



universität
wien

DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

Messung der Grenzschicht mittels RASS und Radiosonde im
Großraum Wien

Verfasserin

Claudia Flandorfer

angestrebter akademischer Grad

Magistra der Naturwissenschaften (Mag. rer. nat)

Wien, 2013

Studienkennzahl lt. Studienblatt: A 415

Studienrichtung lt. Studienblatt: Meteorologie

Betreuerin / Betreuer: Univ. Prof. Dr. Reinhold Steinacker

Zusammenfassung

Nach einer Übersicht über die typische Struktur und Entwicklung der städtischen Grenzschicht sowie die Besonderheiten der klimatischen Verhältnisse im Raum Wien werden anhand gemessener Vertikalprofile die Strömungsverhältnisse (Windgeschwindigkeit, Windrichtung) und die Temperaturschichtung in der Grenzschicht analysiert und interpretiert.

Am Flughafen Wien-Schwechat wurde von 20. Oktober 2009 bis 28. Februar 2011 ein RASS (Messsystem PCS-2000 der Firma METEK) betrieben. Bis in eine Höhe von 600m wurden 10-Minuten-Mittel von Temperatur, Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Vertikalgeschwindigkeit mit einer vertikalen Auflösung von 25m gemessen. In dieser Arbeit wird zur Untersuchung der winterlichen Grenzschicht im Großraum Wien die Messperiode von Dezember 2009 bis Februar 2010 (3 Wintermonate) betrachtet. Das Messprinzip dieses Fernerkundungssystems wird einleitend erläutert.

Neben den RASS-Messungen werden hierfür die Radiosonden-Aufstiege von Wien Hohe Warte herangezogen und statistische Maßzahlen berechnet. Durch die Gegenüberstellung der Messungen wird gezeigt, wie groß der Unterschied der an den beiden Standorten gemessenen Vertikalprofile ist und warum es zu diesen Differenzen kommt.

Weiters werden anhand zweier Inversionswetterlagen die unterschiedlichen meteorologischen Gegebenheiten zwischen den Messorten gezeigt. Hier wird ebenfalls ein Blick auf die Messwerte der meteorologischen Stationen in der Stadt Wien und Umgebung geworfen.

Die Auswertungen haben gezeigt, dass die vertikalen Profile der Windrichtungen aufgrund der unterschiedlichen orographischen Gegebenheiten an den 2 Messorten vor allem in Bodennähe unterschiedliche Windrichtungen aufweisen, sich jedoch durch den geringer werdenden Einfluss der Orographie in größeren Höhen annähern. Die Windgeschwindigkeit ist am Flughafen Wien-Schwechat durch die geringere Bodenrauigkeit um etwa 1 bis 2m/s höher, jedoch zeigen die beiden Profile einen nahezu identen Verlauf. Die größten Unterschiede im Temperaturprofil treten in Bodennähe aufgrund der Hanglage der Station Hohe Warte (schneller Erwärmung) und der Stadtnähe (Wärmeinseleffekt) auf. Der Temperaturrückgang ist am Flughafen Wien-Schwechat, im Gegensatz zur Hohen Warte, durch die höheren Windgeschwindigkeiten und die daraus resultierende höhere Durchmischung in den höheren Niveaus etwas gebremst.

Abstract

After an overview of the typical structure and development of the urban boundary layer as well as the climatic characteristics of the Vienna area, flow regimes and temperature profiles in the boundary layer are analyzed and interpreted based on the sounding data.

From 20th October 2009 to 28th February 2011 a RASS measurement system (PCS-2000 system by METEK) was operated at the Vienna International Airport. 10-minutes-averages of temperature, wind velocity, wind direction and vertical velocity were measured up to 600m above ground with a vertical resolution of 25 m. In this thesis, the investigation of the winter boundary layer focused on the 3 winter months from 1st December 2009 to 28th February 2010. In the beginning, the measuring principle of this remote sensing instrument is explained.

The RASS-measurements will be compared with radiosoundings at Vienna Hohe Warte. Statistical indices are calculated. The comparison demonstrates the differences between the vertical profiles of the measured parameters.

For 2 different episodes with inversions the differences between the boundary layer profiles, but also the measured parameters of the meteorological measurement stations in Vienna and the immediate vicinity are shown.

The evaluations have shown that the largest differences in the vertical profiles of wind directions can be found at the lower levels, due to the different terrain structures around the two locations. With higher altitudes the wind directions converge, because of the decreasing impact of the orographic structures. As an effect of the lower surface roughness, the airport Wien-Schwechat shows higher wind speeds, but the two considered profiles are nearly identical. The profile at Hohe Warte shows higher temperatures at the lower levels as a result of faster warming of the ground and due to the closeness of the city center. The higher wind speeds at the airport Wien-Schwechat causes higher mixing in the upper boundary layer heights so that the temperature at Hohe Warte decreases faster.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	i
Abstract	ii
Inhaltsverzeichnis.....	iii
1. Einleitung.....	1
2. Atmosphärische Grenzschicht.....	3
2.1. Höhe und Tagesgang der Grenzschicht	3
2.2. Vertikale Einteilung der Grenzschicht	4
2.2.1. Prandtl-Schicht.....	5
2.2.2. Ekman-Schicht.....	5
2.3. Grundtypen der Grenzschicht	7
3. Verhältnisse im Raum Wien	8
3.1. Topographie von Wien	8
3.2. Klima von Wien	9
3.3. Wetter im Messzeitraum.....	13
4. Messgeräte.....	19
4.1. Mess-Standorte	19
4.1.1. Höhenverteilung der Messstationen	21
4.2. SODAR und RASS.....	23
4.2.1. Schallausbreitung in der Atmosphäre.....	24
4.2.2. Doppler Effekt	26
4.2.3. Messprinzip SODAR.....	27
4.2.4. Messprinzip RASS.....	27
4.2.5. Bestimmung der Temperatur	28
4.2.6. Messhöhe RASS.....	30
4.2.7. Technische Details	31
4.3. Radiosonde	32
4.3.1. Technische Details	33
4.4. Messstationen in Wien und Umgebung	34
5. Datenanalyse.....	37
5.1. SODAR mit RASS-Erweiterung	37
5.1.1. Datenkorrektur	37
5.1.2. Datenverfügbarkeit.....	37

5.1.3. Fehlerhaftigkeit der Daten.....	39
5.2. Radiosonde	39
5.3. RASS und Radiosonde	40
5.4. Messstationen	40
6. Ergebnisse	42
6.1. RASS – Flughafen Wien-Schwechat	42
6.1.1. Windrichtung und Windgeschwindigkeit	42
6.1.2. Temperatur	44
6.2. Radiosonde – Wien Hohe Warte	45
6.3. Vergleich RASS und Radiosonde	47
6.3.1. Windrichtung und Windgeschwindigkeit	47
6.3.2. Temperatur	51
6.3.3. Statistische Maßzahlen	54
6.4. Fallstudien zu Inversionswetterlagen	57
6.4.1. Inversionswetterlage bei Südost-Wind.....	57
6.4.2. Inversionswetterlage bei Nordwest-Wind.....	63
7. Conclusio	70
Literaturverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis	VII
Danksagung	VIII
Lebenslauf	IX

1. Einleitung

Die atmosphärische Grenzschicht ist jener Teil der Troposphäre, der direkt von der Erdoberfläche beeinflusst wird und innerhalb einer Zeitskala von einer Stunde oder weniger auf Oberflächeneinflüsse reagiert (Stull, 1988).

Für umweltmeteorologische Fragestellungen ist es wichtig, die Schichtung der Grenzschicht zu kennen, um auf die Verdünnung und den Transport der Schadstoffe in der Atmosphäre schließen zu können.

Für die Verdünnung von Luftschadstoffkonzentrationen ist unter anderem das Luftvolumen, welches für die Verdünnung zur Verfügung steht, von Bedeutung. Dieses Volumen wird im Wesentlichen durch die Höhe der Mischungsschicht bestimmt. Diese Schicht (Grenzschicht) ist gegenüber der darüber liegenden freien Atmosphäre durch eine erhöhte Turbulenz ausgezeichnet, welche durch eine Zone stabiler oder sogar inverser Temperaturschichtung begrenzt wird (Verein Deutscher Ingenieure, 2009).

SODAR („Sonic Detection And Ranging“) und SODAR mit RASS Erweiterung („Radio Acoustic Sounding Systems“) sind speziell auf die Messung der Grenzschicht ausgelegt. Die vertikale Reichweite dieser Fernerkundungssysteme beträgt einige hundert Meter und es können unter anderem Temperatur, Windgeschwindigkeit und Windrichtung gemessen werden. Mit Radiosonden, welche täglich weltweit zur selben Zeit (00 UTC und 12 UTC) gestartet werden, ist es ebenfalls möglich ein vertikales Profil der Atmosphäre zu messen. Da mit Radiosonden aber nur punktuelle Aufnahmen des vertikalen Profils gemacht werden, sind sie für umweltmeteorologisch relevante Fragestellungen nicht gut geeignet.

Ein SODAR beeinträchtigt seine Umgebung durch laute Piepsgeräusche, weshalb es nur bedingt möglich ist dieses Gerät im Stadtgebiet zu betreiben. Zu Testzwecken hat sich die ACG (Austro Control Österreichische Gesellschaft für Zivilluftfahrt mit beschränkter Haftung) ein SODAR mit RASS-Erweiterung (Messsystem PCS-2000/64, Firma METEK, im Weiteren kurz als RASS bezeichnet) von der Fachabteilung Umweltmeteorologie der ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik) geliehen. Die Messungen wurden von 20. Oktober 2009 bis 28. Februar 2011 am Flughafen Wien-Schwechat durchgeführt. In dieser Arbeit werden die vertikalen Profile der Temperatur und Windinformationen der Wintermonate (Dezember 2009 bis Februar 2010) ausgewertet und mit den punktuellen Messungen der Radiosonde Wien Hohe Warte verglichen.

Die winterliche Grenzschicht ist im Raum Wien oft von Inversionen geprägt. Inversionen verhindern eine Durchmischung der Luftschichten und so kommt es häufig zu hohen Schadstoffbelastungen in Bodennähe. Da die winterlichen Inversionen nicht allzu hoch sind, lassen sie sich gut in den vom RASS gemessenen vertikalen Profilen erkennen. Anhand eines typischen Inversionstages werden neben den vertikalen Profilen von RASS und Radiosonde auch die Messungen der meteorologischen Messstationen in Wien und Umgebung betrachtet.

Zu Beginn der Arbeit wird ein kurzer Einblick in die Eigenschaften der atmosphärischen Grenzschicht gegeben. Es wird auf die Höhe und den Tagesgang, sowie auf die vertikale Einteilung der Grenzschicht eingegangen. Kapitel 3 befasst sich mit den Verhältnissen im Raum Wien. Zuerst werden die Lage und die orographischen Besonderheiten von Wien betrachtet, danach werden das Klima von Wien und das Wetter im betrachteten Messzeitraum beschrieben. Das 4. Kapitel befasst sich mit den meteorologischen Messgeräten. Hauptaugenmerk liegt auf dem Messprinzip des RASS Systems. Ebenfalls wird das Messprinzip der Radiosonde beschrieben und die betrachteten meteorologischen Messstationen aufgelistet. Bevor die Messdaten ausgewertet wurden, wurde eine Datenanalyse durchgeführt, welche in Kapitel 5 zu finden ist. Hier werden die Datenverfügbarkeit und gegebenenfalls die Datenkorrekturen beschrieben. Das 6. Kapitel ist den Auswertungen zuzuschreiben. Zuerst werden getrennt voneinander die Messungen des RASS und der Radiosonde betrachtet, danach wird ein direkter Vergleich der vertikalen Profile durchgeführt. Die Betrachtung eines typischen Inversionstages ist ebenfalls hier zu finden. In Kapitel 7 werden die Ergebnisse zusammengefasst und Schlussfolgerungen gezogen.

2. Atmosphärische Grenzschicht

Die atmosphärische Grenzschicht wird als Übergangsschicht von der Erdoberfläche zur Freien Atmosphäre betrachtet (Kraus, 2008).

In der freien, durch den Boden unbeeinflussten Atmosphäre, wird eine geostrophische Strömung aufgebaut. Durch den Einfluss der Bodenreibung bildet sich über der Erdoberfläche eine Grenzschicht aus, d.h. eine reibungsbestimmte Schicht, in der die Strömungsgeschwindigkeit von Null an der Erdoberfläche bis zur Geschwindigkeit des geostrophischen Windfeldes ansteigt (Roedel, 2000).

2.1. Höhe und Tagesgang der Grenzschicht

Über Ozeanen weist die Höhe der Grenzschicht kaum einen Tagesgang auf, da sich die Meeresoberflächentemperatur nur sehr langsam ändert. Über Landoberflächen ist der Tagesgang der Grenzschicht für Regionen in Hochdruckgebieten in Abbildung 2-1 dargestellt. Die drei Hauptteile dieses Tagesgangs sind die Mischungsschicht, die Restschicht und die stabile Grenzschicht (Stull, 1988).

Mit Sonnenaufgang beginnt sich bei gering bewölktem oder wolkenlosem Himmel die Erdoberfläche infolge der Einstrahlung rasch zu erwärmen. Etwa eine halbe Stunde nach Sonnenaufgang kann man anstelle der stabilen nächtlichen Grenzschicht die Entwicklung einer gut durchmischten Schicht (konvektive Grenzschicht bzw. Mischungsschicht) beobachten. Die Höhe dieser Schicht wächst im Tagesverlauf weiter an und kann sich am späten Nachmittag über die gesamte Grenzschicht erstrecken (Piringer, Baumann, & Langer, 1996).

Die konvektive Grenzschicht wird von einer statisch stabilen Luftschicht (Temperaturinversion) mit zeitweilig auftretender Turbulenz begrenzt. Diese Turbulenz induziert das Ein- und Ausmischen von Luft mit der darüber liegenden Troposphäre. Die sogenannte „Entrainment“-Schicht umfasst etwa 10% der gesamten Grenzschicht. Kurz vor Sonnenuntergang bildet sich am Boden bereits eine stabile Grenzschicht aus. Darüber liegen die Reste der Mischungsschicht vom Vortag, die sogenannte Restschicht. Nach Sonnenaufgang lösen sich die stabile Grenzschicht und die Restschicht schnell auf. An bewölkten Tagen und im Winter kann es sein, dass sich aufgrund der niedrigen Energiezufuhr die Mischungsschicht nur gering entwickeln kann und die Restschicht des Vortages noch erhalten bleibt (Foken, 2006).

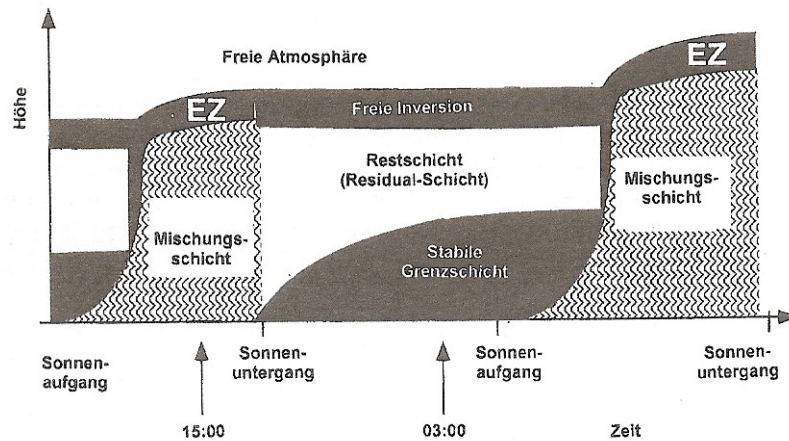


Abbildung 2-1 Tagesgang der Struktur der atmosphärischen Grenzschicht (Stull, 2000), EZ: Entrainmentschicht (Foken, 2006)

Die Höhe der Grenzschicht ist abhängig von der Stabilität, meist beträgt sie zwischen 1-2 km an Land und 0,5 km über den Ozeanen (Foken, 2006). Bei labiler Schichtung mit entsprechend heftigem Vertikalaustausch wird sie etwas höher, bei stabiler Schichtung etwas niedriger (Roedel, 2000).

In Tabelle 2-1 sind die Eigenschaften der atmosphärischen Grenzschicht im Vergleich mit der freien Atmosphäre aufgelistet.

Tabelle 2-1 Vergleich der Eigenschaften der Grenzschicht und der freien Atmosphäre (Stull, 1988)

Eigenschaft	Grenzschicht	Freie Atmosphäre
Turbulenz	Näherungsweise durchgehend turbulent, außer in der Nacht	nur in konvektiven Wolken oder „Clear-Air“ Turbulenz in dünnen Schichten großer horizontaler Ausdehnung
Reibung	Stark an der Erdoberfläche, starke Energiedissipation	geringe viskose Dissipation
Dispersion	Schnelle turbulente Durchmischung sowohl vertikal als auch horizontal	Nur kleine molekulare Diffusion. Oft schneller horizontaler Transport durch den mittleren Wind
Wind	Logarithmisches Windprofil	Nahezu geostrophischer Wind
Vertikale Transporte	Turbulenz dominiert	Mittlerer Wind dominiert
Höhe	Variabel von 100m bis 3000m, Tagesgang über Land	Langsame zeitliche Variabilität, 8km bis 18km

2.2. Vertikale Einteilung der Grenzschicht

In der untersten Teilschicht (wenige mm dick) wird die Dynamik durch die molekulare Viskosität und bei stärker strukturierten Oberflächen auch durch den Staudruck an Strömungshindernissen bestimmt. Darüber dominiert der Einfluss der turbulenzbedingten Reibung. Diese Schicht kann man in 2 Unterschichten einteilen: die Prandtl-Schicht und die Ekman-Schicht. (Roedel, 2000)

2.2.1. Prandtl-Schicht

Die Prandtl-Schicht ist charakterisiert durch meist voll entwickelte Turbulenz und reicht bis in eine Höhe von einigen Dekametern. Für die neutral geschichtete Prandtl-Schicht gilt das durch die Bodenreibung verursachte logarithmische Windprofil (Kraus, 2008):

$$\bar{u}(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (2.1.)$$

mit $\bar{u}(z)$... mittlerer horizontaler Wind in der Höhe z

u_* ... Schubspannungsgeschwindigkeit

κ ... Kármán-Konstante

z ... Höhe

z_0 ... Rauigkeitslänge

In Abbildung 2-2 ist das logarithmische Windprofil der Prandtl-Schicht für unterschiedliche Rauigkeitslängen (von 0,01 für ebene Landschaft, wenige Häuser bis 1,5m für Großstädte mit hohen Gebäuden) dargestellt. Ist die Bodenoberfläche glatt, kann die Windgeschwindigkeit schnell mit der Höhe zunehmen. Befinden sich Hindernisse (Wälder, Häuser) in Bodennähe, so wird der Wind viel stärker abgebremst, das Windprofil ist gedämpft.

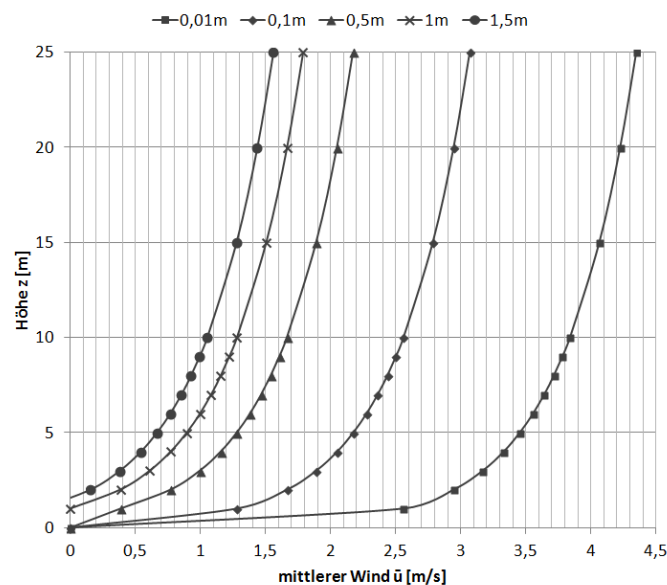


Abbildung 2-2 Logarithmisches Windprofil nach Gleichung 2.1. mit einer Schubspannungsgeschwindigkeit $u_* = 0,2 \text{ m/s}$ für unterschiedliche Rauigkeitslängen

2.2.2. Ekman-Schicht

Oberhalb der Prandtl-Schicht liegt die Ekman-Schicht. Dieser liegt die Vorstellung zugrunde, dass die Windrichtung stetig von der Bodenwindrichtung in die Richtung des geostrophischen Windes der freien Atmosphäre dreht. Die Spitze des Windvektorpfeiles beschreibt dabei eine Spirale, die sogenannte Ekman-Spirale (Roedel, 2000).

In der Ekman-Schicht kommt zur Reibung noch der Einfluss der Coriolis- und der Druckgradientkraft dazu. Die Reibung bewirkt eine Drehung des Windvektors von der geostrophischen Windrichtung aus gesehen nach links. In Erdbodennähe wird die Druckgradientkraft durch die Corioliskraft und die Reibung kompensiert. Die Gleichungen für

die horizontalen Komponenten der Windgeschwindigkeit in der Ekman-Schicht lauten (Rubel, 2007):

$$-f(\bar{v} - \bar{v}_g) = \frac{\partial}{\partial z} K_m \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \quad (2.2.)$$

$$-f(\bar{u} - \bar{u}_g) = \frac{\partial}{\partial z} K_m \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \quad (2.3.)$$

mit $\bar{u}, \bar{v} \dots$ u- bzw. v-Komponente des mittleren horizontalen Windes

$\bar{u}_g, \bar{v}_g \dots$ u- bzw. v-Komponente des mittleren geostrophischen Windes

$f \dots$ Coriolis-Kraft

$K_m \dots$ turbulenter Diffusionskoeffizient

Um die analytische Lösung des Gleichungssystems zu erhalten muss man einige Annahmen treffen: Barotropie ($\bar{u}_g, \bar{v}_g$ sind höhenkonstant), $K_m(z)$ ist höhenkonstant, Randbedingungen: $\bar{u} = \bar{v} = 0$ für $z = 0$, $\bar{u} = u_g$ und $\bar{v} = v_g$ für $z \rightarrow \infty$. Die analytische Lösung lautet (Rubel, 2007):

$$\bar{u}(z) = \bar{u}_g \left[1 - \exp\left(-\frac{z}{D}\right) \cos\left(\frac{z}{D}\right) \right] \quad (2.4.)$$

$$\bar{v}(z) = \bar{u}_g \left[\exp\left(-\frac{z}{D}\right) \sin\left(\frac{z}{D}\right) \right] \quad (2.5.)$$

mit $\bar{u}(z), \bar{v}(z) \dots$ u- bzw. v-Komponente des mittleren horizontalen Windes

$\bar{u}_g, \bar{v}_g \dots$ u- bzw. v-Komponente des mittleren geostrophischen Windes

$z \dots$ Höhe

$D \dots$ Ekman-Länge (konstant), $D = \sqrt{2 K_m / f}$

In Abbildung 2-3 ist die Ekman-Spirale als Hodograph dargestellt. Ein Hodograph zeigt den Verlauf des Windgeschwindigkeitsvektors mit der Höhe an.

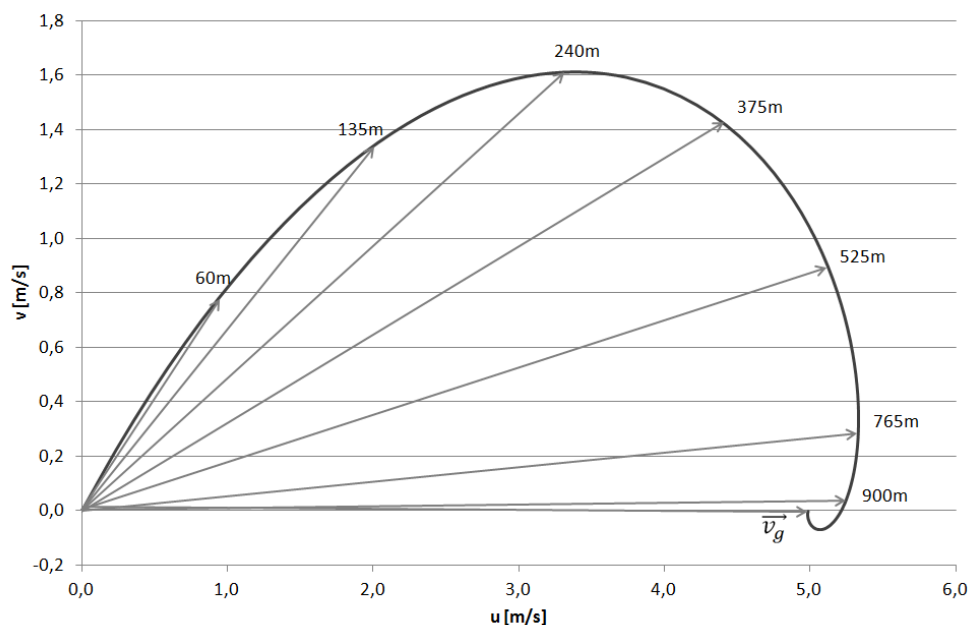


Abbildung 2-3 Hodograph der Ekman-Spirale für eine geographische Breite von 45° ($f = 0,0001 \text{ s}^{-1}$), $K_m = 5 \text{ m}^2/\text{s}$, $\bar{u}_g = 5 \text{ m/s}$, $\bar{v}_g \dots$ geostrophischer Wind ($v_g = 0$)

2.3. Grundtypen der Grenzschicht

Die Grenzschicht kann man grob in 3 Grundtypen einteilen: die rein dynamische Grenzschicht, die konvektive Grenzschicht und die stabile Grenzschicht.

Die rein dynamische Grenzschicht lässt sich allein über die Bewegungsgleichungen mit Berücksichtigung der Corioliskraft beschreiben (Ekman-Gleichungen). Das Windprofil wird durch eine Spirale beschrieben (Kraus, 2008).

Die konvektive Grenzschicht (Mischungsschicht) besteht aus einer gut durchmischten Schicht über der Prandtl-Schicht und unter einer abgehobenen Inversion (Kraus, 2008). Eine abgehobene Inversion entsteht, wenn sich der Boden durch die Sonneneinstrahlung erwärmt und zuerst die Temperatur in Bodennähe und dann erst in höheren Niveaus zunimmt. Die Untergrenze der ursprünglich nächtlichen Bodeninversion steigt im Tagesverlauf immer weiter an und wird daher als abgehobene Inversion bezeichnet (Piringer, Baumann, & Langer, 1996). Die Durchmischung der Grenzschicht ist so groß, dass die Profile der konservativen Größen (z.B. potentielle Temperatur, spezifische Feuchte) nahezu höhenkonstant sind. Über der die Turbulenz erzeugenden Grenzschicht befindet sich eine nicht-turbulente, absinkende freie Atmosphäre. Die Turbulenz wird durch Reibung, aber auch durch thermische Flüsse verursacht. Die Obergrenze dieser turbulenten Schicht ergibt sich als Gleichgewicht zwischen dem Bestreben der Absinkbewegung und der Turbulenzvorgänge. Nimmt die Turbulenz zu und/oder das Absinken ab, dann verschiebt sich die Obergrenze der atmosphärischen Grenzschicht nach oben. Bei Abnahme der Turbulenz und/oder Verstärkung des Absinkens verschiebt sie sich nach unten (Kraus, 2008).

Die stabile Grenzschicht ist durch eine stabile Temperaturschichtung über relativ zur Luft kalter Bodenoberfläche charakterisiert. Sie tritt bei Abkühlung der Erdoberfläche durch eine negative Strahlungsbilanz oder bei Überströmung des Bodens durch wärmere Luft auf. Die Stabilität der Schichtung bewirkt eine thermische Vernichtung der turbulenten kinetischen Energie (Kraus, 2008).

3. Verhältnisse im Raum Wien

3.1. Topographie von Wien

Wien ist die Hauptstadt von Österreich und ist mit einer Fläche von fast 415 km² das kleinste Bundesland in Österreich. Es wohnen etwa 1,7 Millionen Menschen im Stadtgebiet, innerhalb des Ballungsraumes sind es 2,4 Millionen.

In Abbildung 3-1 ist die Lage und Topographie von Wien dargestellt. Wien liegt am östlichen Ausläufer der Alpen und am Nordwestrand des Wiener Beckens. Vom Südwesten bis zum Nordwesten wird Wien von dem Wienerwald begrenzt, der teilweise auch ins Stadtgebiet hineinreicht. Die höchste Erhebung im Stadtgebiet ist mit 542 m der Hermannskogel. Im Süden werden die Erhebungen des Wienerwaldes vom Wienerberg und Laaer Berg fortgesetzt. Südöstlich befindet sich die Lobau (Teil der Donauauen), die gleichzeitig den niedrigsten Punkt der Stadt (151 m) ausmacht. Im Osten ist Wien vom flachen Marchfeld, im Norden vom etwas hügeligen Weinviertel begrenzt.

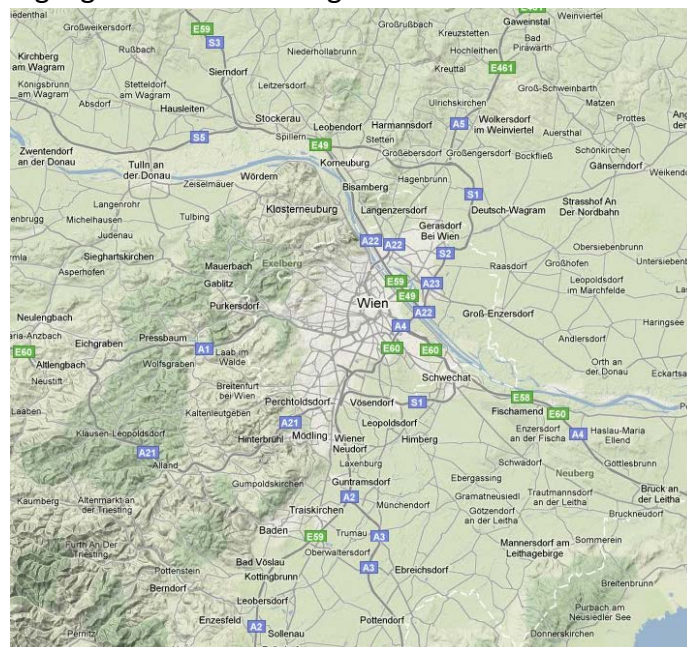


Abbildung 3-1 Topographie und Lage von Wien (Google Maps, 2012)

Die Erhebungen im Westen, den flachen Süden bis Osten und den hügeligen Norden kann man in der 3 Dimensionalen Darstellung von Wien (Abbildung 3-2) erkennen.

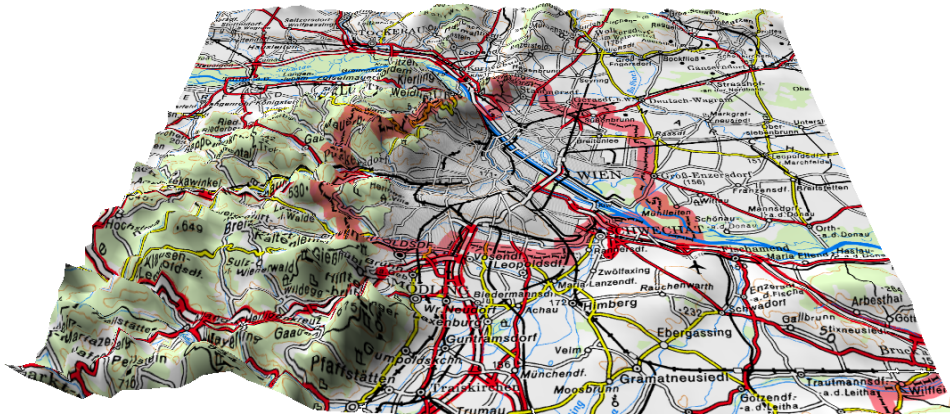


Abbildung 3-2 3-Dimensionale Darstellung von Wien und Umgebung (AMAP Austria, 2011)

3.2. Klima von Wien

Auf der Homepage der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (www.zamg.ac.at) gibt es für jede einzelne TAWES Station in Österreich eine Zusammenstellung der klimatologisch relevanten Werte (Temperaturmittel, Frosttage, Eistage, Windrichtungsverteilung usw.). Zur Berechnung der Mittelwerte wurden die Jahre 1971-2000 verwendet. Im Folgenden werden die Klimamittel einiger Parameter der Stationen Wien Hohe Warte (Lage am Stadtrand, 198m), Wien Innere Stadt (Lage im Stadtzentrum, 171m) und Flughafen Wien-Schwechat (ländliche Gegend, 175m) dargestellt. In Abbildung 3-3 werden die Standorte der 3 betrachteten TAWES-Stationen gezeigt.

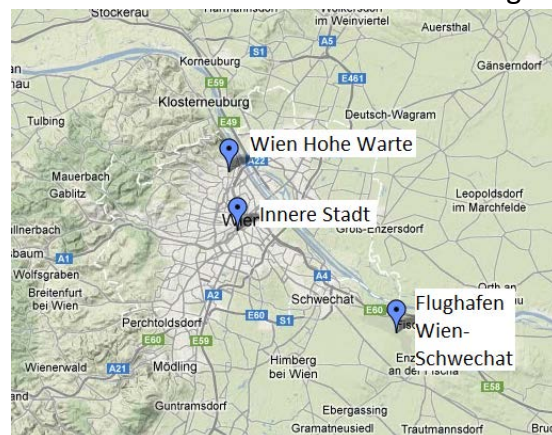


Abbildung 3-3 Standorte der TAWES Messstationen Wien Hohe Warte, Wien Innere Stadt und Flughafen Wien-Schwechat (Google Maps, 2012)

In „Das Klima von Wien“ von I. Auer, R. Böhm und H. Mohnl (1989) wurde die 30-jährige Periode von 1951-1980 für die Auswertungen verwendet.

