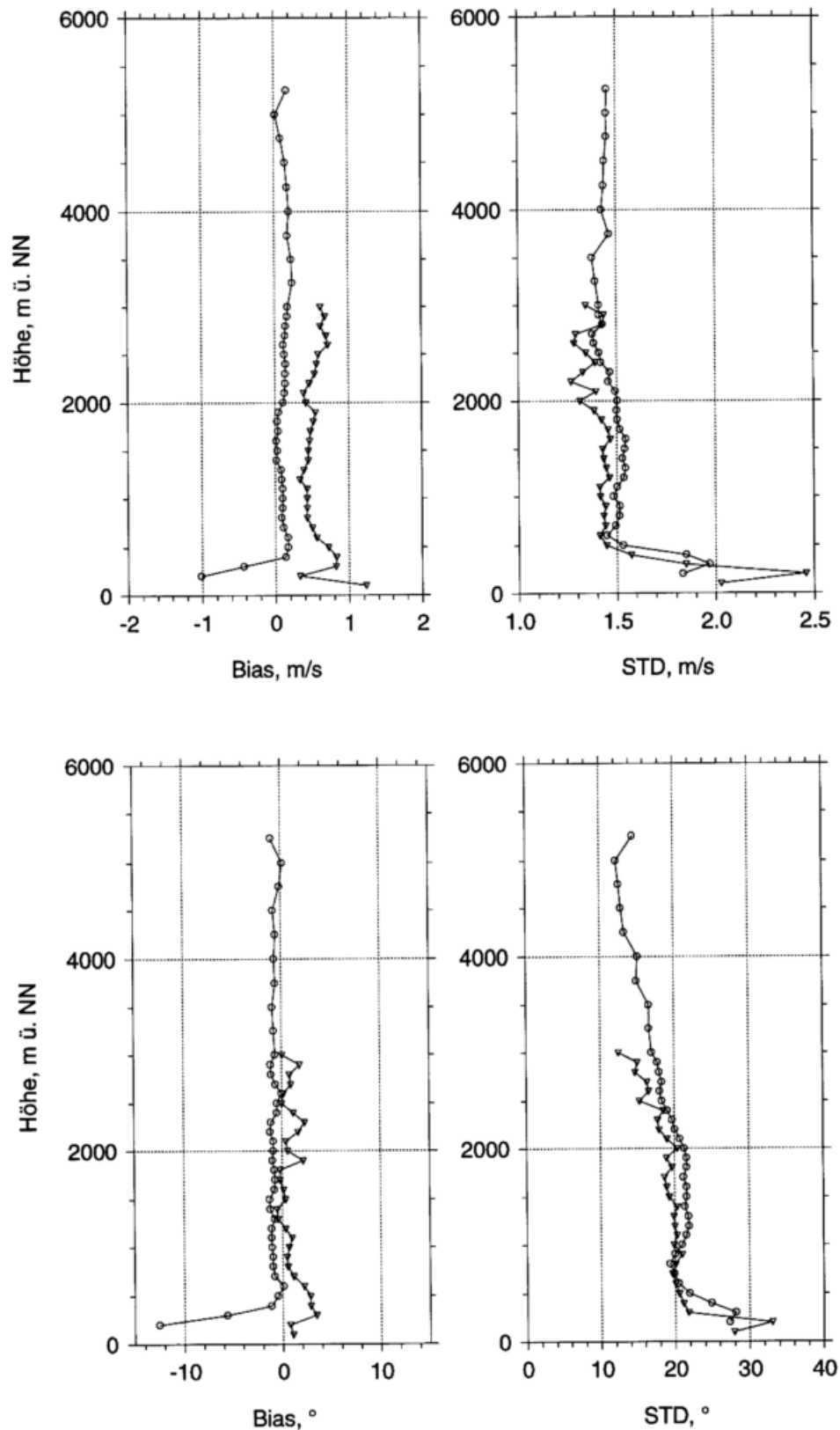


Abbildung 4.4: Bias (WPR minus Rawin) und Standardabweichung zwischen den vom LAP und der Rawinsonde gemessenen Windgeschwindigkeiten (oben) und -richtungen (unten), berechnet aus 3067 bzw. 3033 Vergleichen für den Zeitraum: November 1993 - Oktober 1996; Kreise: LAP - High Mode, Dreiecke: LAP Low Mode.

wolken demonstriert. Die Korrelationskoeffizienten liegen zwischen 0,919 und 0,978 bei der Windgeschwindigkeit und 0,796 und 0,851 bei der Windrichtung. Die geringeren Werte treten jeweils beim LAP auf, da hier insbesondere bei Windgeschwindigkeiten $< 20 \text{ m/s}$ größere Abweichungen von der Regressionsgeraden auftreten. Für diese größeren Abweichungen kommen mehrere Ursachen in Betracht. Infolge des geringeren Leistungsaparturprodukts und der größeren Nebenkeulen der Antenne verglichen mit der des TWP sind die LAP-Messungen nachweislich störanfälliger sowohl gegenüber Bodenechos als auch gegenüber externen und internen Interferenzen. Außerdem ist beim LAP durch die Systemeigenschaften (Frequenz, Pulsvolumen, Mittelungszeit) auch ein erhebliches Störpotential durch Vogelzug gegeben (vgl. Abschnitt 4.2.2.5). Nicht alle diese Störungen werden dabei von den verschiedenen Stufen der automatischen Qualitätskontrolle (Konsensusmittelung, Konsistenzprüfung) erkannt und eliminiert. Bei den LAP - Messungen im High- und im Low Mode fällt außerdem auf, daß der Anstieg der Regressionsgeraden mit 0,978 bzw. 0,946 deutlich kleiner als 1 ist, d. h. mit zunehmenden Windgeschwindigkeiten tendiert der Windprofiler dazu, die Windgeschwindigkeit zu unterschätzen. Ein ähnliches Ergebnis erhielt Klein Baltink (1998) beim Vergleich von Profilmessungen mit Messungen an einem Mast. Eine schlüssige Erklärung für diese Erscheinung existiert bisher nicht.

Die Häufigkeitsverteilungen von Windgeschwindigkeits- und Windrichtungsdifferenzen (Abb. A.2, A.4, A.6 und A.8) sind für beide Profiler streng symmetrisch und folgen mit zunehmender Häufigkeit ausgezeichnet der angepaßten Gauß-Kurve. Der Erwartungswert der Windgeschwindigkeits-Verteilung, der als Bias interpretiert wird, stimmt mit dem arithmetisch berechneten Bias (Tabelle 4.2) auf weniger als $0,16 \text{ m/s}$ überein. Bei der Windgeschwindigkeit sind die mittleren Abweichungen kleiner als $0,5 \text{ m/s}$ unabhängig vom Profiler und vom Mode. Die Dispersion variiert zwischen $1,125 \text{ m/s}$ beim TWP Low Mode und $1,289$ beim TWP High Mode. Der deutlich größere Wert beim TWP High Mode ist zumindest zum Teil auf den mit der Höhe wachsenden Meßfehler des Rawinsondenwindes (vgl. Abb.3.4) zurückzuführen. Die Windrichtung der Windprofiler-Messungen weicht im Mittel um weniger als 1° von der Rawinsondenmessung ab. Auffallend ist hier die große Diskrepanz zwischen den direkt aus den Differenzen berechneten Standardabweichungen und denen, die aus der Gauß-Verteilung abgeschätzt wurden. Das liegt vor allem daran, das bei geringen Windgeschwindigkeiten sehr große Differenzen in der Windrichtung auftreten können. Da diese Ereignisse jedoch relativ selten sind, bleiben sie beim Gauß-Fit unberücksichtigt. Die Standardabweichung der Windrichtung schwankt zwischen $9,44^\circ$ beim High Mode und $20,96^\circ$ beim TWP Low Mode. Die Werte der Dispersion des Gauß-Fits zeigen die gleiche Abhängigkeit vom Profilertyp und vom Meßmode wie die Standardabweichungen, jedoch sind die Beträge um den Faktor $1/2$ bis $1/3$ geringer.

Neben den über den gesamten Datensatz gemittelten Vergleichsparametern stellt sich die Frage nach der Höhenabhängigkeit von Bias und Standardabweichung. Dazu wurden für jede Höhenstufe der arithmetische Mittelwert der Differenzen und deren Standardabweichung berechnet. Gemäß der in der Tabelle 4.1 festgelegten Terminologie wird der arithmetische Mittelwert im weiteren als Bias bezeichnet. Die Vertikalprofile vom Bias der Windgeschwindigkeit und -richtung sind für den TWP in Abb. 4.3 und in Abb. 4.4 für den LAP dargestellt.

Beim TWP variiert der Bias der Windgeschwindigkeit sehr markant mit der Höhe, im High Mode noch deutlich stärker als im Low Mode. In den unteren beiden Höhen ist der Bias im High Mode positiv, wechselt dann in 800 m das Vorzeichen, um mit zunehmender Höhe auf $-0,5$ m/s anzusteigen. Das Maximum wird in ca. 9000 m, d.h. etwa 1,5 km unterhalb des mittleren Tropopausenniveaus beobachtet. Ab dieser Höhe erfolgt eine Reduzierung des Bias mit einem Vorzeichenwechsel in ca. 10 km. Das positive Maximum wird in 13 km erreicht. Beim Low Mode ist über den gesamten Höhenbereich mit Ausnahme der untersten Meßhöhe ein negativer Bias bis maximal $0,3$ m/s zu beobachten. Als Ursache für dieses für beide Modi zu beobachtende stark höhenabhängige Verhalten des Bias kommt möglicherweise ein Fehler oder eine Ungenauigkeit in der Höhenzuordnung in Frage. Betrachtet man nämlich die mittleren Profile der von der Rawinsonde und dem Windprofiler gemessenen Windgeschwindigkeiten (Abb. 4.5), erkennt man einen Zusammenhang zwischen dem Gradienten der Windgeschwindigkeit und dem Vorzeichen des Bias. Nimmt die Windgeschwindigkeit mit der Höhe zu, unterschätzt der Windprofiler die Windgeschwindigkeit - bei mit der Höhe abnehmender Windgeschwindigkeit wird der Bias hingegen positiv.

Durch eine Verschiebung des TWP-Profiles (High Mode) um ca. 170 m erreicht man eine wesentlich bessere Übereinstimmung der mittleren Vertikalprofile, so daß der Bias in der Troposphäre kleiner $0,25$ m/s ist und in der Stratosphäre $0,5$ m/s nicht übersteigt. Die Frage eines möglichen Höhenfehlers soll jedoch an dieser Stelle nicht weiter diskutiert werden, weil der daraus resultierende systematische Fehler der Windgeschwindigkeit noch in dem von der WMO empfohlenen Toleranzbereich (< 1 m/s) für die Meßgenauigkeit der Windgeschwindigkeit liegt. Eine detailliertere Diskussion zu dieser möglichen Fehlerquelle erfolgt außerdem im Zusammenhang mit der Verbesserung der Temperaturmessung im Kapitel 5. Der negative Bias beim TWP Low Mode kann ebenfalls mit einem Höhenfehler erklärt werden, der jedoch u.a. auf Grund der feineren vertikalen Auflösung geringere Auswirkungen hat als im High Mode.

Die Standardabweichung der Windgeschwindigkeitsdifferenzen variiert zwischen $1,2$ m/s in der mittleren Troposphäre und ca. 2 m/s in der unteren Stratosphäre also im oberen Höhenmeßbereich. Im Überlappungsbereich von High und Low Mode ist dabei beim Low Mode

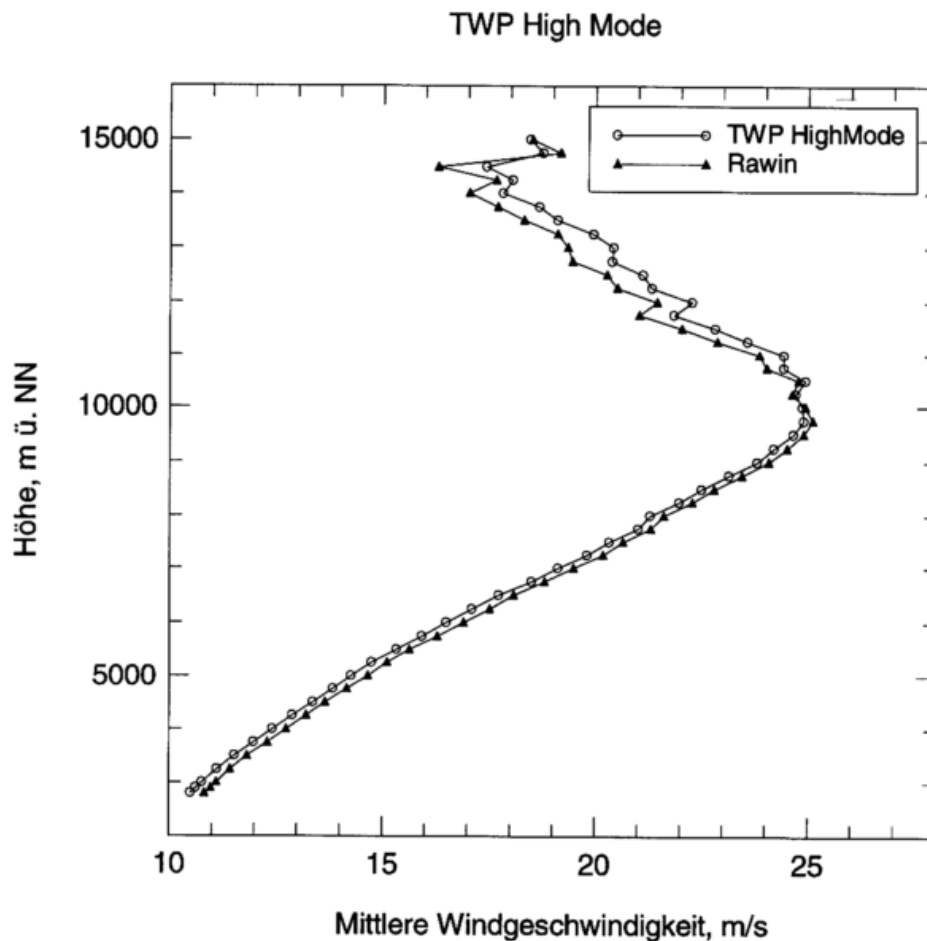


Abbildung 4.5: Mittlere Profile der horizontalen Windgeschwindigkeit, berechnet aus adäquaten Datensätzen der Rawinsonde und des TWP High Mode für den Zeitraum: Januar 1997 bis Dezember 1997.

eine um 0,1 bis 0,2 m/s geringere Standardabweichung zu verzeichnen als beim High Mode, was ebenfalls auf die höhere vertikale Auflösung im Low Mode, die der Auflösung der Rawinsonde näher kommt als der High Mode, zurückzuführen ist.

Der Bias der Windrichtung ist nahezu über den gesamten Höhenbereich kleiner $1,5^\circ$. Die beim Low Mode in den unteren Höhen zu beobachtenden größeren Abweichungen zur Rawinsonde sind mit ziemlicher Sicherheit auf die nach dem Start auftretenden Ungenauigkeiten der Windmessung mit der Rawinsonde infolge des manuellen Einfangens des Ballons mit dem Trackingradar zurückzuführen. Die Standardabweichung ist in den unteren Meßhöhen mit ca. 20° am größten und nimmt mit zunehmender Höhe allmählich auf Werte kleiner 10° ab. Die größeren Werte im unteren Bereich können zum einen durch die Meßunsicherheit bei der Rawinsonde und zum anderen mit der größeren Variabilität bei geringen Windgeschwindigkeiten erklärt werden.

Beim LAP High Mode ist der Bias der Windgeschwindigkeit mit Ausnahme der unteren beiden Höhenstufen über den gesamten Höhenbereich kleiner als 0,25 m/s. Auffallend ist jedoch die erhebliche Diskrepanz zum Bias des Low Modes, bei dem mittlere Beträge von 0,4 m/s bis 0,8 m/s auftreten. Eine Erklärung für dieses deutliche Überschätzen der Windgeschwindigkeit in diesem Mode könnte das Auftreten von „range aliasing“ und das Nichterkennen der fehlerhaften Werte bei der Qualitätskontrolle sein. In diesem Fall wäre jedoch zu erwarten, daß die Häufigkeitsverteilung eine Schiefe zu größeren positiven Werten aufweist, was nicht beobachtet wird.

Die Standardabweichung variiert oberhalb von 500 m zwischen 1,2 m/s und 1,6 m/s. In Höhen darunter sind der Bias und die Standardabweichung deutlich größer als in den darüberliegenden Höhen, was auf die höhere Meßunsicherheit der Rawinsondenmessung in geringen Höhen, auf die größere Störanfälligkeit der LAP-Messungen in den untersten Höhentoren und auf die größere Variabilität des Windes in der Grenzschicht zurückzuführen ist. Bezüglich der Windrichtung ist der Bias beim High Mode mit ca. 1° negativ, beim Low Mode dagegen mit Werten bis zu 4° positiv. Größere Werte sind auch hier in den untersten Höhengniveaus zu beobachten. Die Standardabweichung zeigt ein ähnliches höhenabhängiges Verhalten wie beim TWP, jedoch sind die Beträge beim LAP um 5° bis 10° größer.

Auf Grund der großen Anzahl von Vergleichen über einen Zeitraum von ein bzw. drei Jahren bietet sich eine Betrachtung der Vergleichsergebnisse in Abhängigkeit von der Tages- und Jahreszeit an. Darüber hinaus soll auch eine Bewertung der Genauigkeit der WPR-Windmessungen bei Niederschlag vorgenommen werden.

Tages- und jahreszeitliches Verhalten

Zur Untersuchung der Meßgenauigkeit in Abhängigkeit von der Tages- und von der Jahreszeit ist der zeitlich und über alle Höhenstufen gemittelte Betrag des Differenzvektors (MBDV) für alle vier Aufstiegstermine der Rawinsonde sowie für jede Betriebsart separat berechnet worden (Tabelle 4.3). Beim TWP ist keine signifikante Abhängigkeit des MBDV von der Tageszeit zu erkennen. Dagegen zeigt sich beim LAP in beiden Meßmodi ein Maximum des MBDV zum 00 UTC Termin. Als Ursache für die größere Fehlerhäufigkeit in der Nacht (vgl. auch die prozentuale Häufigkeit des Überschreitens verschiedener Schwellenwerte) konnte eindeutig Vogelzug identifiziert werden (vgl. auch Engelbart et al. (1998)). Wie bereits erwähnt, können etwa 2 % aller Windprofile des LAP High Mode als vom Vogelzug verfälscht eingestuft werden. Nur ein Teil der derart beeinflussten Messungen wurde von der automatischen Qualitätskontrolle selektiert, da die zeitliche und vertikale Konsistenzprüfung (Weber and Wuertz, 1991) auf Grund der zeitlichen Dauer der Störung über mehrere Stunden versagt. Gemäß dem Zugverhalten der Vögel mit einem Maximum in den

| | LAP-High Mode | | | | | LAP-Low Mode | | | | |
|---------------------------|-------------------|------|------|------|------|--------------|------|------|------|------|
| | 00 | 06 | 12 | 18 | all | 00 | 06 | 12 | 18 | all |
| Zeitraum | Nov.'93 - Okt.'96 | | | | | | | | | |
| MBDV | | | | | | | | | | |
| Mittelwert, m/s | 2,68 | 2,09 | 1,86 | 1,85 | 2,09 | 2,68 | 2,28 | 2,00 | 1,90 | 2,19 |
| > 2 ms ⁻¹ , % | 53,1 | 32,2 | 35,3 | 33,6 | 29,7 | 53,1 | 42,7 | 38,0 | 33,8 | 41,5 |
| >5 ms ⁻¹ , % | 23,0 | 9,5 | 4,8 | 6,2 | 10,8 | 19,1 | 11,8 | 5,7 | 6,0 | 10,4 |
| > 10 ms ⁻¹ , % | 8,1 | 4,5 | 1,2 | 1,8 | 3,5 | 7,0 | 3,1 | 1,1 | 1,5 | 3,1 |
| | TWP-High Mode | | | | | TWP-Low Mode | | | | |
| | 00 | 06 | 12 | 18 | all | 00 | 06 | 12 | 18 | all |
| Zeitraum | Jan.'97 - Dez.'97 | | | | | | | | | |
| MBDV | | | | | | | | | | |
| Mittelwert, m/s | 2,09 | 2,00 | 2,11 | 2,08 | 2,07 | 1,79 | 1,71 | 1,87 | 1,79 | 1,75 |
| > 2 ms ⁻¹ , % | 39,4 | 35,8 | 37,2 | 39,7 | 38,0 | 30,9 | 29,1 | 24,7 | 23,1 | 30,8 |
| >5 ms ⁻¹ , % | 5,5 | 4,9 | 6,2 | 6,7 | 5,8 | 4,3 | 4,1 | 4,2 | 4,4 | 4,1 |
| > 10 ms ⁻¹ , % | 0,9 | 1,0 | 0,8 | 1,8 | 1,1 | 0,6 | 0,8 | 0,4 | 1,3 | 0,9 |

Tabelle 4.3: Mittlerer Betrag des Differenzvektors (MBDV) und die prozentuale Häufigkeit des Überschreitens von ausgewählten Schwellenwerten für die vier Vergleichstermine.

Frühjahrs- und Herbstmonaten ist in diesen Monaten eine Häufung von hierdurch bedingten Meßfehlern zu verzeichnen, so daß der MBDV in den Monaten März und Oktober Maxima aufweist (Abb. 4.6). Ein weiteres wichtiges Indiz für die Vogelzugstörungen ist in Abb. 4.7 dargestellt. Die Abbildung zeigt alle Vergleiche, bei denen die Windgeschwindigkeitsdifferenz zwischen Rawin und LAP High Mode einen Betrag von 5 m/s überschritt. Jeweils in den Frühjahrs und Herbstmonaten ist eine Häufung zu verzeichnen.

Beim TWP (Abb. 4.6) ist im Februar ein Maximum und im August ein Minimum zu erkennen. Das kann auf eine Abhängigkeit der Vergleichsergebnisse von der Windgeschwindigkeit zurückgeführt werden. Je größer die Windgeschwindigkeit desto größer sind die Meßwertdifferenzen zwischen WPR und Rawinsonde. Das liegt zum einen an der Abhängigkeit des Meßfehlers der Rawinsonden-Windmessung von der Windgeschwindigkeit und zum anderen an der bei hohen Windgeschwindigkeiten auftretenden größeren Entfernung zwischen dem WPR-Standort und der Rawinsonde. Im betrachteten Jahr 1997 war der Februar der Monat in dem die mittlere Windgeschwindigkeit in der Troposphäre und unteren Stratosphäre ein Maximum aufwies, während im August ein Minimum auftrat.

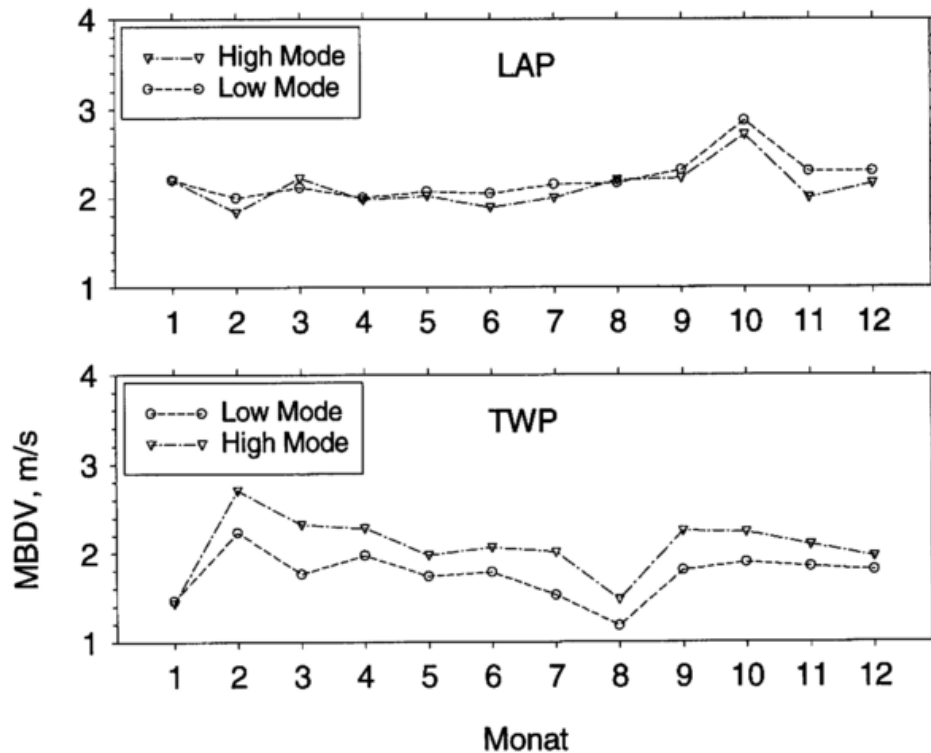


Abbildung 4.6: Jahresgang des mittleren Betrages des Differenzvektors (MBDV) für beide Windprofiler auf der Grundlage eines einjährigen (TWP) und dreijährigen (LAP) Datensatzes.

Verhalten bei Niederschlag

Wie in 4.2.2.6 diskutiert, beeinflusst Niederschlag in vielfältiger Weise die Messungen von WPR, so daß eine Betrachtung der Meßgenauigkeit in Abhängigkeit vom Auftreten von Niederschlag sinnvoll erschien. Bei Niederschlag tritt neben der Braggstreuung zusätzlich Rayleighstreuung auf, wobei in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Sendesignals, der Niederschlags- und der Turbulenzintensität der eine oder der andere Streuprozess dominiert oder im ungünstigsten Fall beide Streuprozesse gleich stark zur Rückstreuung beitragen (Abb. 2.1).

Beim LAP (1290 MHz) führt Rayleighstreuung bei Niederschlag häufig zu einem stärkeren Rückstreusignal als die Braggstreuung. Dadurch erhöht sich das Signal-Rausch-Verhältnis des Empfangssignals³ und damit schließlich auch die Genauigkeit der Momentschätzung (vgl. Glg.4.8). Die Genauigkeit der Windmessung sollte in diesem Fall also positiv beeinflusst werden. Beim Auftreten von Bragg- und Rayleighstreuung in vergleichbarer Intensität, wie dies beim TWP häufig der Fall ist, selektiert der Momentschätzalgorithmus (der hier betrachteten Systeme) entweder ein einzelnes Maximum oder bestimmt einen Mittelwert

³was auch eine größere vertikale Reichweite der Messung zur Folge hat

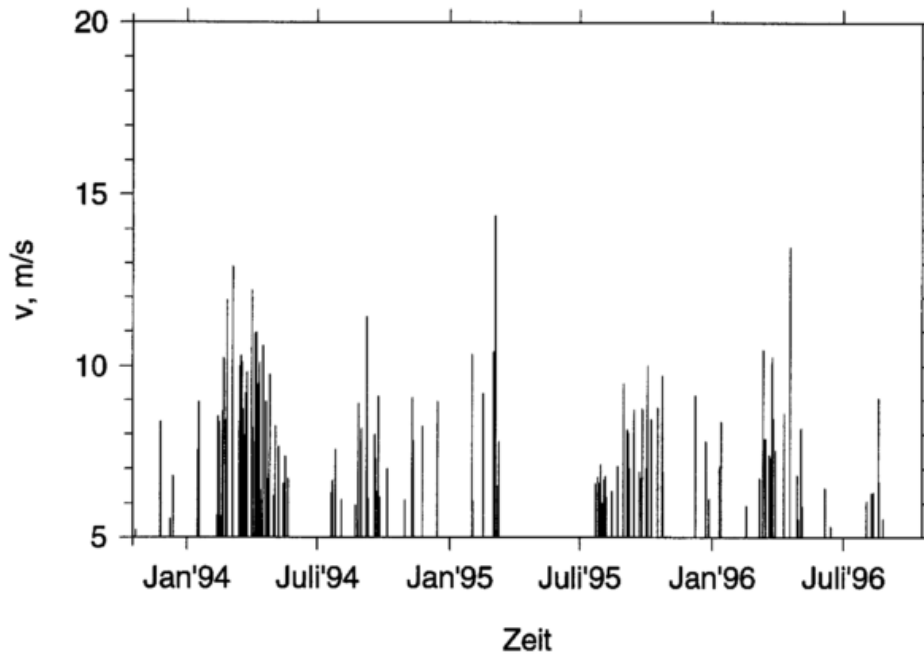


Abbildung 4.7: Mittlerer Betrag der Windgeschwindigkeitsdifferenz zwischen LAP (High Mode) und der Rawinsonde für alle Vergleiche bei denen der Betrag den Grenzwert 5 m/s überschreitet.

aus mehreren Maxima. Bei der Konsensusmittelung der Radialgeschwindigkeiten wird dann in Abhängigkeit von den Mittelungsparametern entweder kein oder ein fehlerbehafteter Mittelwert berechnet.

Eine weitere Fehlerursache in Verbindung vor allem mit konvektivem Niederschlag besteht darin, daß die Homogenität innerhalb des von den Radarstrahlen aufgespannten Volumens als Voraussetzung für die Berechnung des Windvektors nicht gegeben ist.

Abb. 4.8 zeigt die Abhängigkeit des mittleren Differenzvektors von verschiedenen Niederschlagsklassen. Klasse A beinhaltet alle niederschlagsfreien Fälle. In der Klasse B sind die Vergleiche zusammengefaßt, bei denen während der Messung der Windprofiler zwar leichter Niederschlag auftrat, jedoch von der Dauer kürzer als 30 min war. Dagegen enthält Klasse C alle Situationen mit länger als 30 min andauerndem leichtem Niederschlag. Klasse D beinhaltet alle Fälle mit ebenfalls länger als 30 min andauerndem Niederschlag von jedoch mäßiger bis starker Intensität. Diese Differenzierung wurde vorgenommen, da in der Konsensusmittelung bei Inkonsistenz der Radialwinde die Vernachlässigung von 40 % der Einzelmessungen zugelassen wurde (bei einem Mittelungsintervall von 50 min entspricht dies einer Zeitdauer von etwa 20 min). Mit der Klasse C sind somit alle Situationen erfaßt, in denen die zum Mittelwert beigetragenden Einzelmessungen in jedem Fall durch Niederschlag beeinflußt wurden. Alle Situationen, die durch diese Einteilung nicht erfaßt werden,

wurden nicht berücksichtigt.

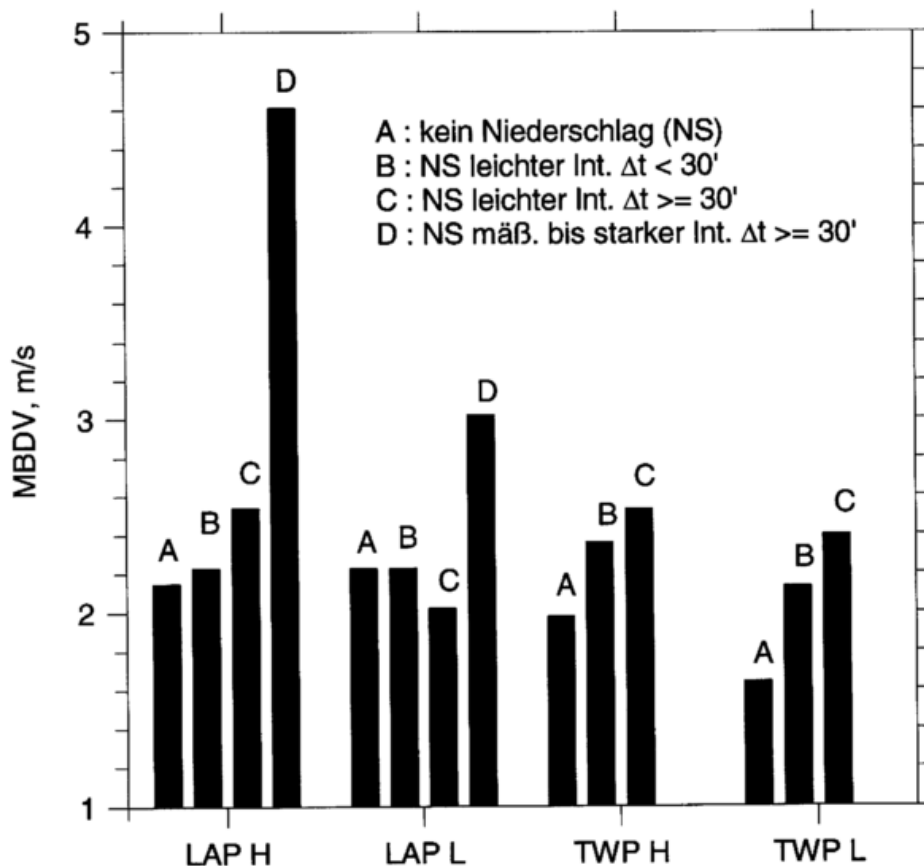


Abbildung 4.8: Mittlerer Betrag des Differenzvektors in Abhängigkeit vom Niederschlag, berechnet für einen Zeitraum von November 1993 bis Oktober 1996 (LAP) bzw. Januar 1997 bis Dezember 1997 (TWP).

Die Klasse D trat beim TWP (nur einjähriger Zeitraum) so selten auf, daß keine Mittelwerte berechnet worden sind. Allgemein kann bei beiden Systemen in beiden Modes ein ähnliches Verhalten beobachtet werden. Der Meßfehler nimmt mit der Dauer und der Intensität des Niederschlages zu, beim Auftreten von andauerndem mäßigen bis starken Niederschlag ist der MBDV sogar ca. doppelt so groß wie in niederschlagsfreien Situationen.

Eine Ausnahme von diesem Verhalten erkennt man beim LAP Low Mode. Leichter Niederschlag, der wenigstens länger als 30 min dauert, reduziert den Meßfehler im Vergleich zu niederschlagsfreien Situationen um ca. 0,2 m/s. Dies kann dadurch erklärt werden, daß sich bei Niederschlag das stärkere Rückstreusignal stärker auf eine Erhöhung der Meßgenauigkeit auswirkt als die bei Niederschlag auftretenden qualitätsmindernden Effekte.

4.3.2.2 Virtuelle Temperatur

Für den Vergleich wurden die von der Radiosonde gemessenen Temperaturen unter Berücksichtigung der ebenfalls von der Radiosonde gemessenen Feuchte in virtuelle Temperaturen umgerechnet. Beim LAP sind Messungen im Zeitraum von Juni 1994 bis Oktober 1996, beim TWP von Januar 1997 bis Dezember 1997 für den Vergleich berücksichtigt worden. Weitere Angaben zu den verwendeten Systemparametern sind in Kapitel 3 aufgeführt. Die Tabelle 4.4 faßt die statistischen Parameter des Vergleichs zusammen.

| | LAP/RASS | TWP/RASS |
|----------------------|-------------------|-------------------|
| Zeitraum | Juni'94 - Okt.'96 | Jan.'97 - Dez.'97 |
| Anzahl d. Vergleiche | 2666 | 1130 |
| Bias, K | 0,27 | 0,67 |
| STD, K | 0,535 | 0,594 |
| RMSD, K | 0,62 | 0,91 |
| Gauß-Fit | | |
| Bias, K | 0,24 | 0,76 |
| STD, K | 0,512 | 0,575 |

Tabelle 4.4: Ausgewählte mittlere statistische Parameter des Vergleichs der Temperaturmessungen: WPR/RASS - Radiosonde.

Die Korrelogramme zwischen den vom RASS und der Radiosonde gemessenen Temperaturen (Abb. A.9 und A.11) zeigen eine im allgemeinen gute Übereinstimmung ($r=0,992$ bzw. $0,995$). Differenzen größer 2 K werden nur in 2,5 % aller Vergleiche beim LAP/RASS und in 5,1 % beim TWP/RASS beobachtet. Diese größeren Differenzen treten häufig im Zusammenhang mit ausgeprägten Temperaturinversionen auf, wo das RASS die markante Temperaturänderung nur stark geglättet wiedergibt, oder unter konvektiven Bedingungen, wo der routinemäßig bei der Berechnung der virtuellen Temperatur nicht berücksichtigte Vertikalwind zu größeren Abweichungen führt. Interessant ist die bei beiden Vergleichen zu beobachtende Abweichung des Anstieges der Regressionsgeraden von der optimalen Geraden: Mit abnehmenden Temperaturen überschätzen die RASS-Systeme die Temperatur zunehmend stärker. Eine Erklärung für dieses Verhalten wird im Kapitel 5 gegeben.

Die Histogramme mit den angepaßten Gauß-Verteilungen (Abb. A.10 und A.12) bestätigen die in der Tabelle 4.4 angegebenen Schätzwerte von Mittelwert und Standardabweichung. Demnach wird durch beide RASS die Temperatur im Mittel um ca. 0,24 K bzw. 0,77 K überschätzt. Unterschiede zwischen Bias und Erwartungswert können, wie schon

| | LAP/RASS | | | | | TWP/RASS | | | | |
|---------------|-------------------|------|------|------|------|-------------------|------|------|------|------|
| | 00 | 06 | 12 | 18 | all | 00 | 06 | 12 | 18 | all |
| Zeitraum | Juni'93 - Okt.'96 | | | | | Jan.'97 - Dez.'97 | | | | |
| Bias | | | | | | | | | | |
| Mittelwert, K | 0,27 | 0,29 | 0,21 | 0,29 | 0,27 | 0,69 | 0,71 | 0,57 | 0,73 | 0,67 |
| > 0,5 K, % | 38,8 | 38,6 | 48,2 | 39,7 | 41,5 | 72,0 | 74,1 | 68,3 | 74,3 | 77,2 |
| > 1,0 K, % | 11,6 | 11,9 | 18,4 | 11,7 | 13,5 | 30,4 | 39,1 | 30,7 | 43,7 | 36,2 |
| > 2,0 K, % | 2,2 | 2,2 | 3,9 | 1,7 | 2,5 | 3,7 | 7,0 | 3,4 | 6,4 | 5,1 |

Tabelle 4.5: Mittlerer Bias der vom RASS gemessenen virtuellen Temperatur und die prozentuale Häufigkeit des Überschreitens von ausgewählten Schwellenwerten für die vier Vergleichstermine.

beim Wind, damit erklärt werden, daß mit zunehmender Höhe die Verfügbarkeit abnimmt, für die Berechnung des mittleren Bias jedoch die Werte einer jeden Höhenstufe mit dem gleichen Gewicht berücksichtigt worden sind. Die mittlere Standardabweichung beträgt 0,512 K bzw. 0,575 K.

Die Vertikalprofile des Bias weisen ein signifikant höhenabhängiges Verhalten auf (Abb. 4.9). In den unteren Höhen wird die Temperatur von beiden RASS leicht unterschätzt. Mit zunehmender Höhe erfolgt dann ein Vorzeichenwechsel des Bias, der beim TWP/RASS ein positives Maximum in 1100 m und beim LAP/RASS in 600 m Höhe erreicht. Trotz einer leichten Abnahme oberhalb des Maximums bleibt ein signifikant positiver Bias bestehen. Damit wird vom RASS die Schichtung innerhalb der unteren 1000 m bzw. 600 m deutlich als zu stabil wiedergegeben. Dieser höhenabhängige Temperaturmeßfehler des RASS wird durch eine Reihe von anderen Vergleichen bestätigt (z.B. Angevine and Ecklund (1994); Peters and Angevine (1996); Riddle et al. (1996)).

Die Standardabweichung variiert beim TWP/RASS zwischen 0,75 K in den untersten Höhengniveaus und 0,45 K an der Obergrenze des Meßbereichs sowie beim LAP/RASS zwischen 0,61 K und 0,45 K, wobei ebenfalls eine Abnahme der Standardabweichung mit der Höhe zu beobachten ist. Diese ist meßtechnisch nicht ohne weiteres zu erklären. Ein wesentliche Rolle spielt die mit der Höhe abnehmende Variabilität des Temperaturfeldes und deren Auswirkung auf den Vergleich zwischen Radiosonde und RASS. Im Gegensatz zu den Windmessungen genügt die Temperaturmeßgenauigkeit des RASS den Anforderungen für die meisten Anwendungen der Meteorologie nicht, weshalb im Kapitel 5 eine eingehende Fehleranalyse erfolgt.

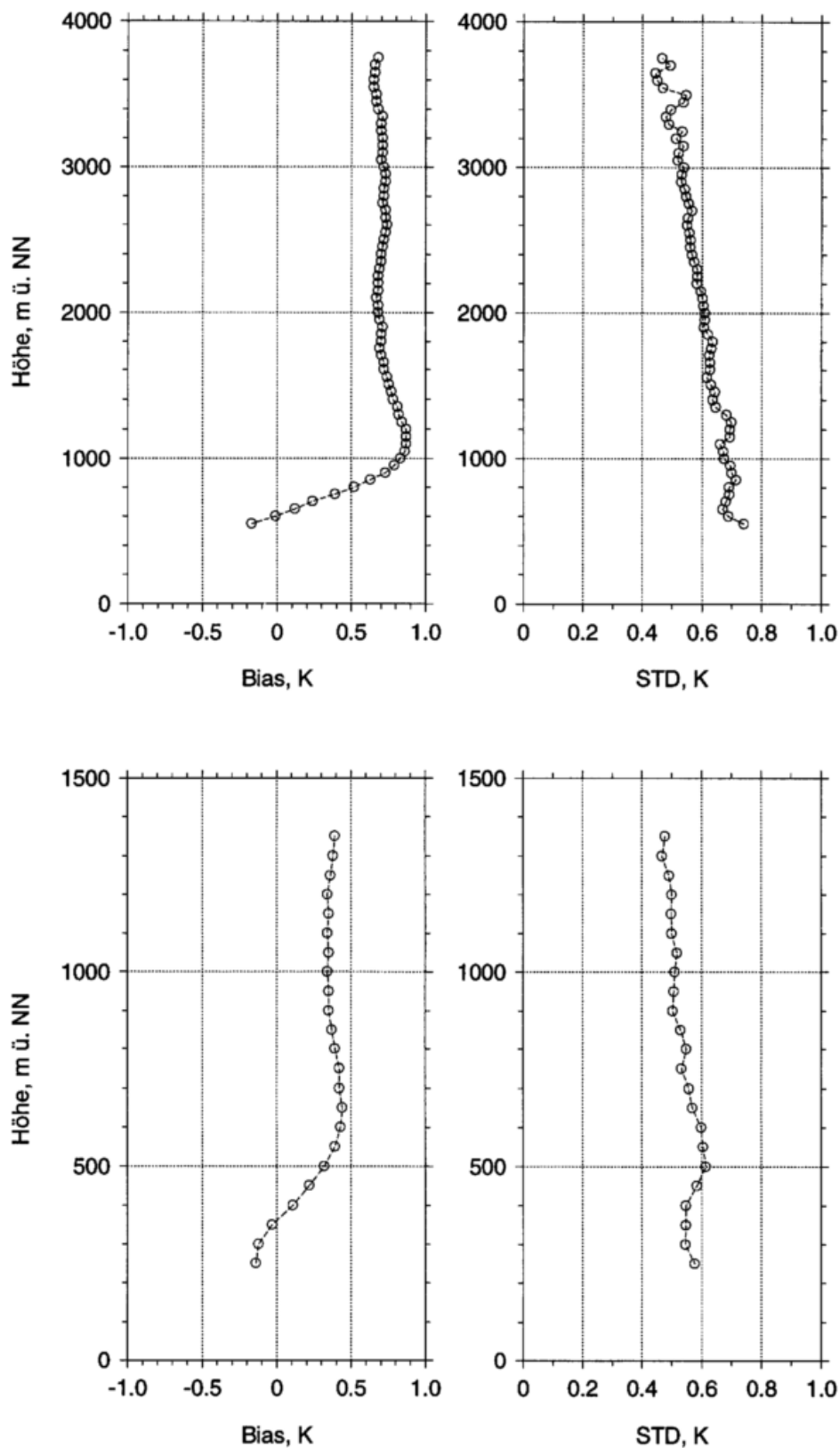


Abbildung 4.9: Bias (WPR/RASS minus Rawin) und Standardabweichung der vom TWP/-RASS (oben) bzw. vom LAP/RASS (unten) gemessenen virtuellen Temperaturen im Vergleich zur Radiosonde, berechnet aus 2666 bzw. 1130 Vergleichen für den Zeitraum: Juni 1994 - Oktober 1996 bzw. Januar 1997 - Dezember 1997

Tages- und jahreszeitliches Verhalten Der Bias beim LAP/RASS ist nahezu unabhängig von der Tageszeit, während beim TWP/RASS zum Mittagstermin ein deutliches Minimum zu beobachten ist. Die relative Häufigkeit des Überschreitens bestimmter Schwellenwerte der Differenzen zeigt bei beiden Systemen einen ausgeprägten Gang. Beim LAP/RASS ist zum 12 UTC Termin ein Maximum erkennbar, was auf die bereits angedeutete Nichtberücksichtigung des Vertikalwindes in der Berechnung der virtuellen Temperatur zurückzuführen ist. Anders ist dagegen das Verhalten beim TWP/RASS. Hier tritt zum Mittagstermin das absolute Minimum auf, zum 06 UTC und 18 UTC Termin werden Maxima beobachtet, wobei die Abweichung vom Wert des 00 UTC Termins sehr gering ist. Daß sich der Vertikalwind beim TWP/RASS mittags nicht ähnlich auswirkt wie beim LAP/RASS, kann durch den zu größeren Höhen hin verschobenen Meßbereich erklärt werden, so daß Konvektion nur bei Grenzschichthöhen über 600 m und damit seltener als beim LAP/RASS einen Einfluß auf die Messungen hat.

