

Ergänzung der SODAR-Messtechnik mit einem Radio-akustischen Sondierungssystem (RASS) zur gleichzeitigen Erfassung von Wind-, Turbulenz- und Temperaturprofilen

Hans-Jürgen Kirtzel, Metek Meteorologische Messtechnik GmbH,
Fritz-Strassmann-Straße 4, D-25337 Elmshorn
Tel.: +49 4121 43259-0 Fax.: +49 4121 4359-20 e-Mail: kirtzel@metek.de

Zusammenfassung

Ein wesentlicher Parameter in Modellrechnungen zur bodennahen Ausbreitung von Schadstoffen ist die Mischungsschichthöhe. Mit dem Radio-akustischen Sondierungssystem (RASS) steht eine Ergänzung des SODARs zur Verfügung, die eine quantitative Bestimmung von Temperaturgradienten in relevanten Höhenbereichen von 40 m bis 300 – 500 m gestattet. Das Funktionsprinzip verschiedener RASS-Verfahren wird erläutert und anhand von Episoden wird gezeigt, das ein mit RASS gemessenes Temperaturprofil in Situationen mit problematischen Ausbreitungsbedingungen eine wichtige Eingangsgröße für eine realitätsbezogene Ausbreitungsmodellierung ist.

1 Einleitung

Die Ausbreitung von Schadstoffen wird im Rahmen der kontinuierlichen Überwachung von emittierenden Standorten und in der Störfallinstrumentierung durch Modellrechnungen simuliert, um eventuelle Gesundheitsrisiken zeitnah zu erkennen und angemessene Maßnahmen zu deren Vermeidung oder bestmöglichen Reduzierung treffen zu können. Als Einflussgrößen für die Schadstoffausbreitung sind zu betrachten:

Tabelle 1: Einflussgrößen für die Schadstoffausbreitung

1. Windrichtung (WR) für Transportrichtung
2. Windgeschwindigkeit (WG) für Transportgeschwindigkeit
3. Turbulenzgrad, bzw. Ausbreitungsstufe (AK) für Vermischung
4. Niederschlag (N) für nasse Deposition (Stoffsenke)
5. Andere Stoffsenken, z. B. durch trockene Deposition oder Umwandlung
6. Quellgrößen (effektive Quellhöhe)
7. Praktisch alle Einflussgrößen (1) – (6) können sich vertikal, horizontal und zeitlich ändern !

Für die Zuverlässigkeit der Modellrechnungen kommt der realitätsnahen Beschreibung der aktuellen Wittersituation bei austauscharmen Wetterlagen besondere Bedeutung zu. Als Rechenmodell wurde über lange Jahre ein sog. Gauß-Modell eingesetzt, dass als meteorologische Eingangsgrößen lediglich die Größen WR, WG und AK in der Höhe der Emission, bzw. im effektiven Emissionsniveau benutzt. Damit sind Einschränkungen in der Zuverlässigkeit der Modellergebnisse verbunden, denn austauscharme -also hinsichtlich einer Schadstoffbelastung ungünstige- Bedingungen treten bevorzugt unter stabiler Schichtung mit signifikanten Höhenunterschieden dieser Eingangsgrößen auf.

Dies ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn die turbulente Mischung durch eine aufliegende Inversion stark behindert oder durch eine freie Inversion effektiv nach oben begrenzt wird. Da diese Situationen bei vorgegebener Emission zwangsläufig mit erhöhten Immissionswerten am Boden einhergehen, hat ihre zuverlässige Erfassung vorrangige Bedeutung für die operationelle Ausbreitungsrechnung.

In den deutschen Regelwerken (TA-Luft alte Fassung, KTA 1508, AVV) wurde die Schadstoffausbreitung unter stabilen Lagen oder bei Vorliegen von Inversionen nur über die Ausbreitungsklasse berücksichtigt, bzw. über sehr niedrig gewählte, dazugeordnete Mischungsschichthöhe. Mit der Einführung modernerer Ausbreitungsmodelle (Gauß-Puff-Modell, Partikel-Modell) ist neben der Berücksichtigung von vertikalen Profilen und weiteren Turbulenzparametern auch die Einbindung von vertikalen Sperschichten möglich.

2 Funktionsprinzip eines RASS

Prinzipiell könnte eine sehr detaillierte Analyse von SODAR-Messungen, die an vielen Standorten zur Erfassung der Ausbreitungsparameter WR, WG und AK durchgeführt werden, auch die zeitliche Entwicklung der Höhe von Sperschichten (z. B. bei abhebenden Inversionen) erkennen lassen. Dazu müssten die vertikalen Profile der Rückstreuintensität durch entsprechend trainiertes Personal ausgewertet werden, wobei zusätzliche meteorologische Größen benötigt werden. Mit SODAR allein können aber keine quantitativen Angaben zum Temperaturgradienten gemacht werden, denn die Intensität des Empfangssignals im SODAR wird nur von kleinräumigen turbulenten Temperaturschwankungen bestimmt wird. Daher können aus der Rückstreuintensität allenfalls qualitative Aussagen über Bereiche erhöhter Temperaturfluktuationen (i.a. verknüpft mit Bereichen starker Temperaturunterschiede) getroffen werden. Auch die mit SODAR direkt messbare Vertikalwindvarianz ist im Fall von Inversion kein zuverlässiger Indikator für den turbulenten Austausch, da hier oft Schwerewellen oder Kelvin-Helmholtz-Wellen auftreten, die zwar zur gemessenen Varianz beitragen, aber keine turbulente Vermischung bewirken. Als zuverlässiges Verfahren zur Bestimmung des vertikalen Temperaturprofils steht mit dem RASS eine Messtechnik bereit, die als Ergänzung bestehender SODAR-Systeme einsetzbar ist.

Ähnlich wie die SODAR-Technik die Schallstreuung an turbulenten Dichteinhomogenitäten nutzt, um aus dem Rückstreusignal das vertikale Wind- und Turbulenzprofil zu ermitteln, arbeitet die RASS-Technik mit der Streuung von Radiowellen an Schallwellen, die als künstlich erzeugte Streuzentren wirken. Das rückgestreute Signal trägt dabei eine Information über die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwellen, die wiederum in guter Näherung als Maß für die virtuelle Temperatur anzusehen ist. Die Schallwellen wirken dabei ähnlich wie ein Hohlspiegel, d.h. die Schallwellenfronten werfen die RADAR-Wellen zu einem Empfangsfleck gebündelt zum Erdboden zurück.