Orographische Gegebenheiten im Raum Wien sowie anthropogene Faktoren modifizieren das in den größten Teilen Mitteleuropas herrschende warmgemäßigte Klima mit Regen. Der anthropogene Einfluss macht sich in der Lufttemperatur, durch den „Wärmeinseleffekt“ in Wien deutlich bemerkbar. Aufgrund dichter bebauter und weniger Vegetationszonen tritt je nach Wetterlage mehr oder weniger ausgeprägt eine Übertemperatur gegenüber dem

Freiland auf. Vor allem bei windschwachen, bewölkungsarmen Tagen kann es sehr große Temperaturunterschiede geben. Der Effekt tritt am stärksten in Sommernächten auf, hier ist die Stadt im Mittel um 2,5°C wärmer als die Ebene im Osten und Süden. Tagsüber im Sommer tritt der Wärmeinseleffekt nur geringfügig auf, das Stadtzentrum kann sogar etwas kühler sein. Im Winter ist der Tagesgang weniger stark ausgeprägt, die direkten Wärmequellen führen nur zu einer leichten Übertemperatur (Auer, Böhm, & Mohnl, 1989).

In Tabelle 3-1 sind die klimatologischen Werte der Temperatur aufgelistet. Der Wärmeinseleffekt ist durch diese 3 Messstationen gut zu erkennen. Die Station Wien Innere Stadt weist in jedem Monat deutlich höhere Temperaturmittel auf als die etwas außerhalb liegenden Stationen. Die Differenz zu der am Flughafen Wien-Schwechat liegenden Messstation beträgt im Durchschnitt etwa 1,5°C. Der Unterschied zur Station Wien Hohe Warte ist etwas geringer, im Mittel etwa 1°C. Aufgrund der ländlichen Lage der Messstation am Flughafen Wien-Schwechat und der von der Stadt beeinflussten Messstation an der ZAMG liegt die Temperaturdifferenz dieser beiden Stationen bei etwa 0,5°C. In der Innenstadt fällt das mittlere Temperaturmaximum bzw. das mittlere Temperaturminimum im Vergleich zu den anderen Stationen natürlich ebenfalls höher aus. Auch die Anzahl der Frost- und Eistage ist im Stadtzentrum reduziert. Am Flughafen Wien-Schwechat treten im Mittel etwa 6 Frosttage und 1-2 Eistage mehr auf.

Tabelle 3-1 Temperatur (T), mittleres Temperaturmaximum (mTmax), mittleres Temperaturminimum (mTmin), Anzahl der Frosttage (Tagesminimum < 0°C) und Anzahl der Eistage (Tagesmaximum < 0°C) für die Stationen Wien Hohe Warte, Wien Innere Stadt und Flughafen Wien-Schwechat für Dezember, Jänner und Februar im Klimamittel (1971-2000) (ZAMG, 2012)

	T [°C]	mTmax [°C]	mTmin [°C]	Frosttage [Tage]	Eistage [Tage]
<u>Dezember</u>					
Wien Hohe Warte	1,50	4,00	-0,50	15	6
Wien Innere Stadt	2,40	4,60	0,50	13	4
Flughafen Wien-Schwechat	1,00	3,80	-1,50	18	7
<u>Jänner</u>					
Wien Hohe Warte	0,10	2,90	-2,00	20	9
Wien Innere Stadt	1,20	3,80	-0,80	17	8
Flughafen Wien-Schwechat	-0,50	2,50	-3,20	23	10
<u>Februar</u>					
Wien Hohe Warte	1,60	5,10	-0,90	15	4
Wien Innere Stadt	2,90	6,10	0,30	11	5
Flughafen Wien-Schwechat	1,00	4,80	-2,10	18	5

Die statistischen Daten über die vertikale Temperaturschichtung Wiens wurden von Auer et. al (1989) mit Hilfe eines Vergleichs von Messstationen in verschiedenen Seehöhen gewonnen. Es wurde die Häufigkeit des Auftretens von Inversionen (Temperaturzunahme mit der Höhe, positiver Temperaturgradient) in den 4 Jahreszeiten betrachtet. Inversionen sind umweltmeteorologisch relevant, da sie keine Durchmischung zulassen und somit die Luftschadstoffe in der Grenzschicht halten. Als Höhenstation wurde die Station Kahlenberg (475m, existiert jetzt nicht mehr) verwendet. Als Bodenstationen wurden für das Stadtzentrum die in einer Seehöhe von 176m gelegene Station Schottenstift (existiert ebenfalls nicht mehr), für die ebene Umgebung im Süden und Osten die Station Großenzersdorf und für die Lage im Wienerwaldtal die Station Wien-Mariabrunn verwendet.

In Abbildung 3-4 ist die relative Häufigkeit des Auftretens von Inversionen für die 4 Jahreszeiten dargestellt. Die urbane Wärmeinsel wirkt sich positiv auf den Inversionsabbau aus. In der Innenstadt können nur im Frühling, Sommer und Herbst in den Vormittagsstunden Inversionen beobachtet werden (maximale Häufigkeit von 10%). Im Winter treten im Stadtzentrum kaum Inversionen auf. In Wienerwaldtälern wird die Bildung von Inversionen durch Kaltluftströme von den Hängen begünstigt. Tagsüber werden die Inversionen meist durch die Sonneneinstrahlung bzw. Advektion anderer Luftschichten aufgelöst (Auer, Böhm, & Mohnl, 1989).

In den drei Temperaturprofilen wird zu jeder Jahreszeit ein Anstieg der Inversionshäufigkeit am frühen Vormittag gezeigt. Die Messstation Kahlenberg stand auf einem Gipfel des Wienerwaldes auf einer Waldwiese. Hang- bzw. Gipfelstationen werden immer mehr oder weniger von ihrer Umgebung beeinflusst: „Überwärmung“ der hangnahen Luftschicht gegenüber der freien Atmosphäre tagsüber infolge der Sonneneinstrahlung bzw. stärkere Auskühlung dieser Luftschicht nachts infolge der Ausstrahlung (Kaiser, 1996). Durch die vorher genannten Effekte wird in den Vormittagsstunden ein vertikaler Temperaturanstieg angezeigt, wodurch fälschlicherweise eine erhöhte Häufigkeit an Inversionen gezeigt wird.

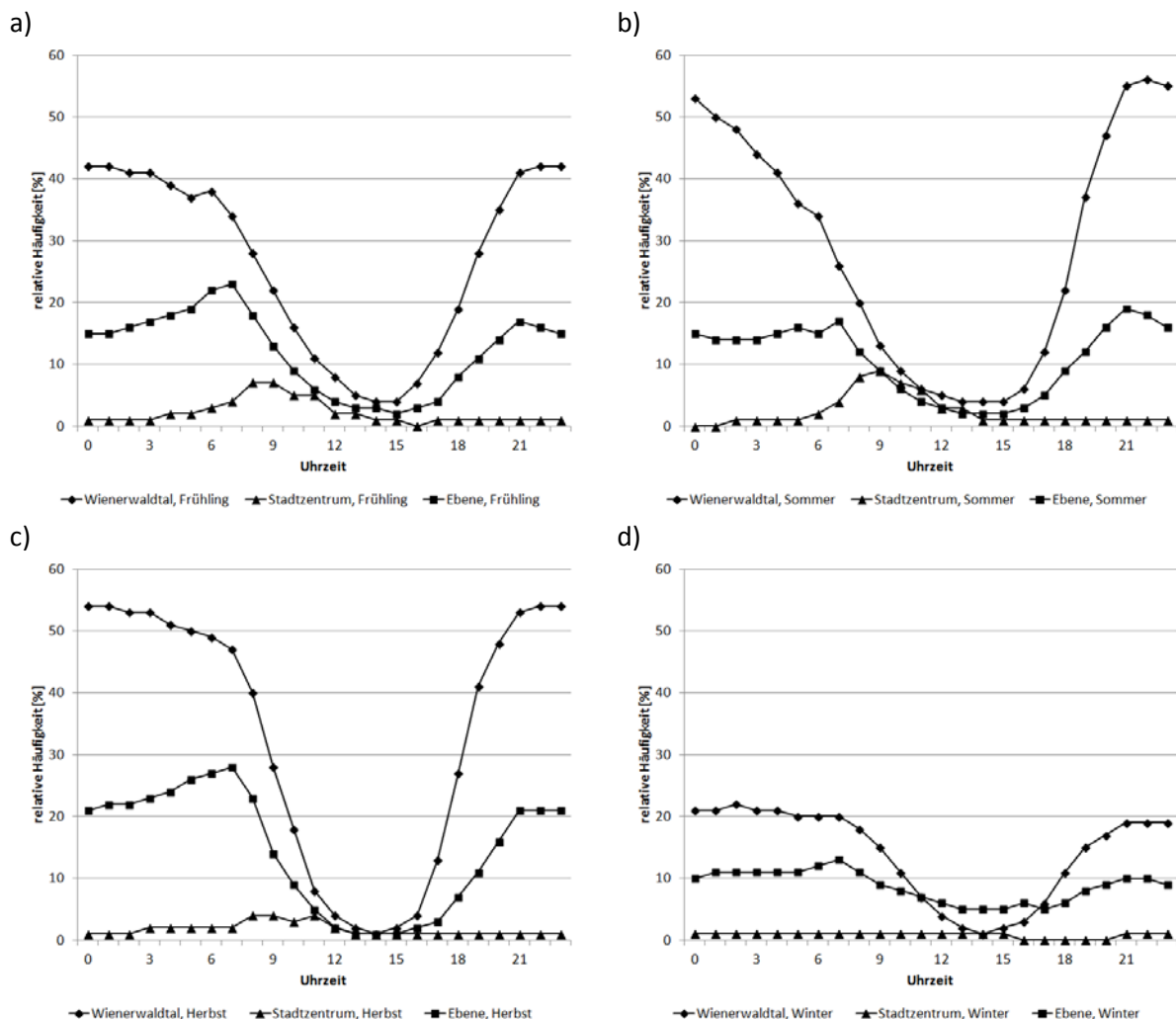


Abbildung 3-4 Relative Häufigkeit des Auftretens von Inversionen in Wien, a) Frühling, b) Sommer, c) Herbst, d) Winter (1951 – 1980) für Wienerwaldtal (Station Mariabrunn, 226m bis 475m, Δ 249m), Stadtzentrum (Station Schottenstift, 176m bis 475m, Δ 299m) und Ebene (Großenzersdorf, 153m bis 475m, Δ 322m) (Auer, Böhm, & Mohnl, 1989)

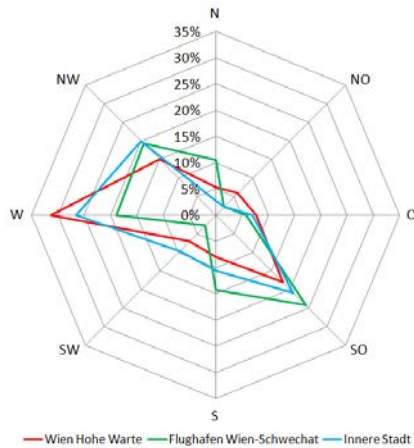
Die Lage Wiens am Ausläufer der Alpen modifiziert die Windrichtungsverteilung der freien Atmosphäre über der Stadt: von der im ungestörten Fall um die Hauptwindrichtung West symmetrisch verteilten Windrichtungen auf ein Hauptmaximum aus West bis Nordwest und ein sekundäres Maximum aus Südost. In Erdoberflächennähe kommen die kleinräumigen Strukturen des Windfeldes hervor. In den Wienerwaldtälern bilden sich Tal-Windsysteme aus. Auf Kuppenlagen (Wienerberg, Laaerberg) zeigen die Nebenwindrichtungen eine höhere Häufigkeit als in der Ebene. Durch den Donaudurchbruch im Norden der Stadt (zwischen Leopoldsberg und Bisamberg) erfährt das Windfeld eine stärkere Ausrichtung auf die Talrichtung (Nordwest bis Südost). Ebenfalls kommt es durch eine Art Düseneffekt zu einer Windgeschwindigkeitsverstärkung. In den Herbst- und Wintermonaten ist mit einer größeren Häufigkeit von Südost-Winden zu rechnen, diese treten dann im Mittel genauso häufig auf wie West- bis Nordwestwinde. Für die Luftqualität spielt das eine erhebliche Rolle, da aus Richtung Südosten die Schadstoffe einiger Großemittenten das Stadtzentrum treffen. Die geringsten Windgeschwindigkeiten treten in den Tälern des Wienerwaldes, die höchsten auf Kuppenlagen auf. Auch die ebenen Flächen im Süden und Osten der Stadt und der Bereich des Donaudurchbruchs im Norden weisen höhere Windgeschwindigkeiten auf. Durch die „raue“ Oberfläche des Stadtkerns wird die Windgeschwindigkeit stark abgebremst. Nachts treten die geringsten Windgeschwindigkeiten auf. Das Maximum zeigt eine um etwa 30% bis 70% höhere Geschwindigkeit und tritt zwischen 14 und 16 Uhr auf. Die am häufigsten auftretenden Windrichtungen weisen im Mittel auch die größten Windgeschwindigkeiten auf, so sind etwa die Winde aus West bis Nordwest im Durchschnitt um etwa 30% stärker als die Südostwinde (Auer, Böhm, & Mohnl, 1989).

In Abbildung 3-5 sind die Windrosen für die Stationen Wien Hohe Warte, Flughafen Wien Schwechat und Wien Innere Stadt dargestellt. Alle drei Messstationen zeigen in allen Monaten die größte Häufigkeit bei Winden aus West bis Nordwest.

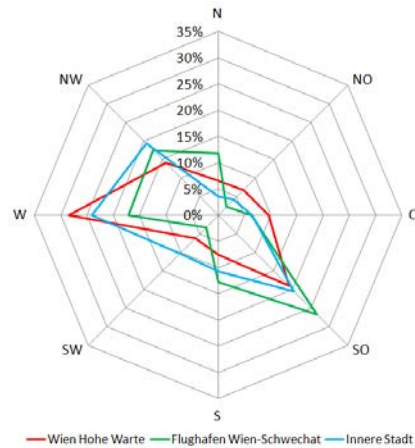
Fast die Hälfte der Zeit kommt im Stadtgebiet der Wind aus dem Sektor West bis Nordwest. Die Station Wien Hohe Warte weist deutlich mehr Westwinde (29% bis 31%) als Nordwestwinde (14% bis 17%) auf. In der Innenstadt gibt es auch mehr Winde aus West (24% bis 29%), jedoch treten nordwestliche Richtungen nur geringfügig weniger häufig auf (19% bis 22%). An beiden Stationen weht in jedem Monat in nur 20% der Fälle der Wind aus Südost. Am Flughafen Wien-Schwechat liegt die Häufigkeit für West- bis Nordwestwinde bei unter 40%, jedoch treten hier aufgrund des Einflusses des Donautals mehr Winde aus Nordwest (18% bis 23%) als aus West (17% bis 18%) auf. Die SO-Winde sind etwas häufiger vertreten als im Stadtgebiet (24% bis 27%).

Messdaten mit Windgeschwindigkeiten unter 0,5m/s (Calmen) wurden in der Auswertung nicht mitberücksichtigt. In der Innenstadt (0,4% bis 1,1%) liegt die Calmenhäufigkeit aufgrund der erhöhten Bodenrauigkeit deutlich unter der Häufigkeit der Station Wien Hohe Warte (1,5% bis 1,8%) oder Flughafen Wien-Schwechat (1,8% bis 2,1%)

a)



b)



c)

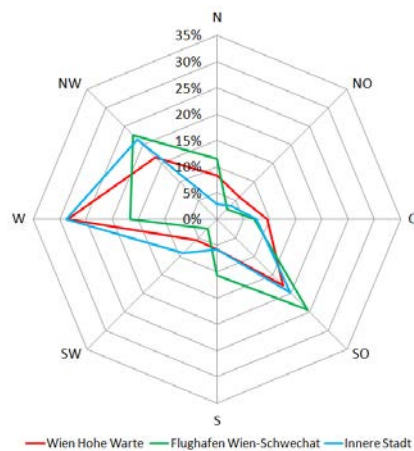


Abbildung 3-5 Windrosen für a) Dezember, b) Jänner, c) Februar im klimatologischen Mittel (1971-2000) (ZAMG, 2012)

3.3. Wetter im Messzeitraum

In Abbildung 3-6 sind die Temperaturzeitreihen der Messstationen Flughafen Wien-Schwechat und Wien Hohe Warte für Dezember 2009 dargestellt. Bis zum 10. Dezember war das Wettergeschehen von Tiefdruckkomplexen und den damit einhergehenden Frontsystemen geprägt. Danach drehte sich die Höhenströmung aufgrund eines sich langsam breit machenden Hochdruckgebiets von den dominierenden Richtungen Südwest bis Nordwest auf Nordost. Durch die ständige Zufuhr kalter kontinentaler Luftmassen sank die Temperatur kontinuierlich ab. Erst ab dem 20. Dezember drehte die Höhenströmung langsam wieder auf südwestliche Richtungen, wodurch mildere Luftmassen herangeführt wurden und innerhalb kürzester Zeit die Temperatur stark anstieg. Durch den wechselnden Einfluss von Tiefdruckgebieten und kurzweiligen Zwischenhochs präsentierte sich das Wetter Ende des Monats wechselhaft.

3. Verhältnisse im Raum Wien

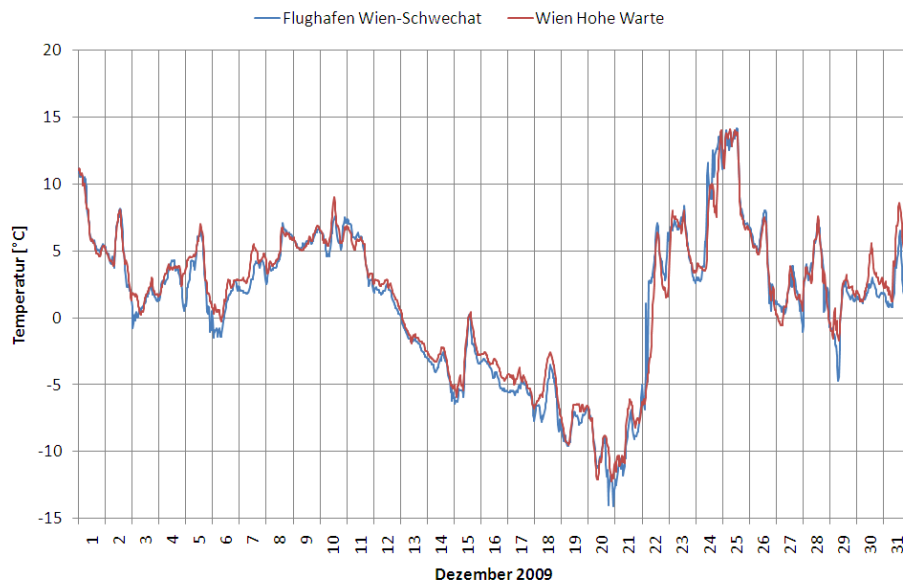


Abbildung 3-6 Temperaturverlauf der TAWES Stationen Flughafen Wien-Schwechat und Wien Hohe Warte im Dezember 2009

Durch den Wechsel von kontinentalen Kaltluftmassen und wärmeren Luftmassen aus dem Mittelmeerraum zeigen die Temperaturabweichungen vom langjährigen Mittel im Dezember 2009 im Osten Österreichs ein recht durchschnittliches Temperaturbild (Abbildung 3-7).

Temperaturabweichung Dezember 2009

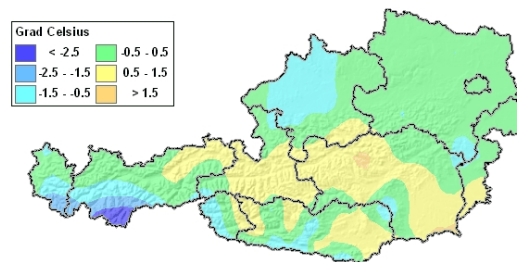


Abbildung 3-7 Temperaturabweichungen vom langjährigem Mittel (1971-2000) im Dezember 2009 (ZAMG, 2012)

In Abbildung 3-8 sind die Windrosen für Dezember 2009 für die Messstationen Flughafen Wien-Schwechat und Wien Hohe Warte dargestellt. Wie in den klimatologischen Windrosen (Abbildung 3-5) dominieren am Flughafen Wien-Schwechat die südöstlichen und die nordnordwestlichen Winde. Die stärksten Winde kamen aus den Richtungen Südost und Nordwest. Die Nordnordwest-Winde hatten eine Windgeschwindigkeit von maximal 6 m/s. An der Hohen Warte wurden im Dezember 2009 am häufigsten Winde aus westlichen Richtungen gemessen, welche auch mit den größten Windgeschwindigkeiten einhergehen. Die restlichen Häufigkeiten verteilen sich auf die Sektoren Südost, Nord und Nordost.

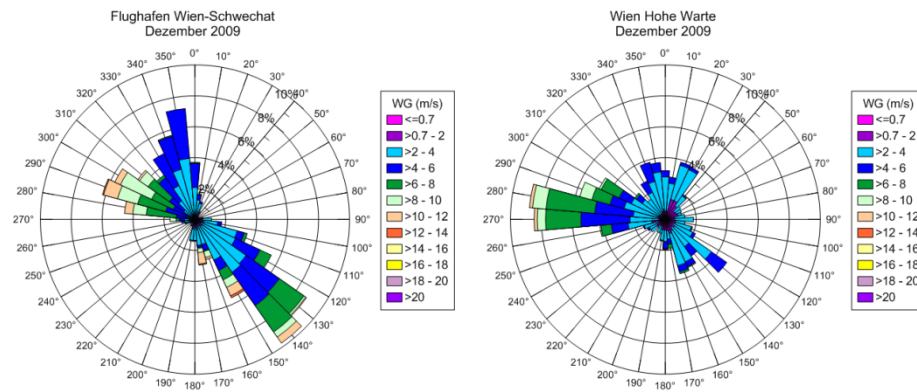


Abbildung 3-8 Windrosen für die Stationen Flughafen Wien-Schwechat und Wien Hohe Warte im Dezember 2009

Abbildung 3-9 zeigt den Temperaturverlauf der Messstationen Wien Hohe Warte und Flughafen Wien-Schwechat im Jänner 2010.

Das Wettergeschehen in Österreich wurde im Jänner 2010 durch einen Wechsel aus Tief- und (Zwischen-) Hochdruckgebieten und den daraus resultierenden häufigen Drehungen der Höhenströmung (vorwiegend zwischen westlichen und nordöstlichen Richtungen) beherrscht. Durch die vermehrte Tiefdrucktätigkeit östlich und südöstlich von Österreich zeigte sich der Monat im Osten meist trüb, wodurch die Temperatur gedämpft wurde. Ab dem 20. Jänner machte sich ein mächtiges Hochdruckgebiet vom Osten her über Österreich breit und führte kalte kontinentale Luftmassen mit sich. Erst Ende des Monats drehte die Höhenströmung wieder auf West bis Nordwest wodurch wieder mildere Luftmassen Österreich erreichten.

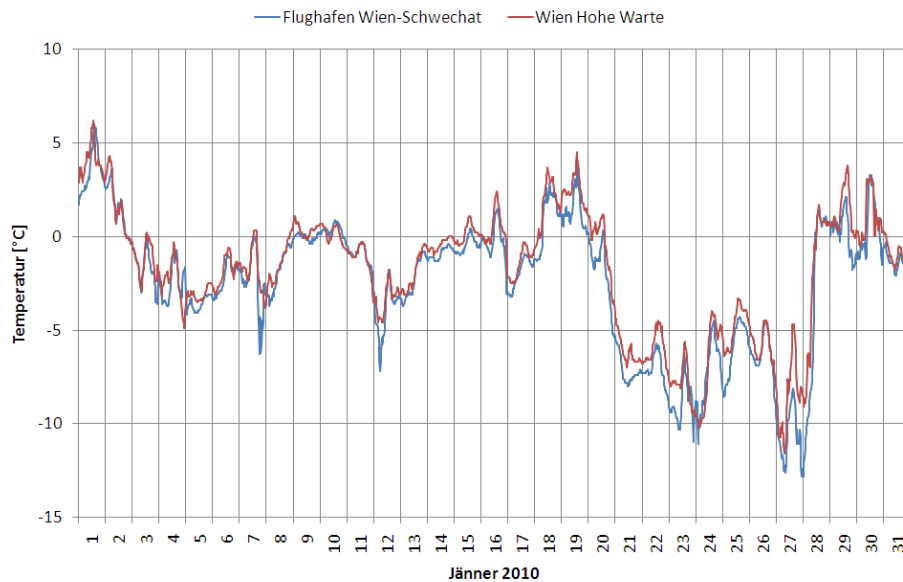


Abbildung 3-9 Temperaturverlauf der TAWES Stationen Flughafen Wien-Schwechat und Wien Hohe Warte im Jänner 2010

In weiten Teilen Österreichs verlief der Jänner 2010 verbreitet zu kalt. Durch häufige Hochnebelphasen und der Advektion kalter Luftmassen war es im Wiener Raum etwa 1,5°C bis 2,5°C kälter als im langjährigen Mittel (Abbildung 3-10).

Temperaturabweichung Jänner 2010

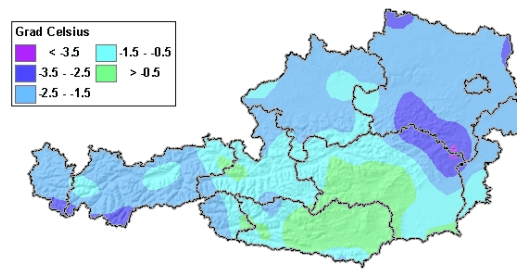


Abbildung 3-10 Temperaturabweichungen vom langjährigem Mittel (1971-2000) im Jänner 2010 (ZAMG, 2012)

Aufgrund der erhöhten Tiefdrucktätigkeit im Südosten bzw. Osten Österreichs ist die Windrose von Jänner 2010 im Vergleich mit der des Dezembers 2009 etwas gedreht (Abbildung 3-11). Im Jänner zeigt die Messstation am Flughafen Wien-Schwechat eine deutlich geringere Häufigkeit an Nordnordwest-Winden und eine höhere Häufigkeit an Nordwest-Winden als im Dezember 2009. Am häufigsten sind aber wie im Dezember 2009 Winde aus Südosten. Auf der Hohen Warte ist das Maximum der westlichen Windrichtungen etwas breiter gefächert als im Dezember 2009. Die Häufigkeit der Südostwinde hat aufgrund des kräftig ausgeprägten Hochdrucksystems im Osten Österreichs deutlich zugenommen.

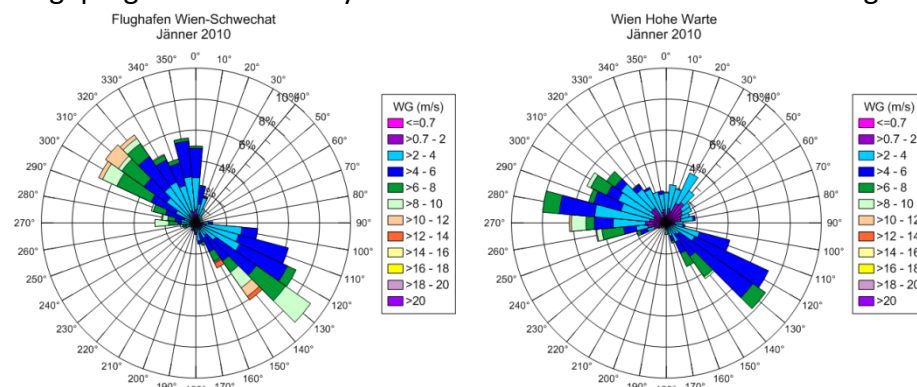


Abbildung 3-11 Windrosen für die Stationen Flughafen Wien-Schwechat und Wien Hohe Warte im Jänner 2010

Aufgrund der in die nordwestliche Höhenströmung eingelagerten Störungen war das Wetter Anfang Februar 2010 wechselhaft. Ab 6. Februar wurden durch die Drehung der Höhenströmung auf nördliche Richtungen kalte Luftmassen nach Österreich transportiert. Während in den meisten Teilen Österreichs meist sonniges Winterwetter herrschte, war es im Osten durch eine lang anhaltende Hochnebelperiode kalt und trüb. Erst die Drehung der Höhenströmung auf Süd bis Südwest konnte am 21. Februar den Hochnebel auflösen. Der restliche Februar war durch einen freundlichen Wettercharakter geprägt.

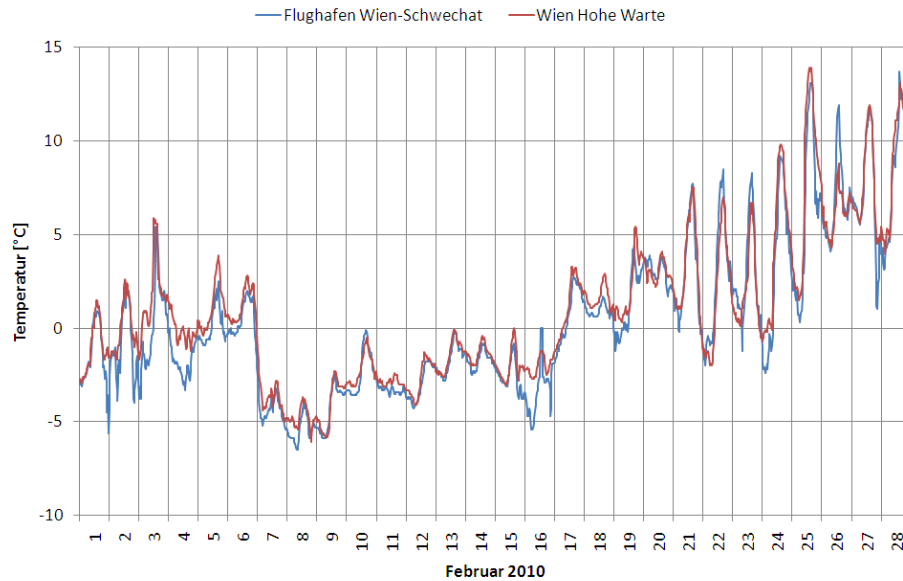


Abbildung 3-12 Temperaturverlauf der TAWES Stationen Flughafen Wien-Schwechat und Wien Hohe Warte im Februar 2010

Da sich die erste Hälfte des Februars tief winterlich präsentierte und in der zweiten Hälfte aufgrund der Südströmung anfangs nur in den typischen Föhngebieten, dann aber auch im Osten verbreitet frühlingshafte Temperaturen herrschten, zeigen die Temperaturabweichungen in Abbildung 3-13 ein relativ einheitliches Bild.

Temperaturabweichung Februar 2010

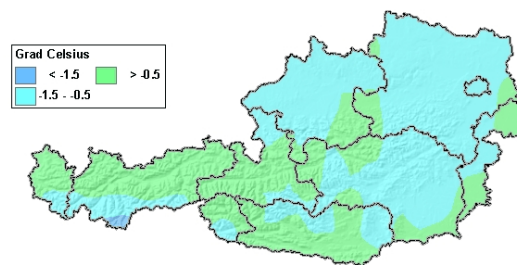


Abbildung 3-13 Temperaturabweichungen vom langjährigem Mittel (1971-2000) im Februar 2010 (ZAMG, 2012)

Die Station Flughafen Wien-Schwechat zeigt im Februar 2010 eine stark Donautal-parallele Strömung. Die Station Wien Hohe Warte zeigt die typische Windrichtungsverteilung mit dem Maximum bei westlichen Richtungen und dem sekundären Maximum bei südöstlichen Richtungen an.

3. Verhältnisse im Raum Wien

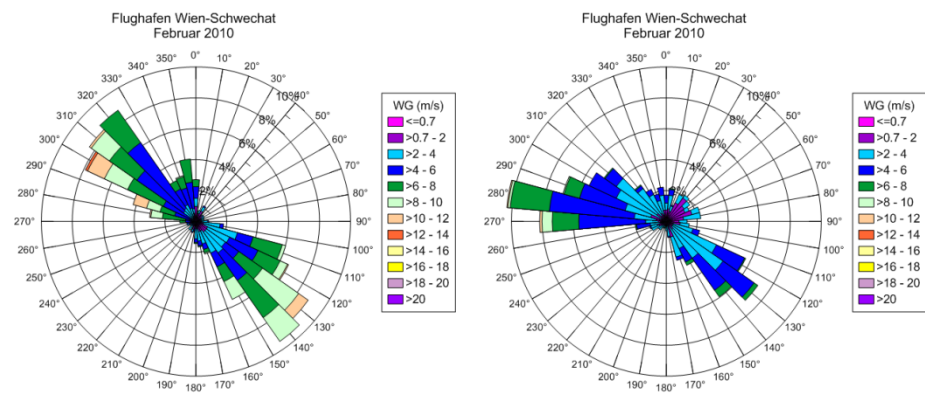


Abbildung 3-14 Windrosen für die Stationen Flughafen Wien-Schwechat und Wien Hohe Warte im Februar 2010

4. Messgeräte

4.1. Mess-Standorte

Die folgende Abbildung zeigt die Standorte der Messgeräte. Im gesamten Stadtgebiet und in der Umgebung von Wien werden von der ZAMG teilautomatische Wetterstationen betrieben.

