



Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 6927

**Bestimmung der
Mischungsschichthöhe aus
über einen Zeitraum von
16 Monaten durchgeführten
SODAR-Messungen mittels
automatischer Auswertung**

Matthias Türk, Stefan Emeis
Institut für Meteorologie und Klimaforschung

November 2003

Forschungszentrum Karlsruhe

in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 6927

**Bestimmung der Mischungsschichthöhe aus über einen
Zeitraum von 16 Monaten durchgeführten SODAR-
Messungen mittels automatischer Auswertung**

Matthias Türk^{*}, Stefan Emeis

Institut für Meteorologie und Klimaforschung

^{*} Meteorologisches Institut, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i.Br.

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe
2003

Impressum der Print-Ausgabe:

**Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor**

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe**

**Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)**

ISSN 0947-8620

Zusammenfassung:

Die Ausbreitung emittierter und sekundär gebildeter Luftbeimengungen hängt stark von den meteorologischen Bedingungen in der atmosphärischen Grenzschicht ab. Hierzu zählen die Mischungsschichthöhe (MLH), die das Volumen, auf das eine Luftbeimengung durch turbulenten Austausch verdünnt werden kann, bestimmt, und das vertikale Windprofil, das Ausbreitungsrichtung und -geschwindigkeit vorgibt.

Die MLH ist über längere Zeiträume hinweg in-situ Messungen nicht zugänglich sondern muss mit Fernerkundungsverfahren vom Boden her bestimmt werden. Im Projekt VALIUM im Rahmen des vom BMBF geförderten Programms AFO2000 ist über fast zwei Jahre hinweg ein hochreichendes SODAR (Messhöhe maximal 1200 m, vertikale Auflösung 12,5 bis 25 m, zeitliche Mittelung 30 min) auf einem Industriegelände in Hannover-Linden betrieben worden. Aus den Messdaten zur Schallrückstreuung aus der Atmosphäre und von σ_w lässt sich die MLH ableiten. Hier sollen Ergebnisse aus dem Zeitraum von Oktober 2001 bis März 2003 vorgestellt werden.

Nach der MLH wird in den SODAR-Daten mit zwei Kriterien gesucht. Das erste, das einen starken Abfall der Rückstreuintensität nach oben hin diagnostiziert, sucht nach Obergrenzen einer turbulenten Schicht (tagsüber oft die Obergrenze der konvektiven Grenzschicht). Das zweite Kriterium, das maximale Werte der Rückstreuintensität diagnostiziert (wobei σ_w gewisse Schwellwerte nicht überschreiten darf, um durch Turbulenz ausgelöste Maxima zu eliminieren), sucht nach am Boden aufliegenden oder abgehobenen Temperaturinversionen. Der jeweils niedrigere Höhenwert, der sich aus den beiden Kriterien ergibt, wird als MLH bezeichnet.

Dieser Bericht präsentiert Zeitreihen und Häufigkeitsstatistiken für dieses Datenmaterial. Gezeigt werden monatlichen Häufigkeitsstatistiken der MLH, monatliche Häufigkeitsverteilungen des Tagesmaximums der MLH und monatliche mittlere Tagesgänge der MLH, die allesamt einen deutlichen Jahresgang aufweisen. Abschließend wird die interannuelle Variabilität dieser Statistiken an einem Beispiel demonstriert.

Abstract:

Automatic determination of mixing-layer height from 16 months of SODAR measurements

The dispersion of emitted and formed air pollutants depends decisively on the meteorological conditions in the atmospheric boundary-layer. This includes the mixing-layer height (MLH) that defines the volume within which an air pollutant can be diluted, and the vertical wind profile that determines the direction and speed of the dispersion.

The MLH cannot be measured by in-situ methods for longer time periods. It has therefore to be derived from ground-based remote sensing methods. An acoustic remote sensing instrument, a long-range SODAR, has been operated for nearly two years in the framework of a research project (VALIUM, a AFO2000-project financed by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF)) on the grounds of an industrial plant in the town of Hannover. The maximum range of this remote sensing device is 1200 m, the vertical resolution has been chosen between 12.5 and 25 m, the temporal resolution was 30 min. The device returns profiles of the acoustic backscatter intensity, of the three wind components, and of the variance of the vertical wind component. The MLH can be derived from the backscatter intensity and the variance of the vertical wind component. This report contains results for the period October 2001 until March 2003.

The MLH is retrieved by scanning the vertical profiles from below using two criteria. The first criterion that diagnoses a strong decrease in the backscatter intensity with height is designed to find the top of a turbulent layer. During daytime this turbulent layer is very often identical to the convective boundary layer. The second criterion that diagnoses maximum values of the backscatter intensity profiles is formulated in order to find surface and lifted temperature inversions. Only those maxima are accepted by the criterion where the variance of the vertical velocity component remains below a given threshold. This excludes backscatter maxima from enhanced turbulence intensity. The lower value returned from both criteria is taken as the MLH.

This report presents mainly statistical evaluations of the MLH data set, among which are monthly frequency distributions of MLH, monthly frequency distributions of the daily MLH maximum, and mean daily courses of MLH for selected months. All these results show a distinct yearly course. The interannual variability of the results is demonstrated at one example that compares February 2002 and February 2003.

Inhaltsverzeichnis:

Zusammenfassung

1. Einleitung	3
2. Datenmaterial	3
3. Methode	4
4. Ergebnisse	5
4.1. MLH im Jahresverlauf	5
4.1.1. Reflektivitäten + Zeitreihen	5
4.1.2. Häufigkeitsverteilung des Minimums der Kriterien	8
4.1.3. Häufigkeitsverteilung des Minimums der Kriterien (Tag/Nacht)	10
4.1.4. Häufigkeitsverteilung des Kriteriums 2	12
4.1.5. Häufigkeitsverteilung des Kriteriums 2 (Tag / Nacht)	14
4.1.6. Häufigkeitsverteilung des Tagesmaximums der Inversionshöhe (M. d. K.)	16
4.1.7. Mittlerer monatlicher Tagesgang der Inversionshöhe (M. d. K.)	18
4.2. Interannuelle Variabilität ausgewählter Monate	20
5. Schlussbemerkung und Ausblick	22
6. Literatur	22
Anhang	23

1. Einleitung

Die Ausbreitung von Luftschadstoffen mit der Höhe wird in erster Linie von der vertikalen Struktur der atmosphärischen Grenzschicht (*Atmospheric Boundary Layer*, ABL) in Boden- und Quellnähe bestimmt. Von entscheidender Bedeutung ist dabei die Mischungsschichthöhe (*Mixing Layer Height*, MLH), die die Obergrenze des durch thermische und / oder mechanische Turbulenzen gut durchmischten Bereiches der Atmosphäre darstellt. Die MLH ist also der Beginn einer Sperrschicht, die den Austausch von Luftmassen behindert. Von ihr hängt das Maß der Ausbreitung und Verdünnung von bodennah emittierten Luftschadstoffen ab – je niedriger die Mischungsschichthöhe und je geringer die Turbulenz in der nach unten anschließenden Mischungsschicht, desto höher ist die Anreicherung von Luftschadstoffen in Boden- und Quellnähe. Eine zeitlich kontinuierliche Überwachung der MLH durch in situ-Messungen ist nicht möglich.

Mögliche Verfahren zur Bestimmung der MLH, die häufig durch eine Temperaturinversion, zumindest aber durch eine stabilere thermische Schichtung der Luft charakterisiert ist, werden in Seibert et al. (2000) diskutiert. Eine Methode ist die Fernerkundung mittels SODAR (Beyrich 1997), die zwei Größen aus der Atmosphäre liefert: das vertikale Windprofil (einschließlich des Profils der Varianz der Vertikalgeschwindigkeit σ_w) über die Dopplerverschiebung der rückgestreuten Schallwellen und ein Maß für die turbulenten Temperaturfluktuationen oder des Temperaturgradienten über die Stärke des zurückkommenden Signals.

Die Vorteile des SODAR sind vor allem die im Vergleich zu anderen bodengestützten Fernerkundungsverfahren (RADAR, LIDAR) verhältnismäßig einfache, robuste und preiswerte Technik. Nachteile sind die begrenzte Höhenreichweite (in der Regel nicht über 1000 m) und die limitierte Datenverfügbarkeit bei bestimmten Wettersituationen wie z.B. Starkregen oder den an Strahlungstagen nachmittags auftretenden nahezu perfekt adiabatischen Schichtungsverhältnissen (Maughan et al. 1982). Für Zentral-Schottland (Maughan et al. 1982) und Moskau (Lokoshchenko 2002) sind schon einmal SODAR-Auswertungen zur MLH über längere Zeiträume hinweg durchgeführt worden. Eine Studie von Keder (1999) dagegen scheiterte, da das von ihm verwendete SODAR-Gerät für diese Aufgabe nicht geeignet war.

2. Datenmaterial

In dieser Studie werden die im Rahmen des vom BMBF geförderten AFO2000-Projektes VALIUM (Development and Validation of Tools for the Implementation of European Air Quality Policy in Germany) mit einem METEK-SODAR (DSDR3x7, Reitebuch und Emeis 1998) über einen Zeitraum von mehr als 16 Monaten durchgeführten Messungen auf die Bestimmung der MLH hin statistisch ausgewertet. Aufgabe der SODAR-Messungen im Projekt VALIUM war die Erfassung der großräumigen Wind- und Ausbreitungsverhältnisse im Bereich der Straßenschlucht ‚Göttinger Straße‘ in Hannover bis in ca. 1000 m Höhe über Grund, um sie zu den dort ebenfalls gemessenen Spurenstoffkonzentrationen in Beziehung zu setzen.

Ziel der vorliegenden Auswertung ist die Untersuchung der Variabilität der MLH im Tages- und Jahresverlauf. Durch Vergleich gleicher Monate aus verschiedenen Jahren soll auch ein Anhaltspunkt für die Abschätzung der interannuellen Variabilität der MLH gefunden werden. Das hier verwendete Auswerteverfahren, das die MLH aus den SODAR-Daten ableitet,

konnte zwischenzeitlich durch Parallelmessungen mit dem RASS des FZK-Instituts IMKASF und einem Ceilometer (Münkel et al. 2002) für eine Frühjahrs- und eine Herbstepisode validiert werden (Emeis et al. 2003).

Das SODAR ist ein METEK DSD3x7, ein mono-statisches Doppler-SODAR mit 3 Antennen. In dieser Messkampagne wird das SODAR in einem zweigeteilten Rhythmus betrieben, der halbstündlich wechselt: In der ersten halbe Stunde wird mit einer vertikalen Auflösung von 25m gearbeitet, was unter günstigen Umweltbedingungen eine Reichweite von über 1000m ermöglicht, in der nächsten halbe Stunde beträgt die Auflösung 12,5m, mit einer Höhenreichweite von dann etwas über 500m (Emeis et al. 2003). Dieses Messprogramm bildet einen guten Kompromiss zwischen großer Reichweite einerseits und feiner Auflösung in Bodennähe andererseits, auch wenn die unterschiedlichen Auflösungen zu leicht abweichenden Messergebnissen in den gleichen Höhenstufen führen. Dies ist ein Effekt, welcher direkt vom SODAR verursacht wird. Da er jedoch verhältnismäßig gering ausfällt, wird darauf verzichtet, für die unterschiedlichen vertikalen Auflösungen getrennte Kriterien für die Auswertung der Rohdaten zu formulieren.

In die Auswertung sind die Daten der Monate Okt. 2001 bis Mai 2002 und Aug. 2002 bis März 2003 eingegangen. Für die beiden Monate Juni und Juli 2002 liegen keine Daten vor, da das SODAR während dieser Zeit in einer anderen AFO2000-Messkampagne eingesetzt wurde.

3. Methode

Für die automatische Bestimmung der Inversionshöhe aus den vom SODAR ermittelten 30 Minuten-Mittelwerten der Reflektivität werden zwei Suchalgorithmen verwendet (im folgenden Kriterium 1 bzw. Kriterium 2).

Kriterium 1 sucht nach der Obergrenze der Mischungsschicht indem getestet wird, ob die Turbulenz ein bestimmtes Niveau unterschreitet. Es wird eine logische WENN / UND-Schleife durchlaufen mit R = Reflektivität (dB) und z = Höhe (m):

MLH, Wenn ($R_z < 88$ dB Und $R_{z+1} < 86$ dB Und $R_{z+2} < 84$ dB)

Damit der Suchalgorithmus eine MLH ausweist, muss also die Reflektivität in einer bestimmten Höhe kleiner als 88dB sein und gleichzeitig muss in den beiden darüberliegenden Höhenstufen ein weiterer Abfall der Reflektivität von jeweils mindestens 2 bzw. 4dB im Vergleich zur untersuchten Höhenstufe vorliegen. Die Betrachtung von 3 Stufen soll verhindern, dass einzelne „Ausreißer“ innerhalb der Werte, die nicht im Zusammenhang mit der Obergrenze der Mischungsschicht stehen, ein frühzeitiges Aussteigen des Suchalgorithmus bewirken.

Kriterium 2 ist zweigeteilt und sucht nach abgehobenen oder aufliegenden Inversionen. Der Suchparameter zum Erkennen abgehobener Inversionen definiert die MLH wie folgt (mit σ_w = Streuung der Vertikalgeschwindigkeit der Luftströmung)

MLH, Wenn ($\Delta R / \Delta z_{z+1} < 0$ dBm⁻¹ Und $\Delta R / \Delta z_{z-1} > 0$ dBm⁻¹ Und $\sigma_w < 0,70$ ms⁻¹)

Um eine MLH auszuweisen, muss der Reflektivitäts-Gradient oberhalb der untersuchten Höhenstufe negativ sein und gleichzeitig unterhalb positiv. Der Gradient wird dabei zentriert

jeweils über 2 Höhenstufen gebildet. Zusätzlich muss σ_w kleiner als $0,7 \text{ ms}^{-1}$ sein, um durch Turbulenz erzeugte sekundäre Reflektivitätsmaxima, die gelegentlich tagsüber auftreten, auszuschließen.