Die RASS-Technik weist gegenüber einem SODAR grundlegende Vorteile auf. So sind RASS-Messungen unempfindlich gegenüber Festechos und Umgebungslärm. Gerade dies sind die Begleitumstände, die an Industriestandorten meist angetroffen werden und eine SODAR_Messung erschweren. Ebenso beeinträchtigen selbst starke Niederschläge nicht die RASS-Messungen.

Ein gewisser Nachteil des RASS besteht allerdings darin, dass die ausgesendeten Schallwellen vom mittleren Windfeld mitgeführt werden und mit zunehmender Höhe den Überlappungsbereich mit den RADAR-Antennen verlassen. Dieser Effekt ist am leichtesten mit dem erwähnten Hohlspiegeleffekt der Schallwellen zu erklären, der den Ort des Empfangsfleckes außerhalb der Empfangsantenne verschiebt. Daher ist der Messbereich eines kleinen RASS meist auf 200 ... 300 m beschränkt. Falls dieser Höhenbereich nicht ausreicht, kann er aber durch luvseitig aufgestellte zusätzliche Schallantennen auf rund 500 m erweitert werden. Das Verdriften der Schallwellen bei Starkwind ist für Ausbreitungsfragen insofern unkritisch, da unter Starkwind die am Boden mechanisch angeregte Turbulenz immer für eine Vermischung von Schadstoffen sorgt. Turbulente Fluktuationen wirken sich im übrigen günstig auf den erreichbaren Höhenbereich auf, da diese die Schallwellenfronten verformen und damit auch dann noch ein Signal auf die Empfangsantenne treffen kann, wenn die geometrische Konstruktion der Wellenstrahlen den auch dann noch ein Streusignal

Grundsätzlich muss einem RASS-Verfahren die Wellenlänge der Schallwelle λ_a genau halb so groß sein wie die Wellenlänge der Radarwelle λ_e , damit sich viele einzelne Rückstreumuster phasengleich zu einem Rückstreusignal überlagern (konstruktive Interferenz, Bragg-Bedingung), welches dann von der Empfangsantenne aufgenommen und anschließend analysiert werden kann.

Die Interferenz aufeinanderfolgender Streusignale im RASS wird durch nachfolgende Abbildung deutlich gemacht. Die Position einer durch das Schallwellenfeld laufenden Radarwelle ist zu drei Zeitpunkten gezeigt ($n=1,2,3$ als rot, blau, grün), wobei ihre Halbwellen als oberer und unterer Teil der Radarwelle markiert sind. Die führende Halbwelle erreicht phasengleiche Wellenfronten der Schallwelle zu den angegebenen Zeitpunkten. Die zu diesen Zeitpunkten entstehenden rücklaufenden Streuwellen (gestrichelt) überlagern sich phasengleich, wenn die Wellenlängen so gewählt wurden, dass die Beziehung [1] gilt.

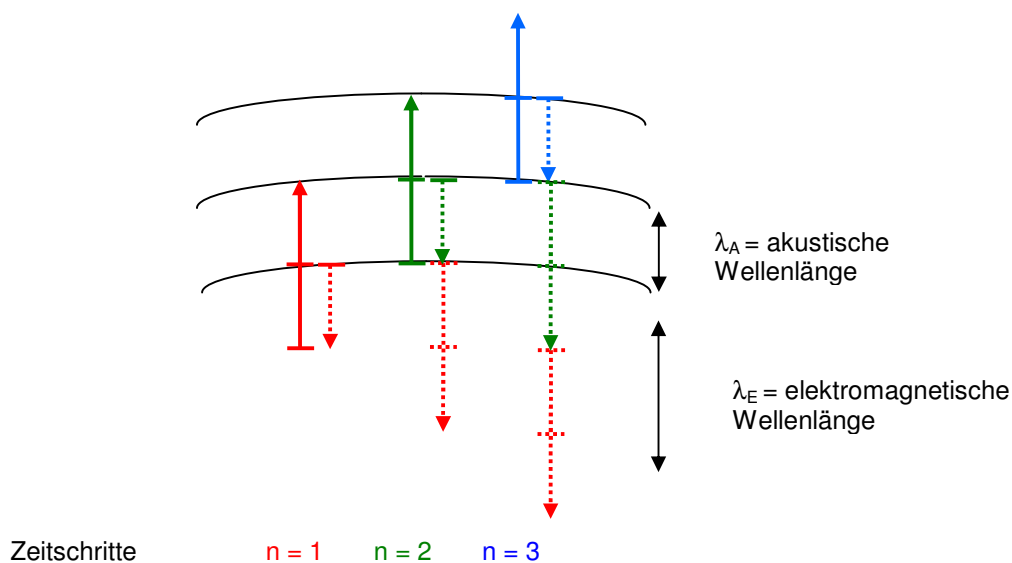


Abb. 1: Konstruktive Interferenz aufeinanderfolgender Streusignale im RASS

Die Darstellung soll nicht den Eindruck erwecken, dass der Streuprozess nur an einem bestimmten Teil des Wellenfeldes stattfindet. Vielmehr setzt sich das rückgestreute Signal aus einer Vielzahl von einzelnen Streuprozessen zusammen, die überall dort erfolgen, wo sich die Antennenkeulen der RADAR-Sende- und Empfangsantennen und der akustischen Sendeantenne zu einem gemeinsamen Messvolumen überlagern.

Der hier betrachtete Fall einer Kombination von vertikal gerichteten Schall- und RADAR-Antennen liefert zunächst ein Profil der vertikalen Schallgeschwindigkeit, die durch eine einfache Beziehung mit der RASS-Temperatur T_R verknüpft ist.

$$[3] \quad T_R [^\circ K] = \left(\frac{c_A [m/s]}{20.05} \right)^2$$

mit c_A = vertikale Schallgeschwindigkeit

Da die Luft i.a. nicht trocken ist, sondern einen gewissen Anteil von Wasserdampf enthält, kann die aus der vertikalen Schallgeschwindigkeit c_A abgeleitete Temperatur T_R in guter Näherung als Virtuelltemperatur angesehen werden. Sie verknüpft also die für Auftriebsprozesse relevanten Informationen der trockenen Temperatur und der Feuchte und ist somit besonders gut für die Bewertung der Ausbreitungssituation geeignet. Zu berücksichtigen ist allerdings in c_A noch der Anteil des Vertikalwindes, dessen Einfluss bei 1 m/s rund 1.7 °K beträgt. Da der absolute Wert des mittleren Vertikalwindes aus SODAR-Messungen oft nur mit unbefriedigender Genauigkeit zu bestimmen ist (dies ist vor allem unter konvektiven Bedingungen der Fall) und andererseits die stabilen Fälle mit geringer Vertikalwindkomponente eher von Interesse sind, kann auf eine Vertikalwindkorrektur in c_A für die meisten Anwendungen verzichtet werden, solange eine ausreichend lange Mittelungszeit von mindestens 10-15 Minuten, bei starker Konvektion von 30 Minuten gewählt wird.