Ein ausgeprägtes jahreszeitliches Verhalten ist vor allem beim Bias beider Systeme zu erkennen (Abb. 4.10). Die Temperaturüberschätzung durch die RASS Systeme weist in den Sommermonaten mit Werten von ca. 0,6 K beim TWP/RASS und 0,15 K beim LAP/RASS ein deutliches Minimum gegenüber dem Bias in den Wintermonaten mit 0,73 K bzw. 0,45 K auf. In diesem Verhalten bestätigt sich die bereits anhand der Korrelogramme festgestellte Abhängigkeit der Temperaturdifferenzen von der Temperatur selbst und zwar in der Art, daß bei abnehmender Temperatur die Temperaturüberschätzung durch das RASS zunimmt. Die Standardabweichung schwankt im Verlauf des Jahres zwischen 0,44 K und 0,58 K beim LAP/RASS sowie 0,49 K und 0,63 K beim TWP/RASS. Dabei hat die Standardabweichung beim LAP/RASS, ähnlich dem Tagesgang des Auftretens von großen Differenzen, ihr Maximum im Sommer, also zu einer Zeit mit maximaler Konvektion, während beim TWP/RASS Maximalwerte der Standardabweichung in den Wintermonaten mit dem häufigen Auftreten von Inversionen in Verbindung zu bringen sind.

4.3.3 Vergleich mit Modellen

Ein Vergleich der als Modelleingangsdaten verwendeten Messungen mit Modellergebnissen ist eine gebräuchliche Methode für die Qualitätsprüfung und -beurteilung aller im Modell verwendeten Eingangsdaten. Da die Modellfelder einerseits auf einer Vielzahl von Informationen basieren und andererseits in der Datenassimilation eine der Meßgenauigkeit der einzelnen Datenarten angepaßte Analyse erfolgt, ist deren Zuverlässigkeit relativ hoch.

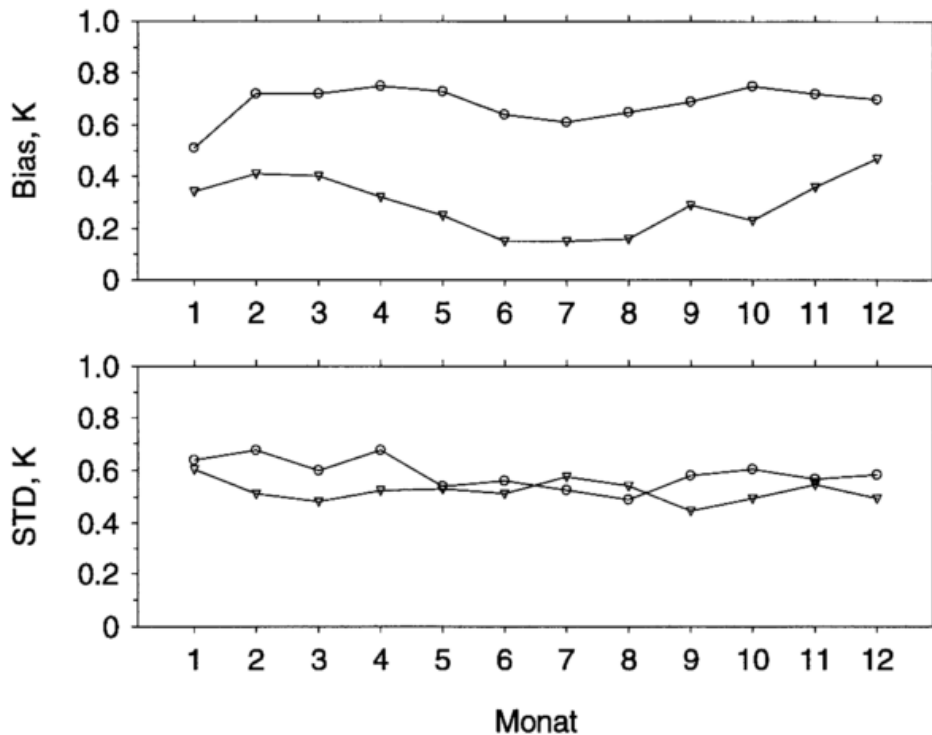


Abbildung 4.10: Jahresgang von Bias und Standardabweichung für den Vergleich der Temperaturmessungen vom LAP/RASS (Dreiecke) bzw. TWP/RASS (Kreise) mit der Radiosonde.

Damit ist mit dem Modell eine nahezu unabhängige Referenz⁴ für die Beurteilung von Windprofiler/RASS-Messungen auch im Vergleich zu den Rawinsondierungen gegeben. Für den Vergleich wurden die Modellergebnisse des Deutschland Modells der Version 3 (DM3) für den Gitterpunkt Lindenberg verwendet (s. Kapitel 3). Es wurden die Modellergebnisse des Windes zum Zeitschritt 0 (Analyse) und für die 12 h Vorhersage jeweils vom 00 UTC- und dem 12 UTC- Lauf genutzt. Zur Berechnung der statistischen Parameter erfolgte eine Interpolation der Modell-, der WPR- und der Rawinsondendaten auf einheitliche Höhen. Für eine Gegenüberstellung der Vergleiche: Modell-WPR und Modell-Rawinsonde wurde außerdem eine Anpassung des Stichprobenumfangs der Rawinsondenmessungen an die Windprofilermessungen (mit der Höhe abnehmende Verfügbarkeit) vorgenommen, so daß jeweils Datensätze gleichen Umfangs mit dem Modell verglichen worden sind. Betrachtet wurden zunächst die über ein Jahr und über alle Höhen gemittelten Parameter Bias und Standardabweichung von Windrichtung- und -geschwindigkeit sowie der mittlere Betrag des Differenzvektors (Tabelle 4.6).

Der Vergleich mit der Modellanalyse zeigt, daß Windprofiler und Rawinsonde eine geringere

⁴Dabei ist natürlich zu berücksichtigen, daß Rawinsondierungen die wesentliche Basis von aerologischen Daten für die Modelle darstellen und damit vor allem die Anfangs (Analyse-)felder von den Rawinsondenmessungen geprägt werden.

| | Mod-LAPL | | Mod-Rawin | | Mod-TWPH | | Mod-Rawin | | Mod-TWPL | | Mod-Rawin | |
|-------------------------------|----------|-------|-----------|-------|----------|-------|-----------|-------|----------|-------|-----------|-------|
| | v | d | v | d | v | d | v | d | v | d | v | d |
| Modellanalyse | | | | | | | | | | | | |
| Anzahl d. Vgl. | 255 | | | | 272 | | | | 272 | | | |
| Bias, $ms^{-1}/^{\circ}$ | 0,13 | 2,44 | 0,08 | 1,88 | 0,45 | 0,30 | 0,25 | 1,09 | 0,27 | 0,46 | 0,23 | 1,44 |
| STD, $ms^{-1}/^{\circ}$ | 1,62 | 20,54 | 1,36 | 17,62 | 1,78 | 13,07 | 1,80 | 13,12 | 1,54 | 15,49 | 1,51 | 14,51 |
| MBDV, $ms^{-1}/^{\circ}$ | 2,24 | | 1,78 | | 2,54 | | 2,47 | | 2,07 | | 1,93 | |
| Modell 12 h Vorhersage | | | | | | | | | | | | |
| Bias, $ms^{-1}/^{\circ}$ | 0,21 | 3,36 | 0,07 | 2,50 | 0,33 | 0,32 | 0,25 | 1,15 | 0,25 | 1,37 | 0,23 | 2,52 |
| STD, $ms^{-1}/^{\circ}$ | 1,73 | 23,60 | 1,82 | 23,82 | 2,01 | 19,02 | 2,06 | 18,51 | 1,82 | 20,55 | 1,92 | 21,03 |
| MBDV, $ms^{-1}/^{\circ}$ | 2,43 | | 2,52 | | 3,28 | | 3,34 | | 2,76 | | 2,83 | |

Tabelle 4.6: Ausgewählte mittlere statistische Parameter des Vergleichs: Modell-WPR und Modell-Rawin für den Zeitraum: Januar 1997 bis Dezember 1997. Die Stichprobe des Vergleichs Modell-Rawin wurde jeweils der des Vergleichs Modell-WPR angepaßt (v: Windgeschwindigkeit, d: Windrichtung).

Windgeschwindigkeit als das Modell liefern, wobei diese Unterschätzung beim Windprofiler noch wesentlich stärker ausfällt als bei der Rawinsonde. Dadurch werden auch die im direkten Vergleich beider Meßsysteme ermittelten Differenzen bestätigt. Die Standardabweichungen sind beim Vergleich: Modell-Rawinsonde kleiner als beim Vergleich: Modell-LAP Low Mode und Modell-TWP Low Mode, jedoch geringfügig größer als beim Vergleich: Modell-TWP High Mode. Da die beobachteten Differenzen jedoch sehr klein sind, kann davon ausgegangen werden, daß die Qualität von Windprofiler- und Rawinsondenmessungen vergleichbar ist. Selbst die geringen Differenzen zwischen den verschiedenen Vergleichen lassen sich schlüssig erklären. Da, wie bereits erwähnt, das Analysefeld auf Rawinsondenmessungen basiert, ist eine gute Übereinstimmung zwischen Rawinsondenmessungen und Modellfeld zu erwarten. Dennoch tendiert der Vergleich: Modell-TWP High Mode zu einem besseren Ergebnis als der Modellvergleich mit der Rawinsonde. Die Vertikalprofile des mittleren Betrages des Differenzvektors (Abb.4.11 und 4.12) zeigen, daß die Unterschiede im Mittelwert auf Differenzen in größeren Höhen zurückzuführen sind. Die größeren MBDV beim Vergleich mit der Rawinsonde können zwei Ursachen haben. Zum einen wächst mit der Höhe die Entfernung der mit dem Horizontalwind abdriftenden Rawinsonde zum Rawinsondenstartplatz, zum anderen nimmt der Meßfehler der Rawinsondenwindmessung mit der Höhe zu. Zu berücksichtigen ist außerdem, daß die Modellintegrationszeit mehr der Mittelungszeit der WPR-Messungen als der der Rawinsondenmessung entspricht.

Der Vergleich der Messungen mit der 12 h Modellvorhersage zeigt sogar für alle Meßmodi eine besseres Ergebnis für den Vergleich: Modell-Windprofiler gegenüber dem Vergleich

Modell-Rawin. Dies kann mit der größeren Unabhängigkeit des Modellfeldes von den Eingangsdaten (dominiert von den Rawinsondierungen) erklärt werden. Besonders deutlich ist der Unterschied zwischen dem Vergleich mit der Analyse und dem mit der 12 h-Vorhersage beim LAP (4.14). Aus dem Modellvergleich kann also der Schluß gezogen werden, daß die Meßgenauigkeit der Windprofiler gleich oder sogar größer als die des hier verwendeten Rawinsondensystems ist.

Der Modellvergleich bietet außerdem die Möglichkeit, die beobachtete deutliche Unterschätzung der Windgeschwindigkeit im TWP High Mode zu überprüfen. Abb. 4.13 zeigt, daß der TWP High Mode auch im Vergleich zum Modell die Windgeschwindigkeit deutlich unterschätzt. Allerdings wird auch von der Rawinsonde die Windgeschwindigkeit um bis zu 0,5 m/s unterschätzt.

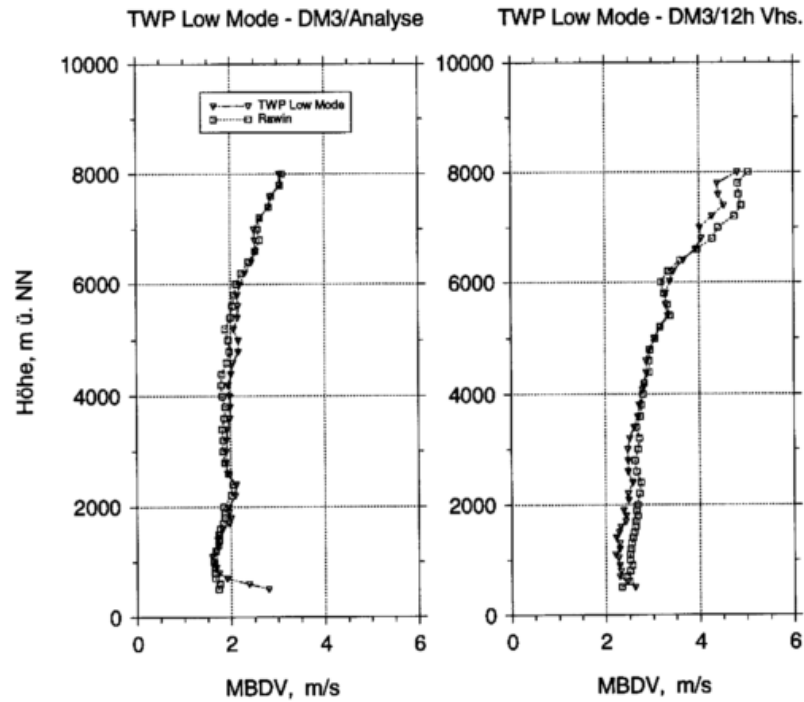


Abbildung 4.11: Mittlerer Betrag des Differenzvektors zwischen TWP Low Mode und Modell sowie zwischen Rawinsonde und Modell, berechnet aus 272 Vergleichen für Januar bis Dezember 1997.

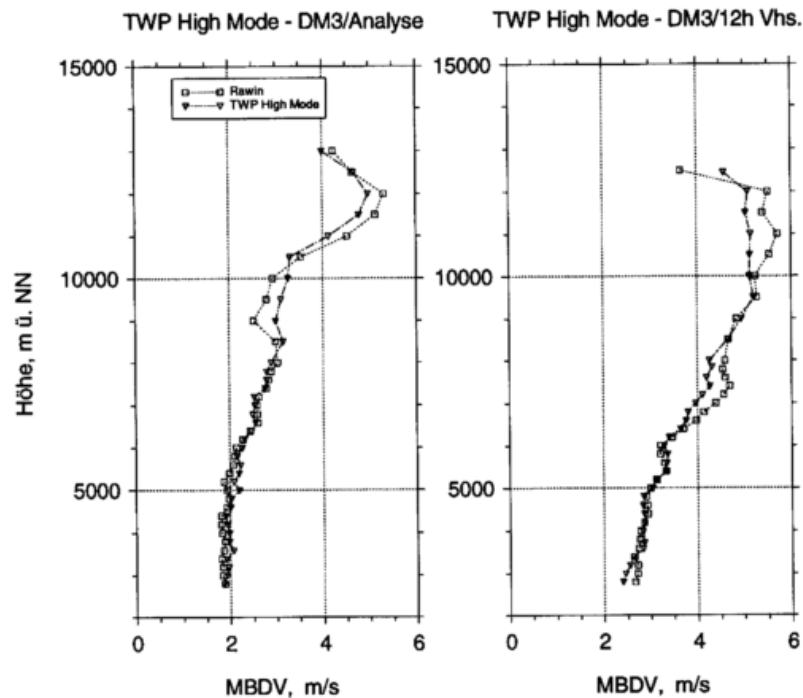


Abbildung 4.12: Mittlerer Betrag des Differenzvektors zwischen TWP High Mode und Modell sowie zwischen Rawinsonde und Modell, berechnet aus 272 Vergleichen für Januar bis Dezember 1997.

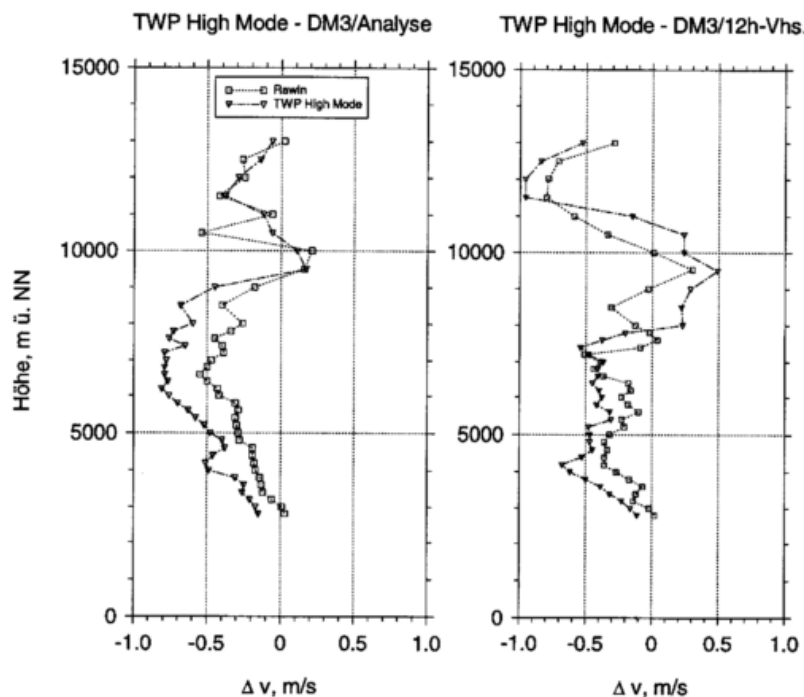


Abbildung 4.13: Mittlere Differenzen der horizontalen Windgeschwindigkeit zwischen TWP High Mode und Modell sowie zwischen Rawinsonde und Modell, berechnet aus 255 Vergleichen für Januar bis Dezember 1997.

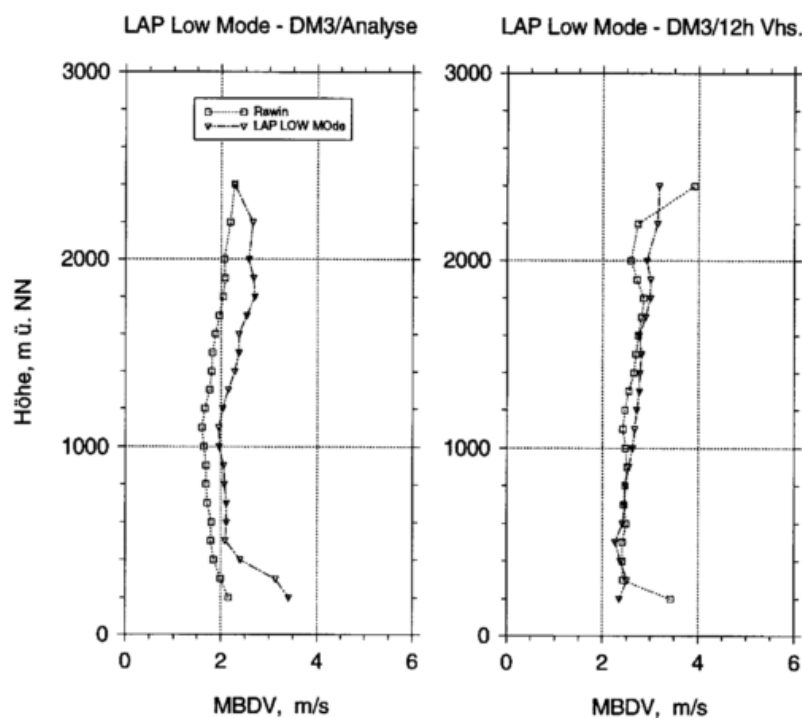


Abbildung 4.14: Mittlerer Betrag des Differenzvektors zwischen LAP Low Mode und Modell sowie zwischen Rawinsonde und Modell, berechnet aus 255 Vergleichen für Januar bis Dezember 1997.

Kapitel 5

Verfahren zur Verbesserung der Genauigkeit von RASS-Temperaturmessungen

5.1 Allgemeines

Die im Kapitel 4 analysierte Meßgenauigkeit des RASS, insbesondere der mit der Höhe variable Meßfehler genügt nicht den Ansprüchen der meisten Anwendungen in der Meteorologie. Deshalb war und ist die Analyse der RASS-Meßfehler bzw. die Verbesserung der Meßgenauigkeit Gegenstand einer Reihe von wissenschaftlichen Arbeiten (Angevine and Ecklund, 1994; Lataitis, 1993; Peters and Angevine, 1996). Allerdings ist bislang in keiner dieser Arbeiten, meist auf Grund fehlender Vergleichsmöglichkeiten, eine umfassende Verifikation der verschiedenen Korrekturen erfolgt, so daß die Wirksamkeit einzelner Korrekturen noch nicht abschließend bewertet werden konnte.

In diesem Kapitel wird deshalb zunächst ein Überblick über die verschiedenen Fehlerursachen der RASS-Messung und die entsprechenden in der Literatur diskutierten Korrekturen gegeben. Insbesondere wird gezeigt, daß der vor allem in den unteren Meßhöhen verbleibende Fehler, nach Anwendung aller bekannten Korrekturen, auf einen bislang nicht ausreichend berücksichtigten Fehler in der Höhenzuordnung der Temperaturmeßwerte zurückgeführt werden kann. Es erfolgt deshalb eine theoretische Darstellung zur Höhenzuordnung der Meßwerte und die Ableitung einer daraus resultierenden Höhenkorrektur, die sich wesentlich von bisher in der Literatur vorgeschlagenen Lösungen unterscheidet. Durch Vergleichsmessungen zwischen einem RASS und direkten Verfahren (Radiosonde und Fesselsonden) kann-

te außerdem der experimentelle Nachweis erbracht werden, daß die Temperaturmeßfehler in den unteren Höhen auf Mängel in der Höhenzuordnung zurückzuführen sind.

Abschließend erfolgt mit einem dreimonatigen und einem einjährigen Vergleichs-Datensatz eine Verifikation der neu entwickelten Höhenkorrektur in Verbindung mit den von anderen Autoren vorgeschlagenen Korrekturen, wobei unterschiedliche Theorien bzgl. der Wechselwirkung elektromagnetischer und akustischer Wellen berücksichtigt werden. Zur Verifikation erfolgt eine Neuberechnung der virtuellen Temperatur aus den Momentdaten der WPR/RASS und der Vergleich mit Radiosondenmessungen.

5.2 Fehlerursachen und entsprechende Korrekturen

Die bei der RASS Temperaturmessung möglichen Fehler lassen sich nach ihrer Herkunft hinsichtlich der Messung und der Datenauswertung in folgende Kategorien einteilen:

- Meßfehler bzw. -ungenauigkeiten in der Signalverarbeitung
- Approximationen in den Gleichungen zur Berechnung der virtuellen Temperatur aus den spektralen Informationen
- Vernachlässigung des Vertikalwindes
- Vereinfachungen in der Beschreibung der Wechselwirkung von elektromagnetischen und akustischen Wellen
 - Nichtberücksichtigung der Systemgeometrie, d.h. des Abstandes zwischen (virtueller) Schallquelle und Vertikalachse der Radarantenne
 - Einfluß von Horizontalwind und Turbulenz
- Fehler in der räumlichen und zeitlichen Zuordnung der Meßwerte

In den nächsten Abschnitten werden diese Fehlerursachen und deren Korrektur näher beschrieben und diskutiert.

5.2.1 Ungenauigkeiten der Signalverarbeitung

Die Genauigkeit der RASS Temperaturmessung hängt wesentlich von der Leistungsfähigkeit der Signalverarbeitung ab. Der Zusammenhang zwischen dem zufälligen Fehler der Moment-

schätzung und dem Verfahren der Momentschätzung, den jeweiligen Parametern der Signalanalyse und der Rückstreuleistung wurde bereits in Kapitel 4 diskutiert. Zur Untersuchung möglicher Ungenauigkeiten in der Signalverarbeitung ist ein einfaches Experiment durchgeführt worden. Es beruht auf der in 2.1.4 beschriebenen Wechselwirkung von akustischen und elektromagnetischen Wellen, wonach bei Aussenden eines kontinuierlichen Schallsignals das rückgestreute Radarsignal genau um den Betrag der gesendeten Schallfrequenz frequenzverschoben ist (Glg. 2.22). Die Überprüfung dieses theoretischen Sachverhaltes und der Qualität der Signalverarbeitung erfolgte mit dem RASS des LAP durch das Aussenden kontinuierlicher schmalbandiger Schallsignale anstelle eines Frequenzspektrums. In Abb. 5.1 sind die gemessenen Temperaturprofile für verschiedene Sendefrequenzen dargestellt.

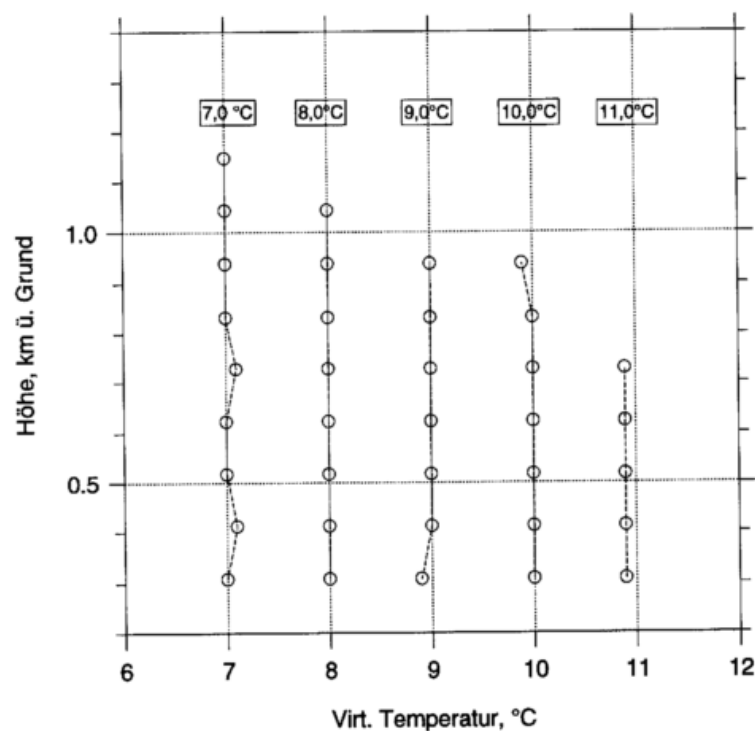


Abbildung 5.1: Vertikalprofile der virtuellen Temperatur für verschiedene akustische Sendefrequenzen, die den angegebenen Temperaturen entsprechen. Gemessen am 11.09.1997 mit dem LAP.

Die Sendefrequenz entspricht den Temperaturwerten¹ 7,0°C, 8,0°C, 9,0°C, 10,0°C und 11,0°C. Es ist deutlich erkennbar, daß die gemessenen Temperaturen den vorgegebenen Frequenz- bzw. Temperaturwerten mit Abweichungen kleiner 0,1 K entsprechen. Ein mög-

¹Die Einstellung des Frequenzfensters bzw. einzelner Frequenzen ist bei den Lindenberger Systemen generell nur über die Temperatur möglich. Der Zusammenhang zwischen virtueller Temperatur und Schallfrequenz kann mit (2.64) und (2.23) leicht hergeleitet werden. Demnach ergibt sich die Schallfrequenz aus $f_a \approx \sqrt{T_v} 401,94 f_e / c$.

licher Einfluß des von Peters (1994) beschriebenen „second-order doppler effect“ konnte auf Grund von Windgeschwindigkeiten kleiner 5 m/s nicht beobachtet werden. Beim Aussenden eines Frequenzspektrums und dem Erfüllen der Bragg-Bedingung kann die Schallgeschwindigkeit aus der Dopplerfrequenz nach Glg. (2.40) berechnet werden, weil bei erfüllter Bragg-Bedingung (was im Routinebetrieb bekanntlich durch das Aussenden eines Frequenzspektrums bzw. einer Folge von akustischen Impulsen unterschiedlicher Frequenz erreicht wird) die optimale Schallfrequenz gleich der durch die Schallgeschwindigkeit hervorgerufenen Dopplerverschiebung ist (Glg. 2.23).

Eine weitere Voraussetzung für die Ableitung der Schallgeschwindigkeit aus dem Dopplerspektrum besteht darin, daß in jeder Höhenstufe nur das durch sich ausbreitende Schallwellen hervorgerufene Echo existiert, d.h. keine Störechos auftreten. Echos treten im Dopplerspektrum durch ein eindeutig zu identifizierendes Maximum, einen sogenannten Peak, in Erscheinung. Bei RASS Temperaturmessungen ist das Vorhandensein von Störechos zwar deutlich unwahrscheinlicher als bei der Windmessung, da infolge des analysierten Geschwindigkeitsbereiches (320 m/s .. 340 m/s) weder Groundclutter noch Niederschlagsechos eine Rolle spielen. Dennoch gibt es Situationen, in denen das Dopplerspektrum Doppelpeaks aufweist und somit keine eindeutige Momenterkennung nach dem in 2.3.1 beschriebenen Verfahren möglich ist. Abb. 5.2 zeigt ein solches Beispiel für das RASS Dopplerspektrum des TWP und die jeweils nach dem Routineverfahren bestimmten 1. Momente. Im Höhentor 1789 m erkennt man zwei signifikante Peaks. Das 1.Moment wird durch die automatische Ermittlung genau zwischen diesen Peaks lokalisiert². Das dazugehörige von der Radiosonde gemessene Vertikalprofil der virtuellen Temperatur (Abb. 5.3) weist genau in diesem Bereich eine markante Inversion auf, die jedoch vom RASS im Vergleich zur Radiosonde nur stark geglättet wiedergegeben wird. Dieser Effekt ist besonders in der kalten Jahreszeit häufig zu beobachten und wird durch die Vergleichsergebnisse RASS - Radiosonde statistisch bestätigt. Das Auftreten der Doppelpeaks läßt sich dadurch erklären, daß die vom RASS gemessene Temperatur einen u.a. mit der Höhengewichtsfunktion gewichteten Mittelwert repräsentiert. Bei einem kontinuierlichen und glatten vertikalen Verlauf der Temperatur sind die Spektralanteile um einen Mittelwert nahezu gleichverteilt. Treten Unstetigkeiten im Temperaturprofil auf, wie es bei einer Inversion der Fall ist (Abb. 5.3), können sich zwei Maxima im Dopplerspektrum ergeben, entsprechend den unterschiedlichen Temperaturen in einem Höhenintervall.

²Der für die Momenterkennung benutzte Algorithmus identifiziert die beiden nahe beieinander liegenden Peaks als einen Peak und legt den Schwerpunkt etwa in die Mitte. Komplexere Multippeak-Algorithmen können derartige Peaks voneinander unterscheiden und würden in diesem Fall den maximalen Peak detektieren (Griesser, 1998).

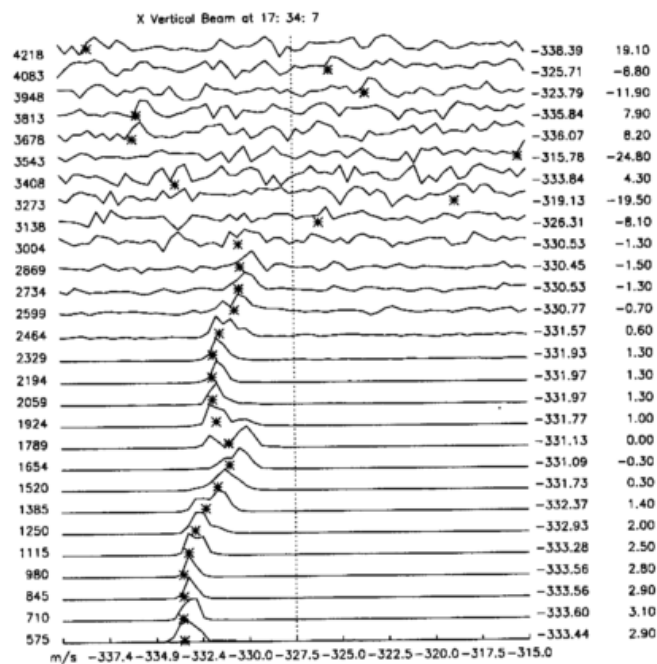


Abbildung 5.2: Dopplerspektren einer RASS Messung (TWP) am 23.11.1998 und die jeweiligen nach dem Routineverfahren ermittelten 1. Momente (Sterne) für die einzelnen Höhenintervalle.

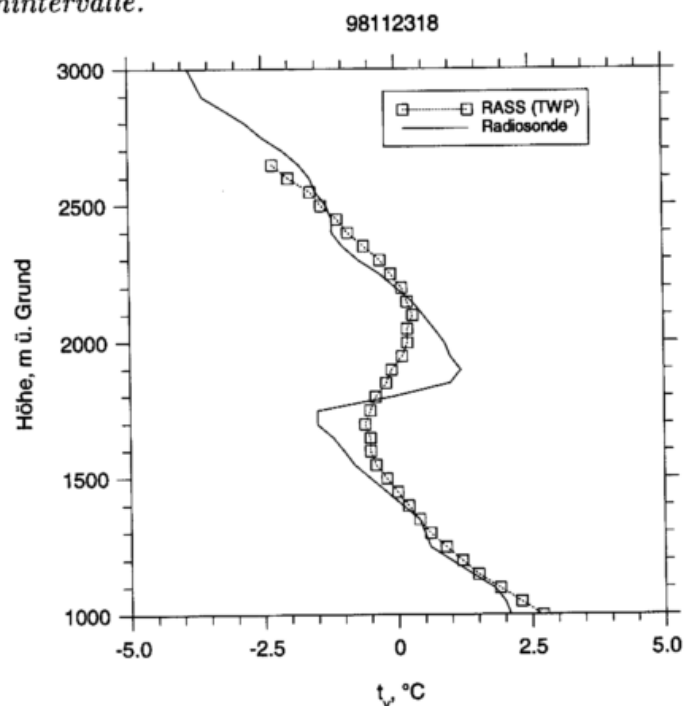


Abbildung 5.3: Vertikalprofil der virtuellen Temperatur, gemessen mit der Radiosonde und dem RASS-TWP (5 min Mittelwert) für das in Abb. 5.2 dargestellte Beispiel.

5.2.2 Approximationen in den Gleichungen zur Berechnung der virtuellen Temperatur aus den spektralen Informationen

Die routinemäßige Ableitung der Schallgeschwindigkeit aus den spektralen Informationen basiert im wesentlichen auf zwei Gleichungen. Zum ersten wird für den Fall maximaler Rückstreuung (Bragg-Bedingung) die Schallgeschwindigkeit aus der Dopplerverschiebung bestimmt (vgl. Gleichung 2.40):

$$c_a = -\frac{cf_d}{2f} \quad (5.1)$$

Im Gegensatz zu (2.40) wird durch das Minuszeichen das Koordinatensystem derart definiert, daß c_a bei einer Ausbreitung der Schallwellen nach oben positiv ist. Im nächsten Schritt erfolgt die Berechnung der virtuellen Temperatur mit Gleichung 2.63:

$$T_v = \frac{c_a^2 M_d}{\gamma R_a} \quad (5.2)$$

Die Größen c , M_d , γ und R_a werden bei der routinemäßigen Berechnung von T_v als konstant angenommen. Durch die Verwendung der Lichtgeschwindigkeit c im Vakuum in Gleichung (5.1) sowie durch die Annahme, daß sich Luft wie ein ideales Gas verhält und die Nichtberücksichtigung der Feuchteabhängigkeit von γ (Gleichung (5.2)) werden Näherungen angenommen, die zu einem nicht zu vernachlässigenden Fehler führen. Im weiteren wird die damit im Zusammenhang stehende Korrektur als „Konstanten-Korrektur“ bezeichnet.

5.2.2.1 Abhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von Temperatur und Luftfeuchte

Die Lichtgeschwindigkeit c in der Atmosphäre ist kleiner als die Lichtgeschwindigkeit c_0 im Vakuum und kann über die bekannte Beziehung, wonach das Verhältnis der beiden Geschwindigkeiten gleich dem Brechungsindex n ist, berechnet werden:

$$c = \frac{c_0}{n} \quad (5.3)$$

Der Brechungsindex ist proportional zur Moleküldichte und deren Polarisierung und läßt sich nach Bean and Dutton (1966) aus der Refraktivität N_n des Mediums ableiten.

$$n = N_n \times 10^{-6} + 1 \quad (5.4)$$

Zur Berechnung der Refraktivität kann in guter Näherung eine Gleichung von denselben Autoren (zitiert u.a. auch in Doviak and Zrnic (1993), S.16) genutzt werden:

$$N_n = 77,6 \frac{p}{T} + 71,6 \frac{e}{T} + 3,7 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (5.5)$$

Darin ist p der atmosphärische Luftdruck und e der Wasserdampfpartialdruck in hPa(!).

Um den absoluten Temperaturfehler abzuleiten, wird zunächst durch Kombination der Gleichungen (5.1), (5.2) und (5.4) eine direkte Beziehung zwischen T_v und n hergestellt.

$$T_v = \frac{c_0^2 f_d^2 M_d}{4 f^2 n^2 \gamma R_a} \quad (5.6)$$

Gemäß dem Gesetz der Fehlerfortpflanzung (s. auch Kapitel 4) ergibt sich nun der Temperaturfehler ΔT_v durch die partielle Ableitung dieser Gleichung nach n und der Multiplikation mit Δn . Werden die von n unabhängigen Größen mit dem Faktor A zusammengefaßt, so erhält man:

$$\Delta T_v = \frac{-2A}{n^3} \Delta n \quad (5.7)$$

Bei Verwendung von c_0 in Gleichung (5.1) ist $\Delta n = 1 - n$, da n für $c = c_0$ gleich 1 ist. Berechnet man außerdem die Konstante A für eine angenommene Schallgeschwindigkeit von $c_a = 340 \text{ m/s}$ und mit den in der Routine verwendeten Konstanten für M_d , γ und R_a , so ergibt sich folgende Gleichung zur Berechnung von ΔT_v :

$$\Delta T_v = \frac{-573,4}{n^3} (1 - n) \quad (\Delta T_v \text{ in K}) \quad (5.8)$$

In Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte und für ausgewählte Temperaturen ist der sich nach (5.8) ergebende Temperaturmeßfehler in Abb. (5.4) dargestellt. Die Verwendung der im Vakuum geltenden Lichtgeschwindigkeit führt also in jedem Falle zu einer Überschätzung der Temperatur durch das RASS im Vergleich zur Verwendung der realen Lichtgeschwindigkeit. Allerdings ist die Variation des Fehlers innerhalb des in der Atmosphäre (in Mitteleuropa) vorkommenden Temperatur- und Feuchtebereiches mit Werten kleiner 0,1 K relativ gering. Deshalb ist für routinemäßige Anwendungen die Verwendung einer mittleren, konstanten Lichtgeschwindigkeit normalerweise akzeptabel.

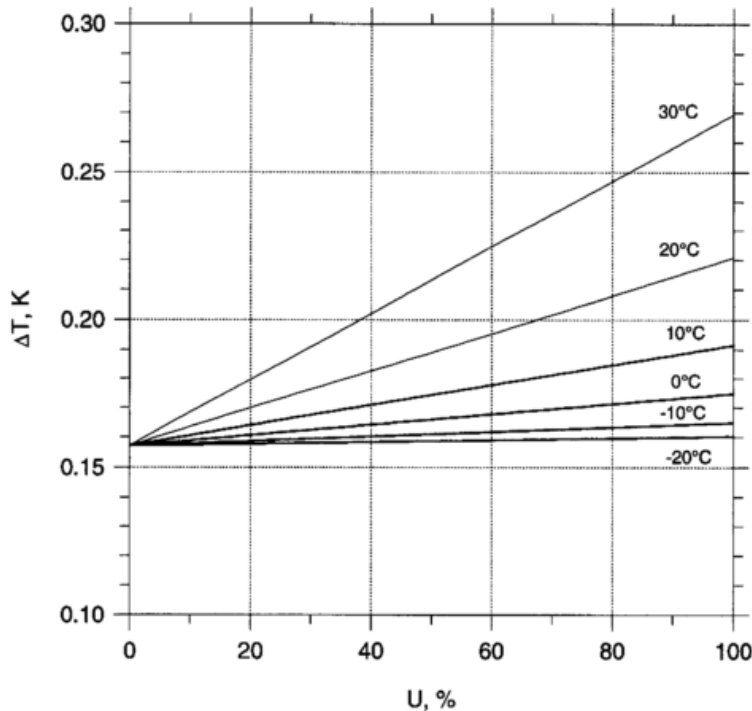


Abbildung 5.4: Absoluter Fehler der virtuellen Temperatur bei Verwendung der Lichtgeschwindigkeit für Verhältnisse im Vakuum entsprechend Gleichung (5.2) in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte für ausgewählte Temperaturen im Bereich von -20°C bis 30°C .