Aufliegende Inversionen werden im Kriterium 2 wie folgt definiert:

MLH, Wenn $R_z > 105 \text{ dB}$ Und $\sigma_w < 0,3 \text{ ms}^{-1}$

R_z muss größer als 105 dB sein, und σ_w kleiner als $0,3 \text{ m s}^{-1}$. Das Sigma-Kriterium ist erforderlich, um Situationen mit starken bodennahen Turbulenzen auszuklammern, die sich ebenfalls durch hohe Reflektivitäten auszeichnen. Diese treten v.a. an Strahlungstagen im Sommer auf, wenn sich durch Erwärmung der Oberfläche eine bodennahe überadiabatische Schichtung und thermische Turbulenz ausbildet.

Der jeweilige Suchalgorithmus scannt die Werte des Höhenprofils für jede halbe Stunde von unten nach oben durch, für Kriterium 1 und 2 getrennt nacheinander. Bei Erfüllung eines der Suchparameter innerhalb eines Kriteriums steigt das Programm aus und die weitere Suche innerhalb dieser halben Stunde wird für dieses Kriterium abgebrochen.

Von den von beiden Kriterien gefundenen Inversionshöhen wird die niedrigere (nachfolgend als Minimum der Kriterien, M.d.K. bezeichnet) ermittelt, da diese entscheidend ist für den Beginn der Sperrschicht, die die Verdünnung von Luftschadstoffen in vertikaler Richtung verhindert.

4. Ergebnisse

4.1. MLH im Jahresverlauf

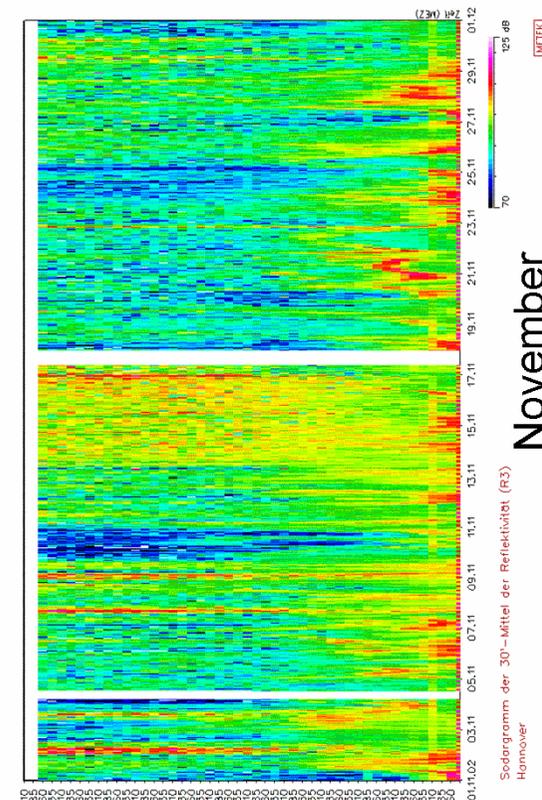
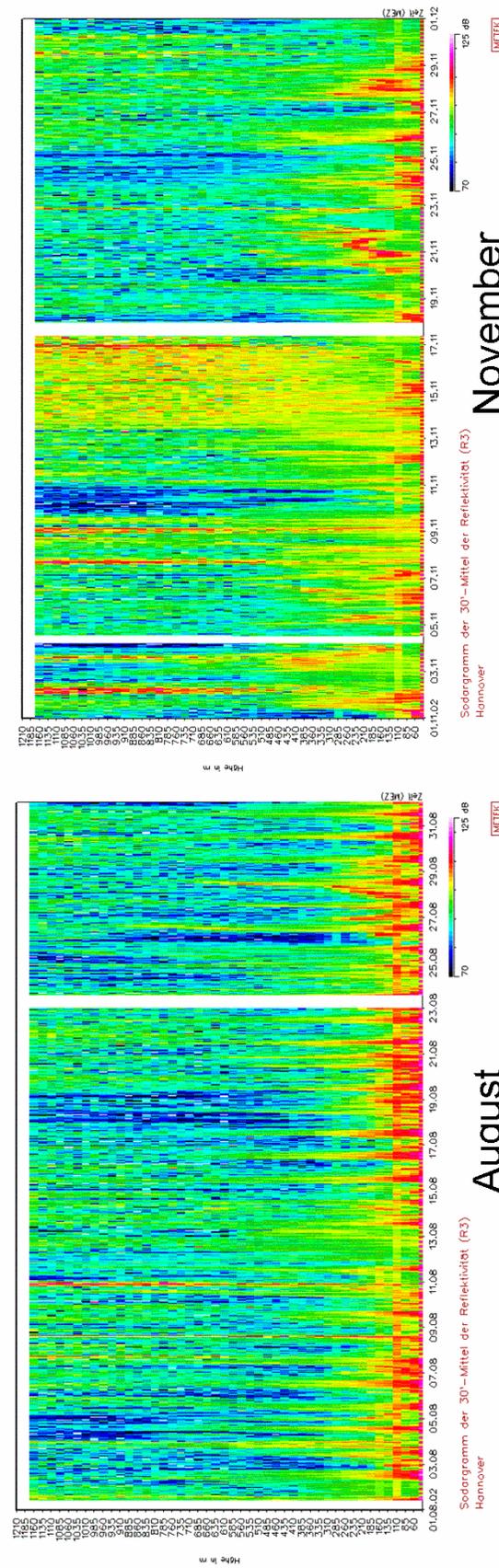
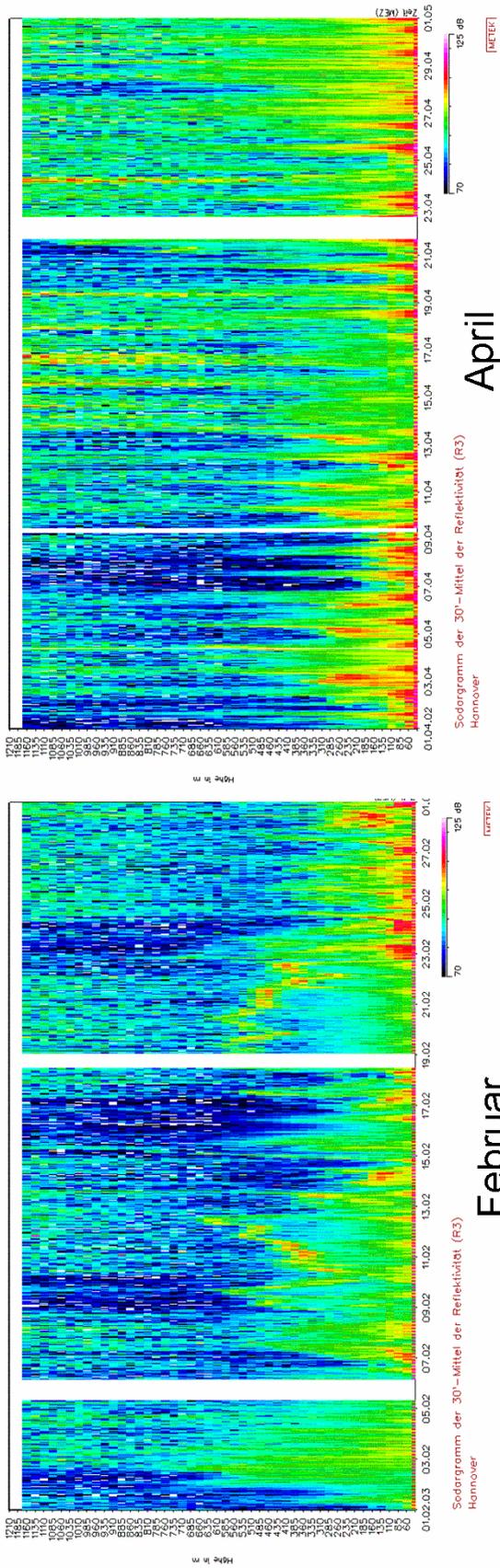
Zum Vergleich werden 4 Monate (April, August und November 2002 sowie Februar 2003) ausgewählt, anhand derer die unterschiedliche Charakteristik der MLH im Jahresverlauf deutlich wird.

4.1.1. Reflektivitäten + Zeitreihen

Zunächst werden die Rohdaten der Reflektivitäten anhand eines Sodargramms (Abb. 1) sowie einfacher Zeitreihen, die den Verlauf der von den Kriterien 1 und 2 gefundenen Inversionshöhen wie auch das Minimum der Kriterien aufzeigen (Abb. 2), dargestellt. Diese monatsweisen Rohdatendarstellungen ermöglichen eine erste Begutachtung der Daten, das Erkennen von Tagesgängen sowie besonderer meteorologischer Phänomene. April und insbesondere der August sind durch ausgeprägte, regelmäßige Tagesgänge gekennzeichnet, während der Februar bis auf die Tage vom 23.-28. keinen deutlichen Tagesgang aufweist sondern durch die synoptischen Bedingungen und die allgemeine Wetterlage geprägt ist. Der November nimmt hier eine Mittelstellung ein. Ausgeprägte Tagesgänge entstehen hauptsächlich an Strahlungstagen mit Aufwärmung am Tag und Auskühlung in der Nacht.

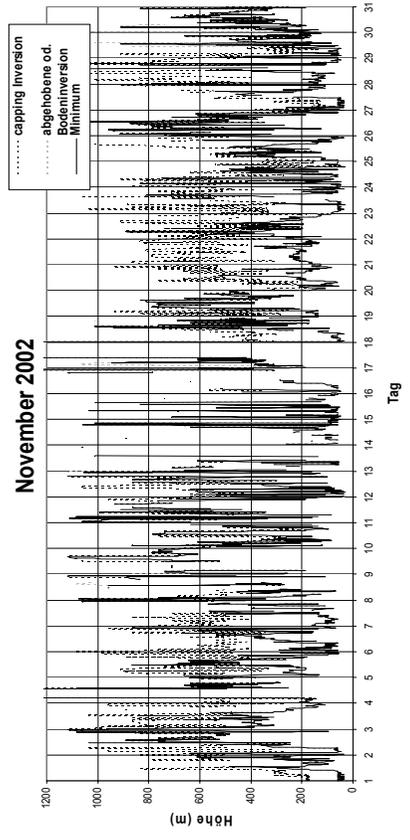
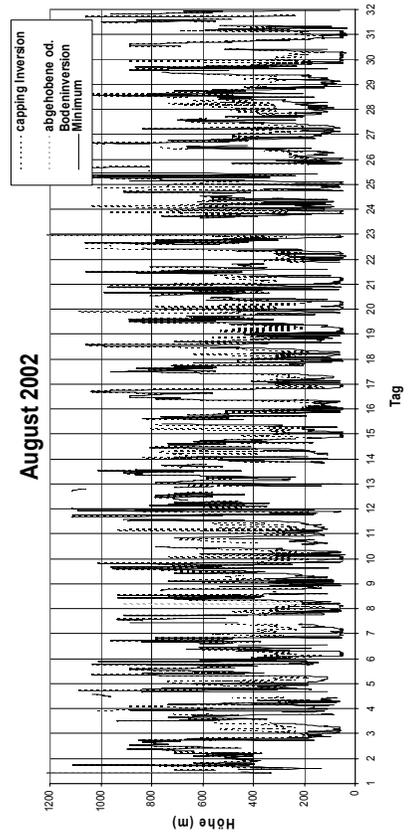
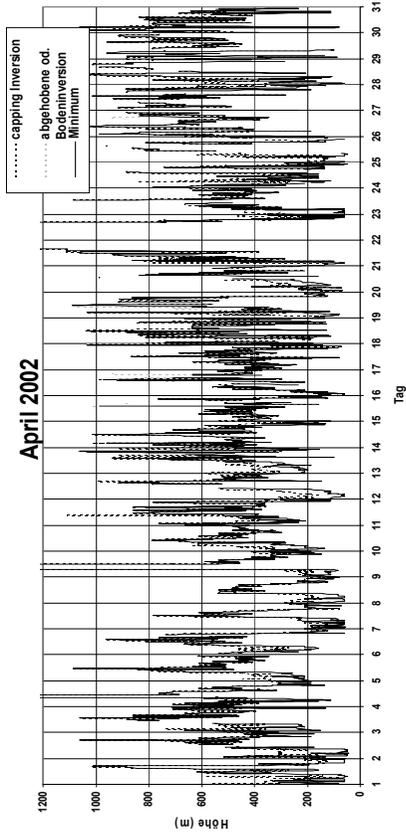
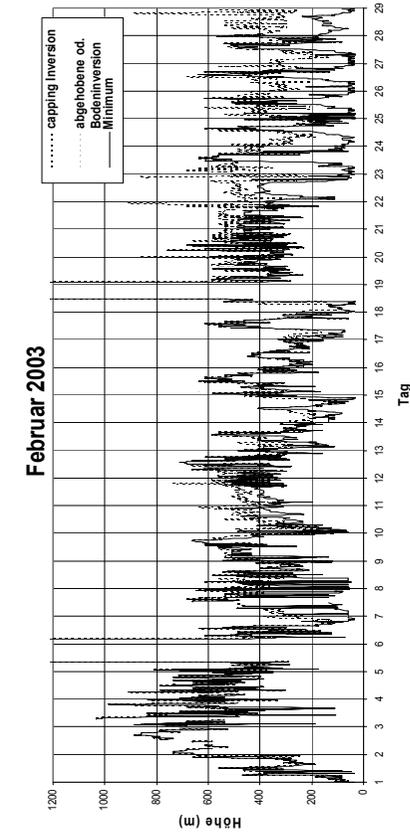
Gemessene Schallreflektivität in dB, METEK-SODAR, Hannover