Da für den Bereich der kerntechnischen Anlagen bereits SODAR-Anlagen vorhanden sind und ein Doppler-RASS in etwa den gleichen Höhenbereich abdeckt wie ein operationell betriebenes SODAR, ist davon auszugehen, dass für die Ergänzung einer Störfallinstrumentierung ein Doppler-RASS zum Einsatz kommen wird. Daher werden sich die weiteren Ausführungen auch auf diese Betriebsart beschränken.

Der schematische Aufbau eines RASS-Systems als Ergänzung eines SODARs wird in Abb. 2 dargestellt, einen typischen Feldaufbau eines transportablen System zeigt Abb. 3. Hierbei handelt es sich um ein RASS-System, dessen RADAR-Komponenten im Frequenzbereich von 1290 MHz arbeiten, dies entspricht einer RADAR-Wellenlänge von rund 23 cm. Die dazugehörige Schallwellenlänge beträgt also 11.5 cm, je nach Umgebungstemperatur entspricht dies einer RASS-Schallfrequenz von knapp 3000 Hz. SODAR-Messungen erfolgen i.a. im Bereich von 1500 ... 2500 Hz. Die Durchmesser der RADAR- und SODAR-Antennen liegen im Bereich von 1 ... 2 m.

Bei Auswahl entsprechend breitbandiger Lautsprecher können SODAR- und RASS-Betrieb mit der gleichen Schallantenne erfolgen. Das RASS-Empfangssignal wird durch Heruntermischen mit der RADAR- und mit der Schallfrequenz in den gleichen Frequenzbereich verlagert wie das eigentliche SODAR-Signal und durch die Auswerteelektronik des SODAR ausgewertet. SODAR- und RASS-Betrieb erfolgen also gemeinsam, die Daten werden in einem gemeinsamen Datensatz zusammengeführt.

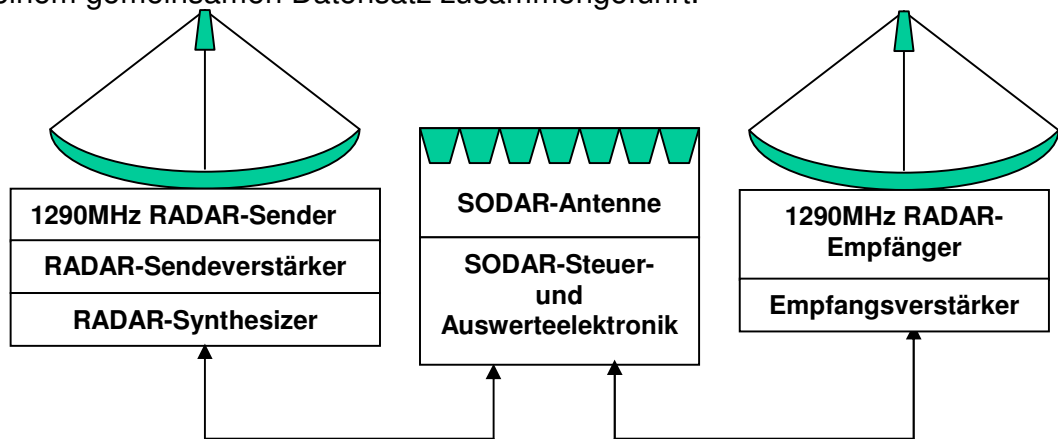


Abb. 2: *Prinzipieller Aufbau eines SODAR-RASS-Systems*

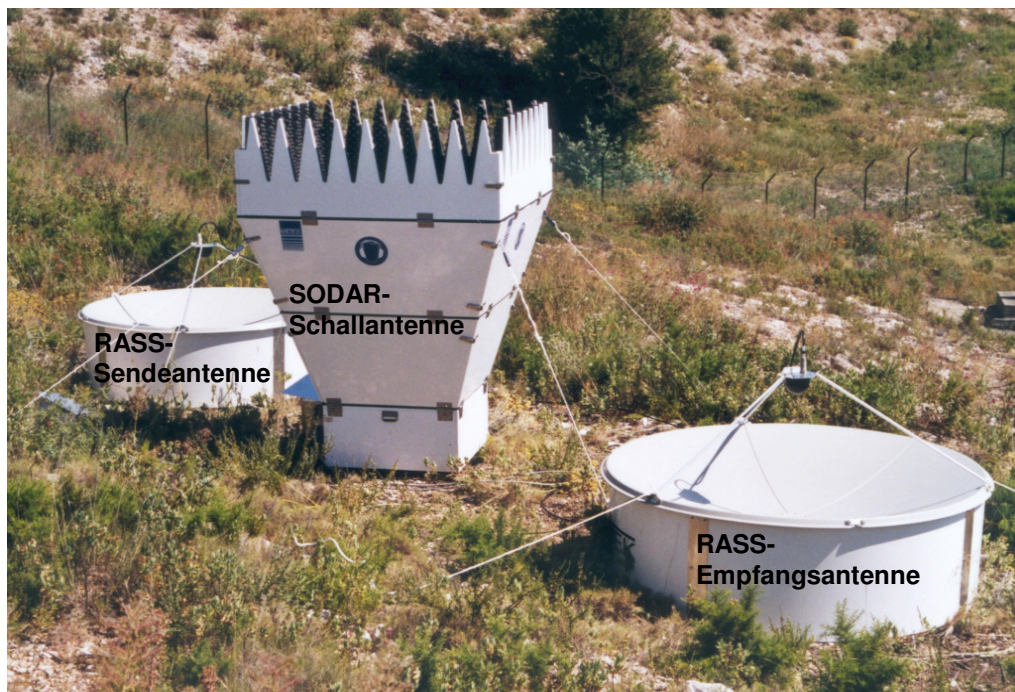


Abb. 3: *Feldaufbau eines 1290 MHz-RASS mit SODAR-System*

3 Doppler-RASS und Bragg-RASS

Aus der Vielzahl der Möglichkeit, Schall- und RADAR-Wellenfeldern miteinander zu verknüpfen, sind zwei RASS-Methoden prinzipiell zu unterscheiden:

- **Doppler-RASS**

Hier wird nur ein kurzer Schallimpuls in die Atmosphäre gesendet, während ein kontinuierliches Radarsignal fester Frequenz gesendet wird. Da die tatsächliche Temperatur in einer bestimmten Höhe ja zunächst nicht bekannt ist und sich ohnehin mit der Höhe drastisch ändern kann, ist die o.a. Bragg-Bedingung nur dadurch zu erfüllen, dass der kurze Schallimpuls aus einem breiten akustischen Frequenzgemisch besteht oder eine sägezahnförmige Frequenzmodulation aufweist. Da sich die rückstreuenden Schallwellenfronten mit Schallgeschwindigkeit fortbewegen, entsteht bei der Rückstreuung eine entsprechende Dopplerverschiebung gegenüber der Sendefrequenz. Dieser Zusammenhang wird beschrieben durch:

$$[1] \quad f_D = (2 \cdot f_E) \cdot \frac{c_A}{c_E}$$

mit f_D = Dopplerverschiebung
 f_E = Empfangssignal RADAR
 c_A = Schallgeschwindigkeit
 c_E = Lichtgeschwindigkeit

Ein Doppler-RASS wird im allgemeinen als Ergänzung zu einem vorhandenen Doppler-SODAR verwendet, sodass nur die Radar-Einheiten zu ergänzen sind. Generell ist dieses System unproblematisch hinsichtlich der benötigten Frequenzgenehmigung, da durch das kontinuierliche RADAR-Signal nur ein sehr schmaler spektraler RADAR-Bereich belegt wird.

Die Höhenzuordnung erfolgt über die gemessene Laufzeit des relativ kurzen Schallimpulses. Um dabei sicherzustellen, dass auch im Fall starker vertikaler Temperaturschichtung Frequenzen im Schallsignal enthalten sind, die der Bragg-Bedingung entsprechen, wird das Schallsignal sägezahnförmig frequenzmoduliert. Nur ein kleiner Teil des Schallsignals trägt also in den verschiedenen Höhenstufen zum rückgestreuten RASS-Signal bei, so dass der erfasste Höhenbereich mit auswertbarem Signal je nach angetroffener Wettersituation auf 200 ... 500 m beschränkt bleibt.

- **Bragg-RASS**

Bei einem Bragg-Rass wird ein kontinuierliches frequenzmoduliertes Schallsignal verwendet, so dass die erforderliche Höhenzuordnung nun über eine Frequenzmodulation des RADAR-Sendesignals vorgenommen wird. Ein Bragg-RASS wird meist als Ergänzung zu einem vorhandenen RADAR-Windprofiler aufgebaut. Die Leistung des rückgestreuten Wellenfeldes verteilt sich dabei auf einen spektralen Bereich, in der je bei benachbarten Frequenzen je nach vorliegendem Temperaturwert

unterschiedliche starke Rückstreuintensitäten beobachtet werden. Aus der Dispersionsbeziehung kann dann aus der Lage des Maximums eine entsprechende Frequenz und daraus die Schallgeschwindigkeit abgeleitet werden.

$$[2] \quad f_{a,\max} = \frac{c_A}{\lambda_{A,\max}} = 2 \cdot \frac{c_A}{\lambda_E}$$

mit $f_{a,\max}$ = Dopplerverschiebung, bei der die Rückstreuintensität im Spektrum ein Maximum aufweist

f_E = Empfangssignal RADAR

c_A = Schallgeschwindigkeit

c_E = Lichtgeschwindigkeit

Da ein Bragg-RASS ein frequenzmoduliertes Sendesignal verwendet, ist die Frequenzzulassung durch die größere belegten Bandbreite problematischer.

Vorteilhaft ist die höhere Reichweite, da pro Zeiteinheit mehr akustische Sendeleistung eingebracht werden kann. Dies erhöht das Signal-/Rauschverhältnis und folglich auch den Höhenbereich. Die Beschränkung aufgrund des Verdriftens der Schallwellen wird dadurch allerdings nur geringfügig abgemildert. Bragg-Rass Anwendungen werden meist als Ergänzung zu großen RADAR-Windprofilern eingesetzt, da diese ohnehin einen größeren Frequenzbereich beanspruchen und hinsichtlich der Frequenzgenehmigung aufwändiger sind.

4 Betriebsgenehmigungen für RASS

Da ein RASS zwangsläufig einen RADAR-Sender verwendet, ist der Betrieb eines nur nach vorheriger Genehmigung -in Deutschland durch die Regulierungsbehörde für Post und Telekommunikation- zulässig. Weil diese Genehmigungen lange Zeit nicht einheitlich geregelt waren, wurde 1997 ein weltweit verbindliches Regelwerk für den Betrieb von RADAR- und Rass-Systemen zur Wetterbeobachtung verabschiedet, wobei nach wie vor Unterschiede zwischen den einzelnen Ländern in den zugeteilten Frequenzbereichen bestehen. Die Genehmigungen müssen immer durch den System-Nutzer beantragt und durch das Land erteilt werden, in dem das System betrieben werden soll.

Tabelle beschreibt die gebräuchliche Betriebsgenehmigungen, wobei die Frequenzen in einem Bereich von einigen Megahertz um die angegebenen Werte variieren können:

Tab. 1: Frequenzbereiche für RADAR-/RASS-Systeme

1290 MHz	Deutschland, gebräuchlich auch in Teilen Europas und anderen Erdteilen
1274 MHz	Frankreich
915 MHz	USA
480 MHz	Deutschland
449 MHz	USA
50 MHz	Australien, Frankreich, Großbritannien

5 Vergleichsmessung 1290 MHz RASS und Mast in 100 m Höhe

Als Beispiel für die Messgenauigkeit wird in Abb. 4 ein Vergleich zwischen einem Doppler-RASS und einer direkten Mastinstrumentierung am Meteorologischen Observatorium Lindenberg mit belüftetem Temperaturfühler gezeigt. Die Mastvergleichshöhe beträgt 98 m über Grund, die dazugehörige RASS-Messung erfolgte in der Messhöhe 100 m (Höhenbereich 90 - 110 m über Grund bei 20 m Höhenstufung). Die Temperaturwerte des Mastes wurden mit Hilfe einer Feuchtemessung auf die Virtuelltemperatur T_V umgerechnet. Die Werte wurden als 10-Minutenmittelwerte gewonnen. Mit einem Korrelationskoeffizienten von 0.98 und einer Steigung der Regressionsgeraden von 1.00 wird praktisch eine perfekte Übereinstimmung erzielt. Für eine Vergleichsmessung in 48 m Höhe wurden praktisch identische Werte ermittelt.

Jahreszeitlich bedingt liegt in diesem Beispiel nur eine mäßig entwickelte thermodynamisch angeregte Turbulenz vor, so dass die Beiträge des Vertikalwindes in der RASS-Messung klein bleiben zugunsten einer geringen Streuung in den RASS-Werten.