Die Radiosonde wird an der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik im 19. Wiener Gemeindebezirk (48,249°N, 16,356°E, 198m) gestartet. An diesem Standort befindet sich auch die TAWES Station Wien Hohe Warte.

Die meisten Stationen der ACG sind am Flughafen Wien-Schwechat zu finden. Dabei handelt es sich meist um Windmessenanlagen (WMA). Eine weitere Messstation liegt südlich des Zentrums von Wien, beim Arsenal, eine zweite steht am Exelberg, im Nordwesten von Wien.

Der temporäre Standort des RASS befand sich am Flughafen Wien-Schwechat (48,120°N, 16,536°E, 175m), etwas außerhalb der Stadt Wien. Neben dem RASS befindet sich eine Windmessenanlage (WMA11) der ACG.

Unterteilt man die Abbildung 4-1 in 4 Quadranten (mit Mittelpunkt im Stadtzentrum von Wien bzw. TAWES Station Innere Stadt) sieht man, dass die meisten Messstationen im 2. und 4. Quadranten zu finden sind. Im 1. Quadranten (Nord bis Ost) befinden sich nur 3 Messstationen, dieser Teil von Wien ist relativ schlecht abgedeckt. Im 2. Quadranten befinden sich auch die Windmessenanlagen der ACG am Flughafen Wien-Schwechat. Von den restlichen 7 Stationen befinden sich drei im Wiener Stadtgebiet. Die erste ist die Station Arsenal, welche sich auf einer Seehöhe 360m befindet und damit 158m über Grund (auf dem Arsenalturm). Die zweite Station (Seehöhe 250m) ist auf dem Laaer Berg zu finden. Die Messstation Kaiserebersdorf liegt weit außerhalb des Stadtzentrums im südöstlichen Wien. Die restlichen Stationen befinden sich in Niederösterreich. Im 3. Quadranten (Süd bis West) liegen alle Stationen zwischen Süd und Südwest. Der Bereich des Stadtgebiets und des Wienerwaldes ist im Sektor Südwest bis West von keiner Messstation erfasst. Im 4. Quadranten liegen 2 Stationen im Stadtgebiet (Wien AKH und Wien Hohe Warte). Im Westen befinden sich die Stationen Wien Jubiläumswarte (449m) und Wien Mariabrunn im Stadtgebiet und die Station Purkersdorf außerhalb des Stadtgebietes von Wien. Die Stationen Exelberg (592m Seehöhe) und Hermannskogel (520m Seehöhe) decken den Wienerwaldbereich im Nordwesten ab. In Richtung Norden befinden sich außerhalb des Stadtgebietes noch 2 Messstationen (Korneuburg).

4. Messgeräte

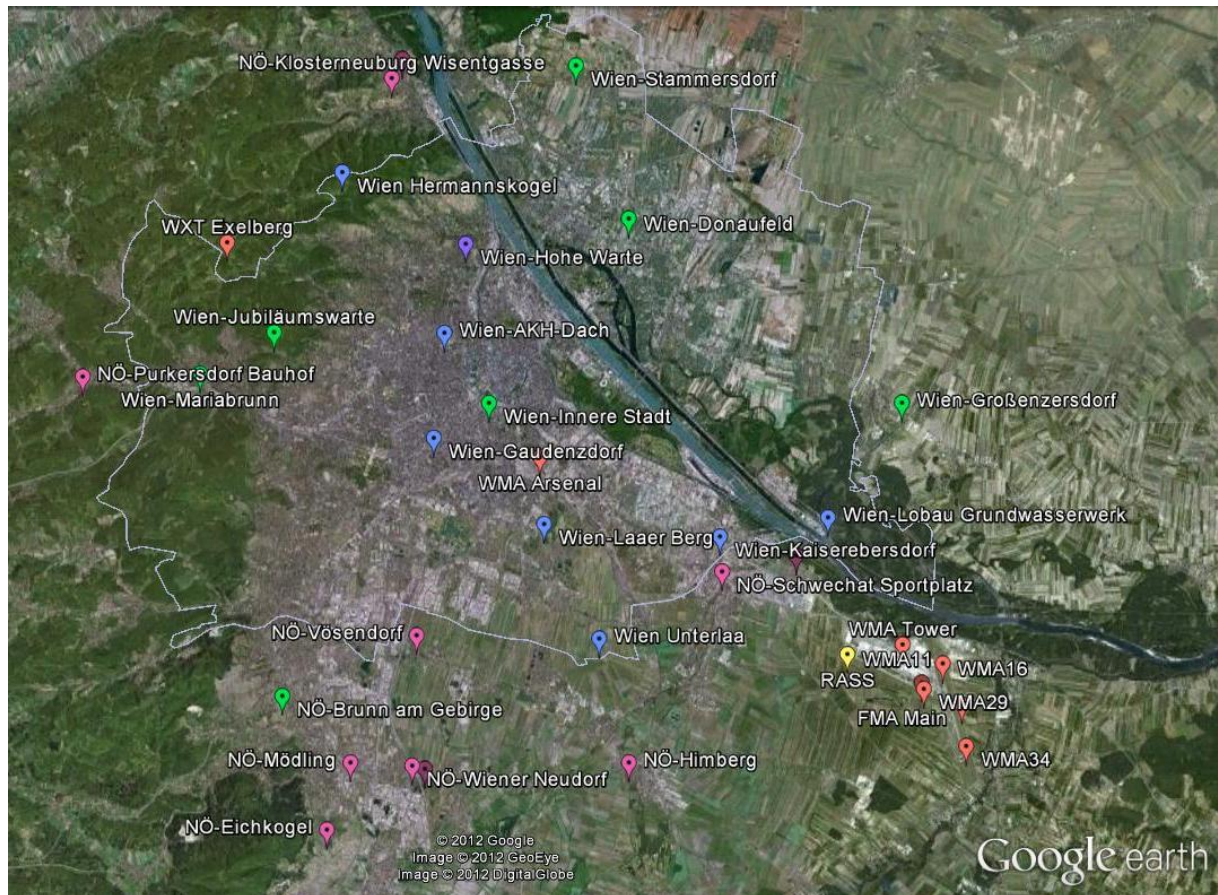
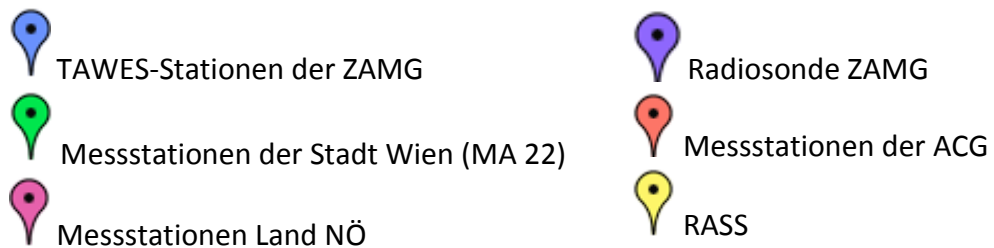


Abbildung 4-1 Standort der Messstationen, RASS und Radiosonde (Google Earth, 2012)



In Abbildung 4-2 ist eine detaillierte Übersicht der meteorologischen Messstationen am Flughafen Wien-Schwechat gegeben. Als Standort für das RASS wurde eine Grasfläche neben dem West-Ende der 110° bzw. 290° gerichteten Start- bzw. Landebahn gewählt.



Abbildung 4-2 Meteorologische Messstationen (rot) am Flughafen Wien-Schwechat und RASS (gelb) (Google Earth, 2012)



4.1.1. Höhenverteilung der Messstationen

Wien/Lobau-Grundwasserwerk ist die Station mit der niedrigsten Seehöhe (150 m), sie liegt im südöstlichen Flachland von Wien. Die höchste Station befindet sich am Exelberg (592 m), nordwestlich von Wien, in Niederösterreich.

In Abbildung 4-3 sind die Seehöhen der einzelnen Messstationen in Abhängigkeit des Breitengrades dargestellt (meridionaler Schnitt). Im Norden wird Wien von den im Wienerwald gelegenen Messstationen umgeben.

Abbildung 4-4 zeigt die West-Ost Verteilung der Seehöhen. Der Westen der Stadt weist die größten Seehöhen durch den Wienerwald auf. Im Osten ist es ziemlich flach mit Seehöhen unter 200m.

4. Messgeräte

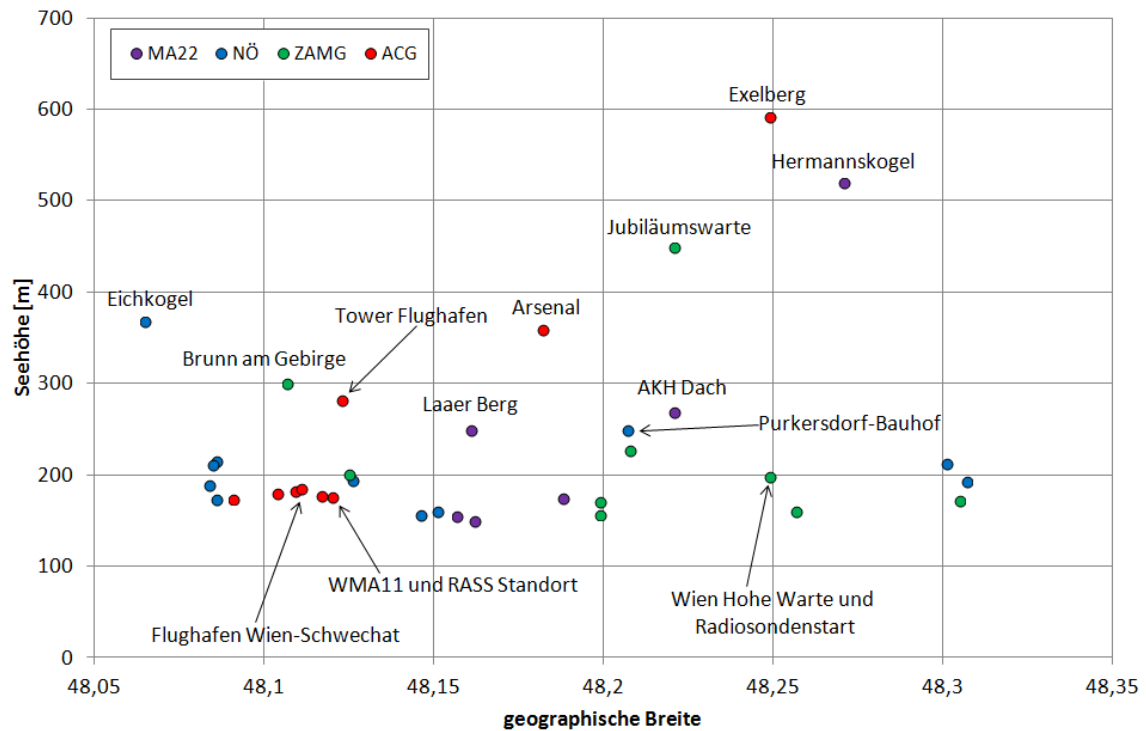


Abbildung 4-3 Meridionale Verteilung (Süd-Nord Verteilung) der Seehöhen der meteorologischen Messstationen in Wien und Umgebung

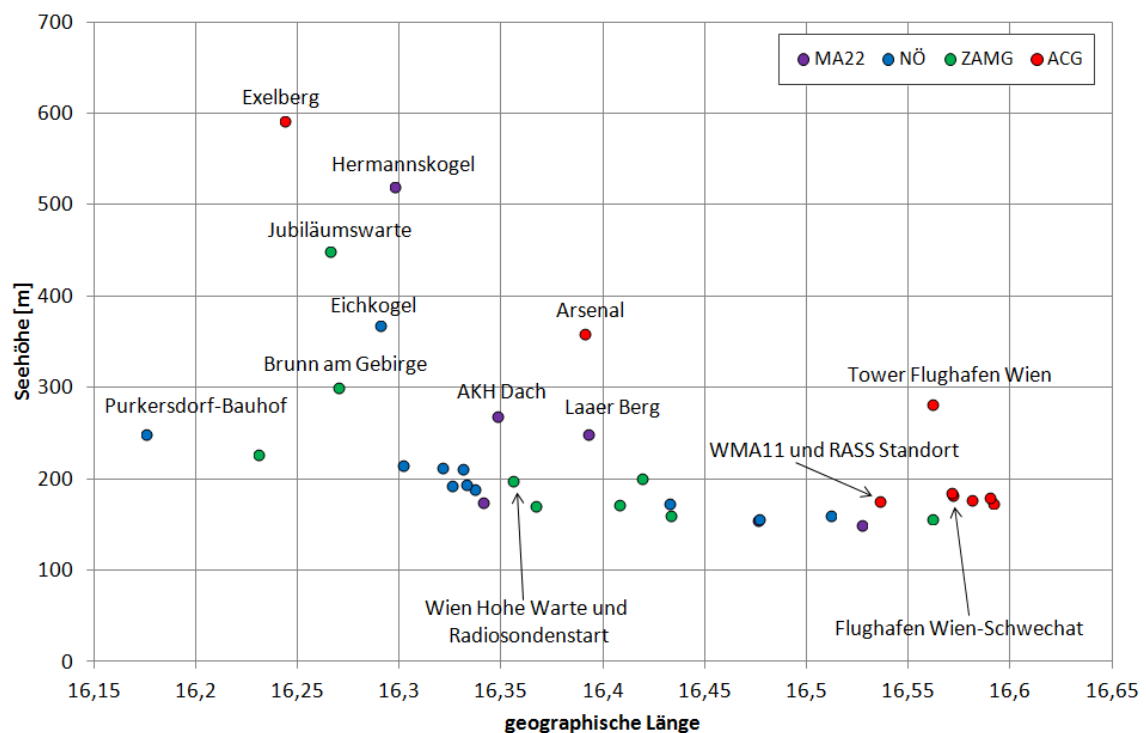


Abbildung 4-4 Zonale Verteilung (West-Ost Verteilung) der Seehöhe der meteorologischen Messstationen in Wien und Umgebung

4.2. SODAR und RASS

Ein SODAR („Sonic Detection and Ranging“) ist ein bodengebundenes Fernerkundungsmessinstrument zur Erfassung des Vertikalprofils des dreidimensionalen Windes, welches in Kombination mit zwei elektromagnetischen Gitterantennen (RASS) auch zur Erfassung des Temperaturprofils eingesetzt werden kann.

Die Antenne des SODARs besteht aus 64 Schalltrichtern und dient als Sende- und Empfangsanlage für Schallwellen (siehe Kapitel 4.2.1 Schallausbreitung in der Atmosphäre). Ein geringer Teil der Schallenergie wird an natürlichen Dichteinhomogenitäten der Atmosphäre rückgestreut. Da sich diese mikroturbulenten Inhomogenitäten mit der Atmosphäre bewegen, ist das rückgestreute Signal frequenzverschoben (Doppler-Effekt, siehe Kapitel 4.2.2). Aus dem empfangenen Signal kann die Frequenzverschiebung bestimmt werden, woraus neben dem dreidimensionalen Wind auch die Standardabweichung, Vertikalgeschwindigkeit und Rückstreuamplitude bestimmt werden kann. Die Schalllaufzeit zwischen Senden und Empfangen ermöglicht (über die Schallgeschwindigkeit) die Höhenzuordnung der jeweiligen Streuzentren (siehe Kapitel 4.2.3).

Das RASS-Messverfahren nutzt die Reflexion von elektromagnetischen Wellen an Brechungsindexschwankungen (siehe Kapitel 4.2.4). Aus dem empfangenen Signal können Temperaturprofile (siehe Kapitel 4.2.5) der Atmosphäre bis in einige Hundert Meter Höhe bestimmt werden (siehe Kapitel 4.2.6).

In Abbildung 4-5 sieht man ein Foto vom SODAR mit RASS-Erweiterung (im Weiteren RASS) am Flughafen Wien-Schwechat mit dem eingehausten SODAR in der Mitte und den beiden elektromagnetischen Gitterantennen im Vorder- und Hintergrund.



Abbildung 4-5 RASS am Flughafen Wien-Schwechat

4.2.1. Schallausbreitung in der Atmosphäre

Schallgeschwindigkeit

Der theoretische Ausdruck der Schallgeschwindigkeit in einem idealen Gas ist gegeben durch

$$c = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} \quad (4.1.)$$

mit c ... Schallgeschwindigkeit

γ ... Verhältnis der spezifischen Wärmekapazitäten $\frac{c_p}{c_v} = 1,4$

p ... Umgebungsdruck

ρ ... Gasdichte

Die Schallgeschwindigkeit in trockener Luft wurde mit $c = 331,45 \pm 0,05 \text{ m/s}$ bei 0°C und einem Umgebungsdruck von 1013,25hPa experimentell verifiziert (Bohn, 1988).

Substituiert man in Gleichung 4.1. p mit der idealen Gasgleichung ($pV = RT$) erhält man (Bohn, 1988):

$$c = \sqrt{\frac{1,4RT}{M}} \quad (4.2.)$$

mit c ... Schallgeschwindigkeit

R ... universelle Gaskonstante

T ... Temperatur

M ... mittlere molare Masse des Gases

Gleichung 4.2. beschreibt die Temperatur- und Druckabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit. Erhöht sich der Druck, erhöht sich ebenfalls die Dichte. Solange die Temperatur konstant bleibt, ändert sich die Schallgeschwindigkeit aufgrund einer Druckänderung nicht. Eine Temperaturänderung würde zu einer Dichteänderung führen, welche jedoch nicht den Druck beeinflusst, d.h. Druckänderungen führen zu Dichteänderungen jedoch nicht umgekehrt. Da R und M Konstanten sind kann man Gleichung 4.2. umschreiben (Bohn, 1988):

$$c = c_0 \sqrt{1 + \frac{T}{T'}} \quad (4.3.)$$

mit c ... Schallgeschwindigkeit

c_0 ... Referenzschallgeschwindigkeit

T ... Temperatur [K]

$T' = 273,16^\circ\text{K}$... Referenz-Temperatur

In Abbildung 4-6 ist die Gleichung 4.3. grafisch dargestellt.

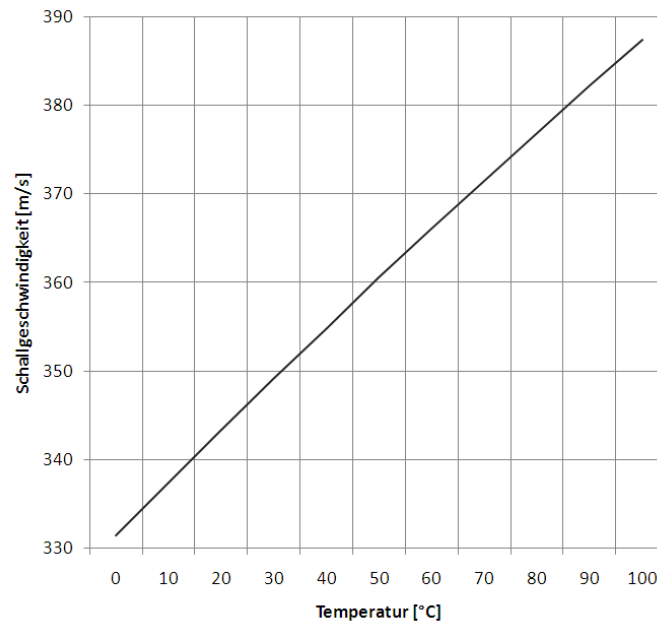


Abbildung 4-6 Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Temperatur (Bohn, 1988)

Die Luftfeuchtigkeit hat ebenfalls Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit. Feuchte Luft hat eine geringere Dichte als trockene Luft, d.h. die Schallgeschwindigkeit in Gleichung 4.1. wird größer. Jedoch schlägt sich die Feuchtigkeit auch auf das Verhältnis der spezifischen Wärmekapazitäten nieder, dies würde eine Abnahme in der Schallgeschwindigkeit bewirken. Der Effekt der Änderung der Dichte ist jedoch größer und somit bewirkt eine erhöhte Luftfeuchtigkeit eine höhere Schallgeschwindigkeit (Bohn, 1988).

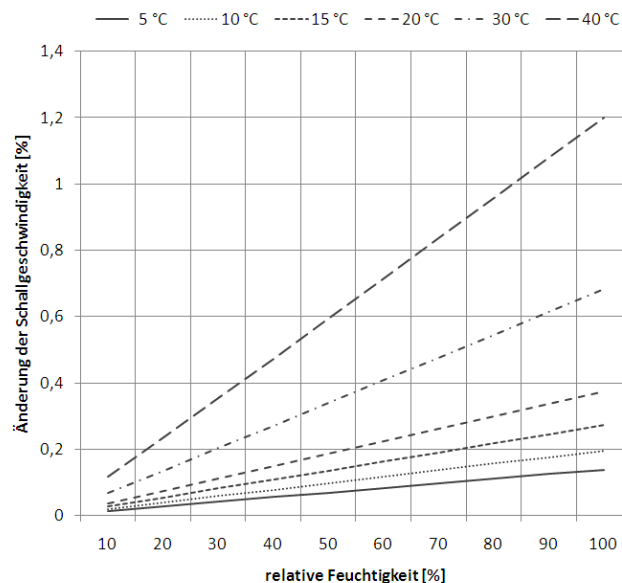


Abbildung 4-7 Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Luftfeuchtigkeit (Bohn, 1988)

Schallwellen

Schallwellen sind reine Kompressionswellen, die Partikel bewegen sich in Ausbreitungsrichtung (Longitudinalwellen) (Bergmann, Schäfer, 2001).

Wenn sich Schallwellen durch die Atmosphäre bewegen, werden sie geschwächt. Die Schwächung der Schallwelle kann durch drei verschiedene Mechanismen passieren. Die

Energiedissipation durch Luftviskosität, Strahlung und Wärmeleitung hat nur einen sehr geringen Anteil und ist frequenzabhängig. Einen etwas höheren Beitrag liefert die molekulare Schwächung. Der Anteil der Schwächung durch Streuung von Schall an Temperatur- und Turbulenzstrukturen kann sehr groß werden und ist abhängig von den Eigenschaften der Atmosphäre. Im vollkommen homogenen und kontinuierlichen Medium werden Schallwellen nicht gestreut, eine Streuung erfolgt nur dann wenn es zu Änderungen des akustischen Brechungsindex kommt. Diese Inhomogenitäten entstehen durch turbulente Strukturen des Wind- und Temperaturfeldes (Verein Deutscher Ingenieure, 1994).

Der Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit, Frequenz und Wellenlänge ist gegeben durch:

$$c = \lambda * f \quad (4.4.)$$

Bei Änderung der Frequenz f ändert sich die Wellenlänge λ , nicht die Schallgeschwindigkeit c . Wellen mit höherer Frequenz werden stärker absorbiert als Wellen mit niedriger Frequenz.

4.2.2. Doppler Effekt

Der Doppler Effekt beschreibt die Änderung der Frequenz einer Welle wenn sich Quelle und/oder Beobachter bewegen. Dabei können sie sich aufeinander zu bewegen, entfernen oder relativ zueinander bewegen. Es kann sich dabei um jede Art von Welle handeln. Im Weiteren werden nur Schallwellen betrachtet. Bewegt sich der Beobachter mit einer Geschwindigkeit r auf die Schallquelle, die mit einer Frequenz f_S sendet, zu (+) oder weg (-), dann stellt der Beobachter folgende Frequenz f_B fest (Verein Deutscher Ingenieure, 2009):

$$f_{B1} = f_{S1} * (1 \pm \frac{r}{c}) \quad (4.5.)$$

Die Frequenz wird erhöht wenn sich der Beobachter auf die Quelle zu bewegt, bewegt er sich von der Quelle weg, wird die Frequenz verringert. Bewegt sich die Quelle und der Beobachter ruht, dann tritt folgende Frequenzverschiebung auf (Verein Deutscher Ingenieure, 2009):

$$f_{S2} = f_{B1} * \frac{1}{1 \mp \frac{r}{c}} \quad (4.6.)$$

In diesem Fall sind die Vorzeichen umgekehrt. Bewegt sich die Quelle auf den Beobachter zu wird die Frequenz verringert, entfernt sie sich vom Beobachter erhöht sich die Frequenz.

Beim SODAR sind die Inhomogenitäten, an denen sich der Schall streut, „Beobachter“ und „Sender“ gemeinsam. In Gleichung 4.5. ist f_{S1} die Frequenz des sendenden SODARs, f_{B1} ist die veränderte Frequenz, welche die Inhomogenität in der Atmosphäre „beobachtet“. In Gleichung 4.6. tritt wieder f_{B1} auf. Die Inhomogenität streut das Signal mit der gleichen Frequenz zurück. f_{S2} ist die Frequenz die wieder beim SODAR ankommt. Man muss die vorherigen Formeln kombinieren um zur Frequenzverschiebung des SODARs zu gelangen (Verein Deutscher Ingenieure, 2009):

$$f_{S2} = f_{S1} * \frac{1 \pm \frac{r}{c}}{1 \mp \frac{r}{c}} \quad (4.7.)$$

mit f_{S2} ... gesendete Frequenz
 f_{S1} ... empfangene Frequenz
 r ... Geschwindigkeit der Inhomogenität
 c ... Schallgeschwindigkeit

Die Geschwindigkeit der Inhomogenität r ist die in Strahlrichtung vom SODAR gemessene Windkomponente (Verein Deutscher Ingenieure, 2009).

4.2.3. Messprinzip SODAR

Beim SODAR-Messverfahren werden hörbare Schallimpulse zeitlich und räumlich gebündelt in die Atmosphäre abgestrahlt. Ein kleiner Teil der Schallwellen wird an Inhomogenitäten des akustischen Brechungsindex in der Atmosphäre zurückgestreut und wieder empfangen (Verein Deutscher Ingenieure, 1994).

Da sich diese mikroturbulente Inhomogenitäten mit der Atmosphäre bewegen, ist das rückgestreute Signal, entsprechend der Windgeschwindigkeit parallel zur Schallausbreitungsrichtung, frequenzverschoben. Diese Frequenzverschiebung wird vom Empfänger gemessen. Durch die Schalllaufzeit zwischen Senden und Empfangen kann die Höhenzuordnung erfolgen. Es werden drei verschiedene orientierte Messstrecken verwendet, damit man die Windgeschwindigkeit auch als 3-dimensionale vektorielle Größe bestimmen kann (METEK Meteorologische Messtechnik GmbH, 2001).

Das RASS am Flughafen Wien-Schwechat wurde bis zum 15. Jänner 2010 mit einer Sendefrequenz 2000 Hz betrieben. Danach wurde auf Multifrequenzbetrieb umgestellt, d.h. zur Detektierung werden Schallwellen unterschiedlicher Frequenz ausgesendet: 1386 Hz, 1612 Hz, 1862 Hz, 2087 Hz. Es wird dann nur die Frequenz verwendet, welche die größten Höhen erreicht und somit die meisten Messwerte beinhaltet, d.h. es wurde nur die Frequenz 2087 Hz verwendet. Ab 3. Februar 2010 wurden die Einstellungen nochmals modifiziert, dabei wurden alle Levels über 500 Meter ausgeblendet (da in diesen Höhen die Datenverfügbarkeit sehr gering war). In Kapitel 5 wird auf die Datenverfügbarkeit eingegangen. In dieser Arbeit werden im gesamten Zeitraum alle Messwerte bis in eine Höhe von 500 m betrachtet.

Beim METEK SODAR PCS.2000 dient eine physikalische Schallantenne zum Senden wie auch zum Empfangen der Schallsignale. Diese Schallantenne ist durch absorbierende Materialien an allen Antennenwänden gut gegen störenden Umweltlärm abgeschirmt. Das SODAR verwendet ein Phasenarray aus 64 Hochleistungslautsprechern, die sowohl zum Senden und Empfangen dienen (monostatisches System). Durch Ansteuerung der einzelnen Lautsprecher mit 4 verschiedenen Phasen (0°, 90°, 180° und 270°) werden 5 logische Antennen gebildet, von denen eine Antenne senkrecht nach oben blickt (METEK Meteorologische Messtechnik GmbH, 2001).

4.2.4. Messprinzip RASS

Das RASS nutzt die Reflexion von elektromagnetischen Wellen an Brechungsindexschwankungen, um Temperaturprofile in einem zum SODAR vergleichbaren Höhenbereich von bis zu einigen hundert Metern zu gewinnen. Die erforderlichen Brechungsindexschwankungen, die in der natürlichen Atmosphäre mit den turbulenten Inhomogenitäten in sehr unterschiedlicher Intensität vorhanden sind, werden beim RASS-Verfahren durch eine Schallquelle (in diesem Fall durch die vertikal ausgerichtete Schallantenne) künstlich erzeugt, d.h. ihre Intensität und ihre typische Wellenzahl werden durch die Schallquelle bestimmt. Damit sich die an den Schallwellen reflektierten RADAR-Wellen konstruktiv überlagern, müssen Frequenz der elektromagnetischen Wellen und Schallfrequenz eine feste Beziehung, die sog. Bragg-Bedingung¹, erfüllen. Das bedeutet, dass

¹ Bragg-Bedingung: $\lambda_a = \frac{1}{2} * \frac{1}{\cos \alpha} * \lambda_e$ mit λ_a akustische Wellenlänge, α Streuwinkel, λ_e elektromagnetische Wellenlänge

die Länge der akustischen Wellen halb so lang sein muss wie die elektro-magnetische Wellenlänge (METEK Meteorologische Messtechnik GmbH, 2008).

Da sich die Schallfrequenz zeitlich und mit der Höhe stark ändern kann, wird nicht eine einzelne Schallfrequenz verwendet, sondern ein Signal mit einer definierten Bandbreite, dessen Mittenfrequenz entsprechend der Lufttemperatur automatisch angepasst wird. Für eine elektromagnetische Frequenz von 1290 MHz ($\lambda_e = 0,23$ m) ergibt sich eine akustische Wellenlänge von $\lambda_a = 0,115$ m. Daraus resultiert eine typische Mittenfrequenz (temperaturabhängig) von 2900 Hz (METEK Meteorologische Messtechnik GmbH, 2008).

Ähnlich wie beim SODAR-Verfahren weisen die reflektierten RADAR-Wellen gegenüber dem ausgesendeten Signal eine Frequenzverschiebung auf, die ein Maß für die Schallgeschwindigkeit ist. Aus dieser kann unter Berücksichtigung des mit dem SODAR gemessenen mittleren Vertikalwindes und der Laufzeit der RADAR-Wellen die Lufttemperatur in den verschiedenen Höhen abgeleitet werden. Die Analyse des reflektierten RADAR-Wellen erfolgt analog zur Analyse des SODAR-Rückstreusignals (METEK Meteorologische Messtechnik GmbH, 2008).

4.2.5. Bestimmung der Temperatur

Der Anteil des empfangenen Signals, welcher aus der Streuung an den Schallwellen stammt, ist frequenzverschoben:

$$\delta f = 2 * \frac{c}{\lambda_e} \quad (4.8.)$$

mit δf ... Frequenzverschiebung
 c ... Schallgeschwindigkeit
 λ_e ... Wellenlänge der elektromagnetischen Welle

Mittels der obenstehenden Gleichung kann man die Schallgeschwindigkeit aus der bekannten elektromagnetischen Wellenlänge und der gemessenen Frequenzverschiebung bestimmen (METEK Meteorologische Messtechnik GmbH, 2008).

Der Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und Temperatur wird durch die Formel von Laplace für ideale Gase beschrieben (Verein Deutscher Ingenieure, 2009):

$$c = \sqrt{\gamma_a R T} = \sqrt{\gamma_a \frac{R_a}{M_a} T_S} \quad (4.9.)$$

mit γ_a ... Verhältnis der spezifischen Wärmekapazitäten für feuchte Luft
 R ... universelle Gaskonstante
 T ... Temperatur
 R_a ... spezifische Gaskonstante feuchter Luft
 M_a ... molare Masse feuchter Luft
 T_S ... virtuelle akustische Temperatur

Daraus ergibt sich:

$$T_S = \frac{c^2 M_a}{\gamma_a R_a} \quad (4.10.)$$

In der realen Atmosphäre sind die Größen γ_a und vor allem M_a von der Luftfeuchte abhängig. Da man beim RASS die Luftfeuchte nicht messen kann, kann die molare Masse M_a nicht bestimmt werden. Deswegen wird in der Praxis nicht die tatsächliche Temperatur aus den Messungen berechnet sondern die virtuelle akustische Temperatur T_S . Für die Berechnung werden statt den spezifischen Größen für feuchte Luft jene für trockene Luft verwendet (Verein Deutscher Ingenieure, 2009).

$$T_S = \frac{c^2 M_d}{\gamma_d R_d} \approx \frac{c^2}{401,94} \quad (4.11.)$$

mit γ_d ... Verhältnis der spezifischen Wärmen trockener Luft

R_d ... Gaskonstante trockener Luft $287 \frac{J}{kgK}$

M_d ... molare Masse trockener Luft $28,97 \frac{g}{mol}$

Da bei der Bestimmung der Temperatur T_S davon ausgegangen wird, dass sich die Luft wie ein ideales Gas verhält und dass die Größen γ_d , R_d und M_d konstant sind, kommt es mit dieser Näherung zu Fehlern (Abbildung 4-8).