Abb. 1



Zeitreihen

Abb. 2

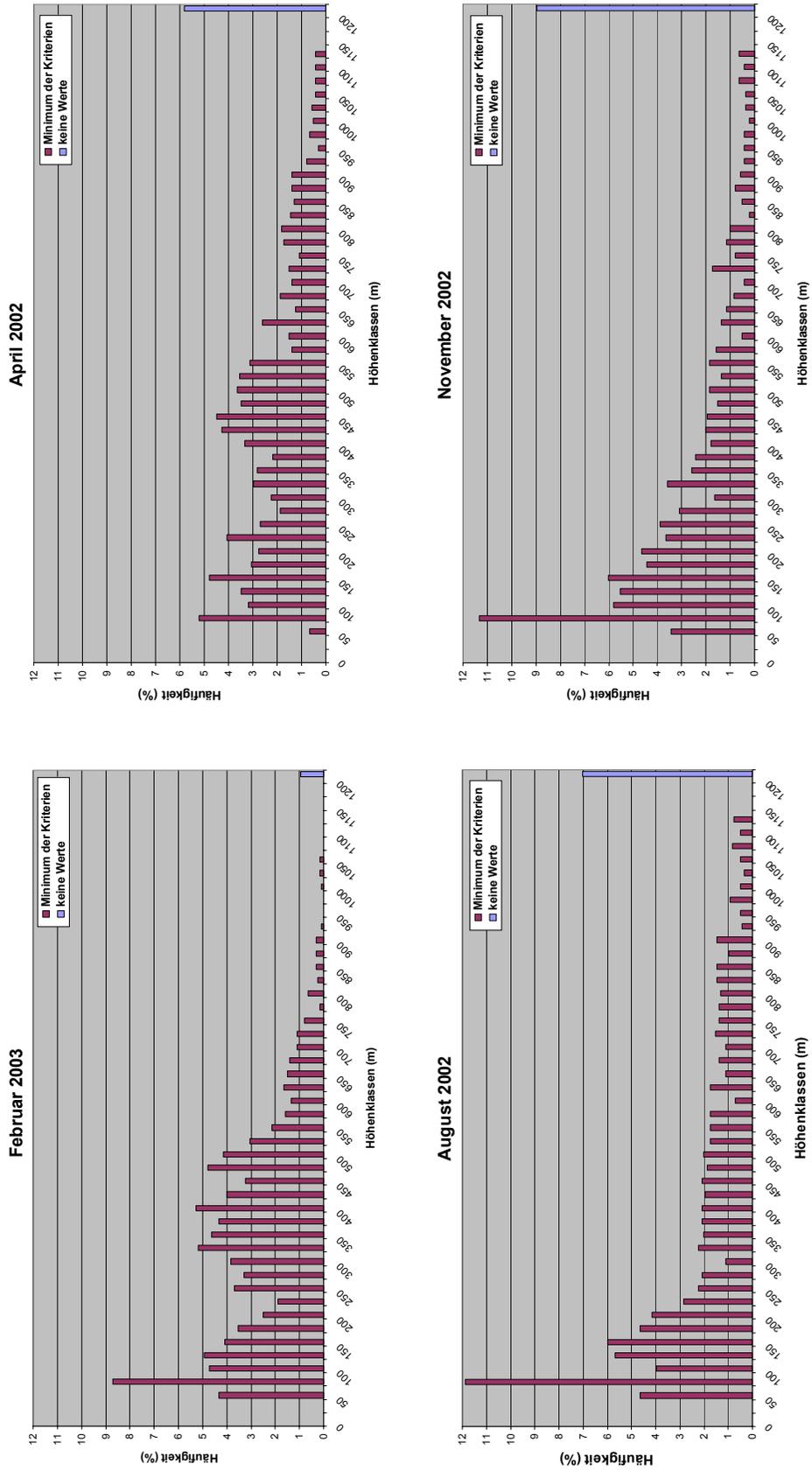


4.1.2. Häufigkeitsverteilung des Minimums der Kriterien

Die Grafiken in Abb. 3 zeigen die Häufigkeitsverteilung des Minimums der von beiden Kriterien gefundenen Inversionshöhen aus allen Halbstundenwerten eines Monats. In allen Monaten fällt ein Peak in der Höhe 75m auf, der jedoch im April relativ schwach ausgeprägt ist. Dieser relativ bodennahe Peak entsteht durch aufliegende Inversionen bei nächtlicher Auskühlung, welche in diesem August besonders häufig vorkommen. Der Februar fällt durch ein deutliches zweites Maximum in einer Höhe zwischen 325m und 450m auf. Dies resultiert aus dem wenig ausgeprägten Tagesgang und der bei den Zeitreihen (s. Abb. 2) beschriebenen Dominanz der synoptischen Umgebung, was zu einer größeren Häufigkeit der Inversionshöhen in diesen Höhenklassen führt. Im August fallen zwei Effekte besonders auf: Ein Maximum in den unteren Höhenklassen und eine sehr gleichmäßige Verteilung bis in große Höhen. Ursache sind die durch klare Nächte mit Auskühlung bedingten aufliegenden Inversionen einerseits und durch starke Einstrahlung verursachte aufsteigende Inversionen andererseits. Dadurch, dass die aufsteigenden Inversionen nahezu jeden Tag gleichmäßig alle Höhenstufen durchlaufen, kommen die Höhenklassen ab 275m mit leichter Abnahme nach oben sehr einheitlich vor. Die Inversionen erreichen im April 2002 bereits große Höhen, was sich durch die allgemein besonders im April und Mai vorkommenden starken thermische induzierten Turbulenzen – verursacht durch die in dieser Zeit vorherrschenden Temperaturunterschiede zwischen aus Norden kommender noch sehr kalter und trockener Luft und bereits durch Einstrahlung aufgeheizter Landoberfläche – erklären läßt. Der November 2002 wird durch eine verhältnismäßig geringe Sonnenscheindauer geprägt, die Inversionshöhen häufen sich daher in den unteren Höhenklassen.

Häufigkeitsverteilung der Inversionshöhe (M.d.K.)

Abb. 3



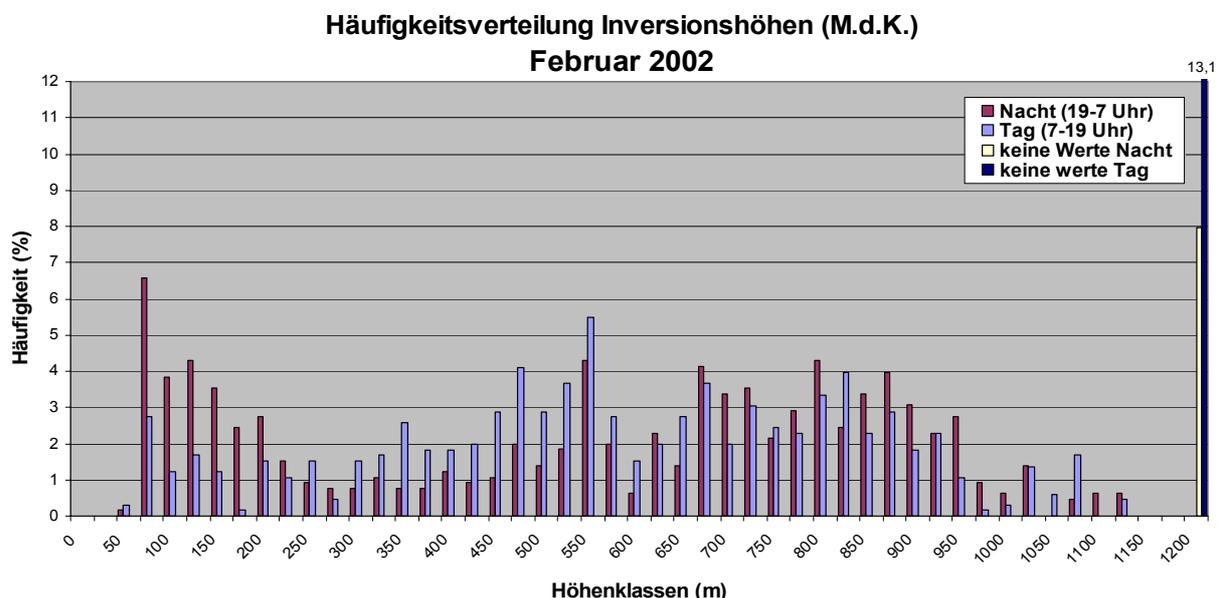
4.1.3. Häufigkeitsverteilung des Minimums der Kriterien (Tag/Nacht)

In Abb. 5 wird die Häufigkeitsverteilung des Minimums der Kriterien getrennt nach Tag und Nacht dargestellt, mit Tag von 7:00 bis 18:59 Uhr und Nacht von 19:00 bis 6:59 Uhr. Im Februar und November fällt auf, dass es bis auf die Häufung der Nachtwerte in den unteren Klassen keinen allzu großen Unterschiede in der Verteilung der Tag- und Nachtwerte gibt. Im Gegensatz dazu zeigen April und v.a. August markante Differenzen zwischen der Häufigkeitsverteilung der Tag- und Nachtwerte. In beiden Monaten dominieren in den unteren Höhenklassen erwartungsgemäß die Nachtwerte (verursacht durch auskühlungsbedingte aufliegende Inversionen) und in den oberen Klassen die Tagwerte, ausgelöst durch abgehobene Inversionen und Obergrenzen konvektiver Grenzschichten.

Als Beispiel für zeitweilig vorkommende Häufigkeitsverteilungen mit drei Maxima wird außerhalb der vier für die Vergleiche in dieser Studie betrachteten Monate der Februar 2002 angeführt. Hier zeigt sich klar eine dreigipflige Verteilung im Diagramm des M.d.K. getrennt nach Tag und Nacht (s. Abb. 4). Der erste Peak im Bereich bis etwa 150m hat seinen Ursprung überwiegend in den nächtlichen Inversionen, der zweite Gipfel zwischen 450 und 550m rührt in erster Linie von den tagsüber auftretenden abgehobenen Inversionen her. Zu diesen beiden thermisch induzierten Prozessen kommt in diesem Monat ein dritter Effekt hinzu, der sich in einem weiteren, gemessen an den beiden anderen Maxima verhältnismäßig breiten, Maximum in der Häufigkeitsverteilung zwischen etwa 675 und 950m zeigt. Dieser Peak resultiert aus im Februar 2002 gehäuft auftretenden Sturmereignissen und dadurch bedingter starker mechanischer Durchmischung bis in große Höhen und weist – da nicht durch thermische Effekte verursacht – keinen Unterschied in der Verteilung zwischen Tag und Nacht, also keinen Tagesgang auf. Die dreigipflige Verteilung entsteht also aus einem mechanisch und zwei thermisch verursachten Abläufen.

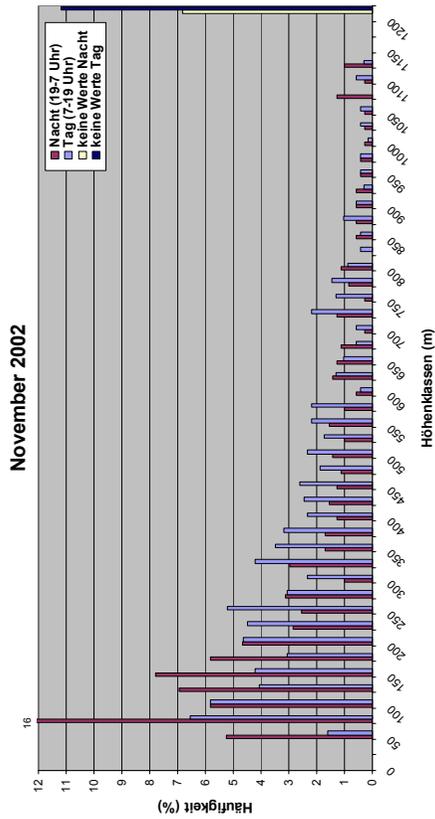
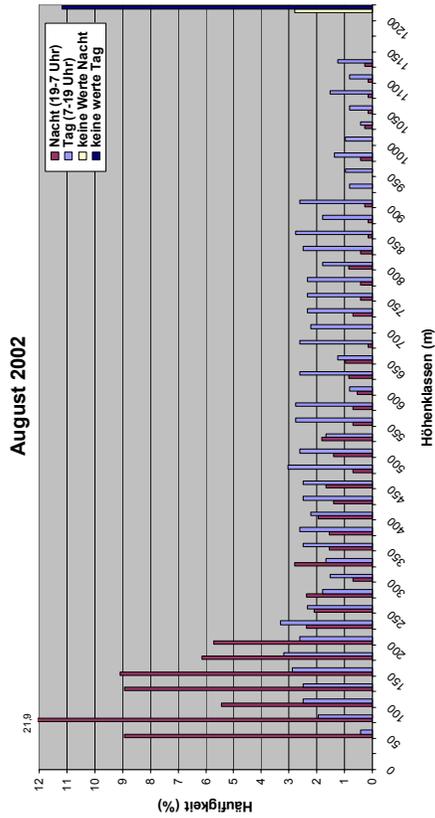
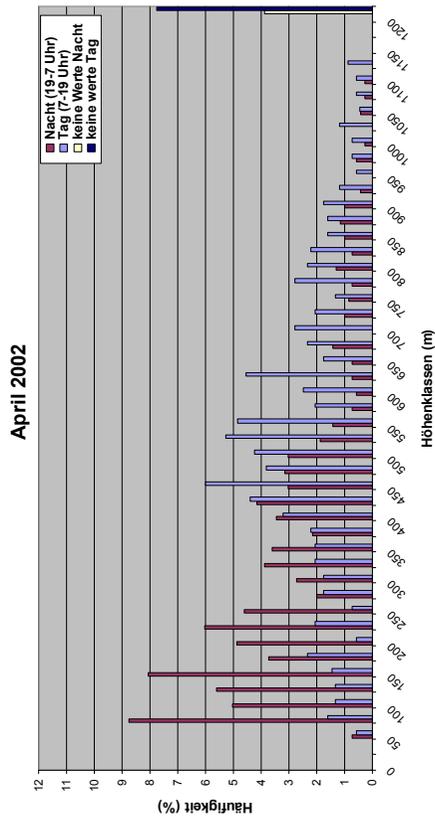
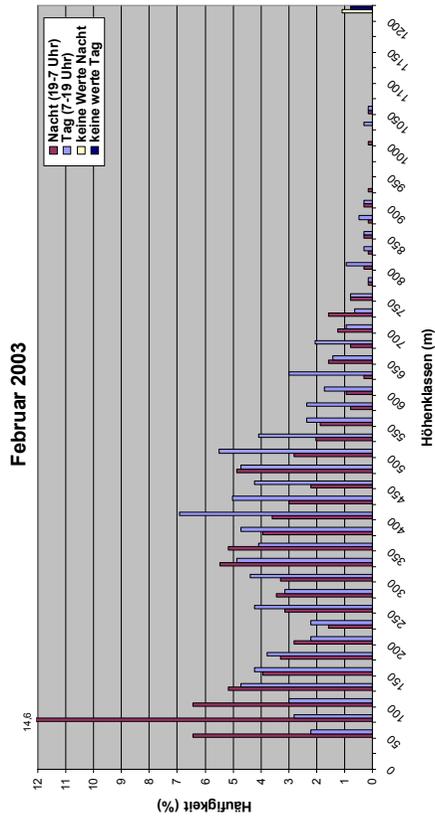
Im August und mit Abstrichen auch im April und November wird die limitierte Höhenreichweite des SODAR in der Tatsache deutlich, dass Fälle, in denen keine Inversionshöhe gefunden wird, wesentlich häufiger tagsüber auftreten als nachts. Steigen abgehobene Inversionen so weit auf, dass sie über die Reichweite des SODAR hinausgehen, wird keine Inversion mehr ausgewiesen.