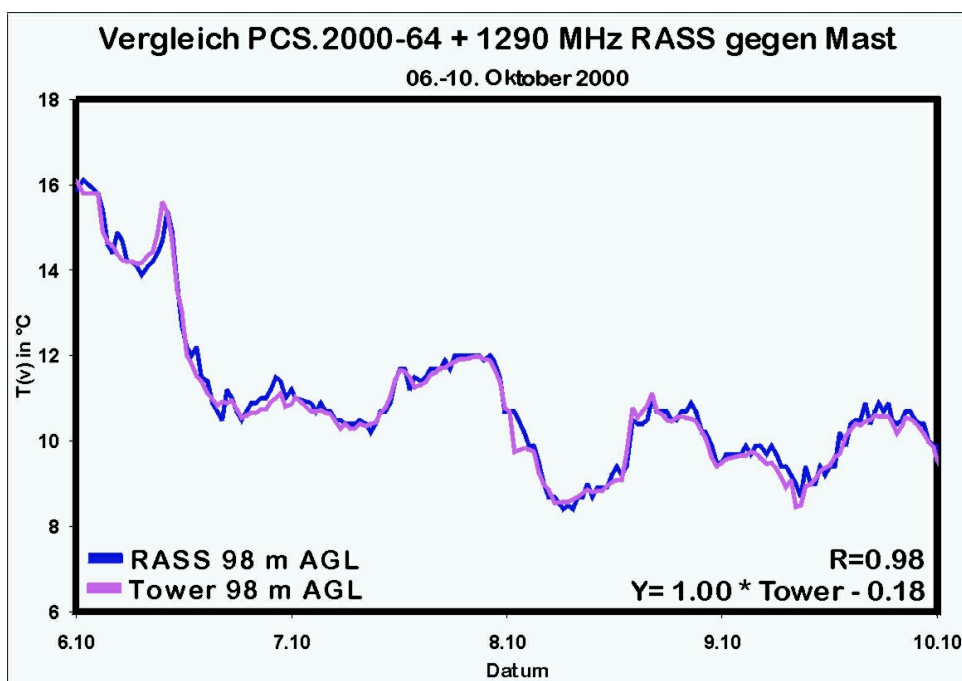


Abb. 4: Vergleich eines Doppler-RASS 1290 MHz mit einer Mastmessung

6 Höhenverfügbarkeit 1290 MHz

Wie in Kap. 2 beschrieben wird der erreichbare Höhenbereich der RASS-Messungen durch das Verdriften der Schallwelle beschränkt und weniger durch die atmosphärische Absorption der Schallwelle. Kompensiert werden kann dieser Effekt durch atmosphärische turbulente Dichtefluktuationen, die zu einer Art „Verbeulung“ der Schallwellenfront führen. Der in Kap. 2 beschriebene Empfangsfleck weitet dadurch auf, so dass Teile des Empfangsflecks auch noch aus größeren Höhen im Bereich der Empfangsantenne liegen.

Der Standort, an dem die Vergleichsmessung in Abb. 4 erfolgte, ist gekennzeichnet durch geringe orographische Gliederung und vergleichsweise hohe mittlere Windgeschwindigkeiten. Beide Effekte wirken sich ungünstig auf die Höhenverfügbarkeit der RASS-Messungen aus, sie beträgt am Standort in 200 m rund 70 %. Für eine 4-wöchige Messung im Großraum Basel wurde dagegen eine deutlich günstigere Verfügbarkeit ermittelt, die in Abb. 5 gezeigt wird. Für diesen Zeitraum liegen besonders günstige Bedingungen - starke mechanisch und thermodynamisch angeregte Turbulenz bei geringen mittleren Windgeschwindigkeiten - mit Verfügbarkeiten über 90 % bis Höhen von knapp 400 m vor. Der Rückgang der Verfügbarkeit in der untersten Messhöhe 40 m wurde durch ein zeitweiliges Störsignal verursacht, die an 100 % fehlenden Prozentpunkte sind in den untersten Höhen auf zeitweilige Unterbrechungen in der Stromversorgung und in der Datenaufzeichnung zurückzuführen