5.2.2.2 Annahme eines idealen Gases

In den bisherigen Betrachtungen zum Zusammenhang von Schallgeschwindigkeit und Temperatur wurde davon ausgegangen, daß sich Luft wie ein ideales Gas verhält - eine für viele Anwendungen berechnete Approximation. In Wirklichkeit jedoch verhält sich Luft bzw. das Luft-Wasserdampf-Gemisch der Atmosphäre wie ein reales Gas, welches sich durch die van-der-Waalssche Zustandsgleichung allgemein beschreiben läßt:

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = R_a T \quad (5.9)$$

worin V das Volumen ist. Die Größe b berücksichtigt das Eigenvolumen der Moleküle, während der Term $\frac{a}{V^2}$ die gegenseitige Anziehung der Moleküle beschreibt. Häufig wird Gleichung (5.9) jedoch nach einer Reihenentwicklung in der Virialform dargestellt:

$$pV = R_a T \left(1 + \frac{B}{V} + \frac{C}{V^2} + \dots\right) \quad (5.10)$$

Darin sind B und C die Virialkoeffizienten der 2. und 3. Ordnung.

Folgt man ausgehend von diesen Gleichungen der von Cramer (1993) gegebenen Herleitung, in der die Virialkoeffizienten ab 3. Ordnung infolge ihres geringen Einflusses bei geringen

Gasdichten vernachlässigt werden, dann berechnet sich die Schallgeschwindigkeit folgendermaßen:

$$c_a^2 = \gamma \frac{R_a T}{M} \left(1 + \frac{2pB}{R_a T} \right) \quad (5.11)$$

Der 2. Virialkoeffizient B ist temperaturabhängig und für das Gasgemisch Luft eine Kombination der Virialkoeffizienten für die in der Luft enthaltenen Gase bzw. Spurenstoffe. Cramer (1993) gibt unter Berücksichtigung der 6 wichtigsten in der Luft enthaltenen Gase (O_2 , N_2 , Ar , CO_2 , Ne und H_2O) eine Approximationsformel (s. Anhang) zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit an, wobei die Konzentration der Spurenstoffe mit Ausnahme des Wasserdampfes als konstant angenommen wird. Bei Anwendung der Formel muß beachtet werden, daß bei der Berechnung der Schallgeschwindigkeit der Einfluß der Schalldispersion infolge von molekularer thermischer Relaxation³ unberücksichtigt bleibt. Die Schallgeschwindigkeit verringert sich, je näher die Schallfrequenz der Relaxationsfrequenz kommt. Da die Relaxationsfrequenz wiederum eine Funktion der Feuchte ist, ergibt sich auch hieraus eine Feuchteabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit. Nach Abschätzungen mit den in Cramer (1993) gegebenen Gleichungen sind die darauf zurückzuführenden Schwankungen in der Schallgeschwindigkeit jedoch kleiner 0,1 m/s, wenn die mittleren Schallfrequenzen der beiden Lindenberger Systeme ($\approx 2800 \text{ Hz}$ (TWP) bzw. $\approx 1100 \text{ Hz}$ (LAP)) zugrunde gelegt werden. Die Effekte der Relaxation wurden deshalb vernachlässigt.

Die von Cramer (1993) gegebene Formel besteht aus 16 Termen und läßt sich nicht analytisch nach T auflösen. Zur Berechnung einer entsprechenden Korrektur wird deshalb zunächst in erster Näherung T_v^* nach Gleichung (5.2) berechnet. Für dieses T_v^* erfolgt anschließend die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit $c_{a\text{Cramer}}$ mit der Cramer'schen Approximationsformel. Diese unterscheidet sich von der gemessenen und zur Berechnung von T_v^* herangezogenen Schallgeschwindigkeit um Δc_a . Der absolute Temperaturmeßfehler wird nun ebenfalls unter Berücksichtigung der Fehlerfortpflanzung in Beziehung zu Δc_a gesetzt:

$$\Delta T_v = \frac{c_a}{200,97} \Delta c_a \quad (5.12)$$

Einen direkten Weg zur Berechnung von T_v beschreiben Angevine et al. (1998). Basierend auf den Gleichungen nach Cramer, geben diese Autoren eine auf dem Potenzgesetz beruhende

³Die durch Schall hervorgerufenen Dichte- und Druckänderungen erhöhen zunächst die Translationsenergie eines mehratomigen Gases. Anschließend wird diese Energie auf die Freiheitsgrade der Rotation und der Vibration übertragen. Die dafür erforderliche Zeit bezeichnet man als Relaxationszeit τ_r , woraus sich die Relaxationsfrequenz ($f_r = (2\pi\tau_r)^{-1}$) berechnen läßt.

Näherungsformel zur Ableitung von T_v aus c_a an, wobei die Abweichungen im Vergleich zur Formel von Cramer kleiner 0,05 K sind. In Angevine and Ecklund (1994) wurde dagegen, ebenfalls nach Cramer, γ für die jeweiligen atmosphärischen Bedingungen bestimmt und dann, irrtümlich, in der Gleichung für ideale Gase zur Berechnung der virtuellen Temperatur aus der Schallgeschwindigkeit verwendet. Dadurch erfolgte eine Überschätzung des Fehlers.

Abb. 5.5 zeigt die aus diesem Effekt resultierenden Messfehler der virtuellen Temperatur für verschiedene Temperatur- und Feuchteverhältnisse. Für feuchtwarmer Umgebungsbedingungen ist der Fehler mit Beträgen bis zu 0,7 K negativ, während für Temperaturen unter 10°C durchgehend positive Messfehler auftreten. Die Gültigkeit der Cramer'schen Gleichungen ist auf den Temperaturbereich von 0 bis 30°C beschränkt. Leider finden sich in der Literatur keine präzisen Angaben über die Beziehung: Schallgeschwindigkeit - Temperatur für den negativen Temperaturbereich. Aus diesem Grund sind entsprechende Korrekturen nach der Cramer'schen Formel versuchsweise auch für Temperaturen kleiner 0°C berechnet worden. Inwieweit eine derartige Extrapolation berechtigt ist, wird im nächsten Abschnitt diskutiert.

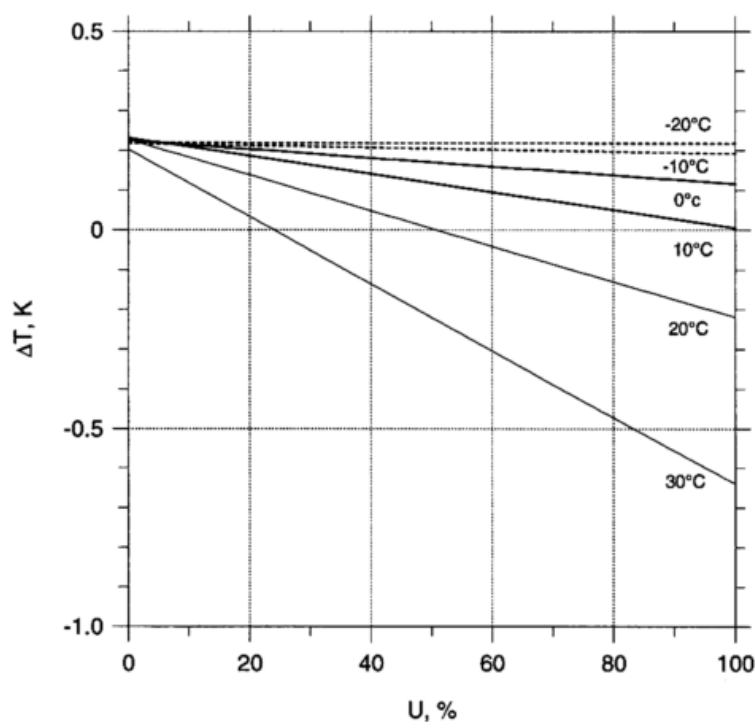


Abbildung 5.5: Absoluter Fehler der virtuellen Temperatur entsprechend Gleichung (5.12) und bei Verwendung der Konstanten $\gamma = 1,4$; $M_d = 28,94 \text{ g/mol}$; $R = 8314,44 \text{ J/(molK)}$ und $c = 2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$ in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte für ausgewählte Temperaturen im Bereich von -20°C bis 30°C .

5.2.2.3 Gesamteffekt der Approximationen

Faßt man die in den beiden vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Effekte zusammen, resultiert aus den Approximationen in den Gleichungen zur Berechnung der virtuellen Temperatur der in Abb. 5.6 dargestellte Fehler. Dabei wurde zusätzlich berücksichtigt, daß die molare Masse M_d in Gleichung (5.2) routinemäßig mit nur 2 Nachkommastellen eingeht und sich daraus bezogen auf den präziseren Wert ($M_d = 28,9645$) ein absoluter Temperaturmeßfehler von ca. $-0,04$ K ergibt.

Der Gesamtfehler ist signifikant feuchte- und temperaturabhängig, so daß sich unter Berücksichtigung der vor allem mit der Jahreszeit sich ändernden Umgebungsbedingungen unterschiedliche Korrekturen ergeben. Dabei ist bemerkenswert, daß die Feuchteabhängigkeit von ΔT mit der Temperatur zunimmt. Dies resultiert aus der Proportionalität des potentiellen Wasserdampfgehaltes der Luft (Sättigungsdampfdruck) und der Temperatur.

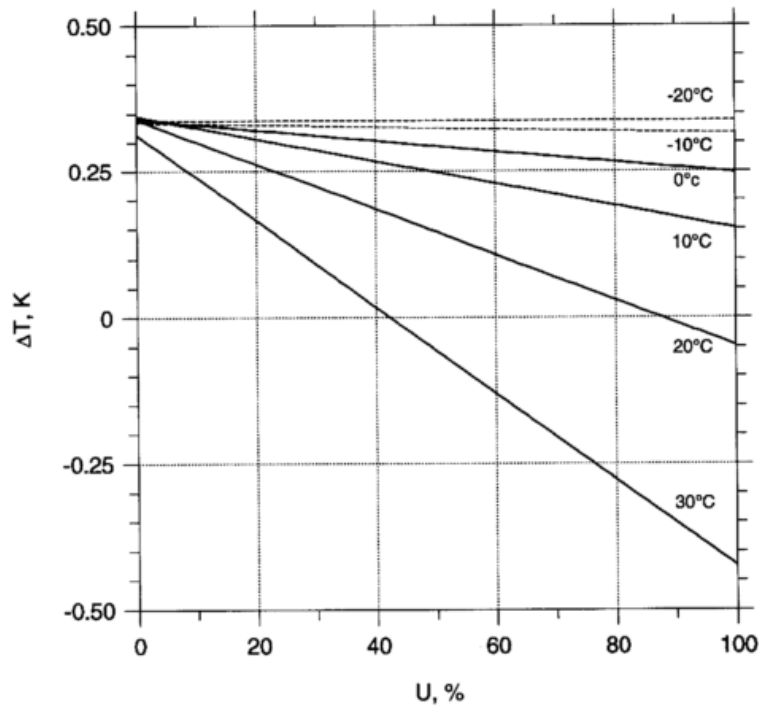


Abbildung 5.6: Absoluter Fehler der virtuellen Temperatur infolge von Approximationen in den Gleichungen (5.1) und (5.2) zur Berechnung der virtuellen Temperatur in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte für ausgewählte Temperaturen im Bereich von -20°C bis 30°C .

Zur Untersuchung der Gültigkeit der Cramer'schen Gleichungen bei Temperaturen kleiner 0°C wurden die RASS-Messungen selbst herangezogen. Setzt man voraus, daß die Abhängigkeit des Meßfehlers von der Temperatur nur über den sogenannten Konstantenfehler gegeben ist, dann sollten die Temperaturdifferenzen zur Radiosonde diese funktionale Abhängigkeit

widerspiegeln. Die obere Grafik in Abb. 5.7 zeigt die Differenzen zwischen den Temperaturen des RASS (TWP), die hinsichtlich der Vertikalgeschwindigkeit (s. Abschnitt 5.2.3) und der Höhenzuordnung (s. Abschnitt 5.2.5) korrigiert wurden, und der Radiosonde als Funktion der Temperatur im Höhenbereich zwischen 2000 m und 2400 m. Dieser Höhenbereich wurde ausgewählt, weil dort die Standardabweichung der Temperaturdifferenzen RASS-Radiosonde und damit der (störende) Einfluß anderer die Meßgenauigkeit bestimmender Faktoren am geringsten ist.

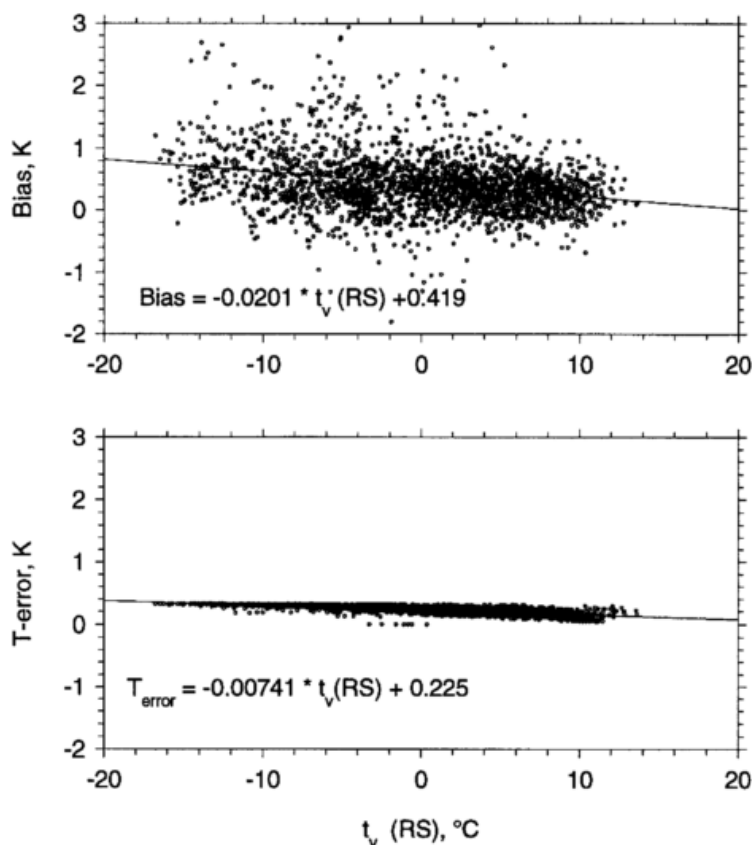


Abbildung 5.7: oben: Beobachtete Temperaturdifferenzen des RASS im Vergleich zur Radiosonde als Funktion der Temperatur für den Höhenbereich zwischen 2000 und 2400 m. Die RASS-Temperaturen wurden bezüglich des Vertikalwindes und der Höhenzuordnung korrigiert; unten: Temperaturmeßfehler, der aus den Gleichungen 5.8 und 5.12 berechnet wurde.

In Abb. 5.7 ist deutlich erkennbar, daß mit abnehmenden Temperaturen die Differenzen größer werden. Diese Abhängigkeit ist der des Temperaturfehlers, der mit den Gleichungen (5.8) und (5.12) für die konkreten Bedingungen berechnet wurde, sehr ähnlich, obwohl der Anstieg geringer ausfällt. Dabei muß in Rechnung gestellt werden, daß die Streuung der beobachteten Differenzen erheblich größer ist als bei den theoretisch berechneten Temperaturmeßfehlern. Diese größere Streuung ist die Folge einer Reihe weiterer die Meßgenauigkeit beeinflussender Faktoren. Trotz dieser Unterschiede erscheint es in erster Näherung erlaubt,

vor allem auf Grund fehlender anderer Algorithmen, die Cramer'schen Gleichungen auch für Temperaturen kleiner 0°C anzuwenden. Der so analysierte Zusammenhang zwischen Temperaturmeßfehler und der Temperatur selbst könnte gegebenenfalls auch dazu verwendet werden, um in der routinemäßigen Anwendung eine empirische Konstantenkorrektur ohne Kenntnis der Feuchte abzuleiten.

5.2.3 Vernachlässigung des Vertikalwindes

Die scheinbare Schallgeschwindigkeit c_m , die mit dem Radar gemessen wird, ist gleich der Summe aus der „wahren“ Schallgeschwindigkeit c_a und der vertikalen Windgeschwindigkeit w .

$$c_m = c_a + w \quad (5.13)$$

Da insbesondere bei kurzen Mittelungszeiten (<60 min), wie bei der RASS-Messung allgemein üblich, signifikant von Null verschiedene Vertikalgeschwindigkeiten zu erwarten sind, ergibt sich bei Nichtberücksichtigung von w ein Temperaturfehler entsprechend

$$\Delta T_v = \frac{c_a + w}{200,97} w \quad (5.14)$$

Eine Vertikalgeschwindigkeit von lediglich 1 m/s (für konvektive Bedingungen ein realistischer Wert) führt bereits zu einem Temperaturmeßfehler von 1,7 K. Negative Vertikalgeschwindigkeiten (Absinkbewegung) haben eine scheinbar geringere Schallgeschwindigkeit und damit eine Unterbestimmung der virtuellen Temperatur, Aufwärtsbewegungen eine Überbestimmung zur Folge. Auf diesen nicht zu vernachlässigenden Einfluß der Vertikalbewegung wurde bereits durch May (1989) hingewiesen. Jedoch erst mit einer weiteren Leistungssteigerung der Rechentechnik und der nunmehr möglichen Fouriertransformation von 2048 Punkten waren die Voraussetzungen gegeben, die Schallgeschwindigkeit und die Windgeschwindigkeit simultan im Frequenzspektrum zu analysieren. Moran and Strauch (1994) wiesen nach, daß die Berücksichtigung der vertikalen Windgeschwindigkeit je nach synoptischer Situation zu einer Verbesserung der Meßgenauigkeit um 0,3 bis 0,8 K führt.

Abb. 5.8 vermittelt am Beispiel eines konvektiv geprägten Tages einen Eindruck von den in der konvektiven Grenzschicht vorkommenden Vertikalbewegungen und dem daraus für die RASS-Messung resultierenden Temperaturmeßfehler. In Höhen um 1000 m erreicht die Temperaturkorrektur Werte von etwa 4 K infolge eines mittleren (10 min) Vertikalwindes von

etwa 2,5 m/s. Bemerkenswert ist weiterhin, daß vertikale Strukturen im Profil der Temperaturkorrektur, die man eher als Meßfehler interpretieren würde, sich auch im unkorrigierten Temperaturprofil des RASS bzw. in dessen Abweichungen zum Radiosondenprofil abbilden (markante Strukturen sind jeweils mit Pfeilen gekennzeichnet). Dies kann als Hinweis auf die gute Qualität der Vertikalwindmessung des WPR/RASS interpretiert werden.

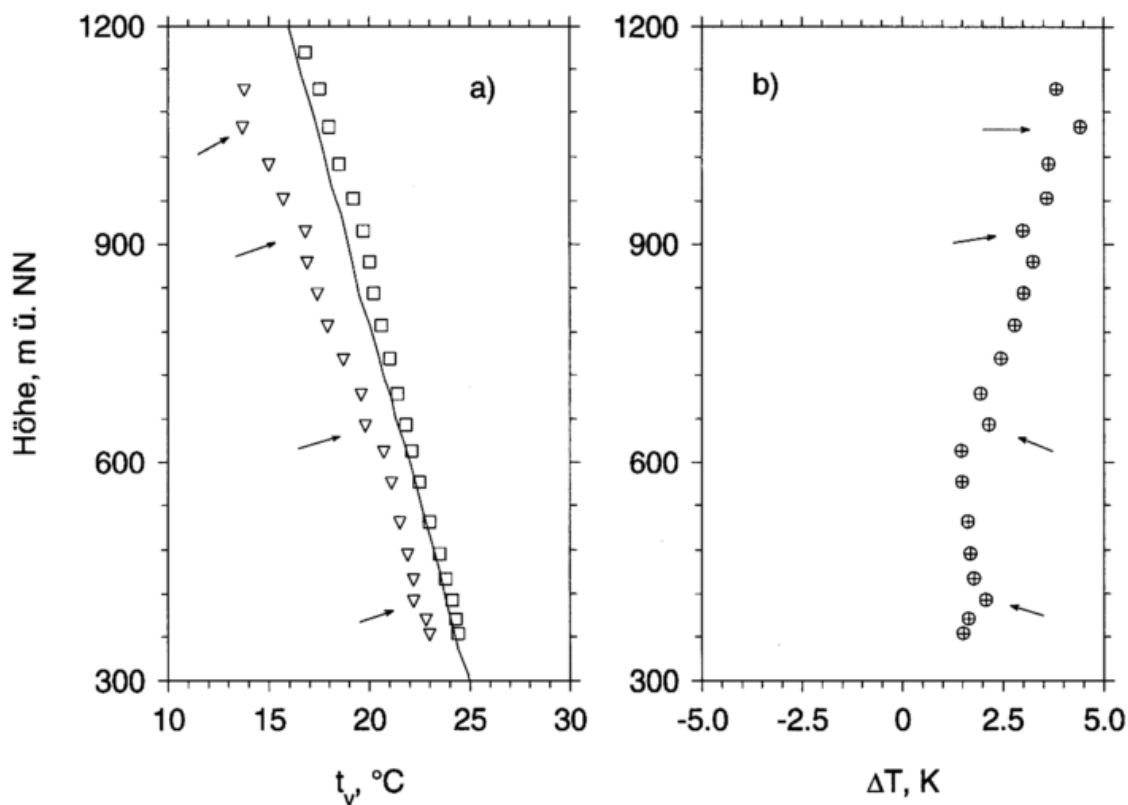


Abbildung 5.8: links: Vertikalprofile der virtuellen Temperatur, gemessen mit der Radiosonde (ausgezogene Linie) und dem LAP-RASS am 06.08.1995 um 12 UTC; Dreiecke: RASS-Temperatur nur mit Höhenkorrektur, Vierecke: RASS-Temperatur mit Höhen-, Vertikalwind- und Konstantenkorrektur. rechts: Vertikalprofil der aus dem Vertikalwind resultierenden Korrektur.

In der praktischen Anwendung der Vertikalgeschwindigkeitskorrektur muß berücksichtigt werden, daß bei UHF-Windprofilern im Falle von Niederschlag die Rayleigh-Streuung gegenüber der Bragg-Streuung dominiert (vgl. Abschnitt 2.1) und damit nicht der Wind sondern die Bewegung der Hydrometeore gemessen wird. Eine Vertikalgeschwindigkeitskorrektur würde in derartigen Situationen zu einer signifikanten Überschätzung der Temperatur führen. Deshalb erfordert die routinemäßige Anwendung der Vertikalwindkorrektur die automatische Erkennung von Niederschlag.

Verfahren zur Erkennung von Niederschlag bei WPR/RASS - Messungen

Ein wichtiges Kriterium für das Auftreten von Niederschlag stellt die Radialgeschwindigkeit dar. Bei Niederschlag ist sie immer positiv, d.h. zum Radar hingelerichtet. Allerdings ist dieses Kriterium nicht eindeutig, da es einen Übergangsbereich gibt, in dem bestimmte Magnituden in der Radialgeschwindigkeit sowohl durch den Vertikalwind als auch durch Niederschlag hervorgerufen werden können. Deshalb empfiehlt es sich als zusätzliches Kriterium die spektralen Momente (Rückstreuleistung, Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) und spektrale Breite) zu betrachten, da sich diese Werte bei Rayleigh-Streuung von denen unter Klarluftbedingungen (Bragg-Streuung) unterscheiden (Ralph, 1995).

Entsprechende Grenzwerte der Leistung, des SNR und der spektralen Breite wurden für das RASS des LAP auf der Grundlage eines einjährigen Datensatzes (August 1995 bis Juli 1996) von Momenten (Berücksichtigung von 4 Mittelungsintervallen pro Tag) und den visuellen Niederschlagsbeobachtungen der Wetterstation Lindenberg ermittelt (s.auch Klocke (1996)). Aus Gründen der Eindeutigkeit sind nur Fälle betrachtet worden, in denen entweder während des gesamten Mittelungszeitraums des RASS Niederschlag auftrat oder es trocken blieb. Die Ermittlung der Grenzwerte erfolgte in 2 Schritten. Im ersten Schritt wurde die lineare Regressionsgerade $y = ax + b$ für die Korrelogramme zwischen der aus dem Vertikalstrahl abgeleiteten Radialgeschwindigkeit des Vertikalbeams und den drei Parametern: Leistung P , Signal-Rausch-Verhältnis SNR und spektrale Breite spw berechnet. Ausgehend von diesen Regressionslinien wurde dann jeweils eine Konstante c so bestimmt, daß alle Punkte im Korrelogramm, bei denen Niederschlag auftrat, innerhalb der parallel zur Regressionsgeraden verlaufenden Linien $y = ax + b + c$ und $y = ax + b - c$ liegen. Im zweiten Schritt erfolgte für jeden Parameter die Ermittlung unterer und oberer Schranken derart, daß optimal zwischen Klarluftsituationen und Niederschlagsereignissen getrennt werden kann. Die Anwendung der so ermittelten und in Tabelle 5.1 angegebenen Parameter erlaubt die Erkennung von 95% aller Niederschlagsereignisse und 96% aller Klarluftsituationen.

Schneefallereignisse sind, auf Grund der deutlich geringeren Fallgeschwindigkeiten, wesentlich schwieriger von Klarluftsituationen zu unterscheiden. Werden die Parameter so optimiert, daß 95% aller Schneefallereignisse erkannt werden, so erfolgt die korrekte Selektion der Klarluftsituationen nur noch zu 79%. Dennoch bildet dieses Verfahren einen ersten Ansatz zur automatischen Erkennung von Niederschlag bei Windprofiler/RASS-Messungen und sollte an weiteren unabhängigen Datensätzen verifiziert werden.

| | Regen | | | Schnee | | |
|-----|--------------------------------|------------------------------|------------|--|------------------------------|-------------|
| | $vrad_{Min} = 0,5 \text{ m/s}$ | | | $vrad_{Min} = 0 \text{ m/s}, vrad_{Max} = 1,5 \text{ m/s}$ | | |
| | SNR | spw | power | SNR | spw | power |
| Min | -15 dB | $0,8 \text{ m}^2/\text{s}^2$ | 45 dB | -25 dB | $0,5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ | 35 dB |
| Max | - | - | - | - | $2 \text{ m}^2/\text{s}^2$ | 72 dB |
| a | 4,52 dBs/m | 0,33 m/s | 8,41 dBs/m | 19,74 dBs/m | - | 27,20 dBs/m |
| b | -4,05 dB | $0,8 \text{ m}^2/\text{s}^2$ | 34,34 dB | -17,38 dB | - | 30,99 dB |
| c | 15 dB | $1,1 \text{ m}^2/\text{s}^2$ | 27 dB | 25 dB | - | 22 dB |

Tabelle 5.1: Parameter der Regressionsgleichung $y = ax + b \pm c$ und entsprechende Grenzwerte zur Erkennung von Niederschlag bei Messungen mit dem 1290 MHz Windprofiler/RASS.

5.2.4 Vereinfachungen in der Beschreibung der Wechselwirkung von elektromagnetischen und akustischen Wellen

Im Abschnitt 2.1.4 wurde für bestimmte Voraussetzungen (Radar- und Schallantenne am selben Ort, kein Wind, keine Turbulenz) gezeigt, daß die Schallgeschwindigkeit genau dann aus der Dopplerfrequenz des rückgestreuten Signals abgeleitet werden kann, wenn die Bragg-Bedingung $2k_e = k_a$ bzw. $2\lambda_a = \lambda_e$ erfüllt ist. Auf Grund dieser Bedingung stellt die Ableitung der Schallgeschwindigkeit keine direkte Messung der Geschwindigkeit, sondern der akustischen Wellenlänge dar. Diese ergibt sich aus dem Abstand zweier Punkte gleicher Phase entlang des Radarstrahls (Peters and Angevine, 1996). Verschiedene Einflüsse wie Wind und Turbulenz können zu einer Verfälschung des gemessenen Abstandes führen. In der Literatur existieren mehrere Arbeiten (Lataitis, 1992, 1993; Peters et al., 1983) zur quantitativen Abschätzung des daraus resultierenden Temperaturmeßfehlers. Leider werden die einzelnen Fehlereinflüsse nur separat behandelt und es bleibt die Frage offen, wie sich die Kombination dieser Einflußgrößen auf die Temperaturmeßgenauigkeit auswirkt. Darüber hinaus beeinflussen die Konfigurationen von Radarantenne und Schallquelle bzw. deren Strahlbreiten den auf Wind und Turbulenz zurückzuführenden Temperaturmeßfehler. Bei einem monostatischen System (eine Radarantenne und eine oder mehrere Schallquellen) mit vergleichbaren Strahlbreiten ergibt sich nach Petenko (1997) nur ein vernachlässigbarer Einfluß der räumlichen Trennung von Schallquelle und Radarantenne sowie des Windes und der Turbulenz auf die Genauigkeit der RASS-Messung.

Zur Prüfung der Wirksamkeit der von Lataitis (1992) und Peters and Angevine (1996) vorgeschlagenen Korrekturen erfolgte eine Verifikation an einem dreimonatigen Datensatz (Abschnitt 5.3.1) wobei folgende Einteilung der Korrekturen gewählt wurde (Görsdorf, 1998):

- Korrektur infolge des Abstandes Schallquelle - Radarantenne (Lataitis, 1993),
- Korrektur infolge des Horizontalwindes (Lataitis, 1993; Peters et al., 1983),
- Korrektur infolge eines kombinierten Einflusses von Wind und Turbulenz (Lataitis, 1993),
- Korrektur infolge von Turbulenz (Peters and Angevine, 1996).

Die Algorithmen zur Berechnung dieser Korrekturen werden nachfolgend dargelegt. Im Abschnitt 5.3.1 wird anhand eines dreimonatigen Datensatzes gezeigt, daß der experimentelle Nachweis für die Berechtigung der Korrekturen nicht erbracht werden kann.

5.2.4.1 Nichtberücksichtigung der Systemgeometrie, d.h. des Abstandes zwischen (virtueller) Schallquelle und Vertikalachse der Radarantenne

Der Abstand von Radarantenne und Schallquelle führt zu einer größeren scheinbaren Wellenlänge entlang der Senkrechten der Radarantenne unter der Annahme, daß der Radarstrahl schmal im Vergleich zum Schallstrahl ist. Um dennoch die Bragg-Bedingung zu erfüllen, muß die akustische Frequenz erhöht werden. Daraus resultiert dann in jedem Falle eine Temperaturüberbestimmung durch das RASS, die nach Lataitis (1993) wie folgt ermittelt werden kann:

$$\Delta T_v = \frac{\rho_t^2}{r_0^2} T_v \quad (5.15)$$

worin ρ_t die horizontale Entfernung zwischen virtueller Schallquelle (Zentrum der Schallwellenfronten) und der vertikalen Achse der Radarantenne ist. Sie wurde in der vorliegenden Arbeit für jede Höhenstufe unter Verwendung des vertikalen Windprofils berechnet. Da mit der Höhe das Verhältnis r_0/ρ_t kleiner wird, tritt lediglich in den untersten Meßhöhen ein signifikanter Meßfehler auf.

5.2.4.2 Vernachlässigung des Horizontalwindes

Der Horizontalwind verursacht je nach Richtung relativ zum Abstandsvektor Radarantenne-Schallquelle eine Vergrößerung oder Reduzierung der gemessenen Schallwellenlänge und damit einen Temperaturfehler, der nach Lataitis (1993) folgendermaßen bestimmt werden kann:

$$\Delta T_v = -2 \frac{\vec{v}_H \vec{\rho}_t}{r_0 c_a} T_v \quad (5.16)$$

mit \vec{v}_H als Vektor der horizontalen Windgeschwindigkeit. Für das LAP-RASS, bei dem die Schallquelle vor jeder Messung immer windaufwärts zur Radarantenne gedreht wird, ergibt sich nur bei sehr schwachem Wind ein positiver Temperaturfehler in den unteren Höhen. In der Regel driftet der Schallkegel jedoch über die Radarantenne hinweg, woraus dann ein negativer Temperaturfehler resultiert.

5.2.4.3 Vernachlässigung des Horizontalwindes in Verbindung mit Turbulenz

Von Lataitis (1993) wurde auch eine Korrektur vorgeschlagen, die die Wirkung von Störungen entlang der akustischen Wellenfronten auf die gemessene Dopplerverschiebung berücksichtigt. Derartige Störungen werden durch Turbulenz hervorgerufen. Der daraus resultierende Fehler wird von Lataitis (1993) wie folgt abgeschätzt:

$$\Delta T_v = \frac{2\vec{\rho}_t \vec{v}}{c_a r [1 + 2\rho_0^2 / D_B^2]} T_v \quad (5.17)$$

D_B ist die Breite des Radarstrahls in der Höhe r_0 und \vec{v} ist die mittlere Windgeschwindigkeit entlang der gekrümmten akustischen Wellenfronten. Für \vec{v} wurde in den Rechnungen näherungsweise \vec{v}_H verwendet. Weiterhin ist ρ_0 die transversale Kohärenzlänge, welche aus dem Vertikalprofil der Strukturkonstanten abgeschätzt werden kann:

$$\rho_0 = (0,545 r k_a^2 c_{n_a}^2)^{-3/5} \quad (5.18)$$

Die Bestimmung der Strukturkonstante des akustischen Brechungsindex $c_{n_a}^2$ kann näherungsweise aus dem 2. Moment des Klarluftechos im Dopplerspektrum gemäß den Gleichungen (5.20) bis (5.25) erfolgen.

5.2.4.4 Vernachlässigung der Turbulenz

Peters and Angevine (1996) haben gezeigt, daß turbulente Störungen im Schallwellenfeld zu Interferenzen führen, die eine höhere Ausbreitungsgeschwindigkeit aufweisen als die akustische Phasengeschwindigkeit. Die daraus resultierende Temperaturüberschätzung durch das

RASS kann nach Peters and Angevine (1996) aus dem mittleren Strukturparameter des Brechungsindex $c_{n_a}^2$ abgeschätzt werden:

$$\Delta T_v = 0.483 r_0^{6/5} k_a^{2/5} (c_{n_a}^2)^{6/5} T_v \quad (5.19)$$

Der mittlere Wert für $c_{n_a}^2$ entlang des Radarstrahls kann berechnet werden mit

$$c_n^2 = \frac{8}{3} \int_0^1 c_{n_a}^2(r) \left(\frac{r}{r_0}\right)^{5/3} d\left(\frac{r}{r_0}\right) \quad (5.20)$$

$c_{n_a}^2$ an der Stelle r ergibt sich nach Tatarskii (1971) aus

$$c_{n_a}^2 = \frac{c_T^2}{4T^4} + \frac{c_v^2}{c^2} \quad (5.21)$$

In der konvektiven Grenzschicht gilt nach Richter (1993) folgende Approximation:

$$c_{n_a}^2 = \frac{c_v^2}{c^2} \quad (5.22)$$

c_v^2 kann schließlich gemäß Gossard et al. (1990) aus der Varianz der Schallgeschwindigkeit bzw. der spektralen Breite σ_w berechnet werden.

$$c_v^2 = 1,3 \left(\frac{1}{\delta}\right)^{2/3} \frac{\sigma_w^2}{\frac{15}{6} \Gamma \alpha^2 + \frac{3}{2} (2\pi)^{-2/3} \left(\frac{v_H t_d}{\delta}\right)^{2/3}} \quad (5.23)$$

Darin ist Γ die Gammafunktion und t_d die Länge der Zeitreihe, für die das Dopplerspektrum repräsentativ ist. Weiterhin sind

$$\left. \begin{aligned} \delta &= D_B/2 \\ h &= 1 - [2\Delta/D_B]^2 \\ \alpha^2 &= 1 - h/15 - h^2/105 - \dots \end{aligned} \right\} \text{für } \Delta \leq D_B/2 \quad (5.24)$$

und

$$\left. \begin{aligned} \delta &= \Delta \\ h &= 1 - [D_B/2/\Delta]^2 \\ \alpha^2 &= 1 - 4h/15 - 8h^2/105 - \dots \end{aligned} \right\} \text{für } \Delta > D_B/2 \quad (5.25)$$

Δ ist hierbei das halbe Höhenintervall.

5.2.5 Fehler der räumlichen und zeitlichen Zuordnung der Meßwerte

Jeder Meßwert ist festen räumlichen und zeitlichen Koordinaten zuzuordnen. Abweichungen vom „wahren“ Wert an diesem Punkt haben ihre Ursache entweder in der:

- jedem System eigenen Meßungenauigkeit oder in der
- ungenauen Bestimmung der räumlichen und zeitlichen Koordinaten.

Da atmosphärische Parameter eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität aufweisen, ist die genaue Bestimmung von Ort und Zeit der Messung sehr wichtig. Bei Vertikalprofilmessungen durch WPR/RASS spielt vor allem die genaue Bestimmung der Vertikalkoordinate, d.h. der Meßhöhe eine besondere Rolle, da die Temperatur mit der Höhe sehr variabel ist. Ungenauigkeiten in der Bestimmung der Meßhöhe Δr führen in Abhängigkeit vom Temperaturgradienten $\partial T_v / \partial r$ zu Temperaturabweichungen bezüglich der tatsächlich in der betreffenden Höhe zu erwartenden Temperatur.

$$\Delta T_v = \frac{\partial T_v}{\partial r} \Delta r \quad (5.26)$$

Für die fehlerhafte Höhenzuordnung hat sich in der Literatur der vereinfachte Begriff: Höhenfehler (range error) etabliert. Im weiteren sollen zwei verschiedene Ursachen für einen Höhenfehler unterschieden werden:

- Ein variabler Höhenfehler infolge der Höhenvariation der durch die akustischen Wellen hervorgerufenen Reflektivität.
- Ein konstanter Höhenfehler infolge der ungenauen Bestimmung des Systemdelays.

5.2.5.1 Variabler Höhenfehler infolge des Gradienten in der Reflektivität

Die vom RASS in einer diskreten Höhe (Höhentor) gemessene Temperatur repräsentiert einen über das Meßvolumen integrierten Wert, der mit der Höhengewichtsfunktion des Empfängers, der Antennengewichtsfunktion und dem Profil der Reflektivität gewichtet ist (Abb. 5.9).

Die zentrale Höhe eines Höhenintervalls entspricht nur dann der geometrischen Mitte r_0 dieses Höhenintervalls, wenn das Produkt aus Höhengewichtsfunktion und Reflektivität η_a

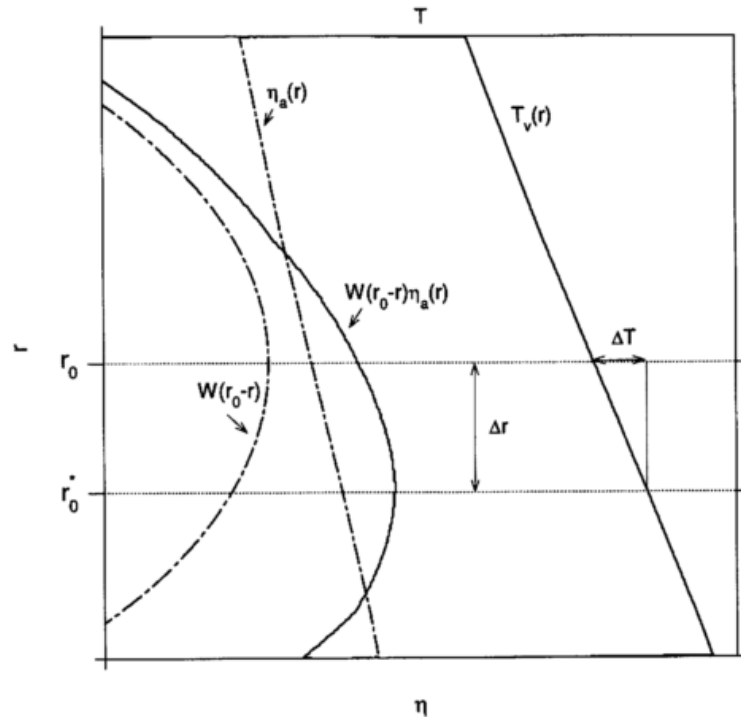


Abbildung 5.9: Schematische Beschreibung des variablen Höhenfehlers

symmetrisch um das geometrische Zentrum des Höhenintervalls, d.h. um r_0 , verteilt ist. Das trifft meist nicht zu, so daß das Zentrum des Höhenintervalls nach oben oder unten verschoben wird. Im allgemeinen nimmt die durch Schallwellen hervorgerufene Reflektivität mit der Höhe ab, da einerseits eine Schallschwächung mit zunehmender Entfernung von der Schallquelle auftritt, andererseits die Richtungen der akustischen und elektromagnetischen Wellenzahlvektoren zunehmend voneinander abweichen, womit die Reflexionsbedingung verletzt wird. Letzteres beeinflusst auch in den untersten Höhentoren den Verlauf der Reflektivität wesentlich. Außerdem spielt in diesen Höhen zusätzlich die Empfängererholzeit⁴ eine Rolle. Im Mittel ist deshalb ein rascher Anstieg der Reflektivität in den untersten Meßhöhen zu verzeichnen, während es oberhalb des Maximums allmählich abnimmt. Zur mathematischen Beschreibung dieses Effekts wird in erster Näherung eine von Doviak and Zrnica (1993) (S. 110) gegebene Gleichung zur Berechnung der radialen Windgeschwindigkeit auf die Ableitung der Temperatur angewendet. Dabei muß berücksichtigt werden, daß auf Grund der unterschiedlichen Streuprozesse, die der Wind- und Temperaturmessung zugrundeliegen, dieser Analogieschluß als heuristisches Modell zur mathematischen Beschreibung

⁴Da die hier behandelten Radargeräte ein und dieselbe Antenne für das Senden und das Empfangen nutzen, ist ein Umschalten zwischen Senden und Empfangen notwendig. Die Zeit, die der Empfänger nach dem Einschalten benötigt, um seine volle Empfangsleistung zu erreichen, wird als Empfängererholzeit (engl. receiver recovery) bezeichnet.

eines hypothetischen Effektes dient (analog zu (Angevine and Ecklund, 1994)). Tiefergehende theoretische Untersuchungen sind auf diesem Gebiet erforderlich. Die mittlere virtuelle Temperatur, die vom RASS am Höhentor r_0 gemessen wird, kann somit beschrieben werden durch:

$$\overline{T}_v(r_0) = \frac{\int_0^\infty T_v(r') |W(r_0 - r')|^2 \eta_a(r') dr'}{\int_0^\infty |W(r_0 - r')|^2 \eta_a(r') dr'} \quad (5.27)$$

Darin ist η_a die durch akustische Wellen erzeugte Reflektivität und $|W(r_0 - r')|^2$ die Höhengewichtsfunktion des Empfängers. Es muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß Gleichung 5.27 nicht im Ergebnis einer umfassenden Ableitung des zugrundeliegenden Streuprozesses ist, sondern als heuristisches Modell zur mathematischen Beschreibung des

Um einen Ausdruck für $T_v(r')$ zu finden, der in Beziehung zu $T_v(r_0)$ und zu $\frac{\partial T_v}{\partial r}$ steht, wird $T_v(r')$ in eine TAYLOR Reihe um r_0 entwickelt. Ausgehend davon, daß der Verlauf von T_v innerhalb des Intervalls $(r_0 - r, r_0 + r)$ in erster Näherung linear ist, wird die Reihe nach dem zweiten Glied abgebrochen.

$$T_v(r') = T_v(r_0) + \frac{\partial T_v}{\partial r} \Big|_{r_0} (r' - r_0) \quad (5.28)$$

Setzt man diesen Ausdruck in Gleichung 5.27 ein, so erhält man

$$\overline{T}_v(r_0) = \frac{\int_0^\infty T_v(r_0) |W(r_0 - r')|^2 \eta_a(r') dr'}{\int_0^\infty |W(r_0 - r')|^2 \eta_a(r') dr'} + \frac{\int_0^\infty \frac{\partial T_v}{\partial r} \Big|_{r_0} (r' - r_0) |W(r_0 - r')|^2 \eta_a(r') dr'}{\int_0^\infty |W(r_0 - r')|^2 \eta_a(r') dr'} \quad (5.29)$$

Unter Berücksichtigung der von r' unabhängigen Glieder läßt sich die Gleichung vereinfachen zu

$$\overline{T}_v(r_0) = T_v(r_0) + \frac{\partial T_v}{\partial r} \Big|_{r_0} \frac{\int_0^\infty (r' - r_0) |W(r_0 - r')|^2 \eta_a(r') dr'}{\int_0^\infty |W(r_0 - r')|^2 \eta_a(r') dr'} \quad (5.30)$$

und weiter zu

$$\overline{T}_v(r_0) = T_v(r_0) + \frac{\partial T_v}{\partial r} \Big|_{r_0} \left[\frac{\int_0^\infty r' |W(r_0 - r')|^2 \eta_a(r') dr'}{\int_0^\infty |W(r_0 - r')|^2 \eta_a(r') dr'} - r_0 \right] \quad (5.31)$$

Der erste Term in den eckigen Klammern entspricht dem ersten Moment der effektiven Höhengewichtsfunktion, d.h. dem Produkt aus Höhengewichtsfunktion und Reflektivität. Dieses ist gleich der Höhe r'_0 , der die gemessene Temperatur zuzuordnen ist. Daraus resultiert bezüglich der festen Höhenwerte für jedes Höhentor (wie es gewöhnlich in der Routine der Fall ist) ein Höhenfehler $\Delta r = r'_0 - r_0$ und letztlich ein Temperaturfehler ΔT .