Abb. 4



Häufigkeitsverteilung der Inversionshöhe (M.d.K.), Tag / Nacht

Abb. 5



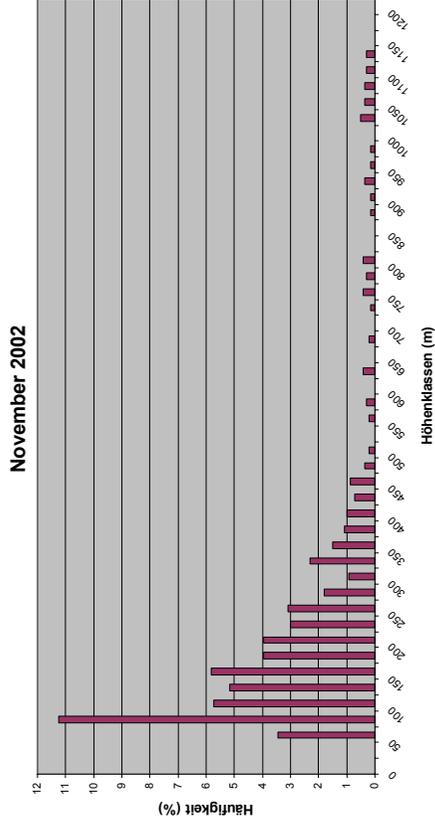
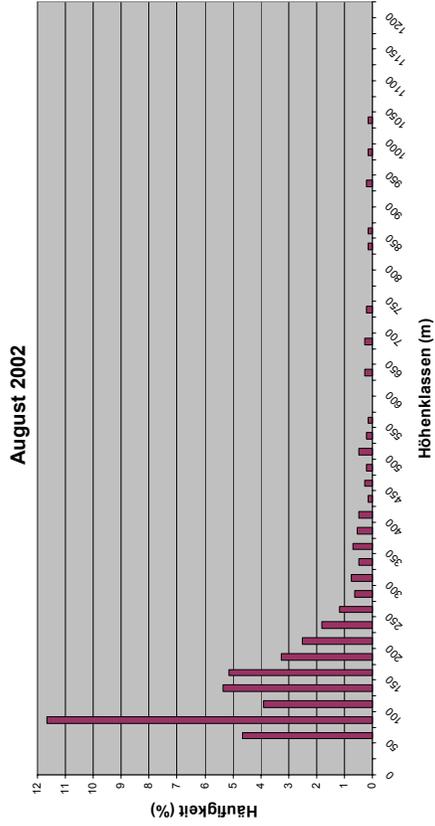
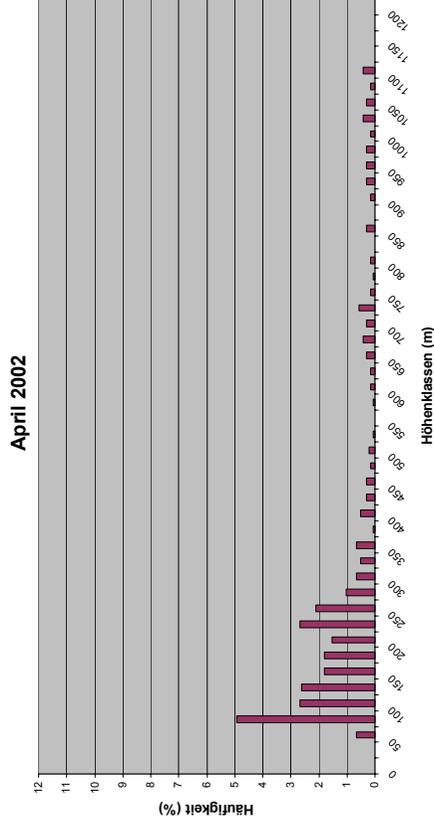
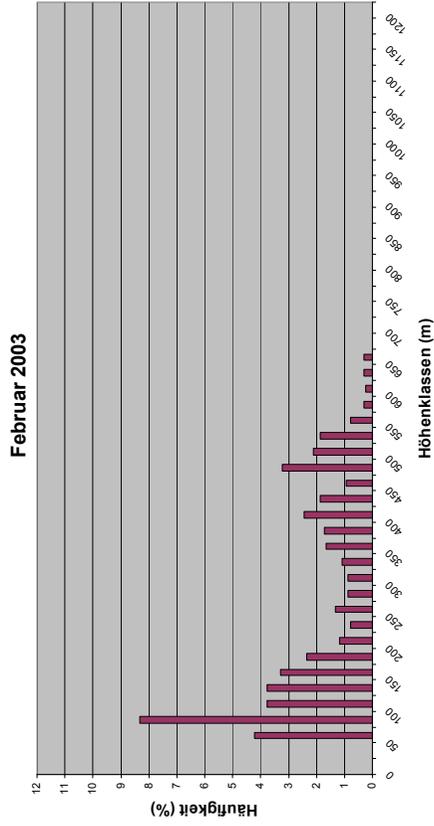
4.1.4. Häufigkeitsverteilung des Kriteriums 2

Neben der Untersuchung des für den Beginn einer den Luftmassenaustausch behindernden Sperrschicht entscheidenden M.d.K. wird auf das Kriterium 2 näher eingegangen. Während das erste der beiden formulierten Kriterien vergleichsweise diffus ist und nicht nur die in verschiedenen Situationen vorkommende Obergrenze einer konvektiven Grenzschicht sucht, sondern auch nach oben abnehmende Turbulenz in nächtlichen Grenzschichten berücksichtigt, beschreibt Kriterium 2 eindeutige meteorologische Situationen. Durch Einbeziehung von σ_w spricht es nur Zustände an, die durch Temperaturinversionen, also äußerst stabile Schichtungsverhältnisse, gekennzeichnet sind und dadurch den Luftmassenaustausch massiv behindern bzw. unterbinden. Instabile Temperaturschichtungen werden nicht erfasst, da diese mit hoher Turbulenz und somit einem hohen σ_w einhergehen. Wie in Abb. 6 ersichtlich treten die oben beschriebenen Temperaturinversionen (innerhalb der Reichweite des SODAR) fast ausschließlich in Höhen bis maximal 600m auf.

Die Summe der relative Häufigkeiten, also die Anzahl der Halbstundenwerte in denen eine Inversion nach Kriterium 2 gefunden wird im Verhältnis zu allen Halbstundenwerten eines Monats (ohne Messausfälle), ist in den betrachteten Monaten deutlich verschieden. Während im April 2002 lediglich in 30% aller Fälle eine Inversion nach Kriterium 2 vom Suchalgorithmus ausgewiesen wird, sind es im November 2002 immerhin 61%, was recht genau der doppelten Anzahl entspricht. Februar 2003 und August 2002 liegen mit 50 bzw. 46% zwischen den beiden anderen Monaten. Die Ursache für die differierenden Häufigkeiten liegt in der unterschiedlichen thermischen Stabilität der Atmosphäre in diesen Monaten. In dem durch häufig thermisch instabile Schichtung geprägtem April mit bereits beträchtlicher Einstrahlung und z.B. im Vergleich zum August 2002 klar höheren mittleren Windgeschwindigkeiten wird die Entstehung der vom Kriterium 2 gesuchten stabilen Schichtungen mit geringer Turbulenz stark behindert, während sich diese im November aufgrund der geringen Einstrahlung sowie der nur schwachen mechanische Turbulenz ungestörter entwickeln können. In dem von Sturmereignissen geprägten Februar 2002 treten gar nur in 22 % aller Halbstundenwerte Inversionen nach Kriterium 2 auf, weil diese durch die starke mechanische Durchmischung an ihrer Entstehung gehindert werden.

Häufigkeitsverteilung der Inversionshöhe (Kriterium 2)

Abb. 6



4.1.5. Häufigkeitsverteilung des Kriteriums 2 (Tag / Nacht)

Bei der differenzierten Betrachtung der Tag- und Nachtwerte des Kriteriums 2 (s. Abb. 7) ist die Grundstruktur der Häufigkeitsverteilung teilweise vergleichbar mit denen des M. d. K. (s. Abb. 5), allerdings auf einem niedrigeren Niveau und mit nur sehr wenigen Werten in den Höhenklassen über 600m. Durchgängig werden nachts relativ mehr Werte gefunden als tagsüber (jeweils bezogen auf die Summe aller Halbstundenwerte einer Nacht bzw. eines Tages), ausgelöst durch das nächtliche Auftreten stabiler aufliegender Inversionen.

Im Februar 2003 fällt wieder die charakteristische zweigipflige Verteilung auf, ursächlich in dem kaum vorhandenen Tagesgang und der Häufung der Inversionen in diesen Höhen Aufgrund der vorherrschenden synoptischen Bedingungen.

Häufigkeitsverteilung der Inversionshöhe (Kriterium 2), Tag / Nacht

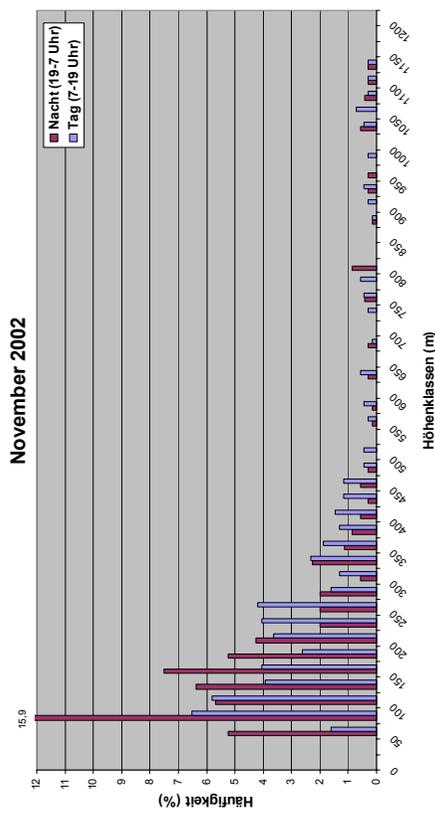
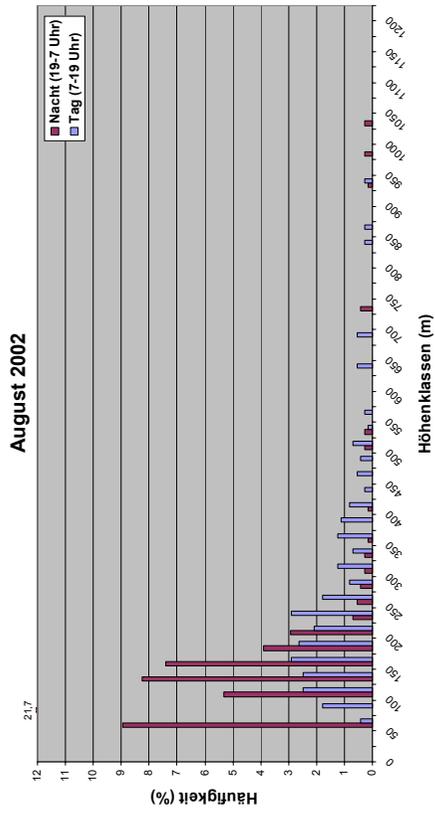
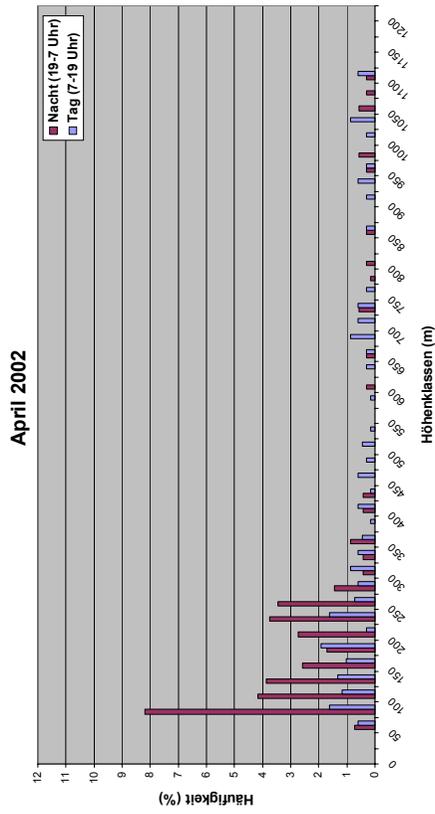
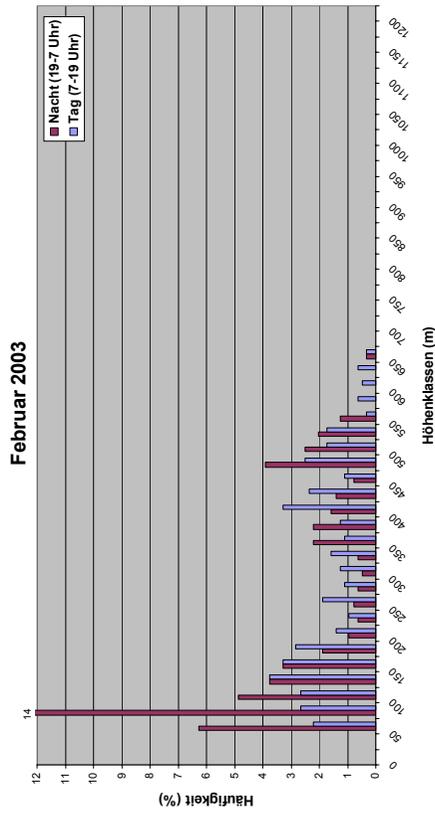