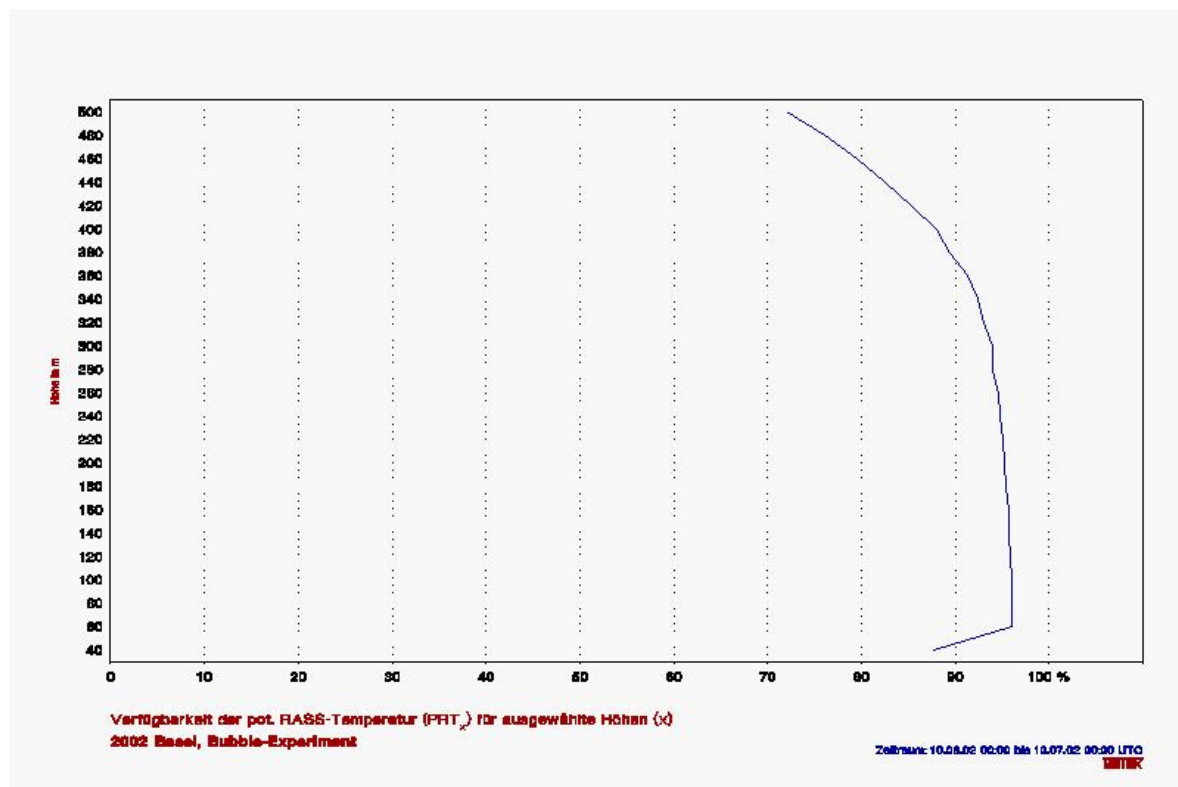


Abb. 5: Höhenverfügbarkeit eines Doppler-RASS 1290 MHz

7 Beobachtung einer persistenten abgehobenen Inversion mit RASS und SODAR

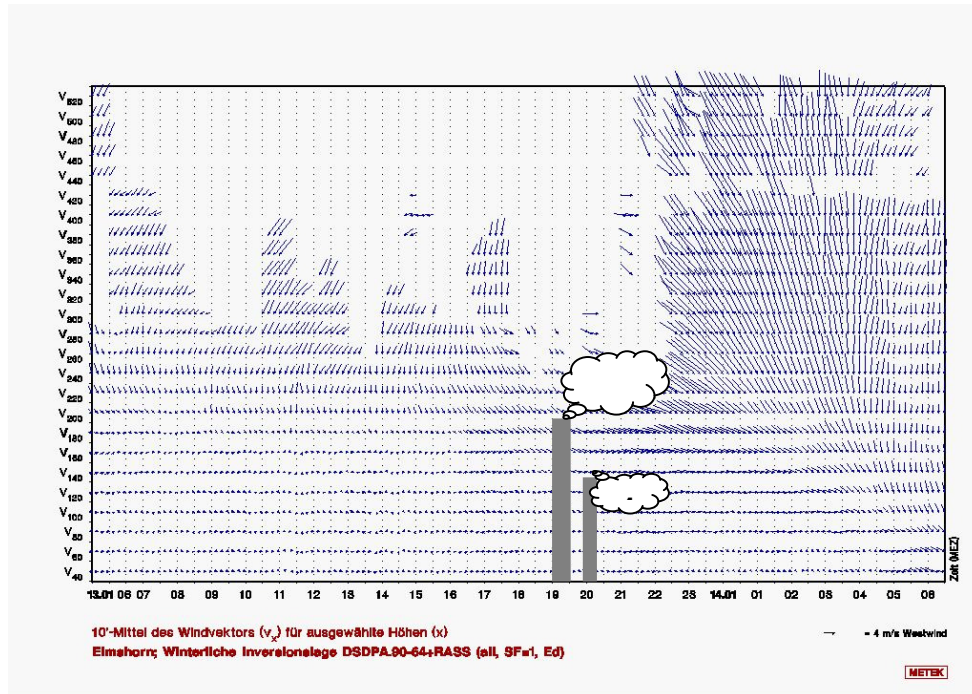


Abb. 6: Windvektoren während einer persistenten abgehobenen Inversion an einem norddeutschen Standort

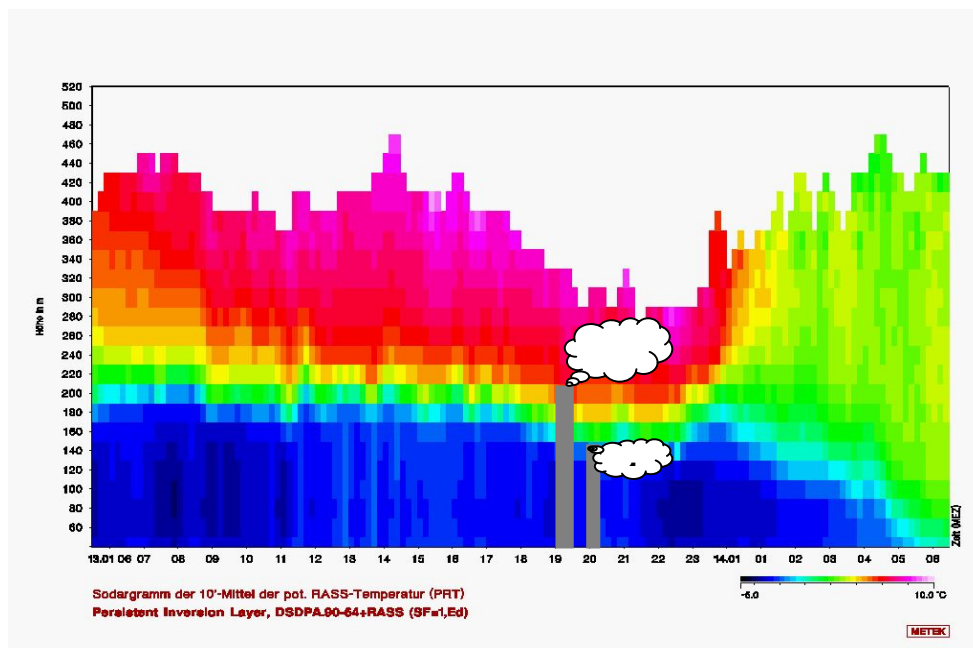


Abb. 7: Temperaturprofile während einer persistenten abgehobenen Inversion an einem norddeutschen Standort

In *Abb. 6* und *Abb. 7* sind die Wind- und Temperaturfelder für einen Zeitraum von 24 Stunden abgebildet, der den Abschluss einer fast 3-tägigen Hochdrucklage mit Hochnebelbildung aus dem Januar 2001 repräsentiert. Während dieses Zeitraums hatte sich eine abgehobene Inversion im Bereich von 240 m gebildet, die aufgrund der geringen Sonneneinstrahlung über mehrere Tage anhielt. Die Messungen erfolgten am Firmenstandort Elmshorn in Norddeutschland mit einem mobilen SODAR vom Typ DSDPA.90-24 und einer 1290 MHz RASS-Ergänzung. Die Messwerte stellen 10-Minutenmittelwerte bei einer Höhenauflösung von 20 m dar.

Das Temperaturfeld zeigt anhand des krassen Sprunges in der Farbkennzeichnung der Temperaturverteilung die Inversion, die als stärksten Zunahme 8.4 Kelvin innerhalb von 60 m Höhendifferenz aufwies. Zum Tageswechsel auf den 14.01.01 wird die warme Luftmasse in den oberen Höhen durch kältere Luftmasse ersetzt, die sich dann innerhalb von 6 Stunden bis zum Boden vorarbeiten kann. Dort führt sie zu einer deutlichen Temperaturzunahme von rund 4 Kelvin, innerhalb dieser Luftmasse sind die starken vertikalen Gradienten vollständig abgebaut.