Zur Berechnung dieses Höhenfehlers wurde durch Angevine and Ecklund (1994) in erster Näherung für die Reflektivität η_a das Signal-Rausch Verhältnis und eine kastenförmige Höhengewichtsfunktion W innerhalb des Höhenintervalls zugrunde gelegt. Für einen 915 MHz WPR/RASS mit einer vertikalen Auflösung von 100 m ergab sich danach ein Höhenfehler von maximal 10 m, wodurch sich lediglich Temperaturabweichungen zur Radiosonde in der Größenordnung von 0,1 K erklären lassen.

In Wirklichkeit wird die Höhengewichtsfunktion durch eine Faltung der Impulsantwort des Empfängers mit dem Sendeimpuls beschrieben. Für eine gaußförmige Übertragungsfunktion des Empfängers und einen rechteckigen Sendeimpuls ist die Höhengewichtsfunktion proportional der Impulsbreite und kann mit einer von Doviak and Zrnic (1993) (S.79) vorgeschlagenen Gleichung berechnet werden:

$$W(r) = \frac{1}{2} \operatorname{erf}[(2aB_6/c)(r_0 - r + c\tau/4)] - \operatorname{erf}[(2aB_6/c)(r_0 - r - c\tau/4)] \quad (5.32)$$

worin $a = \pi/2\sqrt{\ln 2}$ und B_6 gleich der 6 dB Empfängerbandbreite ($= 1/\tau$) ist. Messungen am Ausgang des Empfängers des TWP haben eine hinreichende Übereinstimmung mit der, in Abb. 5.10 dargestellten Form der Höhengewichtsfunktion ergeben.

Weiterhin muß berücksichtigt werden, daß die Reflektivität nur indirekt durch die am Ausgang des Empfängers gemessene rückgestreute Leistung P_a gemessen wird. P_a ist proportional dem Faltungsprodukt zwischen $\eta_a(r')$ und der quadrierten Höhengewichtsfunktion $|W(r_0 - r')|^2$ des Empfängers:

$$P(r_0) = C \int_0^\infty \eta_a(r') |W(r_0 - r')|^2 dr' \sim \eta_a \star W^2 \quad (5.33)$$

Darin faßt C die von der Höhe unabhängigen Radarparameter zusammen. Eine Entfaltung dieser Gleichung mittels Division der Fouriertransformierten von $P(r')$ durch die Fouriertransformierte von $|W(r_0 - r')|^2$ führt meistens (unter realen Bedingungen) zu nicht stabilen Lösungen (vgl. Jungnickel (1994), S.123), so daß von dieser Methode zur Bestimmung von η_a bei der Neuberechnung der Höhen Abstand genommen wurde.

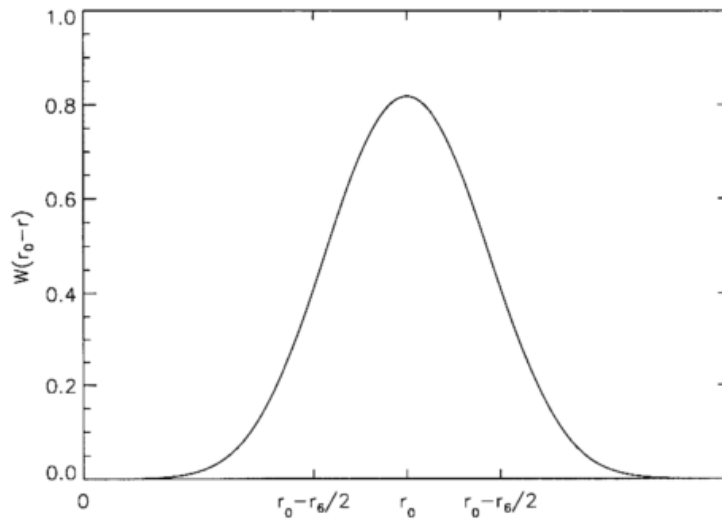


Abbildung 5.10: Höhengewichtsfunktion nach Gleichung 5.32. $r_0 - r_6/2$ und $r_0 + r_6/2$ geben die Grenzen des Höhenintervalls an.

Zur Berechnung der tatsächlichen Höhe r'_0 , aus der schwerpunktmäßig das Temperatursignal stammt, ist deshalb die folgende auf 5.31 basierende Gleichung genutzt worden:

$$r'_0 = \frac{\int_0^\infty r' |W(r_0 - r')|^2 \eta_a(r') dr'}{\int_0^\infty |W(r_0 - r')|^2 \eta_a(r') dr'} \quad (5.34)$$

Zur Abschätzung von η_a sind zwei Wege beschritten worden:

- Die Reflektivität η_a in Glg. (5.34) wurde durch die gemessene Rückstreuleistung $P_a(r')$ approximiert.

Es wird also in erster Näherung angenommen, daß der vertikale Verlauf der durch die akustischen Wellen hervorgerufenen Reflektivität η_a dem gemessenen Profil der Rückstreuleistung $P_a(r)$ am Ausgang des Empfängers entspricht. Diese Annahme ist insofern berechtigt, da die Faktoren im wesentlichen bekannt sind, die diesen, eher kontinuierlichen und glatten Verlauf bestimmen. Das kontinuierliche Profil $P_a(r')$ wurde durch lineare Interpolation zwischen benachbarten Höhentoren bestimmt.

- Der Verlauf von η_a wurde iterativ abgeschätzt. Dazu wird der Verlauf von η_a derart vorgegeben, daß nach der Faltung mit der Höhengewichtsfunktion das am Ausgang des Empfängers gemessene Profil der Rückstreuleistung $P_a(r_0)$ erhalten wird. Die Iteration wurde in folgenden Schritten durchgeführt:

1. η_a wird durch das gemessene und durch lineare Interpolation gewonnene kontinuierliche Profil von $P_a(r')$ ersetzt und anschließend mit $|W(r_0 - r)|^2$ durch numerische Integration für jedes Höhentor r_0 gefaltet. Dieses substituierte η_a soll im weiteren als $P_{i_1}(r')$ bezeichnet werden und damit die Rückstreuleistung am Eingang des Empfängers beschreiben. P_{i_1} stellt die erste Schätzung für das Eingangsprofil P_i dar und wird im Iterationsschritt 1 gleich P_a gesetzt.

$$P_{a_1}(r_0) = \int_0^\infty P_{i_1}(r') |W(r_0 - r')|^2 dr' \quad (5.35)$$

2. Berechnung der Differenz ΔP zwischen $P_{a_1}(r_0)$ und der tatsächlich gemessenen Rückstreuleistung $P_a(r_0)$.

$$\Delta P(r_0) = P_{a_1}(r_0) - P_a(r_0) \quad (5.36)$$

ΔP soll im nächsten Schritt dazu dienen, das geschätzte Eingangsprofil P_{i_1} zu korrigieren.

3. Konstruktion eines neuen Profils von $P_{i_2}(r_0)$ aus $P_{i_1}(r_0)$ und ΔP .

$$P_{i_2}(r_0) = P_{i_1}(r_0) - \Delta P(r_0) \quad (5.37)$$

$$\text{mit } P_{i_1} = P_a(r')$$

4. Wiederholung der Schritte 1 bis 3, so oft (k mal) bis ΔP , gemittelt über alle Höhen, einen Grenzwert unterschreitet. Es wird dann angenommen, daß $P_{i_{k-1}}(r_0)$ den Verlauf der Reflektivität mit ausreichender Genauigkeit approximiert.

$$\begin{aligned} P_{a_k}(r_0) &= \int_0^\infty P_{i_k}(r') |W(r_0 - r')|^2 dr' \\ \Delta P(r_0) &= P_{a_k}(r_0) - P_a(r_0) \\ P_{i_k}(r_0) &= P_{i_{k-1}}(r_0) - \Delta P(r_0) \end{aligned}$$

Die Anwendung dieses Iterationsverfahrens zeigte, daß ΔP rasch konvergiert und damit die Iteration bereits nach 2 Läufen abgebrochen werden konnte.

Abb. 5.11 zeigt auf der Grundlage einjähriger Meßreihen mit beiden Profilern die nach diesen beiden Verfahren berechneten Höhenkorrekturen bzgl. der für jedes Höhentor fixierten diskreten Höhe. Infolge der im Mittel zu beobachtenden Zunahme der Rückstreuleistung in den unteren Höhen stammt die gemessene Temperatur aus Höhen, die um bis zu 120 m über den mittleren Höhen r_0 der Tore liegen. Nach drei bis vier Höhentoren kehren sich mit dem Überschreiten des mittleren Rückstreumaximums die Verhältnisse um, d.h. die Temperaturen entstammen geringeren Höhen als angegeben. Das negative Maximum der Höhenkorrektur wird in der 6. bzw. 8. Höhenstufe erreicht, wo der Gradient der Rückstreuleistung am größten ist. Mit weiter zunehmender Höhe reduziert sich der Betrag der Höhenkorrektur auf ca. -10 m für den TWP und auf nahe 0 m für den LAP. Die geringere Höhenkorrektur beim LAP ist auf die höhere vertikale Auflösung zurückzuführen, d.h., je höher die vertikale Auflösung ist desto geringer fällt die Höhenkorrektur aus. Wie jedoch im Kapitel 2 bereits erwähnt, vergrößert sich mit zunehmender Auflösung⁵ die Bandbreite des Pulses. Dieses Ergebnis unterscheidet sich von den in Angevine and Ecklund (1994) berechneten Korrekturwerten um eine Größenordnung, so daß die von Angevine et al. (1998) vorgeschlagene Vernachlässigung der Höhenkorrektur nicht richtig ist.

Bei Verwendung der iterativ abgeschätzten Reflektivität fallen die Höhenkorrekturen im Bereich der Maxima nochmals um 20 m bzw. 10 m größer aus als bei der näherungsweise Approximation von η_a durch die Rückstreuleistung P_a . Wie stark sich diese Höhenkorrekturen auf die Temperaturmeßgenauigkeit des RASS auswirken, wird im Abschnitt 5.3.2 anhand eines einjährigen Datensatzes untersucht. Im folgenden Abschnitt wird nun anhand von Vergleichsexperimenten mit Fesselsonden der Nachweis des Zusammenhangs zwischen dem Verlauf der Rückstreuleistung und den Temperaturabweichungen bzw. dem daraus resultierenden Höhenfehler erbracht.

5.2.5.2 Experimentelle Bestätigung des variablen Höhenfehlers

Zur Untersuchung des RASS Temperaturfehlers insbesondere in den unteren Meßhöhen wurde im September 1997 an mehreren Tagen ein spezielles Experiment durchgeführt, das Aufschluß geben sollte über die Abhängigkeit des Temperaturmeßfehlers in den unteren Höhen vom Abstand der akustischen Quelle zur Radarantenne und in Abhängigkeit von der Pulslänge. Dabei konnte die besondere technische Eigenschaft des LAP genutzt werden, wonach die auf einem Drehgestell montierte Schallquelle radial in ihrem Abstand zur Radarantenne variiert werden kann. Als Referenz für die vom RASS gemessenen Temperaturen dienten neben der routinemäßig durchgeführten Radiosondierung außerdem 6 Fesselsonden, die in

⁵was durch eine kürzere Pulslänge erreicht wird

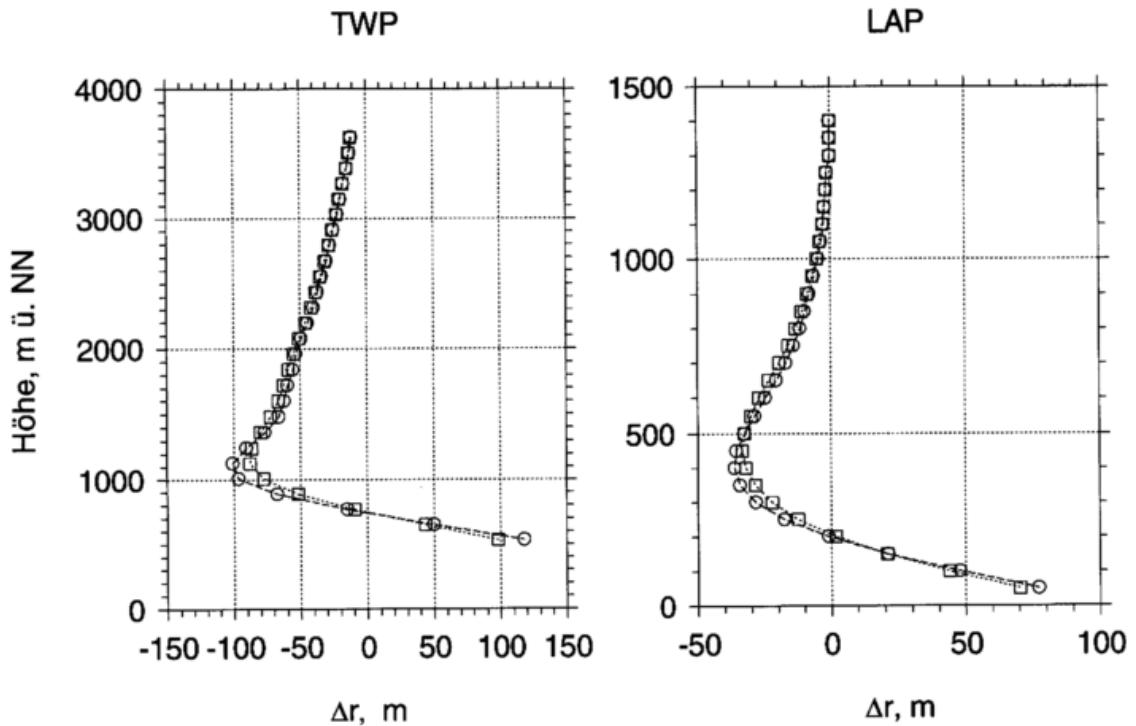


Abbildung 5.11: Mittlere Höhenkorrektur infolge der Wichtung der Temperatur mit der Reflektivität für beide WPR/RASS für eine einjährige Meßreihe (1997); Vierecke: Approximation von η_a durch die Rückstreuleistung P_a , Kreise: Bestimmung von η_a durch Iteration (Entfaltung der Rückstreuleistung).

einem Abstand von 50 m am Halteseil eines 9 m^3 Fesselballons befestigt waren. Dadurch war es möglich, Variationen im Temperaturprofil mit hoher zeitlicher Auflösung zu erfassen.

Experiment am 25.09.1997: Im ersten Experiment am 25.09.1997 in der Zeit von 17.00 bis 17.30 UT erfolgte die Untersuchung des Temperaturmeßfehlers in Abhängigkeit vom Abstand Schallquelle - Radarantenne. Die meteorologischen Bedingungen waren zu dieser Zeit durch 2/8 bis 3/8 Ci gekennzeichnet. Die während des Tages schwach ausgeprägte Konvektion war in ihrer Intensität bereits stark reduziert, die mittlere Windgeschwindigkeit betrug ca. 1 m/s am Boden und ca. 5 m/s in 500 m. Die Schallquelle wurde im Luv der Radarantenne positioniert und in ihrem Abstand zur Radarantenne in drei Stufen geändert. Nach 10 Einzelmessungen ist ein Mittelwert von der virtuellen Temperatur und dem Signal-Rausch Verhältnis nach dem Konsensus-Verfahren (vgl. Abschnitt 2.3.2.1) berechnet worden. Abb. 5.12 (linke Grafik) zeigt die vom RASS für drei verschiedene Abstände gemessenen Vertikalprofile der virtuellen Temperatur im Vergleich zum Temperaturprofil der Radiosonde und der Fesselsonden.

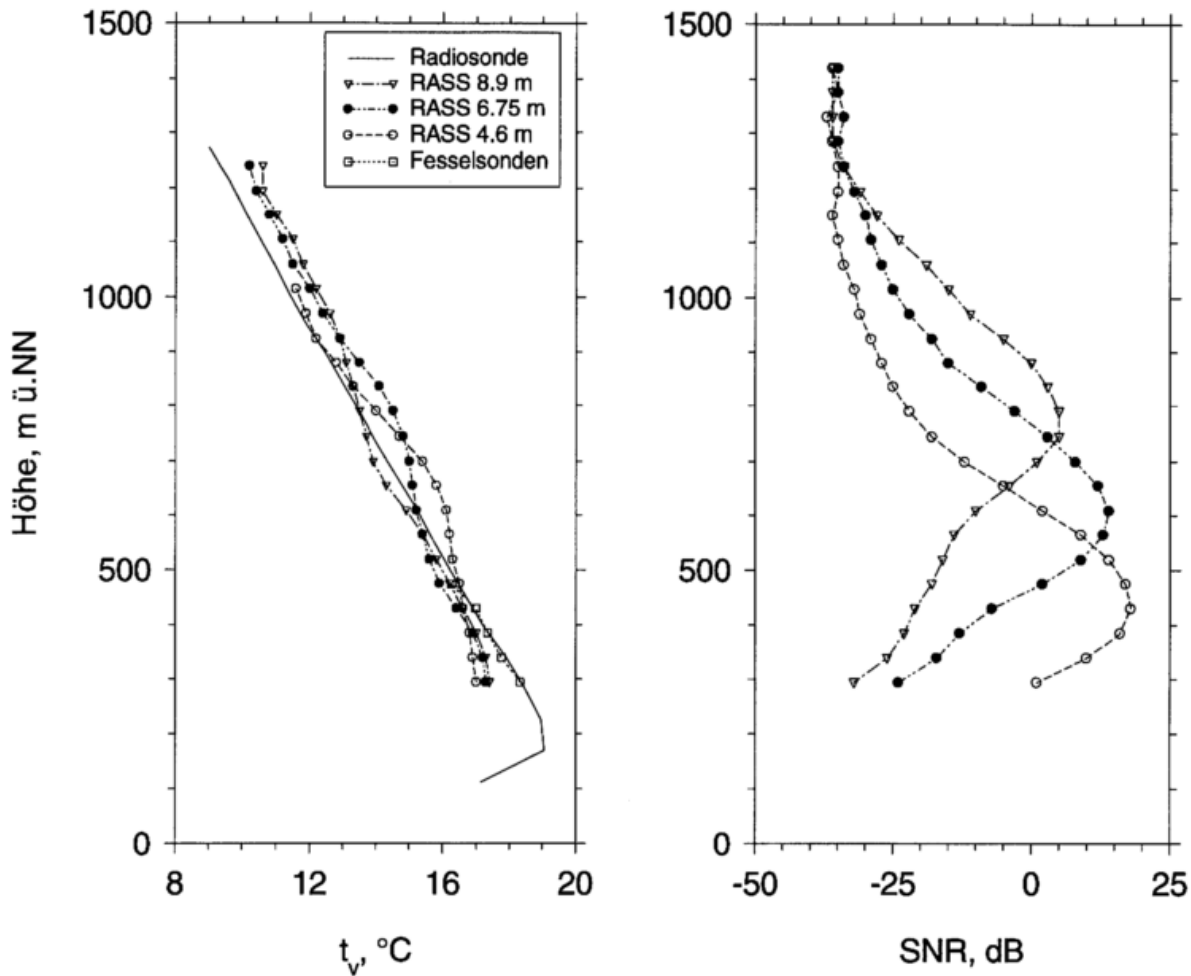


Abbildung 5.12: RASS Temperaturprofile (links) im Vergleich zu gleichzeitig gemessenen Profilen der Radiosonde und der Fesselsonden sowie die entsprechenden Vertikalprofile des SNR (rechts) für verschiedene Abstände der Schallquelle von der Radarantenne. Gemessen am 25.09.1997 in der Zeit zwischen 17.00 und 17.30 UT.

Da während des für die Messungen relevanten Zeitraums keine zeitliche Temperaturänderung auftrat, ist nur ein Fesselsondenprofil dargestellt. Es stimmt mit dem etwa 30 min zuvor gemessenen Radiosondenprofil ausgezeichnet überein. In der rechten Grafik derselben Abbildung sind die entsprechenden Profile des SNR (entspricht der Rückstreuleistung $P_a(r')$) dargestellt. Es ist sofort erkennbar, daß die Änderung des Abstandes Schallquelle - Radarantenne unterschiedliche Verläufe des SNR nach sich zieht. Je größer die Entfernung zwischen Schallquelle und Radarantenne, in desto größeren Höhen tritt das Maximum des SNR auf. Die Ursache dafür ist, daß der Fokus der virtuellen Schallquelle mit dem Wind über die Radarantenne driftet. Ist der Fokus des Schallkegels der Senkrechten der Radarantenne am nächsten (optimale Höhe) wird das SNR-Maximum erreicht. Bei einer Schallquelle, die sich windaufwärts zur Radarantenne befindet, verschiebt sich die optimale Höhe

mit zunehmendem Abstand der beiden Antennen nach oben. Die vom RASS gemessenen Temperaturprofile bzw. die entsprechenden Abweichungen zum Radiosondenprofil stehen im engen Zusammenhang mit dem SNR-Profil. In Höhen mit positiven SNR-Gradienten unterschätzt das RASS die Temperatur (im Vergleich zur Radiosonde), in Höhen mit negativen Gradienten überschätzt es die Temperatur. Dort, wo der Gradient des SNR verschwindet, stimmen die vom RASS und der Radiosonde gemessenen Temperaturen am besten überein.

Der Abstand der Schallquelle von der Radarantenne beeinflusst also den Temperaturmeßfehler des RASS erheblich durch die daraus resultierenden Variationen des SNR-Profiles. Dabei sind sowohl die Bereiche unterhalb als auch oberhalb des SNR-Maximums von diesem Fehler betroffen. Die Ergebnisse zeigen eindeutig, daß die vom RASS gemessenen Temperaturen mit dem Profil des Produkts aus SNR und Gewichtsfunktion gewichtete Mittelwerte darstellen. Bei positiven Gradienten des SNR tragen höhere Schichten mehr zur mittleren Temperatur eines Höhentors bei als niedrigere Schichten. In Abhängigkeit vom Temperaturgradienten resultiert daraus ein positiver oder negativer Temperaturmeßfehler, wenn die geometrische Höhe eines Höhentores fixiert ist (vgl. auch Gleichung (5.26)).

Experiment am 18.09.1997: Ein Fehler in der Höhenzuordnung infolge der Variabilität im Profil der Reflektivität wird sich umso stärker auswirken, je größer das Höhenintervall bzw. je größer die Pulslänge ist.

Am 25.09.1998 wurden dazu in der Zeit von 14.45 UT bis 15.15 UT RASS Messungen mit unterschiedlichen Pulslängen durchgeführt. Die Auswahl des Meßtages erfolgte unter Berücksichtigung der meteorologischen Bedingungen. Diese waren an diesem Tag durch 8/8 mittelhohe Bewölkung bei schwachem Wind (kleiner 5 m/s) gekennzeichnet. Konvektion als zusätzliche Fehlerursache der RASS Messung trat auf Grund der stark gedämpften Einstrahlung nicht auf. Abb. 5.13 zeigt die RASS Temperaturprofile im Vergleich zu den gleichzeitig gemessenen Profilen der Fesselsonden.

Die Temperaturabweichungen sind umso ausgeprägter, je größer die Pulslänge ist. Für einen 1400 ns - Puls (das entspricht einer vertikalen Auflösung von 200 m) beträgt die Abweichung ca. -0,8 K in der unteren Meßhöhe und +0,6 K in der oberen noch vergleichbaren Höhe. Der vom RASS wiedergegebene Temperaturgradient wird also im dargestellten Höhenbereich um etwa 0,7 K/100 m unterschätzt. Bei einer Pulslänge von 700 ns (100 m) liegt die Gradientenschätzung bei ca. 0,5 K/100 m und bei 300 ns (50 m) bei 0,2 K/100 m.

Die dazugehörigen SNR-Profile zeigen in Abhängigkeit von der Pulslänge einen sehr unterschiedlichen Verlauf. Erkennbar ist ein Zusammenhang zwischen dem positiven Gradienten im SNR-Profil in den unteren Höhentoren und den Temperaturdifferenzen.

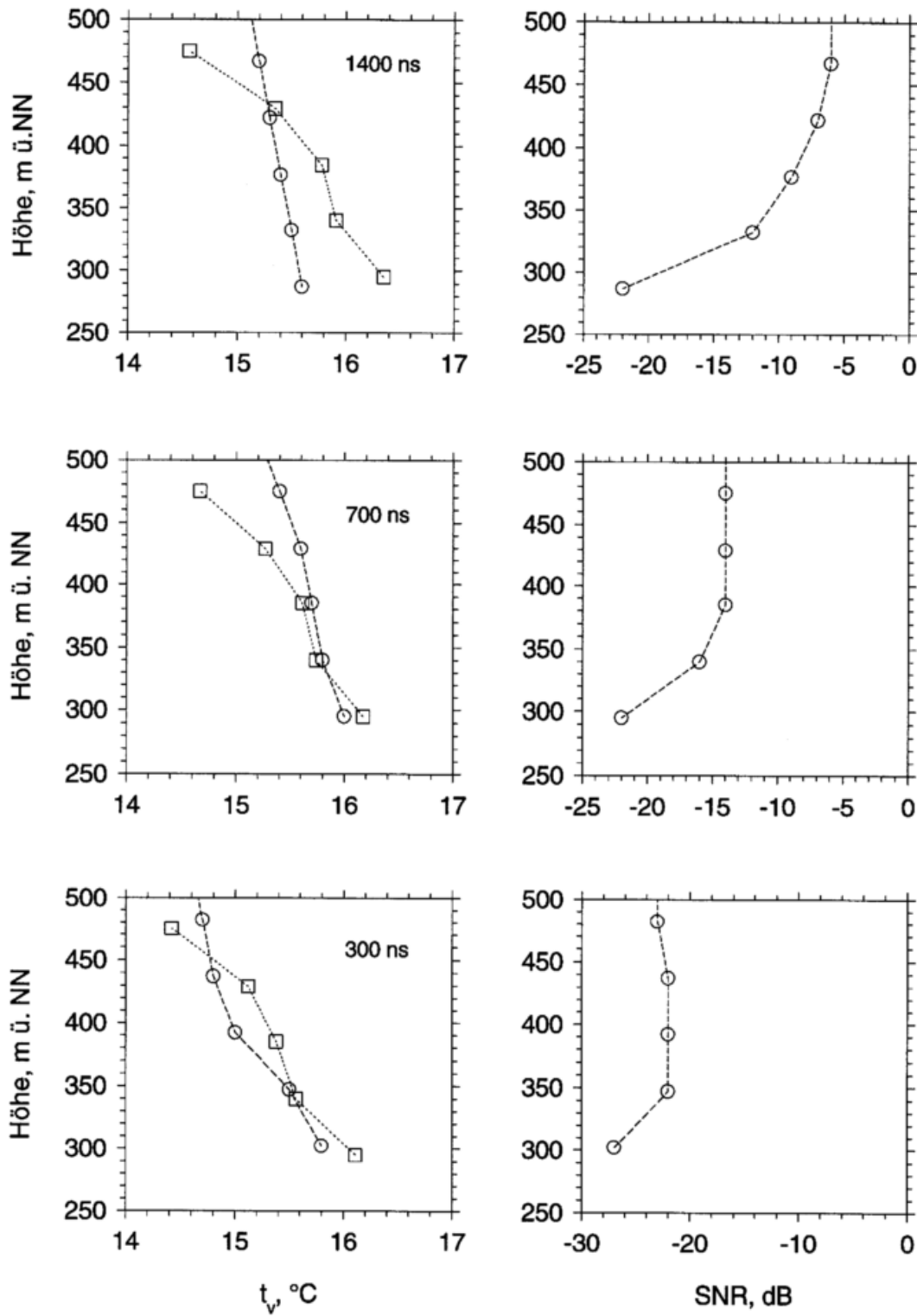


Abbildung 5.13: RASS Temperaturprofile (links, Kreise) und die entsprechenden Profile des SNR für verschiedene Pulslängen (rechts) im Vergleich zu gleichzeitig gemessenen Temperaturprofilen eines Fesselondenssystems (Vierecke) am 18.09. 1997.

5.2.5.3 Konstanter Höhenfehler

Die zentrale Höhe eines Höhenintervalls ist definiert als

$$r_0 = \frac{(\tau - \tau_s)c}{2} \quad (5.38)$$

Eine ungenaue Systemlaufzeit τ_s (engl. „system delay“) kann deshalb ebenfalls die Ursache für einen Höhenfehler sein. Die genaue Bestimmung von τ_s ist eine notwendige Aufgabe zur Kalibrierung eines Radars und wird häufig durch das Einkoppeln eines Sendesignals in den Empfänger über eine definierte Verzögerungsleitung zwischen Senderausgang und Empfängereingang realisiert. Die Zeit, die vom Aussenden bis zum Empfangen des Signals verringert um die Laufzeit in der Verzögerungsleitung vergeht, wird als Systemlaufzeit bezeichnet und entspricht der Laufzeit des Signals innerhalb der Systemkomponenten. Die Genauigkeit dieser Methode ist jedoch begrenzt, u.a. auch deshalb, weil die Verzögerung in der Antennenanlage und deren Zuleitungen durch einen theoretischen Wert berücksichtigt wird. Deshalb wurden die für die Lindenberger Systeme bestimmten Systemlaufzeiten anhand statistischer Ergebnisse des Vergleichs RASS - Radiosonde geprüft.

Zur Analyse eines eventuell vorhandenen Höhenfehlers sind die Vergleiche zwischen dem RASS und der Radiosonde für verschiedene Offsets der Meßhöhen des RASS wiederholt gerechnet worden. Als Kriterium für die beste Übereinstimmung wurde die über alle Höhen gemittelte Standardabweichung der Differenzen genutzt. Diese Standardabweichung beschreibt den zufälligen Fehler der Messungen (beider Meßsysteme) und die durch die Variabilität der Atmosphäre hervorgerufenen Differenzen. Der zufällige Fehler ist die Summe aller zufälligen Fehleranteile und hat einen unteren Grenzwert von Null. D.h. die Reduzierung eines Fehleranteils sollte zu einer Reduzierung der Standardabweichung führen. Durch Änderungen der diskreten Meßhöhe des RASS kann der auf einen Höhenfehler zurückzuführende Meßfehler variiert werden.

Abb. 5.14 zeigt die über den gesamten Höhenbereich gemittelte Standardabweichung und den Bias der Temperaturdifferenzen zwischen RASS- und Radiosondenmessungen in Abhängigkeit von der Höhenverschiebung für beide WPR/RASS. Der Auswertung liegen Messungen des gesamten Jahres 1997 zugrunde, wobei die RASS-Temperaturen hinsichtlich der Vertikalgeschwindigkeit des Windes und der „Konstanten“ bei der Ableitung der virtuellen Temperatur sowie hinsichtlich der Höhenzuordnung (range correction) korrigiert wurden.

Klar erkennbar sind Minima in der Standardabweichung bei einer Höhenverschiebung von -30 m beim TWP und von -20 m beim LAP. Für diese Höhenverschiebungen verringert

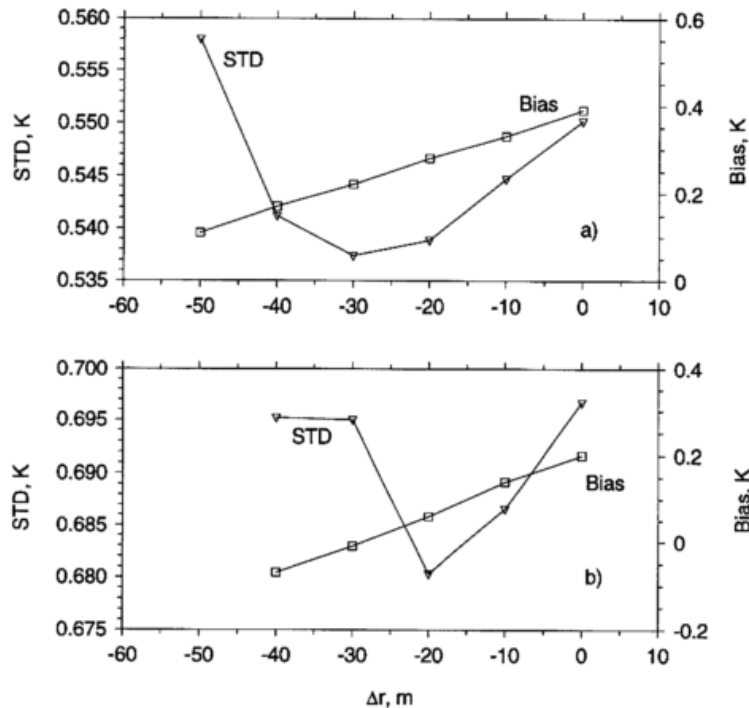


Abbildung 5.14: Standardabweichung (STD) und Bias des Vergleichs RASS - Radiosonde, gemittelt über ein Jahr (1997) und über den gesamten Höhenbereich in Abhängigkeit von der Höhenverschiebung. a) TWP, b) LAP.

sich außerdem der mittlere Bias bei beiden Systemen um etwa 0,15 K. Diese konstanten Höhenkorrekturen wurden bei allen weiteren Auswertungen, insbesondere bei der Verifikation der einzelnen Korrekturen berücksichtigt.

5.3 Verifikation der Korrekturen durch Vergleiche mit Radiosondenmessungen

In den vorangegangenen Abschnitten sind eine Reihe von Korrekturen betrachtet worden, deren Anwendung im Vergleich zu den bislang in der Routineauswertung verwendeten Gleichungen notwendig erscheint, um die Genauigkeit der RASS-Temperaturmessung wesentlich zu verbessern. Allerdings beruhen fast alle diese Korrekturen auf gewissen Voraussetzungen bzw. Annahmen, so daß die erwartete Steigerung in der Meßgenauigkeit erst an einem größeren Datensatz statistisch nachgewiesen werden muß. Dieser Nachweis läßt sich aus schon genannten Gründen am besten durch Vergleiche mit Radiosondierungen erbringen.

Nachfolgend werden die Verifikationsergebnisse anhand von zwei Datensätzen betrachtet,

die die zeitliche Entwicklung der RASS-Korrekturen widerspiegeln. Außerdem wird durch diese Verifikationen erstmals die Wirkung verschiedener Korrekturen in ihrer Gesamtheit betrachtet.

5.3.1 Datensatz 1: August bis Oktober 1995

Der **erste Datensatz** umfaßt Messungen des LAP im Zeitraum von August 1995 bis Oktober 1995 und 172 Vergleiche mit Radiosondierungen. An ihm wurde die Wirkung der folgenden bisher bekannter Korrekturen überprüft:

- **Höhen-Korrektur** nach Angevine and Ecklund (1994)
Diese Korrektur entspricht der im Abschnitt (5.2.5.1) beschriebenen Höhenkorrektur, jedoch mit den in Angevine and Ecklund (1994) vorgenommenen Vereinfachungen (Kastengewichtsfunktion innerhalb des Höhenintervalls)
- **Vertikalwind-Korrektur** entsprechend Abschnitt 5.2.3
- **Konstanten-Korrektur** nach Angevine and Ecklund (1994)
- **Distanz-Korrektur** entsprechend Abschnitt 5.2.4.1
- **Horizontalwind-Korrektur** entsprechend Abschnitt 5.2.4.2
- **Wind- und Turbulenz-Korrektur** entsprechend Abschnitt 5.2.4.3
- **Turbulenz-Korrektur** entsprechend Abschnitt 5.2.4.4

Zur Beurteilung der Meßgenauigkeit wurde unter sukzessiver Berücksichtigung jeder einzelnen Korrektur die RASS Temperatur aus den Momentdaten neu berechnet. Dabei sind nur niederschlagsfreie Situationen berücksichtigt worden, so daß die gemessene Vertikalbewegung nicht durch die fallenden Hydrometeore verfälscht wird. Als Kriterien für die Wirksamkeit der einzelnen Korrekturen diente zum einen die Änderung der Standardabweichung der Differenzen zwischen den virtuellen Temperaturen des RASS und der Radiosonde und zum anderen die Auswirkung auf den Bias (mittlere Differenz) zwischen RASS und Radiosonde. Die Änderung des Bias ist identisch mit dem mittleren Vertikalprofil der Korrekturwerte. Hierbei sind jedoch alle Korrekturen in ihrer Gesamtheit zu betrachten, da einzelne Korrekturen durchaus zu einer Vergrößerung des Bias führen können, ohne daß auf die Wirksamkeit der Korrektur geschlossen werden kann. Abb. 5.15 zeigt die mittleren Werte der einzelnen Korrekturen und deren Standardabweichung, berechnet für den gesamten Datensatz.

Die **Vertikalwind-Korrektur** ist positiv und wächst von 0,1 K in den unteren Höhen auf bis zu 0,6 K in den oberen Höhen. Das bedeutet, daß die mittlere Vertikalgeschwindigkeit während des betrachteten Zeitraums deutlich abwärts gerichtet ist, was überrascht, da aus Kontinuitätsgründen über einen längeren Zeitraum die Vertikalgeschwindigkeit gleich Null sein sollte. Dieses Verhalten der mit dem WPR gemessenen Vertikalgeschwindigkeit trat auch beim Vergleich mit Sodarmessungen auf (Beyrich et al., 1998): Die vom Windprofiler gemessene Vertikalgeschwindigkeit war im Gegensatz zu der Vertikalgeschwindigkeit aus Sodar Messungen abwärts gerichtet. Eine mögliche Erklärung wurde zunächst im Meßprinzip bzw. dem Auswerteverfahren in Verbindung mit der unterschiedlichen Größe von Aufwind- und Abwindgebieten gesucht. Auf Grund der kleineren Aufwindzonen im Vergleich zu den großflächigeren Abwindgebieten sind positive Vertikalgeschwindigkeiten innerhalb eines Mittelungszeitraums (hier 10 min) seltener vertreten als negative Werte. Bei der Mittelwertbildung nach dem Konsensusverfahren (vgl. Abschnitt 2.3.2.1) könnten dann aufwärts gerichtete Werte häufiger als Ausreißer eliminiert worden sein. Eine andere Erklärung wurde später in Angevine (1997) gegeben, wonach fallende Partikel (Aerosolteilchen) eine Ursache für negative Vertikalwindgeschwindigkeiten sein könnten. Andere mögliche Ursachen für einen Bias in der Vertikalgeschwindigkeit sind Ungenauigkeiten in der Strahlneigung.

Unabhängig von der Realität der mittleren Werte der Vertikalgeschwindigkeit wird durch die Anwendung dieser Korrektur eine signifikante Reduktion der Standardabweichung, d.h. des zufälligen Fehlers der RASS-Messung um bis zu 0,4 K erreicht (Abb. 5.16). Die bereits in der Literatur hervorgehobene Notwendigkeit dieser Korrektur zur Verbesserung der Meßgenauigkeit wird damit eindeutig bestätigt. Die routinemäßige Anwendung setzt allerdings die bereits diskutierte automatische Erkennung von Niederschlag voraus.

Die **Konstanten-Korrektur** für die Herleitung der virtuellen Temperatur weist mittlere Werte von -0,3 K bis -0,4 K auf. Die Standardabweichung dieser Korrektur ist mit 0,1 K relativ gering, so daß diese Korrektur zwar einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung der mittleren Temperaturabweichung im Vergleich zur Radiosonde leistet, sich jedoch unerheblich auf die Verminderung des zufälligen Meßfehlers auswirkt. An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, daß für die Verifikation des Datensatzes 1 die Konstanten-Korrektur entsprechend dem in Angevine and Ecklund (1994) vorgeschlagenen Verfahren berechnet wurde. Wie im Abschnitt 5.2.2.2 bereits erwähnt, führt die darin nicht korrekte Anwendung der Cramer'schen Gleichungen (Cramer, 1993) zu einer Überschätzung des „Konstanten“-Einflusses um etwa 0,15 K. Die tatsächlichen Werte liegen jedoch im Bereich von -0,15 K bis 0,25 K.