Abb. 7

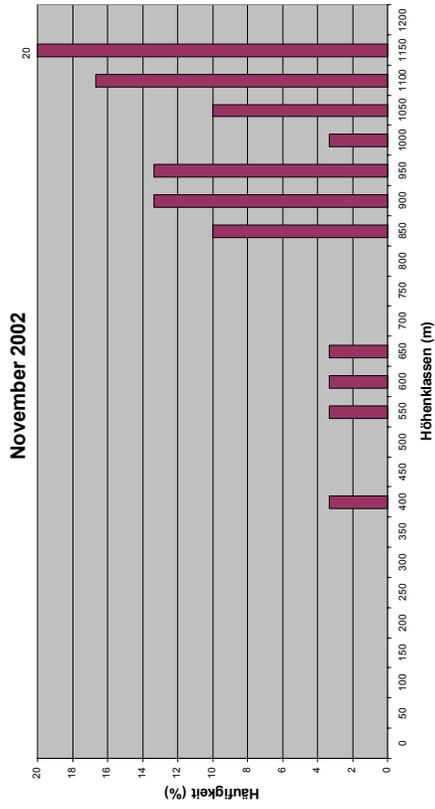
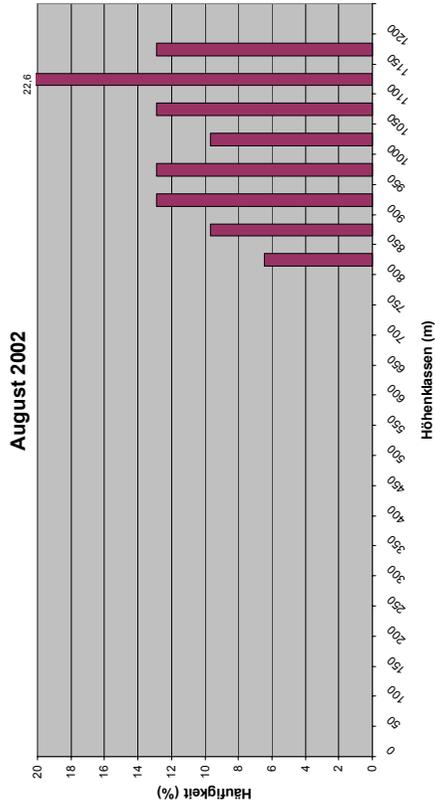
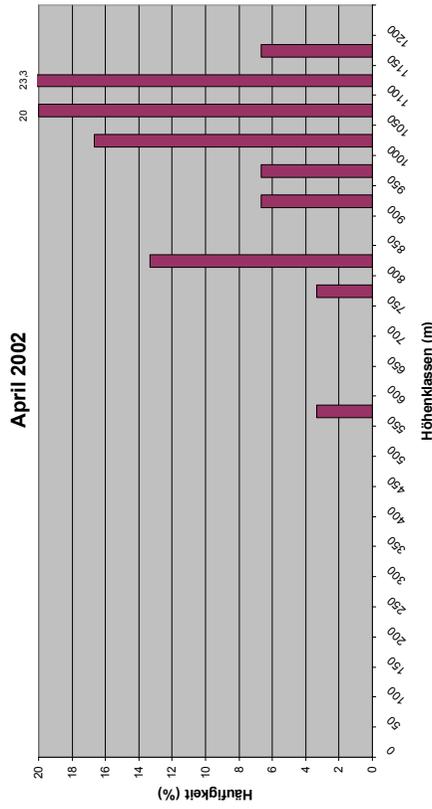
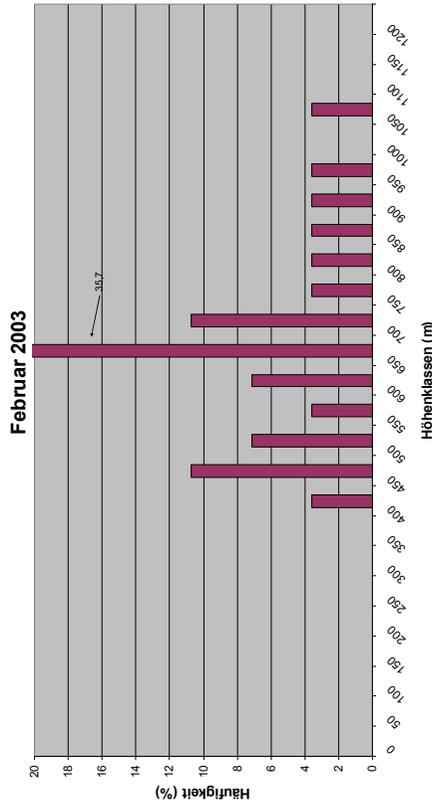
4.1.6. Häufigkeitsverteilung des Tagesmaximums der Inversionshöhe (M. d. K.)

Die Darstellung der Häufigkeitsverteilung des Tagesmaximums der Inversionshöhe des M. d. K. (Abb. 8) ergibt sich aus dem jeweils einen absolut höchsten Wert jedes Tages eines Monats. Es genügt also bereits ein fälschlich nach oben ausreißender Wert pro Tag, um ein höheres Maximum zu suggerieren, als dies tatsächlich der Fall ist. Dies ist ein Nachteil des automatischen Verfahrens zum Detektieren von Inversionen, das dafür aber gegenüber manueller Betrachtung den Vorteil bietet, in kurzer Zeit sehr große Datenmengen bearbeiten zu können.

Dennoch unterscheiden sich die betrachteten Monate wie erwartet in der Struktur der Häufigkeitsverteilung des Tagesmaximums, ein Zeichen dafür, dass die Ausreißer nicht dominieren. Im Februar 2003 treten die Tagesmaxima verstärkt in den mittleren Höhenklassen zwischen 450 und 750m auf, während sie im August 2002 ausschließlich in den höheren Klassen ab 800m vorkommen. Dies lässt sich damit erklären, dass sich im August nahezu täglich strahlungsbedingt aufsteigende Inversionen bilden, sodass immer hohe Klassen erreicht werden. Die Monate April und November 2002 zeigen ähnlich wie der August ein Maximum der Häufigkeitsverteilung in den höheren Klassen, allerdings treten hier auch Werte in den mittleren Klassen auf. Dies ist zu erwarten, da die Einstrahlung in diesen Monaten geringer ist und daher aufsteigende Inversionen weniger ausgeprägt sind.

Häufigkeitsverteilung des Tagesmaximums der Inversionshöhe (M.d.K.)

Abb. 8



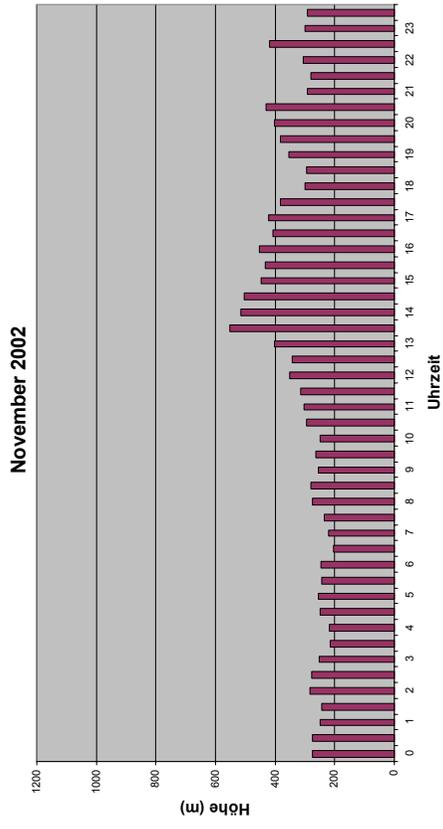
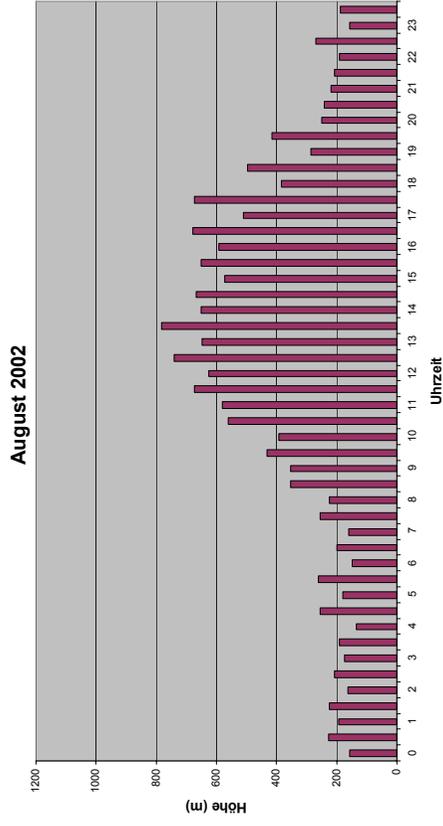
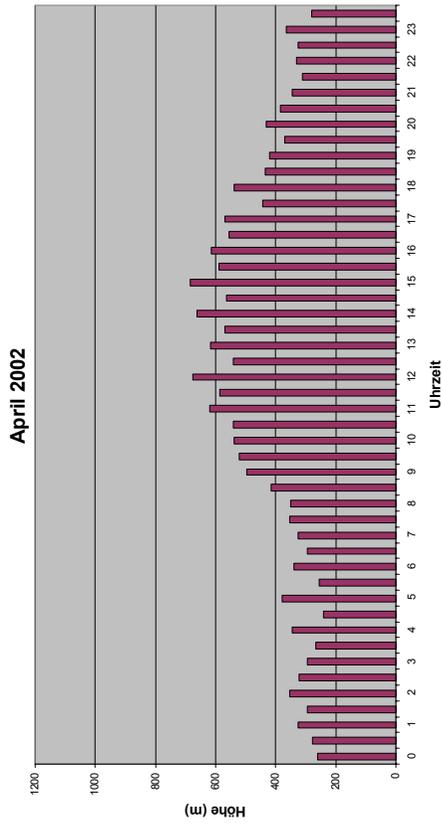
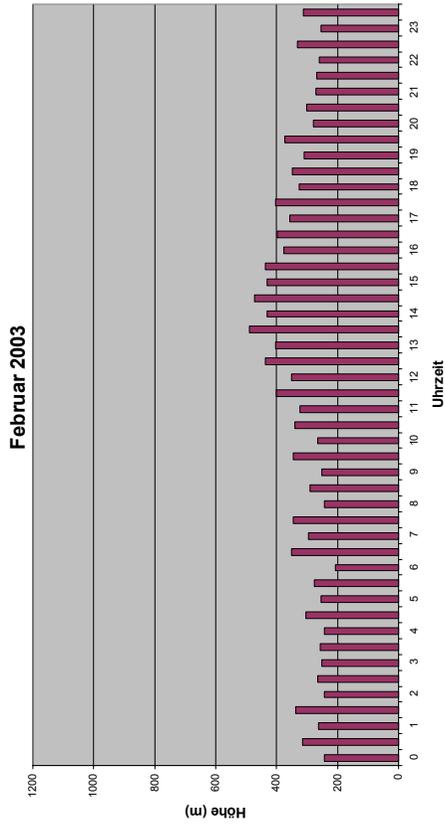
4.1.7. Mittlerer monatlicher Tagesgang der Inversionshöhe (M. d. K.)

Die Abbildungen des mittleren monatlichen Tagesgangs der Inversionshöhe basieren auf allen Halbstundenwerten des Minimums der Kriterien 1 und 2. Die Monate zeigen in dieser Darstellung charakteristische Unterschiede im Jahresverlauf (vergl. die Verläufe von Höchst- und Tiefsttemperatur, Windgeschwindigkeit und Sonnenscheindauer in den Abb. 11-14).