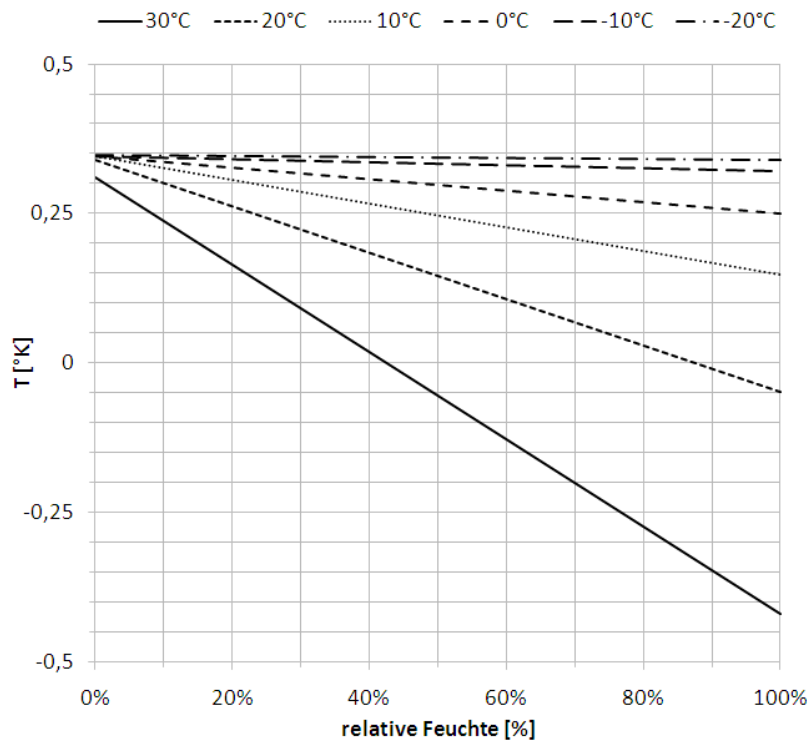


Abbildung 4-8 Fehler von T_S infolge nicht „exakter“ Konstanten in Gleichung 4.9 für ausgewählte Temperaturen als Funktion von der Luftfeuchtigkeit (Verein Deutscher Ingenieure, 2009)

Die virtuelle Temperatur ist jene Temperatur, die trockene Luft unter gleichem Druck annehmen müsste, um die gleiche Dichte zu haben wie feuchte Luft.

$$T_v = T * (1 + 0,64 * q) \quad (4.12.)$$

mit T_v ... virtuelle Temperatur

T ... gemessene Temperatur

q ... spezifische Feuchte

Die virtuelle akustische Temperatur und die virtuelle Temperatur unterscheiden sich nur geringfügig und stehen in folgendem Zusammenhang:

$$T_S = T_v - 0,02e \quad (4.13.)$$

mit T_S ... virtuelle akustische Temperatur

T_v ... virtuelle Temperatur

e ... Wasserdampfdruck

4.2.6. Messhöhe RASS

Da das elektromagnetische Signal kontinuierlich und nicht moduliert ausgesendet wird, kann man die Messhöhe damit nicht bestimmen. Die Schallwellen des SODARs werden in Impulsen ausgesandt. Das empfangene, gestreute Signal wird als Funktion der Schallimpulsausbreitungszeit t aufgezeichnet (METEK Meteorologische Messtechnik GmbH, 2008).

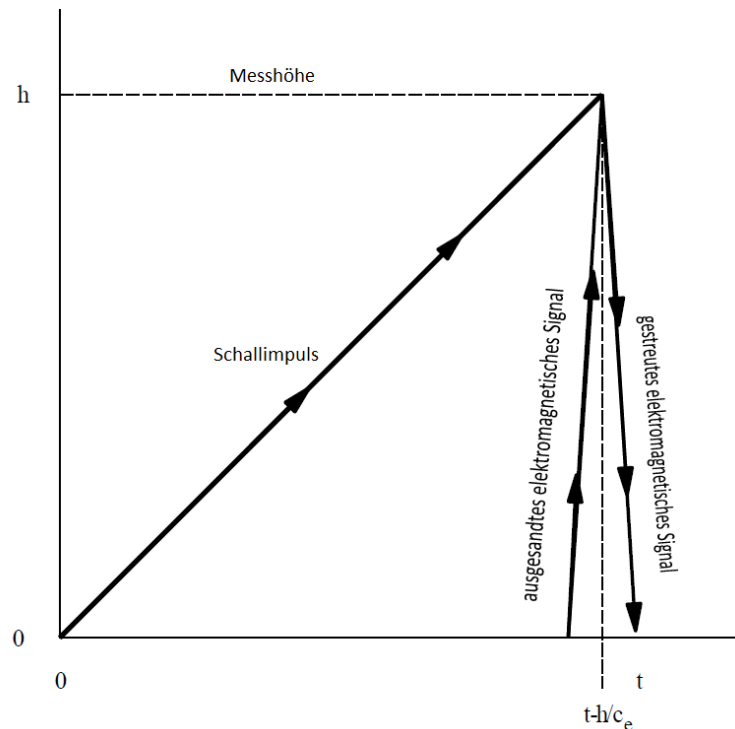


Abbildung 4-9 Bestimmung der Messhöhe der elektromagnetischen Wellen

Die Beziehung zwischen t und der Höhe z ist (METEK Meteorologische Messtechnik GmbH, 2008):

$$h = \int_0^{t-h/c_e} c_a(t') dt' \quad (4.14.)$$

mit t ... Laufzeit des akustischen Signals

h ... Messhöhe

c_a ... Schallgeschwindigkeit

c_e ... gemessene Schallgeschwindigkeit

Statt dem Integranden kann man die mittlere Schallgeschwindigkeit über die Höhe 0 bis $t-h/c$ verwenden (METEK Meteorologische Messtechnik GmbH, 2008):

$$h = \bar{c}_a \left(t - \frac{h}{c_e} \right) = \bar{c}_a t - h \frac{\bar{c}_a}{c_e} \quad (4.15.)$$

$$\rightarrow h = \bar{c}_a t * \frac{1}{1 + \bar{c}_a/c_e} \quad (4.16.)$$

Da das Verhältnis $\bar{c}_a/c_e$ in der Größenordnung 10^{-6} ist, wird näherungsweise folgende Beziehung benutzt (METEK Meteorologische Messtechnik GmbH, 2008).

$$h = \bar{c}_a t \quad (4.17.)$$

Die mittlere Schallgeschwindigkeit kann aus der gemessenen Schallgeschwindigkeit durch Integration der Gleichung 4.14. berechnet werden. Die mittlere Schallgeschwindigkeit wird in der on-line Signalverarbeitung durch die Schallgeschwindigkeit, welche durch in-situ Temperaturmessungen am Boden gewonnen wird, ersetzt (METEK Meteorologische Messtechnik GmbH, 2008).

Die maximale Reichweite des RASS ist abhängig von den meteorologischen Begebenheiten in der Atmosphäre. Die besten Bedingungen sind auftriebsgesteuerte Turbulenz und geringe Windgeschwindigkeiten. Die schlechtesten Bedingungen wären wenig Turbulenz und hohe Windgeschwindigkeit. Üblicherweise wird die maximale Höhe von der Abdrift der akustischen Wellen durch den horizontalen Wind begrenzt (Abbildung 4-10). Die Schallwellen wirken als sphärische Spiegel. Wenn sich diese „Spiegel“ verlagern, trifft der Mittelpunkt des zurück gestreuten Signals nicht direkt auf die Empfangsantenne des RASS. In diesem Fall nimmt die Empfangsstärke des Signals rapide ab (METEK Meteorologische Messtechnik GmbH, 2008).

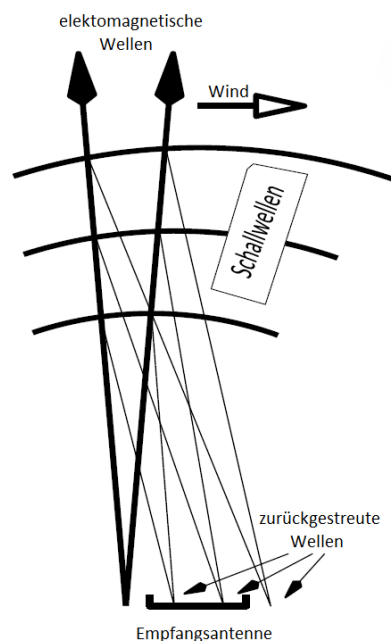


Abbildung 4-10 Begrenzung der maximalen Messhöhe durch die Drift der Schallwellen(METEK Meteorologische Messtechnik GmbH, 2008)

4.2.7. Technische Details

Die nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht der Spezifikationen des in dieser Arbeit verwendeten SODARs mit RASS-Erweiterung. Es werden der Messbereich, die Messgenauigkeit, die Messhöhen und die Sendefrequenz beschrieben.

4. Messgeräte

Tabelle 4-1 Spezifikationen SODAR mit RASS-Erweiterung: Messbereich, Messgenauigkeit, Messhöhen, Sendefrequenz (METEK Meteorologische Messtechnik GmbH, 2001)

Messbereich

Windgeschwindigkeit	0 m/s bis 35 m/s
Windrichtung	0° bis 360°
Standardabweichung der Radialkomponenten	0 m/s bis 3 m/s

Messgenauigkeit

Windgeschwindigkeit (0 m/s bis 5 m/s)	± 0,5 m/s
Windgeschwindigkeit (5 m/s bis 35 m/s)	± 10 %
Windrichtung (0,8 m/s bis 35 m/s)	± 5°
Radialkomponenten	± 0,1 m/s
Standardabweichung der Radialkomponenten	± 0,15 m/s

Messhöhen

unterste Messhöhe (einstellbar, abhängig von der Höhenauflösung)	10 m
Höhenauflösung (einstellbar)	5 m bis 50 m
Verfügbarkeit (abhängig von Umgebungsbedingungen)	80 % bis 200 m

Sendefrequenz

Akustisch: einstellbar	1500 Hz bis 3000 Hz
Elektromagnetisch (RASS)	1290 MHz

Die Einstellungen des SODARs mit RASS-Erweiterung (kurz: RASS) am Flughafen Wien-Schwechat sind in Tabelle 4-2 aufgelistet.

Tabelle 4-2 Einstellungen RASS, Flughafen Wien-Schwechat

Parameter	Einstellung
Frequenz	20. Oktober 2009 bis 2. Februar 2010 mit 2000 Hz, ab 2. Februar 2010 Multifrequenzmodus (1386 Hz, 1612 Hz, 1862 Hz, 2087 Hz)
Integration Time	600 s (10-Minuten-Mittel)
unterste Messhöhe	50 m
Höhenauflösung	25 m

4.3. Radiosonde

Eine Radiosonde ist ein in-situ Messsystem, das von einem Ballon in die Atmosphäre hoch getragen wird und dabei die aufgenommenen Messwerte zu einer Bodenstation funkt. Radiosonden bestehen aus drei Einheiten:

- Messfühler für Luftdruck, Lufttemperatur und relative Feuchte
- Messwertwandler (um die gemessenen Daten in funkübertragbare Form umzuwandeln)
- Kurzwellensender um die Funksignale zu übertragen

Alle drei Teile sind zusammen in einem kleinen Styroporkästchen untergebracht. Die Radiosonde wird mittels eines mit Wasserstoff oder Helium gefüllten Gummiballons

(durchschnittliche Steiggeschwindigkeit von etwa 5m/s) in die mittlere Stratosphäre getragen. Dabei dehnt sich der Ballon aufgrund des geringeren Luftdrucks in diesen Höhen aus, bis er platzt. Es hängt von den Wetterbedingungen ab, wann dies geschieht. Normalerweise werden Höhen von etwa 30km erreicht. Nachdem der Ballon geplatzt ist, schwebt die Radiosonde an einem Fallschirm wieder langsam zu Boden (Häckel, 2005).

Die Radiosonde wird an der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (Seehöhe 198 m) täglich um 23:30 UTC und 11:30 UTC gestartet. Um 0 UTC bzw. 12 UTC hat die Radiosonde dann das Tropopausenniveau erreicht. Es handelt sich um die Sonde RS92 der Firma Vaisala. Die Sonde liefert alle 2-Sekunden Messwerte von Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Temperatur, Feuchtigkeit und Druck. Das dazugehörige Softwareprogramm gibt dann die Messwerte an den Hauptdruckflächen und bei plötzlicher Änderung der Messwerte (Inversionen, Winddrehung usw.) aus. Die Windinformationen werden über das GPS System der Radiosonde gewonnen.

Ebenso wird täglich um 05:30 UTC und 17:30 UTC an der ZAMG eine Pilotierung durchgeführt (Windmessung). Es wird mit einem Reflektorschirm am Ballon, welcher vom Radar an der ZAMG verfolgt wird, gearbeitet. Bei interessanten meteorologischen Situationen oder wenn der das RADAR defekt ist, wird auch zu diesen Nebenterminen die Radiosonde RS92 verwendet, dann sind auch die anderen Parameter verfügbar.

4.3.1. Technische Details

In der nachfolgenden Tabelle werden der Messbereich der einzelnen Sensoren der Radiosonde, sowie die Messgenauigkeit beschrieben.

Tabelle 4-3 Spezifikationen der meteorologischen Sensoren und des GPS Sensors der Radiosonde (Vaisala, 2012)

Temperatursensor

Messbereich	+ 60°C bis -90°C
Auflösung	0,1 °C
Genauigkeit	
gesamte Messungenauigkeit *	± 0,5 °C
Wiederholpräzision bei Kalibrierungen*	± 0,15 °C
Reproduzierbarkeit der Sondierungen***	
1080 – 100 hPa	± 0,2 °C
100 – 20 hPa	± 0,3 °C
20 – 3 hPa	± 0,5 °C

Feuchtigkeitssensor

Messbereich	0 % bis 100 %
Auflösung	1 %
Genauigkeit	
gesamte Messungenauigkeit*	± 5 %
Wiederholpräzision bei Kalibrierungen**	± 2 %
Reproduzierbarkeit der Sondierungen***	± 2 %

Drucksensor

Messbereich	1080 hPa bis 3 hPa
Auflösung	0,1 hPa
Genauigkeit	
gesamte Messungenauigkeit*	
1080 – 100 hPa	± 1,0 hPa
100 - 3 hPa	± 0,6 hPa
Wiederholpräzision bei Kalibrierungen**	
1080 – 100 hPa	± 0,4 hPa
100 - 3 hPa	± 0,3 hPa
Reproduzierbarkeit der Sondierungen***	
1080 – 100 hPa	± 0,5 hPa
100 – 3 hPa	± 0,3 hPa

GPS Sensor

Positionierung horizontal	± 10 m
Positionierung vertikal	± 20 m
Geschwindigkeitsmessung ***	± 0,15 m/s
Richtungsabhängige Messungen ****	± 2 °

* Kumulierte Ungenauigkeit beinhaltet: Wiederholpräzision, langfristige Messbeständigkeit, durch Messbedingungen bedingte Effekte, dynamische Effekte, durch Messelektronik bedingte Effekte.

Für Feuchtesensor: T > -60 °C, für Drucksensor: T < 35 °C.

** Standardabweichung der Differenzen zwischen zwei hintereinander wiederholten Kalibrierungen

*** Standardabweichung der Differenzen zwischen zwei doppelten Sondierungen

**** Standardabweichung der Differenzen zwischen zwei doppelten Sondierungen, Windgeschwindigkeit über 3 m/s

4.4. Messstationen in Wien und Umgebung

In Wien und Umgebung gibt es viele meteorologische Messstationen. Die einzelnen Stationen werden entweder von der ZAMG, der ACG, der Stadt Wien oder dem Land Niederösterreich betreut.

Die nachstehende Tabelle gibt eine Übersicht über alle betrachteten meteorologischen Messstationen in Wien und Niederösterreich. Die Aufstellung gibt für jede Station die geographische Länge, geographische Breite, die Seehöhe und die gemessenen Parameter an. An manchen Stationen werden auch noch andere Parameter gemessen, jedoch werden sie in dieser Arbeit nicht betrachtet.

Tabelle 4-4 meteorologische Messstationen im Raum Wien und Umgebung (gg.L.: geographische Länge [°], gg.B.: geographische Breite [°], Höhe: Seehöhe [m], FF: Windgeschwindigkeit, DD: Windrichtung, T: Temperatur, WMA: Windmessenanlage, FMA: Fernmessenanlage)

ZAMG	gg.L.	gg.B.	Höhe	FF	DD	T
Wien/Innere Stadt	16,367	48,199	171	ja	ja	ja
Wien/Hohe Warte	16,356	48,249	198	ja	ja	ja
Wien/Grossenzersdorf	16,562	48,199	157	ja	ja	ja
Wien/Unterlaa	16,419	48,125	201	ja	ja	ja
Wien/Stammersdorf	16,408	48,305	172	ja	ja	ja
Wien/Jubiläumswarte	16,266	48,221	449	ja	ja	ja
Wien/Mariabrunn	16,231	48,208	227	ja	ja	ja
Wien/Donaufeld	16,433	48,257	161	ja	ja	ja
NÖ/Brunn am Gebirge	16,270	48,107	300	ja	ja	ja

Stadt Wien MA 22	gg.L.	gg.B.	Höhe	FF	DD	T
Wien/AKH-Dach	16,348	48,221	270	ja	ja	ja
Wien/Kaiserebersdorf	16,476	48,157	155	ja	ja	ja
Wien/Lobau-Grundwasserwerk	16,527	48,162	150	ja	ja	ja
Wien/Hermannskogel	16,298	48,271	520	nein	nein	ja
Wien/Laaer Berg	16,393	48,161	250	ja	ja	nein
Wien/Gaudenzdorf	16,341	48,188	175	nein	nein	ja

Land Niederösterreich	gg.L.	gg.B.	Höhe	FF	DD	T
NÖ/Eichkogel	16,291	48,065	367	nein	nein	ja
NÖ/Biedermannsdorf-Mühlgasse	16,337	48,084	188	ja	ja	ja
NÖ/Himberg	16,433	48,086	172	ja	ja	ja
NÖ/Klosterneuburg-B14	16,326	48,307	192	ja	ja	ja
NÖ/Klosterneuburg-Wisentgasse	16,321	48,301	212	ja	ja	ja
NÖ/Mannswörth	16,512	48,151	159	ja	ja	ja
NÖ/Mödling	16,302	48,086	215	ja	ja	ja
NÖ/Purkersdorf-Bauhof	16,176	48,207	248	ja	ja	ja
NÖ/Schwechat-Sportplatz	16,477	48,146	155	ja	ja	ja
NÖ/Vösendorf	16,333	48,126	194	ja	ja	ja
NÖ/Wiener Neudorf	16,331	48,085	210	ja	ja	nein

4. Messgeräte

ACG	gg.L.	gg.B.	Höhe	FF	DD	T
WMA11	16,536	48,120	175	ja	ja	ja*
WMA29	16,572	48,109	183	ja	ja	ja*
WMA16	16,581	48,117	178	ja	ja	ja*
WMA34	16,592	48,091	174	ja	ja	ja*
Arsenal	16,391	48,182	360	ja	ja	ja
Tower	16,562	48,123	283	ja	ja	ja
FMA Main	16,590	48,104	181	nein	nein	ja
Exelberg	16,244	48,249	592	ja	ja	Ja
Wien/Schwechat Flughafen	16,571	48,111	175	ja	ja	ja

* nur virtuelle Temperatur verfügbar

5. Datenanalyse

5.1. SODAR mit RASS-Erweiterung

5.1.1. Datenkorrektur

Windrichtung und Windgeschwindigkeit werden von einem internen Prüfprogramm auf Plausibilität geprüft und dann als 10-Minuten Mittelwerte ausgegeben. An der ZAMG werden diese Mittelwerte in Halbstundenmittelwerte umgerechnet.

Bei den Temperaturmessungen wird normalerweise auch ein internes Programm zur Datenkontrolle benutzt. Da trotz der Filterung der Daten einige unplausible Werte aufgetreten sind, wurde an der ZAMG ein eigenes Kontrollprogramm für die RASS-Messungen entwickelt. Die Rohdaten werden auf vertikale und zeitliche Gradienten geprüft. Das unterste Level (50m) wird als gegeben angesehen. Treten zwischen dem 75m Schichtmittel und dem 50m Schichtmittel zu hohe vertikale Gradienten auf, werden diese Werte auf Ausfall gesetzt. Ebenso wird der zeitliche Gradient betrachtet, hierzu wird der betrachtete Wert mit dem vorherigen verglichen. Liegen die beiden Werte mehr als 5°C auseinander, wird der betrachtete Wert auf Ausfall gesetzt. Die korrigierten Daten wurden anschließend in Halbstundenmittelwerte umgerechnet.

Um die Halbstundenmittelwerte der Temperatur zu kontrollieren wurden die Werte mittels des Programms IVACS (grafisches Korrekturprogramm, ZAMG) nochmals überprüft. IVACS kann einzelne Zeitreihen aber auch mehrere Zeitreihen der Messdaten gleichzeitig darstellen. Das Programm ermöglicht es eventuelle Ausreißer oder nicht plausible Werte zu finden und auf Ausfall zu setzen. In den untersten Levels (50m bis 300m) wurden etwa 4 Ausreißer im gesamten Zeitraum pro Level korrigiert (etwa 0,1% aller Messwerte). Mit etwa 7 Ausreißern gab es in den höheren Levels (ab 300m) geringfügig mehr (0,2% der Messwerte). In den Zeiträumen mit Messausfällen kam es teilweise zu einzelnen Messungen, diese wurden bei der Korrektur ebenfalls auf Ausfall gesetzt. In allen Höhen gab es dabei etwa 3 bis 4 Fälle (0,1 % aller Messwerte)

5.1.2. Datenverfügbarkeit

In Tabelle 5-1 sind die Ausfälle des RASS aufgelistet. Der Grund der meisten Ausfälle waren technische Probleme. Die niedrigen Temperaturen Mitte Dezember ließen die Heizung des PCs ausfallen, wodurch bis zum 4. Jänner 2010 keine Messdaten zur Verfügung stehen. Am 15. Jänner 2010 wurde der Frequenzmodus umgestellt, wobei es zeitweise zu Ausfällen gekommen ist. Nach der Umstellung gab es aufgrund von technischen Problemen (Heizung, PC-Absturz) noch kurze Ausfälle.

Tabelle 5-1 Messausfälle RASS

18.12.09 01:30 – 04.01.10 10:00
15.01.10 15:30 – 16.01.10 00:30
16.01.10 22:30 – 17.01.10 16:00
23.01.10 16:30 – 26.01.10 10:30
28.01.10 06:00 – 29.01.10 17:00
06.02.10 15:30 – 10.02.10 13:00
17.02.10 10:30

In den drei Wintermonaten von 1. Dezember 2009 bis 28. Februar 2010 wären 4320 Halbstundenmittelwerte möglich. Aufgrund der vorher beschriebenen Ausfälle und geringfügigen Datenkorrekturen sind weniger Werte verfügbar.

In Abbildung 5-1 ist die Verfügbarkeit der Windinformationen und der Temperatur dargestellt. In den untersten Levels ist die Verfügbarkeit der Windmessungen mit etwa 74 % (3192 Werte) so hoch wie die der Temperatur (3191 Werte). Mit zunehmender Höhe nimmt die Verfügbarkeit der Winddaten stärker ab als jene der Temperatur. Die höhere Verfügbarkeit der Temperatur-Messungen liegt daran, dass elektromagnetische Wellen im Gegensatz zu Schallwellen in größeren Höhen noch genügend Informationen liefern um aus dem zurückgesendeten Signal auf eine Temperatur zu schließen.

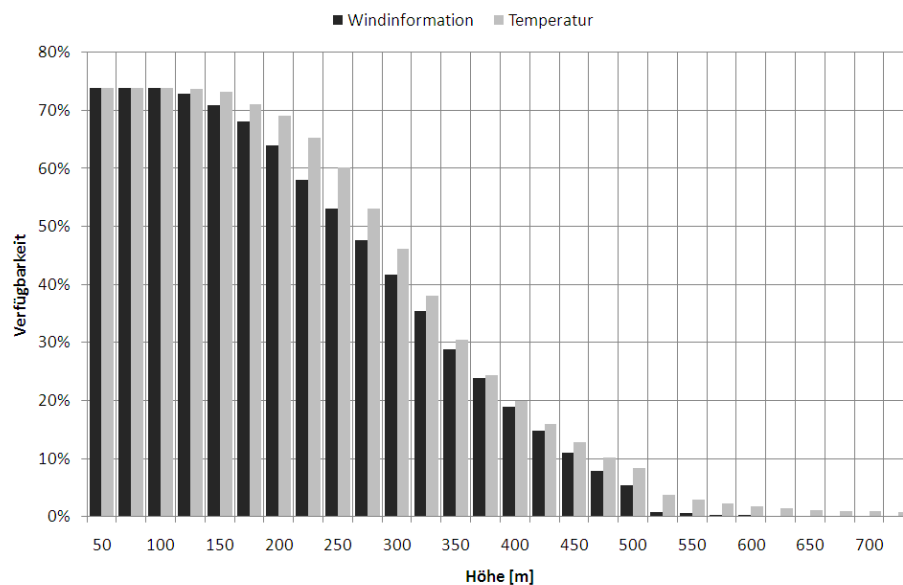


Abbildung 5-1 Datenverfügbarkeit der Messwerte vom RASS

Ab einer Höhe von 500m sind kaum noch Messdaten verfügbar. Durch eine Modifikation der RASS-Einstellungen wurden ab dem 3. Februar 2010 keine Messdaten über 500 m mehr aufgezeichnet, deswegen werden für diese Arbeit die vertikalen Profile nur bis in eine Höhe von 500m ausgewertet.

Der mittlere Tagesgang der Verfügbarkeit ist in Abbildung 5-2 für ausgewählte Levels dargestellt. In den untersten Levels ist die Verfügbarkeit der Windinformation und Temperatur annähernd gleich. Die Turbulenz tagsüber begünstigt die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen, wodurch es in den höheren Levels (ab 250m) zu einer Zunahme der Verfügbarkeit der Temperaturmessungen in den Vormittagsstunden kommt.

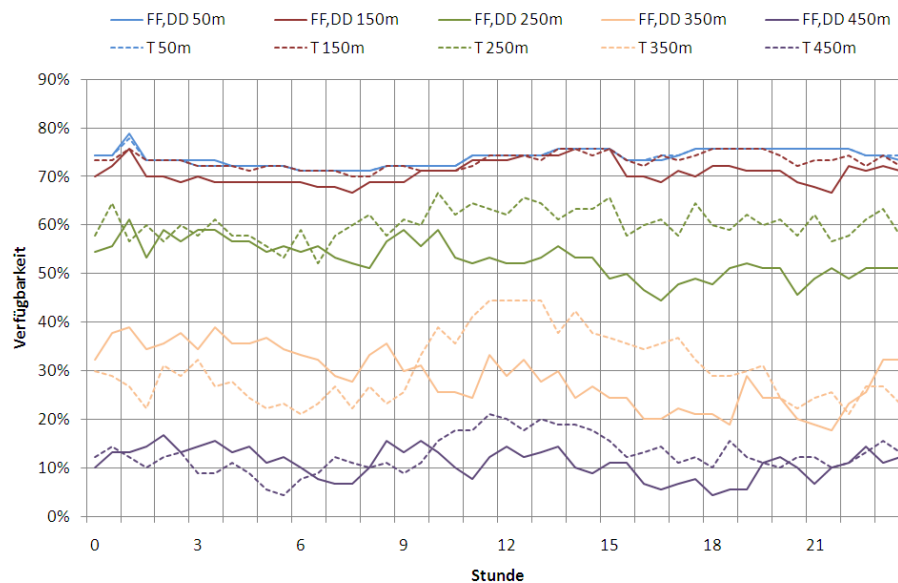


Abbildung 5-2 mittlerer Tagesgang der Verfügbarkeit der RASS Messungen

5.1.3. Fehlerhaftigkeit der Daten

Bei dem Vergleich der vertikalen Temperaturprofile vom RASS und der 2m-Temperatur Flughafen Wien-Schwechat wurde eine im Mittel auffällig starke Temperaturabnahme zwischen dem Bodenniveau und dem untersten RASS Niveau festgestellt. METEK hat zugesagt, die betreffenden RASS-Daten zu prüfen und mittels eines Re-Evaluierungsprogrammes zu korrigieren. Da die korrigierten Daten noch nicht eingetroffen sind, wurden in dieser Arbeit die nicht korrigierten Daten für die Auswertungen verwendet.

Unterschiede zwischen Stationsmessungen und den Ergebnissen des Fernerkundungssystems sind jedoch in gewissem Ausmaß grundsätzlich aufgrund des unterschiedlichen Messprinzips (insbesondere Messvolumens) zu erwarten.

Auf den betrachteten Temperaturunterschied wird in Kapitel 6.1.2 nochmals eingegangen.

5.2. Radiosonde

Die Radiosonde liefert Messwerte auf den Hauptdruckflächen und bei plötzlichen bzw. starken Änderungen der Messwerte. Um einen Vergleich zwischen den RASS Daten und den Radiosondenmessungen erstellen zu können, musste zuerst zwischen den Messwerten linear interpoliert werden. Im nächsten Schritt wurden von diesen interpolierten Daten die gewünschten Höhen extrahiert. Das RASS befindet sich auf einer Seehöhe von 175m, die Radiosonde wird in 198m gestartet. Das erste Niveau der RASS Messung befindet sich in 50m über Grund, d.h. 225m Seehöhe. Die Messhöhe 28m ü.G. (Radiosonde) entspricht also der Messhöhe 50m ü.G. (RASS). Es wurden alle Daten der Radiosonde zwischen 28m bis 478m ü.G. mit einer vertikalen Auflösung von 25m extrahiert.

Insgesamt gibt es in den beobachteten drei Wintermonaten 197 Radiosonden-Aufstiege. Dabei kommt in keiner Höhe einen Ausfall, d.h. die Datenverfügbarkeit liegt in allen Niveaus bei 100 %.

5.3. RASS und Radiosonde

In Abbildung 5-3 ist die Verfügbarkeit unter Berücksichtigung des gleichzeitigen Auftretens der RASS Messungen und der Radiosondenmessungen dargestellt. In den unteren Levels liegt die Verfügbarkeit bei Wind und Temperatur bei etwa 76% (150 Werte). Mit zunehmender Höhe nimmt auch die Verfügbarkeit der RASS Daten ab.

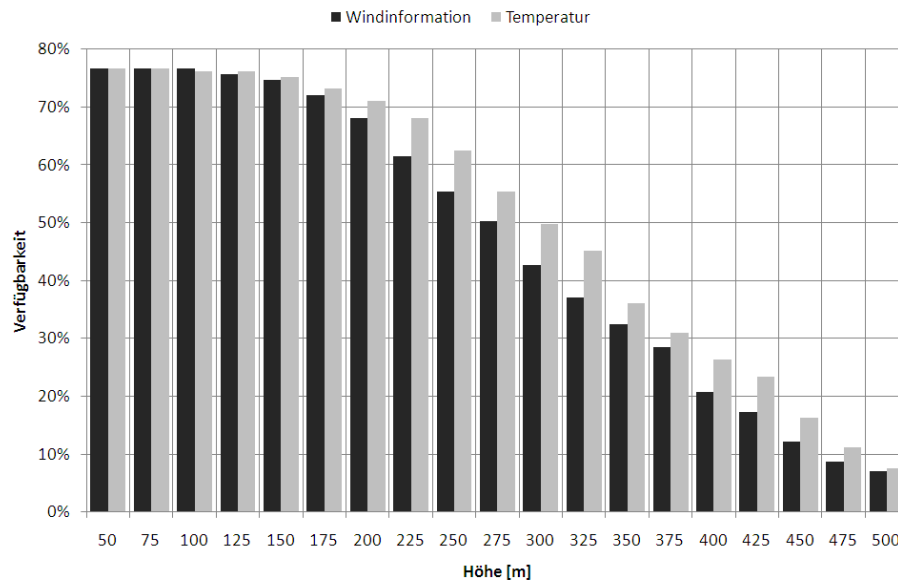


Abbildung 5-3 Verfügbarkeit der RASS Messungen zum Zeitpunkt der Radiosonden-Aufstiege

5.4. Messstationen

Die meteorologischen Messstationen weisen, wie Tabelle 5-2 zeigt, eine hohe Datenverfügbarkeit auf. Bis auf wenige Ausnahmen sind nahezu alle Datensätze komplett. Längere Messausfälle gab es bei der TAWES Station Wien Lobau-Grundwasserwerk (1.12.2009 bis 11.12.2009) bei allen 3 Parametern und bei der Station Vösendorf (kürzere Ausfälle über den gesamten Zeitraum verteilt) bei Windrichtung und Windgeschwindigkeit.

Die meteorologischen Messdaten der ACG mussten vor der Datenanalyse gefiltert werden, da die Stationen bei Windgeschwindigkeiten unter 1 kt (0,5 m/s) die Windrichtung nicht aufzeichnen. Die geringen Datenverluste der Windmessanlagen sind auf diese Datenfilterung zurückzuführen. Bei den Messstationen Arsenal und Exelberg kam es zusätzlich zu einigen Ausfällen der Messgeräte.