Die **Distanz-Korrektur** ist in der untersten Meßhöhe mit fast -0,4 K am größten, nimmt mit zunehmender Höhe schnell ab und bereits ab der vierten Höhenstufe (300 m) ist der

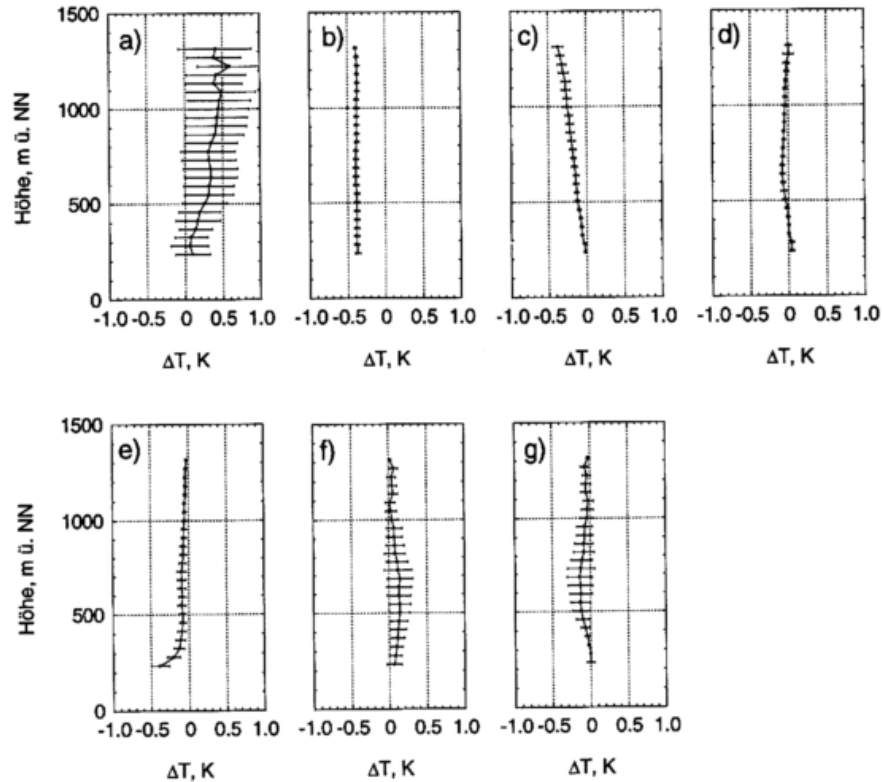


Abbildung 5.15: Mittlere Werte und Standardabweichung für folgende Korrekturen: a) Vertikalgeschwindigkeit, b) Genauere Konstanten, c) Turbulenz, d) Höhenfehler, e) Abstand zwischen Radarantenne und Schallquelle, f) Horizontalwind, g) Turbulenz/Wind.

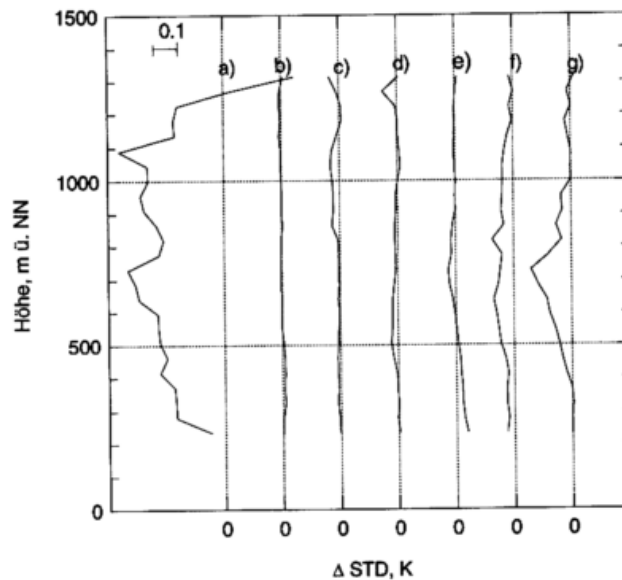


Abbildung 5.16: Änderungen der Standardabweichung zwischen den virtuellen Temperaturen des RASS und der Radiosonde für jede einzelne der in Abb. 5.15 gezeigten Korrekturen.

Betrag kleiner 0,2 K. Die Variabilität dieser Korrektur bleibt mit einer Standardabweichung von maximal 0,15 K recht niedrig. Für den zufälligen Temperaturmeßfehler des RASS bleibt diese Korrektur wirkungslos.

Die mittlere **Horizontalwind-Korrektur** ist über den gesamten Höhenbereich positiv mit einem Maximum von 0,2 K in 700 m. Positive Korrekturwerte zeigen an, daß sich die virtuelle Schallquelle im Mittel bereits auf der windabgewandten Seite der Antenne befindet. Die relativ große Standardabweichung dieser Korrektur wird verursacht durch große Korrekturwerte in Situationen mit hohen Windgeschwindigkeiten. Derartige Situationen tragen dazu bei, daß im Höhenbereich zwischen 500 m und 1000 m eine Reduzierung der Standardabweichung der Differenzen zur Radiosonde um bis zu 0,09 K zu verzeichnen ist. Die Abnahme der Korrekturwerte oberhalb des Maximums in ca. 700 m ist darauf zurückzuführen, daß bei hohen Windgeschwindigkeiten mit entsprechend großen Korrekturwerten die maximale Meßhöhe stark reduziert ist.

Die mittleren **Wind- und Turbulenz-Korrekturen** variieren zwischen 0 K in den untersten Höhen und -0,2 K in mittleren Höhen. Mit Ausnahme der unteren Höhen sind die Korrekturbeträge denen der Horizontalwindkorrektur bei entgegengesetztem Vorzeichen nahezu gleich, da der Term ρ_0^2/D_B^2 aus Gleichung (5.17) mit zunehmender Höhe gegen Null strebt. In Situationen mit Windgeschwindigkeiten $> 20 \text{ m/s}$ unterscheiden sich jedoch die Werte der Wind- und Wind/Turbulenzkorrektur um etwa 1 K. Die Standardabweichung der Temperaturdifferenzen reduziert sich um bis zu 0,15 K.

Die **Turbulenz-Korrektur nach Peters and Angevine (1996)** liegt im untersten Höhengniveau bei 0 K und wächst allmählich auf -0,4 K in 1300 m bei einer allgemein geringen Schwankungsbreite. Eine signifikante Änderung des zufälligen Temperaturmeßfehlers ist nicht zu verzeichnen.

Abb. 5.17 zeigt den mittleren Bias der RASS-Temperaturen unkorrigiert und nach Anwendung **aller Korrekturen** sowie die entsprechenden Standardabweichungen für die gesamten 172 Vergleiche. Der Bias hat sich über den gesamten Höhenbereich um ca. 0,4 K zu tieferen Temperaturen hin verschoben. Oberhalb 500 m reduzierte sich dadurch zwar der Betrag der Abweichung auf kleiner 0,2 K, in den darunterliegenden Höhen ist jedoch eine Zunahme auf bis zu -0,8 K festzustellen. Da trotz Berücksichtigung aller gegenwärtig bekannten Korrekturen die Unterschätzung des Temperaturgradienten durch das RASS in den unteren Meßhöhen erhalten bleibt, muß vermutet werden, daß die realen Verhältnisse bei der RASS-Messung durch die vorgeschlagenen Korrekturen nicht exakt genug wiedergegeben werden. Die Standardabweichung verringerte sich um ca. 0,2 K nahezu gleichmäßig über alle Höhen auf etwa 0,5 K und ist in erster Linie auf die Vertikalwind-Korrektur zurückzuführen.

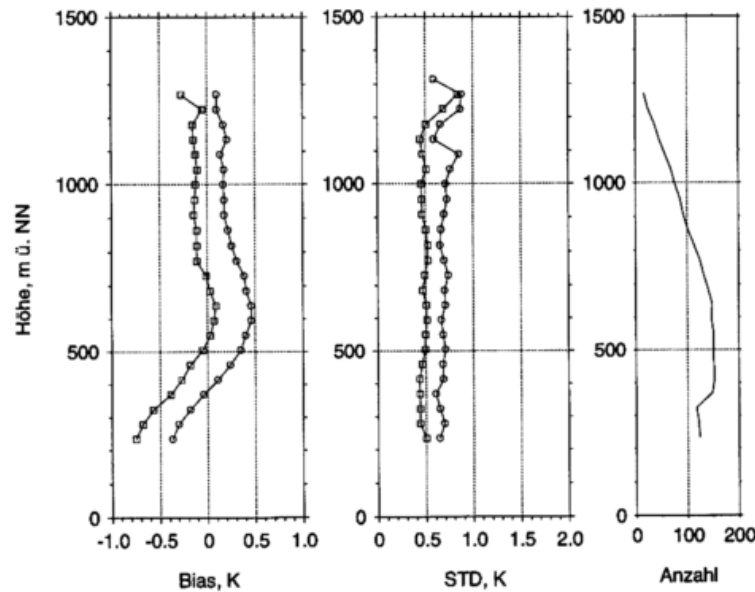


Abbildung 5.17: Bias (RASS minus Sonde), Standardabweichung und Anzahl der Vergleiche zwischen den virtuellen Temperaturen des RASS und der Radiosonde, abgeleitet vor (Kreise) und nach (Vierecke) Anwendung aller Korrekturen für den Zeitraum August'95 bis Oktober'95.

5.3.2 Datensatz 2: Januar bis Dezember 1997

Dieser Datensatz beinhaltet RASS-Messungen sowohl vom LAP als auch vom TWP und deren Vergleiche mit Radiosonden. Bei der Verifikation sind die eigenen Untersuchungen zum Höhenfehler durch Anwendung der verbesserten Höhenkorrektur sowie die korrekte Konstantenkorrektur (vgl. Abschnitt 5.2.2 und Angevine et al. (1998)) zugrundegelegt worden. Die im Abschnitt 5.2.4 diskutierten Korrekturen (Einfluß von Horizontalwind, Turbulenz und der Distanz zwischen Schallquelle und Radarantenne) sind nicht angewendet worden, da einerseits ihre beim Datensatz 1 nachgewiesene Wirksamkeit deutlich geringer ist als die der nachfolgend berücksichtigten Korrekturen (Vertikalwind,- Konstanten,- und Höhenkorrektur) und andererseits ihre Praxisrelevanz noch in der Diskussion ist (Petenko, 1998).

Ob die bei der Verifikation des Datensatzes 1 festgestellte Verringerung der Standardabweichung tatsächlich auf die entsprechenden Korrekturen zurückzuführen ist, kann nicht sicher beurteilt werden. Große Korrekturbeträge bei hohen Windgeschwindigkeiten sind auch bei der Höhenkorrektur infolge der starken Abdrift der virtuellen Schallquelle zu erwarten. Da jedoch beim Datensatz 1 die Höhen-Korrektur in der verbesserten Form noch nicht angewandt wurde, könnte die Korrektur in die richtige Richtung auch durch die Wind- und/oder Turbulenz-Korrektur erfolgt sein.

Die Gesamtkorrektur beschränkte sich damit auf die Berücksichtigung folgender Einflüsse:

- verbesserte **Höhen-Korrektur** nach Abschnitt 5.2.5
- **Vertikalwind-Korrektur** entsprechend Abschnitt 5.2.3
- **Konstanten-Korrektur** entsprechend Abschnitt 5.2.2

Ebenso wie bei Datensatz 1 sind zunächst nur niederschlagsfreie Meßperioden einbezogen worden. Die Wirksamkeit der einzelnen Korrekturen wird sowohl an deren Einfluß auf den Bias als auch auf die Standardabweichung beurteilt und wird anhand der entsprechenden Abbildungen diskutiert. Die dabei betrachteten Änderungen des Bias der RASS-Temperaturmessung sind identisch mit der für diesen Zeitraum berechneten mittleren Korrektur des jeweiligen Einflußfaktors.

Die **Höhen-Korrektur** nach dem im Abschnitt 5.2.5.1 beschriebenen Verfahren führt zu den in Abb. (5.11) dargestellten mittleren Höhenkorrekturen. Bei einem im Mittel negativen Temperaturgradienten ergeben sich daraus für den TWP und den LAP mittlere Temperaturkorrekturen (Abb. 5.18) von bis zu -0,6 K bzw. -0,3 K in Höhen, wo der Gradient von P_a und damit die erforderliche Höhen-Korrektur ein Maximum aufweisen. In der untersten in der Statistik berücksichtigten Höhenstufe ist die Temperaturkorrektur zunächst positiv, um dann schnell auf den negativen Maximalwert in 1200 m bzw. 700 m anzusteigen. Nach einer deutlichen Abnahme in den darüberliegenden Höhen bleibt eine mittlere negative Korrektur für den verbleibenden Höhenbereich von immerhin -0,25 K bzw. -0,15 K bestehen. Der Verlauf dieser mittleren Korrektur zeigt auffallende Ähnlichkeiten mit dem inversen Verlauf des Bias der unkorrigierten RASS-Temperaturen (vgl. Abschnitt 4.3.2.2) und wirkt der Unterschätzung des Temperaturgradienten durch das RASS entgegen. Neben dieser signifikanten Änderung des Temperaturbias verringert sich auch die Standardabweichung bei beiden Systemen. Beim TWP fällt die Änderung mit maximal 0,25 K wesentlich deutlicher aus als beim LAP (0,1 K). Mit wachsender Höhe strebt die Änderung der Standardabweichung jedoch gegen Null, um beim LAP in den obersten Höhen wieder positiv zu werden.

Die **Vertikalwind-Korrektur** (Abb. 5.19) zeigt im Mittel nicht den positiven Effekt einer Reduzierung der Standardabweichung, wie er sowohl in der Literatur angegeben als auch bei der Verifikation des Datensatzes 1 festgestellt wurde. In größeren Höhen steigt die Standardabweichung sogar wieder an. Das läßt sich damit erklären, daß die Korrektur natürlich nur dann wirkungsvoll sein kann, wenn der Meßfehler der Vertikalgeschwindigkeitsmessung kleiner als die Magnitude der Vertikalgeschwindigkeit selbst ist. Diese Bedingung scheint

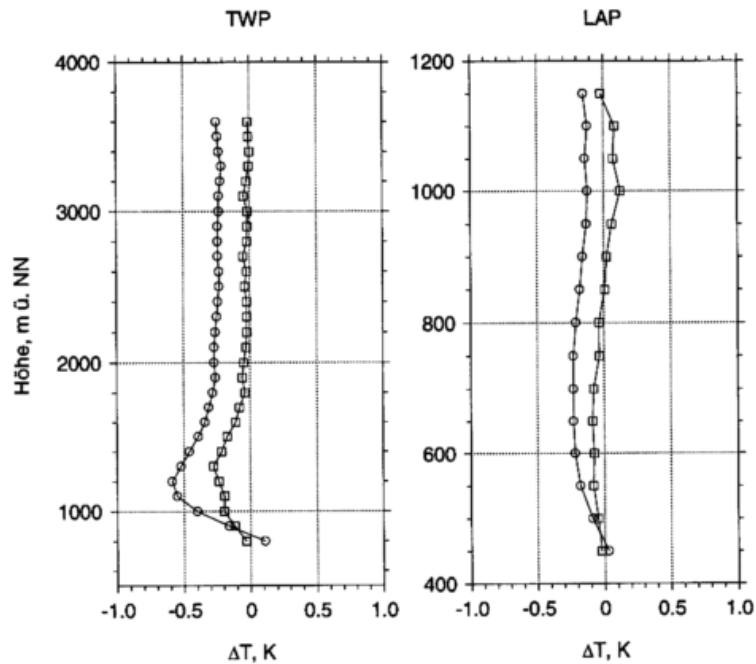


Abbildung 5.18: Mittlere Änderung des Bias (Kreise) und der Standardabweichung (Quadrate) der Differenzen zwischen virtueller Temperatur des RASS und der Radiosonde infolge der Höhen-Korrektur.

lediglich in der Grenzschicht unter konvektiven Bedingungen erfüllt zu sein. Werden nur Mittagsvergleiche während der Sommermonate in der Statistik berücksichtigt, ist eine signifikante Änderung der Standardabweichung um bis zu 0,6 K für den TWP und 0,5 K für den LAP zu beobachten. Das bedeutet, daß in der konvektiven Grenzschicht die Korrektur sehr wichtig für die Ableitung genauer RASS-Temperaturen ist. Andererseits besteht die Gefahr, daß in Situationen bzw. in Höhenbereichen mit nur sehr kleinen Beträgen im Vertikalwind eine Vertikalgeschwindigkeitskorrektur zu einer Verschlechterung der Temperaturmeßgenauigkeit beim RASS führt.

Weiterhin fällt auf, daß auch bei diesem Datensatz die Korrektur eine signifikante Änderung des Temperaturbias bewirkt. Dies ist eine Folge der im Mittel abwärtsgerichteten Vertikalbewegung, die bei beiden Systemen zu beobachten ist (Abb. 5.20). Die größten Beträge werden dabei bei beiden Systemen in der Grenzschicht zum Mittagstermin beobachtet. Dies stimmt mit der in Angevine (1997) gegebenen Erklärung überein. Allerdings können die darin beobachteten Werte in der Nacht von ca. 0 m/s durch die vorliegenden Lindenberger Messungen nicht bestätigt werden, die auch nachts, unabhängig vom System, eine mittlere negative Vertikalgeschwindigkeit von 0,05 m/s bis 0,15 m/s aufweisen.

Möglicherweise zieht ein systematischer Fehler in der Vertikalgeschwindigkeitsmessung einen systematischen Fehler in der RASS Temperaturmessung nach sich, was bei der Interpretation

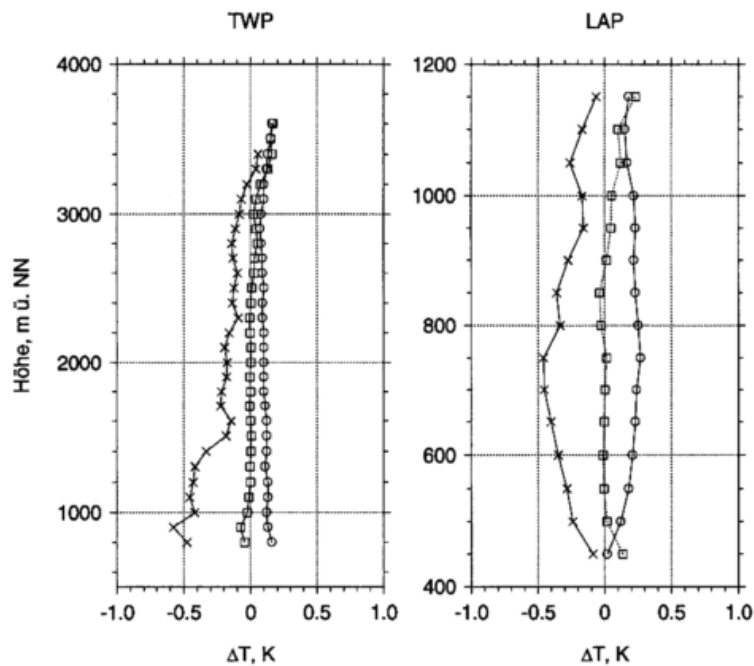


Abbildung 5.19: Mittlere Änderung des Bias (Kreise) und der Standardabweichung (Quadrate) der Differenzen zwischen virtueller Temperatur des RASS und der Radiosonde infolge der Vertikalwind-Korrektur. Die Kreuze zeigen die Änderung der Standardabweichung, wenn nur Mittagsvergleiche während der Sommermonate berücksichtigt werden.

des Verifikationsergebnisses zu berücksichtigen ist.

Die **Konstanten-Korrektur** in den Gleichungen zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit aus der Dopplerverschiebung hat vor allem Einfluß auf die Änderung des Bias der RASS Temperaturmessung (Abb. 5.21). Über das Jahr gemittelt ergibt sich beim TWP eine Änderung um 0,15 K bis 0,3 K und beim LAP um 0,1 K bis 0,2 K. Die Unterschiede zwischen den beiden Systemen lassen sich dadurch erklären, daß der Verifikation der Messungen bei beiden Systeme unterschiedliche Datensätze innerhalb des betrachteten Jahres zugrunde liegen und die Konstantenkorrektur entsprechend den Temperatur- und Feuchteverhältnissen einen Jahresgang aufweist. Auffallend ist die fast verschwindende Änderung der Standardabweichung der Temperaturdifferenzen zwischen RASS und Radiosonde auf Grund der geringen Variabilität des Korrekturbetrages von Messung zu Messung.

In der Abb.5.22 ist nun die Auswirkung aller drei Korrekturen auf die Vergleichsergebnisse RASS-Radiosonde für den TWP bzw. den LAP dargestellt. Die unkorrigierten RASS Temperaturen zeigen einen ausgeprägten höhenabhängigen Bias bis zu 0,8 K bzw. 0,5 K. Nach Anwendung aller Korrekturen sind die mittleren Temperaturabweichungen zur Radiosonde kleiner als 0,3 K für den TWP und kleiner 0,2 K für den LAP. Bemerkenswert

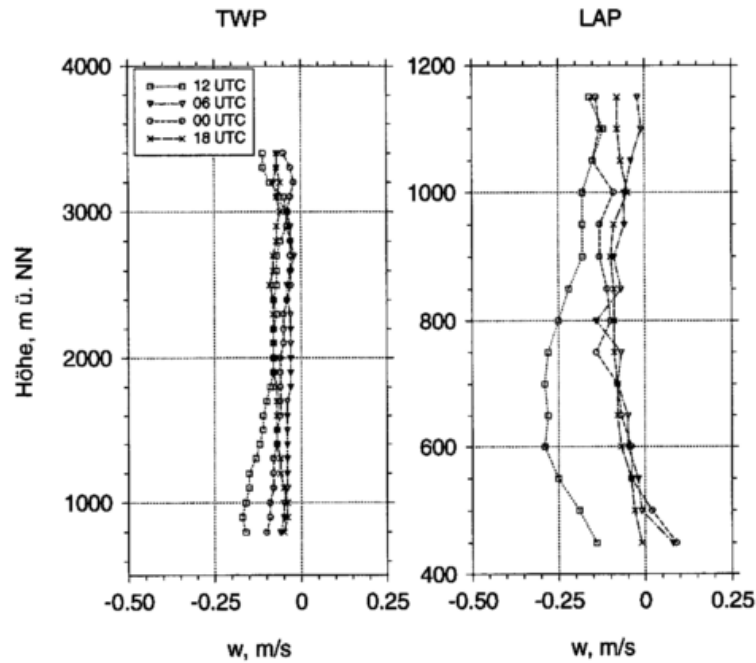


Abbildung 5.20: Mittlere Vertikalwindgeschwindigkeiten, gemessen mit dem TWP (links) und dem LAP (rechts) über ein Jahr zu den vier Aufstiegsterminen der Radiosonde

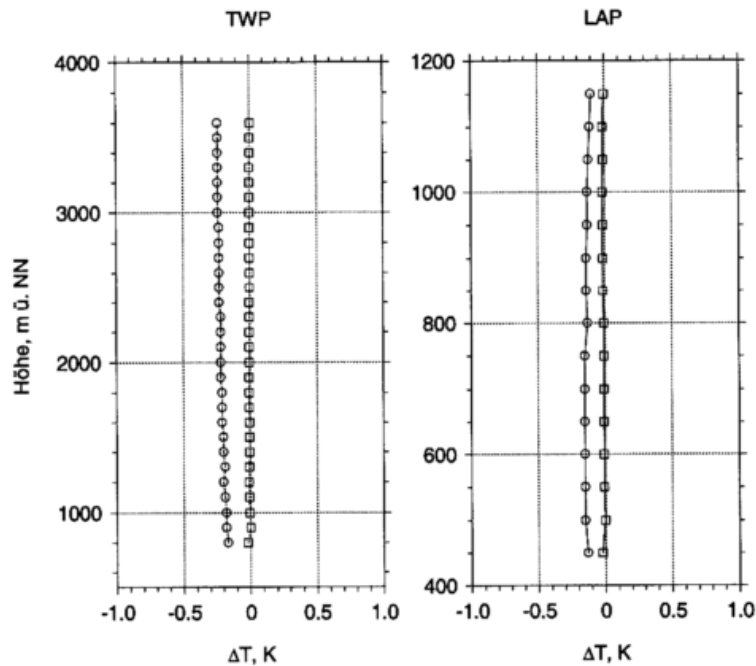


Abbildung 5.21: Mittlere Änderung des Bias (Kreise) und der Standardabweichung (Quadrate) der Differenzen zwischen virtueller Temperatur des RASS und der Radiosonde infolge der Korrektur bzgl. genauerer Konstanten

ist vor allem die Eliminierung bzw. deutliche Reduzierung der Höhenabhängigkeit des Bias, was insbesondere auf die Anwendung der Höhen-Korrektur zurückgeführt werden kann. Die Standardabweichung wurde ebenfalls um bis zu 0,3 K reduziert, insbesondere in den unteren Schichten des Meßbereiches. In den obersten Höhen ist dagegen eine Zunahme der Standardabweichung zu verzeichnen, hervorgerufen durch die begrenzte Genauigkeit in der Messung der Vertikalwindgeschwindigkeit und dem daraus resultierenden negativen Effekt bei der Korrektur. Da, wie oben erwähnt, mittlere systematische Vertikalgeschwindigkeiten einen systematischen RASS Temperaturfehler zur Folge haben, sind zusätzlich die Kurven ohne Vertikalgeschwindigkeitskorrektur gezeigt. In diesen Fällen reduziert sich der Temperaturbias über den gesamten Höhenbereich auf weniger als 0,15 K für den TWP und 0,2 K für den LAP.

5.3.3 Meßbeispiele

Anhand einiger ausgewählter Beispiele von Einzelmessungen bzw. Vergleichen soll ein Eindruck vermittelt werden von der Größe und der Variabilität der verschiedenen Korrekturen. Darüber hinaus wird gezeigt, daß letztlich nur die Anwendung aller drei Korrekturen zu einer Verbesserung der Meßgenauigkeit führt.

Das Meßbeispiel Nr. 1 vom 28.10.1997, 06 UTC (Abb. 5.23) demonstriert nochmals die Bedeutung der Höhen-Korrektur. Das unkorrigierte RASS Temperaturprofil weicht vom gleichzeitig gemessenen Radiosondenprofil um bis zu 3 K ab. Diese Abweichung wird durch Anwendung der variablen Höhen-Korrektur nahezu vollständig korrigiert. Der Korrekturbetrag von 3 K ist zwar nicht typisch für die Höhen-Korrektur, in Situationen mit einem scharfen Gradienten im Profil der rückgestreuten Leistung und einem signifikanten Temperaturgradienten aber durchaus möglich.

Das Meßbeispiel Nr.2 vom 05.07.1997 18 UTC (Abb. 5.24) charakterisiert eine Situation, in der nur die Anwendung aller Korrekturen zu einem befriedigenden Ergebnis führt. Die Vertikalgeschwindigkeits- und Höhen-Korrektur erreichen in einigen Höhen Beträge von bis zu 1,3 K bzw. 2,2 K mit zum Teil entgegengesetztem Vorzeichen. Die Vernachlässigung einer Korrektur würde nicht zu der am Ende guten Übereinstimmung von Radiosonden- und RASS-Temperaturprofil führen.

Mit dem letzten Meßbeispiel vom 09.01.1997, 18 UTC (Abb. 5.25) soll gezeigt werden, daß trotz der mit den Korrekturen erzielten signifikanten Verbesserung der Temperaturmeßgenauigkeit des RASS Situationen auftreten, in denen das vertikale Temperaturprofil nicht vollständig korrekt wiedergegeben wird. Bei markanten Inversionen hat, wie bereits erwähnt,

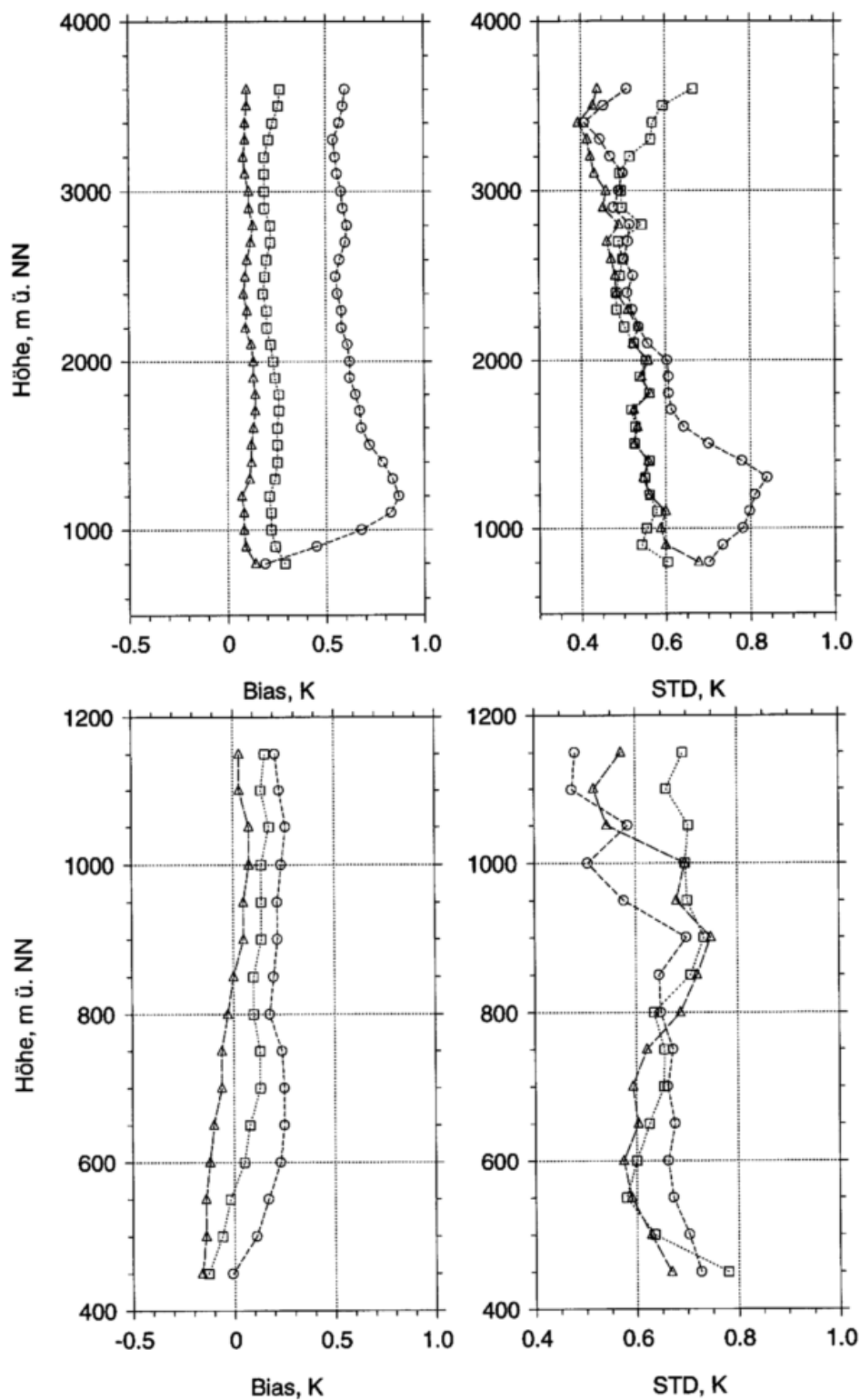


Abbildung 5.22: Bias(RASS minus Sonde) und Standardabweichung zwischen unkorrigierten (Kreise) und korrigierten (Quadrate) RASS Temperaturen und virtuellen Temperaturen der Radiosonde für den TWP (oben) und den LAP(unten). Die Dreiecke zeigen die Ergebnisse, wenn die Vertikalgeschwindigkeitskorrektur nicht angewendet wird.

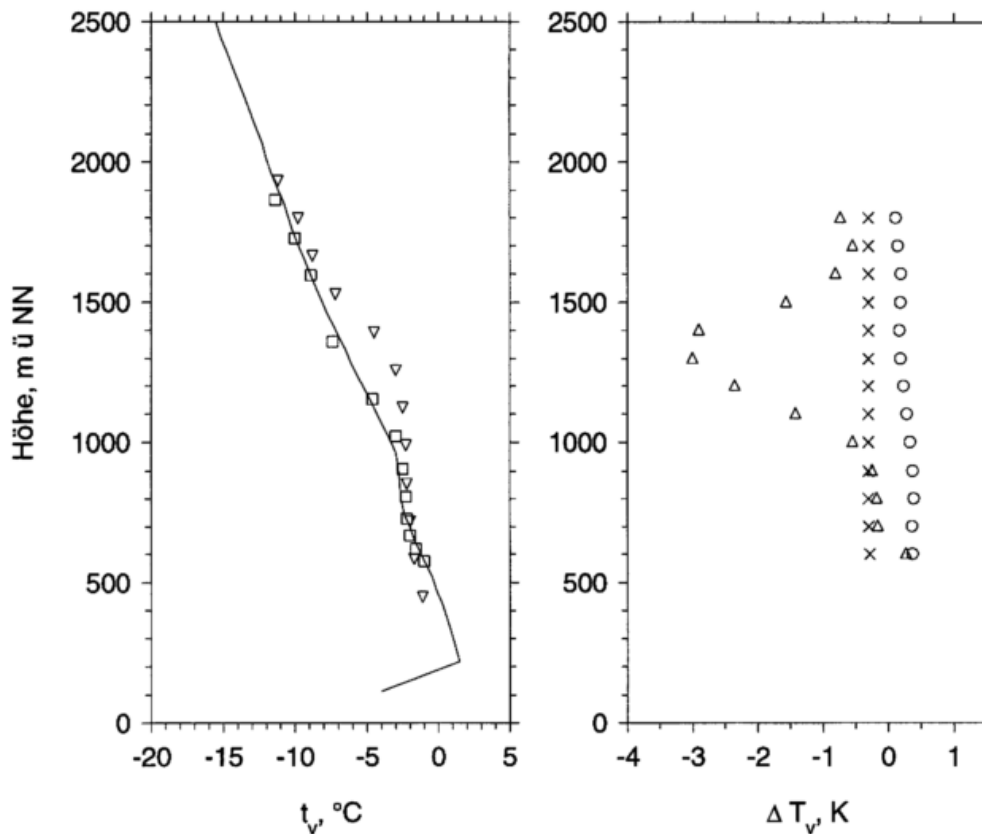


Abbildung 5.23: links: Vertikalprofile der virtuellen Temperatur, gemessen mit der Radiosonde und dem TWP-RASS am 28.10.1997 um 06 UTC; ausgezogene Linie: Radiosonde, Dreiecke: RASS unkorrigiert, Quadrate: RASS korrigiert. rechts: Vertikalprofil der aus den verschiedenen Einflüssen resultierenden Temperaturkorrekturen, Dreiecke: Höhen-Korrektur, Kreise: Vertikalgeschwindigkeitskorrektur, Kreuze: Konstantenkorrektur.

der Momentschätzalgorithmus Probleme, den für jede Höhenstufe charakteristischen Peak zu analysieren. Derartige Fehlerursachen lassen sich nur durch einen verbesserten Momentenschätzalgorithmus beseitigen (s. z.B. (Herden, 1996)).

5.3.4 Zusammenfassung der Verifikationsergebnisse

Die Wirksamkeit verschiedener Korrekturen zur Verbesserung der Genauigkeit der routinemäßig abgeleiteten RASS Temperaturen wurde auf der Grundlage zahlenmäßig umfangreicher Vergleiche mit Radiosondierungen untersucht. Nicht alle in der Literatur vorgeschlagenen Korrekturverfahren führten zu einer nachweisbaren Reduzierung des RASS Temperaturmeßfehlers. Insbesondere die Korrektur bzgl. des Abstandes von Schallquelle und Radarantenne sowie des Einflusses von Horizontalwind und Turbulenz scheinen in erster Näherung

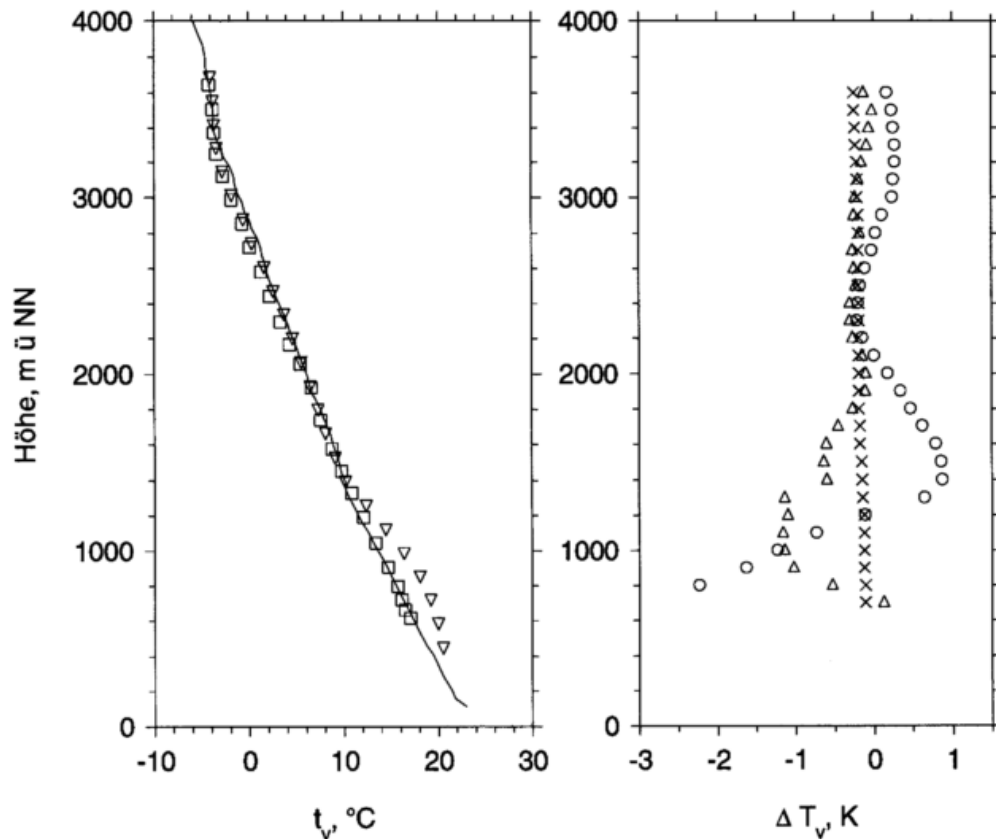


Abbildung 5.24: wie Abb. 5.23, jedoch für den 05.07.1997, 18 UTC.

vernachlässigbar, zumindest für Messungen mit dem Troposphärenwindprofiler.

Durch Anwendung der folgenden drei Korrekturen konnte eine signifikante Verbesserung der Meßgenauigkeit erreicht werden:

- verbesserte **Höhen-Korrektur** nach Abschnitt 5.2.5
- **Vertikalwind-Korrektur** entsprechend Abschnitt 5.2.3
- **Konstanten-Korrektur** entsprechend Abschnitt 5.2.2

Wichtige statistische Parameter des Vergleichs und der Verifikation dieser Korrekturen auf der Grundlage eines einjährigen Datensatzes sind in Tabelle 5.2 zusammengefaßt. Die wichtigsten Ergebnisse sind:

- Durch Anwendung der oben genannten Korrekturen konnte der Bias der RASS Temperaturen gegenüber den Radiosondenwerten auf weniger als 0,3 K für beide Systeme reduziert werden. Die Standardabweichung verringerte sich um bis zu 0,3 K.

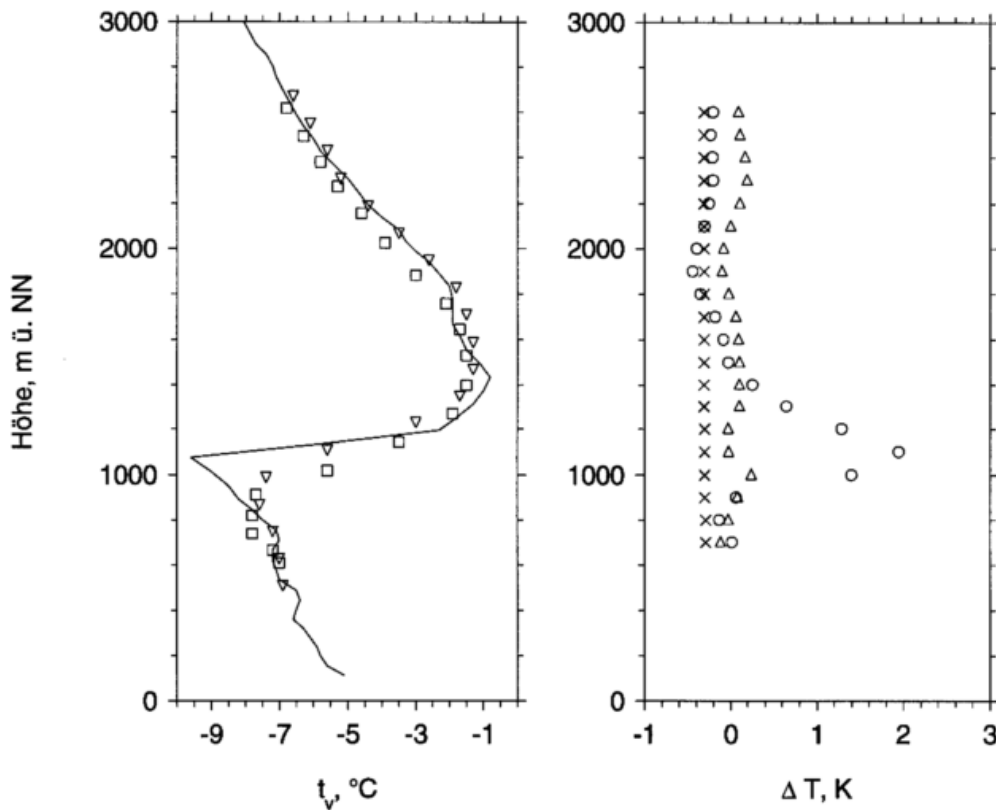


Abbildung 5.25: wie Abb. 5.23, jedoch für den 09.01.1997, 18 UTC.

- Die weiterentwickelte Höhen-Korrektur, welche das Vertikalprofil der Reflektivität berücksichtigt, hat den größten Effekt auf die Verringerung des Bias und insbesondere auf die deutliche Reduzierung von dessen Höhenabhängigkeit. Ebenso wird durch diese Korrektur der zufällige Fehler der RASS Messung deutlich reduziert.
- Die Wirksamkeit der Vertikalgeschwindigkeitskorrektur hängt von der Genauigkeit der Messung der vertikalen Windgeschwindigkeit und von den Beträgen der auftretenden Vertikalbewegungen in der Atmosphäre ab. Eine Reduzierung der zufälligen Meßfehler infolge dieser Korrektur ist nur in Situationen mit signifikanten vertikalen Luftbewegungen (z.B. in der konvektiven Grenzschicht) zu beobachten.
- Durch den gegenwärtig noch auftretenden systematischen Bias in der vom RASS gemessenen Vertikalgeschwindigkeit läßt sich ein Teil der noch verbleibenden Temperaturdifferenzen erklären. Bei Nichtanwendung dieser Korrektur ist die Übereinstimmung zwischen RASS und Radiosondentemperaturen für beide Systeme besser als 0,2 K. Weitere Untersuchungen zur Zuverlässigkeit der Vertikalgeschwindigkeitsmessung sind deshalb erforderlich.
- Die genaueren Konstanten in der Ableitung der virtuellen Temperatur verringern im

| | LAP | | | TWP | | |
|--------------------------------------|------------|---------------------|-----------------|------------|--------------------|-----------------|
| | alle Höhen | $\leq 800\text{ m}$ | $>800\text{ m}$ | alle Höhen | $\leq 2\text{ km}$ | $> 2\text{ km}$ |
| Anzahl der Vergleiche | 709 | | | 957 | | |
| Bias ohne Korrr., K | 0.18 | 0.12 | 0.23 | 0.62 | 0.66 | 0.58 |
| STD , K | 0.643 | 0.678 | 0.574 | 0.59 | 0.709 | 0.495 |
| Bias mit allen Korrr. , K | 0.06 | 0.04 | 0.14 | 0.22 | 0.24 | 0.21 |
| STD , K | 0.680 | 0.646 | 0.700 | 0.540 | 0.552 | 0.526 |
| Bias mit Höhen-und Konst.korr., K | -0.03 | -0.10 | 0.04 | 0.11 | 0.11 | 0.10 |
| STD , K | 0.627 | 0.620 | 0.646 | 0.509 | 0.567 | 0.509 |
| Änderung der STD infolge: | | | | | | |
| Höhenkorr. , K | -0.008 | -0.037 | 0.025 | -0.074 | -0.0137 | -0.023 |
| w - Korrr., K | 0.065 | 0.020 | 0.116 | 0.026 | -0.012 | 0.056 |
| Konstantenkorr. , K | -0.015 | -0.015 | -0.015 | -0.006 | -0.009 | -0.003 |

Tabelle 5.2: Ausgewählte statistische Parameter des Vergleichs zwischen den RASS Temperaturmessungen und Radiosondierungen, berechnet für einen einjährigen Datensatz (Januar bis Dezember 1997) sowie für verschiedene Stufen der RASS-Korrektur.

wesentlichen den Bias der RASS Temperaturen. Nach den hier durchgeführten Vergleichen mit Radiosondierungen scheint die Anwendung der von Cramer (1993) angegebenen Beziehungen zwischen Temperatur und Schallgeschwindigkeit in Luft zwar auch bei Temperaturen unterhalb 0°C anwendbar zu sein. Dies sollte jedoch nur als vorläufiges Ergebnis betrachtet werden, so lange keine entsprechenden Labormessungen vorliegen.