Februar 2003 und November 2002 besitzen einen vergleichsweise wenig ausgeprägten Tagesrhythmus und erreichen im mittleren Tagesgang nur eine maximale Höhe von etwa 500m. Ausschlaggebend sind dabei hauptsächlich der niedrige Sonnenstand und die dadurch limitierte einstrahlungsbedingte thermische Komponente bei der Turbulenzbildung. Wesentlich deutlicher erscheint der Tagesgang im April 2002, und die mittlere Inversionshöhe gipfelt erst bei über 600m. Den am auffälligsten ausgeprägten Tagesgang der Inversionshöhe besitzt erwartungsgemäß der August 2002, verursacht durch den zu dieser Jahreszeit ohnehin hohen Sonnenstand mit entsprechend hoher Einstrahlung und zusätzlich durch die speziell in diesem August außerordentlich hohe Zahl von Strahlungstagen. Durch die starke nächtliche Auskühlung an Strahlungstagen, die in diesem Monat regelmäßig mit Unterschieden in der Tageshöchst- und -tiefsttemperatur von deutlich über 10°C einhergehen (vergl. Abb. 13), sinken die Nachtwerte im mittleren monatlichen Tagesgang bedingt durch aufliegende Inversionen tiefer als in allen anderen betrachteten Monaten i.d.R. auf Werte unter 200m.

Mittlerer monatlicher Tagesgang der Inversionshöhe (M.d.K.)

Abb. 9



4.2. Interannuelle Variabilität ausgewählter Monate

Zusätzlich zur Betrachtung der vier ausgewählten Monate zum Aufzeigen jahreszeitlich bedingter Differenzen kann auch ein interannueller Vergleich sehr aufschlußreich sein.

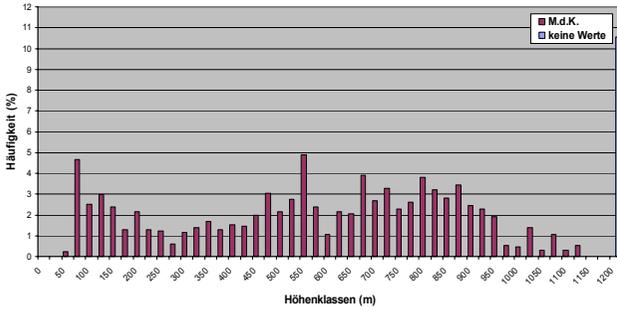
Der Februar 2003 (siehe die Darstellung wesentlicher meteorologischer Parameter in Abb. 11 im Anhang) ist ein typischer kalter Wintermonat mit 8 Eistagen gewesen, wohingegen der Februar 2002 (siehe Abb. 15 im Anhang) eher einem warmen Frühlingsmonat entsprach und zusätzlich von mehreren Sturmereignissen geprägt wurde.

Der unterschiedliche Witterungscharakter dieser beiden Monate spiegelt sich in den völlig unterschiedlichen Häufigkeitsverteilungen der MLH für diese beiden Monate wider. Bei der Betrachtung der Häufigkeitsverteilung des Minimums der beiden Kriterien fällt auf, dass im Februar 2003 das Maximum der Verteilung auf Grund der vielen klaren Tage, an denen es stark auskühlte, klar in der unteren Hälfte der Höhenklassen liegt, während es im Februar 2002 auf Grund der höheren Turbulenterzeugung durch die hohen Windgeschwindigkeiten deutlich höher angesiedelt ist. Die vom Kriterium 2 ermittelten aufliegenden oder abgehobenen Inversionen kommen im kalten Februar 2003 häufiger vor als im warmen und windigen Februar 2002 (siehe auch Kap. 4.1.4). Der mittlere monatliche Tagesgang der Inversionshöhe des Minimums der Kriterien unterscheidet sich ebenfalls deutlich. Beide Monate zeigen keinen besonders stark ausgeprägten Tagesgang, obgleich dieser im Jahr 2003 aufgrund höherer Einstrahlung stärker zum Ausdruck kommt. Während im Jahr 2003 die Höhen zwischen 200 und 450m liegen, fallen Sie im Februar 2002 nie unter 400m und erreichen bis zu 650m. Der Peak der Verteilung der Tagesmaxima liegt im Februar 2002 in den oberen Höhenklassen (1000-1150m), im Februar 2003 dagegen in den mittleren (450-700m).

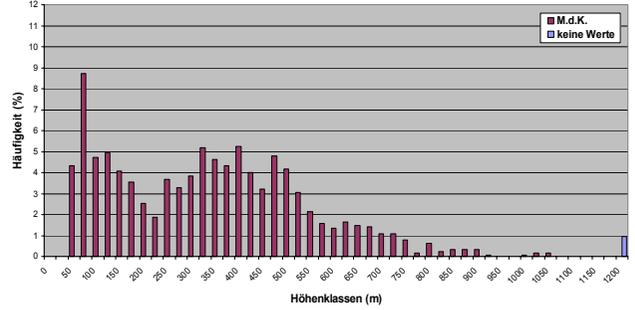
Das Widerspiegeln der klimatologisch völlig verschiedenen Charakteristika der beiden Monate in den Statistiken der gefundenen Inversionshöhen ist ein Indiz für die Aussagefähigkeit der verwendeten Methode zur automatischen Bestimmung der Mischungsschichthöhe aus SODAR-Daten.

Interannueller Vergleich Februar 2002 – Februar 2003

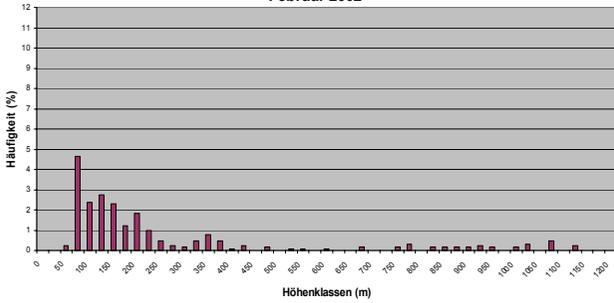
Häufigkeitsverteilung Inversionshöhen (M.d.K.)
Februar 2002



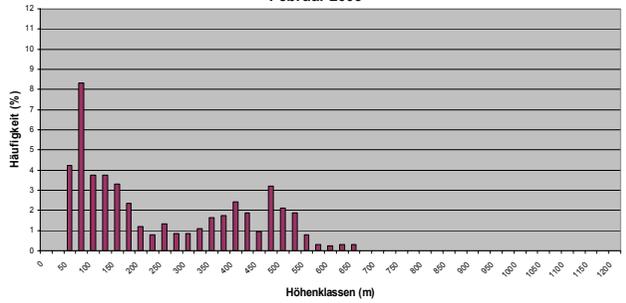
Häufigkeitsverteilung Inversionshöhen (M.d.K.)
Februar 2003



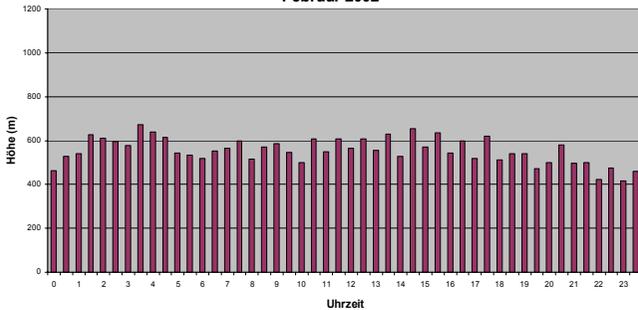
Häufigkeitsverteilung Inversionshöhen (Kriterium2)
Februar 2002



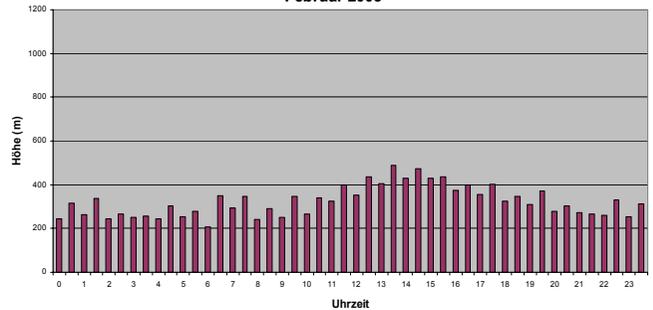
Häufigkeitsverteilung Inversionshöhen (Kriterium2)
Februar 2003



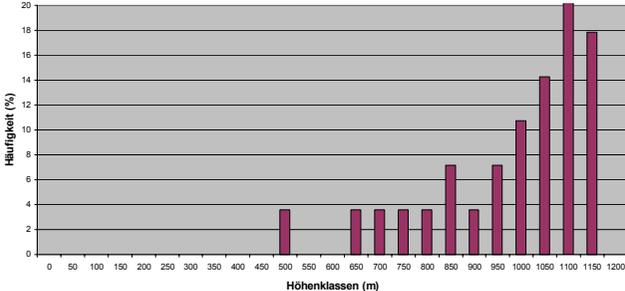
Mittlerer monatlicher Tagesgang der Inversionshöhe (M.d.K.)
Februar 2002



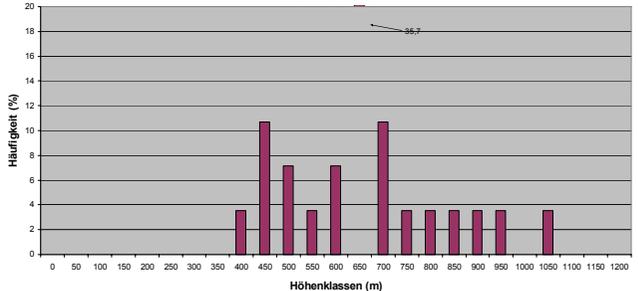
Mittlerer monatlicher Tagesgang der Inversionshöhe (M.d.K.)
Februar 2003



Häufigkeitsverteilung der Tagesmaxima (M.d.K.)
Februar 2002



Häufigkeitsverteilung der Tagesmaxima (M.d.K.)
Februar 2003



5. Schlussbemerkung und Ausblick

Das Feldexperiment während des Projekts VALIUM in Hannover hat gezeigt, dass mittels SODAR-Messungen längere Zeitreihen der Mischungsschichthöhe (MLH) erhalten werden konnten. Die Ableitung der MLH aus Vertikalprofilen der Schallrückstreuung und der Varianz der Vertikalgeschwindigkeit konnte in einer weiteren Studie validiert werden.

Die Länge der erhaltenen Zeitreihe erlaubte eine statistische Auswertung der Daten. Die erhaltenen monatlichen Häufigkeitsstatistiken und mittleren monatlichen Tagesgänge für die MLH zeigen ausgeprägte Jahrgänge. Meteorologische Besonderheiten der einzelnen ausgewerteten Monate spiegeln sich deutlich in den erhaltenen Statistiken wieder. Das heißt, dass die hier ausgewertete MLH relevante klimatologische Signale (Tagesgang, Jahrgang, interannuelle Variabilität) enthält.

Die in diesem Bericht vorgestellten Häufigkeitsstatistiken für die MLH stellen somit eine klimatologische Aussage für die Ausbreitungsbedingungen über einer norddeutschen Großstadt dar. Es ist vorgesehen, in einer folgenden separaten Auswertung die während VALIUM zeitgleich erfassten Zeitreihen von Spurenstoffkonzentrationen mit den hier vorgestellten MLH-Zeitreihen zu korrelieren. Damit soll die Frage untersucht werden, in wie weit die turbulente Durchmischung in der Grenzschicht als Ganzem die Luftqualität in Straßenschluchten mit beeinflusst. Solche Untersuchungen liefern damit einen Beitrag zum Verständnis der Entwicklung hoher Luftbelastungen in Städten. Darüber hinaus werden MLH-Daten aber auch zur Diagnose von Luftbelastungen aus Satellitendaten, für den Einsatz diagnostischer (massenkonsistenter) Windfeldmodelle und für die Validierung numerischer und physikalischer Strömungsmodelle benötigt.

Die Studie hat gezeigt, dass bodengebundene Fernerkundung (hier mit akustischen Methoden) in der Lage ist, längere Zeitreihen von Parametern aus Atmosphärenschichten zu liefern, die einer in-situ Messung nicht oder nur kurzfristig und punktuell zugänglich sind.

6. Literatur

Beyrich, F., 1997: Mixing height estimation from sodar data – a critical discussion. *Atmosph. Environ.*, **31**, 3941-3953.

Emeis, S., C. Munkel, S. Vogt, W.J. Müller und K. Schäfer, 2003: Atmospheric boundary-layer structure from simultaneous SODAR, RASS, and ceilometer measurements. Angenommen zur Publikation in *Atmosph. Environ.*

Keder, J., 1999: Detection of Inversions and Mixing Height by REMTECH PA2 Sodar in Comparison with Collocated Radiosonde Measurements. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **71**, 133-138.

Lokoshchenko, M.A., 2002: Long-term Sodar Observations in Moscow and a New Approach to Potential Mixing Determination by Radiosonde Data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **19**, 1151-1162.

Maughan, R.A., A.M. Spanton und M.L. Williams, 1982: An analysis of the frequency distribution of SODAR derived mixing heights classified by atmospheric stability. *Atmos. Environ.* **16**, 1209-1218.

Munkel, C., S. Emeis, W.J. Müller, K. Schäfer, 2002: Observation of aerosol in the mixing layer by a ground-based LIDAR ceilometer. Proceedings of 9th Intern. Symp. on Remote Sensing, 22.-27.09.02 in Aghia Pelagia (GR), SPIE paper 4882-52 (in press).

Reitebuch, O. und S. Emeis, 1998: SODAR-measurements for atmospheric research and environmental monitoring. *Meteorologische Zeitschrift, N. F.*, **7**, 11-14.