Tabelle 5-2 Verfügbarkeit der Windrichtungs-, Windgeschwindigkeits- und Temperaturmessungen der meteorologischen Messstationen

Station	Windrichtung	Windgeschwindigkeit	Temperatur
Wien/Innere Stadt	100%	100%	100%
Wien/Hohe Warte	100%	100%	100%
Wien/Grossenzersdorf	100%	100%	100%
Wien/Unterlaa	100%	100%	100%
Wien/Stammersdorf	100%	100%	100%
Wien/Jubiläumswarte	100%	100%	100%
Wien/Mariabrunn	100%	100%	100%
Wien/Donaufeld	100%	100%	100%
NÖ/Brunn am Gebirge	100%	100%	100%
Wien/AKH-Dach	100%	100%	100%
Wien/Kaiserebersdorf	100%	100%	100%
Wien/Lobau-Grundwasserwerk	88%	88%	88%
Wien/Hermannskogel	-	-	100%
Wien/Laaer Berg	100%	100%	-
Wien/Gaudenzdorf	-	-	100%
NÖ/Eichkogel	-	-	100%
NÖ/Biedermannsdorf-Mühlgasse	100%	100%	100%
NÖ/Himberg	100%	100%	100%
NÖ/Klosterneuburg-B14	100%	100%	100%
NÖ/Klosterneuburg-Wisentgasse	100%	100%	100%
NÖ/Mannswörth	100%	100%	100%
NÖ/Mödling	100%	100%	100%
NÖ/Purkersdorf-Bauhof	100%	100%	100%
NÖ/Schwechat-Sportplatz	100%	100%	100%
NÖ/Vösendorf	87%	87%	100%
NÖ/Wiener Neudorf	100%	100%	-
WMA11	98%	98%	100%
WMA29	99%	99%	100%
WMA16	99%	99%	100%
WMA34	99%	99%	100%
Arsenal	86%	86%	100%
Tower	99%	99%	100%
FMA Main	-	-	100%
Exelberg	74%	74%	100%
Wien/Schwechat Flughafen	99%	99%	100%

6. Ergebnisse

6.1. RASS – Flughafen Wien-Schwechat

6.1.1. Windrichtung und Windgeschwindigkeit

Am Flughafen Wien-Schwechat sind Winde aus Nordwest und Südost am häufigsten. In Abbildung 6-1 ist die Häufigkeit der Windrichtung, ebenso die Häufigkeit der in diesen Richtungen auftretenden Windgeschwindigkeiten, für TAWES Flughafen Wien-Schwechat und für unterschiedliche Höhen der RASS Messungen als Mittel über den gesamten Beobachtungszeitraum dargestellt. Wie auch beim 10m-Wind ist in einer Höhe von 50m die häufigste Windrichtung Südost (Häufigkeitsmaximum bei 130°). Ein sekundäres Maximum tritt bei nordwestlichen Winden auf. Die geringe Häufigkeit der Winde aus 310° wird auch von den Windrosen der Radiosonde (Kapitel 6.2) gezeigt und ist auf die Wetterlagen im Beobachtungszeitraum zurückzuführen. Die geringe Häufigkeit aus dieser Richtung ist vor allem im 50m Niveau erkennbar. Die höheren Levels zeigen ähnliche Windrosen, jedoch verlagern sich die Maxima der südöstlichen Richtungen mit steigender Höhe auf die südlichen Winde (Ekman-Spirale, siehe Kapitel 2.2.2). Der Einfluss des Donautals auf die Windrichtung wird mit zunehmender Höhe immer geringer, weshalb sich in den höheren betrachteten Niveaus die Windrichtungsverteilung der nordwestlichen Winde langsam an die Hauptwindrichtung West annähert.

Die höchsten Windgeschwindigkeiten treten in den Hauptwindrichtungen auf. Mit zunehmender Höhe nehmen auch die Windgeschwindigkeiten zu. Die Südost-Winde weisen, im Gegensatz zum langjährigen Mittel (siehe Kapitel 3.2), aber meist höhere Geschwindigkeiten auf, als die Nordwest-Winde. Auch mit zunehmender Höhe nehmen die Windgeschwindigkeiten der Nordwest-Winde weniger stark zu als die der südöstlichen Winde.

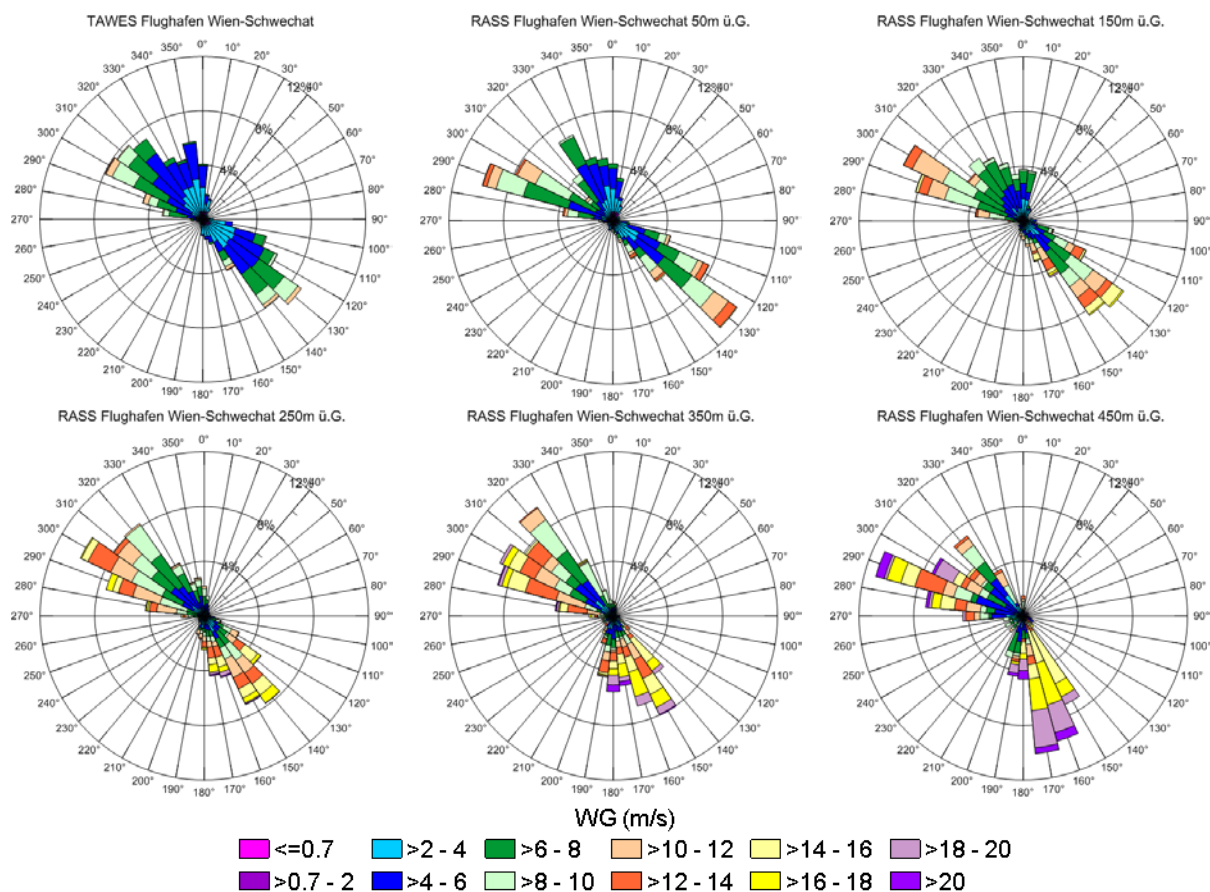


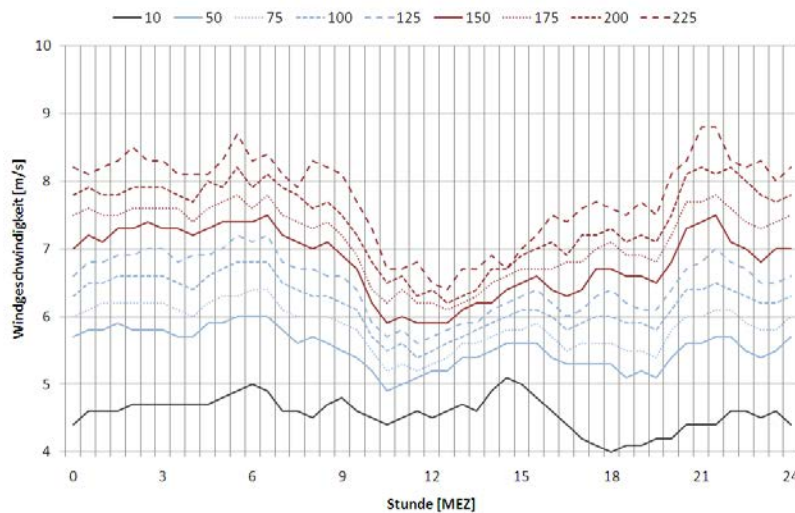
Abbildung 6-1 Windrose für ausgewählte Höhen des RASS am Flughafen Wien-Schwechat

In den folgenden Abbildungen wurde der Tagesgang bzw. der Monatsmittelwert der Windgeschwindigkeit bzw. der Temperatur von TAWES Flughafen Wien-Schwechat nur von den Messungen, die eine Gleichzeitigkeit mit dem 50m RASS Niveau aufweisen berechnet.

Der Tagesgang der Windgeschwindigkeit ist in Abbildung 6-2 a) für die untersten RASS Niveaus und für TAWES Flughafen Wien-Schwechat dargestellt. In Bodennähe sind die geringsten Windgeschwindigkeiten zu finden. Nachts und am Vormittag ist die Windgeschwindigkeit nahezu gleichbleibend. Kurz vor Sonnenaufgang kann man ein sekundäres Maximum erkennen. Am frühen Nachmittag nimmt die Windgeschwindigkeit zuerst etwas zu und sinkt mit Sonnenuntergang wieder (um etwa 1m/s) und pendelt sich danach wieder bei etwa 4,5m/s ein. In einer Höhe von 50m schwankt die Windgeschwindigkeit etwa zwischen 5m/s und 6m/s. Die Schwankungsbreite nimmt mit höherem Level zu und liegt in 225m bei etwa 2m/s. Alle Höhen zeigen den gleichen Tagesgang. Mit Sonnenaufgang setzt die Durchmischung der Grenzschicht ein (siehe Kapitel 2) wodurch der Wind etwas einschläft und beim Zeitpunkt mit maximaler Durchmischung ein Minimum erreicht. Erst mit dem Aufbau der stabilen Grenzschicht frischt der Wind wieder auf. In den untersten Niveaus ist das Maximum kurz vor Sonnenaufgang zu finden, in den höheren Niveaus (ab 175m) in der ersten Nachthälfte. Da die höheren RASS Niveaus eine geringe Datenverfügbarkeit aufweisen, welche sich auch im Tagesgang nicht mehr glätten lässt, wurden die oberen Niveaus in dieser Abbildung weggelassen.

In Abbildung 6-2 b) ist das vertikale Profil der Monatsmittelwerte der Windgeschwindigkeit dargestellt. Im Bodenniveau beträgt die mittlere Windgeschwindigkeit etwa 4,5m/s. Mit zunehmender Höhe nimmt auch die Windgeschwindigkeit stetig zu. Ab dem Level 375m wird die Windgeschwindigkeitsabnahme aufgrund der geringen Datenverfügbarkeit angezeigt.

a)



b)

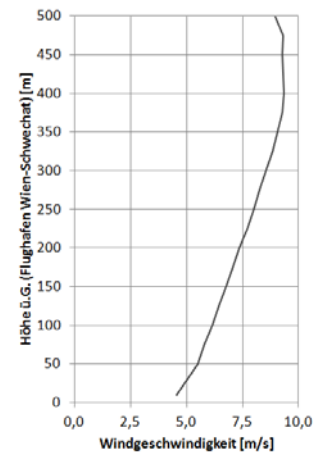


Abbildung 6-2 a) mittlerer Tagesgang der Windgeschwindigkeit in den untersten Niveaus des RASS, b) mittleres vertikales Profil der Windgeschwindigkeit

6.1.2. Temperatur

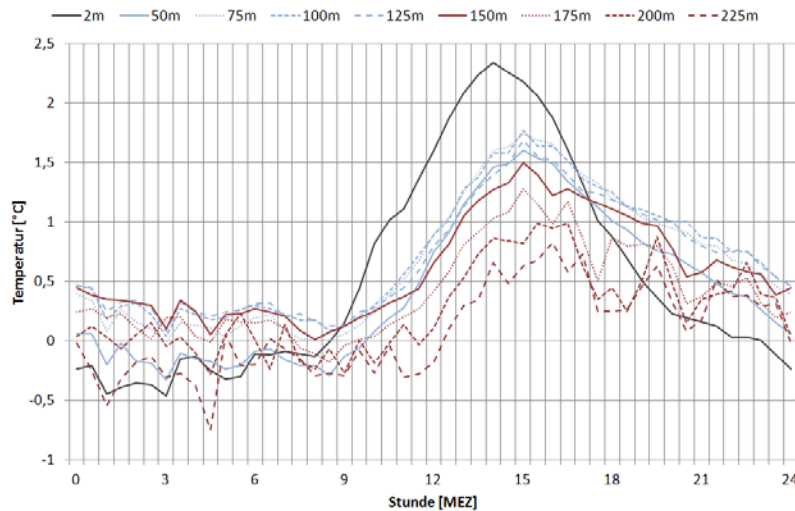
Der mittlere Tagesgang der Temperatur ist in Abbildung 6-3 a) dargestellt. Wie im Kapitel 5.1.3 beschrieben wurde ein Fehler in den Temperaturdaten der untersten Niveaus des RASS festgestellt. Im Tagesgang ist vor allem tagsüber eine große Temperaturdifferenz zwischen dem Bodenniveau und der 50m-Schichttemperatur zu erkennen. Die Differenzen zwischen den Messungen können durch verschiedene Dinge hervorgerufen werden. Die Temperaturen wurden durch 2 unterschiedliche Messmethoden erfasst. Bei der 2m-Temperatur handelt es sich um eine in-situ Messung, beim RASS hingegen um eine Fernerkundungsmessung. Beide Messmethoden sind mit Messunsicherheiten behaftet. Außerdem handelt es sich bei der 2m-Temperatur um eine Punktmessung, das RASS-Ergebnis entspricht der mittleren Temperatur innerhalb einer 25 m dicken Schicht. Ebenfalls ist zu berücksichtigen, dass es sich bei der RASS Temperatur um eine virtuelle akustische Temperatur handelt, welche einen Unterschied zur virtuellen Temperatur aufweist (siehe Kapitel 4.2.5). Da die größten Temperaturdifferenzen tagsüber auftreten, könnte zusätzlich ein Strahlungsfehler bei der TAWES vorliegen. Diese Unstimmigkeiten wurden zusätzlich durch einen Fehler in der Bestimmung der Temperatur aus dem elektromagnetischen Signal etwas erhöht. Um diesen Fehler auszubessern hat die Firma METEK ein Re-Evaluierungsprogramm entwickelt um die bestehenden Zeitreihen zu korrigieren. Da diese Korrekturen noch nicht verfügbar waren, wurden für die Diplomarbeit die unkorrigierten Temperaturdaten verwendet.

Tagsüber zeigen die Tagesgänge der untersten Niveaus eine abgehobene Inversion (Temperaturzunahme zwischen 50m und 75m). Darüber fällt die Temperatur tagsüber in den untersten Niveaus mit etwa $0,1^{\circ}\text{C}$ pro 25m, ab 150m dann mit etwa $0,2^{\circ}\text{C}$ bis $0,3^{\circ}\text{C}$ pro 25m. Nachts wird im Mittel eine Bodeninversion gezeigt. Die Differenz zwischen dem Bodenniveau und der 50m-Temperatur ist mit etwa $0,2^{\circ}\text{C}$ bis $0,3^{\circ}\text{C}$ geringer als tagsüber. Die nächtliche Inversion erreicht im Mittel eine Höhe von 100m bzw. 125m. Darüber sinkt die Temperatur mit der Höhe wieder.

Abbildung 6-3 zeigt das mittlere Temperaturprofil der RASS Messungen. Da wegen der vorher genannten Gründe die 2m-Temperatur nicht direkt mit der RASS Temperatur verglichen werden kann, wird sie in dem vertikalen Profil nur als Punkt dargestellt. Zwischen

der 2m-Temperatur und der 50m-Schichttemperatur würde eine Temperaturabnahme stattfinden. Die Schichten darüber zeigen jedoch eine Inversion bis in etwa 100m, woraus man schließen kann, dass im Mittel auch am Boden eine Inversion vorliegen sollte. Zwischen den Levels 100m und 300m nimmt die Temperatur ab. Die starke Temperaturzunahme ab 300m ist auf die geringe Datenverfügbarkeit zurückzuführen.

a)



b)

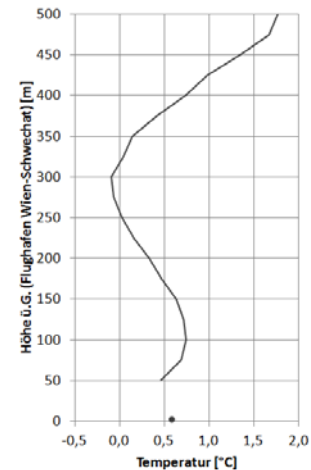


Abbildung 6-3 a) mittlerer Tagesgang der Temperatur in den untersten Niveaus des RASS, b) mittleres vertikales Profil der Temperatur

6.2. Radiosonde – Wien Hohe Warte

In Abbildung 6-4 sind die Windrosen der TAWES Wien Hohe Warte und der Radiosonde für ausgewählte Höhen dargestellt. Am Boden sind Winde aus westlichen Richtungen am häufigsten. Ein sekundäres Maximum ist bei den südöstlichen Winden zu finden. Mit der Höhe beginnt sich die Windrichtungsverteilung langsam zu drehen (Ekman-Spirale, siehe Kapitel 2.2.2). Die Häufigkeiten des 10m Windes sind aufgrund der Orographie auf kleine Sektoren begrenzt, in einer Höhe von 328m ü.G. bzw. 428m ü.G. ist der Einfluss der Umgebung nicht mehr so groß, wodurch die Windrichtungssektoren breiter werden. Treten z.B. in 10m Windrichtungen aus 270° bis 300° mit einer Häufigkeit von mehr als 4% auf, sind es in 428m Windrichtungen aus 270° bis 330°. Die Verbreiterung der Sektoren ist bei den westlichen Winden stärker ausgeprägt als bei den südöstlichen.

Die Windgeschwindigkeit ist in 10m ü.G. bei Winden aus den westlichen Richtungen am größten. Mit zunehmender Höhe steigt die Windgeschwindigkeit in diesen Richtungen am stärksten an. Ab 328m ü. G. treten bei den westlichen Winden auch Windgeschwindigkeiten über 18m/s auf. Die südöstlichen Winde weisen sowohl am Boden als auch in der Höhe geringere Windgeschwindigkeiten als die westlichen Winde auf.

6. Ergebnisse

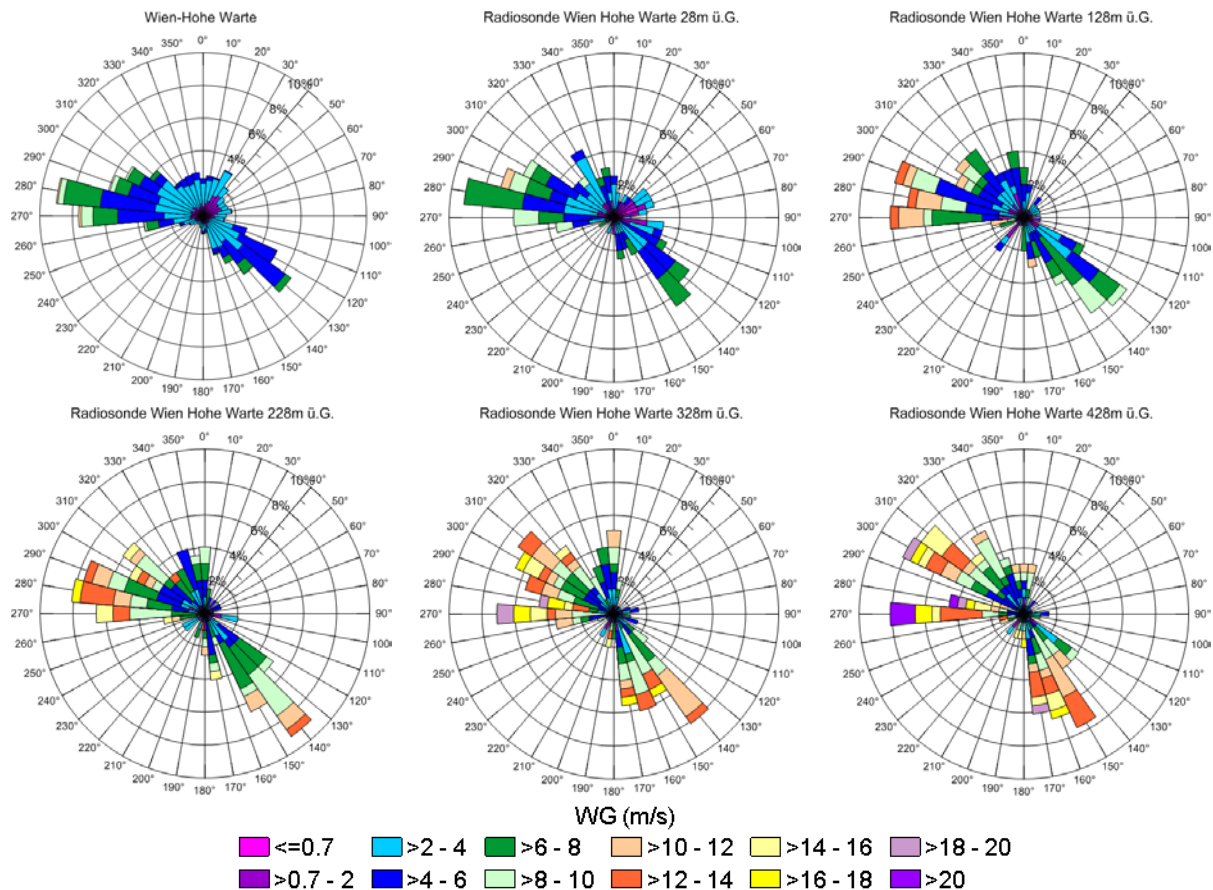


Abbildung 6-4 Windrose für ausgewählte Höhen der Radiosonde Wien Hohe Warte

Das mittlere vertikale Windgeschwindigkeitsprofil der Radiosonde Wien Hohe Warte ist in Abbildung 6-5 a) dargestellt und ist durch eine Windgeschwindigkeitszunahme charakterisiert. Bis in eine Höhe von etwa 300m steigt die Windgeschwindigkeit linear mit etwa 0,3m/s pro 25m an, danach wird der Anstieg mit etwa 0,2m/s pro 25m etwas geringer. Auch im vertikalen Temperaturprofil (Abbildung 6-5 b) sieht man einen Gradientenwechsel bei etwa 250m ü. G. Vom Boden nimmt die Temperatur zuerst im Mittel mit etwa 0,2°C pro 25m linear ab. Ab 250m sinkt die Temperatur dann nur mehr um etwa 0,1°C pro 25m.

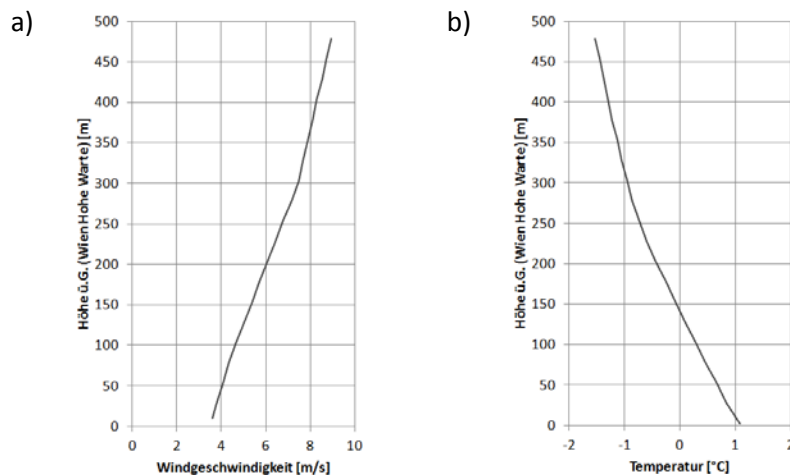


Abbildung 6-5 vertikales Profil der a) Windgeschwindigkeit und b) Temperatur der Radiosonde Wien Hohe Warte

6.3. Vergleich RASS und Radiosonde

Um die Messwerte von RASS und Radiosonde vergleichbar zu machen, mussten zuerst die Daten aufbereitet werden: Die Radiosonde wird zu den Hauptterminen um 12:30 MEZ (11:30 UTC) und 0:30 MEZ (23:30 UTC), teilweise auch bei den Nebenterminen 18:30 MEZ (17:30 UTC) und 6:30 MEZ (5:30 UTC) gestartet. Die RASS Daten sind in Halbstundenmittelwerten verfügbar. Der 13 MEZ Halbstundenmittelwert ist das Mittel über die Messungen der letzten halben Stunde, d.h. der 13 MEZ Wert ist der Mittelwert über die Messungen zwischen 12:30 MEZ und 13:00 MEZ. Da die Radiosonde die untersten atmosphärischen Schichten kurz nach dem Start misst, werden für den Vergleich die Mittelwerte um 1:00, 7:00, 13:00 und 19:00 MEZ verwendet. Neben dem gesamten Zeitraum (alle verfügbaren Termine) werden die 13 MEZ und 1 MEZ Termine auch extra betrachtet.

Im ersten Teil des Vergleichs werden Differenzplots für die Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Temperatur in ausgewählten Höhen betrachtet. Bei einem Differenzplot sind auf der Abszisse die Messungen von A und auf der Ordinate die Differenz zwischen den Messungen A und Messungen B aufgetragen. Liegen die Werte an der 0-Linie der Ordinate so sind die Daten perfekt korreliert. Streuen die Daten stark, dann ist keine oder nur eine geringe Korrelation zwischen den Daten gegeben. Ebenfalls werden die mittleren vertikalen Profile der Windgeschwindigkeit und der Temperatur betrachtet.

Im zweiten Teil werden statistische Maßzahlen berechnet.

In den nachfolgenden Abbildungen werden die gemessenen Profile vom RASS und der Radiosonde in der gleichen Seehöhe (siehe Kapitel 5.2) verglichen. Bei den Abbildungen der vertikalen Profile werden einheitlich auf der y-Achse die Höhen ü.G. am Flughafen Wien-Schwechat aufgetragen, d.h. in einer Höhe von z.B. 50m ist das 50m-Niveau vom RASS und das 28m-Niveau der Radiosonde dargestellt.

Da es sich bei den untersuchten Daten um eine kleine Stichprobe handelt, muss man bei der Interpretation der Ergebnisse, vor allem bei den berechneten statistischen Maßzahlen vorsichtig sein.

6.3.1. Windrichtung und Windgeschwindigkeit

In Abbildung 6-6 sind die Differenzplots für die Windrichtung für den gesamten Beobachtungszeitraum, 13 MEZ und 1 MEZ dargestellt. Im Differenzplot wurde die Drehung der Windrichtung über Nord berücksichtigt. Liegt ein Datenpunkt im positiven Ordinatenbereich (über der 0-Linie) so bedeutet das, dass die Windrichtung der Radiosonde im Uhrzeigersinn (nach rechts) von der Windrichtung des RASS gedreht ist. Liegt ein Datenpunkt im negativen Ordinatenbereich (unter der 0-Linie) so ist die Windrichtung der Radiosonde gegen den Uhrzeigersinn von der Windrichtung des RASS verschoben.

Da die Hauptwindrichtungen an beiden Standorten bei westlichen bzw. nordwestlichen und bei südöstlichen Windrichtungen liegen, sind die Punktwolken vor allem in diesen Richtungen zu finden. Treten am Flughafen Wien-Schwechat nordwestliche Winde auf, so zeigt der Standort Wien Hohe Warte die größten Abweichungen in den untersten Niveaus. Im 50m/28m Niveau werden aufgrund des Wienerwaldeinflusses eher westlichere Winde gemessen. Mit zunehmender Höhe werden die Unterschiede in den Windrichtungen geringer, die Punktwolke streut nur geringfügig. Die Abbildungen für 13 MEZ und 1 MEZ zeigen bei den nordwestlichen Winden kaum Unterschiede zum gesamten Beobachtungszeitraum. Bei den südöstlichen Windrichtungen ist die Streuung viel größer und es treten auch Unterschiede zwischen den Abbildungen für die betrachteten Zeiträume

auf. Wie in Piringer (1989) gezeigt, kann sich auf der Hohe Warte trotz der großräumigen Südostströmung aufgrund der nächtlichen Kaltluftabflüsse vom Wienerwald eine entgegengesetzte Bodenströmung ausbilden. Tagsüber kommt es ebenfalls zu einer Modifikation des Windfeldes aufgrund der orographischen Begebenheiten an der Hohen Warte.

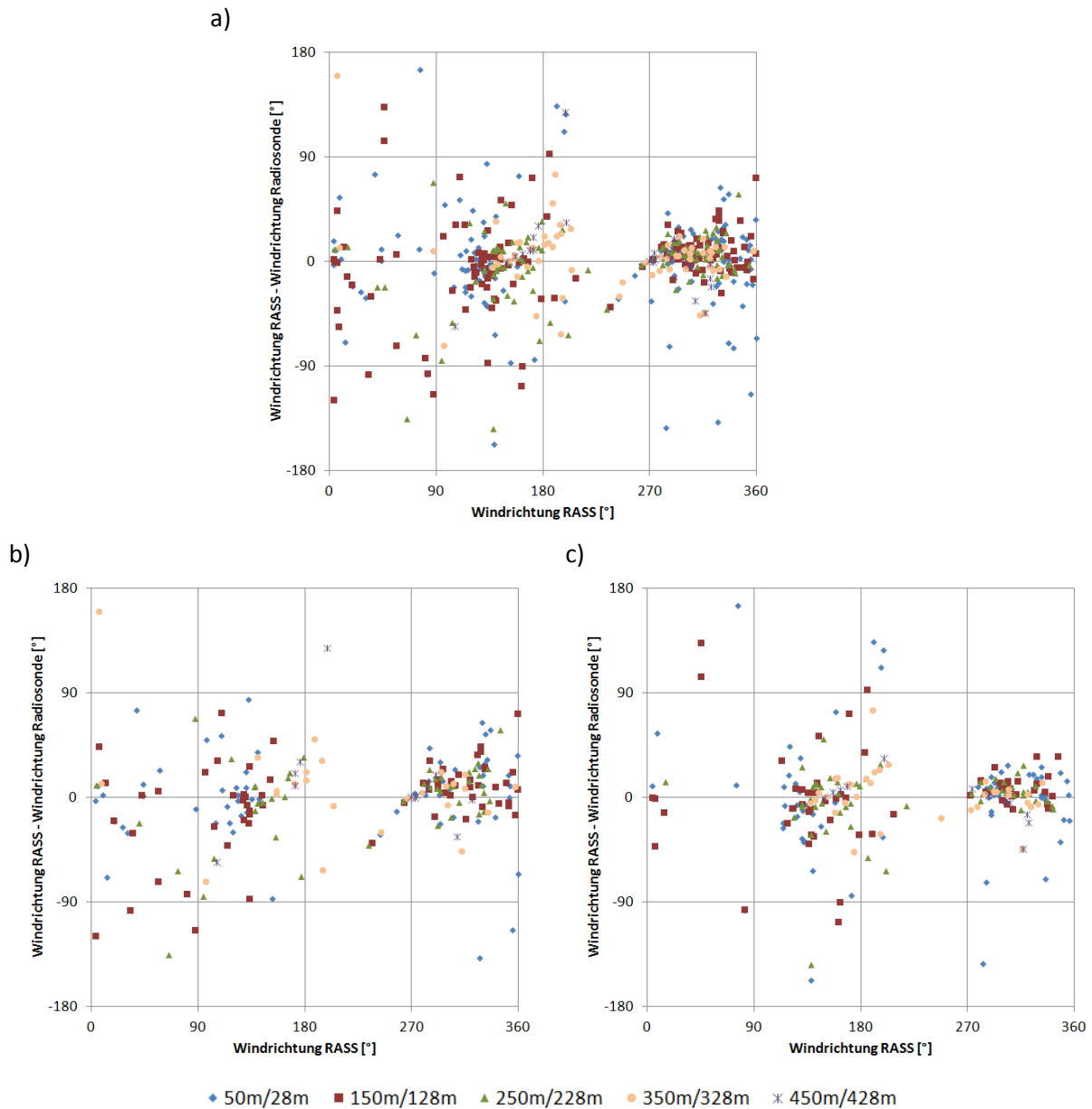
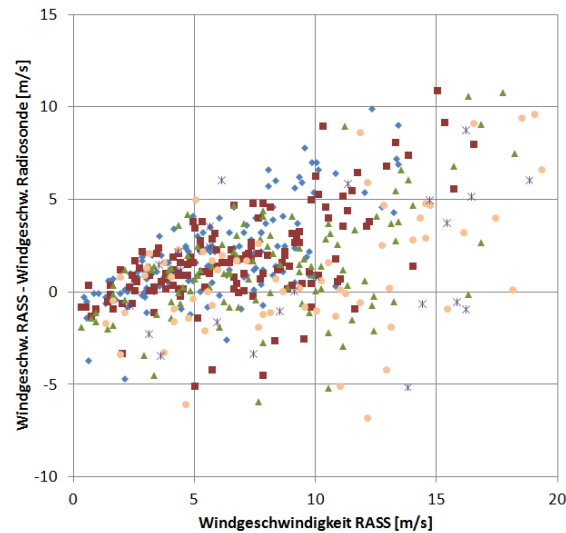


Abbildung 6-6 Differenzplot Windrichtung RASS gegen die Differenz Windrichtung RASS - Windrichtung Radiosonde a) gesamter Beobachtungszeitraum b) 13:00 MEZ und c) 1:00 MEZ

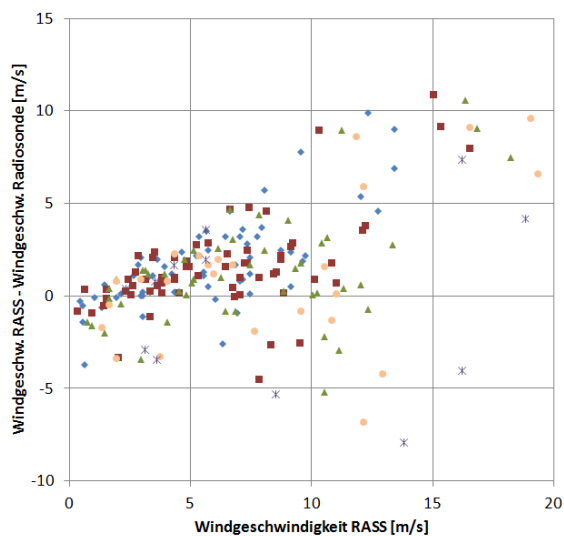
In Abbildung 6-7 ist der Differenzplot für die Windgeschwindigkeit über den gesamten Beobachtungszeitraum, für 13 MEZ und 1 MEZ dargestellt. Bei Schwachwindlagen ist am Standort Hohe Warte meist mit etwas höheren Windgeschwindigkeiten zu rechnen als am Flughafen Wien-Schwechat. Aufgrund der Nordwesthang-Lage der Station Wien Hohe Warte kommt es vor allem in den Vormittags- und Mittagsstunden zu einer stärkeren Erwärmung und somit zu höherer Turbulenz, wodurch auch höhere Windgeschwindigkeiten auftreten. Auch die höheren Schichten werden durch diese Turbulenz beeinflusst und können dadurch höhere Windgeschwindigkeiten aufweisen. Nachts kann es aufgrund des Abfließens der

Kaltluft ebenfalls zu höheren Windgeschwindigkeiten kommen als im Flachland. Bei höheren Windgeschwindigkeiten weist der Flughafen Wien Schwechat im Mittel in allen Niveaus höhere Werte auf. Jedoch gibt es auch einige Ausreißer, die zeigen dass teilweise auch die Windgeschwindigkeit an der Hohen Warte größer war. Meist ist es jedoch so, dass durch den geringen Einfluss der Orographie die Windgeschwindigkeit am RASS Standort höher ist, da die höheren Windgeschwindigkeiten an der Hohen Warte vor allem in den untersten Niveaus vom Wienerwald gebremst werden.