Kapitel 6

Verfügbarkeit der Windprofiler/RASS-Messungen

Der vertikale Meßbereich und die zeitliche Verfügbarkeit der Wind- und Temperaturmessungen sind ein wichtiges Kriterium für einen operationellen Einsatz von Windprofilern und RASS. Insbesondere die erreichbare maximale Meßhöhe ist nicht nur von den Systemeigenschaften sondern auch von den jeweiligen meteorologischen Bedingungen abhängig und deshalb z.T. erheblichen Schwankungen unterworfen. Auf der Grundlage der über mehrere Jahre durchgeführten Messungen mit WPR/RASS am MOL soll deshalb in diesem Kapitel eine Statistik zur mittleren Verfügbarkeit der einzelnen Systeme in den verschiedenen Meßmodi gegeben werden. Die Betrachtungen erfolgen für den Wind und für die virtuelle Temperatur getrennt, wobei jeweils allgemeine theoretische Betrachtungen vorangestellt werden.

Die maximale Meßhöhe wird durch die Stärke des Rückstreusignals und deren Verhältnis zum Rauschen bestimmt. Die Rückstreuleistung wird durch die Radargleichung (2.35) in Beziehung zu den Systemparametern und den atmosphärischen Eigenschaften gesetzt. Faßt man darin die Systemparameter und Konstanten in der Variablen α zusammen, ergibt sich folgende vereinfachte Form der Radargleichung:

$$\bar{P}(r_0) = \alpha \frac{P_T \eta}{r^2 l^2} \quad (6.1)$$

Man erkennt sofort, daß die rückgestreute Leistung proportional der Sendeleistung P_T und der Volumenreflektivität η sowie umgekehrt proportional zum Quadrat der Entfernung r und einem Schwächungsparameter l ist. Die Detektierbarkeit des Signals wird darüber hinaus von der Stärke des Rauschens bestimmt, wobei die dazu wesentlich beitragende kosmische Strahlung sehr stark frequenzabhängig ist und beispielsweise ein VHF-System deutlich stär-

ker beeinflusst als ein UHF-System (Röttger and Larsen, 1990). Bleiben beim Betrieb von WPR/RASS die Systemparameter unverändert, so sind Schwankungen in der Verfügbarkeit, insbesondere in der erreichbaren maximalen Meßhöhe, auf Variationen der Volumenreflektivität und/oder der Schwächung der elektromagnetischen und akustischen Wellen in der Atmosphäre zurückzuführen.

Auf Grund der genannten Abhängigkeiten der maximalen Reichweite wurde die tatsächlich beobachtete Verfügbarkeit für jedes Höhenniveau berechnet. Dazu sind die im Zuge der Qualitätsprüfung als gültig deklarierten Werte in das Verhältnis zu den möglichen Werten gesetzt worden:

$$\text{Relative Verfügbarkeit in \%} = \frac{\text{Anzahl der gültigen Werte}}{\text{Anzahl der möglichen Werte}} \times 100 \quad (6.2)$$

Da im Verlauf des betrachteten Zeitraums mitunter die Höhen der Entfernungstore (meist nur geringfügig) variierten, wurden die Meßwerte festen Höhenstufen zugeordnet, wobei der Abstand der Höhenstufen der vertikalen Auflösung angepaßt worden ist.

6.1 Wind

6.1.1 Theorie

Neben der Abhängigkeit von den Systemparametern sind für die maximale Reichweite die Volumenreflektivität und die Schwächung der elektromagnetischen Wellen in der Atmosphäre entscheidend. Die Schwächung der elektromagnetischen Wellen ist proportional der Frequenz und wird u.a. in Doviak and Zrnica (1993) für die in der Atmosphäre vorkommenden Medien: Luft, Regen und Wolken diskutiert. Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die Schwächung der von Windprofilern benutzten Wellenlängen (0,20 m - 6 m) um mehrere Größenordnungen kleiner ist als alle anderen die Reichweite bestimmenden (systembedingten und atmosphärischen) Effekte. Auf eine weitergehende Betrachtung der Schwächung elektromagnetischer Wellen wird deshalb an dieser Stelle verzichtet.

Einen wesentlich größeren Einfluß auf die rückgestreute Leistung hat die Volumenreflektivität, die entsprechend Gleichung (2.5) definiert ist als:

$$\eta = 0,38c_n^2 \lambda^{-1/3} \quad (6.3)$$

c_n^2 ist darin der Strukturparameter des Brechungsindex, der die Stärke der Brechungsindexfluktuationen in der Atmosphäre beschreibt. Nach Ottersten (1969) kann er beschrieben werden durch:

$$c_n^2 = a \langle \Delta n^2 \rangle L_0^{-\frac{2}{3}} \quad (6.4)$$

mit a als Konstante, Δn als Varianz des Brechungsindexes und L_0 als äußere Turbulenzskala.

Die Beurteilung der Verteilung von c_n^2 in der Atmosphäre erfordert Kenntnisse über den Brechungsindex und die Turbulenz. Der Brechungsindex kann aus Radiosondenaufstiegen berechnet werden. Abb. 6.1 zeigt nach der Jahreszeit unterteilte mittlere Vertikalprofile des Brechungsindexgradienten auf der Grundlage einjähriger Radiosondierungen am MOL und unter Verwendung der Gleichung 2.2.

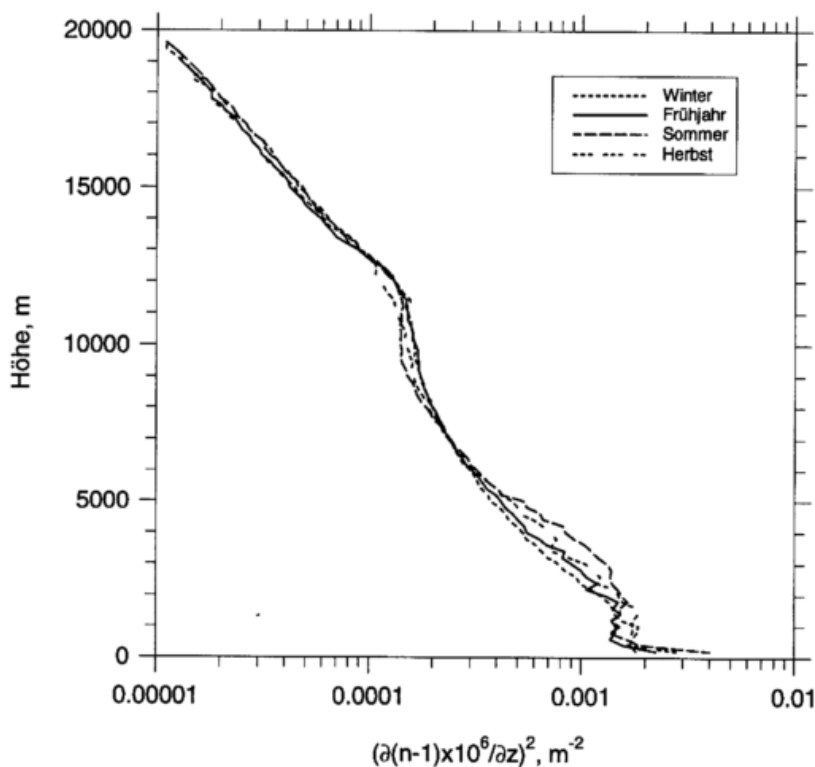


Abbildung 6.1: Mittlere Profile des Quadrates des Brechungsindexgradienten, berechnet aus Radiosondierungen eines Jahres.

Es ist erkennbar, daß der Gradient des Brechungsindexes mit der Höhe allmählich abnimmt. Diese Abnahme ist im Höhenbereich von 2 bis 7 km und oberhalb von 13 km stärker ausgeprägt als in den anderen Höhen. Das andeutungsweise zu erkennende Minimum bei ca. 9 km schlägt sich auch, wie noch gezeigt wird, in einer in diesem Höhenbereich geringeren

Verfügbarkeit der TWP High Mode - Messungen nieder. Jahreszeitliche Variationen sind vor allem in der unteren Troposphäre von Bedeutung, wobei die höheren Werte im Sommer auftreten und auf den höheren Wasserdampfgehalt der Atmosphäre in dieser Jahreszeit zurückzuführen sind. Die jahreszeitliche Variation bildet sich u.a. in den jahreszeitlichen Schwankungen der Verfügbarkeit des LAP ab.

Bei Bragg-Rückstreuung wird die Volumenreflektivität durch Variationen des Brechungsindex bestimmt, deren Größe der halben Radarwellenlänge λ_e ist. Wie bereits im Kapitel 2 erwähnt, verschiebt sich der durch den „inertial subrange“ definierte Größenbereich der Turbulenzpakete (eddies) mit der Höhe zu größeren Wellenlängen. Der untere Grenzwert der Wellenlänge für Klarluft-Radarsysteme wird in der englischen Literatur als „viscous cutoff“ des Streumechanismus bezeichnet. Daraus resultiert für jede Radarwellenlänge λ_e eine obere Grenzhöhe, bis zu der Bragg-Rückstreuung erwartet werden kann. Dieser Zusammenhang erklärt, weshalb mit der Ausdehnung des vertikalen Meßbereiches Radarsysteme mit längerer Wellenlänge genutzt werden. Abb. 6.2 zeigt für verschiedene Turbulenzintensitäten die „cutoff“- Wellenlänge (nach Gossard and Strauch (1983)). Werden kürzere Wellenlängen genutzt, kommt es zu einer erheblichen Reduzierung der Rückstreuintensität.

Der Einfluß des aktuellen Atmosphärenzustandes auf die vertikale Reichweite wurde anhand eines VHF-Systems von Low et al. (1997) mit auf Radiosondendaten beruhenden Berechnungen des Gradienten des generalisierten Brechungsindex untersucht. Insgesamt wurde dort eine gute Übereinstimmung der vorhergesagten Reichweite mit der tatsächlichen Reichweite gefunden.

6.1.2 Ergebnisse

In Abb. 6.3 sind für den LAP und den TWP die über den gesamten Zeitraum gemittelten Verfügbarkeiten als Vertikalprofile für beide Meßmodi dargestellt. Es ist zunächst offensichtlich, daß eine höhere vertikale Auflösung eine geringere vertikale Reichweite zur Folge hat.

Beim LAP High Mode ist die Verfügbarkeit in einem Höhenbereich von etwa 700 m bis 2500 m größer 80 %, im Low Mode werden Verfügbarkeiten größer 80 % lediglich zwischen 400 m und 1000 m erreicht. Neben der allmählichen Abnahme der Verfügbarkeit in größeren Höhen fallen die geringen Werte in den unteren zwei bis drei Höhentoren auf. Dies ist auf die größere Störanfälligkeit der LAP-Messungen in den unteren Höhentoren, z.B. durch Bodenechos, zurückzuführen.

Mit dem TWP ist es im High Mode möglich, den Wind bis in eine Höhe von 16 km zu

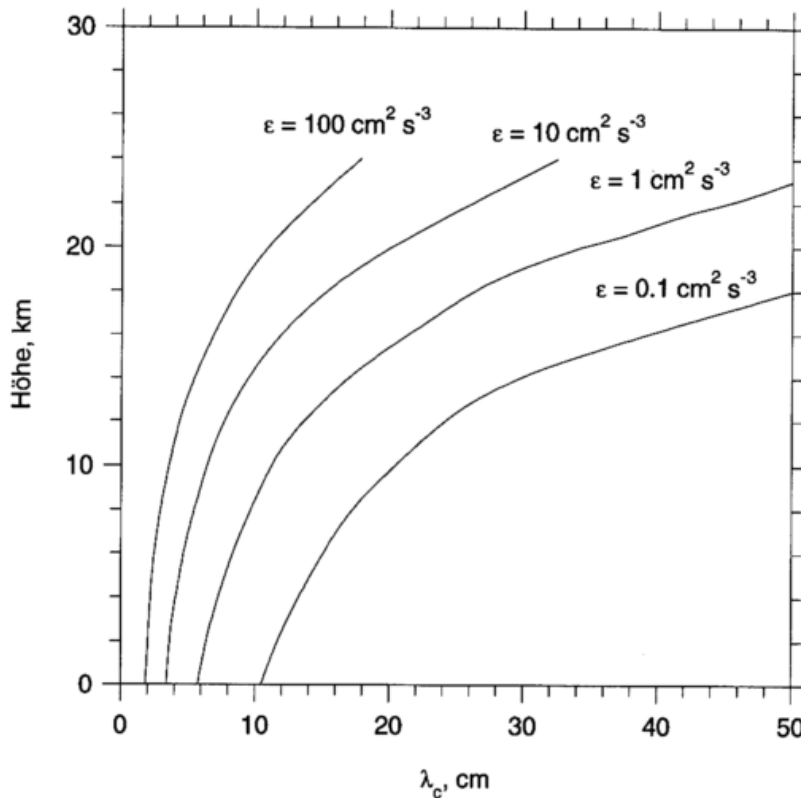


Abbildung 6.2: Minimale Wellenlänge des „inertial subrange“ als Funktion der Höhe für verschiedene, durch die Dissipationsrate ϵ beschriebene Turbulenzintensitäten (aus Gossard and Strauch (1983)). Die Rückstreuung verringert sich erheblich, wenn die Wellenlänge des Radars λ_e kleiner λ_c wird.

messen, wobei ein markanter Einbruch in der Verfügbarkeit bereits oberhalb von 12 km zu verzeichnen ist. Der Schwellenwert von 80 % wird von der minimal eingestellten Meßhöhe in 2500 m bis in 9,5 km Höhe überschritten. Kennzeichnend für das Vertikalprofil der Verfügbarkeit ist ein sekundäres Minimum in ca. 11 km, d.h. etwa im Bereich der Tropopause. Erklärbar ist dieses Minimum mit einem im Mittel geringeren Brechungsindexgradienten in diesem Bereich, wie man es der Abb. 6.1 entnehmen kann.

Im TWP Low Mode kann nahezu über den gesamten eingestellten Meßbereich eine Verfügbarkeit größer 80 % beobachtet werden, wobei im Bereich von 700 m bis 2 km die Verfügbarkeit sogar größer 90 % ist. Dieser Meßmode weist damit von beiden Systemen und Modi die mit Abstand größte Verfügbarkeit auf.

Tages- und jahreszeitliches Verhalten

Im Verlauf des Jahres sind in allen Meßmodi, mit Ausnahme des TWP Low Modes, Variationen in der Verfügbarkeit erkennbar (Abb. C.1 bis C.6). Besonders ausgeprägt zeigen sich

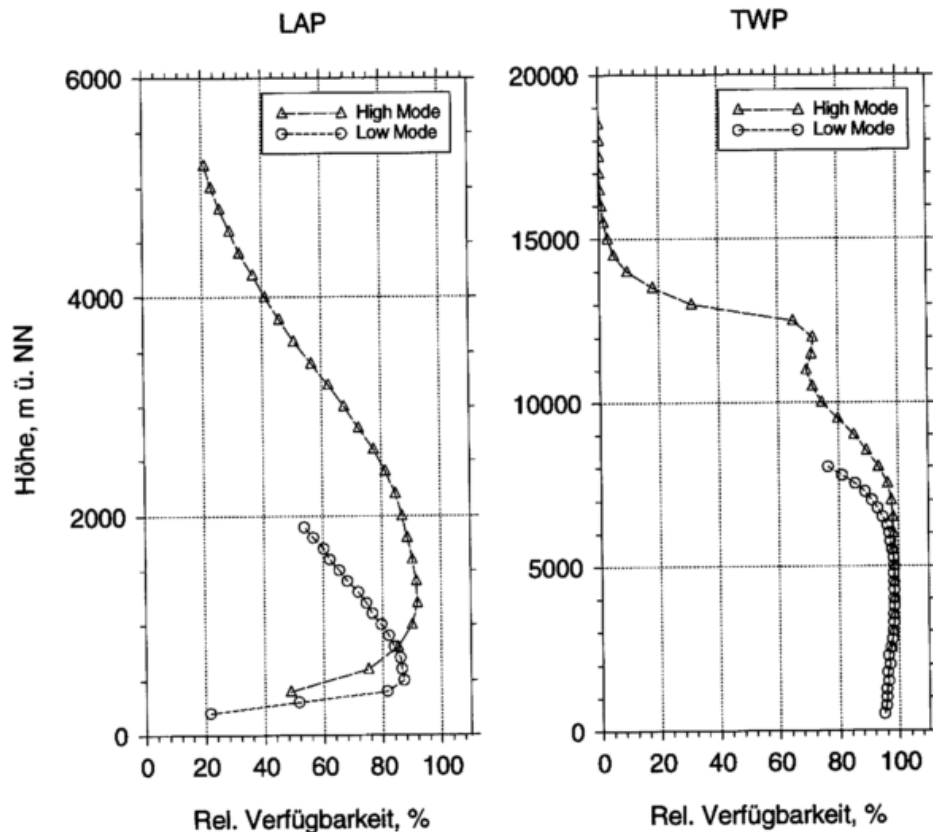


Abbildung 6.3: Vertikalprofile der mittleren Verfügbarkeit des Windes, gemessen mit dem LAP(links) von November 1993 bis Oktober 1996 und dem TWP(rechts) von Januar bis Dezember 1997

diese beim LAP mit einer im allgemeinen höheren Verfügbarkeit in den Sommermonaten, bedingt durch das in dieser Jahreszeit größere Wasserdampfangebot in der Troposphäre und den daraus resultierenden größeren Werten des Brechungsindexgradienten (vgl. Abb. 6.1). In den Wintermonaten dagegen erreicht die Verfügbarkeit ihr Minimum, beim LAP Low Mode ist im November und Dezember die Verfügbarkeit in keiner Höhe mehr größer 80 %. Beim High Mode beträgt die maximale Höhe mit einer Verfügbarkeit größer 80 % 1700 m im Vergleich zu 3400 m im August.

Die Variationen beim TWP High Mode sind ebenfalls durch maximale Werte in den Sommermonaten gekennzeichnet. Die im Verlauf des Jahres zu erkennende allmähliche Abnahme hat jedoch technische Ursachen. Durch den Ausfall einiger Antennenelemente reduzierte sich das Aperturprodukt im betrachteten Zeitraum geringfügig.

Eine Abhängigkeit der Verfügbarkeit von der Tageszeit (Abb. C.3 bis C.4) kann man erwartungsgemäß nur beim LAP und bei diesem System nur im Low Mode beobachten.

6.2 Virtuelle Temperatur

6.2.1 Theorie

Die vertikale Reichweite eines RASS hängt wesentlich von der ausgesandten elektromagnetischen und akustischen Leistung und einer Reihe atmosphärischer die Schalldämpfung beeinflussender Parameter ab (z.B. Lataitis (1992) und Bauer-Pfundstein (1998)). Zur quantitativen Beschreibung der bei der RASS-Messung mit einem WPR/RASS empfangenen mittleren Leistung ist von Lataitis (1992) folgende Gleichung angegeben worden:

$$\bar{P}(r_0) = 3,7 \times 10^{-14} \frac{c\tau}{2(\lambda_e r)^2} \frac{P_a G_a P_T}{B} 10^{-\alpha \frac{r}{10}} I \quad (6.5)$$

Darin ist $B = 2\pi b/c_a$ die akustische Wellenzahlbreite mit b als Bandbreite des akustischen Signals. α und I beschreiben die Effekte der akustischen Schwächung, wobei α die akustische Dämpfungskonstante der klassischen und molekularen Absorption sowie I die der sogenannten „excess attenuation“ umfaßt. P_T und P_a sind von der elektrischen bzw. akustischen Sendeleistung der jeweiligen Verstärker abhängig. Die Größe P_T wird darüber hinaus von der Länge und Folge des elektromagnetischen Pulses sowie der Anzahl der kohärenten Integrationen bestimmt. Beim akustischen Puls ist vor allem der Teil des Schallspektrums relevant, der die Bragg-Bedingung erfüllt und somit zur Rückstreuung der elektromagnetischen Wellen beiträgt. Die zur Rückstreuung beitragende akustische Leistung ist dabei von folgenden Eigenschaften des akustischen Sendesignals abhängig:

- der Art der akustischen Frequenzabstrahlung (z.B. lineare oder zufällige Frequenzabtastung),
- der Verweilzeit bei einer einzelnen Frequenz,
- der Größe der Frequenzsprünge im Frequenzfenster und
- der Breite des akustischen Frequenzfensters.

Der Einfluß dieser Größen auf die Reichweite des RASS wurde durch Christoph (1995), Urych (1995) und Steinhagen et al. (1995) am LAP/RASS untersucht und zur Erzielung der größt möglichen Verfügbarkeit optimiert. Dabei konnte die vertikale Reichweite etwa um zwei Höhenstufen, d.h. um ca. 100 m gesteigert werden.

Neben der akustischen Sendeleistung spielen für die Verfügbarkeit drei verschiedene und unterschiedlich stark wirkende Arten der Schallschwächung eine wesentliche Rolle:

- die klassische Schallabsorption (bedingt durch die innere Reibung sowie Wärmeleitungs- und Wärmestrahlungsprozesse),
- die molekulare Absorption (infolge von Relaxationsprozessen bei mehratomigen Gasen) und
- die sogenannte „excess attenuation“ (als Folge der Strahlaufweitung z.B. durch Turbulenz oder die horizontale Abdrift des Schalls).

Die Wirkung der einzelnen Schwächungsarten hängt wesentlich von der akustischen Frequenz ab. Die klassische Schallabsorption ist für die akustischen Frequenzen des LAP/RASS ($f_a \approx 3000 \text{ Hz}$) und des TWP/RASS ($f_a \approx 1000 \text{ Hz}$) vernachlässigbar, da sie um 1 bis 2 Größenordnungen kleiner als die anderen beiden Schwächungsarten ist (Delany, 1977).

Die molekulare Absorption des Schallsignals wird durch den thermo- und hydrodynamischen Zustand der Atmosphäre bestimmt, wobei die Stärke der Absorption frequenzabhängig ist. Für ausgewählte Temperaturen ist sowohl für die Frequenz des LAP/RASS als auch für die des TWP/RASS die auf molekulare Absorption zurückzuführende Schallschwächung in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte in Abb. 6.4 dargestellt.

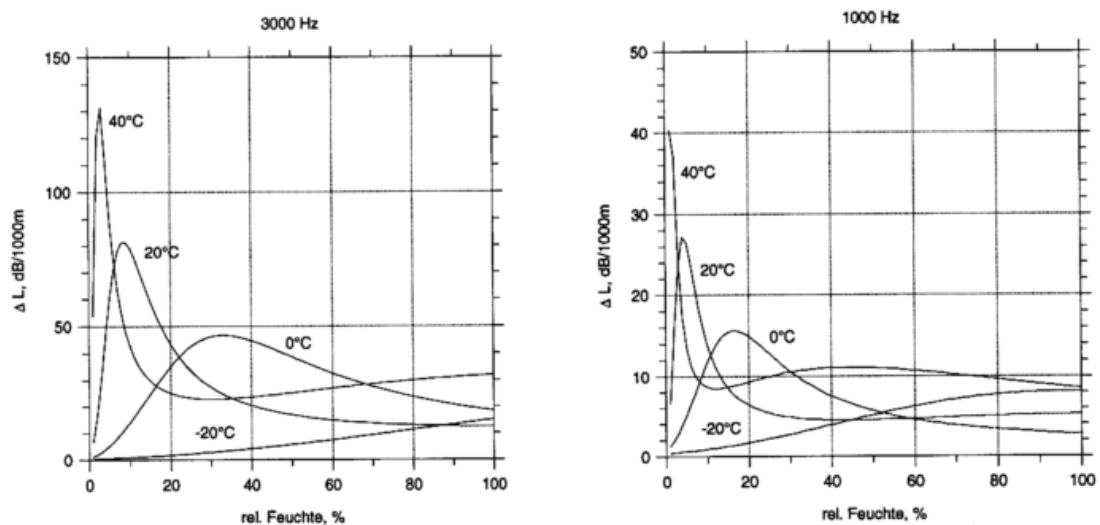


Abbildung 6.4: Auf molekulare Absorption zurückzuführende Abnahme der Schallintensität für die typischen Frequenzen der beiden RASS (3000 Hz:LAP/RASS; 1000 Hz:TWP/RASS). Berechnet mit Gleichungen von Zuckerware and Meredith (1985) für verschiedene Feuchte- und Temperaturverhältnisse. Zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung der y-Achsen.

Man erkennt durch einen Vergleich der Kurven für 1000 Hz und 3000 Hz sofort, daß mit zunehmender Frequenz die Schallschwächung größer wird - ein Grund dafür, daß mit dem TWP/RASS größere Meßhöhen erreicht werden. Das Maximum der Schallabsorption ist

stark temperaturabhängig und variiert außerdem erheblich mit der relativen Luftfeuchte. Für den in Mitteleuropa zu erwartenden Feuchte- und Temperaturbereich variiert die Schallschwächung zwischen 5 und 45 dB/1000 m bei 3000 Hz und zwischen 2 und 14 dB/1000 m bei 1000 Hz.

Für die Abschätzung der „excess attenuation“ gibt Lataitis (1992) eine Gleichung an, die die Stärke der Turbulenz, den Horizontalwind und die Systemparameter berücksichtigt. Der Horizontalwind hat dabei die größten Auswirkungen auf die Verringerung der Rückstreuleistung, weil mit dem Wind die akustischen Wellenfronten aus dem elektromagnetischen Strahl herauswandern. Dies ist im allgemeinen der die Reichweite am stärksten begrenzende Faktor (vgl. auch Masuda (1988)). Turbulenz führt zu einer Aufweitung des Schallkegels, so daß ohne Horizontalwind die im Radarstrahl zur Rückstreuung beitragende akustische Leistung geringer wird und damit zu einer Reduzierung der Reichweite führt (Clifford and Wang, 1977; Clifford et al., 1978). Jedoch kann beim Auftreten von Wind die turbulenzbedingte Schallaufweitung die Abdrift des Schallkegels zum Teil kompensieren. Mit einer von Lataitis (1992) angegebenen Gleichung wurde diese Art der Schallschwächung für verschiedene Kombinationen von Turbulenzintensität und Horizontalwindgeschwindigkeit berechnet.

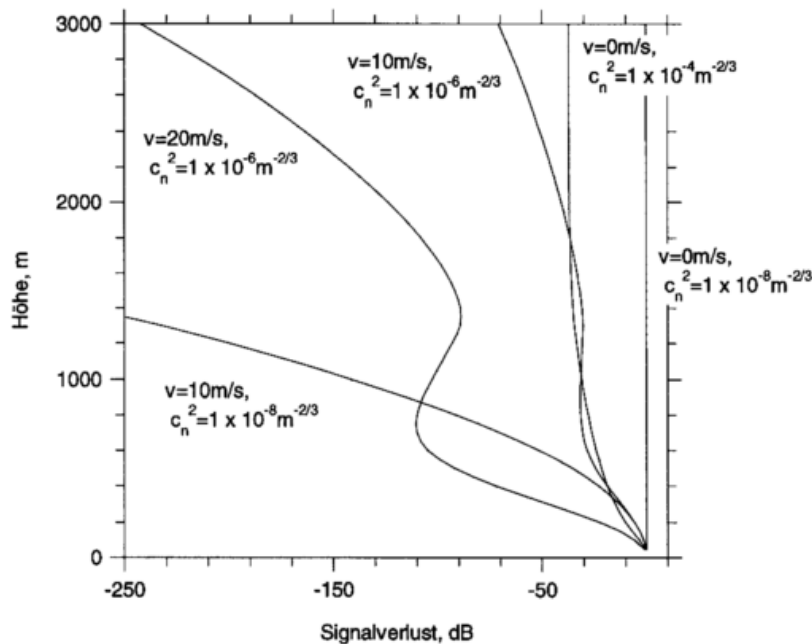


Abbildung 6.5: Durch Turbulenz und Horizontalwind verursachter Signalverlust, berechnet nach Lataitis (1992) für verschiedene Kombinationen von Windgeschwindigkeiten und Turbulenzintensitäten

Bei windstillen Verhältnissen nimmt der Signalverlust mit Zunahme der Turbulenzintensität zu und erreicht bei gut ausgeprägter Turbulenz in diesem Beispiel in 3 km 36 dB. Weht ein

in diesem Beispiel von der Höhe unabhängiger Wind von 10 m/s, so ist eine drastische Zunahme des Signalverlustes zu erkennen. Die Intensität der Turbulenz verhält sich jedoch invers im Vergleich zu den Verhältnissen ohne Wind, d.h., je stärker die Turbulenz, desto geringer der Signalverlust. Einer Reduzierung der Reichweite durch den Horizontalwind wird also durch Turbulenz in gewissen Grenzen entgegenwirkt.

6.2.2 Ergebnisse

Die Abb. 6.6 zeigt die Vertikalprofile der über den gesamten betrachteten Zeitraum gemittelten Verfügbarkeit der virtuellen Temperatur für beide RASS. Der Gesamtmeßbereich erstreckt sich beim LAP/RASS von 200 bis 1400 m, beim TWP/RASS von 500 bis 3800 m. Wie erwartet weist die Verfügbarkeit bei beiden Systemen eine starke Höhenabhängigkeit in der Art auf, daß mit zunehmender Höhe die Verfügbarkeit allmählich abnimmt. Davon ausgenommen ist das jeweils untere Höhentor, bei dem infolge der Empfängererholzeit und des möglicherweise noch nicht vollständigen Überlappens von elektromagnetischem und akustischem Strahl die Verfügbarkeit um 20 % bzw. 40 % geringer ist als in den Höhen darüber. Der häufig als Kriterium für die mittlere vertikale Reichweite zugrundegelegte Wert von 80 % wird beim LAP/RASS in einer Höhe von ca. 700 m und beim TWP/RASS in 2200 m unterschritten. Beide Systeme decken einen unterschiedlichen, sich andererseits jedoch hervorragend ergänzenden vertikalen Bereich ab, entsprechend ihren unterschiedlichen Systemparametern und der unterschiedlich stark wirkenden Schallschwächung.

Tages- und jahreszeitliches Verhalten

Die mittleren Verfügbarkeiten zeigen einen systematischen Jahresgang (Abb. C.5). Sowohl beim LAP/RASS als auch beim TWP/RASS werden die größten Meßhöhen in den Sommermonaten und die niedrigsten Meßhöhen in den Wintermonaten erreicht, wobei die Höhe mit einer Verfügbarkeit $> 80\%$ um etwa 400 m beim LAP/RASS und um etwa 1 km beim TWP/RASS im Laufe des Jahres schwankt. Die Unterschiede zwischen den Jahreszeiten können in erster Linie durch den Jahresgang der mittleren Windgeschwindigkeiten und deren eingangs diskutierten Einfluß auf die Verfügbarkeit erklärt werden. Außerdem dürfte auch die im Sommer stärker ausgeprägte Turbulenz einen positiven Einfluß auf die Reichweite haben.

Weniger stark ausgeprägt ist der Gang der Verfügbarkeit im Verlauf eines Tages (Abb. C.6). Die Isolinien der 80 %-Verfügbarkeit schwanken über den Tag um 500 m beim TWP/RASS und etwa 180 m beim LAP/RASS, wobei bei beiden Systemen das Maximum in der Verfügbarkeit um die Mittagszeit herum auftritt. Erklärbar ist der Tagesgang durch die am

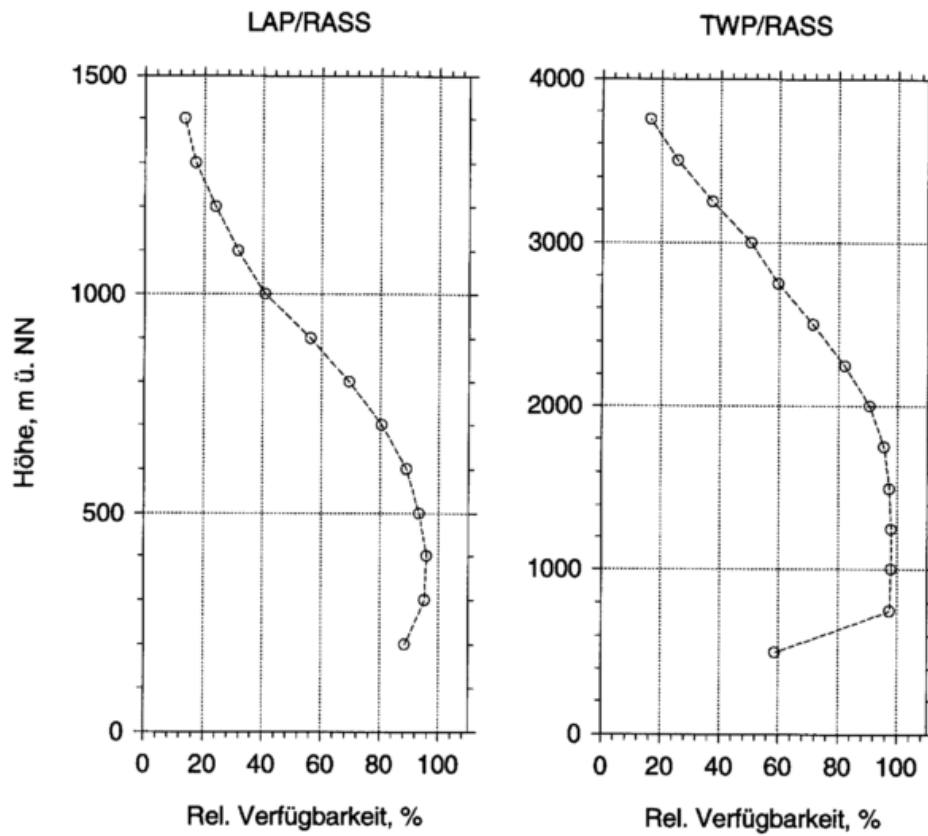


Abbildung 6.6: Vertikalprofile der mittleren Verfügbarkeit der virtuellen Temperatur, gemessen mit dem LAP/RASS(links) von November 1993 bis Oktober 1996 und dem TWP/RASS(rechts) von Januar bis Dezember 1997

Tage stärker ausgeprägte Turbulenz und den damit verbundenen positiven Einfluß auf die vertikale Reichweite.

Kapitel 7

Schlußfolgerungen

Windprofiler/RASS (WPR/RASS) sind bodengebundene Fernerkundungssysteme, die Vertikalprofile von Wind und Temperatur mit einer hohen zeitlichen und vertikalen Auflösung messen und damit Daten für viele Anwendungen, insbesondere der numerischen Wettervorhersage bereitstellen können. Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung der Meßgenauigkeit und deren Verbesserung sowie die Analyse der Verfügbarkeit von Windprofiler-Radar/RASS-Daten auf der Grundlage mehrjähriger Messungen eines 1290 MHz WPR/RASS (LAP) und eines 482 MHz WPR/RASS (TWP) am Meteorologischen Observatorium Lindenberg (MOL). Die Beurteilung der Meßgenauigkeit erfolgte schwerpunktmäßig durch Vergleiche mit viermal täglich am MOL durchgeführten Rawinsondierungen (Windbestimmung mittels „Trackingradar“). Darüber hinaus wurden Vergleiche mit den Ergebnissen eines numerischen Wettervorhersagemodells für den Gitterpunkt Lindenberg durchgeführt. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Genauigkeit der Windmessung mit UHF-Windprofiler-Radar

Es wurde festgestellt, daß der horizontale Windvektor durch UHF-Windprofiler-Radar mit einer Genauigkeit gemessen wird, die gleich, in größeren Höhen sogar besser als die Meßgenauigkeit von Rawinsondierungen ist.

Die systematischen Abweichungen zur Rawinsonde sind bei der Windgeschwindigkeit, unabhängig vom Meßsystem und vom Meßmode, in allen Höhen in ihrem Betrag kleiner 0,5 m/s und bei der Windrichtung, mit Ausnahme der untersten Höhen, geringer als 2°. Die Standardabweichung der Differenzen variiert zwischen 1,2 m/s und 2 m/s. Unter Berücksichtigung des Meßfehlers der Rawinsonde und der atmosphärischen Variabilität kann somit ein zufälliger Meßfehler der UHF-WPR von kleiner 1 m/s angegeben werden. Vergleiche der Windprofiler- und der Rawinsondenmessungen mit Modellanalyse- und Vorhersagefeldern

zeigten in größeren Höhen eine bessere Übereinstimmung zwischen WPR und Modell als zwischen Rawinsonden und Modell. Dies ist durch eine bessere Meßgenauigkeit von WPR gegenüber Rawinsondierungen zu erklären, bei denen einerseits der Meßfehler mit der Höhe zunimmt, andererseits die horizontale Entfernung des Ballons zu den für das Modell relevanten Koordinaten der Rawinsondenstation wächst.

Eine signifikante Abhängigkeit der Meßgenauigkeit von der Tages- und Jahreszeit wurde nicht festgestellt. Lediglich beim LAP High Mode waren etwa 2 % aller Messungen durch Vogelzug kontaminiert. Durch neue Auswertalgorithmen und eine günstige Wahl der Betriebsparameter wurden derartige Störeinflüsse weitgehend eliminiert.

Das Auftreten von Niederschlag hat im allgemeinen eine Verschlechterung der Meßgenauigkeit zur Folge. Moderne, zum Teil bereits existierende Momentschätzalgorithmen können dazu beitragen, die Meßgenauigkeit von WPR bei Niederschlag zu verbessern. Die Implementierung in Routineauswertprogramme steht jedoch noch aus.

Zur weiteren Verbesserung der Windmeßgenauigkeit durch WPR sind zukünftig die Ursachen für das höhenabhängige Verhalten der Windgeschwindigkeitsabweichungen im Vergleich zur Rawinsonde sowie die Abhängigkeit dieser Abweichungen von der Windgeschwindigkeit zu untersuchen.

Genauigkeit der Temperaturmessung mit RASS

Die Messung der virtuellen Temperatur mit dem RASS ist bei Verwendung der derzeit allgemein gebräuchlichen Auswertalgorithmen im Vergleich zu Radiosondierungen durch einen höhenabhängigen systematischen Fehler gekennzeichnet. Dabei wird in mittleren und oberen Höhen eine Überschätzung der Temperatur um bis zu 1 K und in den unteren Höhen ein falscher (d.h. zu geringer) Temperaturgradient beobachtet. In der Literatur vorgeschlagene Korrekturen konnten diesen Fehler bislang nicht erklären bzw. eliminieren.

Verbesserung der Temperaturmeßgenauigkeit

In der vorliegenden Arbeit wurde gezeigt, daß trotz der Anwendung der in der Literatur vorgeschlagenen Korrekturen der vor allem in den unteren Höhen auftretende Temperaturmeßfehler auf eine an die Volumenmessung des RASS nicht angepaßte Höhenzuordnung zurückzuführen ist. Deshalb wurde über die bekannte Vertikalwindkorrektur und die exakte Bestimmung der in der Auswertung benutzten Konstanten hinaus eine entsprechende Höhen-Korrektur unter Berücksichtigung der Höhengewichtsfunktion und des Profils der Reflektivität entwickelt. Im Ergebnis dieser Korrektur konnte eine deutliche Reduzierung der systematischen Abweichung zur Radiosonde und eine nahezu vollständige Eliminierung

der Höhenabhängigkeit des Fehlers erreicht werden. Darüber hinaus führte die Korrektur zu einer Abnahme des zufälligen Fehlers von RASS-Temperaturmessungen.

Die systematische Abweichung zur Radiosonde betrug bei beiden Systemen nach Anwendung dieser Korrektur, der Vertikalwindkorrektur und der Berücksichtigung genauerer Konstanten in der Herleitung der virtuellen Temperatur aus der Schallgeschwindigkeit im gesamten Höhenbereich weniger als 0,3 K, die Standardabweichung lag im Bereich zwischen 0,4 und 0,75 K. Durch eine Steigerung der Genauigkeit der Vertikalwindmessung durch WPR/RASS, insbesondere durch Vermeidung des bei WPR/RASS auftretenden negativen Bias des mittleren Vertikalwindes, kann eine weitere Verbesserung der Temperaturmeßgenauigkeit erreicht werden. Weiterhin wurde gezeigt, daß die in der Literatur nur für positive Temperaturen angegebene Konstantenkorrektur in erster Näherung auch auf den negativen Temperaturbereich ausgedehnt werden kann, um somit eine routinemäßige Anwendung zu ermöglichen.

Der Temperaturmeßfehler des RASS konnte damit soweit reduziert werden, daß die Meßgenauigkeit zahlreichen Anforderungen in der Meteorologie, u.a. der numerischen Wettervorhersage, genügt.

Verfügbarkeit von Windprofiler-Radar/RASS-Messungen

Der vertikale Meßbereich von Windprofiler-Radar/RASS und dessen zeitliche Schwankungen werden wesentlich durch die Systemeigenschaften und die atmosphärischen Bedingungen bestimmt. Mit dem TWP ist es möglich, den Wind mit einer vertikalen Auflösung von 500 m (High Mode) bis in eine Höhe von ca. 10 km mit einer Verfügbarkeit von 80 % und bis 12 km mit einer Verfügbarkeit von 70 % zu messen. Bei einer Halbierung der Auflösung (Low Mode) wird ein Meßbereich von 500 m bis nahe 8 km abgedeckt. Der LAP, ausgelegt für Messungen in der Grenzschicht, liefert Meßwerte in einer im Vergleich zum TWP nochmals gesteigerten vertikalen Auflösung von 100 m im Höhenbereich von 200 m bis ca. 1 km.