Seibert, P., F. Beyrich, S.-E. Gryning, S. Joffre, A. Rasmussen und P. Tercier, 2000: Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height. *Atmosph. Environm.*, **34**, 1001-1027.

Anhang

Bei der Interpretation der gewonnenen Daten ist es unerlässlich, die klimatischen Randbedingungen der einzelnen Monate mit zu berücksichtigen. Im Anhang werden auf Grund dessen verschiedene Diagramme mit meteorologischen Kenngrößen der jeweiligen Monate angeführt (Abb. 11-15).

Sie zeigen – jeweils für den Standort Hannover – die Größen Tageshöchsttemperatur, Tagestiefsttemperatur, Sonnenstunden und mittlere Windstärke für die behandelten Monate April, August und November 2002 sowie Februar 2003.

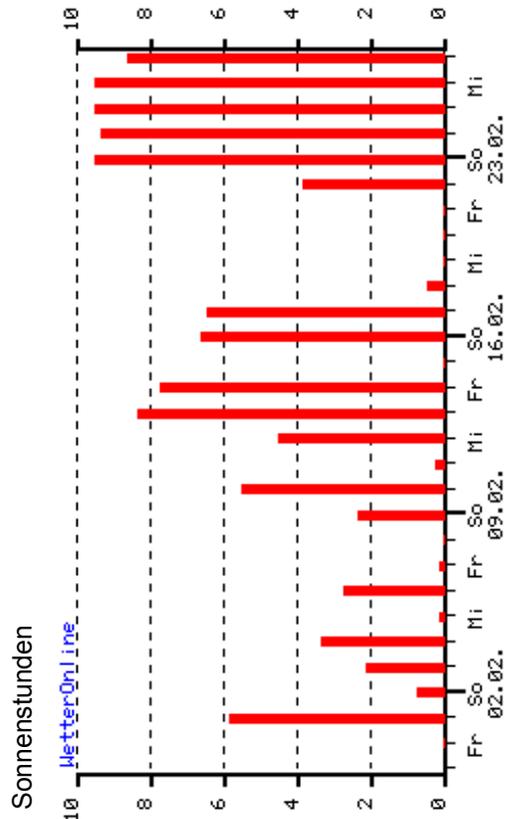
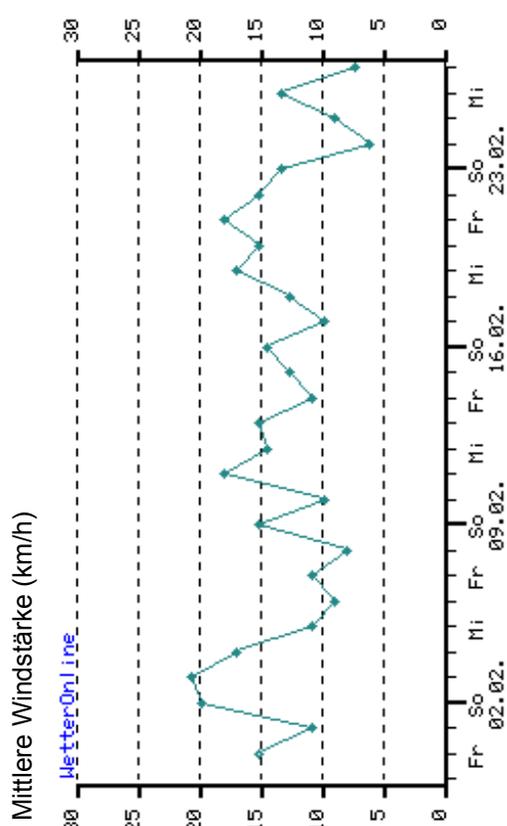
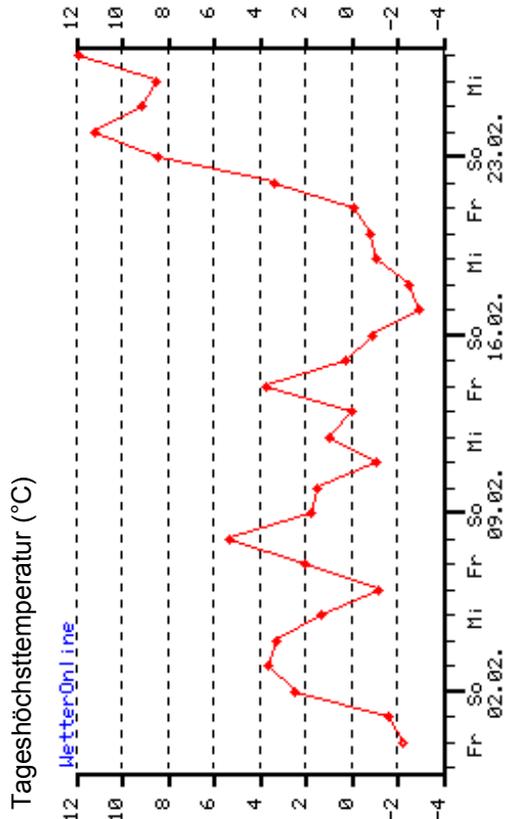
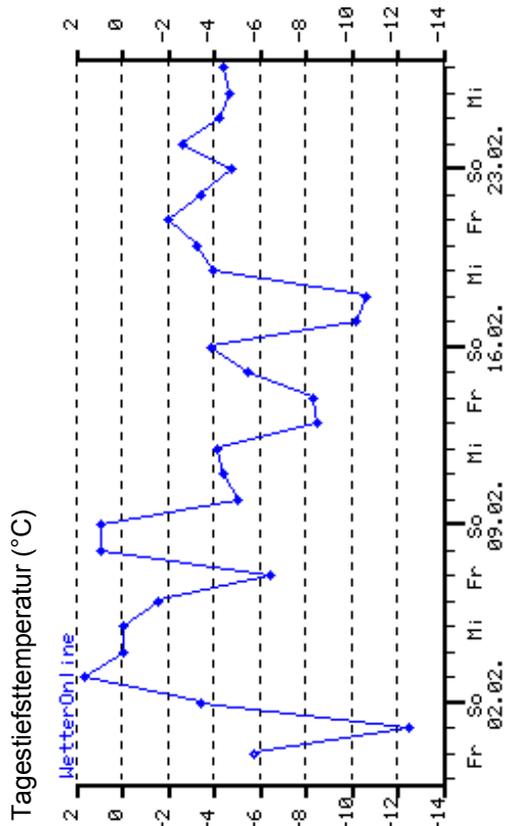
Für den ferner besprochen Monat Februar 2002 ist wegen der besonderen Auffälligkeit zusätzlich die Abbildung der Windspitzen eingefügt.

Die Abbildungen sind der Internetseite www.wetteronline.de entnommen, Messstation Hannover Flughafen, Stand 10.04.03.

Abb. 16 zeigt einige Bilder des Standortes des SODAR während der Messkampagne im Rahmen des Projektes VALIUM.

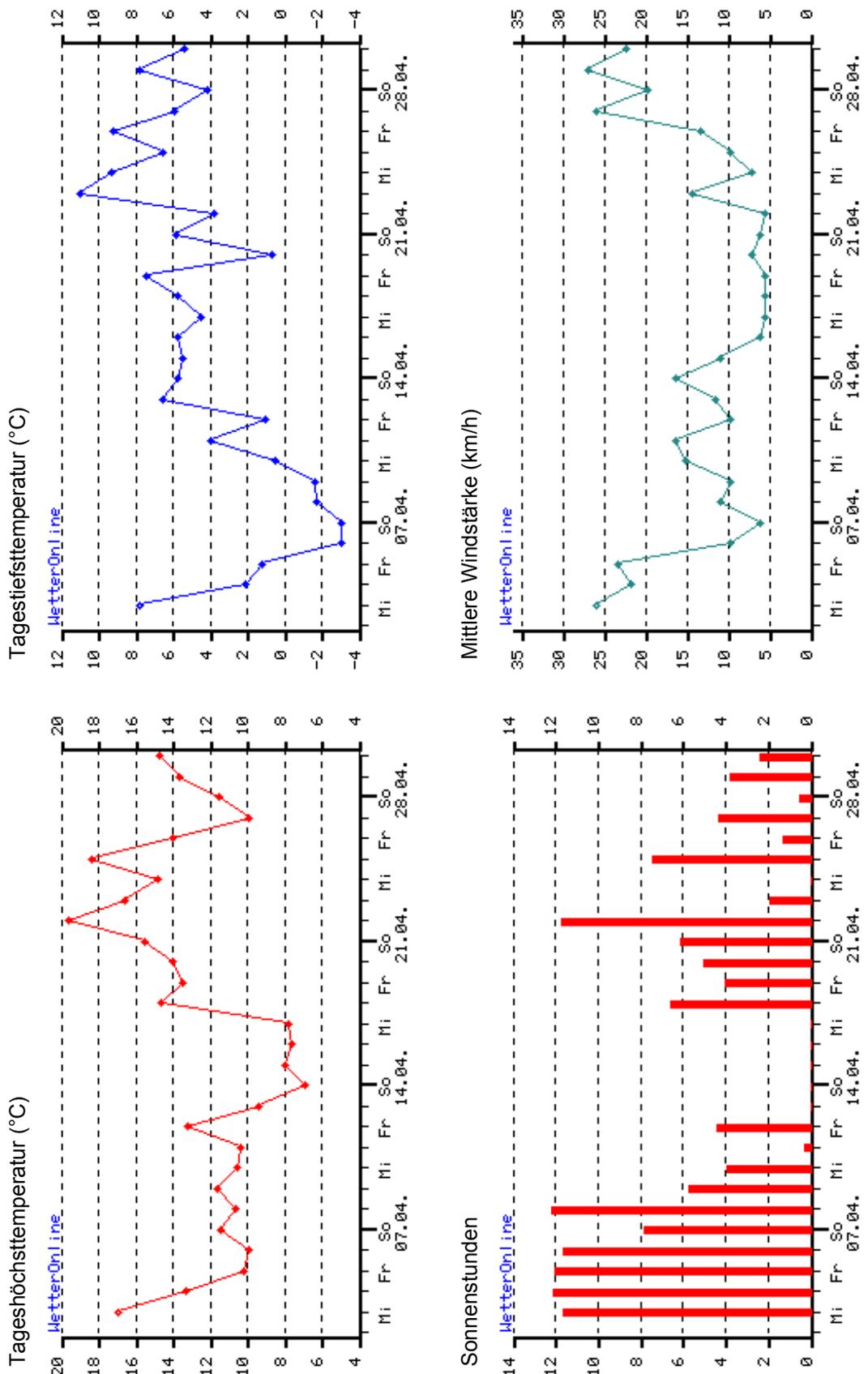
Februar 2003

Abb. 11



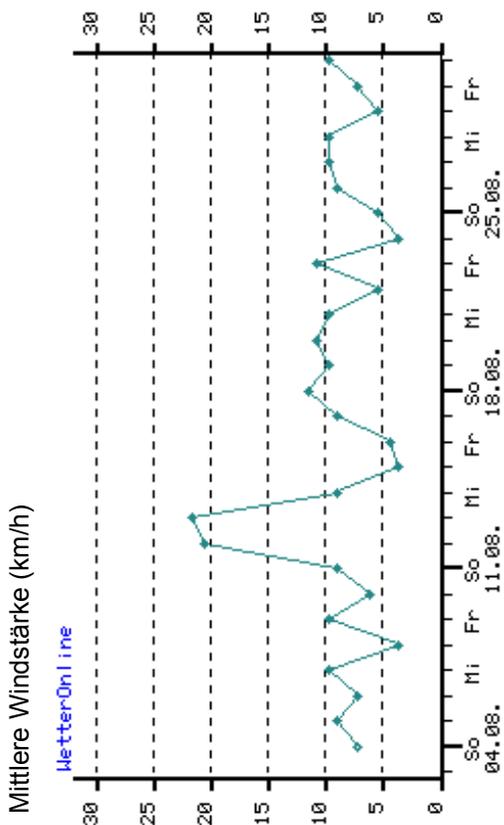
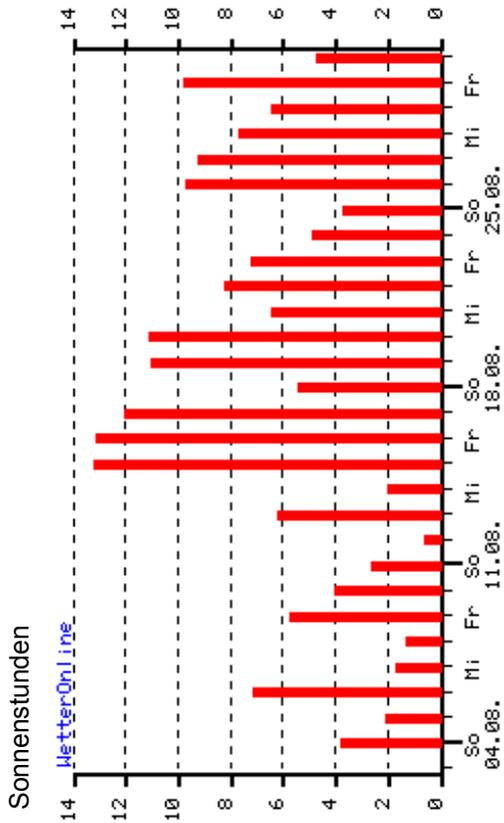
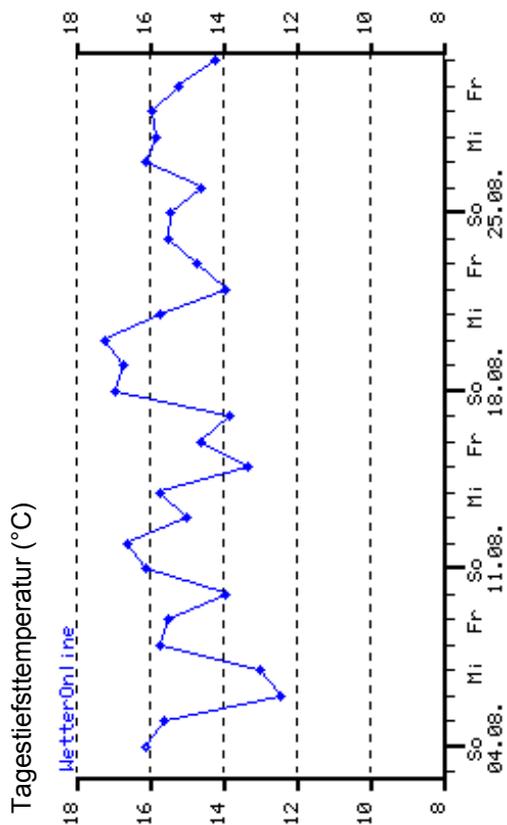
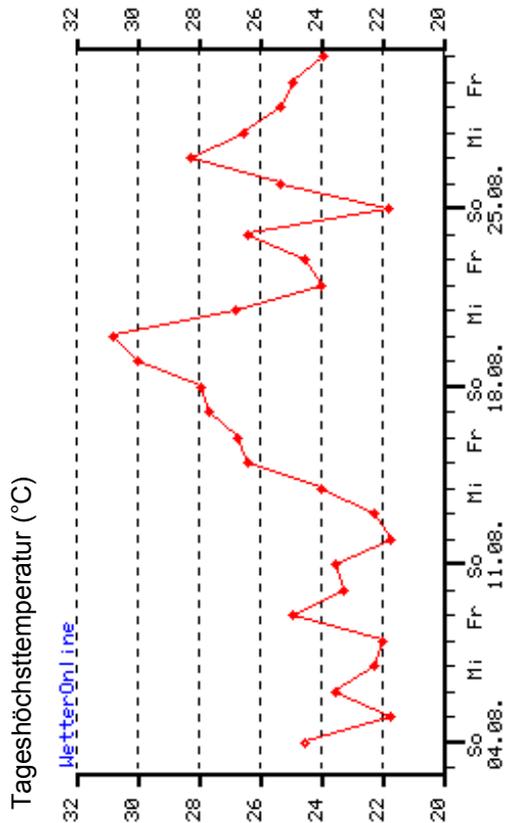
April 2002