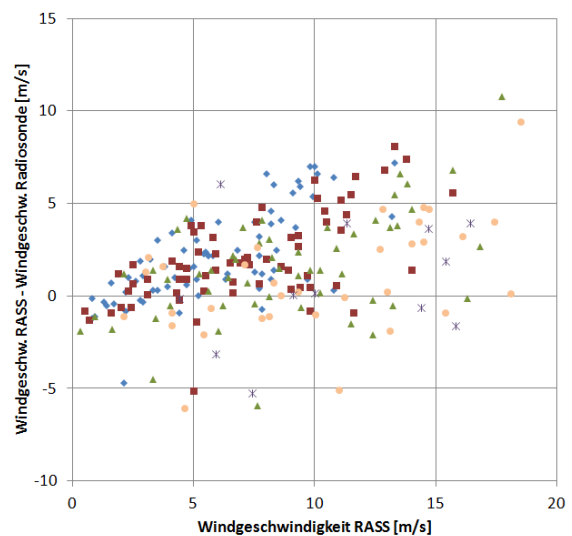
a)



b)



c)



◆ 50m/28m ■ 150m/128m ▲ 250m/228m ● 350m/328m ✕ 450m/428m

Abbildung 6-7 Differenzplot Windgeschwindigkeit RASS gegen die Differenz Windgeschwindigkeit RASS – Windgeschwindigkeit Radiosonde a) gesamter Beobachtungszeitraum b) 13:00 MEZ und c) 1:00 MEZ

In Abbildung 6-8 sind die vertikalen Profile der Windgeschwindigkeit vom RASS und von der Radiosonde und in Abbildung 6-9 die Differenz dieser Profile für den gesamten Zeitraum, 13 MEZ und 1 MEZ dargestellt.

Die Windgeschwindigkeit im Raum Schwechat ist wegen der geringeren Bodenrauigkeit in allen 3 betrachteten Fällen höher als am Standort Hohe Warte. Die RASS Windgeschwindigkeit liegt in den untersten Niveaus um fast 2m/s höher. Mit zunehmender

Höhe wird der Wind an der Hohen Warte immer weniger von der Orographie beeinflusst und weist immer geringere Differenzen zum RASS auf. Ab einer Höhe von etwa 350m kommt es aufgrund der geringen Datenverfügbarkeit zu dem Auseinanderdriften der Windgeschwindigkeitskurven.

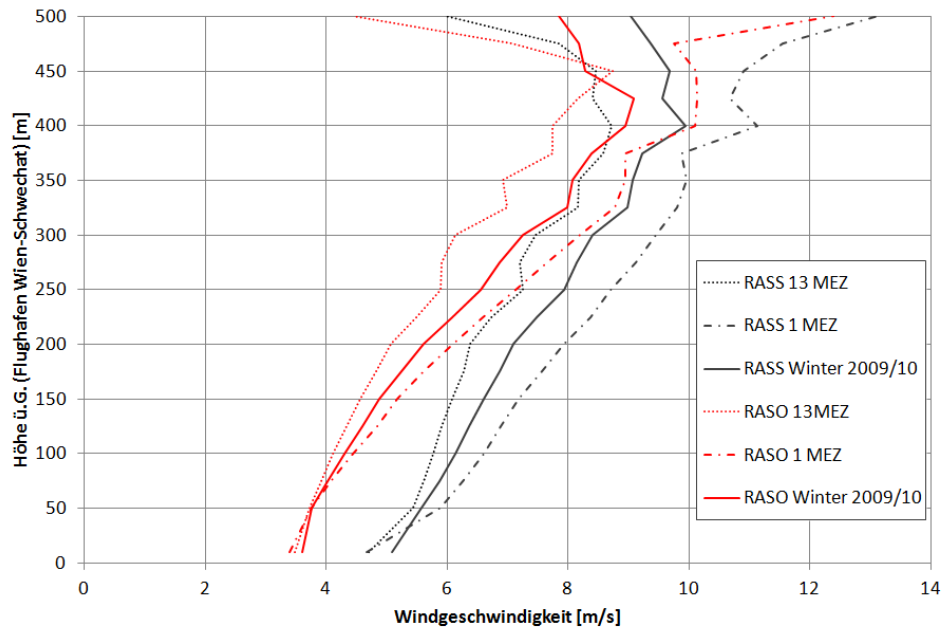


Abbildung 6-8 vertikales Profil der Windgeschwindigkeit vom RASS und der Radiosonde („RASO“) für den gesamten Beobachtungszeitraum, 13 MEZ und 1 MEZ.

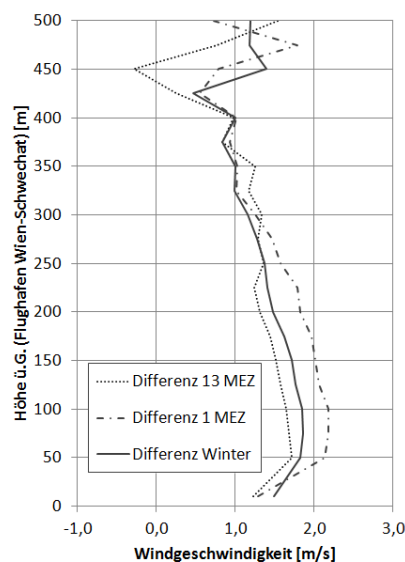


Abbildung 6-9 Differenz (Windgeschwindigkeit RASS – Windgeschwindigkeit Radiosonde) der vertikalen Profile der Windgeschwindigkeit für den gesamten Beobachtungszeitraum, 13 MEZ und 1 MEZ

6.3.2. Temperatur

Der Differenzplot der Temperatur für den gesamten Beobachtungszeitraum, sowie für 13 MEZ und 1 MEZ ist in Abbildung 6-10 dargestellt. In allen drei Grafiken ist das unterste Niveau der Radiosonde meist wärmer als beim RASS. Da bei der Radiosonde der unterste Messpunkt nicht so weit vom Erdboden entfernt ist wie beim RASS, hat der Boden einen höheren Einfluss. Tagsüber kann sich bei Sonneneinstrahlung der Hang der Hohen Warte schneller erwärmen als die Ebene beim Flughafen Wien-Schwechat. Nachts bzw. an strahlungsarmen Tagen kann aufgrund der exponierten Lage der Hohen Warte die Kaltluft den Hang hinab fließen, in der Ebene im Raum Schwechat kann sich die Kaltluft besser sammeln, wodurch es zu niedrigen Temperaturen vor allem in den untersten Schichten kommen kann. Ebenfalls spielt vor allem nachts die Stadtnähe der Station Hohe Warte eine Rolle. Die bodennahe Grenzschicht über Stadtgebiet kühlt aufgrund des Wärmeinseleffektes weniger stark aus, als die Grenzschicht über ländlichem Gebiet. So sieht man auch in der Abbildungen des gesamten Beobachtungszeitraumes, dass das unterste Niveau der Radiosonde meist wärmer ist als die RASS Schicht. Die höheren Niveaus weisen etwas häufiger positive Differenzen auf. Vor allem tagsüber kann es aufgrund der höheren Windgeschwindigkeiten am Flughafen Wien-Schwechat (siehe Kapitel 6.3.1) zu höheren Temperaturen kommen. Bei niedrigen Temperaturen liegt die Radiosonde etwas über der RASS Temperatur und bei hohen Temperaturen darunter. Sehr niedrigen Temperaturen treten häufig an Strahlungstagen bzw. Inversionswetterlagen mit Kaltluftadvektion auf. Aufgrund der vorher genannten Gründe kühlt die Grenzschicht im ländlichen Gebiet stärker aus, als die Grenzschicht in Stadtnähe.

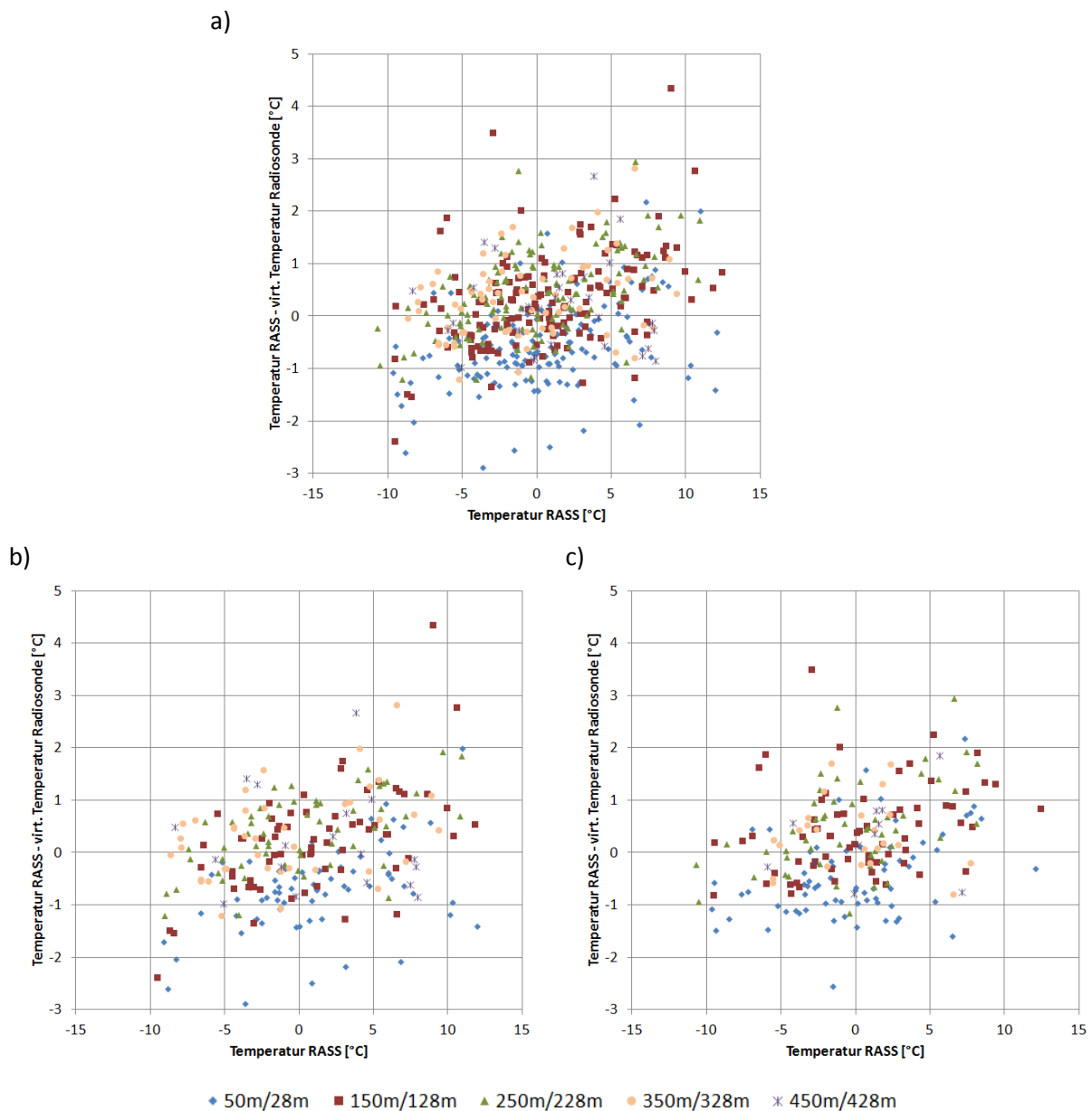


Abbildung 6-10 Differenzplot Temperatur RASS gegen die Differenz Temperatur RASS – Temperatur Radiosonde
a) gesamter Beobachtungszeitraum b) 13:00 MEZ und c) 1:00 MEZ

Abbildung 6-11 zeigt das vertikale Profil der Temperatur vom RASS und der Radiosonde und die Abbildung 6-12 die Differenz der mittleren vertikalen Temperaturverlauf für den gesamten Beobachtungszeitraum, 13 MEZ und 1 MEZ. Die 2m-Temperaturen werden in den 2 Abbildungen wegen der zu großen Temperatursprünge beim RASS (siehe Kapitel 5.1.3 bzw. Kapitel 6.1.2) nicht betrachtet. In Bodennähe ist das RASS wegen der vorher genannten Gründe kühler als die Radiosonde, wodurch die Bildung von Inversionen am Flughafen Wien-Schwechat begünstigt ist. Ein weiterer Grund für die höhere Temperatur in den untersten RASS Schichten könnte auf den städtischen Lee-Effekt zurückzuführen sein. Bei Nordwestströmung wird die wärmere Luft vom Stadtzentrum in Richtung Flughafen Wien-Schwechat transportiert und bewirkt dort eine Erhöhung der Temperatur in den unteren Niveaus. Die vertikalen Profile des RASS zeigen tagsüber eine Inversion bis in eine Höhe von etwa 100m, nachts bis in 150m. Die Radiosonden-Daten zeigen weder tagsüber noch nachts eine Inversion. Die Profile der Radiosonde zeigen vor allem tagsüber, aufgrund der guten

Durchmischung der Grenzschicht (siehe Kapitel 2.3), eine nahezu lineare Temperaturabnahme mit der Höhe. Obwohl beim RASS höhere Windgeschwindigkeiten herrschen, lässt sich der Kaltluftsee am Boden nicht ausräumen, wodurch vor allem tagsüber erst über der Inversion eine gut durchmischte Grenzschicht gezeigt wird. Über der Inversion am Flughafen Wien-Schwechat zeigen die Profile einen nahezu parallelen Verlauf wie die Radiosonden-Temperaturen. Der starke Temperaturanstieg in den höheren Levels ist auf die geringe Datenverfügbarkeit zurückzuführen.

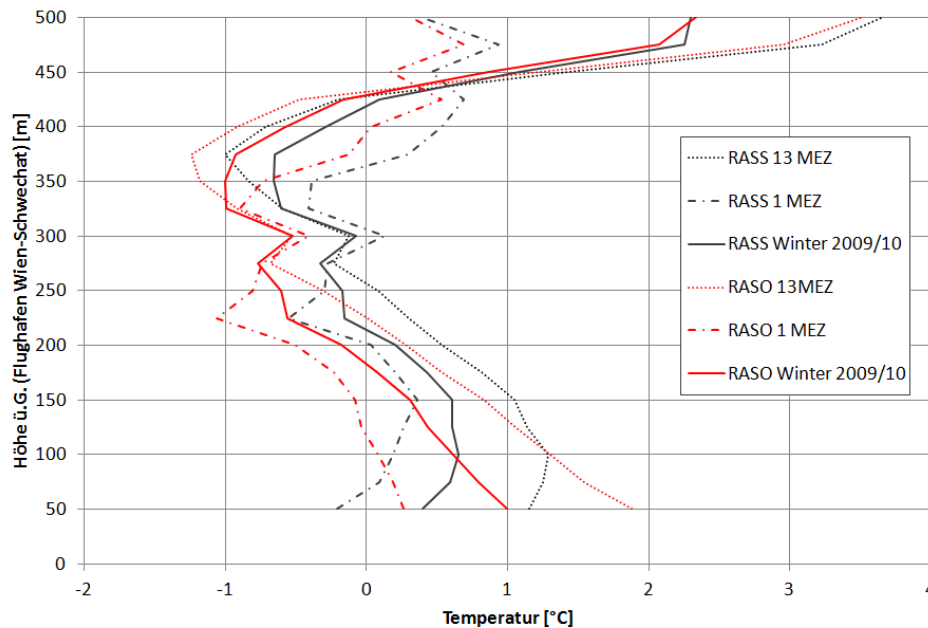


Abbildung 6-11 vertikales Profil der Temperatur vom RASS und der Radiosonde („RASO“) für den gesamten Beobachtungszeitraum, 13 MEZ und 1 MEZ

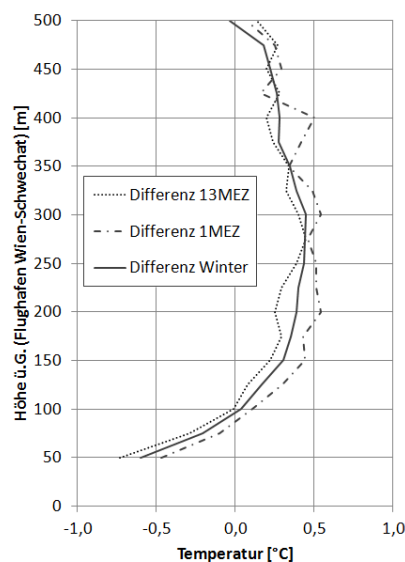


Abbildung 6-12 Differenz der vertikalen Profile (Temperatur RASS – Temperatur Radiosonde) der Temperatur für den gesamten Beobachtungszeitraum, 13 MEZ und 1 MEZ

Um den vorher genannten städtischen Lee-Effekt nachzuweisen wurden die RASS-Temperaturen nach der Windrichtung gefiltert und in mittleren vertikalen Profilen

dargestellt (Abbildung 6-13). Da sich der Lee-Effekt in den untersten Schichten bemerkbar macht und durch das windrichtungsabhängige Filtern nur ein kleines Sample zur Verfügung war, wurden die vertikalen Temperaturprofile nur bis in eine Höhe von 300m dargestellt. Das vertikale Profil der Temperatur bei Nordwest-Wind (im 50m-Niveau) zeigt im Gegensatz zum Temperaturprofil bei Südost-Wind (im 50m-Niveau) die für den Lee-Effekt typische Temperaturzunahme in den untersten Niveaus.

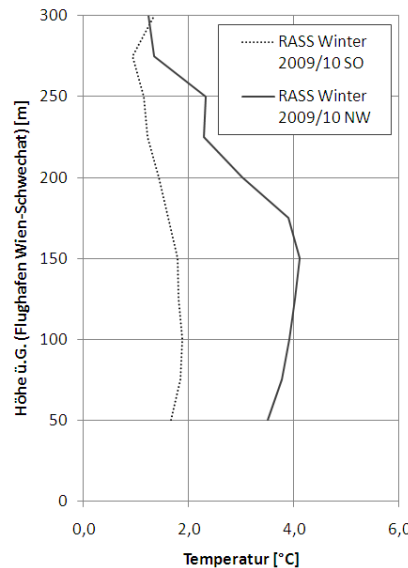


Abbildung 6-13 Nachweis des Lee-Effekts der Stadt Wien am Flughafen Wien-Schwechat: vertikale Profile der Temperatur gefiltert nach der vorherrschenden Windrichtung im 50m-Niveau, Nordwest (NW): 290° bis 310°, Südost (SO): 130° bis 140°.

6.3.3. Statistische Maßzahlen

Der Bias, auch mittlerer linearer Fehler genannt, zählt zu den systematischen Fehlern. Er ist ein Maß für die Zuverlässigkeit der Messungen. Er kann Werte zwischen $-\infty$ und $+\infty$ erreichen, wobei die Messwerte A zu groß sind, wenn der Bias größer 0 und zu klein, wenn der Bias kleiner als 0 ist. Da er ein einfaches Fehlermaß ist, gibt er keine Auskunft über die Grösse des Fehlers, da sich hohe und niedrige Biaswerte aufheben können.

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A_i - B_i) \quad (6.1.)$$

Der mittlere absolute Fehler (MAE) gibt die mittlere Grösse des Fehlers an, da er die absolute Differenz berechnet. Er beschreibt die Genauigkeit einer Messung A im Vergleich zur Messung B. Der Wertebereich liegt zwischen 0 und ∞ , wobei der perfekte Wert bei 0 liegt.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |A_i - B_i| \quad (6.2.)$$

Der mittlere quadratische Fehler (RMSE) liefert eine Aussage über die Genauigkeit der Messung A im Vergleich zur Messung B. Zu beachten ist, dass er die Fehler zum Quadrat beinhaltet und somit große Fehler einen erheblichen Beitrag liefern. Der Wertebereich liegt zwischen 0 und ∞ .

Der RMSE und MAE liefern gemeinsam eine Abschätzung für die Fehlervarianz. Ist der RMSE $\gg$ MAE besitzen die Messungen A eine hohe Fehlervarianz. Ist der RMSE gleich dem MAE, ist die Fehlervarianz gering. Zu beachten ist, dass der RMSE nie kleiner als der MAE sein kann.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A_i - B_i)^2} \quad (6.3.)$$

In Abbildung 6-14 sind die statistischen Maßzahlen für die Windgeschwindigkeit und die Temperatur als vertikales Profil dargestellt. Als „Messwert A“ wurden in den Berechnungen die Daten vom RASS, als „Messwert B“ die Daten von der Radiosonde verwendet.

Alle statistischen Maßzahlen weisen bei der Windgeschwindigkeit nahezu immer positive Werte auf. Wie schon vorher gezeigt ist die Windgeschwindigkeit der RASS Messungen höher als die Windgeschwindigkeit der Radiosonde (siehe Kapitel 6.3.1). Der BIAS der Bodenstationen liegt in allen 3 betrachteten Zeiträumen bei etwas über 1. In den untersten Schichten ist der BIAS am höchsten. Im Mittel nähern sich die Windgeschwindigkeiten mit der Höhe immer mehr an (siehe Abbildung 6-8), auch der BIAS zeigt in großen Höhen geringere Werte als in Bodennähe, jedoch weisen der MAE und der RMSE auf große Differenzen der Messungen in diesen Höhen hin.

Da die Temperaturen in den untersten Niveaus auf der Hohen Warte im Mittel höher sind als die Temperaturen im Raum Schwechat (siehe Abbildung 6-11) liegt auch der BIAS unter 0. Wie schon in den vertikalen Profilen gezeigt, wird die RASS Temperatur ab einer Höhe von 100m wärmer als die Radiosonden-Temperatur – der BIAS wird positiv. Der MAE zeigt, dass in der untersten Schicht im Mittel geringfügig größere Abweichungen (zwischen 0,5°C bis 0,7°C) als in den höheren Schichten vorkommen.

Obwohl es sich bei den betrachteten Datensätzen aufgrund der wenigen Aufstiegstermine der Radiosonde pro Tag um kleine Stichproben handelt, liefern die statistischen Maßzahlen plausible Ergebnisse.

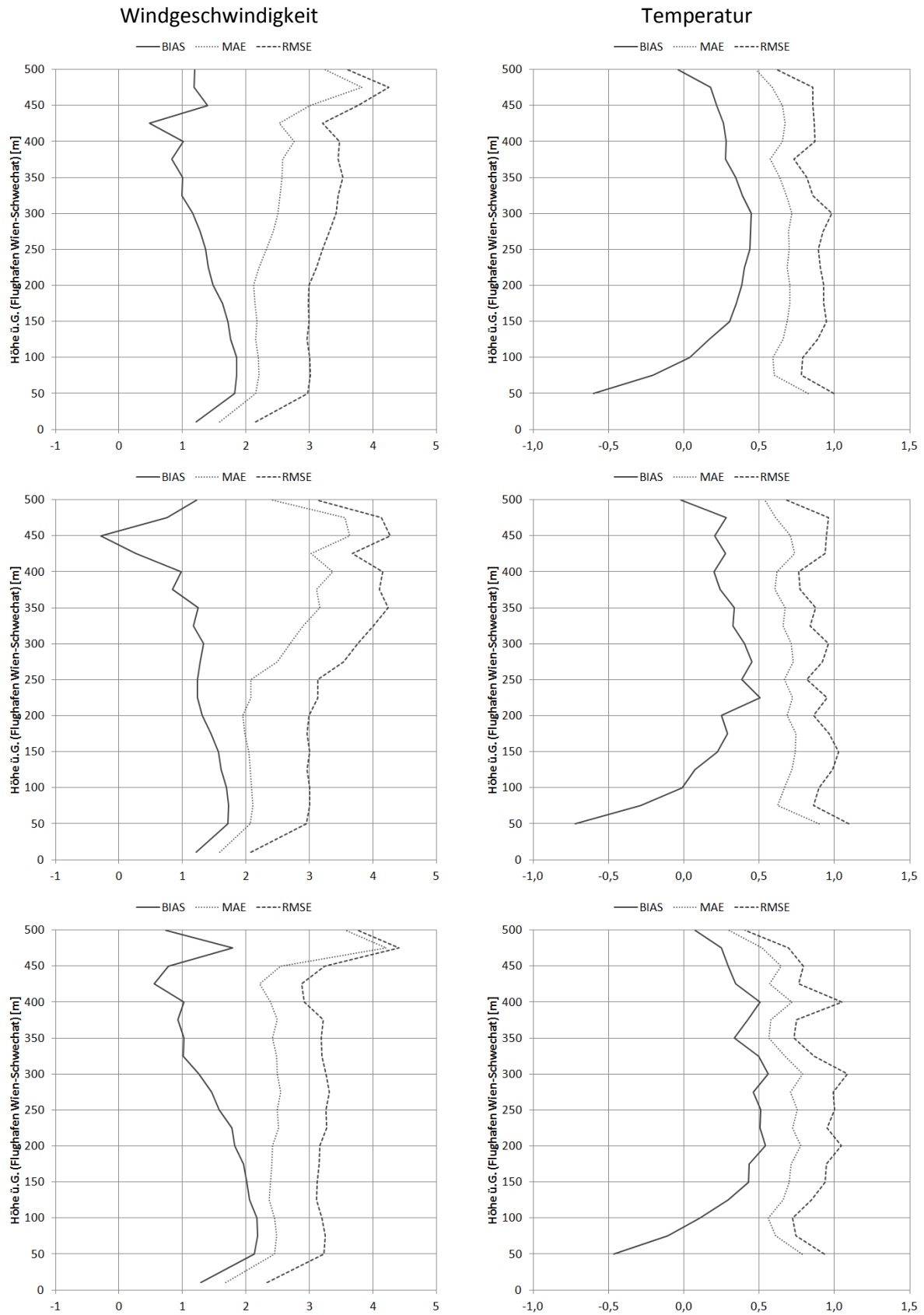


Abbildung 6-14 vertikales Profil von BIAS, MAE und RMSE der RASS und Radiosonden Messungen der Windgeschwindigkeit (links) und Temperatur (rechts) für den gesamten Beobachtungszeitraum (oben), 13 MEZ (Mitte) und 1 MEZ (unten)

6.4. Fallstudien zu Inversionswetterlagen

Bei einer Inversion lagert wärmere Luft über kälterer, d.h. der vertikale Temperaturgradient ist positiv. Durch Inversionen kann der Austausch mit der darüber liegenden Schicht fast völlig unterbunden werden. In Erdbodennähe kommt es dadurch zu einer Anreicherung von bodennah freigesetzten Luftschadstoffen. Ebenfalls damit verbunden ist die Anreicherung von Wasserdampf, welche zu Nebelbildung, zu einer verstärkten thermischen Abstrahlung und damit zu einer weiteren Abkühlung führt. Dieser Rückkopplungseffekt verstärkt und stabilisiert die Inversion. Inversionen können sich in Hochdruckwetterlagen (Absinkinversionen) oder durch die nächtliche Ausstrahlung bilden (Roedel, 2000).

6.4.1. Inversionswetterlage bei Südost-Wind

In Abbildung 6-15 ist die Bodenanalyse (Druck und Fronten) und die absolute Topographie in 500hPa (ATP500) vom 6. Dezember 2009 dargestellt. Österreich befand sich in einer nordwestlichen Höhenströmung zwischen einem Höhentief mit Kern nordwestlich von Großbritannien, einem weniger stark ausgeprägten Tiefdrucksystem im östlichen Mittelmeer und einem Hochdruckgebiet über Russland. Am Boden lag Österreich in einer Hochdruckbrücke, welche sich im Laufe des 6. Dezembers verstärkte.

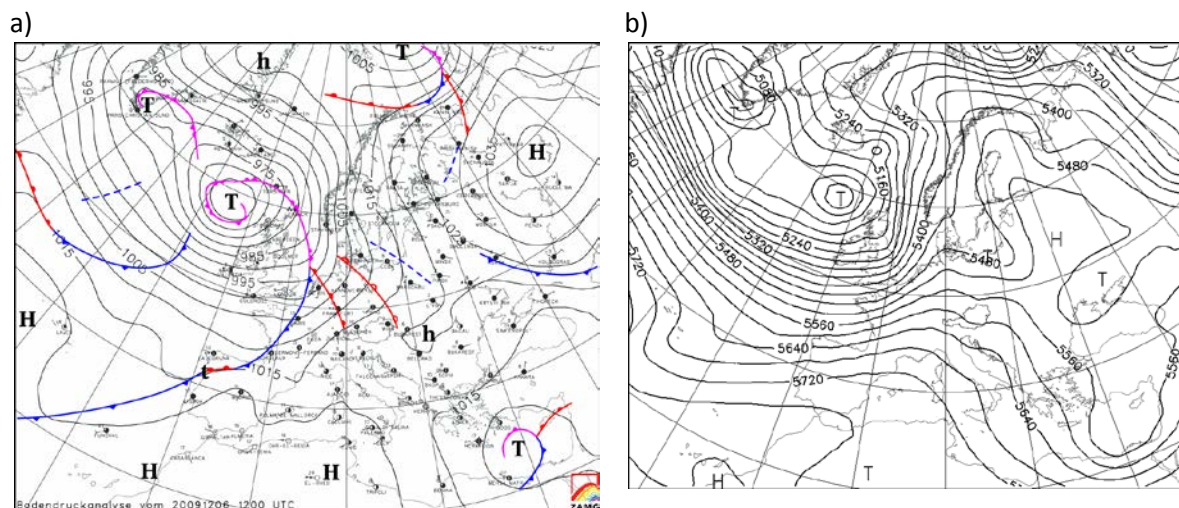


Abbildung 6-15 a) Bodendruckkarte und b) absolute Topographie 500hPa vom 6. Dezember 2009 12 UTC (13 MEZ) (ZAMG, 2012)

In Abbildung 6-16 ist in einem Zeit-Höhendiagramm der vom SODAR gemessene Horizontalwind in Form von Windpfeilchen dargestellt. Abbildung 6-17 zeigt den zeitlichen Verlauf der vom RASS gemessenen Temperaturprofile als Farbflächen. Durch den sich breit machenden Hochdruckeinfluss im Osten Österreichs drehte der Wind, wie die SODAR-Messung zeigt, von südwestlichen Richtungen auf südöstliche Richtungen. Ab etwa 4 MEZ kam der Wind im 50m Niveau durchgehend aus Südosten. In den darüber liegenden Schichten drehte der Wind im Laufe des Vormittags auf Südost. Um etwa 13 MEZ kann man bis in eine Höhe von 250m Südostwind beobachten. Die Windgeschwindigkeiten sind aufgrund der gradientschwachen Lage in der gesamten Grenzschicht sehr niedrig. Im Zeit-Höhendiagramm der RASS-Temperatur kann man die stabile nächtliche Grenzschicht erkennen: Bis in die frühen Morgenstunden sank die Temperatur unter der abgehobenen Inversion auf unter 0°C ab. Aufgrund der schwachen südöstlichen Bodenströmung und der Temperaturabnahme in den untersten Schichten machte sich in den Morgenstunden Bodennebel breit. Die Temperatur sank noch weiter ab und lag um 10 MEZ bei etwa -1,5°C.