Die Temperaturmessung erreicht auf Grund der Schwächung akustischer Wellen in der Atmosphäre nicht die Meßhöhen der Windprofiler. Legt man eine Verfügbarkeit von größer 80 % zugrunde, erstreckt sich der kombinierte Meßbereich beider WPR/RASS von 200 m bis 2200 m.

Mit den hier betrachteten Systemen ist eine kontinuierliche Sondierung des Windes innerhalb der Troposphäre und der virtuellen Temperatur im Bereich der Grenzschicht möglich. Systembedingt setzten die Messungen erst in einer Höhe von 200 m bis 400 m ein, so daß der Bereich vom Boden bis zu diesen Höhen durch andere Meßsysteme (Mast, Sodar/RASS) abgedeckt werden muß.

Tages- und jahreszeitliche Variationen wurden bei der Windmessung des LAP und bei der Temperaturmessung beider RASS mit Maxima zur Mittagszeit bzw. in den Sommermonaten beobachtet.

Schlußfolgerungen für den operationellen Einsatz von Windprofiler-Radar/RASS

Die Genauigkeit von Windprofiler-Radar Messungen ist beim gegenwärtigen Entwicklungsstand vergleichbar mit der von Rawinsondenmessungen, jedoch mit der für zeitlich hochauflösende Modelle wichtigen Eigenschaft, kontinuierlich Vertikalprofile des Windes bereitzustellen. Infolge der gegenwärtig international unternommenen Anstrengungen zur Weiterentwicklung der Auswertalgorithmen ist zukünftig mit einer weiteren Verbesserung der Meßgenauigkeit zu rechnen.

Die Temperaturmeßgenauigkeit des RASS konnte durch die in dieser Arbeit entwickelte Höhen-Korrektur signifikant verbessert werden. Vor einer routinemäßigen Nutzung der RASS-Messungen sind jedoch die entsprechenden Korrekturalgorithmen in den Routine-Auswerteprogrammen der Systeme zu implementieren. Für die erfolgreiche Anwendung der Vertikalwind-Korrektur bedarf es dazu außerdem einer zuverlässigen automatischen Niederschlagserkennung.

Dem vertikalen Meßbereich sind systembedingt sowohl nach unten als auch nach oben Grenzen gesetzt, so daß die Ergänzung von WPR/RASS mit anderen, vorzugsweise indirekt messenden Systemen, zu empfehlen ist. Um beispielsweise die Lücke vom Boden bis zum ersten Höhentor von WPR/RASS zu schließen, bietet sich der Einsatz von Sodar/RASS an. Den zukünftig, insbesondere durch die numerische Wettervorhersage gestellten Anforderungen an aerologische Daten kann daher nur durch eine Kombination von direkt und indirekt messenden Systemen entsprochen werden.

Literaturverzeichnis

- Angevine, W. and Ecklund, W., Errors in radio acoustic sounding of temperature, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 11, 837 – 842, 1994.
- Angevine, W., Ecklund, D., Carter, D., and Gage, K., Improved radio acoustic sounding technics, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 11, 42 – 49, 1994.
- Angevine, W. M., Errors in mean vertical velocities measured by boundary layer wind profilers, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 14, 565–569, 1997.
- Angevine, W. M., Bakwin, P. S., and Davis, K. J., Wind profiler and RASS measurements compared with measurements from a 450-m-tall tower, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 15, 818 – 825, 1998.
- Antikainen, V. and Hyvönen, V., The accuracy of Vaisala RS 80 radiosonde, in *Proceedings 5th Symposium of Meteorological Observations and Instrumentation, Toronto*, pp. 134–140, 1983.
- Astin, I. and Thomas, L., The accuracy and precision of radar wind measurements, in *Fifth Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST radars*, pp. 15–19, Aberystwyth, 1991.
- Atlas, D., Indirect probing techniques, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 43, 457–466, 1962.
- Atlas, D., *Radar in Meteorology*, American Meteorological Society, 45 Beacon Street, Boston, MA02176, 1990.
- Barth, M., Chadwick, R., and van de Kamp, D., Data processing algorithms used by NOAA's wind profiler demonstration network, *Annales Geophysicae*, 12, 518–528, 1994.
- Bauer-Pfundstein, M., *Bestimmung von Turbulenzparametern und der Schallabsorption mit einem Wind-Temperatur-RADAR*, Ph.D. thesis, Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Forschungszentrum Karlsruhe und Universität Karlsruhe, 1998.

- Bean, B. R. and Dutton, E. J., *Radio Meteorology*, U.S. Government Printing Office, Washington, D. C., 1966.
- Beyrich, F., Görsdorf, U., Neisser, J., Steinhagen, H., and Weisensee, U., Results from a three-month intercomparison of boundary layer wind profiler and sodar wind measurements at Lindenberg, *Meteorol. Zeitschrift, N.F.* 7, 220-225, 1998.
- Bonino, G., Lombardini, P., and Trivero, P., A metric wave radio-acoustic tropospheric sounder, Tech. rep., 1979.
- Bruderer, B. and Liechti, F., Richtungsverhalten nachziehender Vögel in Süddeutschland und der Schweiz unter besonderer Berücksichtigung des Windeinflusses, *Orn. Beob.*, 87, 271-293, 1990.
- Christoph, A., Optimierung des Radio-Akustischen Sondierungssystems (RASS) bezüglich der maximalen Verfügbarkeit der virtuellen Temperatur, Werkvertrag, 1995.
- Clifford, S. F. and Wang, T., The range limitation on radar acoustic sounding systems (rass) due to atmospheric refractive turbulence, Tech. rep., 1977.
- Clifford, S. F., Wang, T., and Priestley, J. T., Spot size of the radar return from a radar-acoustic sounding system (RASS) due to atmospheric refractive turbulence, *Radio Sci.*, 13, 985-989, 1978.
- Collwell, R. C. and Friend, A. W., Reflection of medium and short radio waves in the troposphere, *Nature*, 144, 31, 1939.
- Cramer, O., The variation of the specific heat ratio and the speed of sound in air with temperature, pressure, humidity, and CO_2 concentration, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 93, 2510-2516, 1993.
- Delany, M. E., Sound propagation in the atmosphere: A historical review, *Acustica*, 38, 201-223, 1977.
- Dicke, R. H., Beringer, R., Kyhl, R. L., and Vane, A. B., Atmospheric absorption measurements with a microwave radiometer, *Phys. Rev.*, 70, 340 - 348, 1946.
- Doviak, R. J. and Zrnic, D. S., *Doppler Radar and Weather Observations*, Academic Press, 1993.
- Dzingel, M. and Leiterer, U., Untersuchungen über Genauigkeit und Korrekturmöglichkeiten für die Feuchtesondierung mit dem A-Humicap der Sonde RS80, 15 S., Tech. rep., Meteorologisches Observatorium Lindenberg, 1995.

- Ecklund, W. L., Carter, D. A., and Gage, K. S., Sounding of the lower atmosphere with a portable 50 MHz coherent radar, *J. Geophys. Res.*, 82, 4969–4971, 1977.
- Ecklund, W. L., Carter, D. A., and Balsley, B. B., A UHF wind profiler for the boundary layer: Brief description and initial results, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 5, 432–441, 1988.
- Ecklund, W. L., Carter, D. A., Balsley, B. B., Currier, P. E., Green, J. L., Weber, B. L., and Gage, K. S., Field tests of a lower tropospheric wind profiler, *Radio Sci.*, 25(5), 899–906, 1990.
- Engelbart, D., Görzdorf, U., and Ruhe, W., Effects and observation of migrating birds on a boundary-layer windprofiler in Eastern Germany, *Meteorol. Zeitschrift, N.F.* 7, 280–287, 1998.
- Friend, A. W., Continuous determination of air-mass boundaries by radio, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 20, 202–205, 1939.
- Fukao, S., Sato, T., May, P. T., Tsuda, T., and Kato, S., A systematic error in MST/ST radar wind measurements induced by a finite range volume effect. 1. observational results, *Radio Sci.*, 23(1), 59–82, 1988.
- Görzdorf, U., About the accuracy of temperature measurements with RASS, *Meteorol. Zeitschrift, N.F.* 7, 241–247, 1998.
- Gossard, E. E. and Strauch, R. G., *Radar Observations of Clear Air and Clouds*, Elsevier, 1983.
- Gossard, E. E., Welsh, D. C., and Strauch, R. G., Radar measured height profiles of c_n^2 and turbulence dissipation rate compared with radiosonde data during October 1989 at Denver, *NOAA Technical Report, ERL 442-WPL 63*, 115, 1990.
- Griesser, T., *Multipeakanalyse von Dopplerspektren aus Windprofiler-Radar-Messungen*, Ph.D. thesis, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 1998.
- Hardy, K. R., Atlas, D., and Glover, K. M., Multiwavelength backscatter from the clear atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 71, 1537–1552, 1966.
- Hart, H., Lotze, W., and Woschni, E. G., *Meßgenauigkeit*, VEB Verlag Technik Berlin, 1989.
- Herden, S., *Korrektur der Höhenzuordnung der Daten eines Wind-Temperatur-Radars*, Master's thesis, Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Universität Karlsruhe, Forschungszentrum Karlsruhe, 1996.

- Hildebrand, P. H. and Sekhon, R., Objective determination of the noise level in Doppler spectra, *J. Appl. Meteorol.*, *13*, 808–811, 1974.
- Hirsch, L., Radarinterferometrie-Messungen mit dem Windprofiler des Meteorologischen Observatoriums Lindenberg Vol.2, Tech. rep., Meteorologisches Observatorium Lindenberg, 1995.
- Hocking, W. K., Rüster, R., and Czechowsky, P., Absolute reflectivity and aspect sensitivities of VHF radio wave scatters measured with SOUSY radar, *J. Atmos. Terr. Phys.*, *48*, 131–144, 1986.
- Hocking, W. K., Fukao, S., Tsuda, T., Yamamoto, M., Sato, T., and Kato, S., Aspect sensitivity of stratospheric VHF radio wave scatters, particularly above 15 km altitude, *Radio Sci.*, *25*, 613–627, 1990.
- Ito, Y., Errors in wind measurements estimated by five-beam phased array Doppler sodar, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, *14*, 792–801, 1997.
- Jordan, J. R., Lataitis, R. J., and Carter, D. A., Removing ground and intermittent clutter contamination from wind profiler signals using wavelet transformation, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, *14*, 1280–1297, 1997.
- Jungnickel, B.-J., *Messen und Information in der Experimentalphysik*, BI Wissenschaftsverlag, 1994.
- Kaimal, J. C. and Gaynor, J. E., Another look at sonic thermometry, *Bound.-Layer Met.*, *56*, 401–410, 1991.
- Kallistratova, M. A. and Kon, A. I., *Radioakusticeskoe sondirovanie atmosfery*, Akademie der Wissenschaften der UdSSR, Institut für Physik der Atmosphäre, 1985.
- Kitchen, M., Representativeness errors for radiosonde observations, *Q. J. Meteorol. Soc.*, *115*, 673–700, 1989.
- Klein Baltink, H., A long-term intercomparison of windprofiler/RASS and tower measurements, *Meteorol. Zeitschrift, N. F.* *7*, 271 – 279, 1998.
- Klocke, B., Vertikalwindbestimmung mittels Windprofiler, Tech. rep., Deutscher Wetterdienst, Meteorologisches Observatorium Lindenberg, 1996.
- Klose, B. and Hübel, B., Windprofile in der unteren Troposphäre nach Feinauswertung primärer Radiosondendaten, *Z. Meteorol.*, *33*, 315–321, 1983.

- Kon, A. I., A bistatic radar-acoustic atmospheric-sounding system, *Bull. Acad. Science USSR, Atmosph. Ocean. Physics*, 17, 481-484, 1981.
- Kon, A. I. and Nalbandyan, O. G., Radio-acoustic sounding of the atmosphere with continuous acoustic radiation, *Bull. Acad. Science USSR, Atmosph. Ocean. Physics*, 14, 583-588, 1978.
- Kropfli, R., Katz, I., Konrad, T., and Dobson, E., Simultaneous radar reflectivity measurements and refractive index spectra in the clear atmosphere, *Radio Sci.*, 3, 991-994, 1968.
- Lataitis, R. J., Signal power for radio acoustic sounding of temperature: The effect of horizontal winds, turbulence, and vertical temperature gradients, *Radio Sci.*, 27(3), 369-385, 1992.
- Lataitis, R. J., Theory of a radio-acoustic sounding system (RASS), Tech. Rep. NOAA Technical Memorandum ERL WPL-230, NOAA, 1993.
- Law, D. C., Effects of precipitation, convection, and waves on NOAA network profilers, in *Preprints, 25th International Conference on Radar Meteorology*, Amer. Meteorol. Soc., Boston, Mass., 1991.
- Leiterer, U., Dier, H., and Naebert, T., Improvements in Radiosonde Humidity Profiles Using RS80/RS90 Radiosondes of Vaisala, *Beitr. Phys. Atmos.*, 70, 319-336, 1997.
- Low, D. J., Reid, I. M., Vincent, R. A., and May, P. T., Predicting VHF wind profiler performance from (p,T,q) soundings, in *Proceedings of the Eighth Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar*, pp. 294-297, 1997.
- Ludloff, A., *Handbuch Radar und Radarsignalverarbeitung*, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, 1993.
- Makarova, T. I., Measurement of temperature profiles in the surface layer of the atmosphere by radar-acoustic sounding, *Bull. Acad. Science USSR, Atmosph. Ocean. Physics*, 16(6), 453-455, 1980.
- Marshall, J. M., Peterson, A. M., and Barnes, A. A., Combined radar-acoustic sounding system, *Appl. Opt.*, 11, 108-112, 1972.
- Masuda, Y., Influence of wind and temperature on the height limit of a radio acoustic sounding system, *Radio Sci.*, 23, 647-654, 1988.

- Matuura, N., Masuda, Y., Inuki, H., Kato, S., Fukao, S., and Tsuda, T., Radio acoustic measurement of temperature profiles in the troposphere and stratosphere, *Nature*, *323*, 426–428, 1986.
- May, P. T., The accuracy of RASS temperature measurements, *J. Appl. Meteorol.*, *28*, 1329–1335, 1989.
- May, P. T. and Strauch, R. G., An examination of wind profiler signal processing algorithms, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, *6*, 731–735, 1989.
- May, P. T., Strauch, R. G., and Moran, K. P., The altitude coverage of temperature measurements using RASS with wind profiler radars., *Geophys. Res. Lett.*, *15*, 1381–1384, 1988.
- May, P. T., Sato, T., Yamamoto, M., Kato, S., Tsuda, T., and Fukao, S., Errors in the determination of wind speed by Doppler radar, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, *6*, 235–242, 1989.
- May, P. T., Strauch, R. G., Moran, K. P., and Ecklund, W. L., Temperature sounding by RASS with wind profiler radars: A preliminary study, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *28*(1), 19 – 27, 1990.
- Merritt, D. A., A statistical averaging method for wind profiler Doppler spectra, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, *12*(5), 985–995, 1995.
- Miller, P. A., Collander, R. S., and Barth, M. F., Evaluating the performance of the first RASS in NOAA's wind profiler demonstration network, in *3rd Sympos. Troposph. Profiling, Needs and Technologies, Hamburg, 1994*, pp. 240–242, Hamburg, 1994.
- Moran, K. P. and Strauch, R. G., The accuracy of RASS temperature measurements corrected for vertical air motion, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, *11*, 995–1001, 1994.
- Muschinski, A., The first moments of the variance- and cross-spectra of standard and interferometric clear-air-doppler-radar signals, Tech. Rep. NCAR/TN-441+STR, National Center for Atmospheric Research Boulder, Colorado, 1998.
- Nalbandyan, O. G., The theory of radioacoustic sensing of the atmosphere, *Bull. Acad. Science., Atmosph. Ocean. Phys.*, *13*, 172–177, 1977.
- Nash, J. and Lyth, D., Quality evaluation of time series of upper winds, in *Extended Abstracts -COST-76 Profiler Workshop, Engelberg 1997*, edited by H. Richner, pp. 239–242, 1997.
- Nathanson, F. E., *Radar Design Principles*, McGraw-Hill, New York, 1969.

- Oakley, T., Glennie, A., and Jerret, D., CWINDE97 - report from project office, in *Extended Abstracts - COST-76 Profiler Workshop 1997*, Engelberg, edited by H. Richner, 1997.
- Ottersten, H., Mean vertical gradient of potential refractive index in turbulent mixing and radar detection of CAT, *Radio Sci.*, 4(12), 1247-1249, 1969.
- Petenko, I., Improvement of the accuracy of the virtual temperature determined with radio-acoustic-sounding-system (RASS), Tech. rep., Meteorologisches Observatorium Lindenberg, 1997.
- Petenko, I., Improved estimation of RASS-measured temperature correction, in *Proceedings of the 9th International Symposium on Acoustic Remote Sensing and Associated Techniques of the Atmosphere and Oceans (ISARS'98)*, edited by E. Mursch-Radlgruber and P. Seibert, pp. 154-159, Institute for Meteorology and Physics, BOKU, Vienna, Austria, 1998.
- Peters, G., Second-order Doppler shift of RASS echoes, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 11, 594-598, 1994.
- Peters, G. and Angevine, W., On the correction of RASS-temperature errors due to turbulence, *Beitr. Phys. Atmos.*, 69, 81-96, 1996.
- Peters, G., Timmermann, H., and Hinzpeter, H., Temperature sounding in the planetary boundary layer by RASS-system: Analysis and results, *Int. J. Remote sensing*, 4(1), 49 - 63, 1983.
- Peters, G., Kirtzel, H. J., Fischer, B., and Schlotfeld, T., A small RASS - as an extension of a doppler sodar, 1996.
- Ralph, F. M., Using radar-measured radial vertical velocities to distinguish precipitation scattering from clear air scattering, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 12, 257-267, 1995.
- Richter, C., *Niederschlagsmessung mit dem vertikal ausgerichteten FM-CW-Dopplerradar-RASS-System - Validierung und Anwendung*, Ph.D. thesis, Universität Hamburg, 1993.
- Richter, C. and Peters, G., Deriving rainfall parameters by using a Doppler radar-RASS system at vertical incidence, *Extended Abstracts, 3rd Internat. Symposium on Tropospheric Profiling: Needs and Technologies*, pp. 453-455, 1994.
- Riddle, A. C., Angevine, W. M., Ecklund, W. L., Miller, E. R., Parson, D. B., Carter, D. A., and Gage, K. S., In-situ and remotely-sensed horizontal winds and temperature intercomparisons obtained using integrated sounding systems during TOGA COARE, *Beitr. Phys. Atmos.*, 69, 49-61, 1996.

- Röttger, J. and Larsen, M., UHF/VHF radar techniques for atmospheric research and wind profiler applications, in *Radar in Meteorology*, chap. 21a, pp. 235–281, American Meteorological Society, Boston, 1990.
- Schlatter, T. W. and Zbar, F. S., *Windprofiler assessment report and recommendations for future use.*, Department of Commerce NOAA, Silver Spring, Maryland, 1994.
- Schmidt, G., Rüster, R., and Czechowsky, P., Complementary code and digital filtering for detection of weak VHF radar signals from the Mesosphere, *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, *GE-17*(4), 154–161, 1979.
- Serafin, R. J., *Meteorological radars*, chap. 23, pp. 23.1–23.28, McGraw-Hill, Inc., Skolnik, M. I. edn., 1990.
- Steinhagen, H., Christoph, A., Czechowsky, P., Görsdorf, U., Gube-Lenhardt, M., Lippmann, J., Neisser, J., Rüster, R., Schmidt, G., Wergen, W., and Yoe, J. G., Field campaign for the comparison of SOUSY radar wind measurements with rawinsonde and model data, *Ann. Geophys.*, *12*, 746–764, 1994.
- Steinhagen, H., Christoph, A., Engelbart, D., Görsdorf, U., Hirsch, L., Lippmann, J., Neisser, J., and Wergen, W., Analyse klimatisch relevanter Prozesse in der Troposphäre mit Hilfe bodengebundener Fernerkundungsmethoden (Windprofiler/RASS) -Abschlußbericht des Forschungsvorhabens 07 kft 80, Tech. rep., Deutscher Wetterdienst, Meteorologisches Observatorium Lindenberg, 1995.
- Strauch, R. G., Merritt, D. A., Moran, K. P., Earnshaw, K. B., and van de Kamp, D., The Colorado wind profiling network, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, *1*, 37–49, 1984.
- Strauch, R. G., Weber, B. L., Frisch, A. S., Little, C. G., Merritt, D. A., Moran, K. P., and Welsh, D. C., The precision and relative accuracy of profiler wind measurements, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, *4*, 563–571, 1987.
- Stull, R. B., *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands, 1988.
- Tatarskii, V. I., *Wave propagation in a turbulent medium*, McGraw-Hill, 1961.
- Tatarskii, V. I., *The Effects of the Turbulent Atmosphere on Wave Propagation*, Israel Program for Scientific Translations, 1971.
- Ulrych, P., *Optimierung eines radioakustischen Sondierungssystems*, Master's thesis, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Sozialwesen Zittau/Görlitz (F/H), 1995.

- van Baelen, J. S., Radar interferometry technique: Three-dimensional wind measurement theory, *Radio Sci.*, *26*, 1209–1218, 1991.
- Weber, B. L. and Wuertz, D. B., Comparison of rawinsonde and wind profiler radar measurements, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, *7*, 157–174, 1990.
- Weber, B. L. and Wuertz, D. C., Quality control algorithm for profiler measurements of winds and temperatures, Tech. Rep. NOAA Tech. Memor. ERL WPL-212, U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Boulder, CO., USA, 1991.
- Weber, B. L., Wuertz, D. B., Law, D. C., Frisch, A. S., and Brown, J. M., Effects of small-scale vertical motion on radar measurements of wind and temperature profiles, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, *9*(3), 193–209, 1992.
- Weber, B. L., Wuertz, D. B., Welsh, D. C., and McPeck, R., Quality controls for profiler measurements of winds and RASS temperatures, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, *10*, 452–464, 1993.
- Wilczak, J. M., Strauch, R. G., Ralph, F. M., Weber, B. L., Merritt, D. A., Jordan, J. R., Wolfe, D. E., Lewis, L. K., Wuertz, D. B., Gaynor, J. E., McLaughlin, S. A., Rogers, R. R., Riddle, A. C., and Dye, T. S., Contamination of wind profiler data by migrating birds: Characteristics of corrupted data and potential solutions, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, *12*, 449–467, 1995.
- Woodman, R. F., Spectral moment estimation in MST radars, *Radio Sci.*, *20*, 1185–1195, 1985.
- Zuckerware, A. J. and Meredith, R. W., Low-frequency absorption of sound in air, *J. Acoust. Soc. Am.*, *78*, 946–955, 1985.

Anhang A

Abbildungen zum Vergleich WPR/RASS - Rawinsonde

Die nachfolgenden Abbildungen enthalten Korrelogramme der vom WPR/RASS und der Rawinsonde gemessenen Windgeschwindigkeiten, Windrichtungen oder virtuellen Temperaturen sowie Häufigkeitsverteilungen der entsprechenden Differenzen. In den Darstellungen wurden Meßwerte des gesamten Zeitraums aus allen verfügbaren Höhenniveaus berücksichtigt. Die Berechnung der linearen Regressionsgeraden erfolgte nach der „Methode der kleinsten absoluten Abweichungen“. Dieses Verfahren ist im Vergleich zur „Methode der kleinsten quadratischen Abweichungen“ wesentlich „robuster“ gegenüber Ausreißern. Die Werte der Rawinsondenmessungen werden in der Regressionsgleichung:

$$y = a + bx \quad (\text{A.1})$$

als unabhängige Variable betrachtet. Sie stellen also die x - Werte dar. Die freien Parameter a und b wurden berechnet und sind in den jeweiligen Abbildungen angegeben.

Die Gauß-Anpassung erfolgte mit der Gleichung:

$$y = A_0 e^{-z^2/2} \quad (\text{A.2})$$

$$\text{mit} \quad (\text{A.3})$$

$$z = \frac{x - A_1}{A_2}$$

worin A_0 , A_1 und A_2 die frei zu bestimmenden Parameter sind. A_1 entspricht dem Erwartungswert μ und A_2 der Dispersion σ .

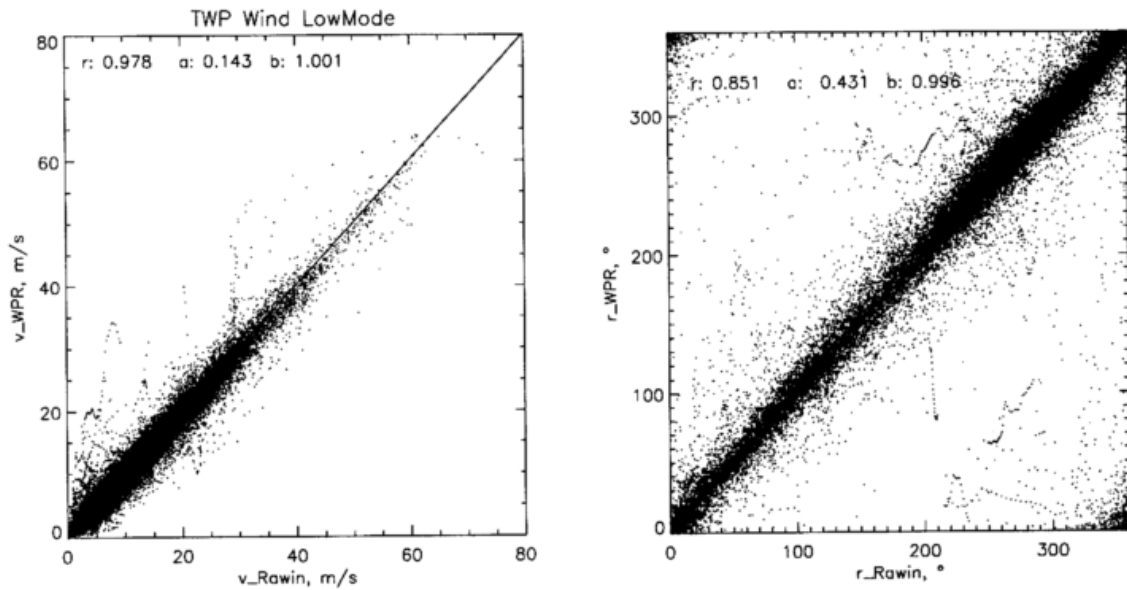


Abbildung A.1: Korrelogramm: Windgeschwindigkeiten (links) und Windrichtungen (rechts) der Rawinsonde und des TWP LowMode sowie die linearen Regressionsgeraden ($y=a+bx$), berechnet für 1127 Vergleiche innerhalb des Zeitraums: Januar bis Dezember 1997.

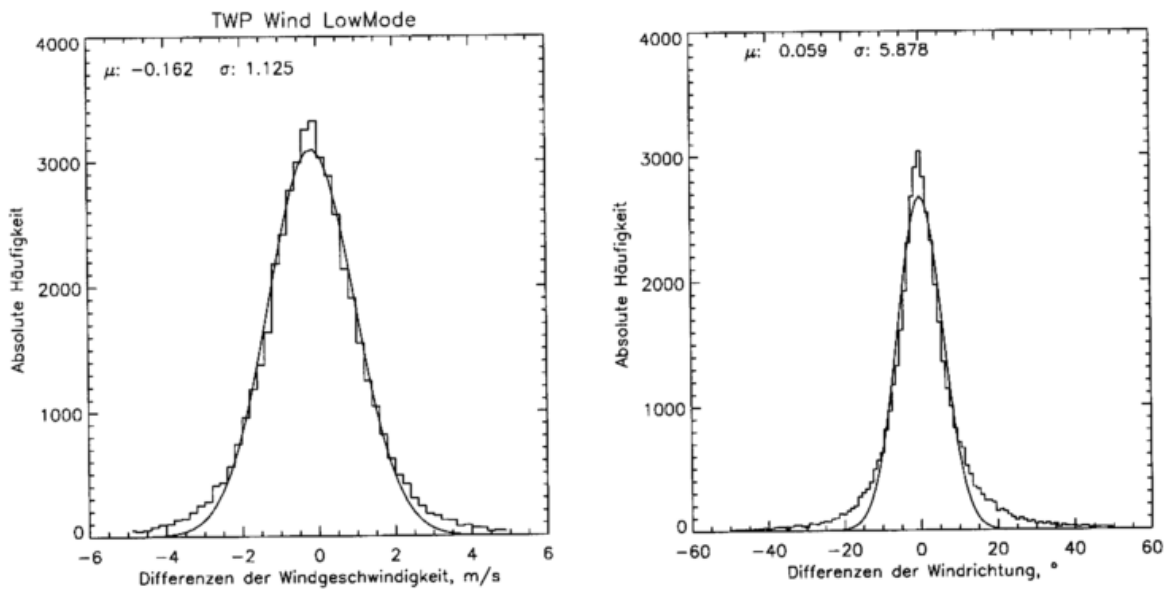


Abbildung A.2: Häufigkeitsverteilung der Windrichtungs- (links) und der Windgeschwindigkeitsdifferenzen (rechts): TWP LowMode - Rawinsonde sowie die angepasste Gauß-Verteilung, berechnet für 1127 Vergleiche innerhalb des Zeitraums: Januar bis Dezember 1997.

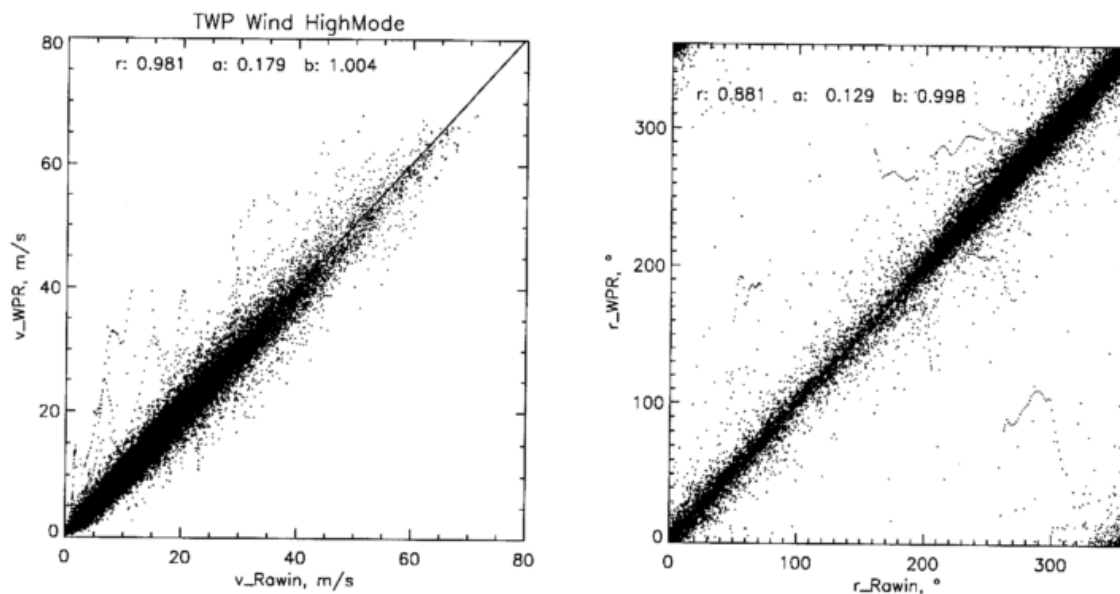


Abbildung A.3: Korrelogramm: Windgeschwindigkeiten (links) und Windrichtungen (rechts) der Rawinsonde und des TWP HighMode sowie die linearen Regressionsgeraden ($y=a+bx$), berechnet für 1089 Vergleiche innerhalb des Zeitraums: Januar bis Dezember 1997.

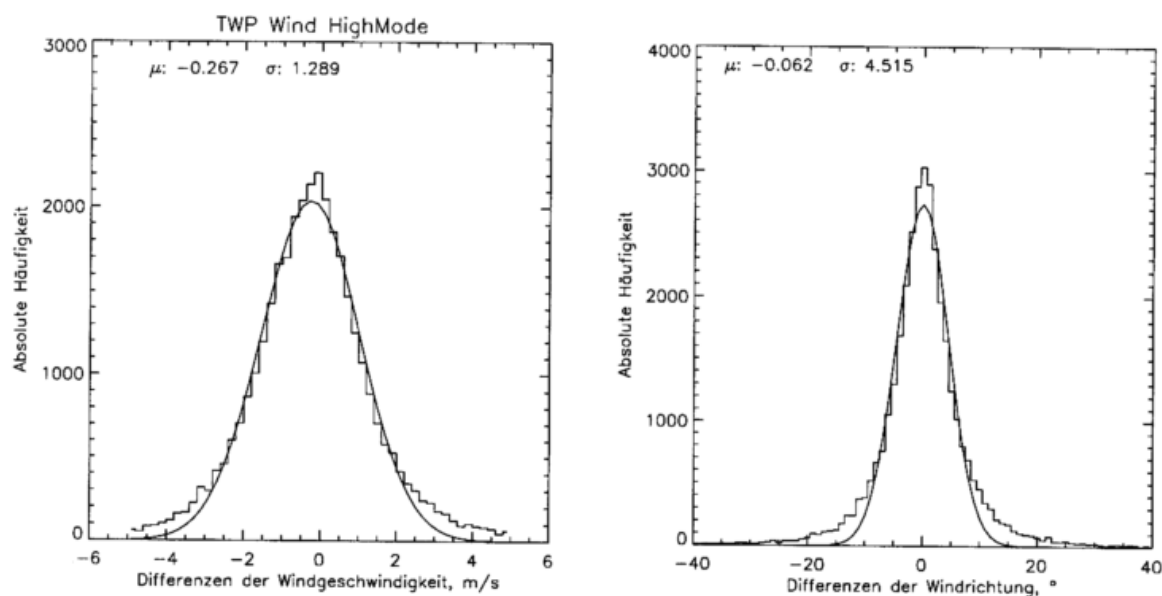


Abbildung A.4: Häufigkeitsverteilung der Windrichtungs- (links) und der Windgeschwindigkeitsdifferenzen (rechts): TWP HighMode - Rawinsonde sowie die angepasste Gauß-Verteilung, berechnet für 1089 Vergleiche innerhalb des Zeitraums: Januar bis Dezember 1997.

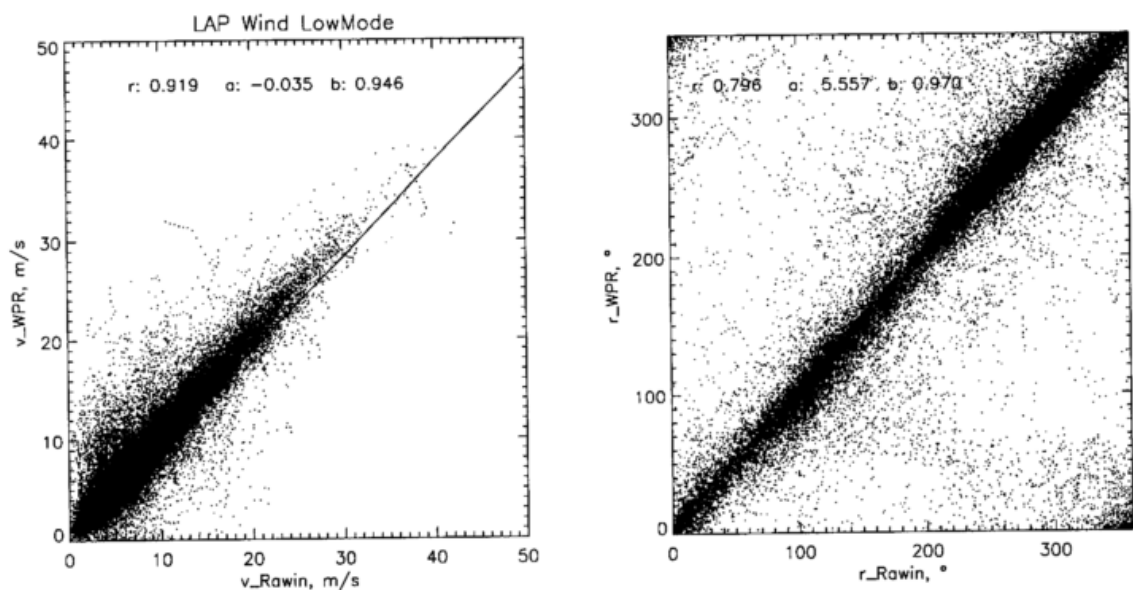


Abbildung A.5: Korrelogramm: Windgeschwindigkeiten (links) und Windrichtungen (rechts) der Rawinsonde und des LAP LowMode sowie die lineare Regressionsgeraden ($y=a+bx$), berechnet aus 3033 Vergleichen innerhalb des Zeitraums: November 1993 bis Oktober 1996.

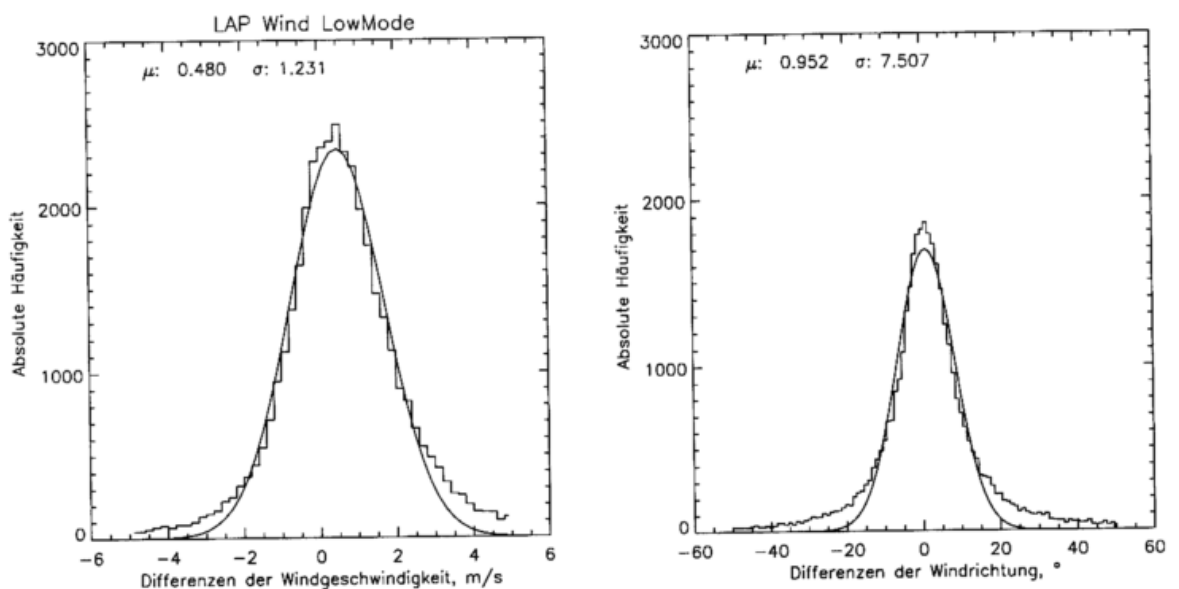


Abbildung A.6: Häufigkeitsverteilung der Windrichtungs- (links) und der Windgeschwindigkeitsdifferenzen (rechts): LAP LowMode - Rawinsonde sowie die angepasste Gauß-Verteilung, berechnet aus 3033 Vergleichen innerhalb des Zeitraums: November 1993 bis Oktober 1996.

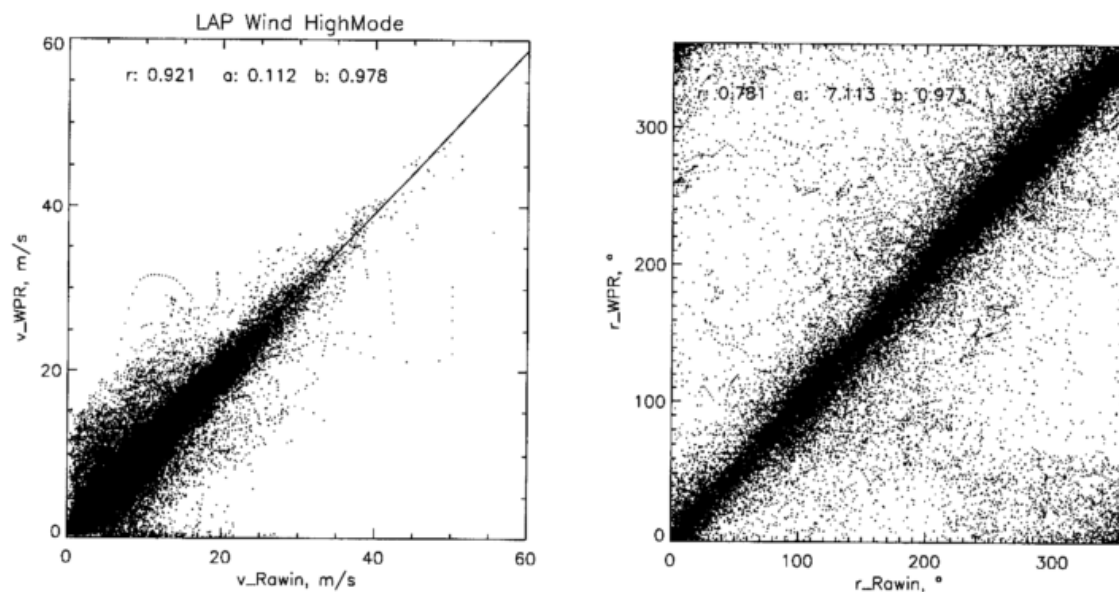


Abbildung A.7: Korrelogramm: Windgeschwindigkeiten (links) und Windrichtungen (rechts) der Rawinsonde und des LAP HighMode sowie die lineare Regressionsgeraden ($y=a+bx$), berechnet aus 3067 Vergleichen innerhalb des Zeitraums: November 1993 bis Oktober 1996.

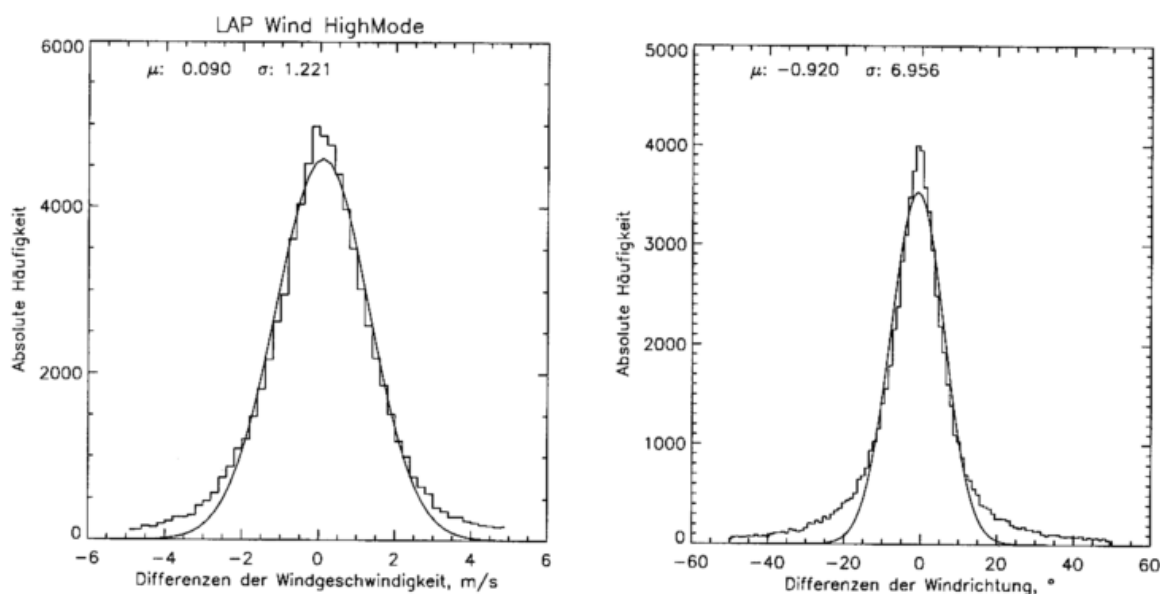


Abbildung A.8: Häufigkeitsverteilung der Windrichtungs- (links) und der Windgeschwindigkeitsdifferenzen (rechts): LAP HighMode - Rawinsonde sowie die angepasste Gauß-Verteilung, berechnet aus 3067 Vergleichen innerhalb des Zeitraums: November 1993 bis Oktober 1996.