Das dazugehörige Windfeld zeigt unterhalb der Inversion zunächst verschwindend kleine Windwerte, während oberhalb zumindest eine mäßig starke nördliche Windströmung vorliegt. Mit dem Einzug der neuen Luftmasse stellt sich in den oberen Höhen eine frische nordwestliche Strömung ein, die sich entsprechend der absinkenden Inversionsgrenze allmählich bis zum Erdboden durchsetzt. Während dieses Absinkens bestehen große Unterschiede zwischen den Windwerten der oberen und bodennahen Schichten.

Das Beispiel zeigt, dass sich auch in Regionen, die durch geringe Orographie und relativ hohe mittlere Windgeschwindigkeiten auszeichnen, komplizierte vertikale Strukturen im Wind- und Temperaturfeld über einen Zeitraum von mehreren Tagen vorliegen können. Um dies zu verdeutlichen, sind zwei unterschiedliche hohe Emissionsquellen in die Plots eingezeichnet, die sie je nach ihrer Lage oberhalb oder unterhalb der Inversion zu einer völlig unterschiedlichen Schadstoffbelastung am Boden führen. Mit dem zur Zeit eingesetzten Gauß-Modell in der Ausbreitungsrechnung können diese Situationen nur unvollständig erfasst und damit die Ausbreitungsrechnung nicht realistisch durchgeführt werden. Zumindest liefert aber eine Kenntnis über die Inversionshöhe und Inversionsstärke einen Hinweis auf die Zuverlässigkeit der durchgeführten Ausbreitungsrechnung. Eine Partikelmodell würde zu einer weiteren wesentlichen Verbesserung in der Simulation und Bewertung der Schadstoffsituation führen.

Ergänzend sei anzumerken, dass die gleichzeitig durchgeführten Turbulenzmessungen mit einem Ultraschallanemometer am Boden über den gesamten Zeitraum sehr kleine fühlbare Wärmeströme lieferten, im Maximum betrugen diese 15 W/m^2 . Damit stand schon während der Inversion praktisch fest, dass die Inversion nicht durch thermo-dynamische Durchmischung, sondern nur durch einen effektive Luftmassenaustausch aufgelöst werden konnte. Partikelmodelle würden die Information der turbulenten Flüsse zusätzlich verarbeiten und damit die Prognose wesentlich verbessern.

8 Ein- und ausstrahlungsbedingter Auf- und Abbau von aufliegenden Inversionen

Abb. 8 zeigt für eine dreitägige Episode den täglichen Wechsel zwischen einer aufliegenden Inversion, die sich durch nächtliche Abkühlung am Boden bildete, und einer weitgehend neutralen Schichtung am frühen Nachmittag, nachdem die –jahreszeitlich bedingt mäßige– Sonneneinstrahlung für eine Erwärmung der unteren Luftschichten gesorgt hat. Die Witterung war während dieser Episode durch eine andauernde Hochdruckwetterlage mit geringer Bewölkung, aber zeitweiligen Hochnebel gekennzeichnet.

Während der frühen Nachmittagstunden zeigt die Situation (1) eine neutrale Durchmischung, so dass vertikale Austauschvorgänge im wesentlichen durch die mechanisch angeregte Turbulenz erfolgen und durch die Temperaturschichtung weder behindert noch unterstützt werden. Die Schadstoffe können sich in beide vertikale Richtungen vermischen. Durch den Austausch zwischen den oberen und unteren Luftschichten ist am Boden eine erhöhte Windgeschwindigkeit zu erwarten. Diese sorgt für einen schnellen Abtransport von Schadstoffen von der Emissionsquelle weg und durch die verstärkte mechanisch angeregte Turbulenz auch für eine günstige Vermischung der Schadstoffe. Da die mechanisch angeregte Turbulenz an den Hindernissen der Erdoberfläche entsteht, wird die Turbulenz unterhalb des Emissionsniveaus und damit auch die Vermischung höher liegen als oberhalb. Diese Unterschiede dürften aber in unmittelbarer Umgebung der Freisetzung zu keinen wesentlichen Asymmetrien im vertikalen Querschnitt der Schadstoffwolke führen.

Nach Sonnenuntergang findet in Situation (2) eine allmähliche Abkühlung des Erdbodens und nachfolgend der bodennahen Luftschichten statt, während sich in den oberen Höhen zunächst keine Änderungen in der Umgebungstemperatur ergeben. Daraus resultiert, dass die in der Höhe freigesetzten Schadstoffe nach unten hin abgegrenzt werden und zumindest in der Umgebung der Freisetzung nicht zum Erdboden gelangen (günstiger Effekt). Da die Vermischung in den bodennahen Bereich unterhalb der Freisetzung zunehmend reduziert wird, muss folglich die Schadstoffkonzentration gegenüber Situation (1) in den Bereichen darüber liegenden Schichten ansteigen. Zudem nimmt die Windgeschwindigkeit durch den geringeren Einfluss der Bodenrauigkeit in der Höhe zu und sorgt für einen rascheren Abtransport der Schadstoffe. Insgesamt resultiert daraus, dass an weiter entfernten Standorten gegenüber Situation (1) eine höhere Schadstoffkonzentration zu erwarten ist (ungünstiger Effekt). Dies kann jedoch durch die zusätzliche horizontale Aufweitung der Schadstoffwolke abgemildert werden.

Die mit (3) bezeichnete Situation zeigt schließlich die Schadstoffausbreitung, nachdem die aufliegende Inversionen bei andauernder Abkühlung des Erdbodens die Emissionshöhe erreicht und diese überschritten hat. Der Ausbreitungsraum wird dadurch nach oben weitgehend abgegrenzt, während mechanisch angeregte Turbulenz nach unten hin für eine andauernde Durchmischung der unteren bodennahen Luftschichten mit den schadstoffbelasteten Luftmassen aus dem Emissionsniveau sorgt. Wie diese Durchmischung tatsächlich abläuft, erkennt man an zunehmenden Abkühlung der oberen Luftschichten, die durch kleinräumige turbulente Austauschvorgänge mit darunter liegenden Luftschichten gesteuert wird. Durch die stabile Schichtung wird das Windfeld im

bodennahen Bereich vom großräumig bestimmten Windfeld abgekoppelt, wodurch der - eher günstig einzustufende- schnelle Abtransport in entferntere Gebiete unterbleibt. Insgesamt ist in dieser Situation mit einem drastischen Anstieg der Schadstoffkonzentration in der Umgebung des Standortes zu rechnen.