6. Ergebnisse

Durch die Einstrahlung wurde es danach wieder etwas wärmer, im Mittel blieben die Temperaturen bei etwa 1,5°C. Nach Sonnenuntergang sank die Temperatur unter der Inversion in der ersten Nachthälfte zum 7. Dezember nur mehr geringfügig ab.

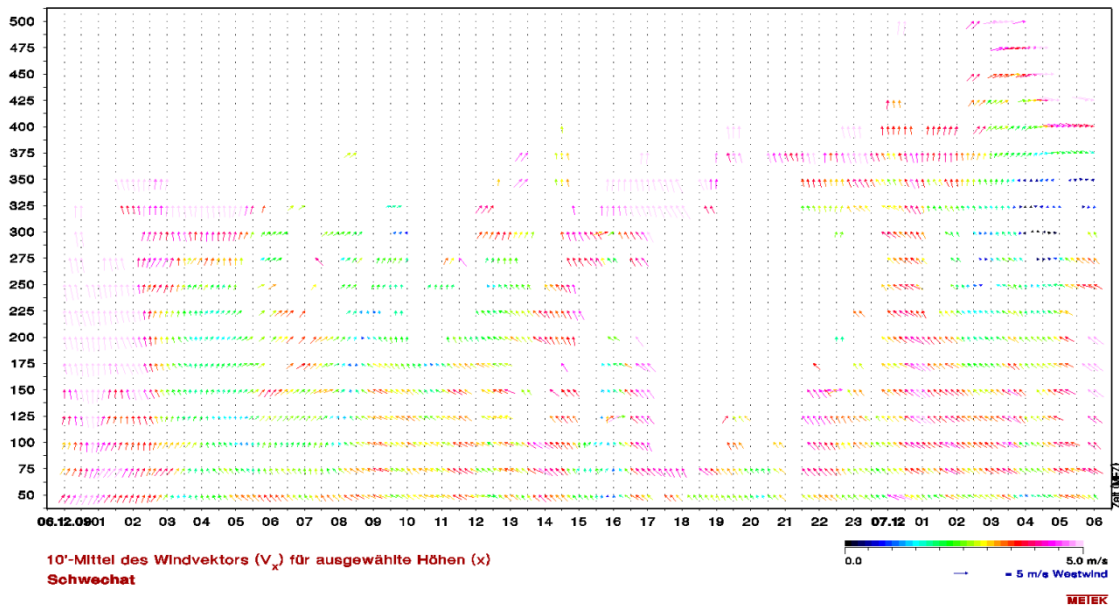


Abbildung 6-16 Zeit-Höhendiagramm des SODAR Horizontalwindes vom 6. Dezember 2009

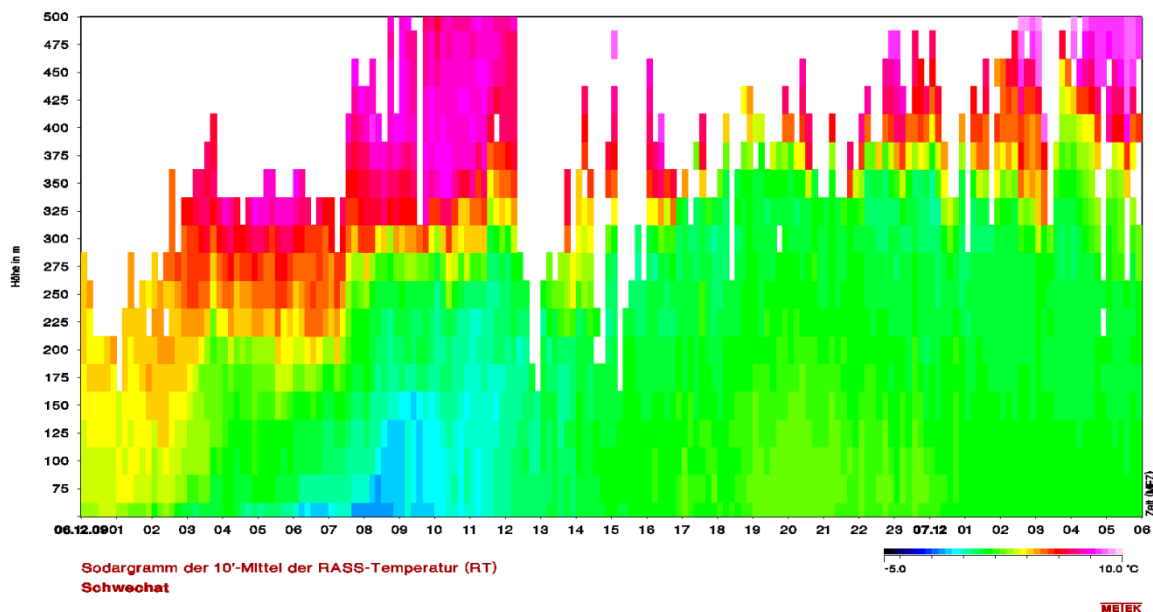


Abbildung 6-17 Zeit-Höhendiagramm der RASS Temperatur vom 6. Dezember 2009

In Abbildung 6-18 sind die vertikalen Profile der Radiosondenaufstiege und der RASS Messungen von Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Temperatur an den Radiosondenaufstiegszeitpunkten (6. Dezember 2009 1 MEZ und 13 MEZ, 7. Dezember 2009 1 MEZ) dargestellt.

Während das RASS am 6. Dezember um 1 MEZ durch das gesamte Profil hindurch Südwinde zeigt, weist die Radiosonde in Bodennähe noch südwestliche Windrichtungen auf und dreht dann erst mit der Höhe auf südliche Winde. Die Windgeschwindigkeit nimmt beim RASS viel stärker zu als bei der Radiosonde. Im Temperaturprofil der Hohen Warte ist wie beim RASS eine leichte Temperaturinversion zu erkennen. Unter der Inversionsschicht sank die 50m-

Temperatur am Flughafen Wien-Schwechat bis 13 MEZ um etwa 3°C. Der vertikale Verlauf präsentiert sich nahezu isotherm, jedoch kann man aufgrund der Temperaturzunahme ab 200m auf eine darüberliegende Inversion schließen. Auch auf der Hohen Warte sank die bodennahe Temperatur um etwa 2°C. Das Temperaturprofil zeigt zuerst eine lineare Abnahme bis in eine Höhe von 275m mit einer darüber liegenden Inversionsschicht. Die Windrichtung zeigt an beiden Standorten in Bodennähe Südostwind, darüber drehen beide Winde auf südwestliche Richtungen. Auch in dem Windgeschwindigkeitsprofil zeigen beide Kurven ähnlich geringe Windgeschwindigkeiten. Auch in der Nacht zum 7. Dezember blieb die Inversion bestehen. Durch die schon vorher genannten Effekte (siehe Kapitel 0) blieb zwar die Bodenschicht auf der Hohen Warte wärmer, jedoch näherten sich die 2 Profile mit zunehmender Höhe immer weiter an und zeigen nahezu die gleiche Inversionsuntergrenze. Die Windrichtung auf der Hohen Warte zeigt durchgehend südliche Richtungen während das RASS in Bodennähe südöstliche Richtungen zeigt, dann aber auf südliche Winde dreht. Die Windgeschwindigkeit zeigt eine lineare Zunahme bis 325m, darüber ist die gleichbleibend. Am Flughafen Wien-Schwechat nimmt der Wind zuerst stark zu und wird ab einer Höhe von 150m wieder geringer. Mit der Winddrehung auf Süd, nimmt die Windgeschwindigkeit wieder zu.

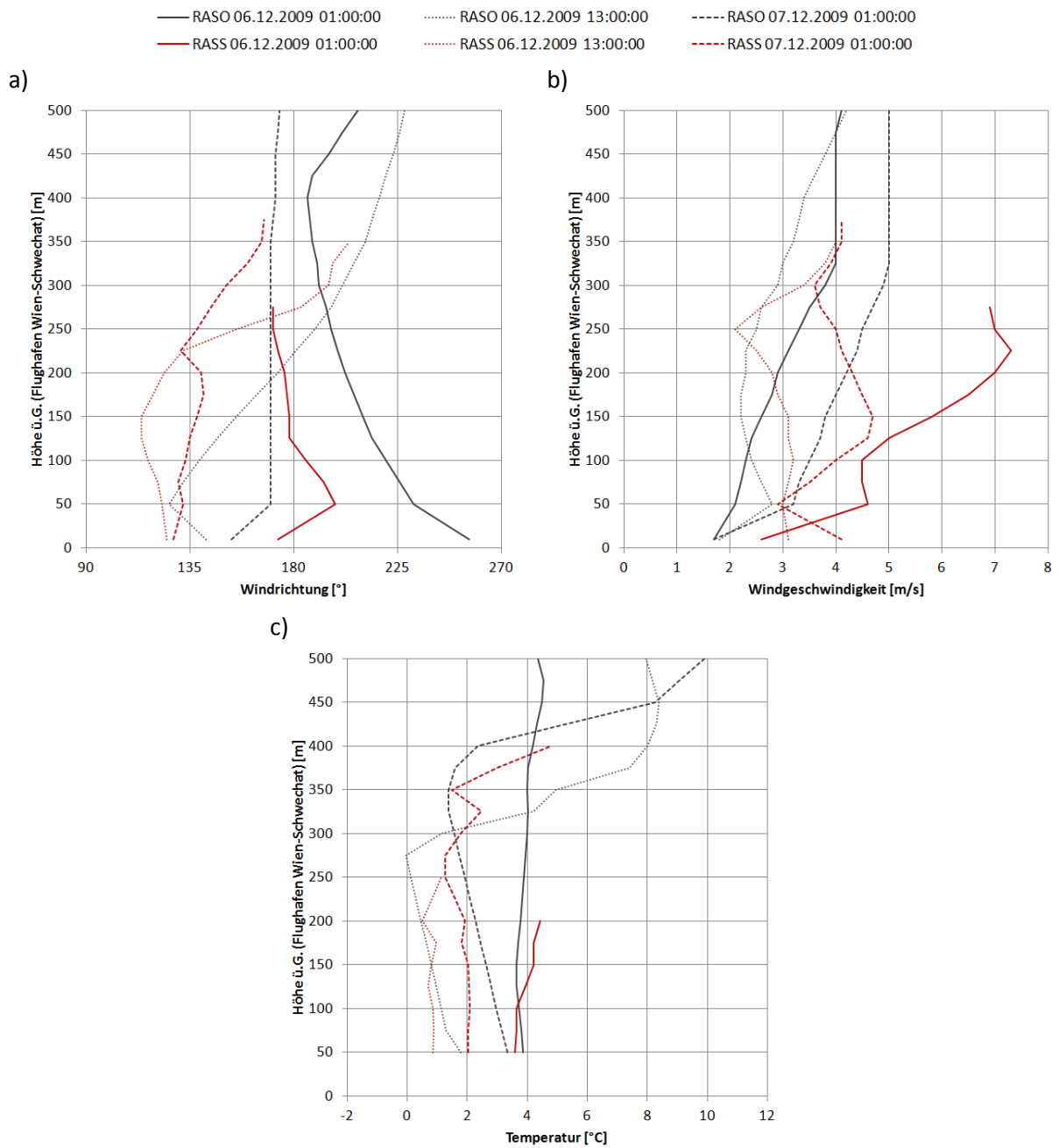


Abbildung 6-18 Vertikale Profile der Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Temperatur für 3 Radiosonden-aufstiegstermine (6.12.09 1 MEZ, 6.12.09 13 MEZ, 7.12.09 1 MEZ).

Für die Betrachtung der Messstationen in Wien und Umgebung wurden die meteorologischen Messstationen in 4 Quadranten und den Innenstadtbereich (inkl. der Höhenstationen im Stadtbereich) eingeteilt (Abbildung 6-19).



Abbildung 6-19 Einteilung der meteorologischen Messstationen in Quadranten (Google Earth, 2012)

In Tabelle 6-1 sind die gemessenen Windrichtungen, Windgeschwindigkeiten und Temperaturen der meteorologischen Messstationen zu 3 betrachteten Zeitpunkten (6. Dezember 2009 1 MEZ, 6. Dezember 2009 13 MEZ, 7. Dezember 2009 1 MEZ) aufgelistet. In Abbildung 6-18 ist ersichtlich, dass zum ersten Beobachtungszeitpunkt an der Hohe Warte in Bodennähe im Gegensatz zum Flughafen Wien-Schwechat noch westliche Winde herrschten. Vor allem die Stationen im Einflussgebiet des Wienerwaldes (III. und IV. Quadrant) zeigen ebenfalls eher westliche bis südwestliche Winde. Wie schon vorher erwähnt (siehe Kapitel 6.3.1) wird dieses Phänomen durch das Abfließen der bodennahen Kaltluft vom Wienerwald erklärt (Piringer, 1989). Die Windgeschwindigkeiten sind durchgehend gering. Die höheren Stationen (Wien/Jubiläumswarte, Exelberg) zeigen erwartungsgemäß höhere Windgeschwindigkeiten als das raue Stadtgebiet. Nur im II. Quadranten werden im Vergleich zu den anderen Quadranten etwas höhere Windgeschwindigkeiten gezeigt, was auf die orographischen Gegebenheiten in dieser Region zurückzuführen ist. Durch den Wärmeinseleffekt zeigt die Station Wien/Innere Stadt höhere Temperaturen als die restlichen Bodenstationen. Die höher gelegenen Stationen (Wien/AKH-Dach, Arsenal, Eichkogel, Jubiläumswarte, Exelberg, Wien/Hermannskogel) weisen ebenfalls höhere Temperaturen als die Bodenstationen auf, was auf eine Inversion über dem betrachteten Gebiet schließen lässt.

12 Stunden später wehte an nahezu allen Bodenstationen Winde aus südöstlichen Richtungen, einzige Ausnahmen sind die Station Exelberg (198°) und die TAWES NÖ/Himberg (241°). Auch tagsüber weht der Wind unter der Inversionsschicht nur geringfügig stärker als in der Nacht. Unter der Inversionsschicht konnte sich der Boden bis 13 MEZ nicht stark erwärmen. Die meisten TAWES Stationen zeigen nur geringfügige Temperaturzunahmen. In den vertikalen Profilen vom RASS und der Radiosonde (siehe Abbildung 6-18) sieht man um 13 MEZ eine Inversionsuntergrenze von etwa 200m ü. G. (Flughafen Wien-Schwechat) und etwa 275m ü. G. (eigentlich 253m ü. G., Hohe Warte). An fast allen höher gelegenen Messstationen, sowohl im Innenstadtbereich (Wien/AKH-Dach), aber auch im Wienerwaldbereich (Exelberg, Hermannskogel) wird eine Temperaturabnahme zum vorherigen Termin (von 1 MEZ bis 13 MEZ) gezeigt, d.h. die Station befindet sich um 13 MEZ schon unterhalb der abgehobenen Inversion. Die Station Arsenal hingegen weist im selben Zeitraum eine Temperaturzunahme um über 3°C auf. Damit ist sie deutlich höher als ihre umgebenden Bodenstationen (wie z.B. Wien/Gaudenzdorf oder Wien/Innere Stadt), was bedeutet, dass die Station in bzw. über der Inversion liegt. Auch die TAWES Wien/Jubiläumswarte (449m) weist eine leichte Temperaturzunahme auf, jedoch liegt die

nahe gelegene Station Wien/Hohe Warte temperaturmäßig etwas darüber, was darauf schließen lässt, dass auch diese Station unterhalb der Inversion liegt.

Wie vorher in den vertikalen Profilen ersichtlich steigt die Inversionsuntergrenze in der Nacht zum 7. Dezember 2009 noch etwas an und befindet sich sowohl im nächtlichen Radiosondenaufstieg als auch im RASS-Profil auf etwa 350m. Die gemessene Windrichtung ist am 7. Dezember um 1 MEZ an nahezu allen Stationen Südost. Fast ausschließlich im III. Quadranten gibt es wenige Stationen die südwestliche Winde zeigen. Die Windgeschwindigkeit hat sich zu den vorherigen Terminen kaum geändert. Fast alle Stationen zeigen jedoch eine Temperaturzunahme. Ausnahme ist die Station NÖ/Mödling, wo sich wahrscheinlich Kaltluft gesammelt hat und die Station Arsenal, die sich zu diesem Zeitpunkt schon unter der Inversion befand. Die Temperaturzunahme zwischen 6. Dezember 13 MEZ und 7. Dezember 1 MEZ lässt sich so erklären: der Boden konnte sich am Nachmittag trotz der Inversionsschicht leicht erwärmen, jedoch verhinderte ebendiese eine Auskühlung in der 1. Nachthälfte, wodurch das Temperaturniveau höher blieb.

Tabelle 6-1 Messungen der meteorologische Messstationen (eingeteilt in 5 Sektoren) für die Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Temperatur für a) 6. Dezember 1 MEZ, b), 6. Dezember 13 MEZ und c) 7. Dezember 1 MEZ. Bei den Windmessenanlagen der ACG sind nur die virtuellen Temperaturen verfügbar (*).

Innenstadt	Windrichtung			Windgeschwindigkeit			Temperatur		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Wien/Innere Stadt	210	148	144	1,4	1,6	1,9	2,3	2,2	3,4
Wien/Gaudenzdorf	-	-	-	-	-	-	0,5	1,9	2,9
Wien/AKH-Dach	187	155	170	0,9	1,3	1,2	2,7	1,6	2,5
Arsenal	183	144	148	6	2,4	2,4	4,5	7,9	3,1
Wien/Laer Berg	229	156	151	1,3	1,3	0,9	-	-	-

I Quadrant

Wien/Stammersdorf	45	110	130	1,1	1,6	1,3	-0,1	0,7	2,6
Wien/Donaufeld	170	151	150	0,8	1,3	1,3	0,4	1,6	3,2

II Quadrant

Wien/Großenzersdorf	160	151	146	1,2	1,8	2,5	-0,3	1,4	2,9
Wien/Kaiserebersdorf	206	156	172	1	1,7	1,1	0,2	2,1	3,1
Wien/Unterlaa	199	173	187	2,8	1,3	1,1	-0,8	0,9	2,4
NÖ/Mannswörth	164	120	116	1,7	2,5	2,8	-0,9	0,6	1,6
NÖ/Schwechat Sportplatz	176	150	135	0,9	1,4	0,9	0,2	2	3,1
NÖ/Himberg	188	241	205	1,2	0,9	1	-0,8	1,5	2,9
Wien/Schwechat Flughafen	173	125	128	2,6	3,1	4,1	-1,5	1,3	2
WMA11	188	126	147	2,4	3,1	2,1	2,0*	2,0*	2,9*
WMA29	167	126	137	1,9	3,6	3,8	2,5*	2,2*	3,1*
WMA16	175	124	131	2,6	3,1	4,1	2,4*	2,1*	3,0*
WMA34	177	130	142	2,2	3,3	3,8	2,5*	-0,3*	0,9*
FMA Main	-	-	-	-	-	-	-1,4	1,2	2,0*
Tower	167	130	135	1,9	4,1	6,3	2,1	-0,3	0,7

III Quadrant

NÖ/Vösendorf	-	-	211	-	-	0,9	-0,7	2,1	2,6
NÖ/Mödling	154	129	193	0,6	0,7	0,7	-2,4	3,2	1,5
NÖ/Wiener Neudorf	200	142	206	0,6	0,7	1,1	1,3	1,7	2,8
NÖ/Eichkogel	-	-	-	-	-	-	2,5	0,4	0,7
NÖ/Brunn am Gebirge	223	98	173	1,8	1	1,2	0,2	0,4	1
NÖ/Biedermannsdorf Mühlgasse	153	121	215	0,5	0,7	0,9	-1,6	0,6	2,3

IV Quadrant

Wien/Mariabrunn	288	127	122	0,3	2,4	1,7	-2,7	1,4	1,9
Wien/Jubiläumswarte	167	132	137	4,6	1,3	2,7	1,3	1,8	0,6
NÖ/Purkersdorf- Bauhof	0	59	61	0	1,1	0,6	2,4	2,3	3,4
Exelberg	178	198	165	6,3	5	5,1	2,1	-0,3	0,7
Wien/Hermannskogel	-	-	-	-	-	-	1,9	0,8	0,2
Wien/Hohe Warte	256	142	153	1,7	1,8	1,7	0,5	2,2	2,8
NÖ/Klosterneuburg- Wisentgasse	227	106	119	0,5	1,3	1,1	-0,3	2,5	2,9
NÖ/Klosterneuburg- B14	252	110	125	0,6	1,6	1,1	-0,3	2,7	3,4

6.4.2. Inversionswetterlage bei Nordwest-Wind

In Abbildung 6-20 sind die Bodendruckkarte (Druck und Fronten) und die absolute Topographie in 500hPa (ATP500) vom 9. Jänner 2010 12 MEZ und vom 10. Jänner 2010 12 MEZ dargestellt. Am 9. Jänner 2010 12 MEZ lag Österreich in einer südöstlichen Höhenströmung im Einflussbereich eines Höhentiefs mit Kern über dem Süden von Frankreich. Das Tief verlagerte sich bis zum 10. Jänner 2010 weiter nach Westen, wodurch der Kern des Höhentiefs über Österreich lag. Das zugehörige Bodentief verlagerte sich von Norditalien in Richtung Kroatien und schwächte sich dabei stark ab.

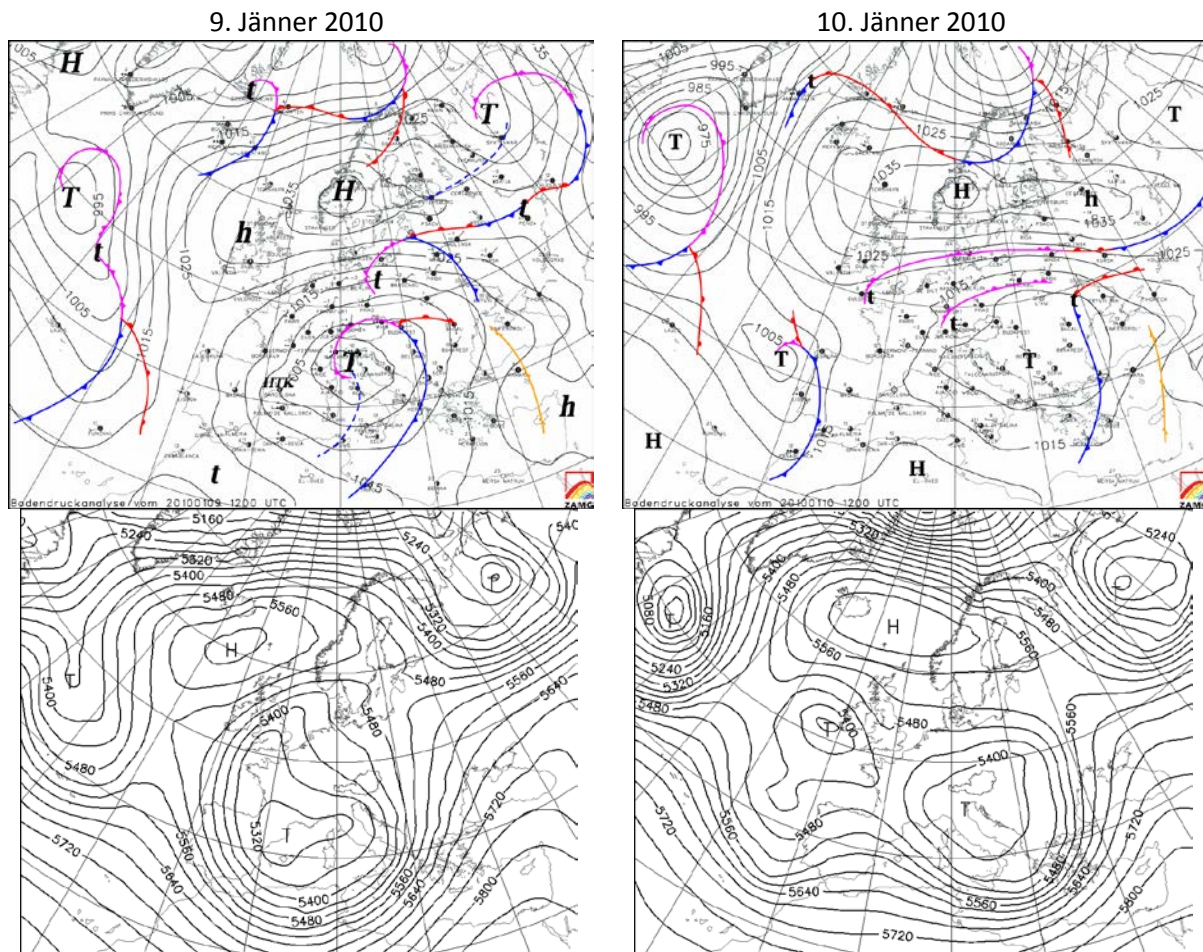


Abbildung 6-20 Bodendruckkarte (oben) und absolute Topographie 500hPa (unten) vom 9. Jänner 2010 (links) und vom 10. Jänner 2010 (rechts), 12 UTC (13 MEZ) (ZAMG, 2012)

Abbildung 6-21 zeigt das Zeit-Höhendiagramm des vom SODAR gemessenen Horizontalwindes in Form von Windpfeilchen. In Abbildung 6-22 ist der zeitliche Verlauf der vom RASS gemessenen Temperaturprofile als Farbflächen dargestellt. Zu Beginn des betrachteten Zeitraumes herrschte am Boden Nordwest-Wind. Mit der Höhe drehte der Wind langsam auf Nordnordwest (siehe Ekman-Spirale, Kapitel 2.2.2). In den Nachmittagsstunden wehte der Wind zuerst noch mit höheren Windgeschwindigkeiten, schief jedoch mit Sonnenuntergang ein. Bis in die 2. Nachthälfte blieb der Wind in den untersten RASS Niveaus sehr schwach und kam aus westlichen bis nordwestlichen Richtungen. In den Schichten darüber nahm die Windgeschwindigkeit langsam zu. Ab etwa 1 MEZ am 10. Dezember stieg die Windgeschwindigkeit in allen Höhen auf über 5 m/s. Im Zeit-Höhendiagramm der RASS Temperatur kann man schon am Mittag des 9. Jänners 2010 eine bodennahe Inversion erkennen, welche sich bis zum 10. Dezember 2010 auch nicht auflöste.

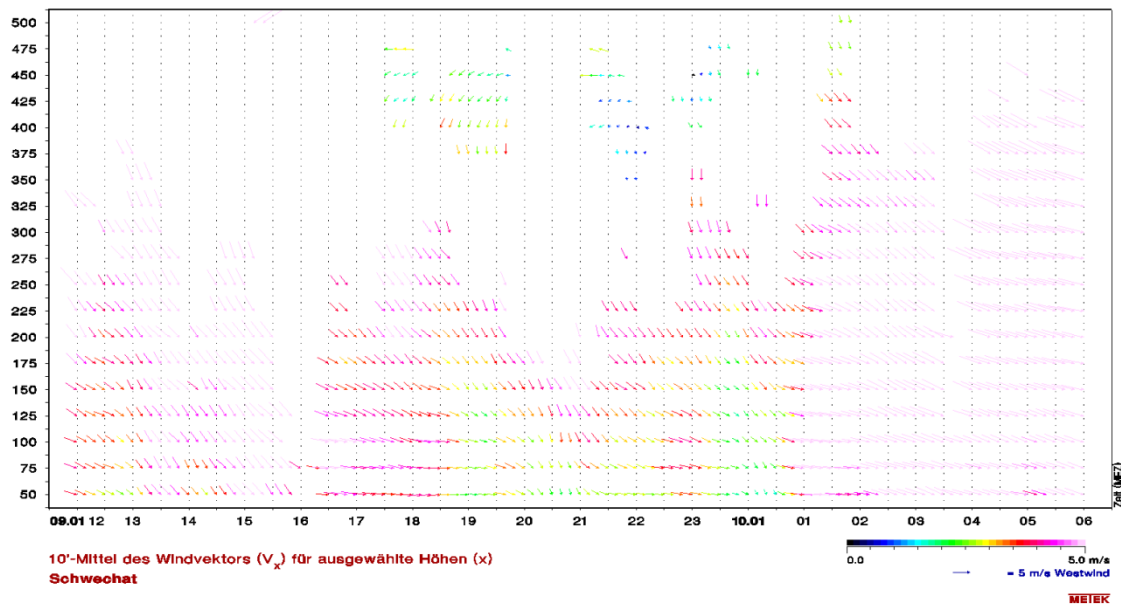


Abbildung 6-21 Zeit-Höhendiagramm des SODAR Horizontalwindes vom 9. Jänner 2010 12 MEZ bis 10. Jänner 2010 12 MEZ

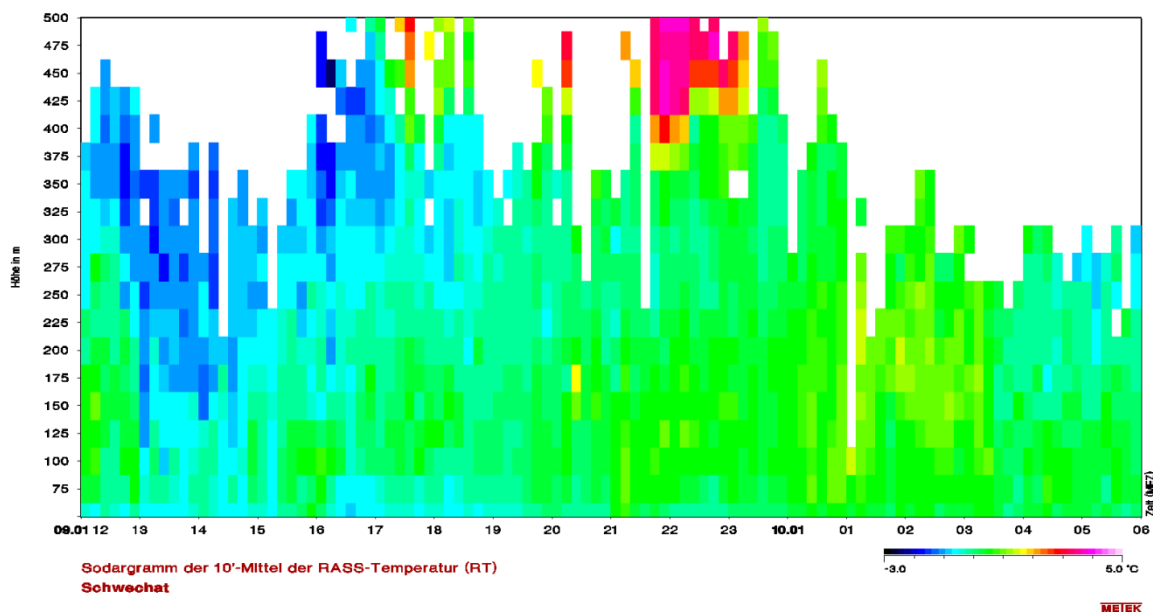


Abbildung 6-22 Zeit-Höhendiagramm der RASS Temperatur vom 9. Jänner 2010 12 MEZ bis 10. Jänner 2010 12 MEZ

In Abbildung 6-23 sind die vertikalen Profile von Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Temperatur vom RASS und der Radiosonde zu den Radiosondenaufstiegsterminen am 9. Jänner 13 MEZ und 19 MEZ, sowie am 10. Jänner um 1 MEZ dargestellt. Auf den ersten Blick fällt auf, dass die Windrichtung zu diesen 3 Beobachtungszeitpunkten nicht so variabel ist wie bei Südostströmung (siehe Abbildung 6-18). Die Windrichtungsprofile vom RASS und der Radiosonde ähneln sich sehr und weisen am Boden Winde aus nordwestlichen Richtungen und mit der Höhe eine Drehung Richtung Nord auf (siehe Ekman-Spirale, Kapitel 2.2.2). In den Radiosonden-Daten erkennt man ab einer Höhe von 350m die weiterführende Drehung auf nordöstliche Richtungen. Die Windgeschwindigkeit zeigt ebenfalls ein nahezu einheitliches Bild: Wie schon vorher gezeigt sind die höheren Windgeschwindigkeiten am Flughafen Wien-Schwechat zu finden (siehe Kapitel 6.3.1). Mit

der Höhe nehmen die Windgeschwindigkeiten an beiden Standorten zu. Die Radiosonde zeigt ab etwa 325m (Drehung des Windes von Nordnordwest auf Nordost) in allen 3 Profilen einen Windgeschwindigkeitsrückgang. Die RASS Daten sind in dieser Höhe leider nicht mehr verfügbar.