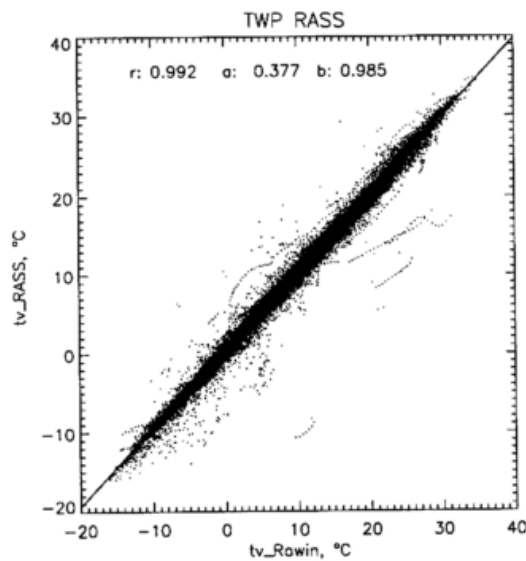


Abbildung A.9: Korrelogramm: Virtuelle Temperaturen der Radiosonde und des LAP RASS sowie die linearen Regressionsgeraden für Juni 1994 bis Oktober 1996.

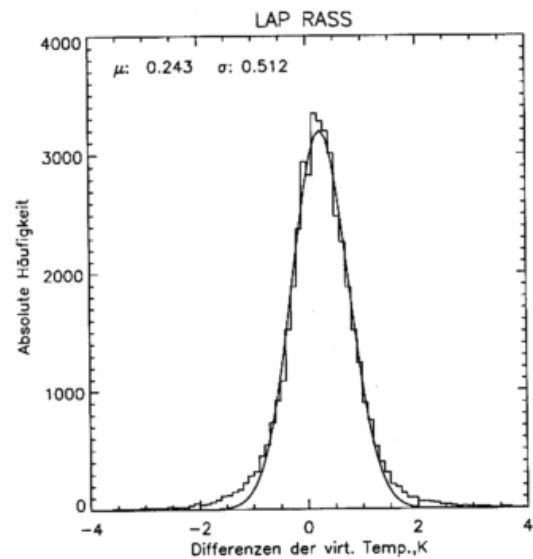


Abbildung A.10: Häufigkeitsverteilung der Temperaturdifferenzen: LAP RASS - Radiosonde sowie die angepasste Gauß-Verteilung für Juni 1994 bis Oktober 1996.

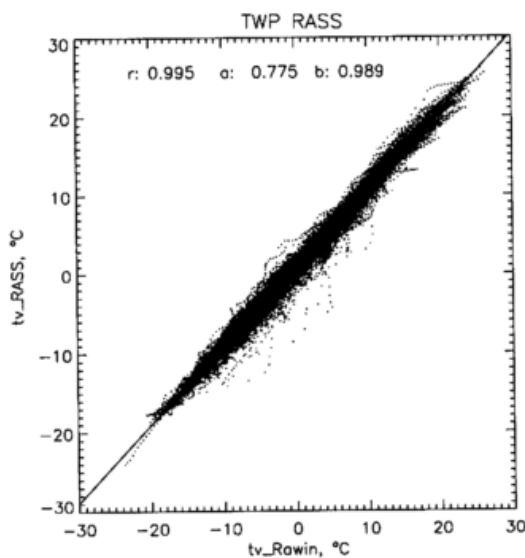


Abbildung A.11: Korrelogramm: Virtuelle Temperaturen der Radiosonde und des TWP RASS sowie die linearen Regressionsgeraden für Januar bis Dezember 1997.

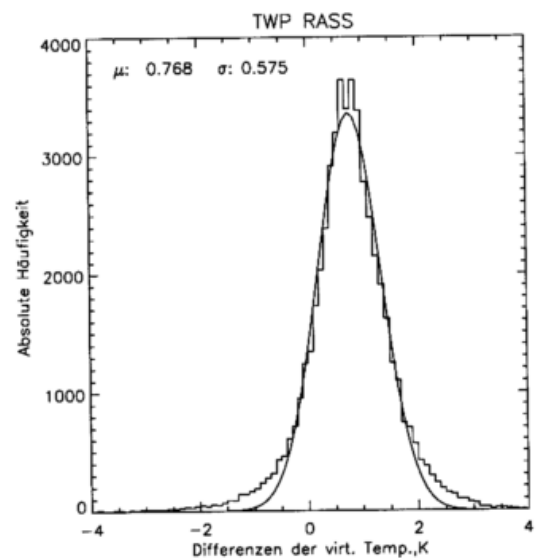


Abbildung A.12: Häufigkeitsverteilung der Temperaturdifferenzen: TWP RASS - Radiosonde sowie die angepasste Gauß-Verteilung für Januar bis Dezember 1997.

Anhang B

Approximationsgleichung zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit

In Cramer (1993) wird eine Approximationsformel zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit c_a in Abhängigkeit von Druck, Temperatur und Feuchte sowie der stofflichen Zusammensetzung der Atmosphäre angegeben. Die Formel ist gültig im Temperaturbereich von 0°C bis 30°C , für einen Druck von 750 hPa bis 1020 hPa, für eine Feuchte bis zu einem molaren Anteil von 0,06 und für eine CO_2 -Konzentration bis zu 1 %.

Die Formel lautet:

$$\begin{aligned}c_a = & a_0 + a_1t + a_2t^2 + (a_3 + a_4t + a_5t^2)x_w \\ & + (a_6 + a_7t + a_8t^2)p + (a_9 + a_{10}t + a_{11}t^2)x_c \\ & + a_{12}x_w^2 + a_{13}p^2 + a_{14}x_c^2 + a_{15}x_wpx_c\end{aligned}\quad (\text{B.1})$$

Darin ist t die Temperatur in $^\circ\text{C}$, x_w die molare Teilchendichte des Wasserdampf und x_c die molare Dichte des Kohlendioxid.

Die molare Dichte läßt sich folgendermaßen berechnen:

$$x_w = \frac{hfe_w}{p}\quad (\text{B.2})$$

wobei h die relative Luftfeuchtigkeit und e_w der Sättigungsdampfdruck ist. f wird mit folgender Gleichung berechnet:

$$f = 1,00062 + 3,14 \times 10^{-8}p + 5,6 \times 10^{-7}t^2 \quad (\text{B.3})$$

Bei der Anwendung der Glg. (B.1) wurde die Variabilität des Kohlendioxidgehaltes der Luft vernachlässigt und mit einem mittleren Wert von 0,000314 Molanteilen berücksichtigt.

Die Koeffizienten haben folgende Werte:

| | | | |
|-------|------------------------|----------|-------------------------|
| a_0 | 331,5024 | a_8 | $-3,93 \times 10^{-10}$ |
| a_1 | 0,603055 | a_9 | -85,20931 |
| a_2 | -0,000528 | a_{10} | -0,228525 |
| a_3 | 51,471935 | a_{11} | $5,91 \times 10^{-5}$ |
| a_4 | 0,1495874 | a_{12} | -2,835149 |
| a_5 | -0,000782 | a_{13} | $-2,15 \times 10^{-13}$ |
| a_6 | $-1,82 \times 10^{-7}$ | a_{14} | 29,179762 |
| a_7 | $3,73 \times 10^{-8}$ | a_{15} | 0,000486 |

Anhang C

Abbildungen zur Verfügbarkeit von WPR/RASS

Dieses Kapitel enthält Zeit-Höhen Schnitte zur Darstellung des tages- und jahreszeitlichen Verhaltens der Verfügbarkeit von WPR/RASS-Messungen. Zugrundegelegt wurden jeweils die mittleren stündlichen bzw. die mittleren monatlichen Vertikalprofile der Verfügbarkeit, berechnet für die im Kapitel 3 angegebenen Zeiträume.

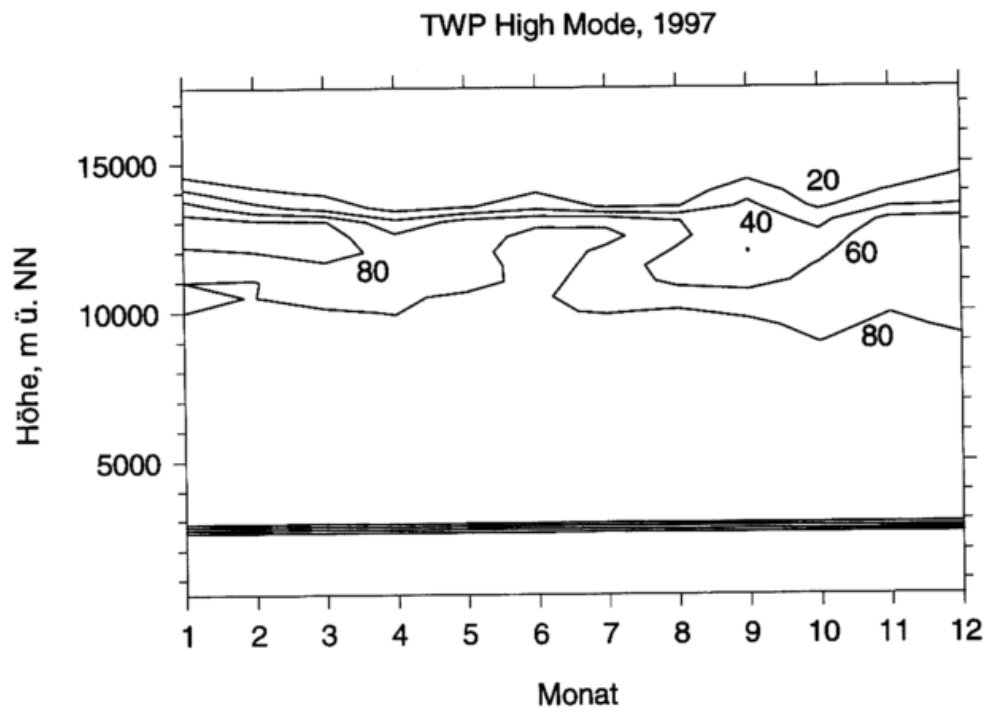
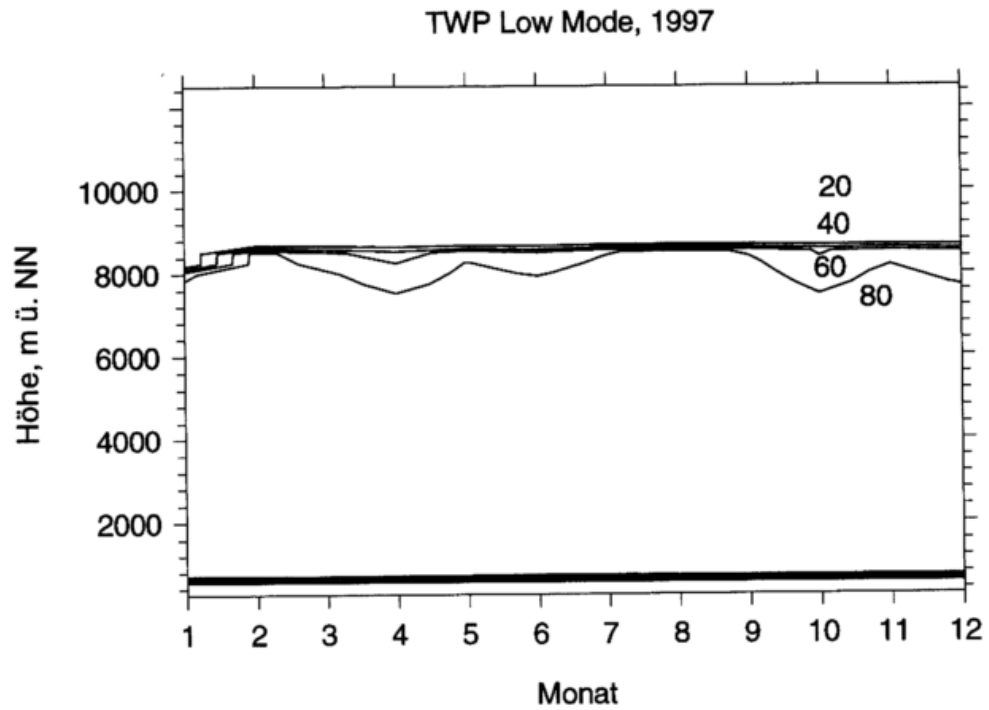


Abbildung C.1: Zeit-Höhen-Schnitt der mittleren monatlichen Verfügbarkeit der TWP Windmessungen im Low Mode (oben) und im High Mode (unten), berechnet auf der Grundlage einjähriger Messungen.

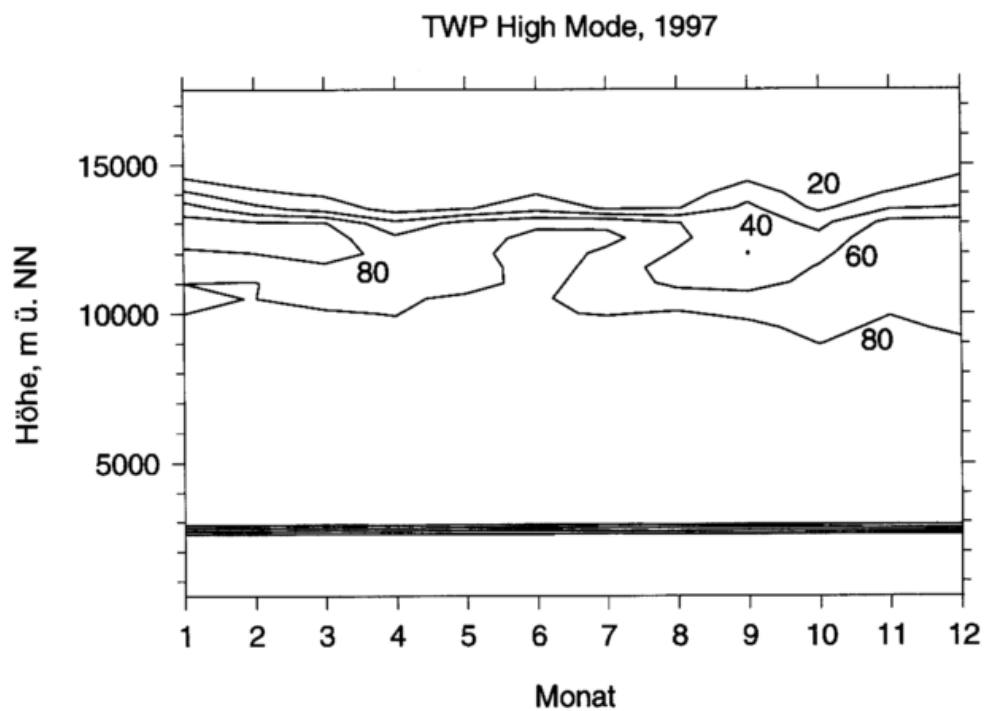
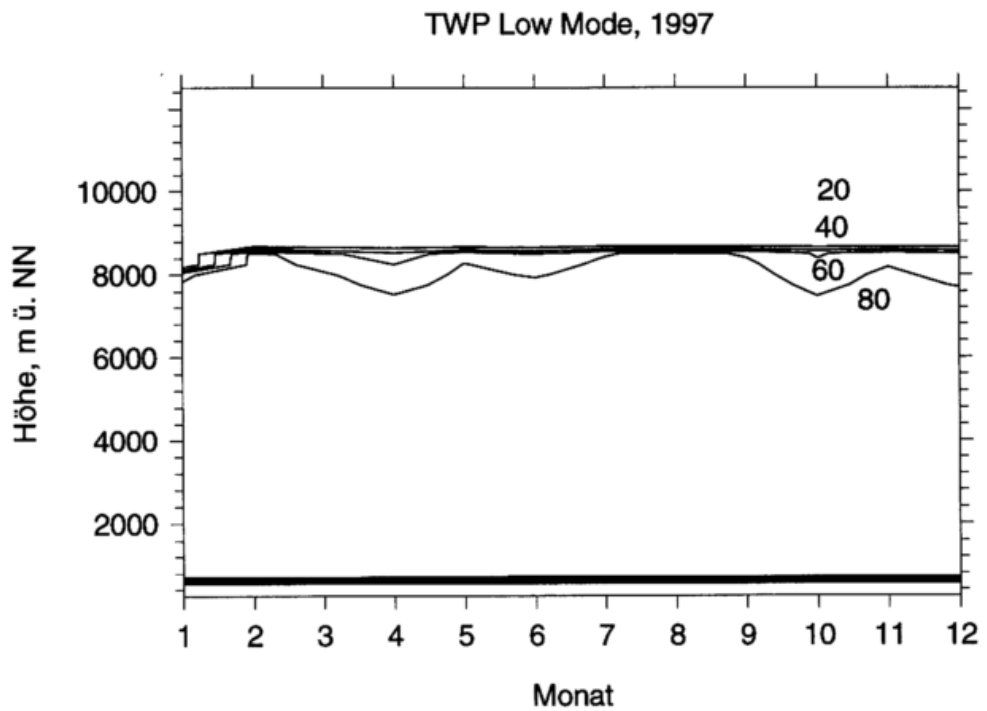


Abbildung C.1: Zeit-Höhen-Schnitt der mittleren monatlichen Verfügbarkeit der TWP Windmessungen im Low Mode (oben) und im High Mode (unten), berechnet auf der Grundlage einjähriger Messungen.

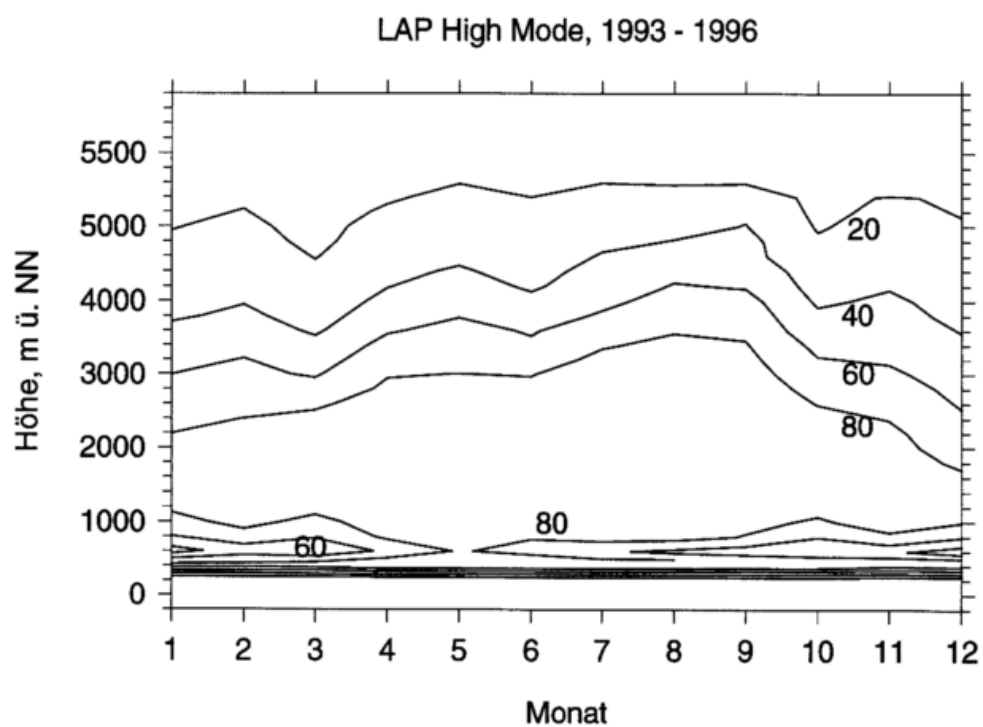
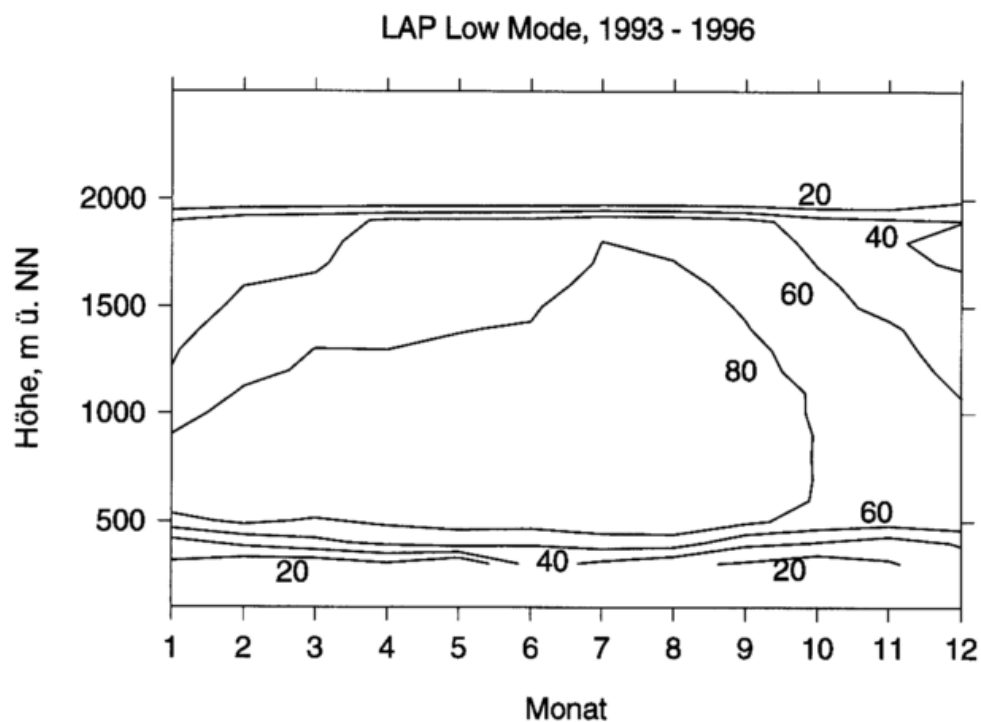


Abbildung C.2: Zeit-Höhen-Schnitt der mittleren monatlichen Verfügbarkeit der LAP Windmessungen im High Mode (oben) und im Low Mode (unten), berechnet auf der Grundlage dreijähriger Messungen.

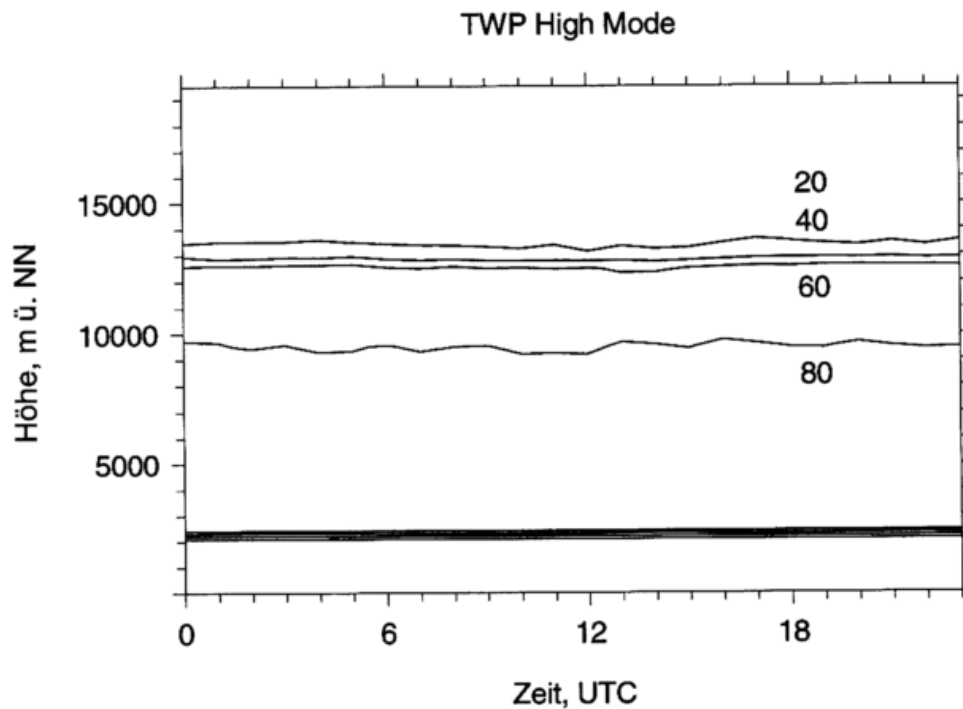
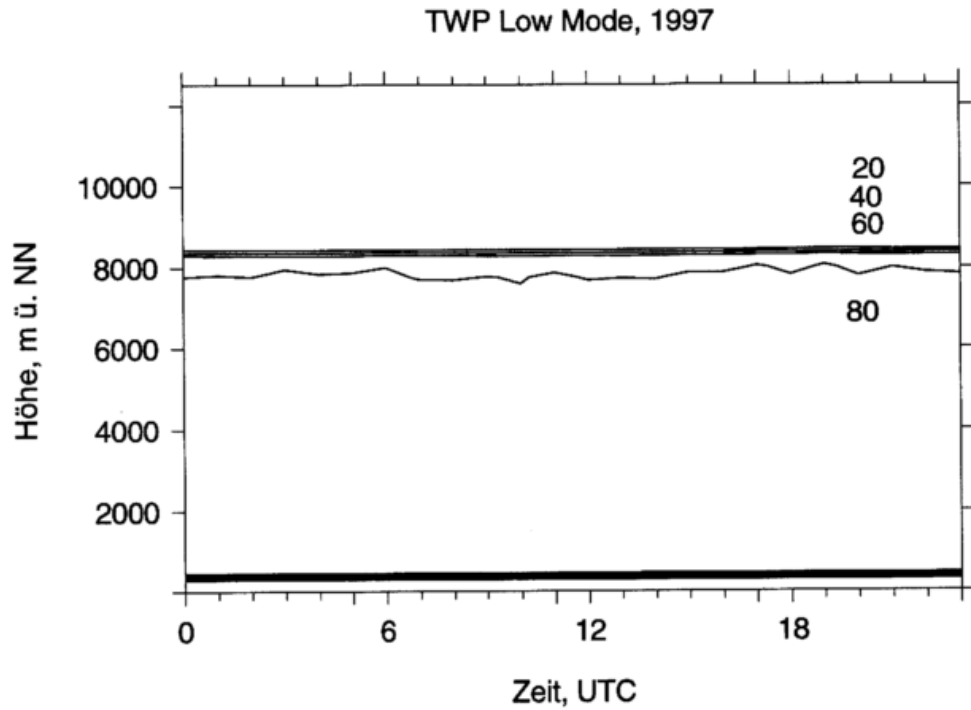


Abbildung C.3: Zeit-Höhen-Schnitt der mittleren stündlichen Verfügbarkeit der TWP Windmessungen im Low Mode (oben) und im High Mode (unten), berechnet auf der Grundlage einjähriger Messungen.

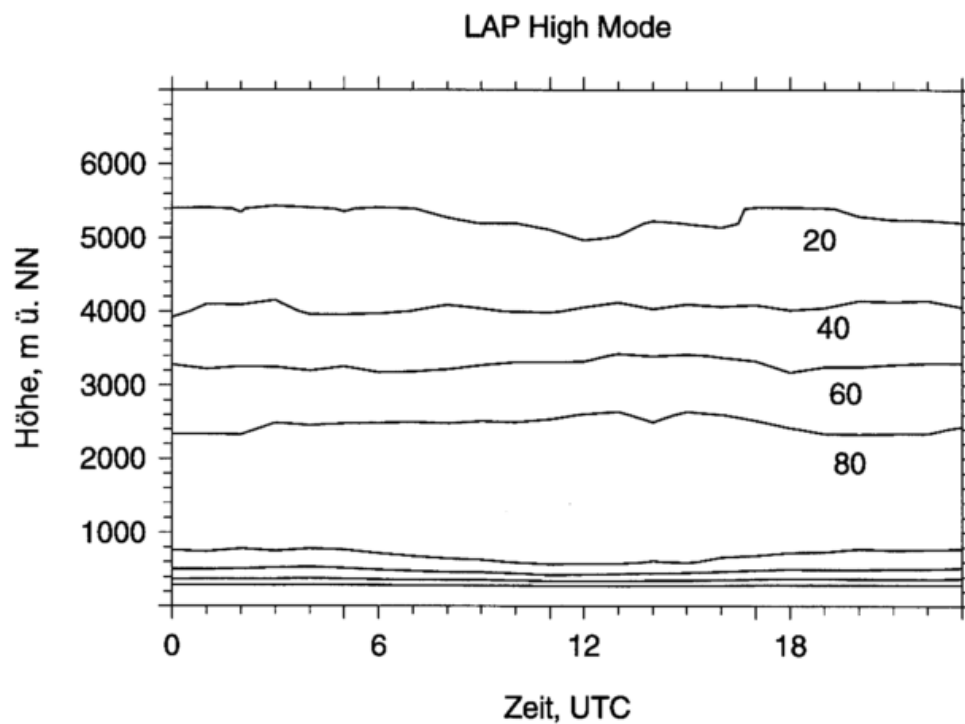
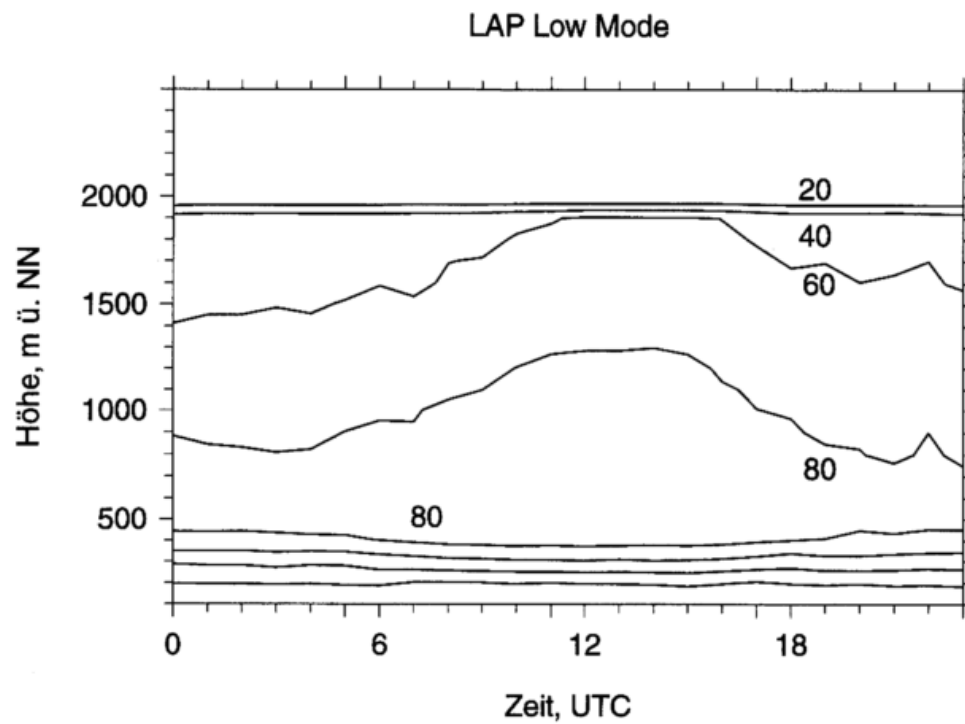


Abbildung C.4: Zeit-Höhen-Schnitt der mittleren stündlichen Verfügbarkeit der LAP Windmessungen im High Mode (oben) und im Low Mode (unten), berechnet auf der Grundlage dreijähriger Messungen.

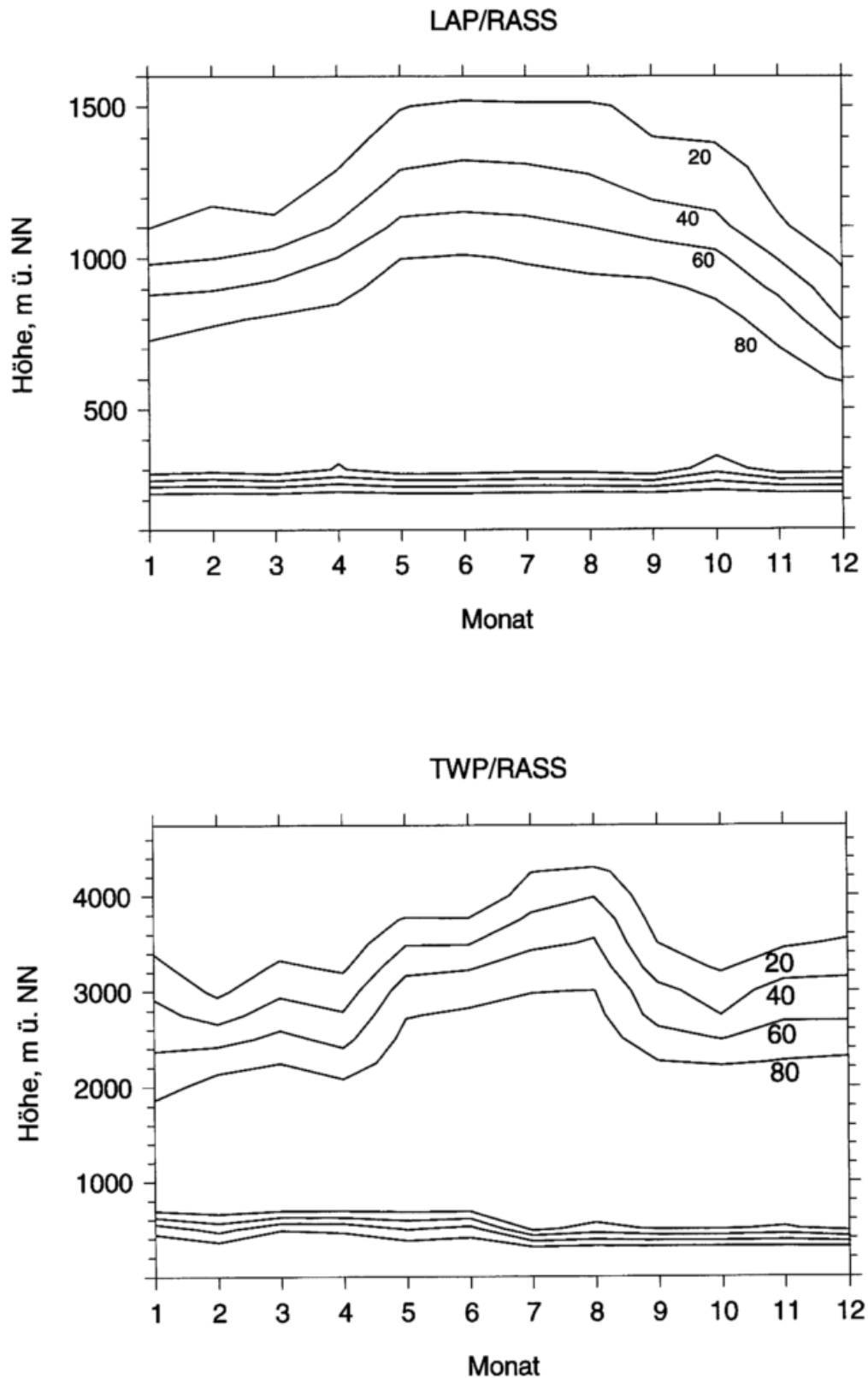


Abbildung C.5: Zeit-Höhen-Schnitt der mittleren monatlichen Verfügbarkeit der virtuellen Temperatur gemessen vom LAP/RASS (oben) und vom TWP/RASS (unten), berechnet auf der Grundlage dreijähriger und einjähriger Messungen.

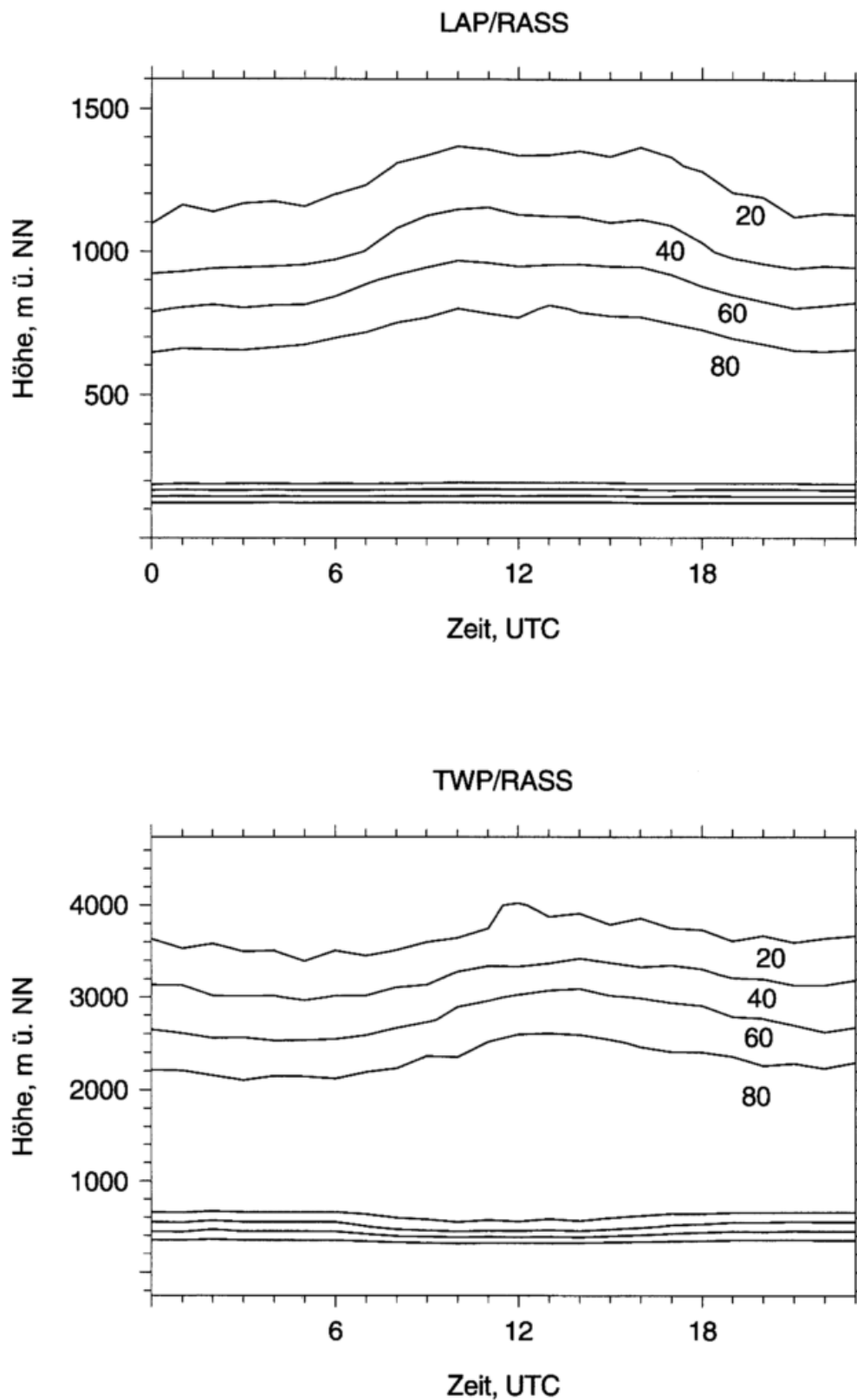


Abbildung C.6: Zeit-Höhen-Schnitt des mittleren täglichen Verlaufs der Verfügbarkeit der virtuellen Temperatur gemessen vom LAP/RASS (oben) und vom TWP/RASS (unten), berechnet auf der Grundlage dreijähriger und einjähriger Messungen.

Danksagung

Die Motivation für die Themenstellung der Arbeit resultiert aus dem Betrieb zweier Windprofiler-Radargeräte beim Deutschen Wetterdienst am Meteorologischen Observatorium Lindenberg (MOL) und geht nicht unwesentlich auf das Engagement von Herrn Dr. H. Steinhaagen, dem Leiter der Arbeitsgruppe „Indirekte Sondierung“, zurück, dem ich hierfür sowie für die mir immer gewährte fachliche und moralische Unterstützung herzlichst danke. Ebenso möchte ich dem Leiter des MOL, Herrn Dr. J. Neisser, danken, der mir die Realisierung der Arbeit im Rahmen meiner Tätigkeit am MOL ermöglichte und diese förderte.

Herrn Prof. Dr. Hinzpeter und Herrn Dr. G. Peters danke ich für die geduldige Betreuung der Arbeit. Zahlreiche Gespräche und Diskussionen gaben der Arbeit wesentliche Impulse und haben somit entscheidend zum Gelingen des Vorhabens beigetragen.

Ferner gilt mein Dank auch Herrn Dr. Igor Petenko, der mit seinen theoretischen Untersuchungen zum RASS Temperaturfehler während seines Aufenthalts in Lindenberg den Fortgang der Arbeiten positiv beeinflusst hat.

Eine wesentliche Basis der Arbeit stellen die kontinuierlich durchgeführten Messungen mit den beiden Windprofiler-Radar/RASS-Geräten am MOL dar. Zur Durchführung und Aufrechterhaltung des quasi-operationellen Betriebes der Meßsysteme sowie zu den in Verbindung mit der Arbeit durchgeführten Sondermessungen mit dem Fesselballonsystem haben alle Mitarbeiter der Arbeitsgruppe „Indirekte Sondierung“ beigetragen. Mein Dank gilt an dieser Stelle insbesondere den Kollegen Sven Volland, Peter Ulrych und Heidrun Pisch.

Besonderen Dank möchte ich auch Herrn V. Lehmann aussprechen, mit dem ich oft über theoretische und praktische Aspekte der Windprofiler-Radar/RASS-Technologie diskutiert habe.

Bedanken möchte ich mich ferner bei Herrn Dr. F. Beyrich und Herrn Dr. D. Engelbart für die kritische Durchsicht des Manuskripts.

Nicht zuletzt gilt mein herzlicher Dank meiner Familie, die viel Verständnis für den mit der Anfertigung der Arbeit verbundenen Aufwand zeigte.