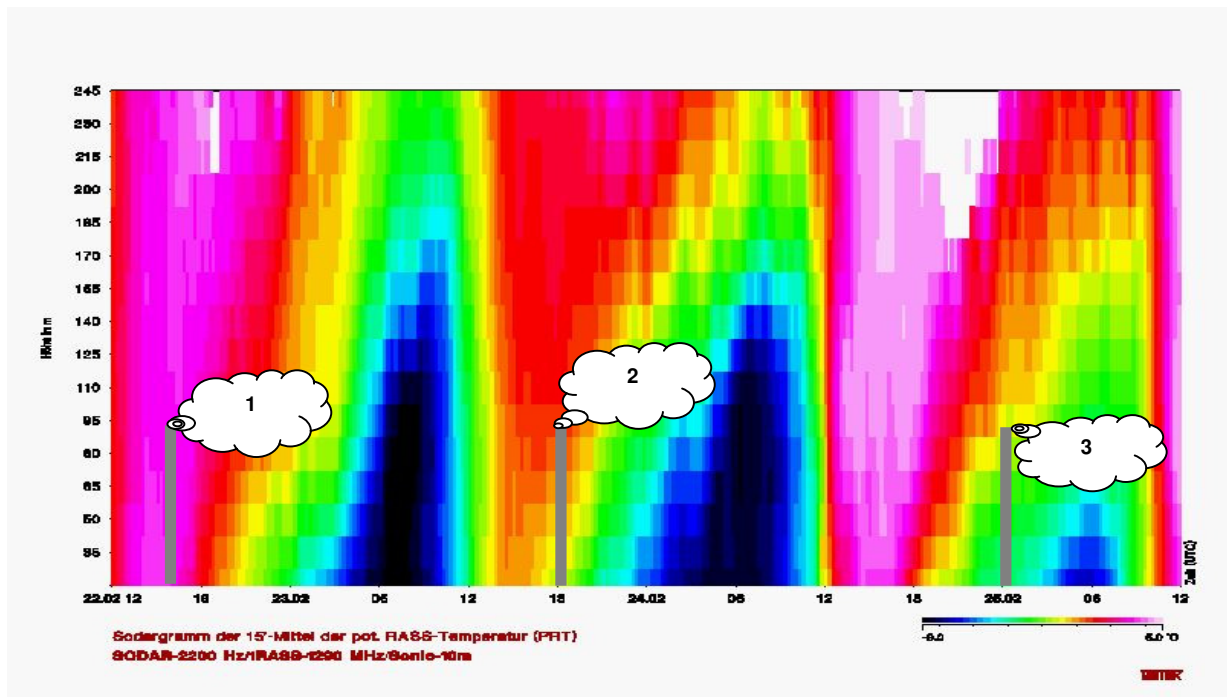


Abb. 8: Tagesgang der vertikalen Temperaturprofils, 22.02. - 25.02.2003

Das gezeigte Beispiel von 3 Tagesgängen wurde aus einer Episode mit insgesamt 15 aufeinanderfolgender Tage gewählt, für die die beschriebenen Zeitabläufe mit hoher Zuverlässigkeit reproduziert wurden. Diese Vorgänge stellen sicherlich unter winterlichen Bedingungen eine größere Problematik dar als während einer sommerlichen Hochdrucklage, da die Situation (3) im Winter durch die geringe Sonnenscheindauer einen größeren Zeitabschnitt im Tagesverlauf einnimmt.

Es ist aber anzumerken, dass sich ähnliche Situationen auch in den übrigen Jahreszeiten einstellen (z. B. abgehobene Inversionen durch Föhnneinfluss oder bei Hochnebel in Kap.7. In allen diesen Fällen würde ein einfaches Gaußmodell den tatsächlichen Austauschbedingungen nur noch eingeschränkt folgen können, die Beschreibung der Schadstoffausbreitung allein auf Basis der mit dem SODAR gemessenen Vertikalwindvarianz wäre sicher mit großen Unsicherheiten behaftet.

9 Schlusswort

Mit der RASS-Technik steht eine zuverlässige, genaue und einfach nachzurüstende Erweiterung der bestehenden Doppler-SODAR-Anlagen zur Verfügung, die in den hinsichtlich der Schadstoffausbreitung kritischen stabilen Wetterlagen eine wichtige Ergänzung der Wind- und Turbulenzprofilmessung darstellt. Dies gilt insbesondere für die Erkennung von vertikalen Sperschichten aufgrund von Temperaturgradienten, durch die die Schadstoffausbreitung wesentlich beeinflusst wird. Es ist zu prüfen, in welcher Form diese zusätzliche Information bei Verwendung moderner Partikel-Ausbreitungsmodelle eingesetzt werden kann. Auch bei Verwendung von den bisher gängigen Gauß-Ausbreitungsmodellen wäre die Verwendung eines Temperaturprofils von großer Bedeutung, um bei Inversionen zumindest einen Hinweis auf die Einschränkung der Ergebnisse in den Ausbreitungsrechnungen zu erhalten.

10 Literatur

Görsdorf, U.: Messgenauigkeit und Verfügbarkeit von Windprofiler/RASS-Messungen unter dem Aspekt der operationellen Anwendbarkeit in der Meteorologie, Dissertation, Universität Hamburg, 1999

Marshall, J. M.: A radio acoustic system for the remote measurement of atmospheric parameters, Scientific report 39 SU-SEL-72-003, Stanford Electron. Laborat., Stanford, CA, 1972

Peters, G.; Timmermann, H. and Hinzpeter, H.: Temperature sounding in the planetary boundary layer by RASS – System analysis and results. Int. J. of Remote Sensing 4 (1983) 49

Peters, G. and Kirtzel, H.J.: Measurements of momentum flux in the boundary layer by RASS. J. Atmos. Oceanic Tech. 11 (1994) 63

Marshall, J.M.; Peterson, A.M. and Barnes, A.A.: Combined radar-acoustic sounding of the atmosphere. Appl. Opt. 11 (1972) 108

Kon, A.J.; Nalbandyan O. G.: Radio acoustic sounding of the atmosphere with continuous acoustic radiation, Bull. (Izv.) Acad. Sci. UDSSR, Atmospheric and Oceanic Physics 14 (1978) 583

Beran, D.W. and Wilfong, T.L. (co-editors): U.S. Windprofilers, A Review, Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research, FCM-R14-1998, Washington, DC, 37 pp., 1998

Hirsch, L.: Bestimmung des turbulenten Impulsflusses mit Hilfe von Doppler- und Interferometriemessungen eines Radar/Rass-Systems, Dissertation, Universität Hamburg, 1999