Das Temperaturprofil des RASS zeigt an allen 3 Terminen eine Inversion bis in eine Höhe von 100m. Darüber nehmen die Temperaturen wieder ab und steigen ab einer Höhe von etwa 375m, wie bei der Radiosonde, wieder an. Die bodennahe Inversion wird jedoch nicht von den Radiosonden-Daten gezeigt, was auf den schon vorher erwähnten Lee-Effekt der Stadt zurückzuführen sein kann (siehe Kapitel 0). Die Temperaturprofile vom 9. Jänner 2010 zeigen den größten Unterschied zwischen den 2 Messorten: Während das RASS ähnliche Profile wie zu den anderen 2 Zeitpunkten zeigt, weist das Profil der Radiosonde eine trockenadiabatische Temperaturabnahme ($1^{\circ}\text{C pro } 100\text{m}$) bis in eine Höhe von 250m auf. Im Tullner Becken (nordwestlich von Wien) könnte sich Kaltluft gesammelt haben, die mit der nordwestlichen Bodenströmung über den Wienerwald transportiert wurde. Über der bodennahen Kaltluft liegt auf der Hohen Warte eine relativ warme Luftschicht. Mit dem Nordwestwind wurden die beiden Luftmassen über die Stadt hinweg bewegt und durchmischten sich dabei. Das RASS am Flughafen Wien-Schwechat zeigt über der bodennahen Temperaturinversion genau das mittlere Temperaturprofil zwischen den übereinander liegenden Luftmassen auf der Hohen Warte.

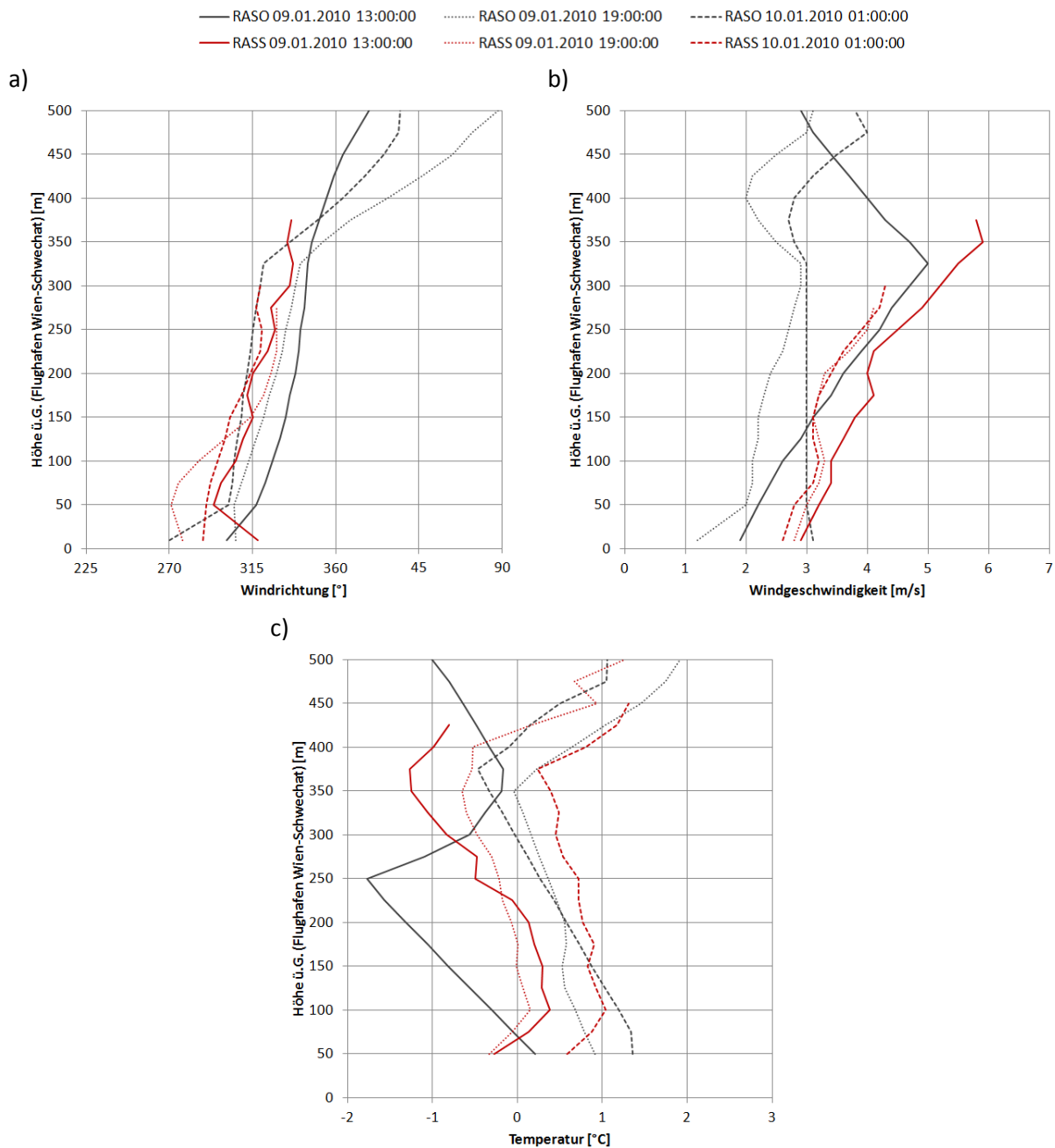


Abbildung 6-23 Vertikale Profile der Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Temperatur für 3 Radiosondenaufstiegstermine (9.1.10 13 MEZ, 9.1.10 19 MEZ, 10.1.10 1 MEZ).

In Tabelle 6-2 sind die Messungen der Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Temperatur der meteorologischen Messstationen eingeteilt in 5 Sektoren (siehe Abbildung 6-19) für den 9. Jänner 2010 13 MEZ und 19 MEZ und für den 10. Jänner 2010 1 MEZ aufgelistet. Wie auch schon das Windrichtungsprofil vom RASS und der Radiosonde gezeigt hat, ist das Windfeld über Wien und Umgebung sehr homogen. Fast alle Stationen zeigen zu allen 3 Beobachtungsterminen Winde aus nordwestlichen Richtungen. Nur die Stationen NÖ/Brunn am Gebirge und NÖ/Purkersdorf-Bauhof weisen eher westliche bzw. südwestliche Richtungen auf. Die Windrichtungsverteilungen beider Stationen werden durch ihre Lage am Wienerwaldrand (NÖ/Brunn am Gebirge) bzw. in einem Wienerwaldtal (NÖ/Purkersdorf-Bauhof) modifiziert. Die Messstationen außerhalb Wiens zeigen aufgrund ihrer ungestörten Lage meist höhere Windgeschwindigkeiten als die städtischen Messstationen. Die etwas

höher gelegenen Stationen zeigen ebenfalls höhere Windgeschwindigkeiten. Nach Sonnenuntergang werden die Winde am 9. Jänner 19 MEZ etwas schwächer, nehmen dann aber in der 2. Nachthälfte, wie auch in Abbildung 6-21 ersichtlich, aufgrund der Wetterlage (siehe Abbildung 6-20) wieder zu. Die Temperaturverteilung zeigt ebenfalls ein homogenes Bild. Wie im Radiosonden-Profil ersichtlich tritt am nordwestlichen Stadtrand, im Gegensatz zu dem vom RASS gemessenen Verhältnissen östlich von Wien, nur eine abgehobene Inversion auf (siehe Abbildung 6-23). Die Station Wien/Jubiläumswarte zeigt zu allen 3 Zeitpunkten niedrigere Temperaturen als ihre umgebenden Stationen in tieferen Lagen. Auch die Stationen Exelberg, Wien/Hermannskogel oder NÖ/Eichkogel lassen nicht auf eine Inversion schließen. Nur die Station Wien/AKH-Dach zeigt eine deutlich höhere Temperatur als die Innenstadt-Stationen und nahezu alle Stationen in den 4 Quadranten. Leider gab es in dem Beobachtungszeitraum keine Messungen an der Station Wien/Laaer Berg, wodurch die hohen Temperaturen der Station Wien/AKH-Dach nicht verifiziert werden können.

Tabelle 6-2 Messungen der meteorologische Messstationen (eingeteilt in 5 Sektoren) für die Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Temperatur für a) 9. Jänner 13 MEZ, b), 9. Jänner 19 MEZ und c) 10. Jänner 1 MEZ. Bei den Windmessanlagen der ACG sind nur die virtuellen Temperaturen verfügbar (*).

Innenstadt	Windrichtung			Windgeschwindigkeit			Temperatur		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Wien/Innere Stadt	305	235	244	3	1,6	2,7	0,6	1,0	1,7
Wien/Gaudenzdorf	-	-	-	-	-	-	-4,7	0,2	0,9
Wien/AKH-Dach	303	316	291	2,9	2,4	2,8	3,1	4,6	3,4
Arsenal	-	-	-	-	-	-	-2,2	-1,4	-0,9
Wien/Laaer Berg	293	292	283	2,4	1,4	2,2	-	-	-

I Quadrant

Wien/Stammersdorf	279	278	270	1,9	1,3	2,2	-0,3	0,3	0,4
Wien/Donaufeld	319	326	297	2,6	1,6	1,2	-0,4	0,3	0,4

II Quadrant

Wien/Großenzersdorf	308	275	293	3,3	1,5	2,6	-0,1	0,5	0,7
Wien/Kaiserebersdorf	321	277	287	1,3	0,5	1,3	0,5	0,6	1,1
Wien/Unterlaa	306	276	291	4,0	2,2	3,3	-0,8	-0,1	0,5
Wien/Lobau Grundwasserwerk	341	264	294	1,2	0,4	0,7	0,3	0,4	0,7
NÖ/Mannswörth	300	279	281	2,0	0,9	1,9	0,4	0,5	0,8
NÖ/Schwechat Sportplatz	288	257	268	1,0	1,0	1,2	0,3	0,5	1
NÖ/Himberg	330	233	302	1,9	0,5	1,6	0,3	0,7	1
Wien/Schwechat Flughafen	318	277	288	2,9	2,8	2,6	-0,2	-0,2	0,2
WMA11	309	256	270	2,4	1,9	2,2	0,7*	1,8*	2,1*
WMA29	323	282	278	3,9	2,1	2,6	3,0*	3,6*	4,4*
WMA16	322	274	288	2,9	2,7	2,7	0,7*	2,0*	2,2*
WMA34	309	287	289	3,1	2,6	2,7	0,4*	1,0*	1,6*
FMA Main	-	-	-	-	-	-	-0,2	-0,2	0,2
Tower	316	276	281	4,1	2,9	4,3	-1,6	-0,9	-0,3

III Quadrant

NÖ/Vösendorf	304	291	285	2,7	0,8	2,7	0,3	0,5	0,9
NÖ/Mödling	309	275	289	1,1	0,7	0,9	0,4	0,4	0,9
NÖ/Wiener Neudorf	327	26	265	2,9	0,4	0,7	-	-	-
NÖ/Eichkogel	-	-	-	-	-	-	-0,6	-0,4	0,3
NÖ/Brunn am Gebirge	270	209	269	2,4	1,5	2,1	-0,8	-0,4	0,2
NÖ/Biedermannsdorf Mühlgasse	308	102	277	2,1	0,6	0,9	0,6	0,6	0,9

IV Quadrant

Wien/Mariabrunn	279	283	288	2,8	1,3	1,8	-1,3	-0,6	0
Wien/Jubiläumswarte	304	299	283	4,8	3,8	4,3	-2,9	-2,0	-1,4
NÖ/Purkersdorf- Bauhof	236	240	238	0,7	0,6	0,9	-1,3	-0,7	-0,2
Exelberg	-	-	-	-	-	-	-3,0	-1,5	-1,1
Wien/Hermannskogel	-	-	-	-	-	-	-3,0	-1,7	-1,3
Wien/Hohe Warte	301	306	270	1,9	1,2	3,1	-0,1	0,4	0,7
NÖ/Klosterneuburg- Wisentgasse	-	-	262	-	-	1,6	-0,9	0,0	0,5
NÖ/Klosterneuburg- B14	269	292	272	2	0,9	0,8	-0,7	0,4	0,7

7. Conclusio

Für Fragestellungen wie die Ausbreitung von Luftschadstoffen oder die Bildung und Auflösung von Nebel sind die Wind- und Temperaturverhältnisse in der untersten Schicht der Atmosphäre, der atmosphärischen Grenzschicht, und deren Veränderungen relevant.

Wie in der vorliegenden Arbeit gezeigt wurde, sind SODAR-RASS Messsysteme gut geeignet, um insbesondere die Struktur der winterlichen Grenzschicht in hoher vertikaler und zeitlicher Auflösung zu erfassen. Die Höhe der sommerlichen Grenzschicht hingegen wächst nach Sonnenaufgang rasch über den Messhöhenbereich des Systems von typischerweise 600 m hinaus.

Die Radiosonde misst die verschiedenen meteorologischen Parameter vom Bodenniveau bis zur mittleren Stratosphäre und deckt damit den gesamten Höhenbereich auch konvektiver sommerlicher Grenzschichten (etwa 2 km) ab, wird jedoch nur maximal 2 Mal pro Tag gestartet. Die Grenzschicht wird damit von der Radiosonde zwar auch erfasst, jedoch liegt hier, im Gegensatz zum SODAR-RASS, keine kontinuierliche Zeitreihe beispielsweise zur Interpretation von Luftgütedaten oder für die Simulation des Transports und der Verdünnung von Luftschadstoffen vor. Radiosondierungen sind aber neben Satellitendaten nach wie vor als Eingangsdaten für die meteorologischen Wettervorhersagemodelle unumgänglich, da man hier den vertikalen Verlauf der verschiedensten meteorologischen Größen vom Boden bis in große Höhen benötigt.

Die Wind- und Temperaturverhältnisse in Wien und Umgebung werden durch die orographischen Gegebenheiten, durch die Erhebungen des Wienerwaldes und durch das Donautal sowie durch die Bebauungsstruktur und die anthropogenen Einflüsse der Stadt auf das Klima (Bodenreibung und Wärmeinseleffekt) beeinflusst. Wie in dieser Arbeit jedoch gezeigt wird, weisen die Grenzschichtprofile am Standort Wien Hohen Warte und am Flughafen Wien-Schwechat hinsichtlich der Windgeschwindigkeit im Mittel während der untersuchten 3 Wintermonate einen nahezu identen vertikalen Verlauf im gesamten Messbereich des SODARs (rund 500 m ü.G.), wobei das SODAR am Flughafen Schwechat im Mittel 1 bis 2 m/s höhere Windgeschwindigkeiten verzeichnet als die Radiosonde auf der Hohen Warte. In den untersten Messniveaus ist dieses Ergebnis durch die geringere Bodenrauigkeit östlich von Wien gut erklärbar. Bei der Interpretation der Windergebnisse oberhalb von einigen hundert Metern über Grund ist zu berücksichtigen, dass die statistische Aussagekraft der Unterschiede hier durch die seltenen Radiosondentermine und die Abnahme der Datenverfügbarkeit des SODARs mit der Höhe beeinträchtigt ist.

Die Windrichtungsprofile aus Radiosondierungen und SODAR-Messungen stimmen oberhalb von etwa 300 m in den meisten Fällen sehr gut überein. Unterschiede zwischen den Windrichtungen an den beiden Standorten in den tieferen Niveaus sind, wie anhand der beiden Fallstudien für Inversionslagen gezeigt wurde, gut erklär- und interpretierbar.

Durch die Hanglage der Hohen Warte erwärmen sich die bodennahen Schichten schneller als in der Ebene am Flughafen Wien-Schwechat. Nachts bewirken Hangwinde am Wienerwald

eine bessere bodennahe Durchmischung. Im Mittel sind daher die größten Unterschiede zwischen den (virtuellen) Temperaturprofilen an den beiden Standorten in Bodennähe zu finden, wobei sowohl tagsüber als auch nachts im Mittel an der Hohen Warte höhere Temperaturen beobachtet werden als am Flughafen Schwechat. Mit zunehmender Höhe nähern sich die Temperaturprofile einander erwartungsgemäß im Mittel an. Zwischen rund 100m und 400m über Grund sind die RASS-Temperaturen im Mittel etwa 0,5° wärmer als jene der Radiosonde. Oberhalb von 400m gleichen sich die mittleren gemessenen Profile einander an.

Dieses Ergebnis zeigt, dass für Untersuchungen der atmosphärischen Grenzschicht im Großraum Wien die Berücksichtigung der Lage der verfügbaren Profil- und Stationsmessungen aufgrund der räumlichen Variabilität entscheidend ist. Ein entsprechend dichtes und gut gewähltes Stationsmessnetz ist aus diesem Grund für Wien unumgänglich. Für Fragestellungen, welche Höhenbereiche über etwa 500 m über Grund betreffen, können die Radiosondierungen auf der Hohen Warte als für den Raum Wien repräsentativ angesehen werden.

Andererseits bedeuten diese Ergebnisse auch, dass zumindest die Wind- und Temperaturmessungen der obersten Messniveaus des SODARs mit RASS-Erweiterung, das mittlerweile operationell von der ACG am Flughafen Schwechat betrieben wird, als Höheninformation auch auf den Stadtbereich Wiens übertragen werden können und damit auch aus diesem Grund eine wertvolle Ergänzung des meteorologischen Messnetzes im Großraum Wien darstellen.

Literaturverzeichnis

- AMAP Austria. (2011). Von www.austrianmap.at abgerufen
- Auer, I., Böhm, R., & Mohnl, H. (1989). *Klima von Wien*. Wien: Magistrat der Stadt Wien.
- Bergmann, Schäfer. (2001). *Erde und Planeten*. Berlin: Walter de Gruyter.
- Bohn, D. A. (1988). Environmental Effects on the Speed of Sound. *Journal of Audio Engineering Society* .
- Foken, T. (2006). *Angewandte Meteorologie*. Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag.
- Google Earth. (2012). Von earth.google.com abgerufen
- Google Maps. (2012). Von maps.google.at abgerufen
- Häckel, H. (2005). *Meteorologie*. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer Stuttgart.
- Kaiser, A. (1996). *Studie zum Aufbau eines Vertikalprofils für den Raum Wien*. Forschungsprojekt im Auftrag des Magistrats der Stadt Wien. Wien: ZAMG.
- Kraus, H. (2008). *Grundlagen der Grenzschicht-Meteorologie*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- METEK Meteorologische Messtechnik GmbH. (2008). *MERASS The METEK Radio Acoustic Sounding System*.
- METEK Meteorologische Messtechnik GmbH. (2001). *PCS.2000 Benutzer-Handbuch/MF*.
- Piringer, M. (1989). Zum Einfluß mesoskalier Strömungen auf die Bodeninversionsbildung in Wien - Hohe Warte: eine Fallstudie. *Wetter und Leben* 41 , S. 217-233.
- Piringer, M., Baumann, K., & Langer, M. (1996). *Forschungsprojekt Kongex Konvektives Grenzschicht-Experiment*. Wien.
- Roedel, W. (2000). *Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Rubel, F. (2007). *Vorlesungsskriptum Atmosphärische Grenzschicht WS 2007*. Universität Wien.
- Stull, R. B. (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Vaisala. (2012). Von www.vaisala.com abgerufen
- Verein Deutscher Ingenieure. (1994). Bestimmung des vertikalen Windprofils mit Doppler-SODAR-Meßgeräten. In *VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1* (Bde. VDI 3786, Blatt 11). Beuth Verlag GmbH.
- Verein Deutscher Ingenieure. (2009). Bodengebundene Fernmessung der Temperatur. In *VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1b: Umweltmeteorologie* (Bde. VDI 3786, Blatt 18). Beuth Verlag GmbH.

ZAMG. (2012). Von www.zamg.ac.at abgerufen

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Tagesgang der Struktur der atmosphärischen Grenzschicht (Stull, 2000), EZ: Entrainmentschicht (Foken, 2006).....	4
Abbildung 2-2 Logarithmisches Windprofil nach Gleichung 2.1. mit einer Schubspannungsgeschwindigkeit $u_* = 0,2 \text{ m/s}$ für unterschiedliche Rauheitslängen	5
Abbildung 2-3 Hodograph der Ekman-Spirale für eine geographische Breite von 45° ($f = 0,0001 \text{ s}^{-1}$), $K_m = 5 \text{ m}^2/\text{s}$, $u_g = 5 \text{ m/s}$, $v_g \dots$ geostrophischer Wind ($v_g = 0$)	6
Abbildung 3-1 Topographie und Lage von Wien (Google Maps, 2012)	8
Abbildung 3-2 3-Dimensionale Darstellung von Wien und Umgebung (AMAP Austria, 2011) .	9
Abbildung 3-3 Standorte der TAWES Messstationen Wien Hohe Warte, Wien Innere Stadt und Flughafen Wien-Schwechat (Google Maps, 2012)	9
Abbildung 3-4 Relative Häufigkeit des Auftretens von Inversionen in Wien, a) Frühling, b) Sommer, c) Herbst, d) Winter (1951 – 1980) für Wienerwaldtal (Station Mariabrunn, 226m bis 475m, Δ 249m), Stadtzentrum (Station Schottenstift, 176m bis 475m, Δ 299m) und Ebene (Großenzersdorf, 153m bis 475m, Δ 322m) (Auer, Böhm, & Mohnl, 1989)	11
Abbildung 3-5 Windrosen für a) Dezember, b) Jänner, c) Februar im klimatologischen Mittel (1971-2000) (ZAMG, 2012)	13
Abbildung 3-6 Temperaturverlauf der TAWES Stationen Flughafen Wien-Schwechat und Wien Hohe Warte im Dezember 2009.....	14
Abbildung 3-7 Temperaturabweichungen vom langjährigem Mittel (1971-2000) im Dezember 2009 (ZAMG, 2012)	14
Abbildung 3-8 Windrosen für die Stationen Flughafen Wien-Schwechat und Wien Hohe Warte im Dezember 2009	15
Abbildung 3-9 Temperaturverlauf der TAWES Stationen Flughafen Wien-Schwechat und Wien Hohe Warte im Jänner 2010.....	15
Abbildung 3-10 Temperaturabweichungen vom langjährigem Mittel (1971-2000) im Jänner 2010 (ZAMG, 2012)	16
Abbildung 3-11 Windrosen für die Stationen Flughafen Wien-Schwechat und Wien Hohe Warte im Jänner 2010.....	16
Abbildung 3-12 Temperaturverlauf der TAWES Stationen Flughafen Wien-Schwechat und Wien Hohe Warte im Februar 2010.....	17

Abbildung 3-13 Temperaturabweichungen vom langjährigem Mittel (1971-2000) im Februar 2010 (ZAMG, 2012)	17
Abbildung 3-14 Windrosen für die Stationen Flughafen Wien-Schwechat und Wien Hohe Warte im Februar 2010.....	18
Abbildung 4-1 Standort der Messstationen, RASS und Radiosonde (Google Earth, 2012)	20
Abbildung 4-2 Meteorologische Messstationen (rot) am Flughafen Wien-Schwechat und RASS (gelb) (Google Earth, 2012).....	21
Abbildung 4-3 Meridionale Verteilung (Süd-Nord Verteilung) der Seehöhen der meteorologischen Messstationen in Wien und Umgebung	22
Abbildung 4-4 Zonale Verteilung (West-Ost Verteilung) der Seehöhe der meteorologischen Messstationen in Wien und Umgebung	22
Abbildung 4-5 RASS am Flughafen Wien-Schwechat	23
Abbildung 4-6 Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Temperatur (Bohn, 1988)...	25
Abbildung 4-7 Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Luftfeuchtigkeit (Bohn, 1988)	25
Abbildung 4-8 Fehler von TS infolge nicht „exakter“ Konstanten in Gleichung 4.9 für ausgewählte Temperaturen als Funktion von der Luftfeuchtigkeit (Verein Deutscher Ingenieure, 2009)	29
Abbildung 4-9 Bestimmung der Messhöhe der elektromagnetischen Wellen.....	30
Abbildung 4-10 Begrenzung der maximalen Messhöhe durch die Drift der Schallwellen(METEK Meteorologische Messtechnik GmbH, 2008).....	31
Abbildung 5-1 Datenverfügbarkeit der Messwerte vom RASS	38
Abbildung 5-2 mittlerer Tagesgang der Verfügbarkeit der RASS Messungen	39
Abbildung 5-3 Verfügbarkeit der RASS Messungen zum Zeitpunkt der Radiosonden-Aufstiege	40
Abbildung 6-1 Windrose für ausgewählte Höhen des RASS am Flughafen Wien-Schwechat.	43
Abbildung 6-2 a) mittlerer Tagesgang der Windgeschwindigkeit in den untersten Niveaus des RASS, b) mittleres vertikales Profil der Windgeschwindigkeit.....	44
Abbildung 6-3 a) mittlerer Tagesgang der Temperatur in den untersten Niveaus des RASS, b) mittleres vertikales Profil der Temperatur	45
Abbildung 6-4 Windrose für ausgewählte Höhen der Radiosonde Wien Hohe Warte	46
Abbildung 6-5 vertikales Profil der a) Windgeschwindigkeit und b) Temperatur der Radiosonde Wien Hohe Warte	46

Abbildung 6-6 Differenzplot Windrichtung RASS gegen die Differenz Windrichtung RASS - Windrichtung Radiosonde a) gesamter Beobachtungszeitraum b) 13:00 MEZ und c) 1:00 MEZ	48
Abbildung 6-7 Differenzplot Windgeschwindigkeit RASS gegen die Differenz Windgeschwindigkeit RASS – Windgeschwindigkeit Radiosonde a) gesamter Beobachtungszeitraum b) 13:00 MEZ und c) 1:00 MEZ	49
Abbildung 6-8 vertikales Profil der Windgeschwindigkeit vom RASS und der Radiosonde („RASO“) für den gesamten Beobachtungszeitraum, 13 MEZ und 1 MEZ.	50
Abbildung 6-9 Differenz (Windgeschwindigkeit RASS – Windgeschwindigkeit Radiosonde) der vertikalen Profile der Windgeschwindigkeit für den gesamten Beobachtungszeitraum, 13 MEZ und 1 MEZ	50
Abbildung 6-10 Differenzplot Temperatur RASS gegen die Differenz Temperatur RASS – Temperatur Radiosonde a) gesamter Beobachtungszeitraum b) 13:00 MEZ und c) 1:00 MEZ	52
Abbildung 6-11 vertikales Profil der Temperatur vom RASS und der Radiosonde („RASO“) für den gesamten Beobachtungszeitraum, 13 MEZ und 1 MEZ.....	53
Abbildung 6-12 Differenz der vertikalen Profile (Temperatur RASS – Temperatur Radiosonde) der Temperatur für den gesamten Beobachtungszeitraum, 13 MEZ und 1 MEZ	53
Abbildung 6-13 Nachweis des Lee-Effekts der Stadt Wien am Flughafen Wien-Schwechat: vertikale Profile der Temperatur gefiltert nach der vorherrschenden Windrichtung im 50m-Niveau, Nordwest (NW): 290° bis 310°, Südost (SO): 130° bis 140°.	54
Abbildung 6-14 vertikales Profil von BIAS, MAE und RMSE der RASS und Radiosonden Messungen der Windgeschwindigkeit (links) und Temperatur (rechts) für den gesamten Beobachtungszeitraum (oben), 13 MEZ (Mitte) und 1 MEZ (unten)	56
Abbildung 6-15 a) Bodendruckkarte und b) absolute Topographie 500hPa vom 6. Dezember 2009 12 UTC (13 MEZ) (ZAMG, 2012)	57
Abbildung 6-16 Zeit-Höhendiagramm des SODAR Horizontalwindes vom 6. Dezember 2009	58
Abbildung 6-17 Zeit-Höhendiagramm der RASS Temperatur vom 6. Dezember 2009	58
Abbildung 6-18 Vertikale Profile der Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Temperatur für 3 Radiosonden-aufstiegstermine (6.12.09 1 MEZ, 6.12.09 13 MEZ, 7.12.09 1 MEZ)..	60
Abbildung 6-19 Einteilung der meteorologischen Messstationen in Quadranten (Google Earth, 2012).....	61
Abbildung 6-20 Bodendruckkarte (oben) und absolute Topographie 500hPa (unten) vom 9. Jänner 2010 (links) und vom 10. Jänner 2010 (rechts), 12 UTC (13 MEZ) (ZAMG, 2012)	64
Abbildung 6-21 Zeit-Höhendiagramm des SODAR Horizontalwindes vom 9. Jänner 2010 12 MEZ bis 10. Jänner 2010 12 MEZ	65

Abbildung 6-22 Zeit-Höhendiagramm der RASS Temperatur vom 9. Jänner 2010 12 MEZ bis 10. Jänner 2010 12 MEZ.....	65
Abbildung 6-23 Vertikale Profile der Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Temperatur für 3 Radiosondenaufstiegstermine (9.1.10 13 MEZ, 9.1.10 19 MEZ, 10.1.10 1 MEZ).	67

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1 Vergleich der Eigenschaften der Grenzschicht und der freien Atmosphäre (Stull, 1988)	4
Tabelle 3-1 Temperatur (T), mittleres Temperaturmaximum (mTmax), mittleres Temperaturminimum (mTmin), Anzahl der Frosttage (Tagesminimum < 0°C) und Anzahl der Eistage (Tagesmaximum < 0°C) für die Stationen Wien Hohe Warte, Wien Innere Stadt und Flughafen Wien-Schwechat für Dezember, Jänner und Februar im Klimamittel (1971-2000) (ZAMG, 2012).....	10
Tabelle 4-1 Spezifikationen SODAR mit RASS-Erweiterung: Messbereich, Messgenauigkeit, Messhöhen, Sendefrequenz (METEK Meteorologische Messtechnik GmbH, 2001)...	32
Tabelle 4-2 Einstellungen RASS, Flughafen Wien-Schwechat	32
Tabelle 4-3 Spezifikationen der meteorologischen Sensoren und des GPS Sensors der Radiosonde (Vaisala, 2012).....	33
Tabelle 4-4 meteorologische Messstationen im Raum Wien und Umgebung (gg.L.: geographische Länge [°], gg.B.: geographische Breite [°], Höhe: Seehöhe [m], FF: Windgeschwindigkeit, DD: Windrichtung, T: Temperatur, WMA: Windmessenanlage, FMA: Fernmessenanlage).....	35
Tabelle 5-1 Messausfälle RASS	38
Tabelle 5-2 Verfügbarkeit der Windrichtungs-, Windgeschwindigkeits- und Temperaturmessungen der meteorologischen Messstationen	41
Tabelle 6-1 Messungen der meteorologische Messstationen (eingeteilt in 5 Sektoren) für die Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Temperatur für a) 6. Dezember 1 MEZ, b), 6. Dezember 13 MEZ und c) 7. Dezember 1 MEZ. Bei den Windmessenanlagen der ACG sind nur die virtuellen Temperaturen verfügbar (*).	62
Tabelle 6-2 Messungen der meteorologische Messstationen (eingeteilt in 5 Sektoren) für die Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Temperatur für a) 9. Jänner 13 MEZ, b), 9. Jänner 19 MEZ und c) 10. Jänner 1 MEZ. Bei den Windmessenanlagen der ACG sind nur die virtuellen Temperaturen verfügbar (*).	68

Danksagung

Ich danke Professor Steinacker, der mich während meiner Diplomarbeit betreut hat.

Ebenso will ich der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, vor allem der Fachabteilung Umweltmeteorologie, für die tatkräftige Unterstützung in fachlichen und technischen Fragen danken. Besonders möchte ich mich bei Frau Dr. Kathrin Baumann-Stanzer und Herrn Dr. Martin Piringer bedanken, die gemeinsam mit mir das Diplomarbeitsthema ausgearbeitet haben. Weiterer Dank gilt meiner Familie, vor allem meinen Eltern, die mir ermöglicht haben Meteorologie zu studieren und mich immer unterstützt haben.

Lebenslauf

Persönliche Angaben

Name Claudia Flandorfer
Geburtsdatum und -ort 6. Juli 1984, Wien

Ausbildung

1990 – 1994 Volksschule Niederkreuzstetten
1994 – 1998 Hauptschule Wolkersdorf
1998 – 2004 Handelsakademie Mistelbach, Abschluss: Matura
2004 – 2013 Universität Wien, Studienrichtung: Meteorologie

Wissenschaftliche Berufserfahrung

Juli und September 2005: Werkvertragsmitarbeiterin

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, 1190 Wien
Abteilung Klimatologie

Datenerfassung von meteorologischen Zeitreihen

Juli, August 2007 und Februar 2008: Teilzeitangestellte

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, 1190 Wien
Abteilung Umweltmeteorologie

Auswertung von Messdaten und Ausbreitungsrechnungen

März 2008 bis April 2009: freie Dienstnehmerin

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, 1190 Wien
Abteilung Umweltmeteorologie

Auswertung von Messdaten und Ausbreitungsrechnungen

Mai bis Juni 2009: freie Dienstnehmerin

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, 1190 Wien
Abteilung Klimatologie

Erstellen von Bioklimagutachten

Wintersemester 2009 (Oktober 2009 bis Jänner 2010): Tutorin für die Lehrveranstaltung
Wetterbesprechung (advektive Prozesse)

Universität Wien, Institut für Meteorologie und Geophysik, 1090 Wien

seit Juli 2009: Teilzeitangestellte

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, 1190 Wien
Abteilung Umweltmeteorologie

Mitarbeit an Forschungsprojekten (Chemische Wettervorhersage) sowie bei
umweltmeteorologischen Gutachten