Abb. 12



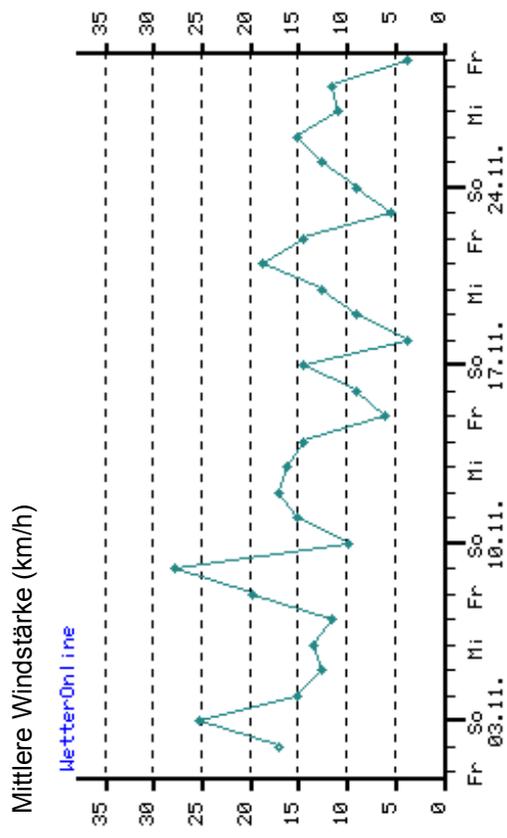
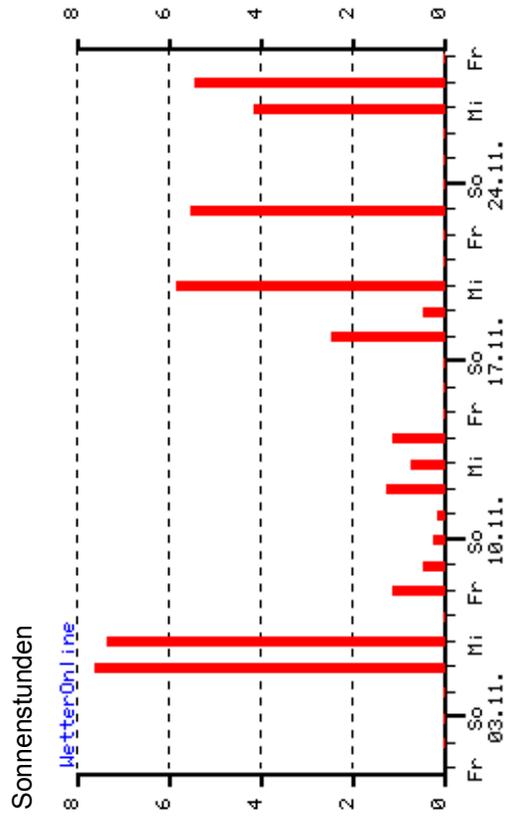
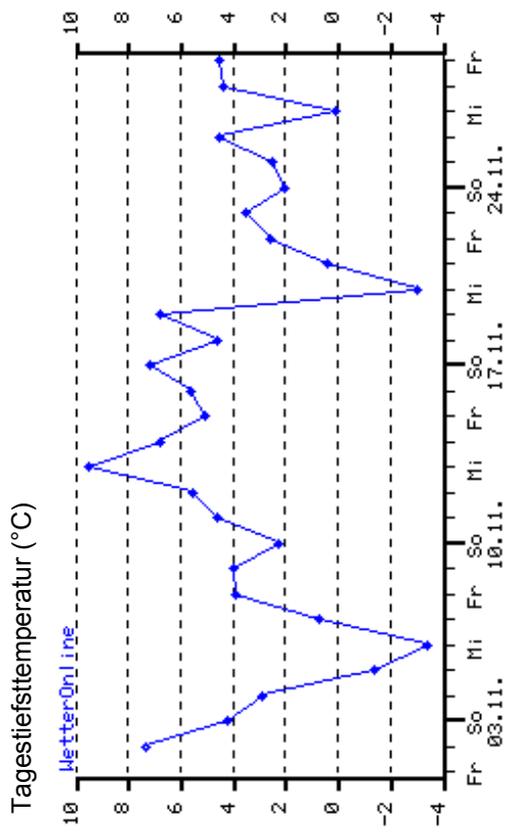
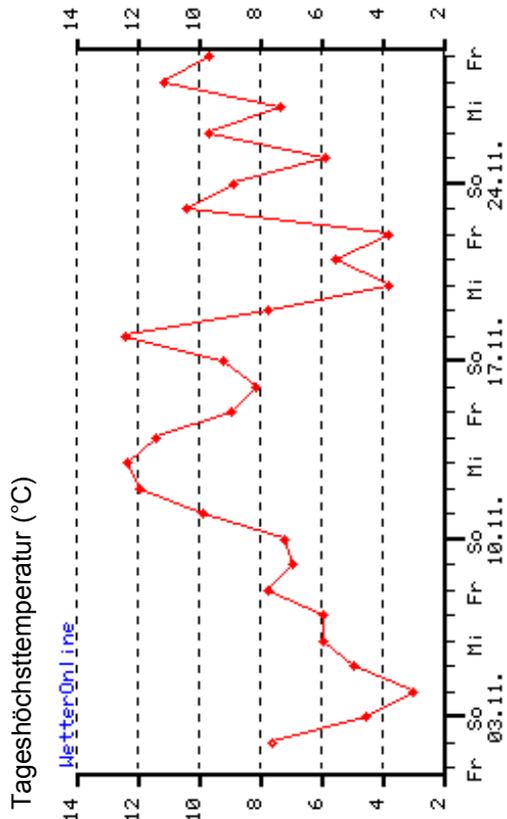
August 2002

Abb. 13



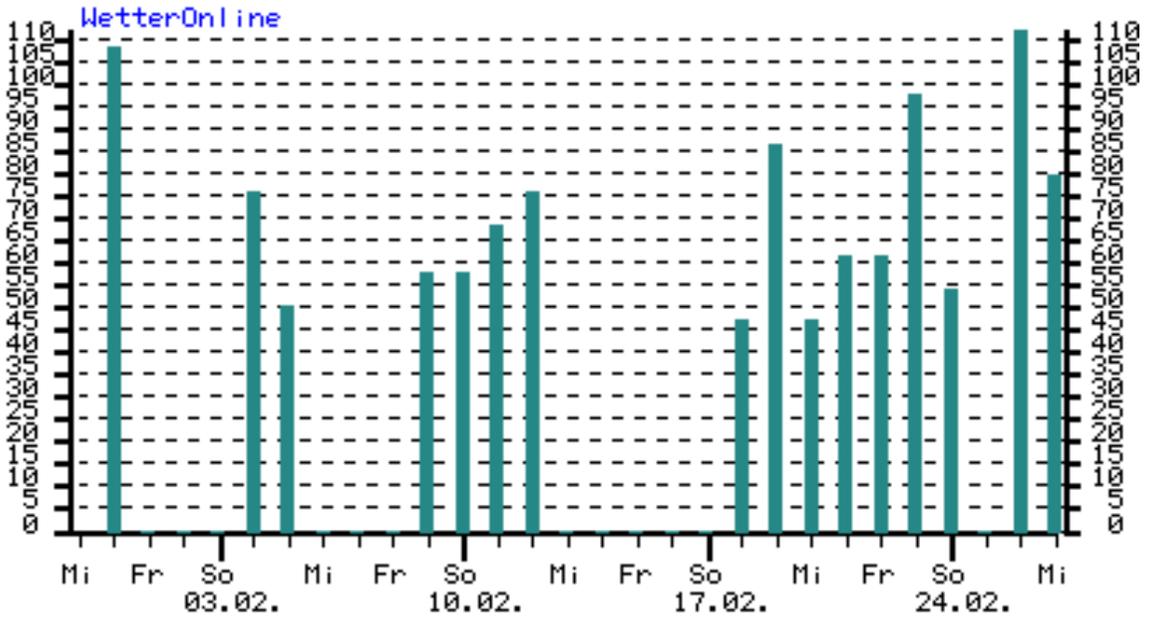
November 2002

Abb. 14

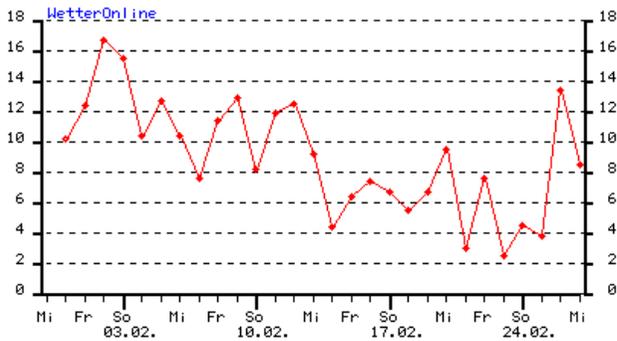


Februar 2002

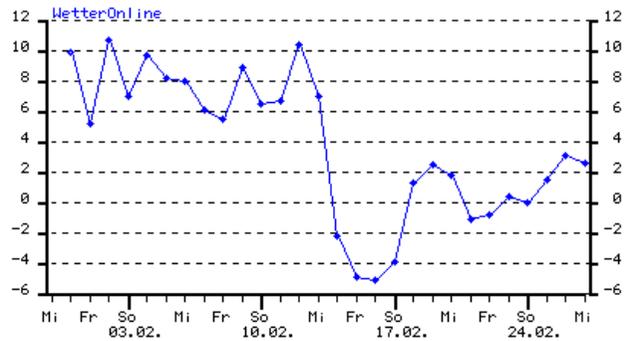
Windspitzen (km/h)



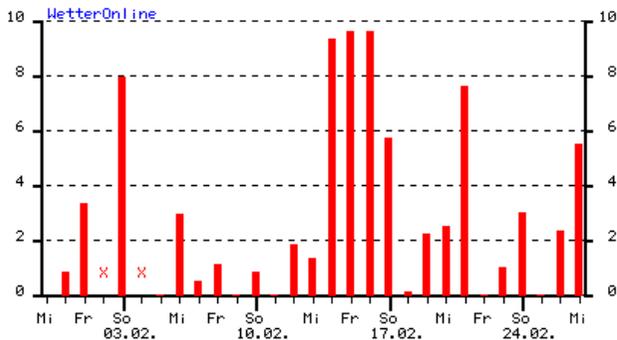
Tageshöchsttemperatur (°C)



Tagestiefsttemperatur (°C)



Sonnenstunden



Mittlere Windstärke (km/h)

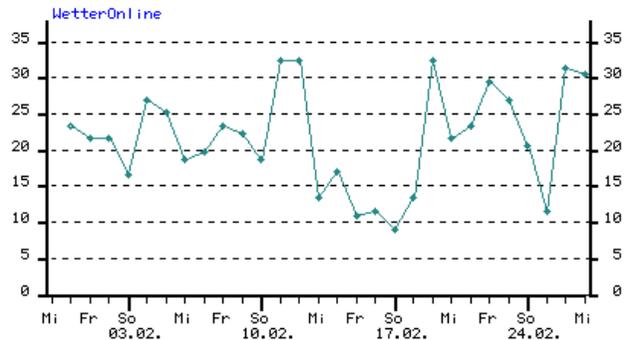


Abb. 16

Standort des SODAR in Hannover

Blick nach Westen über Göttinger Str.

